

A photograph of several industrial robotic arms in a factory. The arms are white and blue, with some yellow components. They are positioned in a way that suggests they are working on a production line. The background is a bright, blue-lit environment with some blurred lights. The overall scene is futuristic and industrial.

NÜÜDISTOOTMINE

**TAL
TECH**

**TALLINNA
TEHNIKAÜLIKOO**

Koostanud

Tauno Otto

NÜÜDISTOOTMINE

Kõrgkooliõpik

Tallinn 2023

Kõrgkooliõpik on valminud programmi "Eestikeelsed kõrgkooliõpikud 2013–2017" toel



HARIDUS- JA
TEADUSMINISTEERIUM



Koostaja: Tauno Otto

Autorid: Aigar Hermaste, Kristo Karjust, Indrek Kiolein, Rein Küttner, Jaak Lavin, Kaia Lõun, Tarmo Mooste, Invar Naams, Tauno Otto, Meelis Pohlak, Jüri Riives, Martinš Sarkons, Adolf Talkop, Toivo Tähemaa

Keeletoimetaja: Kristel Klesmann

Kujundaja: Tiia Eikholm

Autoriõigus © 2023 Tallinna Tehnikaülikool

ISBN 978-9949-83-949-0 (pdf)

Sisukord

1. Eessõna	11
2. Sissejuhatus	15
3. Integreeritud tootmine	23
3.1 Integratsiooni olemus ja mõiste	23
3.2 Organisatsiooni põhielemendid ja ressursid	26
3.3 Vertikaalne integratsioon ettevõttes	29
3.3.1 Ärijuhtimise tasand (4. tasand)	32
3.3.2 Planeerimise ja kavandamise tasand (3. tasand)	35
3.3.3 Tootmise tasand (2. tasand)	38
3.3.4 Operatiivjuhtimise tasand (1. tasand)	41
3.4 Horisontaalne integratsioon ettevõttes	41
3.4.1 Tootmise teostus	41
3.4.2 Töökoha roll ja koht ettevõttes	45
3.4.3 Juhtimise ja tehnoloogia integratsioon tootmises	48
3.5 Ettevõtte kui süsteem	51
3.5.1 Süsteemide arendus	54
3.5.2 Süsteemide ja protsesside sidusus	56
3.6 Protsessikeskne juhtimine	59
3.6.1 Protsesside olemus ja klassifitseerimine	59
3.6.2 Protsesside ülesehitus, esitus ja juhtimine	61
3.6.3 Äriprotsessid ettevõttes	65
3.7 Eesmärgipärane ja tulemuslik tootmine	68
3.7.1 Protsesside efektiivsus	68
3.7.2 Tulemuslikkuse kujundamine ja mõõtmine	74
3.7.3 Tulemuslikkuse tagamise mudel	78
Ülesanded peatükkidele 1-3	82
Viited	86
4. Tootmissüsteemid. Kavandamine ja kasutamine	90
4.1 Tootmine	90
4.1.1 Tootmistüübid	92
4.1.2 Tootmistasemed	98
4.2 Tootmissüsteemi mõiste ja olemus	101
4.2.1 Tootmissüsteemide põhiliigitus	104
4.2.2 Tootmissüsteemi olemuse kujundamine	105
4.3 Tootmissüsteemid ja nende kasutusvaldkonnad	108
4.3.1 Konventsionaalsed tootmissüsteemid	108
4.3.2 Numbrilise juhtimisega tööpingid	110
4.3.3 Paindautomatiseeritud tootmissüsteemid	113
4.3.4 Masstootmisele orienteeritud tootmissüsteemid	119

4.4 Tootmissüsteemide alamsüsteemid	120
4.4.1 Valmistamissüsteem.....	120
4.4.1.1 Tööpinkide rakised ja toodete paigaldus.....	126
4.4.1.2 Tööriistade majandamissüsteem	131
4.4.2 Transpordi- ladustamissüsteem.....	136
4.4.2.1 Transpordi-laosüsteemi kavandamine	139
4.4.3 Kontrolli- ja mõõtesüsteem	141
4.5 Tootmissüsteemide struktuurivariandid ja nende kasutamistarbeks	146
4.6 Robotid ja robot-tehnilised süsteemid.....	151
4.6.1 Robotiseerimine maailmas	151
4.6.2 Tööstusrobotite olemus ja ehitus	152
4.6.3 Robot-tehnilised süsteemid	161
4.7 Tootmiseseadmete asetusplaanid	167
4.8 Tootmissüsteemide olemusnäitajad	174
4.9 Tootmissüsteemide arendus	180
4.9.1 Kavandamisülesanded ja kavandamisprotsessi koht	180
4.9.2 Kavandamisprotsessi üldolemus süsteemiarenduses	183
4.9.3 Seadmete valiku ülesanne.....	190
4.9.3.1 Tööpinkide valik	190
4.9.3.2 Tööstusrobotite valik.....	192
4.9.4 Tootmissüsteemide edutegurid.....	196
4.10 Tööpinkide arvprogrammjuhtimine	198
4.10.1 Arvprogrammjuhtimine (NC, CNC)	198
4.10.2 Arv-programmjuhtimisega pinkide (CNC) juhtprogrammi koostamine	200
4.10.3 Mõõtmistsükliid CNC pingis.....	216
4.10.4 Interaktiivse programmeerimise näited toimetamise režiimis. Tehnoloogilised tsükliid	219
4.11 Robotiseerimise kasutusnäide: keevitusrobot	224
Kordamisküsimused ja ülesanded	229
Viited	232
5. Töötlemismeetodid.....	236
5.1 Mehaaniline töötlemine.....	236
5.1.1 Treimine.....	240
5.1.2 Freesimine.....	242
5.1.3 Puurimine	243
5.1.4 Avardamine	244
5.1.5 Hõõveldamine ja tõukamine	245
5.1.6 Saagimine.....	246
5.1.7 Kammlõikamine	247
5.1.8 Veejugatöötlus.....	248
5.1.9 Abrasiivveejugatöötlus.....	249
5.2 Metallide keevitamine	250
5.2.1 Keevisliited ja -õmblused	250

5.2.2	Keevitusprotsessid	253
5.2.3	Keevitamise tootlikkuse hindamine ja tootlikkuse parandamine.....	267
5.2.4	Keevitamise automatiseerimine	268
5.2.5	Keevitustehnoloogia arengusuunad	270
5.3.	Plastide töötlemine.....	271
5.3.1	Survealuvormimine	271
5.3.1.1	Abistatud survealuvormimine	273
5.3.1.2	Sisetükiga survealuvormimine.....	274
5.3.2	Puhumisvormimine	274
5.3.2.1	Ekstrusioonpuhumisvormimine	275
5.3.2.2	Puhumissurvevormimine	276
5.3.2.3	Venitus-puhumisvormimine	277
5.3.3	Ekstrusioonvormimine.....	278
5.3.4	Termovormimine	278
5.3.5	Rotatsioonvormimine	279
5.3.6	Sissekastev vormimine	280
5.3.7	Kile puhumine	281
5.4	Lehtmaterjalide töötlemine.....	282
5.4.1	Lõikestantsimine	283
5.4.2	Silelõikestantsimine	286
5.4.3	Lehtmaterjali painutamine.....	288
5.4.4	Lehtmaterjali ääristamine ja tõmbamine	289
5.4.5	Lehtmaterjali stantsimine töötlemiskeskustes	291
5.4.6	Lehtmaterjali lõikamise ja tükeldamise protsessid	291
5.4.6.1	Giljotiinlõikamine	291
5.4.6.2	Gaasileegiga lõikamine (hapniklõikamine).....	292
5.4.6.3	Elektrikaarega lõikamine	292
5.4.6.4	Laseriga lõikamine	292
5.4.6.5	Vesi-abrasiivlõikamine	293
5.4.6.6	Lõikeprotsesside võrdlus.....	293
5.5	Viimistlustehnoloogiad	294
5.5.1	Mehaanilised viimistlustehnoloogiad.....	294
5.5.1.1	Lihvimine (mikroteriklõikamine).....	294
5.5.1.2	Hõõritsemine.....	296
5.5.1.3	Poleerimine	296
5.5.1.4	Plankimine (soveldamine).....	297
5.5.1.5	Hoonimine.....	298
5.5.1.6	Superfinaš.....	299
5.5.1.7	Trummeldamine	300
5.5.1.8	Vibrotöötlus	301
5.5.1.9	Tsentrifugaaltöötlus.....	302
5.5.2	Elektrilised ja keemilised viimistlustehnoloogiad	302
5.5.2.1	Elektroerosioontöötlus.....	302

5.5.2.2	Elektropoleerimine	303
5.5.2.3	Galvaaniline katmine (elektrolüütiline katmine metalliga)	304
5.5.2.4	Elektrokeemiline töötlus	305
5.5.2.5	Keemiline töötlus	306
5.5.2.6	Fotokeemiline töötlus	307
5.5.3	Termitised viimistlustehnoloogiad	308
5.5.3.1	loonkiirtöötlus	308
5.5.3.2	Elektronkiirtöötlus	309
5.5.3.3	Lasertöötlus	310
5.5.3.4	Ultrahelitöötlus	311
5.6	Koostamistehnoloogiad	312
5.6.1	Koostamine.....	312
5.6.2	Koostamisprotsessi planeerimise lähteandmed.....	313
5.6.3	Koostamisega seotud tegevused.....	314
5.6.4	Koostamisoperatsioonide sisu	314
5.6.4.1	Koostamisoperatsioonide järjestus	315
5.6.4.2	Koostamise automatiseeritus.....	317
5.6.5	Enamlevinud liidete liigitus.....	319
5.6.6	Koostamiskeskne projekteerimine	321
5.6.6.1	Põhilised koostamisaega mõjutavad tegurid.....	321
5.6.7	Kokkuvõte.....	323
5.7	Kihtlisandustehnoloogiad.....	323
5.7.1	Põhimõisted.....	323
5.7.1.1	Olemus	324
5.7.1.2	Kihtlisandustehnoloogia üldine tööprotsess	324
5.7.1.3	Eelised.....	325
5.7.1.4	Kihtlisandustehnoloogia ja CNC-lõiketöötlemise erinevused	325
5.7.2	Protsesside kirjeldus.....	328
5.7.2.1	Fotopolümeerisatsiooni protsessid	328
5.7.2.2	Pulbriliitmise protsessid	330
5.7.2.3	Vedelas olekus materjali ekstrusioonil või pihustamisel põhinevad protsessid	331
5.7.2.4	Lehtede lamineerimise protsessid	332
5.7.2.5	Kiirega sadestamise protsessid	332
5.7.3	Tehnoloogiavaliku põhimõtted	333
5.7.4	Projekteerimine, arvestades digitaalse otsevalmistuse eripära	333
5.7.5	Arenguperspektiivid	334
5.8	Värvimistehnoloogiad	335
5.8.1	Korrosiooni olemus ja osatähtsus.....	335
5.8.1.1	Atmosfäärikorrosiooni olemus	335
5.8.1.2	Korrosiooni olemus vees	336
5.8.1.3	Korrosiooni olemus pinnases.....	337
5.8.2	Värvimine korrosioonikaitsemeetodina	337

5.8.2.1 Värvimissüsteemi valik.....	338
5.8.3 Pinnatötlusega arvestamine teraskonstruksioonide projekteerimisel	338
5.8.4 Korrosioonikaitsevärvimise standardid.....	341
5.8.4.1 Standardite tähtsus	341
5.8.4.2 Rahvusvahelised standardid	342
5.8.5 Pinna puhastamine ja eeltöötlemine	346
5.8.6 Korrosioonikaitsevärvimise meetodid ja seadmed	352
5.8.6.1 Pintsliga värvimine	352
5.8.6.2 Rulliga värvimine.....	352
5.8.6.3 Lisaõhuga pihustamine	353
5.8.6.4 Kõrgsurvepihustamine	354
5.8.6.5 Plaadi värvimine.....	357
5.8.6.6 Elektrostaatiline pihustamine	359
5.8.6.7 Pihustamisautomaadid.....	360
5.8.6.8 Värvimisrobotid	361
5.8.6.9 Kastmisvärvimine.....	361
5.8.6.10 Valamistärvimine	362
5.8.6.11 Pulbervärvimine	362
5.8.7 Värvimistingimused.....	362
5.8.8 Värvitüübid	363
5.8.9 Lahustid ja vedeldid	367
5.8.10 Korrosioonikaitsevärvimise kulud ja ökonoomsus.....	368
Kordamisküsimused ja ülesanded	371
Viited.....	373
6. Tootmistehnoloogia.....	376
6.1 Põhimõisted	376
6.1.1 Tehnoloogilisuus	376
6.1.2 Tehnoloogilisuse põhinäitajad.....	376
6.1.3 Toote kvaliteedi näitajad	377
6.1.3.1 Toorikute ja detailide pinnakvaliteet	378
6.2 Detaili valmistamise täpsus.....	379
6.2.1 Töötlemistäpsuse mõiste	379
6.2.2 Tooriku paigaldamine.....	380
6.2.3 Tehnoloogilise süsteemi häälestamisviga	381
6.2.4 Elastsed deformatsioonid lõiketöötlemisel	382
6.2.5 Tööriista kulumine lõiketöötlemisel	384
6.2.6 Soojuslikud deformatsioonid	385
6.2.7 Tööpingi geomeetiline täpsus	385
6.2.8 Lõikuri valmistamise viga	386
6.2.9 Jääkpingetest põhjustatud vead.....	386
6.2.10 Summaarse vea määramine töötlemisel.....	387
6.3 Tehnoloogilise protsessi projekteerimine	388
6.3.1 Projekteerimise eesmärk ja lähteandmed	388

6.3.2	Projekteerimise metoodika ja järjekord	389
6.3.3	Tööjooniste ja tehniliste tingimuste kontroll	390
6.3.4	Tootmistüübi määramine	391
6.3.5	Baaside valik	392
6.3.6	Töötlemismarsruudi projekteerimine.....	395
6.3.7	Töötlemisoperatsioonide projekteerimine	396
6.3.7.1	Töötlemisvarude määramine	397
6.3.7.2	Operatsioonide vahemõõtude määramine.....	398
6.3.7.3	Tehnoloogilise mõõteahela lahendamine	400
6.3.7.4	Lõikerežiimide, aegade ja hinna määramine	404
6.4	Tüüp- ja grupitehnoloogia	408
6.4.1	Grupitehnoloogia	408
6.4.1.1	Detailide klassifitseerimine ja kodeerimine	409
6.4.1.2	Kompleksdetail.....	412
	Kordamisküsimused	413
	Viited	414
7.	Toote andmete haldus ja kasutamine tootmises (PLM, CAD/CAM)	415
7.1	Raalintegreeritud tootmine (CIM).....	415
7.2	Raalprojekteerimine. CAD süsteemid (<i>computer-aided design</i>)	421
7.3	Insenerianalüüsi süsteemid (CAE-süsteemid).....	435
7.4	Arvutipõhine tehnoloogia projekteerimine. (<i>computer-aided process planning, CAPP</i>)	440
7.5	Raalvalmistussüsteemid, CAM-süsteemid	443
7.6	Toote elukaare juhtimise PLM-süsteemid.....	452
	Kordamisküsimused ja ülesanded:	455
	Viited	456
8.	Tootmise planeerimine ja teostus (ERP/MES)	457
8.1	Tootmise planeerimise põhimõtted	457
8.2	Toote tükilehe andmete haldamine planeerimiseks	458
8.3	Optimaalse planeerimise mudeli esitamine	461
8.4	Tootmise planeerimine	462
8.4.1	Nõudluse prognoosimise (<i>demand forecasting</i>) meetodid.....	463
8.4.2	Tooteportfelli optimeerimine	467
8.4.3	Tootmise agregaat- (strateegiline) planeerimine	471
8.5	Ressursside strateegiline planeerimine	475
8.5.1	Füüsiliste ressursside planeerimine.....	476
8.5.2	Inimressursside planeerimine	477
8.6	Tootmisvarude juhtimine	477
8.6.1	Tootmisvarude liigid.....	477
8.6.2	Laovarude juhtimine	481
8.6.3	Laovarude juhtimise meetodid.....	486

8.6.3.1 Majanduslikult otstarbeka tellimuse/valmistamise partii suuruse määramine (<i>economic order quantity</i> , EOQ).....	487
8.6.3.2 Dünaamilised partii suuruse määramise meetodid (<i>dynamic lot sizing</i>).....	487
8.7 Tootmise operatiivne planeerimine. Tootmise ajaplaanide koostamine	488
8.7.1 Detailide töötlemisjärjekorra määramine	489
8.7.2 Ajaplaanide optimeerimise püstitus.....	490
8.8 Tootmise planeerimine tarneahelas	495
8.9 Piirangute teooria.....	499
8.10 Äri- ja tootmisprotsesside planeerimise ja juhtimise süsteemid	501
8.10.1 Äri- ja tootmisprotsesside planeerimise ja juhtimise süsteemide areng	501
8.10.2 Materjalivajaduste planeerimine (MRP) süsteemid ja nende põhilised koostisosad	503
8.10.3 Tootmisressursside planeerimine (MRP II) süsteemid. MRP II süsteemide üldine kirjeldus	505
8.10.4 Ettevõtte ressursside planeerimise süsteemid (äriinfosüsteemid). ERP-süsteemid	506
8.10.5 Tootmise planeerimise arengud, APS-süsteemid	509
8.10.6 Tootmise täitursüsteemid	509
Kordamisküsimused ja ülesanded	511
Viited.....	512
9. Kulusäästliku tootmise meetodid ja tööriistad	513
9.1 Varudeta tootmise (JIT) süsteem	515
9.2 Kanban tootmise juhtimise süsteem	519
9.3 Moodultootegruppidele (tooteperedele) suunatud rakktootmine (<i>cellular manufacturing</i>)	521
9.4 Väärtusahela (väärtusvoo) kaardistamine tootmises	522
9.5 Töövahendite seadistusaegade lühendamine. SMED (<i>single-minute exchange of die</i>)	528
9.6 Erinevate toodete tootmisele orienteeritud tootmissüsteemi kasutamine, (<i>mixed model production</i>).	529
9.7 Töökohtade töötlemisaegade ühtlustamine (<i>work balancing</i>)	530
9.8 Tootmise pidev parendamine. Kaizen.	531
9.9 Vigade vältimine (<i>Poka-Yoke, error proofing</i>)	534
9.10 Seadmete hoolduse korraldamine (<i>total productive maintenance</i>)	535
9.11 Töökoha korrasoleku parandamine (<i>5S workplace organization</i>)	536
9.12 Probleemide lahendamine – 5 MIKS-i (<i>5 whys to explore the cause-and-effect relationship</i>).....	538
9.13 Meeskonnatöö korraldus, 8D (<i>team problem solving, 8D</i>)	539
9.14 Visuaalne kontroll (<i>visual control</i>)	540
9.15 20 võtme programm (<i>20 key program to workplace improvement</i>)	540
Kordamisküsimused ja ülesanded	543
Viited.....	543

10. Kvaliteedijuhtimine	544
10.1 Kvaliteedi mõiste ja roll tänapäeva ettevõttes	544
10.2 Kvaliteedijuhtimine organisatsioonis.....	546
10.3 Juhtimissüsteemide standardid kvaliteedijuhtimise tööriistadena	550
10.3.1 ISO 9000 standardite seerial põhinev kvaliteedijuhtimissüsteem	551
10.3.2 ISO 14001 standardil põhinev keskkonnajuhtimissüsteem.....	555
10.3.3 OHSAS 18001 standardil põhinev töötervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteem.....	557
10.3.4 Muud kvaliteedijuhtimise standardid.....	557
10.3.5 Integreeritud juhtimissüsteemid	558
10.3.6 Juhtimissüsteemide sertifitseerimine	559
10.3.7 Tootestandardid ja CE-märgistus	560
10.4 Terviklik kvaliteedijuhtimine	561
10.5 Kuus sigmat.....	563
10.5.1 DMAIC parendusmudel	564
10.5.2 Rollijaotused kuue sigma rakendamisel.....	566
10.6 Juhtimiskvaliteedi hindamine ja kvaliteedi auhinna mudelid	567
10.6.1 EFQM täiuslikkuse mudel (EFQM <i>excellence model</i>).....	567
10.6.2 Eesti tunnustuskeem Eesti Pärl	568
10.7 Tasakaalus tulemuskaart.....	569
10.8 Süstematiseeritud juhtimissüsteemide juurutamise kasu	569
Kordamisküsimused	571
Viited	572
11. Tootmise arengutrendid	574
Viited	582
Kasutatud terminid	583

1. EESSÕNA

Kõrgkooliõpik „Nüüdistootmine“ on valminud programmi „Eestikeelsed kõrgkooliõpikud 2013–2017“ raames ja orienteeritud põhiliselt tootmise probleemide lahendamisele töötleva tööstuse ettevõtetes. Eesmärk on anda bakalaureuse- ja magistritaseme üliõpilastele teadmiseid nüüdisajal tootmisettevõtetes kasutatavatest tootmise ettevalmistamise peamistest meetoditest ja teooriatest ning nende arengutest, näidata praktiliste näidete abil teooria rakendamist, samuti tuua kasutusnäiteid ja kordamisküsimuste ning ülesannetega aidata kaasa teadmiste kinnistamisele. Õpik on mõeldud kasutamiseks eelkõige e-kõrgkooliõpikuna ja sisaldab viiteid interaktiivsetele allikatele. Kõrgkooliõpikus esinevad eestikeelsed uued terminid on koondatud tootmistehnika ja -süsteemide terminikirjete sõnastikku EKI terminibaasis TERMEKI.

Õpik on valminud TTÜ mehaanika ja tööstustehnika instituudi ja Innovaatiliste Masinaehituslike Tootmissüsteemide Tehnoloogiate Arenduskeskuse IMECC töötajate pikaajalise õppe- ja teadustöös kogutud teadmiste põhjal.

Mis on tootmistehnika ja miks peab seda õppima?

Kokkuvõtvalt võib defineerida, et tootmistehnika on **tehnikateaduse valdkond**, mis analüüsib ja hindab ettevõtete erinevaid tootmispraktikaid, sisaldab projekteerimis-, uurimis- ja arendustöid toodete, tootmissüsteemide, tehnoloogiate, seadmete ja tööabinõude arendamiseks, et toota konkurentsivõimeliselt. Tootmistehnika käsitleb samuti inimese otstarbekat osalemist tootmissüsteemis.

Tootmistehnika meetodeid ja vahendeid kasutatakse kõikides tootmisvaldkondades, et parandada tooteid ja nende valmistamismeetodeid ja vähendada töö maksumust. Meetodeid kasutatakse nii tootmise põhi- kui ka abioperatsioonide parandamiseks, mis teeb töö sooritamise kergemaks, sujuvamaks, realiseeritavaks väiksema kulutuse ning ajaga, vähesema energiatarbe ja keskkonna saastamisega, väiksemate vajalike investeeringutega tooteühikule jms.

Tootmistehnika meetodid koosnevad viiest peamisest valdkonnast:

- 1) tootmise projekteerimine ja planeerimine;
- 2) tootmise uurimine ja analüüs;
- 3) tootmise standardimine;
- 4) tootmise töömahu mõõtmine, töötlemistäpsuse ja kulutuste hindamine;
- 5) tootmise juhtimine.

Tootmise projekteerimine ja planeerimine määrab tootmise kulgemise ajas ning hindab, kui palju aega kulub, et saavutada kavandatud tulemusi ostarbekate kulutustega. Tootmise uurimise ja hindamise käigus selgitatakse tootmise hetkeseis ja mida peaks tegema, et tootmine kulgeks paremini kui seni. Standardimise tulemusena töötatakse välja tüüp- (standard-) töövõtted, mida on soovitatav kasutada. Töömahu mõõtmise tulemusena hinnatakse aega ja

kulusid, mis tuleks planeerida töö teostamiseks. Lõpuks auditeeritakse ja juhitakse tootmisprotsessi, adapteerides parima tulemuse saavutamiseks tootmisprotsesse muutunud tootmistingimustele.

Tootmistehnikas kasutatakse laialdaselt erinevaid operatsioonianalüüsi meetodeid, nagu matemaatilist planeerimist, tõenäosusteooriat ja matemaatilist statistikat; info- ja kommunikatsioonitehnoloogia (IKT) meetodeid ja vahendeid; majandusteadust jt valdkondade meetodeid ning tehnikaid.

Tootmistehnika arendamise peamised eesmärgid on tootmiskulude vähendamine, tootmisüsteemi töökindluse ja tootlikkuse suurendamine.

Nende eesmärkide saavutamiseks on vaja teha neli peamist sammu:

- 1) alternatiivsete ja uute projektilahenduste valik/väljatöötamine;
- 2) andmete kogumine ja analüüs, et hinnata toote täpsust ja kasutatavate materjalide ostarbekust ning parendamise võimalusi, töövahendite ja seadmete seadistamise vajadust ning võimalusi, töötingimusi, tootmisjaoskondade planeeringut jms;
- 3) parima projekti valik ja selle hindamine, kasutades mitmeid kriteeriume, nagu tootlikkus, töötlemistäpsus, süsteemi ressursside kasutus, töökindlus, kulud, kasum jms;
- 4) meetodite rakendamine, tulemuste tutvustamine ja dokumenteerimine.

Tootmistehnika õppimine võimaldab:

- 1) omandada baasteadmised tootmisprotsesside projekteerimisest ja peamistest tehnoloogilistest protsessidest (antud kõrgkooliõpikus põhiliselt masinaehituse ettevõtetes). Teiste valdkondade ettevõtete tehnoloogiliste protsesside kirjeldamiseks tuleb kõrgkooliõpikus toodud materjali täiendada;
- 2) leida võimalusi olemasoleva tootmisüsteemi konkurentsivõime suurendamiseks, planeerides tootmist;
- 3) projekteerida ja realiseerida tehniliselt ja majanduslikult tõhusamaid tootmisüsteeme;
- 4) anda teadmisi ettevõtete ja nende koostöövõrkude tehnoloogilis-organisatoorse koostöö ostarbekaks korraldamiseks ja rakendamiseks.

Õppematerjal käsitleb põhiliselt töötleva tööstuse konkurentsivõime arendamist, arvestades tööstuse arenguid (neljas tööstusrevolutsioon).

Vähemalt 100 töötajaga ettevõtteid on Eestis töötlevas tööstuses üle 200, neis on hõivatud pooled tööstussektori töötajatest. Eestis on tööstussektori osatähtsus lisandväärtuse põhjal peaaegu sama suur kui Euroopa Liidus keskmiselt (ca 15%). Töötlevas tööstuses hõivatute osatähtsus on aga Eestis EL-i riikide seas üks kõrgemaid (ligi viiendik), mis näitab, et mujal suudetakse üldiselt sama arvu töötajatega luua rohkem lisandväärtust. Viimastel aastatel on vahe lisandväärtuse ja hõive osakaalu vahel vähenenud.

Töötlev tööstus tervikuna on Eestis suurim tööandja, peaaegu iga viies töötaja töötab selles valdkonnas. Viimase kümne aastaga on töötajate arv ja osatähtsus kogu majanduses siiski langenud ning tootmise kasvu on toonud tootlikkuse suurenemine [1.1].

Töötleva tööstuse toodang moodustab märkimisväärse osa kogu Eesti majanduses loodavast sisemajanduse koguproduktist, seetõttu on töötleva tööstuse konkurentsivõime suurendamine olulise tähtsusega kogu majanduse arendamiseks.

Kõrgkooliõpiku ulatus

Tootmise arendamine on tihedalt seotud mitme tehnikateaduste valdkonna/probleemiga, nagu tootearendus, tootmissüsteemi projekteerimine, tehnoloogiate arendus, tootmise planeerimine ja juhtimine ettevõttes ning ettevõtete koostöövõrkudes (tarneahelas), tootmises kasutatavate ressursside otstarbekas kasutamine ja arendamine, kvaliteedijuhtimine, uute ärimudelite arendus jm probleemid [1.2].

Tootmistehnika inseneri peamine ülesanne on tootmise arendamine, mis võimaldab otstarbekate kulutustega etteantud ajalimiidi piires toota kvaliteetseid tooteid kavandatud koguses. Nüüdistootmise planeerimisel on oluline roll arvutipõhisel ja matemaatilisel modelleerimisel põhinevate meetodite laialdasel kasutamisel.

On ilmne, et üks piiratud mahuga õppematerjal ei suuda haarata kõiki tootmisega seotud probleeme. Paratamatult tuleb kirjeldatavaid probleeme käsitleda piiratud. Õppematerjali peatükkide juurde on lisatud küsimused kordamiseks ja aruteludeks.

Õppematerjal täiendab raamatuid [1.3–1.4], käsitledes põhjalikumalt tootmise planeerimise ja juhtimise teoreetilisi probleeme, mida peaksid teadma tootmistehnikast bakalaureuse- ja magistritaseme üliõpilased ning mille tundmine on vajalik tootmistehnika eriala bakalaureuse- ning magistritööde koostamiseks.

Materjali valikul ja esitamisel on lähtunud kehtivatest õppeprogrammidest, kusjuures põhjalikumalt käsitletakse valdkondi, mis on rakenduste seisukohalt osutunud kõige olulisemaks. Õpik sobib samuti kasutamiseks teiste töötleva tööstuse valdkondade erialade üliõpilastele (nt mööbli-, rõiva-, elektroonikatööstus jt).

Eesti töötlev tööstus koosneb põhiliselt mikro-, väikestest ja keskmistest ettevõtetest.

Arvestades nende ettevõtete piiratud ressursse, on tootmise konkurentsivõime suurendamiseks majanduslikult küsitav suurte ja kallite arvutipõhiste tootmise planeerimise ja juhtimise süsteemide laialdane kasutamine.

Nende ettevõtete jaoks on oluline nüüdisaegsete meetodite tundmine ja esialgne (piiratud mahu) rakendamine, kasutades lihtsamaid ja odavamaid arvutipõhiseid lähenemisi. Samas tuleb aga teada suurte süsteemide arenguid, et õiges suunas edasi liikuda.

Õpik koosneb järgmistest osadest:

- 1) eessõna (Tauno Otto, Rein Küttner);
- 2) sissejuhatus (Jüri Riives);
- 3) integreeritud tootmine (Jüri Riives);
- 4) tootmissüsteemid. Kavandamine ja kasutamine (Jüri Riives, Rein Küttner, Martinš Sarkans);

- 5) töötlemismeetodid (Kristo Karjust, Invar Naams, Meelis Pohlak, Adolf Talkop, Toivo Tähemaa, Tarmo Mooste);
- 6) tootmistehnoloogia (Aigar Hermaste);
- 7) toote andmete haldus ja kasutamine tootmises (PLM, CAD/CAM) (Rein Küttner, Indrek Kiolein);
- 8) tootmise planeerimine ja teostus (ERP/MES) (Rein Küttner, Jaak Lavin);
- 9) kulusäästliku tootmise meetodid ja tööriistad (R. Küttner, J.Lavin);
- 10) kvaliteedijuhtimine (Kaia Lõun);
- 11) tootmise arengutrendid (Tauno Otto).

Täname autoreid oma kogemuste jagamise eest. Kõrgkooliõpiku sisuarutelud ja kirjutamine võtsid mitu aastat. SA Archimedese eestikeelsete kõrgkooliõpikute programmi toetus võimaldas selle loominguulise protsessi tulemused e-raamatuna välja anda. Terminoloogia arendamisel oli abiks Eesti Rakenduslingvistika Ühingu toetus terminibaasi Termeki abil uute tootmistehnika ja -süsteemide terminikirjete loomisel.

Viited

- [1.1] 2014. aasta majandusülevaade. Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, Rahandusministeerium jt. 2015
- [1.2] Jovane, F., Westkämper, E., Williams, D. The Manufature Road. Springer 2010. Berlin, Heidelberg. 261 lk.
- [1.3] Uuenduslik tootmine. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2011. 446 lk.
- [1.4] Küttner, R., Nüüdistootmise õpetus. Tallinn: TTÜ kirjastus, 2016. 220 lk.

2. SISSEJUHATUS

Tööstus on ühiskonna tootlike jõudude arenemist mõjutav rahvamajandusharu, mille ettevõtted (tehased, kontsernid, kaevandused, elektrijaamad jm) valmistavad töövahendeid nii tööstuse enese kui ka teiste valdkondade jaoks, toodavad tooraineid, materjale, kütust ja energiat ning töötlevad tööstus- ja põllumajandussaadusi.

Riigi töötlevat tööstust iseloomustavad eelkõige alljärgnevad tööstusharud:

- ehitusmaterjalide tootmine;
- elektriseadmete tootmine;
- elektroonika- ja optikaseadmete tootmine;
- kemikaalide ja keemiatoodete tootmine;
- kummi- ja plasttoodete tootmine;
- masinate, seadmete ja metalltoodete tootmine;
- laevaehitus;
- mootorsõidukite tootmine;
- puidutöötlemine ja puittoodete tootmine;
- toiduainete tootmine.

Olulisteks majandusvaldkondadeks on veel:

- energeetika;
- infotehnoloogia ja telekommunikatsioon;
- mäetööstus ja põlevkivikeemia;
- kaitsetööstus;
- tehnoloogilised valdkonnad (biotehnoloogia, nanotehnoloogia, keskkonnatehnika).

Iga riik peab tööstusharude arengustatistikat ja võrdleb nende arengut nii siseriiklikult kui karahvusvaheliselt (vt [Statistikaameti kodulehekülge www.stat.ee](http://www.stat.ee)).

Töötlev tööstus jaguneb EL-is suuruse järgi järgmiselt:

- 93% mikroettevõtted;
- 6% väikeettevõtted;
- ligikaudu 1% keskmise suurusega ettevõtted;
- 0,2% suured ettevõtted.

Keskmiselt töötab EL-is ühes ettevõttes 16 töötajat. Taolises olukorras on arengu võtmeküsimuseks VKE konkurentsivõime suurendamine ja nende efektiivse majandamise tagamine. See tegevus osutub üha keerukamaks, kuna kliendid on toodete suhtes üha nõudlikumad ja seda saab kompenseerida vaid tootmistegevust pidevalt arendades.

Tänapäeva tooteid iseloomustab:

- lühike planeeritud toodete elukaar;
- suur nomenklatuursus;
- väike maksumus;
- suured funktsionaalsed võimalused;
- kõrge töökindlus;
- lihtne käsitlus;
- Meeldiv disain;
- roheline mõtlemine.

Sellega kaasnevalt on tootmistegevuse peamised probleemid ja suunad järgmised:

- tugevnev rahvusvaheline konkurents;
- ületootmine;
- kasvav hinnasurve, katemarginaalide vähenemine;
- ressursside pidev kallinemine;
- toodangu hinnaedu püütakse saavutada toodangumahtude suurendamisega;
- sisemine efektiivsus püütakse saavutada masstootmise põhimõtete kasutamisega;
- igal tasandil vajatakse kõrgtasemega kompetentse, mida tihti napib;
- tehnoloogia areneb pidevalt ning muutub järjest keerulisemaks ja kallimaks.

See kõik muudab ettevõtluse olukorra järjest komplitseeritumaks, erilised väljakutsed esitab aga väike ja keskmise suurusega ettevõtetele, kuna paljudel ei ole piisavalt ressursse innovatsiooniks ja uute toodete arenduseks. Vanaviisi jätkamine ei ole jätkusuutlik. Liikumine kõrgtehnoloogilise tootmise suunas vajab palju teadmisi, ettevõtlikkust ning ka ressursse. Teadmised on tänapäeva infoühiskonnas väga olulised. Et olla edukas, on vaja pidevalt langetada tarku otsuseid. Variante on reeglina palju ja õigete otsuste langetamiseks tuleb alati näha ka laiemat pilti.

Muutused globaalses majanduses, sh ressursside piiratus, klientide nõudluse kasvamine, arenevad tehnoloogiad ja uued ärimudelid määravad suuresti võimalused ja tegevused tootmise arenguks ja kasumi kasvatamiseks.

Tootmisettevõtete arengu üldised eesmärgid on:

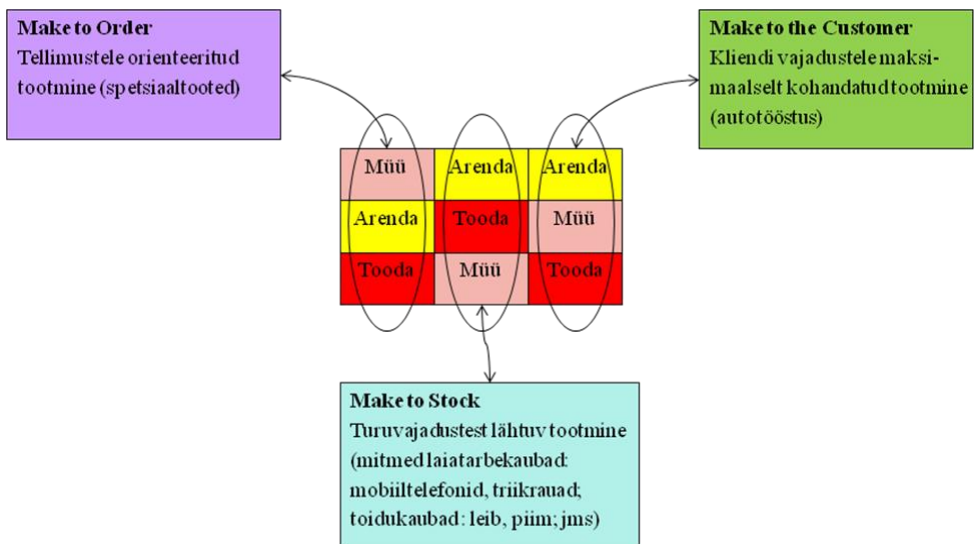
- 1) madalad tootmiskulud (kulusäästlik tootmine);
- 2) kõrge toodete kvaliteet, turul konkurentsivõimeliste ja uuenduslike toodete tootmine;
- 3) klientide soovide rahuldamine, lühike tarneaeg ja suur paindlikkus.

Nende saavutamine on pidev otsingute protsess, sest tootlikkus ja paindlikkus on teatavasti reaalelus vastukäivad mõisted. Paindlikkus eeldab suurt toodete nomenklatuursust ja võimalust neid omavahel asendada ja tuua tootmisprogrammi kiiresti ka täiesti uusi tooteid. Tootlikkus seevastu tähendab kõike hästi kiiresti teha ja kogu kasulik aeg suunata lisandväärtuse andmisele ehk vahetult toote valmistamisele. Ajalooliselt arengud tootmises, mis on esile kutsunud ka tootmise paradigma muutusi, on kajastatud tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Tootmise paradigma arengud

Tootmise paradigma	Masstootmine	CNC ja paindlik tootmine	Kliendile orienteeritud tootmine	Säästlik tootmine
Paradigma muutuse aeg	1913	1980	2000	2020
Ühiskonna vajadus	Odavad tooted	Toodete lai valik , väiksemad seeriad	Tellimustooded	Kulusäästlik ja keskkonnasõbralik tootmine
Turg	Nõudlus > pakkumine	Pakkumine > nõudlus	Turu globaliseerumine, kiirelt muutuv nõudlus	Arvestab keskkonnanõudeid

Iga ettevõtluse alus on äristrateegia ja selle baasil üles ehitatud ärimudel. Äristrateegia määrab ettevõtte suhestuse turuga, kus ta oma tooteid/teenuseid planeerib müüa. Äristrateegia realiseerimise aluseks on ettevõtte põhiprotsesside olemus ja nende toimumise järjestus (vt sele 2.1).



Sele 2.1 Ettevõtte peamised äristrateegiad

Ettevõtte äristrateegia on niivõrd oluline, et kogu tootmise ülesehitus, kasutatavad seadmed ja tehnoloogiad on sellest sõltuvad. Tootmistehnoloogiate, -süsteemide ja tootmise korraldamise meetodite areng on tänapäeval äärmiselt kiire, kusjuures liikumine on kogu aeg suu-

rema paindlikkuse suunas, säilitades sealjuures kõrge tootlikkuse ja tagades toodete kvaliteedi. Tegevuse efektiivsus saavutatakse ressursisäästliku tootmisega, võttes kasutusele uusi ärimudeleid ja arendades välja kontseptuaalselt uusi tehnoloogiaid. Nii need põhimõttelised arengud tööstuses on ikka toimunud, olulisemaid murranguid nimetataksegi **tööstusrevolutsioonideks**. Kõik nad on alguse saanud tehnoloogilistest arengutest ja on põhjustanud olulisi muutusi nii tööstuses kui ka majanduses tervikuna. Nendeks on:

- 1) **tööstus 1.0**, mis algas 19. sajandi keskpaigas, kus märgilise tähtsusega oli aurumasina leiutamine ja kasutuselevõtt tööstuses. See vähendas oluliselt käsitööd ja võimaldas väga paljusi tegevusi mehhaniseerida;
- 2) **tööstus 2.0** sai alguse 20. sajandi esimesel veerandil, mil H. Ford võttis kasutusele automaattootmisliinid autotööstuses ja hakati rakendama masstootmise põhimõtteid. Kujunesid välja sotsiaalmajanduslikud süsteemid: fordism ja taylorism;
- 3) **tööstus 3.0** algas eelmise sajandi 1950.–1960. aastatel, kui toimus küberneetiline revolutsioon mis hoogsalt jätkus 1980. aastate alguses koos raalintegreeritud tootmise (CIM) võidukäiguga. Olulised teetähised sellel teel olid: numbriliselt juhitavate (NC) seadmete arenduse algus (1940.–1950.a); CNC töötlemiskeskuse väljatöötamine ja kasutamine (1959); programmeeritavate loogiliste kontrollrite väljatöötamine (1969); mikroprotsessorid Intel 4040 ja 8080 (1970. aastate alguses) ning universaalsete võimalustega raalprojekteerimise süsteem CADD (McDonnell Douglas 1980. aastate alguses) ja sealt edasi UNIX Workstation Unigraphics, arvutivõrgud, painttootmissüsteemid (FMS) jms;
- 4) **tööstus 4.0** kuulutas välja 7. aprillil 2013. aastal Saksamaa Liidukantsler A. Merkel Hannoveri Rahvusvahelist Tööstusmessi avades. Vastava tööstusrevolutsiooni põhitunnuseks on küber-füüsikalised süsteemid ja asjade internet. Nende realisatsioon koos integreeritud tööstusrakudestega peab andma võimaluse kiiresti ümberkonfigureeritava, intelligentse ja suure tootlikkusega tootmise juurutamiseks. USA-s on vastav initsiatiiv tuntud kui *Smart Manufacturing Leadership Coalition* (<http://smartmanufacturingcoalition.org>).

Viimati nimetatud tööstusrevolutsiooni keskseks kohaks on digitehnoloogiatega, isereguleerivate süsteemide, sensorite, hajusjuhtimise, akumuleeritud teabe ja pilvelahenduste jms integreeritud kasutamine; kombineerides sealjuures tööstusrobotite, erinevate seadmete, automatiseerimisvahendite jms otstarbeka rakendamise. Ka materjalide tehnoloogia, infokommunikatsioonitehnoloogia ja tööstusseadmete areng on esile kutsunud revolutsioonilisi muudatusi, mis annab ettevõtjatele tohutuid võimalusi uute ärimudelite rakendamiseks ning tootmissüsteemide väljaarendamiseks.

Tootmise arengu erinevad etapid sõltuvad olulisel määral tootja ja kliendi suhetest (kliendi kohast) tootmis- ja müügiahelas. Selle kujundamine on ettevõtte äristrateegia ülesanne.

Kuigi käesolev kõrgkooliõpik tugineb **masinatööstuse** eripäradele, on esitatu universaalse iseloomuga ja paljude teemade käsitlused ole vahetult seotud tööstusharu olemusega. Põhitähelepanu on pööratud tootmistehnika kesksetele teemadele. **Tootmistehnika** on kompleksvaldkond, mis on aluseks tootmistegevuse teostamisel ettevõttes. Selle olemus hõlmab nii tehnoloogilisi (tootmistehnoloogiad, töötlemismeetodid, tootmiseseadmed, kvaliteedikontroll jms) kui ka organisatsioonilisi (ärimudelid, tootmise planeerimine, kliendisuhete haldus,

tarneaehelate juhtimine, kulusäästlik tootmine jms) aspekte. Tihti on need sedavõrd integreeritud, et neid vaadeldakse hoopis ühtsete **integreeritud infotehnoloogiliste süsteemidena**, näiteks ettevõtte ressursside haldus (ERP), toote eluea juhtimine (PLM), tootmisprotsesside juhtimine (MPM) jms.

Erinevatele tööstusharudele on iseloomulikud eriliigilised seadmed ja tehnoloogiad, mis on vajalikud teatud otstarbe ja funktsioonidega kliendi vajadusi rahuldavate toodete valmistamiseks. Sõltumata tööstusharust, on tootvale tööstusele iseloomulik, et ettevõttekeskseks osaks on tootmissüsteem, mille toimimise edukus sõltub ühelt poolt vajalike äriprotsesside planeerimis- ja juhtimismeetodite otstarbekast rakendamisest ning teiselt poolt kasutatavate töötlemismeetodite, tootmiseseadmete ja -tehnoloogiate tulemuslikust valikust ja kasutamisest.

Meetodid ja tehnoloogiad sõltuvad suuresti rakendusvaldkondadest. Toote elukaarest lähtuvana on tööstusele iseloomulikud viis peamist rakendusvaldkonda, mis on ka omavahel seotud:

- 1) toormaterjalide töötlemine;
- 2) toodete, sh pooltoodete, detailide valmistamine;
- 3) ettevõtteväline logistika;
- 4) utiliseerimine;
- 5) taaskasutamine.

Toodete valmistamine on kahtlemata üks olulisemaid ühiskonna arengumootoreid. Nii ettevõtte kui ka ühiskonna jätkusuutlikkuse tagab aga tähelepanu pööramine kõigile viiele tootmistegevusega seonduvale probleemvaldkonnale, mis on omavahel tihedalt seotud ja üksteist vastastikku mõjutavad. Kogu ühiskonna heaolu mõjutab otseselt raiskamise vähendamine või elimineerimine, ressursside ratsionaalne kasutamine, keskkonnaohutute materjalide ja protsesside väljatöötamine, eluea lõpetanud toodete utiliseerimine ja taaskasutusse suunamise võimaluste leidmine jms. Töötades välja või võttes kasutusele uusi meetodeid ja tehnoloogiaid, peab mõtlema lisaks nende rakenduse efektiivsusele ka sellele, missugune on nende mõju looduskeskkonnale ja ühiskonnale tervikuna.

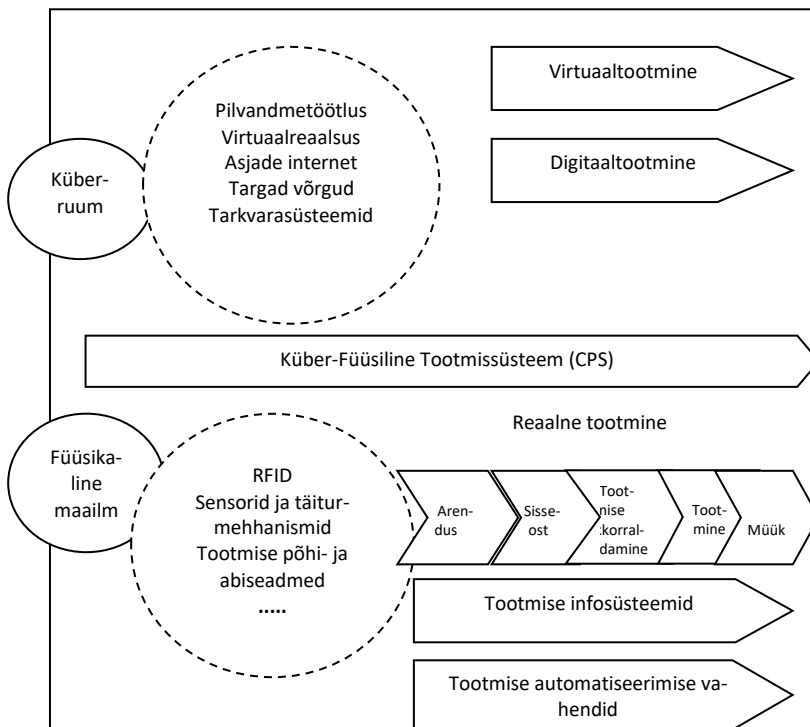
Tootmise arengu üldised eesmärgid on:

- uute tootmise kontseptsioonide, tehnikate ja vahendite arendus, mis tagab paindliku, kergelt ümberkonfigureeritava, teadmistepõhise, keskkonnasõbraliku ja kadudevaba tootmise;
- kiire reageerimine kliendi soovidele, tagades kõrge kvaliteediga toodete majanduslikult otstarbeka (masstootmise oludele vastava) tootmise nõuete tagamise;
- nüüdisaegse tootmistehnoloogia arendamine, uute tootmisstruktuuride väljatöötamine ja kompetentsete töötajate kasutamine annab õige juhtimise korral ettevõttele kindlasti head eeldused tootlikkuse tõstmiseks ja konkurentsivõime tugevdamiseks. Uute tehnoloogiliste lahenduste pakkumine oma partneritele ja võime toota efektiivsemalt võrreldes teistega, on kindlad jätkusuutlikkuse tegurid. Samas on need ülesanded nii tehnoloogiliselt keerukad kui ka piisavalt ressursimahukad ja seetõttu väikestele ja keskmistele ettevõtetele sageli piisavalt komplitseeritud ning ka ületamatud – seda mitte vaid Eestis, vaid terves maailmas. Tööstus 4.0 keskne ärimudel on kujutatud seel 2.2;

- majanduslikuks edukuseks on veelgi enam tarvis inimeste ja organisatsioonide, ettevõtete, teadusasutuste, riiklike tugistruktuuride ja finantsasutuste ühist ja operatiivset tegutsemist.

Jätkusuutlik areng on pidevate muutuste protsess, milles ressursside kasutamise optimeerimine, investeeringute valdkonna määratlemine, tehnoloogilise arengu vektorite defineerimine ja institutsionaalsete muudatuste kavandamine lähtuvad hetkevajadustest, kuid teenivad kooskõlastatult tuleviku arengu kindlustamise vajadusi. Jätkusuutliku tootmise alus on hästi kavandatud ettevõtte toodete ja protsesside olemus ning elukaar, kusjuures paindlikult võetakse arvesse keskkonna majanduslikku, ühiskondlikku ning tehnoloogilist arengut ja vajadusi.

Teadmistepõhine ühiskond on pidevalt arenev. Ühiskonna jätkusuutlikkus põhineb teadmiste loomisel ja kasutamisel ühiskonna tõhusama toimimise ja innovaatilise majanduse suunas liikumise sihis, et tõsta inimeste heaolu.



Sele 2.2 Tööstus 4.0 keskne ärimudel

Teadmistepõhist majandust iseloomustab toodete ja teenuste kõrge lisandväärtus, mis saavutatakse pideva uuendustegevuse kaudu. Uuendustegevus ehk innovatsioon hõlmab nii uute teadussaavutuste kui ka juba olemasolevate teadmiste, oskuste ja tehnoloogiate uudsel moel kasutamist.

Tulevikutehaste kontseptsioone kujundades on tuginetud nii teadmispõhisusele kui ka jätkusuutlikkusele, arvestades et vastavad mudelid on efektiivsemad, tulemuslikumad, aga ka paindlikumad ning kasutavad loodusressursse säästlikumalt.

Euroopa uue arengustrateegia keskselt on välja toodud kolm tulevikutehase (FoF) kontseptsiooni (vt tabel 2.2).

Tabel 2.2 Tulevikutehaste kontseptsioonid

<p><i>SMART FACTORIES</i> (targad tehased)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - energiaefektiivsed ja ressursisäästlikud tehnoloogiad - kiiresti ümberkonfigureeritavad ja adaptiivsed tootmissüsteemid - uued automatiseerimise, protsesside jälgimise ja integreeritud infokommunikatsioonisüsteemid - kulusäästliku tootmise põhimõtted - kontaktivabad sensorite süsteemid - robotite massiline kasutamine
<p><i>VIRTUAL FACTORIES</i> (virtuaaltehased)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - globaalvõrgustikud - tootearenduse (prototüüpide digitaalse kiirvalmistamise) tehnoloogiad - virtuaalmaailma ja reaalmaailma integratsioon - info-kommunikatsioonitehnoloogia ulatuslik kasutamine - diagnostika - uuesti projekteerimine
<p><i>DIGITAL FACTORIES</i> (digitaalsed tehased)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - tootmise-eelsete ülesannete efektiivne ja kiire lahendamine - kontseptuaalne projekteerimine ja simulatsioon - projekteerimise-, planeerimise-, hindamise-, otsuste vastuvõtmise-, teostusekesksete tarkvara süsteemide integreeritud ja oskuslik kasutamine - teadmistel põhinevad platvormid - internetikesksed tarkvarasüsteemid

Ülal esitatud tabelis toodud suundades tuleb liikuda ka Eesti töötleva tööstusel. Samas peab kogu areng olema vajaduspõhine ja arendustegevus nõuab ka vajalikke kompetentse.

Põhimõtteliselt on Eesti masinatööstusel vaid üks jätkusuutlik arengutsenaarium. Eesti masinatööstuse peateeks peab olema odavale hinnale orienteeritud tootmise asendumine nüüdisaegsetele tehnoloogiale orienteeritud kõrgtehnoloogilise tootmisega. Seda ajendavad eelkõige pidevalt kallinevad ressursid (sh tööjõud, energeetika, kommunikatsioonid jms) ja mitmete uute odavtööstuste riikide (nt Hiina, India, Brasiilia) võimas pealetung töötleva tööstuse maailma ning teisalt ka vajadus kuuluda tehnoloogiliste riikide perekonda.

Ettevõtete ärikeskkond muutub väga kiiresti. Uues olukorras traditsioonilised tootearenduse ja tootmise planeerimise ning juhtimise meetodid enam efektiivselt ei tööta. Nende parendamine ja edasiarendused nõuavad laiapõhjalist teadus-arendustööd uute probleemide lahendamiseks. Tulevikutehase (FoF) rahvusvaheline koostööprogramm käsitleb uue põlvkonna tootmistehnoloogiate väljatöötamist erinevatel tasemetel. FoF programm on vahetult seotud EL-i Tehnoloogiaplatformi arendustega. Rahvusvahelisel tasemel on ettevõtetel võimalus liituda Horizon 2020 programmiga, millel on ka mitmeid alamprogramme. Siseriiklikult on Eestis tegutsevate ettevõtete tehnoloogilist arengut edukalt toetanud Ettevõtluse Arendamise Sihtasutus (EAS) oma erinevate tehnoloogiaprogrammide kaudu.

3. INTEGREERITUD TOOTMINE

3.1 Integratsiooni olemus ja mõiste

Integratsioon tähendab koostisosadega kombineerimist millegi terviku saavutamise eesmärgil. Tootmises tähendab integratsioon üksikute allüksuste ja/või tootismoodulite niisugust sidustamist, mis võimaldab lühendada tootmistsükli kestust ning automatiseerida tootmist. Integratsiooni tasemed, lähtudes tootmisseadmetest ja -protsessist on kujutatud vastavalt seledel 3.1 ja 3.2.

		Integreerituse tase →		
Automatiseerituse tase ↓	Automatiseeritud töötlusprotsess	Automatiseeritud tehnoloogiline protsess	Automatiseeritud tootmisprotsess	
	Üheliigilised operatsioonid: - paigaldus - positsioneerimine - tööriistavahetus - mõõtmine	Eriliigilised operatsioonid: - paigaldus - positsioneerimine - tööriistavahetus - mõõtmine - detailivahetus	- Töötlemine: • paigaldus • positsioneerimine • tööriistavahetus • mõõtmine • detailivahetus - Detailide ja tööriistade transport ja ladustamine - Info ja materjalide liikumise juhtimine	
	Tööpink	Töötluskeskus		

Sele 3.1 Tootmisoperatsioonide integratsioon

Integratsiooni on otstarbekas vaadelda vähemalt kolmest aspektist lähtudes:

- 1) erinevate tootmisega seotud alamsüsteemide (valmistamine, transport, ladustamine, kontroll) koostoime ühtse tootmissüsteemi raames;
- 2) erinevate tootmisallüksuste (valmistamine, koostamine jms) integratsioon üheks tervikuks tootmisettevõtte raames;
- 3) tootmise ettevalmistamise ja vahetu tootmise ühendamine ühtsesse arvutivõrku.

Integratsiooniks on ka tootmisoperatsioonide kontsentreerimine ühte tootmisseadmesse kui tervikusse ning selle täiendamine mitmesuguste automatiseerimisvahenditega, mis võimaldavad sellel tootmisel teatava aja vältel iseseisvalt funktsioneerida. Tootmisseadmete ehituses on toodud mõttekäiku kasutatud laialdaste tehnoloogiliste võimalustega seadmete – töötluskeskuste ja paintootmismoodulite – projekteerimisel ja valmistamisel.

Möödunud sajandi 1980. aastate alguses toimusid märgatavad arengud erinevate tootmisega vahetult seotud tegevustes: tootmisprotsessi planeerimine (CAPP), toote projekteerimine ja tootmise teostus (CAD/CAM), toote kvaliteedi tagamise (CAQ) integratsioon, tuginedes vastavatele infotehnoloogilistele süsteemidele. Nii sai alguse **raalintegreeritud tootmine**.

Tootmise integreerimine →					
Automatiseerituse tase ↓	Integreerituse tase 1	Integreerituse tase 2	Integreerituse tase 3	Integreerituse tase 4	Integreerituse tase 5
	Tööpink	Tööpink Laod Transpordivahendid	Tööpink Laod Transpordivahendid Tootmise juhtimine	Tööpink Laod Transpordivahendid Tootmise juhtimine Tootmise planeerimine	Tööpink Laod Transpordivahendid Tootmise juhtimine Tootmise planeerimine Tootmise ettevalmistamine
	Operatsioon				
	Valmistusprotsess				
	Tehnoloogiline marsruut				
	Tootmisprotsess				
	Terviklikult integreeritud tootmine				

Sele 3.2 Tootmisprotsessi integratsiooni tasemed

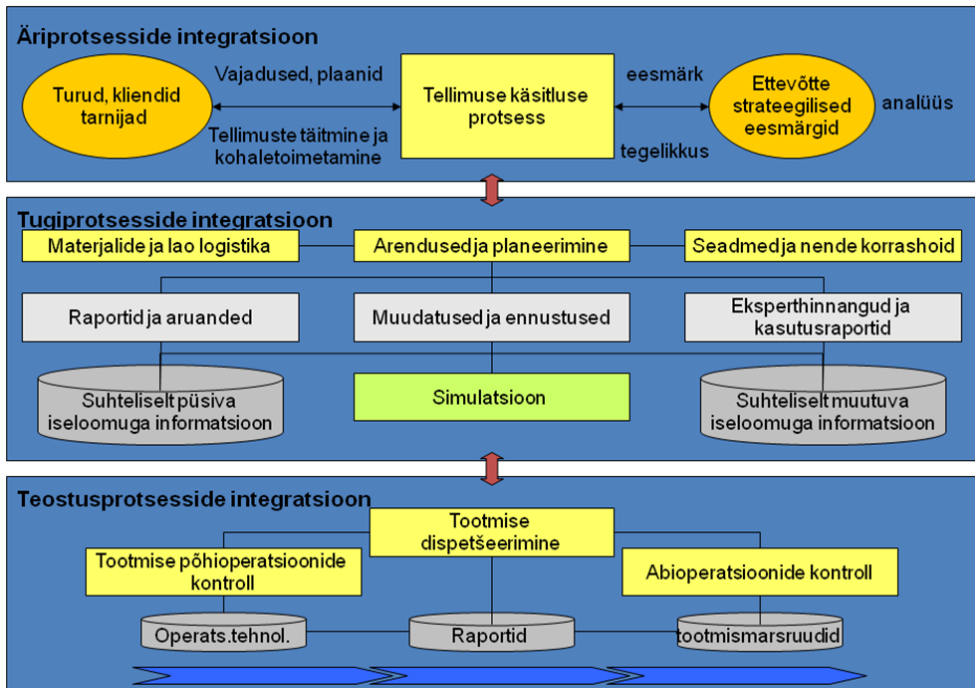
Raalintegreerituks (CIM) nimetatakse tootmist, milles kõik tootmisettevõtte lülid ja tegevused kasutavad infotehnoloogiat (arvuteid, sidetehnikat, automatiseerimisvahendeid) ning on ühtse arvutisüsteemi kaudu integreeritud efektiivselt koos toimivaks tervikuks [3.1].

Raalintegreeritud tootmine seab primaarseks tootmise, mille efektiivsuse suurendamise abinõuks on arvutustehnika ulatuslik rakendamine. Integreerimist mõistetakse antud kontekstis kahest aspektist lähtuvana:

- 1) tootmisega kaasneva info integratsioon tervikuks, mis on kõikide tootmisülilide poolt ühiselt kasutatav, ning
- 2) kõikide tootmisressursside (seadmete, inimeste, materjalide, energia) integreerimine ehk ühendamine ühtse infosüsteemi abil.

Siit johtuvalt toimub tootmisettevõttes nii horisontaalne kui ka vertikaalne integratsioon. Sele 3.1 kajastab horisontaalse integratsiooni võimalusi. **Horisontaalne integratsioon** on peamiselt seotud materjalivoogude juhtimisega toote valmistusprotsessis. Tootmiseseadmed on tootmisüsteemikeskselt integreeritud, et väljatöötatud tootmistehnoloogia alusel läbi viia toote terviklik valmistusprotsess.

Tellimuse teostuseks ja tootmistegevuse korraldamiseks vajatakse suurt hulka eriliigilist informatsiooni ja teavet. Vastavad andmed on selgelt struktureeritud ja kontsentreeritud erinevatele teostustasanditele (vt sele 3.3). Andmevahetus erinevate tasandite vahel ja planeerimise-, inseneri- või analüüsiülesannete lahendamine toimub erinevatel vertikaalsetel tasanditel, mida võimaldab **vertikaalne integratsioon** ettevõttes.



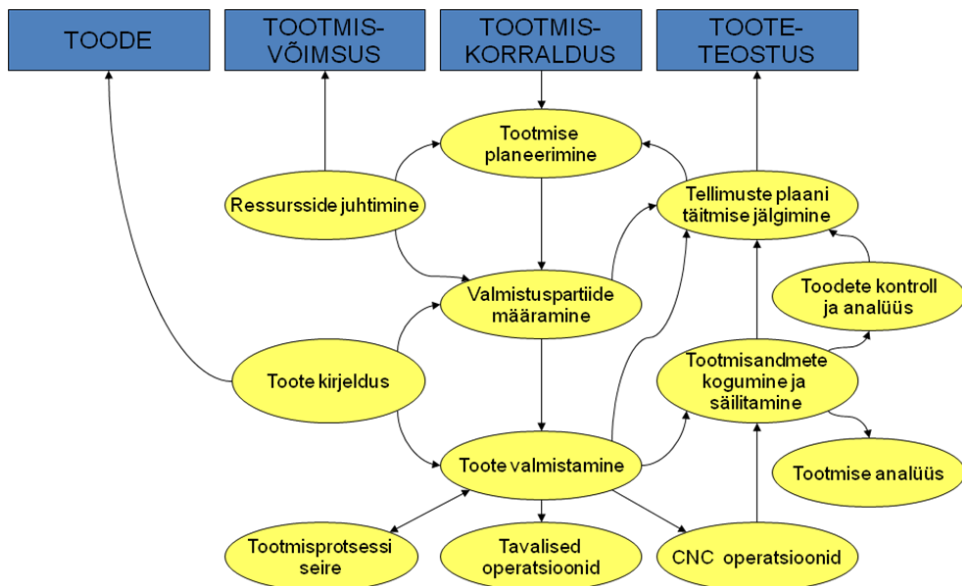
Sele 3.3 Vertikaalne integratsioon ettevõttes

Peamised eesmärkide ja tegevuste poolest erinevad tasemed tellimuste täitmisel ja tootmisetegevuse teostamisel on:

- 1) äritase, mille peaeesmärk on kliendisuhete arendamine ja tootmistellimuste saamine või toodete portfelli kujundamine, lähtudes ettevõtte tegevusstrateegiast ning arvestades olemasolevaid ressursse ja ärilisi võimalusi;
- 2) tootmise ettevalmistuse tase, mis tugineb ettevõtte inseneeria võimekusele ja mille peamine eesmärk on luua tingimused ja eeldused toodete kvaliteetseks ja tulemuslikuks valmistamiseks;
- 3) tootmise tase, kus toimub toodete vahetu valmistamine ning samas toimub ka saavutatud tulemuste analüüs ja vajadusel erinevate korrigeerivate ja ennetavate tegevuste teostamine tulemuslikkuse parandamiseks.

Toodud tasandite realiseerimiseks on vajalik pidev infovahetus nelja olulise atribuudi keskselt: toode, tootmisvõimsus, tootmiskorraldus, tooteteostus (sele 3.4).

Integreeritud tootmise edasiarendusteks on virtuaaltoomine ja e-tootmine, mis realiseeruvad uute ettevõtlusvormide ja -mudelite kaudu [3.2–3.4]. Tootmise nüüdisaegseid arengutrende ja uusi ärimudeleid, seonduvalt neljanda tööstusrevolutsiooniga käsitletakse käesoleva kõrgkooliõpiku 11. peatükis.



Sele 3.4 Infovahetus tootmises

Integratsioon tootmises üha süveneb. Integreeritud tootmissüsteemide realiseerimise peamine mõte seisneb tootmiskulutuste vähendamises, eelkõige tootmistsükli lühendamise ja ressursside otstarbekama kasutamise teel. Tootmine on alati seotud kulutustega. Põhiküsimus seisneb kulutuste efektiivsuses, s.t kuidas tehtud kulutused väljenduvad toote omadustes ja omahinnas.

3.2 Organisatsiooni põhielemendid ja ressursid

Organisatsioon kujutab endast kindla inimrühma terviklikult korrastatud ühendust, mis võimu ja eestvedamise mõjul ning tegevusi kooskõlastades püüavad saavutada ühist eesmärki.

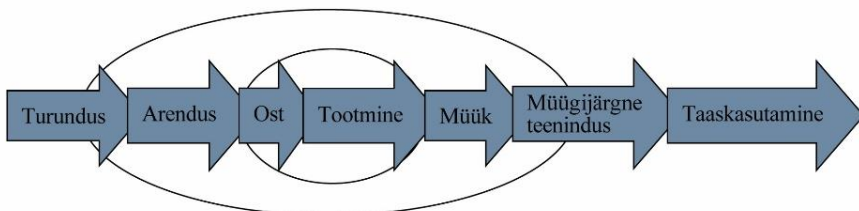
Juhtimine on organisatsioonide või süsteemide funktsioneerimise aluseks. Juhtimisskeemi all mõistetakse kindlaksmääratud toimingute kogumit, mis tugineb saadud informatsioonile, eesmärgiga alal hoida, samuti edendada ja parandada mingi objekti või süsteemi funktsioneerimist. Juhtimisskeemide väljatöötamisel ja kaasajastamisel lähtutakse eelkõige operatiivsuse ja paindlikkuse printsiipidest. Arengu peasuunaks on otsustuste ja vastutuse viimine pidevalt teostusprotsessidele lähemale ning intelligentsete ja iseõppivate organisatsioonide arendus. Organisatsioonist ja juhtimisest annavad hea ülevaate [3.5–3.9].

Organisatsiooni võtmetegurid on:

- 1) **inimesed**, kes kujundavad organisatsioonisisese sotsiaalse süsteemi. Inimeste individuaalsed omadused mõjutavad seda, kuidas jõutakse organisatsiooni eesmärkideni. Inimeste teadmised, oskused ja vilumus ehk kompetents annab eelduse efektiivseks ja tulemuslikuks tööks ning tootlikkuse tõstmiseks;
- 2) **struktuur**, mis kajastab töötajate grupeeritust organisatsioonis ja nendevahelisi seoseid ning kommunikatsioonikanaleid. Struktuur kirjeldab organisatsiooni üksikute osade vahelisi suhteliselt püsivaid seoseid. Inimestevaheline ülesannete jaotus aitab organisatsioonil saavutada oma eesmärgi. Organisatsiooni kui terviku seisukohalt läheb tarvis väga erinevate ülesannete täitjaid. Töötajate rollid organisatsioonis on kirjeldatud ametijuhendites. Struktuuris määratletakse rollid ja rollisuhted vastavalt organisatsiooni eesmärkidele;
- 3) **tehnoloogia** on tootmiseks vajalike masinate, seadmete ja oskuste kogum. Tehnoloogia loob füüsilised ja majanduslikud eeldused organisatsiooni ees seisvate ülesannete täitmiseks. Tööviljakus ja tootlikkus, aga ka teostuste kvaliteet ehk seega ettevõtte konkurentsivõime, sõltub otseselt kasutatava tehnoloogia tasemest. Eduka ettevõtte tunnusjooneks on kõrge automatiseerituse astmega, keskkonnasäästlike ja ohutute tehnoloogiate kasutamine;
- 4) **strateegia** on pikaajaliste eesmärkide ja nende saavutamise põhiteede omavahel seostatud ja üheks tervikuks sulatatud kogum. Selle juurde kuulub kindlasti ettevõtte visioon ja missioon. Strateegia realiseerub mõõdetavate eesmärkide püstitamise ja nende täitmise kontrolli kaudu. Strateegia on pideva parendamise protsessi eestvedajaks.

Iga organisatsiooni **põhiressursideks** on inimesed, seadmed, materjalid ja äriprotsessid. Kõik need on vajalikud organisatsiooni funktsioneerimiseks ja eesmärgipäraseks tegevuseks. Kui ettevõtte eesmärgiks on tootmine ja seeläbi kliendi soovide rahuldamine, siis igas tootvas ettevõttes on tootmistevõime teostuse aluseks olemasolevad tootmisvõimsused, toote kirjeldus, kavandatud tootmisplaan ja saavutatud tootmistulemused (valmistatud tooted ja tegevusnäitajad).

Strateegiad toetuvad äriprotsessidele ja neid viivad ellu inimesed. Äriprotsessid kujundavad ettevõttesiseseid tegevusi ja formeerivad **väärtusahela** (vt sele 3.5), mille abil ettevõtte toodab lisandväärtust.

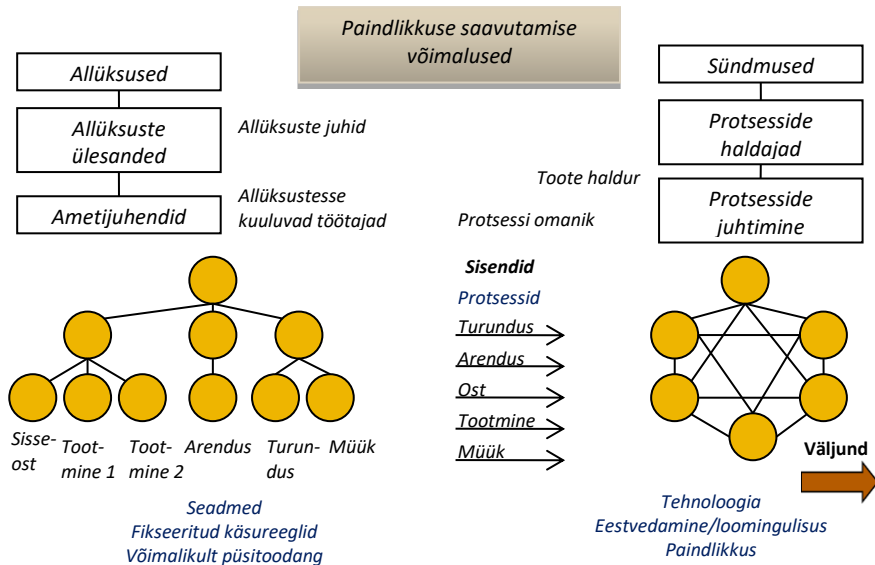


Sele 3.5 Väärtusahela olemus

Ettevõtte loob väärtust tootele, mida ta valmistab. Mida eriliigisemaid töid teostatakse, seda enam väärtust sellele tootele lisandub. Niiviisi räägitakse pikema või lühema väärtusahelaga ettevõtetest. Kui ise toodet ei arendata, on ettevõttes tüüpiliselt realiseeritud kaks väärtusahela lüli: materjalide sisseost ja tootmine. Samas võivad valmistatavad tooted olla lihtsamad või keerukamad. Keerukamate toodete valmistamine nõuab ka suuremaid kompetentse ning komplitseeritumat tehnoloogiat. Sellise toote väärtus turul on kõrgem võrreldes lihtsate toodetega.

Kui ettevõttes arendatakse välja toode või täiendatakse olemasolevat pidevalt, tegeldakse ka valmistatud toodete turustamisega ja organiseeritakse samuti toodete müüjijärgset teenindamist, on tema väärtusahel märksa pikem võrreldes ettevõttega, mille äristrateegia keskendub vaid allhanke töö teostusele kliendi jooniste alusel (vt sele 3.5).

Mida laiem on väärtusahel ja mida enam funktsioone on planeeritud ettevõttes teostada, seda keerulisem on struktuur. Hierarhilised struktuurid tuginevad väga selget väljakujunenud allüksustel, mis omavad teataval ajavahemikul püsivat, fikseeritud olemust (vt sele 3.6).



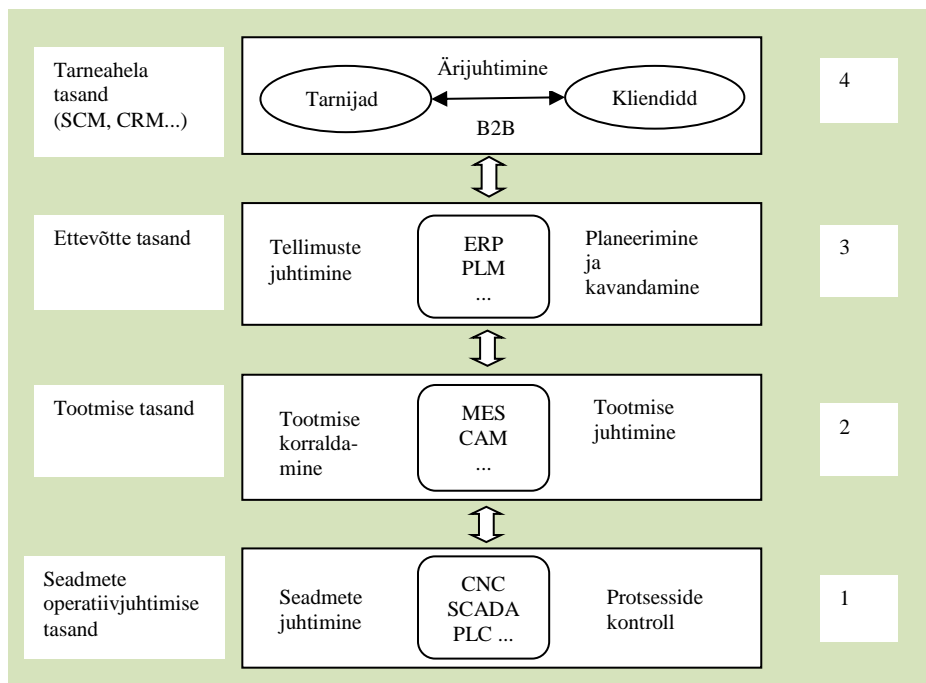
Sele 3.6 Organisatsiooni- (tootmis-) alternatiivid

Nüüdisaegsed väike-, keskmise suurusega ettevõtted (SME) peavad olema võimelised kiiresti kohanduma muutuvate olukordadega tootmises (tootmismahdade, toodete nomenklatuuri, tarnetähtaegade jms). Nende struktuurid peavad olema võimalikult paindlikud. Sellistele vajadustele vastavad kõige enam maatriksstruktuurid [3.10]. Maatriksstruktuuridele on omane suur paindlikkus ja kiire reageerimisvõime turu muutustele ning kliendi soovidele. Maatriksstruktuuride puhul eeldatakse erinevat liiki ülesannete teatavat kattuvust teostusprotsessides. Seetõttu on vajalikud töötajate suuremad ja laialdasemad kompetentsid. Tihti kasutatakse projektijuhtimise põhimõtteid [3.11–3.13] ja iga tellimuse puhul fikseeritakse tootja/või protsessi haldurid (vt sele 3.6), kes siis vastavate toimingute (toote valmistamine algusest lõpuni või konkreetse protsessi juhtimine erinevate toodete puhul) eduka täitmise eest kindlaksmääratud reeglite kohaselt ka vastutavad. Kui paindlikkusele ei ole vaja ülemäära suurt rõhku asetada, on endiselt käibel ka hierarhilised struktuurid, mis tuginevad kindlatele allüksustele ja osakondadele (vt sele 3.6). Hierarhiliste struktuuride puhul on alluvussuhted selgemad, käsuliinid aga pikemad ja teostusajad ning ressursikulud samuti reeglina suuremad. Ettevõtted kasutavad sageli küll hierarhilisi struktuure, aga mitmeid ülesandeid (näiteks tootearendus, tootmistellimuse täitmine või uue jaoskonna projekteerimine jms) täidavad projektijuhtimise meetodeid kasutades.

3.3 Vertikaalne integratsioon ettevõttes

Vertikaalne integratsioon on vajalik, et ettevõtte põhitegevus (tellimuse täitmine) oleks tulemuslik. Tulemuslikkuse põhinäitajaks on tellimuse täitmisele panustatud aja- ja ressursikulu. Vastava tegevuse efektiivsemaks muutmise eesmärgil kasutab eesrindlik ettevõtte mitmeid infotehnoloogilisi süsteeme, mis jaotuvad erinevatele tasemetele. Ettevõttes kasutatavaid süsteeme on palju ja ettevõtte tervikuna ise muutub järjest keerukamaks süsteemiks. Selle edukaks toimimiseks ja pidevaks arenguks töötatakse välja ja täiustatakse sihipäraselt ettevõtet teenindavaid erinevaid funktsionaalsusi täitvaid infotehnoloogilisi süsteeme. Digitaliseerimine on tänapäevase süsteemiarenduse põhiliseks märksõnaks. Tänapäevases käsitluses, vastavalt standardile ANSI/ISA 95.00-xx, on ettevõttes kasutatavad infotehnoloogilised süsteemid traditsiooniliselt paigutatud neljale tasemele (vt sele 3.7). Nendeks tüüpilisteks tasemeteks on:

- 1) ärijuhtimise tasand (B2B);
- 2) planeerimise ja kavandamise tasand;
- 3) tootmise tasand;
- 4) operatiivjuhtimise tasand.



Sele 3.7 Süsteemide hierarhia

Täiendav selgitus seel 3.7 kujutatud integratsioonitasemetest on toodud tabelis 3.1.

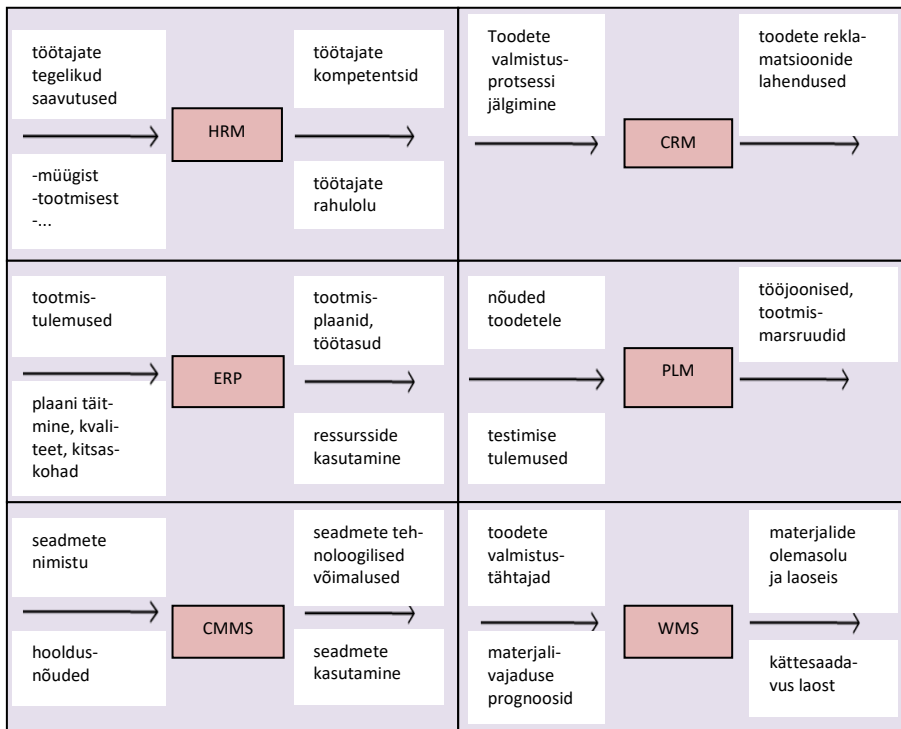
Tabel 3.1 Infotehnoloogiliste süsteemide hierarhia ettevõttes

Tasandi number	Tasandi nimetus	Tasemega seotud süsteemid
4.	Ärijuhtimise tasand	Tarneahela juhtimine (SCM) Kliendihalduse juhtimine (CRM) Töötajate juhtimine (HRM) Täielik kvaliteedijuhtimine (TQM)
3.	Planeerimise ja kavandamise tasand	Toote eluea juhtimine (PLM) Ettevõtte ressursside planeerimine (ERP) Tootmisoperatsioonide juhtimise süsteem (MOMS) Labori info juhtimise süsteem (LIMS) Ladude juhtimise süsteem (WMS) Seadmete hoolduse juhtimise süsteem (CMMS)
2.	Tootmise tasand	Tootmise operatiivjuhtimise süsteem (MES) Raaltootmine (CAM) Automatiseeritud kvaliteedikontroll (CAQ)

1.	Operatiivjuhtimise tasand	Arvjuhtimisega tööpingid (CNC) Vahetu juhtimisega tööpingid (DNC) Paindootmissüsteem (FMS) Tööstusrobotid (IR) Programmeeritavad kontrollid (PLC) Andmete kogumise ja jälgimise süsteem (SCADA)
----	---------------------------	--

Nagu eeltoodust selgub, on ettevõtte omavahel hierarhiliselt ühendatud süsteemide kogumik. Kasutatavate süsteemide arv ja olemus sõltub ettevõtte strateegiast ja võimalustest, aga kahtlemata ka konkreetsetest vajadustest. Kuna konkurents pidevalt suureneb, mis väljendub selgesti tellimuste täitmise aja lühenemises, tarnetäpsuse suurenemises, kvaliteedinäitajate tõus ja teatavates valdkondades (autotööstus, lennundustehnika, meditsiintehnika jms) lausa möödapääsmatuks.

Tootmisülesannete edukas täitmine eeldab pidevat infovahetust erinevate tasandite vahel (vertikaalne integratsioon). Kui erinevad tootmissüsteemi osad: tootmisjaoskonnad, montaažiliinid, töökohad, laod jms on omavahel eesmärgipäraselt ühendatud, siis seda kutsutakse horisontaalseks integratsiooniks (vt ptk 3.1). Et eesmärgipäraselt ja tulemuslikult toota, on vajalik pidev infovahetus erinevate tasandite vahel. Näitena on toodud vertikaalse integratsiooni võimalikud infovahetuse vood tasandite 4–3–2 vahel (vt tabel 3.1):

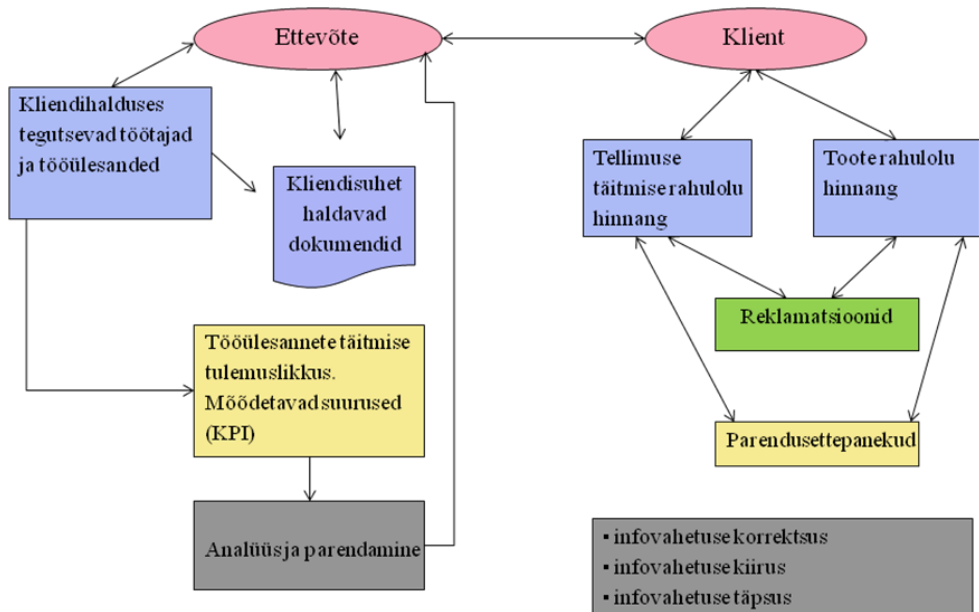


Sele 3.8 Tüüpilised infovahetused digitaalsüsteemide ja integratsiooni tasandite vahel

Kokkuvõtvalt võib öelda, et vertikaalse integratsiooni üks olulisemaid eesmärke on **tellimuse täitmise aja**, s.o aja, mis jääb tellimuse saamise ja toote kliendile kohale toimetamise vahele, minimeerimine. Aja minimeerimisega püütakse minimeerida ka ressursikulu, mis aitab vähendada omahinda. Seda saab saavutada digitaaltehnikate üha laialdasema kasutamisega ettevõtetes. Järgnevalt teeme põgusa ülevaate mõningate olulisemate infotehnoloogiliste süsteemide olemusest ja nende kasutamisevõimalustest ettevõtte erinevatel tasanditel.

3.3.1 Ärijuhtimise tasand (4. tasand)

Neljanda tasandi üldeesmärk on äripartnerlussidemete ja ettevõttele otstarbekate tarneaehelate arendus, kommunikatsioonidemete korraldamine ning andmehalduse kindlustamine ettevõtte ja äripartnerite (tellijad, tarnijad) vahel. Töötajad on iga ettevõtte kõige väärtuslikum vara. Seetõttu töötajate arendus ja motiveerimine (**HRM**) on iga arengule suunatud ettevõtte väga oluline ja pidev tegevusvaldkond. Turundustegevus, klientidega suhtlemine, pakumiste esitamine, kliendisuhete haldamine ja tellimuste käsitlemine on samuti ülemise ehk neljanda tasandi põhitegevusteks. **Kliendisuhete haldus (CRM)** ja **tarneaehelate juhtimine (SCM)** on antud tasandi põhilised tugisüsteemid. Kliendisuhete halduse tüüpiline olemuskeem nii ettevõttepoolset kui ka kliendikeskselt on kujutatud seel 3.9.



Sele 3.9 Kliendisuhete halduse olemuskeem

Kliendisuhete haldus on meetodite ja vahendite kogum, mida ettevõtte interneti vahendusel kasutavad pidevaks suhtluseks klientidega põhieesmärgiga jõuda pakkumistest tellimusteni ja tellimuste täitmisest kliendi rahuloluni. Eesmärgiks on kulutada tellimuseni jõudmiseks minimaalselt aega, olla suhtluses kliendiga korrektne ning hallata reaalajas kogu vajalikku informatsiooni. Edukuse põhikriteeriumiks on võidetud pakkumiste arv. Kliendisuhete halduse põhimõtteid saab täpsemalt lugeda kirjanduse [3.13, 3.14] vahendusel.

Kliendisuhete halduse juurde kuulub nelja liiki tegevusi:

- 1) eesliini tegevused – vahetu side klientidega vastavalt kokkulepitud formaatidele. Oluline on suhtluse korrektsus, kiirus ja täpsus;
- 2) kontorikesksed tegevused – eesliini tegevusi toetavad ja kindlustavad tegevused, näiteks omahinna arvutused, ülevaade vabade ressursside olemasolust, tootmiskogemuste analüüs, vajalike kompetentside olemasolu kontroll, tähelepanu juhtimine kliendi spetsiaalnouetele jms. Oluline on info täpsus ja kiire kättesaadavus;
- 3) ärisuhete arendus on pidev ettevõttepoolne tegevus, mille eesmärgiks on saavutada parem vastastikune arusaam äriprotsesside olemusest juba olemasolevate klientidega ning samuti püüda jõuda uute klientideni. Vastavad proportsioonid kujundavad äristrateegia. Ärisuhete arenduse juures on tüüpiline klientide kategoriseerimine (võtmekliendid, pikaajalised kliendid, strateegilised kliendid, tavakliendid) ja vastavate turundusstrateegiatega väljatöötamine. Ärisuhete arendus on turundusvaldkonna tegevus, mida vajaduse korral toetab ettevõtte juhtkond. Turundusstrateegia ja -protsessi tulemusprogramm on vastava valdkonna võimalikeks ettevõttesisesteks dokumentideks;
- 4) analüüs, statistika. Äris etendavad üha suuremat osakaalu teadmised. Need tekivad konkreetsete andmete ja vastava informatsiooni töötlemise tagajärjel. Seega andmetöötlus ja statistiliste tulemite esiletoomine on iga ettevõtte tulemuslikkuse hindamisel väga olulise tähtsusega. Analüüsi alusel tehakse korrekture (vajaduse korral) ja püütakse edasistes tegevustes veelgi tulemuslikum olla.

Kliendisuhete haldus on ettevõtte praeguste ja tulevaste klientide suhete haldamise mudel, kus tehnoloogilisi lahendusi on kasutatud müügi, turunduse, hoolduse ja tehnilise toe automatiseerimiseks, organiseerimiseks ja sünkroniseerimiseks [3.14].

Kliendisuhete halduse kui äristrateegia kasutamine, aitab ettevõttel oma kasumlikkust tõsta, asetades klientide vajadused tähelepanu keskpunkti. CRM-lahendusest saadav kasu vastab otseselt sellele, mil määral ettevõtte seda ära oskab kasutada. Ettevõttel on tähtis välja arendada oma valdkonnakeskne mõõdikute süsteem. Traditsioonilised suhtarvud on:

- võidetud pakkumiste suhe tehtud pakkumistesse;
- tellimuste kasumlikkus ettevõttele (ressursi kulu suhe müügitulusse);
- võtmeklientide suhe klientide üldarvu;
- tellimuse võitmiseks kulunud aja suhe tellimuse täitmise kestusse;
- tootmise ettevalmistuse aja suhe tootmistsükli aega.

Tänapäevase kliendihalduse lahenduse eesmärk on siduda kliendisuhete traditsiooniline osa (Tellija – Täitja) tellimuse täitmist tagava orgaanilise osaga (Täitja – Tarnija) [3.14].

Kliendisuhete halduse põhimõisted on alljärgnevad:

Tellija – tootja, allhankija, vahendaja, kes tellib toote, detaili, teenuse. Üldjoontes on tegemist juriidilise isikuga (ettevõttega).

Tellimus – kliendipoolne soov saada ettenähtud tehnilistele tingimustele vastav toode kindlaksmääratud tingimustes kokkulepitud ajal.

Tootmistellimus – dokument, konkreetse koguse toodete või detailide valmistamiseks (tootmiseks) või teenuse osutamiseks fikseeritud tingimustel. Tootmistellimust kasutatakse konkreetse töö sooritamiseks ettevõtteväliselt või -sisiselt.

Tarnija/Pakkuja – tootja, allhankija, vahendaja, kes vastab kliendi tellimusele või tootmistellimusele ja koostab hinnapakumise.

Hinnaküsimine – hinnapäring, mille põhjal Tellija soovib saada hinnapakumist.

Niisiis peab kliendisuhete haldus ettevõtte jaoks kindlustama operatiivse suhtluse oma klientidega vastavalt ettevõttes väljatöötatud turundusstrateegiast lähtuvalt. Selle tasandi märksõnaks on äriit äri (B2B). Äri edukus lähtub:

- infovahetuse korrektsusest;
- infovahetuse kiirusest;
- infovahetuse täpsusest.

Ettevõtte peab oma struktuure ja protsesse kujundades eeltoodut silmas pidama ja seda arvestama. Äritasandi infovahetuse mõningad väljakutsed on toodud alljärgnevalt:

- 1) klientide soovide ja nõudmiste keskse informatsiooni kogumine, säilitamine ja analüüs;
- 2) klientide tagasiside informatsiooni kogumine, säilitamine ja analüüs;
- 3) reklamatsioonide olemuse ja nende lahendamist puudutava informatsiooni kogumine, säilitamine ja analüüs;
- 4) pakumiste koostamise protsessi oluliste mõjutegurite kogumine, säilitamine ja analüüs;
- 5) pakumiste edu/ebaedu väljendava informatsiooni kogumine, säilitamine ja analüüs;
- 6) koostööpartnerite vastutulelikkuse, suutlikkuse, hinnataseme, tarnetäpsuse ja kvaliteedi andmete kogumine ja tulemuste analüüs;
- 7) toodete omahinna ja saavutatud kasumimarginaalide kogumine ja analüüs.

Üks ettevõtete peamisi eesmärke on oma positsiooni tugevdamine nii kodu- kui ka välisurul. Globaalne infotehnoloogia võidukäik on suurel määral muutnud tarneprotsesside olemust ja dünaamikat. Samuti on see muutnud intensiivsemaks ettevõtte ja tellija vahelised suhted. Tellija nõudlus tarnekiiruse ja täpsuse osas on plahvatuslikult kasvanud, mis esitab väljakutse tarnijale, kes peab suutma muutunud oludega sammu pidada, et konkurentsipüüa.

Lisaks eeltoodule on oluliselt keerukamaks muutunud toodete valmistustehnoloogiad. Tänapäeval pole enam mõeldav ega ka finantsiliselt otstarbekas kogu toodet algusest lõpuni ise valmistada. Oluliselt mõistlikum ja odavam on luua püsivad koostöösuhted tarnijatega, jättes tuumkompetentsi enda teada. Selliselt kujunevadki välja tarneahelad ja koostöövõrgustikud, mis näiteks lennuki- või autotööstuses on globaalset mõõtu.

Tarneahela mõiste ja selle juhtimisega seonduvate tegevustega hakati tegelema 1980. aastatel, kuna organisatsioonide ja nende vaheline suutlikkus koordineerida omavahelisi tegevusi oli ammendunud. Ühte tarneahelasse kuuluvad ettevõtted tegid samu tegevusi (varude juhtimine, informatsiooni juhtimine, turu-uuringud, informatsiooni haldamine jne), kuid samal ajal ei olnud ühelgi ettevõttel süsteemset käsitlust kogu tarneprotsessist. Kogu tarneahela süsteem oli äärmiselt aeglane reageerimaks turu muutustele [3.15].

Tarneahel on ettevõtluse protsesside integratsioon lõpptarbijast kuni tarneahela alguseni (tarnijani), et tagada toodete, teenuste ja informatsiooni väärtuseline kasulikkus kliendi ja/või aktsionäri juures [3.15, 3.16].

Tarneahel algab toormaterjali hankimisega ja ei lõpe mitte tarbimisega, vaid kätkeb ka jäätmemajandust, mis suunab kasutu materjali tagasi jäätmekäitlusse. Selline laiahaardelisem käsitlus on üks peamisi erinevusi tänapäeva tarneahela juhtimise ja logistikakäsitluse vahel [3.16].

Tarneahela juhtimise juures on oluline tagada nii tarnekiirus kui ka tarne täpsus. Samas püütakse kulude vähendamiseks laoseise igati minimeerida ja toote omahinna alandamise eesmärgil võimalikult palju toote juurde kuuluvat sisse osta minimaalse maksumusega. Praktiliselt teostuseks kasutatakse erinevaid planeerimise tehnikaid, mis võimaldavad ajaliselt prognoosida vajalikud tarned ja optimeerida laoseise ning toodete valmistamise koguseid [3.17, 3.18].

Põhiline info, mida tuleb ja on vajalik 4. tasandil hallata:

- äripartnerite andmed (sh tellijad ja tarnijad);
- tellimused, lepingud;
- töötajad (isikuandmed, karjääriandmed, kompetentsus ja koolitused);
- ressursid (seadmed ja nende tehnoloogilised võimalused; hoonestus ja kommunikatsioonid jms);
- ressursside koormatus (inimeste ja seadmete kättesaadavus ajalisel perspektiivis);
- laoseisud (materjalide, komponentide, valmistoodete osas);
- ressursikulukus (seadmete töötunni maksumused, energiakulukus, transpordi maksumus jms);
- finants- ja juhtimisandmed.

3.3.2 Planeerimise ja kavandamise tasand (3. tasand)

Selle tasandi keskne objekt on **toode**. Masinaehituses nimetatakse tooteks masinaehitustööstuse lõpliku staadiumi produkti. Tooteks võib olla koostatud masin, sõlm või detail, olenevalt sellest, mis on antud tööstusettevõtte tootmise lõpliku staadiumi objektiks. Igal tootel on oma teenistuslik otstarve, mis määrab nii selle toote individuaalsed omadused kui ka mõjud ja vastumõjud teiste toodetega kooseksisteerimisel ühtses süsteemis.

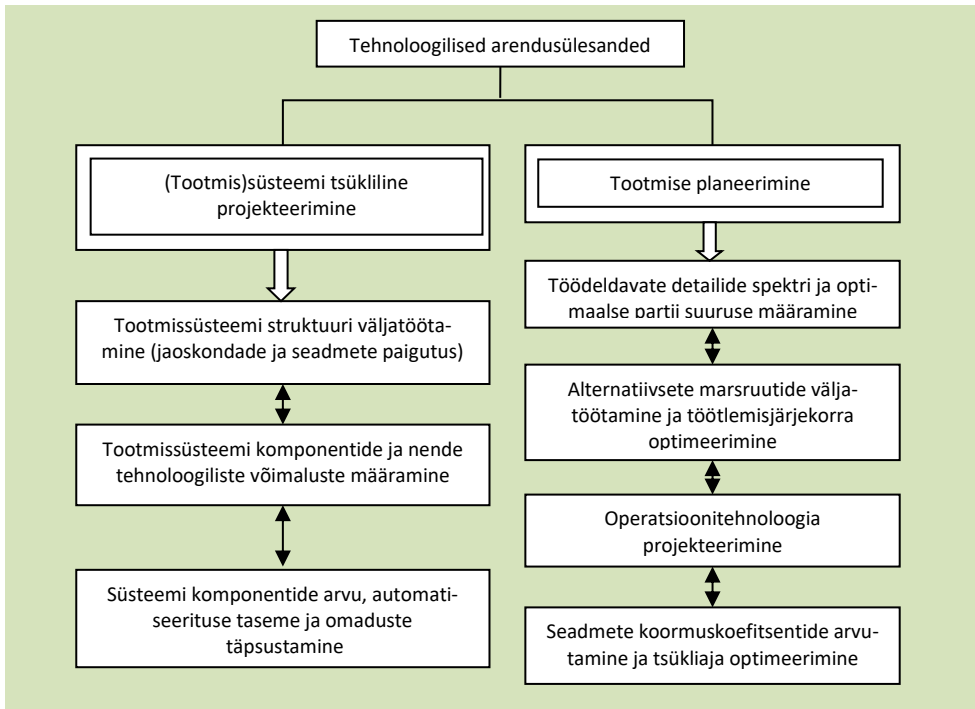
Toote iseloomustamiseks on tema kirjeldus. Toode on defineeritav funktsionaalselt, geomeetriliselt, aga ka valmistusprotsessist või olemuslikust seisukohast lähtudes. Mida täpse-

malt on toode defineeritud või kirjeldatud, seda tõenäosem on valmistusprotsessi resultaadina saada oodatud objekt, mis täidab täpselt talle esitatud teenustuslikke ülesandeid. Kõige üldisem on funktsionaalne definitsioon. Sel juhul kirjeldatakse vaid toote laadi, otstarvet, ehitust vms. Toote geomeetrilise esitusviisi puhul sidustatakse omavahel toote pinnad, kontuurid, servad ja punktid ning nad viiakse ühtsesse mõõtude ja taustsüsteemi. Toodete defineerimist ja dokumenteerimist kajastavad standardid ISO 128, ISO 13567, ISO 16792 [3.20].

Nüüdisaegsed raalprojekteerimise süsteemid (**CAD**) võimaldavad genereerida toodetest täiuslikke ruumilisi (3D) mudeleid. Geomeetrilise kirjelduse puhul esitatakse lisaks nominaalmõõtmetele tavaliselt ka võimalikud mõõdu-, kuju- ning asendihälbed ja pinnakvaliteedi parameetrid. Niiviisi saadakse toote geomeetiline või projekteerimismudel. Valmistusmudel kirjeldab toote valmistusprotsessi ja automatiseeritud projekteerimissüsteeme kasutades on selleks **CAM** [3.19–3.22] (põhjalikumalt vaata 7. ptk).

Tänapäeva tootmisettevõtte pole kinnine süsteem, mis elab suletud keskkonnas oma reeglitejärgset elu, vaid on pidevas muutumises, et püsida konkurentsist. Kui veel aastakümneid tagasi oli toote elukaar üsna pikk ning piisas, kui eelkäija õpetas järeltulijale töövõtteid ja andis vajalikku infot. Tänapäeva tootearenduse ja tootmistempo juures ning konkurentsi ja globaliseerumise taustal ei ole süsteemitu ja intuiitivne lähenemine enam jätkusuutlik. Samuti on konkurentsist tingitud spetsialiseerumine sundinud kõiki komponente ise valmistavaid tootmisettevõtteid vaatama allhanke korras säästlikumalt sarnaseid detaile valmistavate ettevõtete poole ning sarnaselt konkurentidega pühendumata omaenda tugevamate külgede arendamisele. Allhanke korras aga korraldama enda jaoks vähemolulisi tööprotsesse, aga ka tööprotsesse, kus puudub piisav kompetents. Sellise ettevõtetevahelise koostöövõrgustiku hea toimimise üheks alustalaks on aga hästi toimiv ettevõttesisene ja ettevõtete vahel integreeritud toimiv infotehnoloogiline süsteem. Tänapäeval on enamikel juhtudel selleks **Ettevõtte Ressursside Planeerimise (ERP)** süsteemid (vt täpsemalt 8. ptk). Lisaks ERP-süsteemides pakutavatele võimalustele on ettevõtetel sageli vaja põhjalikumalt jooniste teostuse (CAD), seadmete töötlusprogrammide koostamise (CAM), koostu osade loetelulehtedele ehk tükitabelite koostamise (**BOM**), tootmisprotsesside kirjelduse, toote muudatuste halduse, tootmisvigade seire jms tuge pakkuvaid lahendusi. Ehk siis **toote andmete halduse (PDM)** või **toote eluea juhtimise (PLM)** süsteemide kasutamist integreerituna vastavate CAD/CAM- süsteemidega. Nendest on pikemalt kirjutatud 7. peatükis.

Kavandamine ja planeerimine hõlmab kogu ettevõtet. Süsteemide arendus peab toimuma käsikäes ja integreeritult. Teataval perioodidel keskendutakse enam ettevõtte tehnoloogilisele arendusele (uued tehnoloogiad ja seadmed), siis jällegi organisatsiooniliste meetmete arendusele (kvaliteedijuhtimine, kulusäästliku tootmise meetodid, kuue sigma meetod jms). Tootmise insenerliku arenduse peamised ülesanded on kujutatud seel 3.10. Need ülesanded on jagatud kahe olulise liini vahel: tootmissüsteemi arendus (füüsiline keskkond ja tootmistehnoloogiad, vt 6. ptk) ja tootmise planeerimine ning kulusäästlik tootmine (vt 9. ptk). Nagu eelnevalt öeldud, on mõlemad arenduse liinid ettevõttele väga olulised ja nende dünaamiline arendus annab konkurentsielise, vaeleinvestitud aga viivad reeglina ettevõtte keerulistes olukordadesse – tootlikkuse langus, suutmatus valmistada turule vajalikke tooteid, probleemid kvaliteedi tagamise ja kindlustamisega.



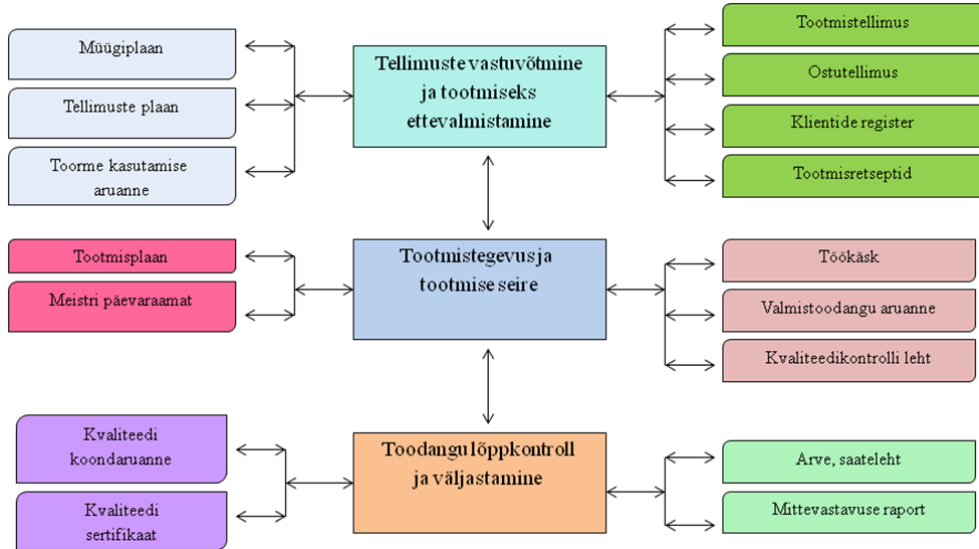
Sele 3.10 Tootmise tehnoloogilised arendusülesanded

Tootmise tulemuslikkusele laotakse alus just sellel tasandil. Toote arendus, toote andmete haldus, tootmise planeerimine, ressursside operatiivne haldamine ja kasutamistotstarbekus – need on põhiülesanded, mida antud tasandil lahendatakse. Toote tehnoloogilisusest sõltub tema valmistamise keerukus või lihtsus. Toote konstruktsioon loob aluse nii toote funktsionaalsusele kui ka hinnale. Valmistamise maksumus sõltub juba suuresti kasutatavatest töötlemismeetoditest ja ressursisäästlikkusest. Tarnetäpsus sõltub planeerimisest. Kvaliteedi peab tagama valitud tehnoloogia. Seetõttu ka vajalik informatsioon on komplitseeritud, mitmekülgne ja peamiselt seotud nii toodete projekteerimise kui ka tootmisvõimaluste kavandamisega:

- toote andmete haldus ja juhtimine;
- laoseisud ja kaupade hoiustamise dünaamika;
- ressursside optimaalne kasutamine;
- alternatiivsed tehnoloogiad ja töötlemisvõimalused;
- toodete valmistamise tehnoloogiad ja juhtimisprogrammid;
- mõõte- ja kontrollitehnoloogiad;
- seadmete korrashoiu tagamise korraldamine;
- ettevõttesisene ja -väline logistika.

3.3.3 Tootmise tasand (2. tasand)

Tootmiskeskne informatsioon on mitmekülgne ja pidevalt muutuv (sele 3.11). Selle informatsiooni õigeaegne kättesaadavus, töötlemise kvaliteetsus, otsuste õigeaegsus ja adekvaatsus ning erinevate osapooltega pideva suhtluse realiseerimine, on lähtealused tulemuslikkuse saavutamiseks tootmiskeskonnas.



Sele 3.11 Tootmiskeskse info olemus

Selel 3.11 on toodud tootmiskeskse info näide ühe ettevõtte põhjal. Erinevatel tootmisettevõtetel võib erineva tootmisprogrammi puhul vastav skeem (sele 3.11) vähemal või suuremal määral olla erinev. Üldpõhimõtted aga jäävad samaks. Tootmiskeskne info peab olema täiuslik ja kõikehõlmav. Siit tuleneb ka tootmise keskne roll tootmisettevõttes. Ühelt poolt peab tootmisel olema ettepoole vaatav ülevaade tellimuste portfelist, teisalt tehnoloogiline teave valmistusprotsesside olemusest ja teostuseks vajalik informatsioon töökohtadel. Tellimuse täitmine lõpeb kvaliteediprotokolliga koostamisega vastava toote kohta ning arve ja saatelehe vormistamisega (raamatupidamise poolt) toote kohaletoimetamiseks kliendile.

Teise taseme kesksed infotehnoloogilised süsteemid on **tootmisprotsesside juhtimise süsteem (MPM)** ja **tootmise teostuse süsteem (MES)** [3.24, 3.25], mis mõlemad realiseeruvad tootmissüsteemis. Tootmissüsteemide arendus ja tootmistehnikate kasutamine on väga olulised ja ka piisavalt keerulised ülesanded, mida käsitletakse põhjalikumalt käesoleva kõrgkooliõpiku 4. ja 5. peatükis.

MPM on tootmistehnoloogiate ja meetodite kogum, mis defineerib, kuidas midagi otstarbekalt ja realselt tootmises valmistada. Kui ERP (vt 8. ptk) defineerib mida ja millal toota (planeerimine), MPM määratleb otstarbekaimad teostused tootmises (juhtimine), siis MES annab toimunu kohta hinnangud (tagasiside tootmisest reaalses või teatava ajalises nihkega) [3.24].

MES on infotehnoloogiline süsteem, mis juhib ja jälgib ettevõtte tootmise soorituse taset ja tootmisprotsesside kulgemist vastavalt planeeritule. Tagasiside ajaintervalli püütakse pidevalt lühendada, kasutades selleks reaalaaja seire süsteeme. Kuna andurite hinnatase on tänapäeval väga olulisel määral vähenenud, siis reaalaaja seire süsteemide arendamine ja kasutusele võtmine ettevõttes on muutunud vägagi reaalseks. Ükskõik kui väikeseks muutub ajaintervall planeeritu ja toimunu vahel, on tegemist ikkagi tagajärje fikseeringuga. Väga oluline on põhjuste väljaselgitamine ja nende toimumise tõenäosuslike hinnangute andmine. Seetõttu on nüüdisaegseks arendusvaldkonnaks prognoosimise tõhustamine ja prognooside täpsuse suurendamine, mis võimaldab igasugused kitsaskohad tootmises juba enne nende võimalikku teket ennetada.

MES-süsteem pakub võimalust kiireks reageerimiseks, mis põhineb reaalaajas kogutavale informatsioonile ja andmete detailsusele. MES-süsteemi viis tähtsamat ülesannet on:

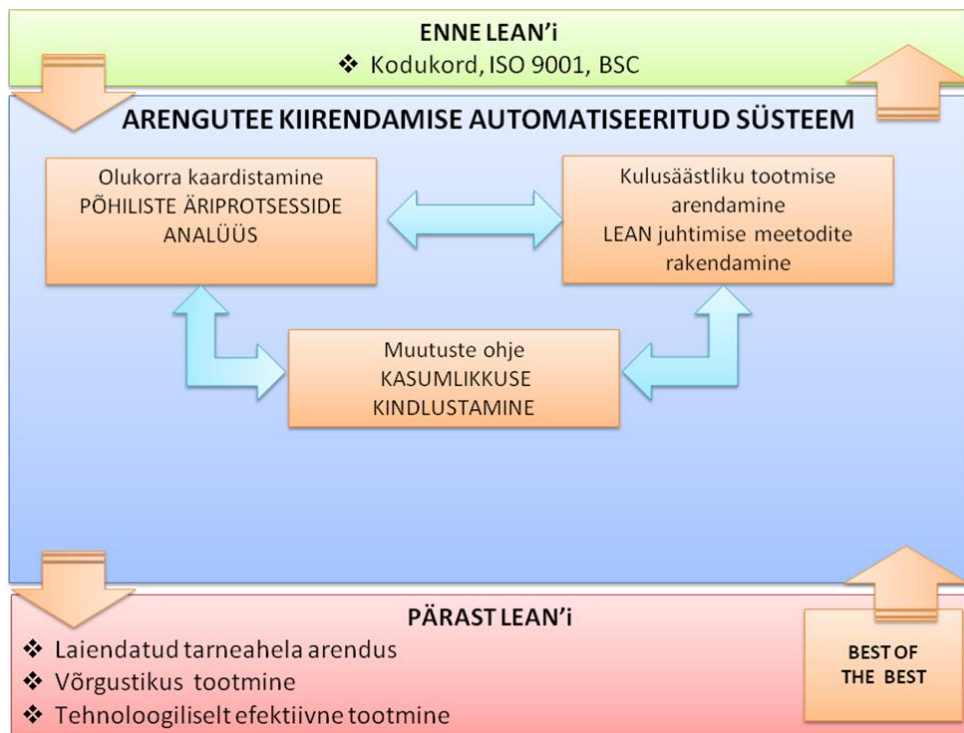
tootmise jälgimine reaalaajas;

- kiire reageerimine sündmustele;
- KPI-de arvutamine ja visualiseerimine;
- pideva parenduse protsessi teostamine;
- andmete edastamine ERP-süsteemidele.

MES fikseerib olukorrad nii protsesside kui ka töökohtade keskselt. Tänapäeval vaadeldakse tulemuslikkuse saavutamist kui komplekstegevust (vt sele 3.12), kus kesksel kohal on tulemuslikkuse saavutamine ja kasumlikkuse kindlustamine. MES-i juurutamine ei saa alata tühjalt kohalt (vt sele 1.13) ja kuna MES oma toimivuses baseerub väga oluliselt kulusäästliku juhtimise meetodikatel (*lean* tootmine), siis kahtlemata peab juba varakult ette nägema ka arendusi pärast *lean*'i.

Teisel tasemel toimub kavandatu elluviimine ning tootmisega seotud operatiivküsimumuste lahendamine. Seetõttu on vastava taseme informatsioon peamiselt tootmiseskeskne:

- tootmisplaani täitmine;
- tootlikkus;
- töökäsu keskne informatsioon ja tootmiskorralduste teostus;
- muudatused tootmises ja nende täitmise võimalused;
- soorituste õigeaegsus;
- toote kvaliteedinäitajatest kinnipidamine;
- töökohakeskse info kogumine ja tulemuslikkuse analüüs;
- protsessikeskse info kogumine ja tulemuslikkuse analüüs;
- parendusettepanekud ja nende rakendused.



Sele 3.12 Tulemusliku tootmise kontseptsioon

Tootmine on äärmiselt mitmetahuline tegevus, kus seire aspekte on väga palju, näiteks: tehnoloogilised (tööpingi tehnoloogiliste võimaluste ratsionaalne kasutamine jms), töökorralduslikud (seadmete ümberhäälestuse sagedus ja sellele kuluv aeg jms), organisatsioonilised (töö ettevalmistusega seonduvad ajakaojms). Ajakadude mõõtmine on vajalik, aga töömahukas. Seetõttu otsitakse lahendusi ajakadude mõõtmiste automatiseerimiseks andurite ja hajusjuhtimise süsteemide ning muu digitaaltehnikaga kaasabil.

Nagu eelnevalt kirjeldatud, keskendutakse teisel tasandil tootmise teostusele ja selle tulemuslikkusele. Äärmiselt oluline on kavandatu elluviimine. Selle tõenduseks on pidev, tõrgeteta protsess nii ajaliselt kui ka teostuslikult. Tüüpilised ajamäärused on töötund, vahetus, tööpäev, tööpäev, kuu, kvartal, poolaasta ja aasta.

Kohamäärused on seevastu töökoht, tootmisprotsess, tootmisjaoskond, tootmistsehh ja tootmine tervikuna. Mida pisem on kohaüksus (töökoht), seda kiiremini peab toimuma infovajadus reaajas (sekund, minut, tund) ja vastupidi. See tingib vajaduse ERP- (peab olema) ja MES- (tegelikult on) süsteemide omavaheliseks integratsiooniks ja koostoimeks. Ka ERP- ja MES-süsteemid on lihtsaid ja keerulisi, odavaid ja kalleid. Ettevõttele on äärmiselt oluline, et vastav(ad) süsteem(id) oleks abivahendiks, mitte aga ressursinõudlejaks. Reaalses teostuses peaks ERP ja MES olema tihedasti integreeritud (vt 8. ptk).

3.3.4 Operatiivjuhtimise tasand (1. tasand)

Antud tasandi ülesanne on kindlustada sujuv ja tõrgeteta tootmine. Tootmise operatiivjuhtimise ülesehitus sõltub oluliselt kahest asjaolust:

- 1) tootmise automatiseerituse tasemest:
 - a) konventsionaalsed (käsitsi juhitud) seadmed;
 - b) digitaalselt juhitud seadmed;
- 2) valmistusprotsessi pidevusest:
 - a) pidevtoimelised valmistusprotsessid (valmistusprotsess on pikka aega katkematu);
 - b) poolpidevad ehk partiidekeskne tootmine;
 - c) individuaaltoomise protsessid (eriliigiliste toodete terviklik valmistamine).

Operatiivjuhtimise eesmärk on edastada vastava toiminguteostamiseks vajalikud signaalid täituritele. Tööstusseadmete vahetu juhtimise temaatikat on põhjalikult käsitletud [3.26]. Vastav temaatika on kaasajal väga kiiresti arenev valdkond ja uued väljakutsed on seotud asjade interneti (IoT) [3.27, 3.28] ja ühenda ning tooda kontseptsioonidega [3.29, 3.30].

Selline ülesannete ja tegevuste grupeerimine (dekompositsioon, tulenevalt standardist ANSI/ISA 95.00-xx) erinevate tasandite vahel on läbipaistvuse ja kontsentreerimise seisukohast lähtudes äärmiselt oluline. Selline hierarhiline arhitektuur koos vastavate teostusmudelitega (infotehnoloogilised süsteemid) ja täpse infovahetuse organiseerimisega fikseeritud objektide vahel on aluseks nii e-tootmise rakendamisel kui ka täiesti uudse lähenemise (tööstus 4.0) praktilisel elluviimisel tööstuses (vt 11. ptk).

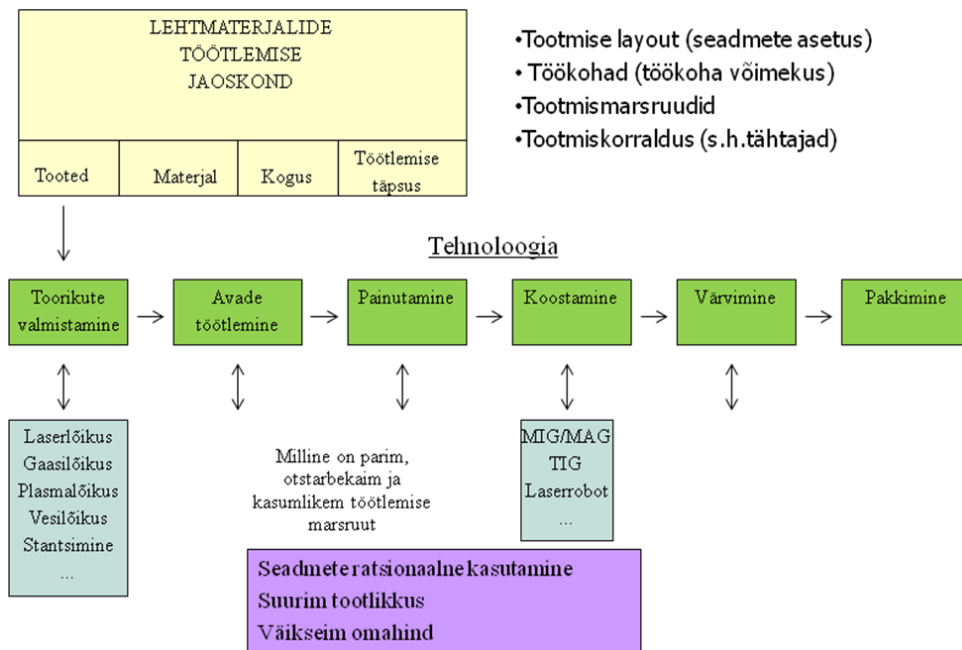
3.4 Horisontaalne integratsioon ettevõttes

3.4.1 Tootmise teostus

Horisontaalse integratsiooni eesmärk on võimalikult kiiresti ja kompaktselt teostada valmistamisprotsess ettevõttes. **Tootmise läbilaskeaeg** on ajaperiood, mis on vajalik toormaterjalist toote lõpliku valmimiseni ehk see on summaarne aeg, mis kulub toote valmistamiseks tootmissüsteemis. Horisontaalse integratsiooni realisatsioonikohaks on tootmissüsteem (vt 4 ptk) ja toimevaldkonnaks tootmisprotsess.

Tootmisprotsess kujutab endast väärtusahela (sele 3.5) ühte protsessi, mille tulemusena tootmissisendid (tooraine, energia, intellektuaalsed ressursid, informatsioon jms) muudetakse soovitud tehnilistele tingimustele vastavaks 3 väljundiks (masinad, seadmed, mehhanismid, aparaadid, pooltooted, detailid, energia, informatsioon jms). Selle transformatsiooniprotsessi aluseks on välja töötatud tootmistehnoloogia (tehnoloogilised protsessid). Tootmisprotsess tugineb töötlemismeetoditele [3.31, 3.32, 3.33] (vt ka 5.ptk) ja tehnoloogiatele. Tootmistehnoloogiat välja töötades pööratakse tänapäeval väga suurt tähelepanu erinevate tootmisprotsessi osade integratsioonile, et tootmislogistika oleks võimalikult lihtne ja läbipaistev ning tootmine teostuks minimaalsete paigalduste arvuga (vt ka 4. ptk).

Tootmine toimub tootmissüsteemis. Tootmissüsteeme, nende ehitust ja kasutamist, käsitletakse neljandas peatükis. Tootmisprotsessi võimalik realisatsioon tootmiskeskkonnas on toodud seel 3.13.



Sele 3.13 Tootmisprotsessi realisatsioon tootmissüsteemis

Tootmisprotsessi läbiviimisel tuleb täita rida abistavaid töövõtteid (tooriku transport, tooriku paigaldamine tööpinki, mahavõtmine, tööriistade kohaletoometamine ja seadistamine, juhtimisprogrammide sisestamine, tööpingi käivitamine ja seiskamine jne), mis ei muuda tooriku olukorda ja mis seetõttu ei kuulu tehnoloogilise protsessi mõiste alla. Tootmisprotsessi vahetud koostisosad on erinevad abistavad protsessid, kus ei toimu vahetu väärtuse lisamine tootele, kuid on paratamatud toote valmistamisel ja tehnoloogilised protsessid, mil toimub tootele vahetult väärtuse lisamine.

Tootmisprotsessi iseloom ja kasutatavad töötlemismeetodid sõltuvad toote valmistamise tehnilistest vajadustest (mehaaniline töötlemine, keevitamine, stantsimine, termiline töötlus, värvimine, jms).

Töötlemismeetod on tehniline lahendus etteantud omaduste ja funktsionaalsustega toote valmistamiseks. Töötlemismeetodite liigitus ja klassifitseerimine ning nende otstarbekate kasutusvaldkondade määratlemine on põhjalikumalt käsitletud kõrgkooliõpiku 5. peatükis, täiendavalt vaata ka kirjandust [3.31, 3.32, 3.33].

Töötlemismeetodid seovad tinglikult tootmissüsteeme ja tootmisprotsesse, kuna ühelt poolt on tegemist tootmisvahenditega (süsteemi komponendid) ja teiselt poolt kasutatavate tehnoloogiliste protsessidega (treimine, freesimine, lihvimine, stantsimine, keevitamine, neetimine, termiline töötlemine, värvimine jms).

Olenevalt ettevõtte iseloomust (masstootmine, tellimusele orienteeritud tootmine vms), tema toodete nomenklatuurist (reduktor, ehituslik metallkonstruktsioon, väiketraktor vms) ja äristrateegiast, võivad tehnoloogilised protsessid olla vägagi erinevad.

Tehnoloogiliseks protsessiks nimetatakse tootmisprotsessi seda osa, milles toimub toodetava objekti olukorra (kuju, mõõtmete, omaduste jm) muutmine ja selle muudetud olukorra kindlaksmääramine (mõõtmine). Tehakse vahet toorikute tootmise, mehaanilise töötlemise, koostamise jt tehnoloogiliste protsesside vahel.

Abiprotsessiks nimetatakse tootmisprotsessi seda lõpetatud osa, mis on vajalik tootmisprotsessi häireteta kulgemiseks ja toote kvaliteedi tagamiseks. Siia kuuluvad: kontroll, transport, hoidmine, demontaaž, pesemine, remont ja pakkimine. Tehnoloogilise protsessi täpseks (üheselt mõistetavaks) kirjeldamiseks on vaja see jagada kindlapiirilisteks osadeks. Abiprotsessid ei loo vahetut väärtust tootele.

Tehnoloogiline operatsioon on tootmisprotsessi see lõpetatud osa, mis viiakse läbi pidevalt ühel ja samal **töökohal** ja mis hõlmab tehnoloogiliste seadmete ja töötajate kogu tegevust ühe või mitme üheaegselt valmistatava detaili või koostu juures. Töödeldavaid pindu, lõikureid ning kasutatavaid režiime võib olla mitmeid ja erinevaid. Operatsioon on tehnoloogilise protsessi peamine osa, see on mõõtühikuks tootmise planeerimisel ajas ja ruumis. Operatsiooni täitmiseks määratakse kindlaks ajanorm ja hinne. Nende järgi määratakse kindlaks toote valmistamise töömahukus ja tehnoloogiline omahind.

Protsessi- ja operatsioonitehnoloogia integreeritust kajastab sele 3.14. Tootmisprotsess on erinevate operatsioonide loogiline jada, kus realiseeritakse vastavad töötlemismeetodid.

Abioperatsioon on abiprotsessi see osa, mis on vajalik tehnoloogilise operatsiooni kvaliteediks ja häireteta kulgemiseks etteantud ajal.

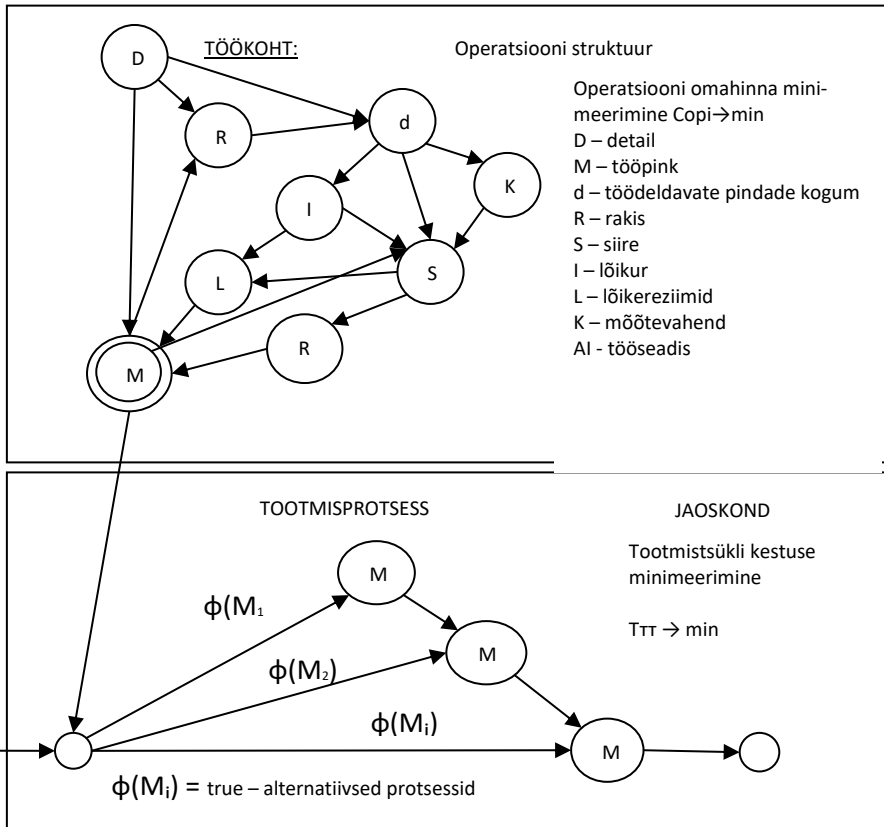
Tehnoloogiline operatsioon jagatakse järgmisteks osadeks: paigaldus, tehnoloogiline siire, töökäik ja positsioon. Käsitööde puhul kasutatakse ka mõistet *töövõte*.

Paigaldus on tehnoloogilise operatsiooni see osa, mis viiakse läbi ühe või enama tooriku, detaili või koostu juures ühe kinnituse juures tööpingis või rakises.

Tehnoloogiline siire on tehnoloogilise operatsiooni see lõpetatud osa, mis viiakse läbi sama lõikuriga või toote istupindadega tehnoloogiliste seadmete töörežiimi muutmata (astmeliselt).

Abisiirdeks nimetatakse tooriku kinnitamist, lõikuri vahetust jt tehnoloogilise operatsiooni lõpetatud osi, mis on seotud töölise ja tehnoloogilise seadme tegevusega ja millega ei kaasne tööobjekti omaduste või kuju muutus, kuid mis on vajalikud tehnoloogilise siirde läbiviimiseks.

Töökäik on tehnoloogilise siirde see lõpetatud osa, mis tehakse tööriista ühekordsel suhtelisel liikumisel tooriku suhtes ja mille tulemusel muudetakse viimase mõõtmeid või omadusi.



Sele 3.14 Protsessi ja operatsioonitehnoloogia integreeritus

Abikäiguks nimetatakse tehnoloogilise siirde seda lõpetatud osa, mis tehakse tööriista ühekordsel suhtelisel liikumisel tooriku suhtes ja mille tulemusel muudetakse viimase mõõtmeid või omadusi.

Positsioon on paigalduse see lõpetatud osa, mis viiakse läbi tooriku või koostu juures ühes fikseeritud asendis tööriista või tööpingi liikumatu osa suhtes.

Töövõtteks nimetatakse teatud kindlate lõpetatud liigutuste kompleksi mingi siirde täitmisel, näiteks tooriku paigaldamine, tööpingi käivitamine, ühe polt-mutter kinnituse tegemine koostamisel jne.

Tehnoloogilised protsessid võivad oma olemuselt olla erisugused ja sõltuvad kasutusvaldkondadest (masinatööstus, mööblitööstus jms), kuid ülesehituse põhimõtted on kõikidel juhtudel sarnased. Operatsioonitehnoloogia realiseerimiseks vastavatel töövahenditel (tootmisvahenditel) kasutatakse konkreetseid töötlemismeetodeid ja tehnoloogilisi režiime. Lähemalt vaata [3.34, 3.35, 3.36]. Igal juhul on eduka protsessi aluseks kasutatav tehnoloogia ja selle realiseerimine.

3.4.2 Töökoha roll ja koht ettevõttes

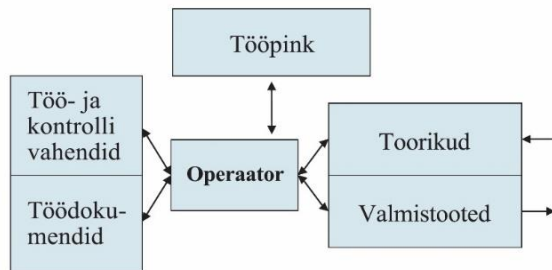
Iga ettevõtte oluliseks koostisosaks on töökoht. **Töökoht** on süsteemi või protsessi osa, mille moodustavad tootmiseseadme/tööruum ja selle teenindaja (töötaja või seade, näiteks robot). **Töötaja** on organisatsiooni kõige suurem väärtus, sest tuginedes oma kompetentsidele, oskab ta oma töökohal rakendada seadmeid ja tehnoloogiaid toote valmistamiseks.

Töökoht on ettevõtte elementaarüksus, mille ülesandeks on planeeritud töö sooritamise. Töökoht on ühelt poolt toomissüsteemi vahetu koostisosa ning teisalt kuulub teostatava tootmisprotsessi koosseisu.

Töö teostamiseks või tööülesande täitmiseks on vaja kindlaksmääratud sisendeid: materjale, abivahendeid, informatsiooni jms. Töö on mõtestatud tegevus, mille tulemusena luuakse väljundid: toode, pooltoode, informatsioon jms. Töö sooritust iseloomustab tulemuslikkus. Tulemuslikkuse näitajad, nende arv ja olemus sõltuvad konkreetse ettevõtte kodukorrast. Tulemuslikkuse näitajad peegeldavad kindlasti soorituse vastavust tööülesandele, soorituse kiirust, kvaliteeti ja ressursside kasutusotstarbekust.

Töökohtade realisatsioonivariante on väga palju ja erinevaid (vt ka 4. ptk). Kuid töökoha organiseerimise põhimõtted on väga suures osas üsna sarnased. Mehaanilise töötlemise töökoha põhimõtteline skeem on toodud seel 3.15.

Sele 3.15 näitab ka töökoha organiseeritust. Lisaks töötaja poolt teenindatavale seadmele kuulub organiseeritud töökoha juurde ka toorikute hoidmine ning alus valmistetailide paigutamiseks. Samuti on oluline, et töökoht oleks varustatud töö tegemiseks vajalike tööriistade ja mõõte- ning kontrollivahenditega. Töökoha juurde peab kindlasti kuuluma ka vajalik tehniline dokumentatsioon antud tööülesande täitmiseks.



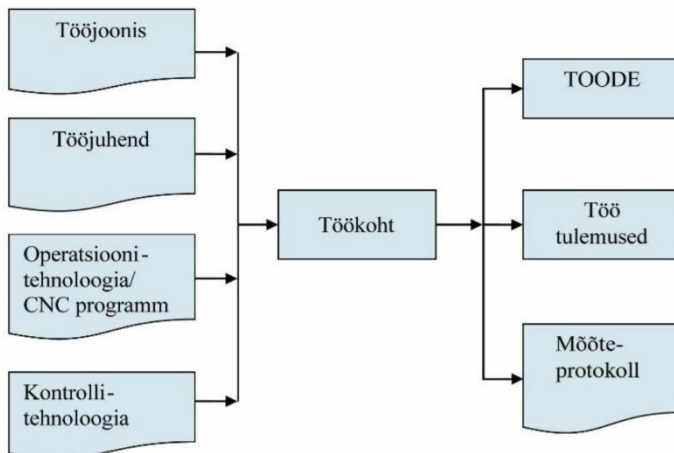
Sele 3.15 Mehaanilise töötlemise töökoha olemus

Töökoha tööülesanne fikseeritakse töökäsul (tööjuhendil), kus on ära toodud valmistamiskogus, -tähtaeg ja fikseering kvaliteedi tõenduse kohta. Töökoha dokumentide hulka kuulub reeglina tööjoonis ning keerulisemate toodete puhul lisatakse kindlasti ka tehnoloogia- ja kontrollikaart.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et töökoht on tootmisruumi (tsehh, jaoskond) osa, kus töötaja täidab tööülesandeid. Seal on tööks vajalikud seadmed, rakised, tööriistad, abivahendid ja tootmisinventar ning tagatud nõuetekohased töötingimused. Töökohas peab olema korraldatud ka vajalike toorikute kohaletoomine ning valmistatud detailide/toodete transport vahelattu või valmistoodete lattu. See kõik peab toimuma vastavaid ohutustehnikanõudeid arvestades. Töökohaga seotud sisendid ja väljundid on toodud sel 3.16. Nendeks on:

- **tööjoonis**, mis iseloomustab toodet või toote osa, mida on vaja valmistada;
- **tööjuhend (töökäsk)**, mis määratleb töötaja kohustused kindlaksmääratud aja-perioodi kohta (mida tuleb teha);
- **tootmistehnoloogia**, mis fikseerib tehnoloogilise operatsiooni sooritamise tingimused ja vastab küsimusele, kuidas midagi teha;
- **kontrollikaart**, mis suunab tähelepanu kontrollitavatele parameetritele, mis peavad olema kajastatud pärast vastava operatsiooni lõpetamist.

Tööjoonis peab olema selgelt ja arusaadavalt esitatud ning väljendama oodatavat tulemust. Tööjooniste lugemise oskus on töötaja kohustuslik ja väga oluline kompetents. Tööjoonisest arusaamine peab olema kiire ja ei tohi tekitada kõhklusid. Kui juhuslikult midagi jääb selguse- tuks, siis mingil juhul ei tohi vastu võtta kõhklevaid otsuseid, vaid on vaja küsida nõu otseselt ülemuselt. Tööjoonisel on oma number ja tuleb jälgida, et tööjoonise number langeks kokku töökäsil toodud tööjoonise numbriga. Siis võib olla kindel, et valmistatakse õiget toodet. Tootejoonisel omakorda on toodud märge toote materjali kohta. Töökohal tuleb jälgida, et kasutatav materjal vastaks tööjoonisel märgitule. Tulenevalt eeltoodust võib väita, et töö alus- tamiseks töökohal peab kindlasti olema tööjoonis ja töökäsk (tööjuhend).



Sele 3.16 Töökoha olemusskeem

Tööjuhend koostatakse vastavalt organistatsiooni tootmisplaanile. Tootmisplaani on tootmis-tegevuse korraldamise aluseks tootmisallüksuses (tsehh, jaoskond). Tootmisplaani on toot-misjuhi dokument ja sellest lähtuvalt jaotatakse tööülesanded tootmiskohtade vahel, mis ongi fikseeritud töökäskudes (tööjuhendites).

Tööjuhend (töökäsk) kui organisatsiooniline dokument on kooskõlastatud kogu ettevõtte ula-tuses. Tööjuhend lähtub tootmisplaanist ja tootejoonisest. Tootmisplaani omakorda on koos-tatud tellimuste plaani alusel, mis töötatakse välja koos turundus-, müügi- ja arendusosakon-naga. Tööjuhendi oluline informatsioon on toodud alljärgnevalt.

Toote number ja tellimuse number – on vaja kokku viia tööjuhend ja tootejoonis ning toot-misplaani.

Töö teostaja – fikseerib vastutuse antud momendil ja ka järeleulatuvalt (on tooteid, kus vas-tutus laieneb aastakümneteks).

Sisuinfo – milliseid tööoperatsioone sooritatakse ja mis on nende põhiolemus.

Teostuskuupäev – võimaldab teostada seiret ka järeleulatuvalt.

Valmistamiskogus – milline on tööülesanne määratletud ajaühikus.

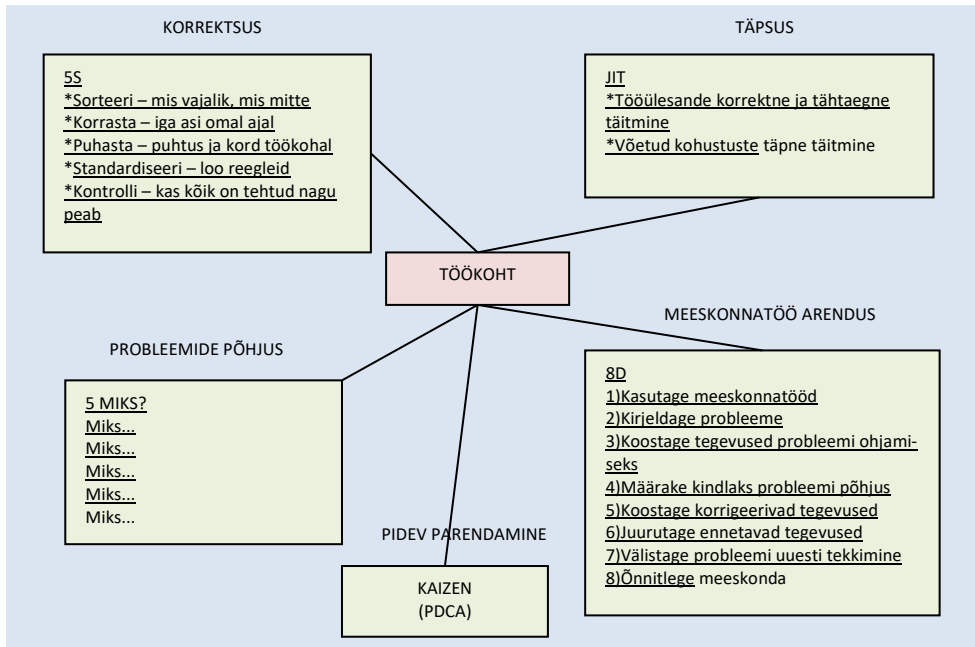
Tähtaeg – millal ajaliselt peab antud tööülesanne olema lõpetatud.

Täiendavalt kajastatakse tööjuhendis informatsiooni, mis iseloomustab nii töö sooritust kui ka tulemuslikkust. Selleks täiendavaks informatsiooniks on siis:

võrdlus plaaniliste näitajate (tavaliselt valmistamiskogus ja -tähtaeg) ning tegelike näitajate (palju tegelikult tooteid valmistati ja millal antud tööülesanne täideti) vahel;

- kvaliteedi tagamine, mida iseloomustab tavaliselt allkiri töökäsul, et tööülesanne on teh-tud tähtjaks ja kvaliteetselt täidetud;
- praaktodete puhul fikseeritakse nende arv;
- vahetu ülemuse (tavaliselt meistri) fikseering andmete õigsuse kohta ja allkirjastamise kuupäev.

Nüüdisaegsete ettevõtete töökohad on tehnoloogiliselt keerulised ja maksumuselt kallid. Kuna nende maksumused on kõrged, on välistatud igasugused tootlikkust vähendavad raiska-mised. Raiskamiste elimineerimiseks kasutatakse kulusäästliku tootmise (*lean manufactu-ring*) meetodeid ning tootmise reaajas tagasisidet tagavaid süsteeme (MES). Pikemalt ja põhjalikumalt vastavaid meetodeid on käsitletud 8. ja 9. ptk-s. Kulusäästliku tootmise meeto-dite rakendamisega tuleb alustada töökohtadel. Esmased töökohal rakendatavad tööriistad on kujutatud seel 3.17. Nende lihtsaviisilist rakendamist käsitleb [3.37]. Vastavate meetodite rakendamine aitab suurendada protsesside efektiivsust. Protsesside efektiivsuse hindamise põhilisteks kriteeriumiteks on kulutatud aeg, ressursside rakendamisest tulenev maksumus ning kvaliteedi tagamiseks vajalik hind [3.38].



Sele 3.17 Tulemusliku töökohta olulised tööriistad

3.4.3 Juhtimise ja tehnoloogia integratsioon tootmises

Ettevõtte edukus sõltub väga oluliselt tootmise tulemuslikkusest ning tootmise tulemuslikkus sõltub omakorda nii tootmise kui ka äriprotsessi juhtimisest ja tootmise kui tootmistehnoloogiate otstarbekast valikust, kasutamisest ja arendamisest.

Tootmisprotsesside väljatöötamise ja teostuse juures on kaks olulist valikutaset:

- tootmise organisatsiooniline vorm;
- kasutatavad töötlemismeetodid ja tootmistehnoloogia.

Tootmise juhtimine on organisatsiooniliste tegevuste kogum, mis peab kindlustama tootmisplaani/tellimuste plaani täitmise etteantud ressursisidega kvaliteetselt ja tähtajaliselt.

Tootmise juhtimise olulisteks koostisosadeks on planeerimine, korraldamine, motiveerimine ja kontrollimine.

Planeerimine on organisatsiooni eesmärkide ja tegevuste defineerimine ning nende teostamise tegevusahela määratlemine.

Korraldamine tähendab tegevuste ja nende täitmiseks vajalike volituste ja vastutuste määratlemist ning vastavate tegevuste koordineerimist nii süsteemisiseselt kui ka kogu organisatsiooni struktuuri keskselt, tagades toimingute täitmise tähtaegsuse ja kvaliteetsuse parima tulemuslikkusega.

Motiveerimine on töötajate sotsiaalsete ja psühholoogiliste vajaduste arvestamine organisatsiooni eesmärkide saavutamise tagamiseks.

Kontrollimine tähendab tegevuste (protsesside) tulemuste seiret ja mõõtmist eelnevalt fikseeritud etappides, nende analüüsi ja vajaduse korral korrigeerivate ja ennetavate tegevuste rakendamist.

Tootmise juhtimisel lähtutakse tellimuste plaanist, mis on koostatud heakskiidetud tellimuste alusel, arvestades olemasolevaid ressursse (seadmed, töökohad, tööliste koormus ja kompetentsid). Tellimuste plaan sisaldab alljärgnevat informatsiooni: tellijad, tellimuse nr-d, tellimuse nimetus ja kogus, tellimuse kood, tellimuse saabumise kuupäev, tellimuse täitmise planeeritud ja tegelik kuupäev.

Tellimuste plaani alusel koostatakse tootmisplaan, mis on tootmisjuhi ja jaoskonna meistrite põhiline töödokument, mille alusel korraldatakse tootmistegevus töökohtadekeskselt. Kui tootmise planeerimine on ettepoole suunatud tegevus ja see realiseerub vastavate abivahendite (ERP-süsteem, Excel vms) kasutamisel, siis tööde jaotus töökohtadekeskselt on vahetu operatiivne tegevus reaalarajas tootmiskeskonnas.

Kasutatavad töötlemismeetodid ja väljatöötatud tootmistehnoloogiad on ettevõtte inseneride arendustöö tulemus ja selle rakendus leiab aset tootmisprotsessis. Tootmistegevuse alus on **tehniline dokumentatsioon**. Tehniline dokumentatsioon jaguneb toote-, valmistamise- ja kvaliteedikeskseks dokumentatsiooniks:

- 1) **tootekeskne dokumentatsioon** – koostejoonised, detailjoonised, tööjoonised, spetsifikatsioonid, vajadusel ka kliendipoolne täiendav tehniline dokumentatsioon. Tootekeskne dokumentatsioon on tootmistegevuse aluseks;
- 2) **toote valmistamise tehnoloogiline dokumentatsioon** – tootmisprotsesside kirjeldused, operatsioonitehnoloogiad, juhtimisprogrammid ning tootmiskeskne organisatsiooniline dokumentatsioon: töökäsk ja/või toote kaart. Tehnoloogiline dokumentatsioon on vajalik toote eesmärgipäraseks valmistamiseks;
- 3) **toote kontrolli ja testimisdokumentatsioon** – kontrollikaardid, mõõteprotokollid, statistilise protsessiohje kaardid, testimistulemused jms. Kontrolli- ja testimistulemused on kvaliteeditõenduseks, et toode vastab etteantud tehnilistele tingimustele.

Tootmise tehniline dokumentatsioon on aluseks kvaliteetsete toodete valmistamisele vähima võimaliku ressursikuluga, seega parima omahinnaga.

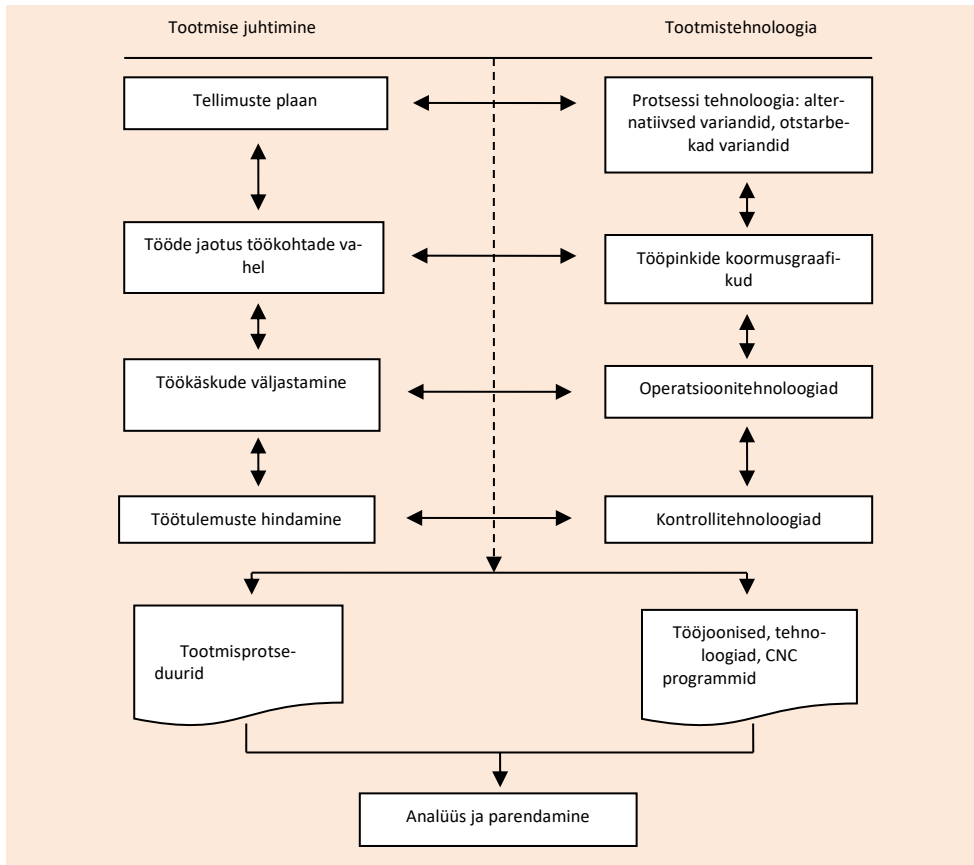
Tootmise juhtimine ja tootmistehnoloogiate kasutamine vahetus tootmisprotsessis peab käima käsikäes (vt sele 3.18). See vastastikune seos aitab ka paremini üles leida organisatsioonilisi või tehnilisi kitsaskohti ning tõsta tootmise tulemuslikkust. Halb organiseerimine ei korva kunagi nüüdisaegset tehnoloogiat ning vastupidi – vananenud või tehnoloogiliste võimaluste poolest mittevastavate seadmete kasutamisega ei ole võimalik saavutada efektiivsust isegi imehea organiseerimise juures.

Tootmistegevuse edukust väljendavad eelkõige:

- tootmisplaani täitmise täpsus;
- vahetu tootmisega seotud ajakulu osatähtsus tootmistsükliks;
- toodangu kvaliteeditase.

Tüüpiliselt kuulub iga ettevõtte strateegiliste ülesannete hulka toote lisandväärtuse suurendamine. On selge, et mida enam asjastatud tööd suudetakse tootele juurde anda, seda suurem on ka selle toote lisandväärtus müügiturgudel.

Toodete valmistamine toimub tootmissüsteemis, mille keskseks elemendiks on töökoht. Töökohta juurde kuulub vajalik tootmisdokumentatsioon: töökäsk, tööjoonis, kvaliteedikontrollileht, aga samuti ka vajalikud tööriistad ning mõõte- ja kontrollivahendid.



Sele 3.18 Tootmise juhtimise ja tootmistehnoloogia vastastikune seos

Eesmärkide püstitamine, tööde organiseerimine töökohtadel, tulemuste hindamine ja järelduste tegemine – need on tootmise juhtimise ja tootmiskorralduse peamised ülesanded. Võimalik ülesannete ja tegevuste jada on toodud allpool:

- 1) kuuplaani analüüs ja tootmistevõime korraldamine;
- 2) toote valmistamise tehnilise dokumentatsiooni kompleksuse kontroll ja selle edastamine tootmislehtidele;
- 3) toote valmistamiseks vajalike materjalide olemasolu kontroll;

- 4) toodete valmistamiseks vajalike juhtimisprogrammide olemasolu kontroll;
- 5) tootmise tehnoloogilise ettevalmistuse vastavus plaanitule;
- 6) töökäskude edastamine töölistele ning töötulemuste fikseerimine tööliste poolt;
- 7) tootmisoperatsioonide kvaliteetse sooritamise seire;
- 8) toote vahekontrolli tulemuste analüüs (üleminekutel ühest tootmisetapist teise). Eesmärk on, et ükski ebakvaliteetne toode (ei vasta spetsifitseeritud nõuetele) ei tohi jõuda järgnevasse operatsiooni;
- 9) lõppkontrolli- ja katsetuse tulemuste analüüs (toote mõõteprotokoll – teostatakse vastavalt tehnoloogiale ja/või kliendi nõudmisele);
- 10) toodete arvele võtmine ja ladustamine ärasaatmiseks;
- 11) probleemsete olukordade lahendamine;
- 12) tellimuste plaani täitmise analüüs ja tulemuste arutelu;
- 13) mittevastavate tööde ja ebakvaliteetse toodangu puhul koostatakse mittevastavuse raport.

3.5 Ettevõtte kui süsteem

Organisatsioon on kui terviklik süsteem, mida on tarvis tema ratsionaalseks funktsioneerimiseks oskuslikult, kiiresti ja efektiivselt juhtida. See toimub süsteemide vahendusel.

Süsteem on inimeste, toodete ja protsesside integreeritud ühendus, mille eesmärk on oma võimekuse piires täita talle püstitatud eesmärgid [3.39, 3.40, 3.41].

Süsteemitehnika sätestab ja kavandab eesmärgipärase süsteemi saavutamise üldised põhimõtted ning vastavad vajalikud tegevused [3.39, 3.40, 3.42, 3.43].

Süsteemiks nimetatakse elementide hulka, millel on kindlaksmääratud seosed ja suhted ning mis moodustavad ühe terviku ja alluvad teatud kindlatele juhtimispõhimõtetele [3.39].

Süsteemi põhikategooriateks on:

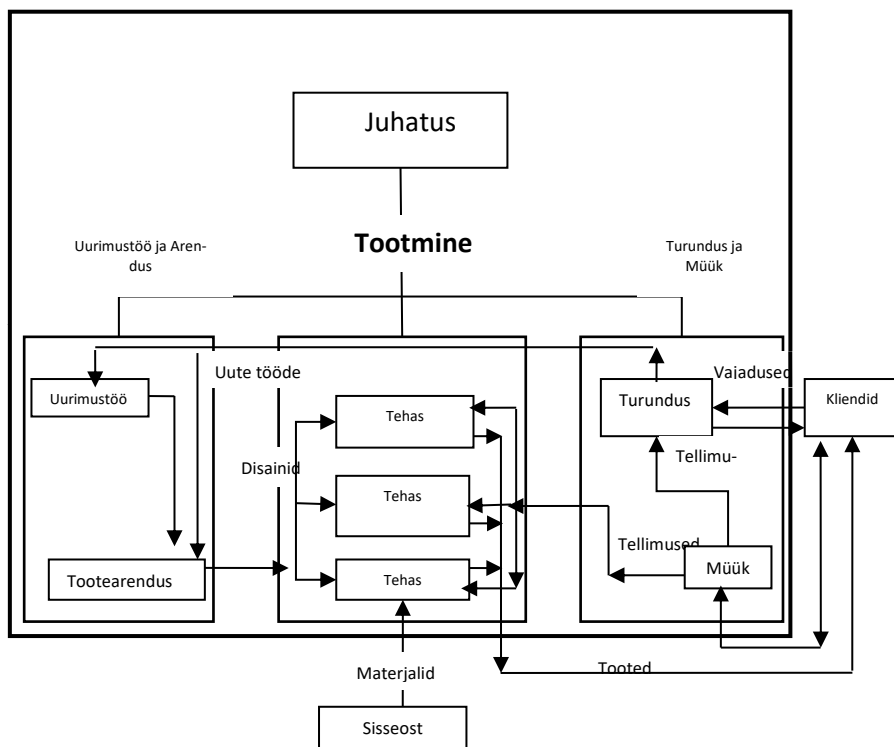
- süsteemi elemendid ehk süsteemi substants;
- süsteemi struktuur ehk süsteemi organiseeritud ja korrastatud vorm;
- süsteemi protsessid ehk süsteemi elementide ja struktuuri baasil tehtavad transformatsiooniprotsessid.

Süsteemi paremaks mõistmiseks peab enda jaoks lahti mõtestama alljärgneva loogilise jada:

- 1) süsteem on paljudest osadest koosnev tervik;
- 2) süsteemil (alamsüsteemil) on selgelt defineeritav eesmärk;
- 3) iga süsteemi osa toetab kogu süsteemi eesmärgi saavutamist, kuid ükski osa ei suuda iseenesest ja omaette seda eesmärki saavutada;
- 4) süsteemi igal osal on omaette eesmärk, aga kogu süsteemi mõistmiseks peab arvestama, et see sõltub ka teistest osadest. Süsteemi osad (või ka alamsüsteemid) on seega vastastikuselt sõltuvuses;

- 5) üksikut osa võime mõista selle järgi, kuidas see sobib süsteemi kui tervikusse. Me ei suuda aga mõista süsteemi, kui õpime tundma kõiki selle üksikuid osi eraldi, ilma nendest tervikut moodustamata;
- 6) osade omavahelisest koostööst arusaamine võib aidata paremini mõista, kuidas süsteem töötab, kuid selleks, et aru saada, miks see süsteem eksisteerib, peame vaatama süsteemist väljapoole;
- 7) mõistmaks süsteemi, peame mõistma tema eesmärki, tema koostisosade omavahelise sõltuvuse ja vastastikuse mõjutamise mehhanisme.

Süsteem on paljudest koostisosadest koosnev tervik. See tervik väljendub ettevõtte strateegias, tegevuseesmärkides, visioonis ja missioonis. Süsteemi osal või elemendil (allüksus, projektigrupp, toote haldur, protsessi haldur) on kindlaksmääratud alaeesmärk, mis viiakse ellu ettevõtte üldiseks arenguks. Ettevõtet kui süsteemi kajastab sele 3.19.



Sele 3.19 Ettevõtte kui süsteem

Nagu selet 3.19 nähtub, moodustavad ettevõtte tema üksikud allüksused (koostisosad), mis on omavahel erinevat liiki sidemetega (infovood, materjalide liikumise vood, kommunikatsiooniliinid jms) ühendatud. Olenevalt ettevõtte tegevusvaldkonnast, suurusest ja funktsioonidest

on allüksuste otstarve, arv ja paigutus ettevõtte territooriumil vägagi erinev, samuti ka vastavate sidemete realiseerimise tase ja otstarve. Ettevõtte kui süsteemi kujundamine kuulub ettevõtte strateegiliste ülesannete hulka. Ettevõtte formeerib vajalikud alamsüsteemid, kujundab nende struktuurid, juhtimispõhimõtted ja planeerib vastavad seadmed ja vahendid. Digitaaltehnikate kasutamine (vt tabel 3.1) on süsteemide arenduse oluline koostisosa. Digitaliseerimisega seonduvalt on välja kujunenud hierarhiline vertikaalne integratsioon, kus erinevatel tasanditel kasutatakse konkreetseid ülesandeid täitvaid infotehnoloogilisi süsteeme ja vahendeid. Taoliste integreeritud lahenduste eestvedajateks on mitmed suured ja tuntud firmad, nagu Siemens, Rockwell Automation jt. Vastavad kontseptsioonid kuuluvad **e-tootmise** arenduse [3.3, 3.4] ja tööstus 4.0 tehnikate valdkonda [3.44, 3.45, 3.46, 3.47].

Olenevalt süsteemi elementide omadustest kujunevad süsteemi omadused ja eesmärgid. Juhtimissüsteem, tootmissüsteem, finantssüsteem – need on näited erinevaid eesmärgi ja ülesandeid omavatest süsteemidest. Nende koosseisu kuuluvatel elementidel (allüksused, inimesed, seadmed, protsessid) on erinevad väärtused, omadused, ülesanded ja eesmärgid, mis kujundavad süsteemi olemuse.

Süsteemi olemus kujuneb süsteemi moodustavate objektide (elementide) omadustest. Organisatsiooni juhtimissüsteemis on objektideks allüksused, osakonnad ja nendes töötavad inimesed. Ettevõttesiseses logistikasüsteemis on objektideks aga laod, transpordivahendid ja sihtpunktid, keda/mida need transpordivahendid teenindavad. Koolivõrk on samuti süsteem, kuhu kuuluvad erineva funktsionaalsusega koolid (kutseõppeasutused, põhikoolid, gümnaasiumid, ülikoolid), riiklikud institutsioonid (ministeeriumid, allasutused), aga ka eraõiguslikud asutused jms.

Vastavast loogikast lähtuvana võib kirjeldada transpordisüsteemi teekondade iseloomu või organisatsiooni struktuuri olemust (1:m – vaste hierarhilisele struktuurile või n:m – vaste maatriksstruktuurile). Suhte olemusest tekib süsteemi paindlikkuse funktsioon, mis iseloomustab ühtlasi ka süsteemi elementide omavahelise suhtluse võimalusi.

Sidemete või seoste iseloom objektide vahel võib olla erinev ja muuta ka oluliselt süsteemi olemust ja toimivust. Juhtimissüsteemi olemus muutub, kui on tegemist kas sotsiaalvõrgustikele ülesehitatud suurel territooriumil toimiva süsteemiga või informatsioon edastatakse väikesele grupile töötajatele suulisel teel piiritletud territooriumil. Kuna informatsiooni on palju, olulise eraldamine äärmiselt oluline ja otsused tuleb vastu võtta kiiresti, on juhtimisskeemide arendus ettevõtte jaoks äärmiselt oluline. Niikaua kui ei kasutata täielikult automatiseeritud otsustussüsteeme, on selles kiiresti muutuv maailmas inimestel täita oma töökohtadel (oluline ei ole, kas see on reaalne või virtuaalne) äärmiselt vastutusrikas ülesanne.

Ettevõtte kui terviku põhieesmärk on kasumi tootmine, klientide ootuste ja vajaduste rahuldamine ning jätkusuutlikkuse kindlustamine.

Süsteemi kuuluvate osade või elementide arv varieerub, nende olemus, paigutus ja funktsionaalsus on erinev ja lähtub ettevõtte strateegiast. Niiviisi tekivad ka erinevad ettevõtte struktuurivariandid, millel on oma arengudünaamika ja kasutusotstarve. Süsteemi iga osa toetab kogu süsteemi eesmärkide saavutamist, kuid ükski osa ei suuda iseenesest või omaette seda eesmärki saavutada. Süsteemi osad on vastastikuselt sõltuvuses. See sõltuvus võib olla

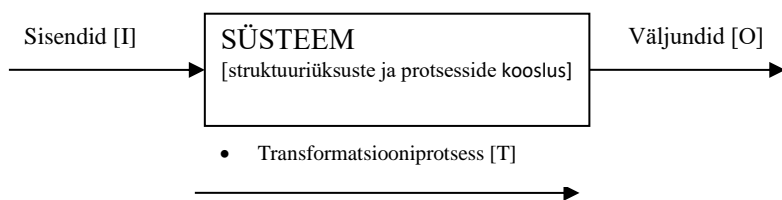
tugevam või nõrgem, paindlikum või jäigem sõltuvalt organisatsiooni struktuurilisest ülesehitusest. Üksikut osa võime mõista ja hinnata selle järgi, kuidas see sobib süsteemi kui tervikusse.

3.5.1 Süsteemide arendus

Süsteemide arendus ettevõttes on organisatsiooni eduka toimimise seisukohast äärmiselt oluline. Süsteeme arendatakse pidevalt, kooskõlastatult toodete nomenklatuuri, tegevusstrateegia või uue äriidee tekkimisega kogu organisatsiooni eluea jooksul. Süsteemi arendus on komplekstegevus ning selle eesmärk on sisendite (energia, materjalid, pooltooted, teadmised, informatsioon jms) efektiivne transformatsiooniprotsess väljunditeks (tooted, teenused, pooltooted, teave, informatsioon jms). Sisendite ja väljundite täpne määratlemine kuulub ettevõtte strateegia valdkonda. Süsteemi arenduse põhiülesanded on kujutatud seel 3.20.

Mõistmaks süsteemi, peab mõistma selle eesmärki, selle koostisosade omavahelise mõjutamise ja sõltuvuse mehhanisme. Kui süsteemi dekomponeeritakse, kaovad sellele iseloomulikud tunnused. Analüüs tähendab süsteemi üksikute osade uurimist. Süntees aga tähendab terviku käsitlust tema ühtsuses, koosnevana üksikutest süsteemi osadest.

Süsteemi optimeerimine hõlmab nii süsteemi komponente kui ka süsteemis asetleidvaid protsesse, kus taotluseks on väljundparameetritele parimate väärtuste leidmine (minimaalne toodangu omahind, maksimaalne tootlikkus, maksimaalne ressursside kasutamine jms).



- 1) Süsteemi analüüs – välja selgitada [T, I, O] olemus, tuues esile nende komponentide tunnused, alternatiivsed variandid ja kasutamishinnangud.
- 2) Süsteemi ekspluatatsioon – ette on antud [T] ja [I], määratleda tuleb kõik vajalik, mis puudutab väljundit [O].
- 3) Süsteemi inversioon – ette on antud [T] ja [O], määratleda tuleb sisend [I].
- 4) Süsteemi süntees – teada on kõik sisendid [I] ja väljundid [O], leida tuleb kõige sobivam süsteemi variant [T].
- 5) Süsteemi optimeerimine – leida [I, O, T] nii, et etteantud kriteeriumide järgi süsteemi töö väljundväärtused oleksid optimaalsed.

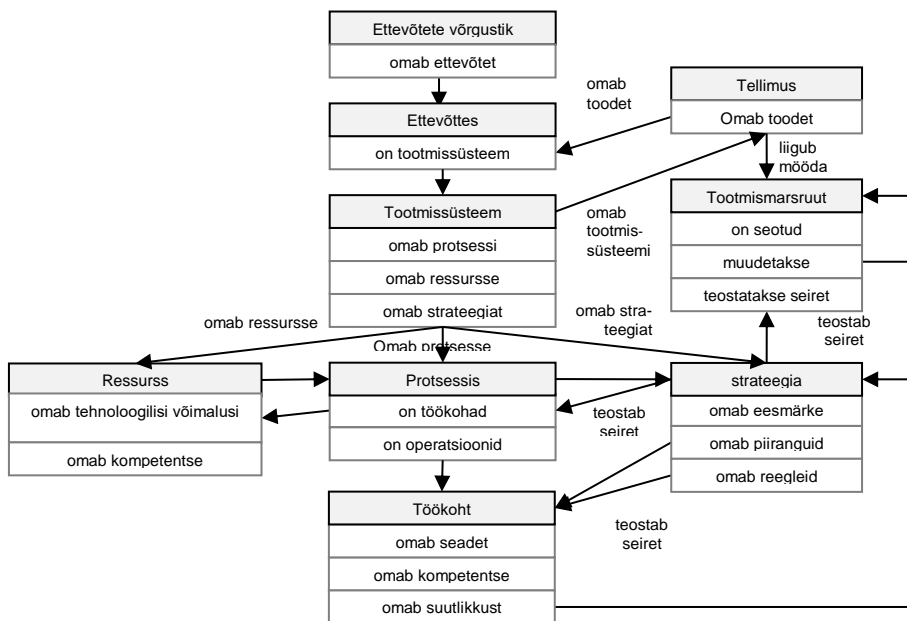
Sele 3.20 Süsteemi arenduse põhiülesanded [3.39]

Süsteemide arenduse juures on oluline mõista ja tunnetada seoseid nii süsteemisiseselt (süsteemi arhitektuur) kui ka süsteemiväliselt (olulisemad atribuudid ja kooslused, millega süsteem oma tegevuse juures kokku puutub). Teoorias tuntakse oluliste mõistete ja süsteemide

midega seonduvate atribuutide ja koosluste fikseerimist ja ühtlustamist kui süsteemide ontoloogia kujundamist [3.48, 3.49]. Tootmise valdkonna ontoloogiline mudel on kujutatud sele 3.21. Vastav mudel kujutab tootmissüsteemi ja selles tootmisega kaasnevat olulist kaaslusi. Mõistmaks neid, saame paremini välja kujundada oma tootmissüsteemi ja selles tulemuslikumalt toota. Siinjuures ei tohiks jääda pealiskaudseks, vaid minna sügavuti ja saada põhjalikult aru seostest. Näiteks:

- 1) ettevõtte strateegia – tootmissüsteemi olemus;
- 2) tootmissüsteem – tootmisprotsessid;
- 3) tootmisprotsessid – töötlemismeetodid;
- 4) tellimused – tootmissüsteemi võimekus;
- 5) töödeldavate detailide spekter – ressursside koormatus jne.

Eelnevalt tõdesime, et väärtusahel lähtub strateegiast ja kujundab struktuuri. Struktuurist jõuame süsteemideni, mis on ettevõtte eesmärgipäraste tegevuste (juhtimine, arendus, tootmine, logistika, müügitegevus, müüjijärgne teenindus, taaskasutus) teostuskohaks. Süsteemid omakorda on aga protsesside kandjaks.



Sele 3.21 Ettevõtte tootmise valdkonna ontoloogiline mudel

Ettevõtte töökõlblikuks formeerimisel on oluline roll nii süsteemidel ja protsessidel kui ka neid teenindavatel töötajatel või seadmetel, olenevalt automatiseerituse tasemest.

Süsteem on paljudest koostisosadest koosnev tervik, millel on määratletav territoorium ja defineeritav eesmärk.

Protsess on vastastikku seonduvate ressursside ja tegevuste kogum, mis muudab lokaalsed sisendid väljunditeks.

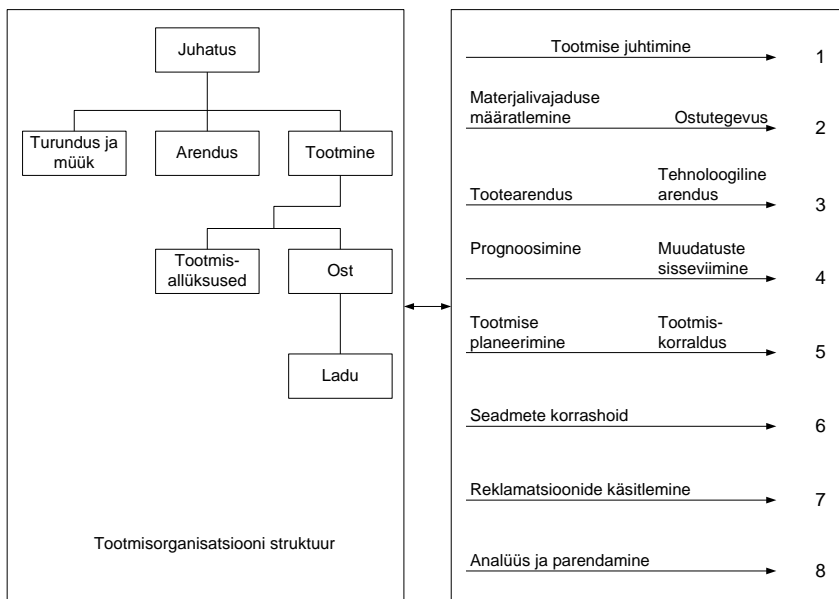
Ettevõtte erinevatel kooslustel on erinevad eesmärgid, et saavutada tulemuslikkus (vt tabel 3.2). Kõige suuremad ja laialdasemad kooslused on süsteemid. Nende eesmärkidest tulenevalt koostab ettevõtte traditsiooniliselt kriitilised edutegurid. Juhtimissüsteemi üldiseks eduteguriks võib olla näiteks tegevusmarginaali suurendamine 8% 10-le vms. Protsess on juba märksa konkreetsema ja korduva tegevusega toiming. Protsessi tulemuslikkus tõuseb, kui protsessikesksel juhtimisel rakendatakse konkreetseid meetmeid. Töökohad on iga ettevõtte kõige olulisemad tulemusüksused. Need on mehitatud töötajatega, kelle konkreetset tööülesanded on kirjeldatud ametijuhendites ja töökäskudes [3.50, 3.51].

Tabel 3.2 Eesmärkide püstitused ettevõttes

Ettevõtte kooslused	Eesmärgid
Süsteemid	Kulusäästlikkus ja ressursisäästlikkus vastava süsteemi tulemusliku toimimise kujundamisel
Protsessid	Sisendite sihtotstarbeline muutmine kvaliteedinõuetele vastavaks väljundiks parima tootlikkusega
Töökohad	Tööülesannete täpne, tulemuslik ja kvaliteetne täitmine minimaalse maksumusega
Töötajad	Olla osa meeskonnast ja süsteemist ning rakendada oma kompetentse suurima tulemuslikkusega

3.5.2 Süsteemide ja protsesside sidusus

Süsteemid on tihedalt seotud protsessidega. Süsteemid realiseerivad oma eesmärgid protsesside vahendusel või kaasabil. Ettevõttel kui süsteemil on erinevad allüksused ja nendega seonduvad alamsüsteemid. Ettevõtte kui süsteem väljendub tema struktuuri kaudu. Struktuuriga on seotud samuti ettevõtte protsessid. Tootmisega enam või vähem seotud protsesside kooslus on kujutatud seel 3.22. Nende protsesside realiseerimine paraku ei toimu mitte tootmissüsteemis, vaid teistes ettevõtte süsteemides ja nendega seotud allüksustes. Siit tuleneb tugev integratsioon nii ettevõtte süsteemide ja protsesside kui ka protsesside endi vahel.



Sele 3.22 Tootmissüsteemiga seonduvate protsesside hierarhia

Täiendavalt selele 3.22 on kujutatud tabelis 3.3 juhtimissüsteemi ja müügisüsteemiga seonduvate protsesside võimalik kooslus. Nagu toodud tabelist nähtub, võib üks süsteem ühendada suure arvu olulisi protsesse. Protsesside arv ja iseloom sõltub ettevõtte suurusest ja tegevusampluaast.

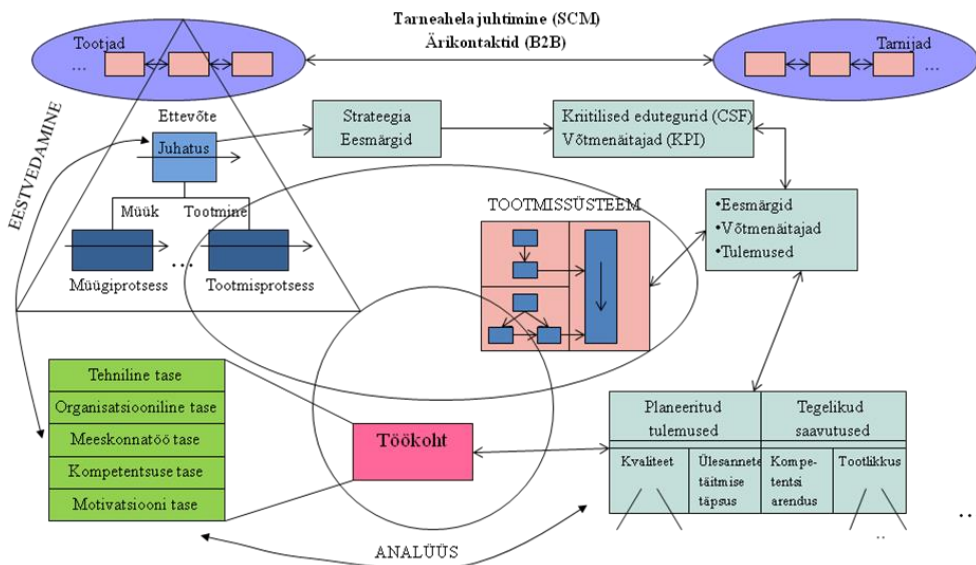
Tabel 3.3 Protsesside jaotus süsteemide vahel

Süsteemid	Protsessid
Juhtimissüsteem	Eesmärgipärane juhtimine Tarneahelate juhtimine Finantsjuhtimine Personalijuhtimine Kvaliteedijuhtimine Haldusjuhtimine Töötervishoiu- ja tööohutuse juhtimine Keskkonnasäästlik juhtimine Lepingute sõlmimine ja tootenõuete ülevaatus Tellimuste käsitus ja kliendisuhete haldus Pidev parendamine
Müügisüsteem	Müügiprotsessi juhtimine Müügivõrgu arendus ja haldus Laokauba käsitus Hankekauba käsitus Reklamatsioonide lahendamine Valmistoodangu pakkimine ja ärasaatmine

Nagu tabelist 3.3 nähtub, on ühe süsteemiga hõivatud üsna mitu protsessi, kusjuures protsesside realiseerimiseks põimuvad need ka omavahel ja teiste süsteemidega. Sellist süsteemide ja protsesside integratsiooni kujutab sele 3.23 [3.51].

Et ettevõtte edukalt toimiks, on väga oluline, et oleks selge ülevaade tegevusfunktsionaalsusest. Kõige esmalt jälgime protsesside sooritust, hinnates nende tulemuslikkust (tulemusnäitajad, millest tuleb juttu edaspidi). Suuremad kooslused on süsteemid, mis on juba selgelt seotud struktuuriga ja mille strateegilise arengu eest vastutab ettevõtte juhtkond. Selline süsteemide arendus kuulub strateegia valdkonda, protsesside tulemuslikkus aga operatiivjuhtimise valdkonda. Terviku moodustavad aga protsessid koos süsteemidega.

Kui organisatsioonis tahetakse saavutada suuremat paindlikkust, on kasulik loobuda tugevatest hierarhiatest ja kasutada protsesside haldureid ning enam lähtuda protsessikeskse juhtimise põhimõtetest [3.9, 3.11, 3.25, 3.53].



Sele 3.23 Süsteemide ja protsesside hierarhia ja integratsioon organisatsioonis

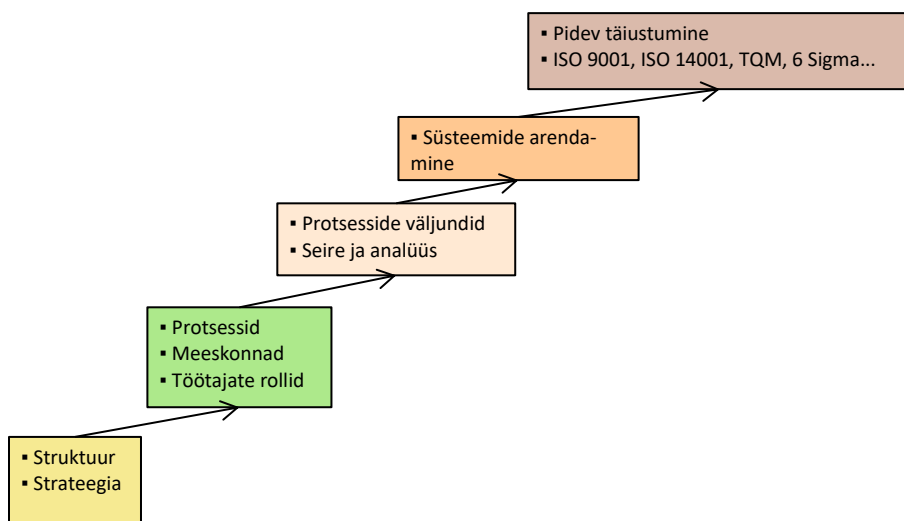
Töökohad on olulised kõikide organisatsiooni struktuuride puhul. Töökoht on keskne väärtuse loomise keskpunkt ja seega ka kogu organisatsiooni tähtsaim lüli strateegiate ja eesmärkide elluviimisel nii süsteemi- kui ka protsessisiselt. Protsessikeskselt on töökoht elementaar-sündmuse teostaja koos oma tulemuslikkusega. Tulemuslikkuse tagamiseks on saavutust vaja pidevalt hinnata või mõõta. [3.54, 3.55, 3.56 3.57]

3.6 Protsessikeskne juhtimine

Protsessikeskne juhtimine [3.9] on tulemustele orienteeritud, väärtustel baseeruv juhtimisprotsess, mille aluseks on fikseeritud tegevuste rühma kui ühe ühtse terviku tulemuslik teostamine ja vastavate väljundite pidev parendamine. Tee täiustumiseni on kujutatud seel 3.24.

Protsessikeskse juhtimise põhiolemus seisneb eesmärkide perioodilises seadmisel ja tulemuste pidevas seires ning vajaduse korral koheses reageerimises puudustele ja kõrvalekalletele. Juhtkonnapoolse ülevaatusel roll on teatava perioodi tagant strateegiate kohandamine ja protsesside arenduse tagamine kooskõlas süsteemse arendusega.

Nagu juba eelnevalt märgitud, siis tänapäeva kiiresti muutuv dünaamiline maailm tingib vajaduse jäigemalt, funktsionaalsetelt organisatsioonimudelilt liikuda paindlikemate ehk protsessikesksete mudelite suunas.



Sele 3.24 Ettevõtte tee pideva täiustumiseni

3.6.1 Protsesside olemus ja klassifitseerimine

Protsess on alguse (sisendid) ja lõpuga (väljundid) elementaarsündmuste loogiline jada, mille eesmärk on muuta etteantud sisendid parimal võimalikul moel soovitud väljunditeks [3.6, 3.34, 3.35].

Protsess on piiritletud ulatusega (konkreetne territoorium ja fikseeritud eesmärk) ning ajalises dimensioonis juhitud tegevus, mille põhikomponendid on elementaarsündmused, mille teostuseks on vajalikud vastavad ressursid (inimesed, seadmed, materjalid, informatsioon, energia, teadmised jms) ja mille väljundiks on protsessi ja elementaarsündmuse iseloomust sõltuv väljund (dokument, tegevusjuhised, arve, toode jms).

Protsess on seega suhteliselt üheselt mõistetav ja mõõdetavaid tulemusi andev tegevus. Protsessi edukust mõõdetakse väljundi saamiseks tarbitud ressursi kuluga. Tänapäeval pööratakse väga suurt tähelepanu protsessi edukuse võtmenäitajate väljatoomisele, nende analüüsile ja vastavate parendusmehhanismide väljatöötamisele. Seega ettevõtte edukuses etendavad väga olulist osa protsessid, nende seos süsteemidega ning kui edukalt on lahendatud protsessikeskse juhtimise põhimõtted (vt sele 3.22, sele 3.24).

Kuna sisendid ja eelkõige väljundid on väga erineva olemusega (toode, toote joonis, valmistamisprotsess, materjalide hange, müügistruktuur, seadmete hooldus, personali oskuste arendamine, kasumi tekitamine, ohutute töötingimuste loomine, keskkonnasäästlik kasutamine, eluea lõpetanud toodete taaskasutamine jms), siis on paratamatu, et ettevõtte tegevusega seotud protsesse on palju ja need on üsna erineva iseloomuga (vt sele 3.22).

Äriprotsessid annavad tootele lisandväärtust (vt väärtusahel) ja täidavad toote/teenuse kliendini jõudmise ahelas erinevaid funktsioone (turundustegevus, toote arendus, ostutegevus, tootmine, müügitegevus jms). [3.6, 3.9, 3.25, 3.53, 3.58]

Protsesside oluliseks klassifitseerimise tunnuseks on **protsessi olemus**. Protsessi olemuse järgi liigitatakse äriprotsesse kolme gruppi:

- 1) põhiprotsessid,
- 2) tugiprotsessid,
- 3) abiprotsessid.

Ühe ettevõtte põhiprotsessid võivad mõnel teisel organisatsioonil olla ka tugi- või abiprotsessiks. Õppeasutustel on koolitustegevus kindlasti põhiprotsessiks, tootmisettevõtetele aga reeglina abiprotsessiks. Samuti võib müügiprotsess ühe ettevõtte puhul olla põhiprotsessiks (eriti kui ettevõtte on oma toodet omav ettevõtte ja arendab müügiorganisatsiooni selle toote müügiks), teisel ettevõttel (allhanketele orienteeritud ettevõtte) ei pruugi müügiprotsessi üldse esineda või on vähesel määral olemas tugiprotsessina. Protsesside jagunemine põhi-, tugi- ja abiprotsessideks lähtub ettevõtte strateegiast.

Põhiprotsessid kajastavad olulisi tegevusi, mis on kriitiliselt vajalikud organisatsiooni edukaks toimimiseks. Nii näiteks tooteid valmistava ettevõtte puhul on tootmisprotsess kindlasti põhiprotsessiks. Kui on mitu tootegruppi, mille tootmine on korraldatud eraldiseisvates tootmisallüksustes, siis on ka tootmisprotsesse kui põhiprotsesse mitu. Kõrgkooliõpiku 4. peatükis on käsitletud tootmisettevõtte tootmisallüksuste asetusplaane ja seadmete valiku põhimõtteid. Seadmete asetusplaani koostamine kuulub tehase planeerimise ülesannete gruppi. Tootmissüsteemide planeerimisel on olulisemateks ülesanneteks seadmete valik ja nende vajaliku arvu määramine/proгноosimine; seadmete asetusplaani (või tootmissüsteemi struktuuri) väljatöötamine, tootmislogistika ja tootmispõhimõtete (seadmete funktsionaalne või grupiviisiline asetuskeem) fikseerimine.

Tugiprotsessid toetavad põhiprotsesside efektiivset teostust. Üks oluline tugiprotsess on kindlasti ostutegevus, samuti seadmete korrashoid ja lao logistika. Ettevõtte, mille tegevusstrateegiasse kuulub ka toote arendus või müügitegevus, omavad veel ka võimalike tugiprotsessidena eelnimetatud tegevusi. Samas kaubandussektorisse kuuluvatel ettevõtetel on müügitegevus ilmselgelt põhiprotsessiks. Tootvatel ettevõtetel võib arendustegevus olla nii

tugi- kui ka põhiprotsessiks. Sõltub see suuresti arendustegevuse ulatusest ja ettevõtte strateegiast.

Abiprotsessid ei toimi organisatsioonis iseseisvalt, kuid etendavad olulist rolli põhi- ja tugiprotsesside edukaks teostuseks ja ettevõtte konkurentsivõime säilitamiseks. Tootmisettevõtete tüüpilisteks abiprotsessideks on personali koolitus, korrigeerivad ja ennetavad tegevused (sh reklamatsioonide käsitlemine), prognoosimine, dokumendihaldus, statistiline andmetöötlus, raamatupidamine jms.

Nii põhi-, tugi- kui ka abiprotsessid on vahetult seotud ettevõtte struktuuriga. Protsesside edukaks teostuseks on neid vajalik juhtida. Seetõttu, lähtudes ettevõtte struktuurist, on protsessidel haldurid või protsesside eduka toimivuse eest vastutavad isikud. Üks ettevõtte allüksus võib hallata ka mitut erinevat protsessi. Tähtis on protsessi teostuse mudelite ja eesmärkide ning vastutuste ja volituste täpne ja selge fikseerimine.

Sõltuvalt ettevõtte suuruselt, strateegiast ja struktuurilisest ülesehitusest võib äriprotsesside arv ettevõttes olla küllaltki erinev. Mõni väiksem allhanketele orienteeritud ettevõtte võib hakata saada kümnekonna protsessiga. Tavaliselt küündib erinevate äriprotsesside arv ettevõttes siiski paarikümne või veelgi enamani. Väiksematel ettevõtetel võib ka üks ja sama inimene olla erinevate protsesside halduriks ja toimetada vajalikke toiminguid erinevate protsesside puhul.

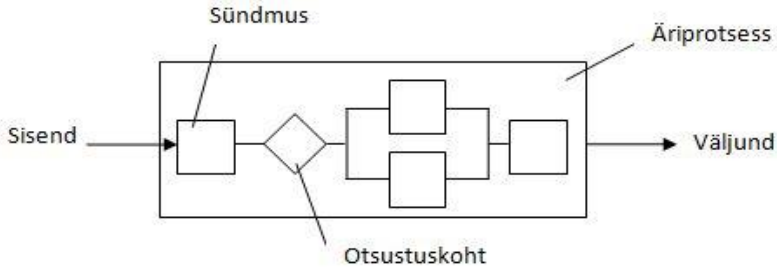
Protsesside oluliseks klassifitseerimise tunnuseks on ka sidusus mõne olulise tegevusvaldkonnaga (toote arendus, tootmine, müük jms). Samas võib selle tegevusvaldkonnaga omakorda olla seotud erinevaid tugi- ja abiprotsesse. Näitena oli seel 3.22 kujutatud tootmisega vahetult seotud protsesside kooslus ning näidatud vastavate protsesside seos ettevõtte struktuuriga. Seel 3.22 toodud pilt on ettevõttekeskne ega pruugi kaugeltki mõne teise ettevõttega kattuda. Samas aga iga ettevõtte oluliseks ülesandeks on selgelt orienteeruda oma protsessides: teha selgeks, millised on põhiprotsessid, kuidas tugiprotsessid nende teostust toetavad ja ka millised on ettevõtte puhul abiprotsessid ja nende rollid ettevõttes. Protsessikeskse juhtimise põhimõtted on ka kõikide kvaliteedijuhtimise süsteemide [3.59] nurgakiviks.

3.6.2 Protsesside ülesehitus, esitlus ja juhtimine

Käesolev punkt annab ülevaate protsessi olemusest ja nende esitlusvõimalustest. Kõikide protsesside juures on kõige olulisemaks tegijaks **sündmused**, mis toimuvad mingis loogilises järjekorras ja käivitavad teatavaid funktsioone või tegevusi.

Sündmus on põhjuslike seoste poolt tekitatud olek või olukord, mis ise on pelgalt fakt, aga kutsub esile teatavaid tegevusi või funktsioonide teostuse. Filosoofilistest seostest võiks mõelda põhjus-tagajärg seosele, konkreetsel juhul aga räägime **sündmus-tegevus** seosest. Olukorra illustreerimiseks võib looduskeskkonnast tuua lihtsa näite: päikesetõus põhjustab valgekuminekku. Või konkreetne näide töökeskkonnast: töökäsu saabumine töökohta (sündmus) käivitab kirjeldatud töötlemisoperatsiooni sooritamise tööpingis. Natukene teistsugune näide protsessiahelast: arendusmeeskonna otsus põhjustas tootearendusprojekti seiskamise kuni uute asjaolude selginemiseni.

Protsessid koosnevad fikseeritud hulgast (dünaamiliselt võib muutuda) lokaalselt (vajab ettevõttekeskselt konkretiseerimist) järjestikku ja/või paralleelselt toimuvatest **sündmustest**, mis lähtuvad protsessi sisenditest ja transformeerivad need võimalikult otstarbekal moel planeeritud väljunditeks (vt sele 3.25). Väljundid kujundavad kliendile (välis- või siseklient) osutatava teenuse ja lisavad tootele väärtuse.



Sele 3.25 Protsessi tüüpelemendid

Protsesside arenduse juures on kolm olulist momenti:

- 1) väljundi spetsifitseerimine;
- 2) sisendite määratlemine;
- 3) transformatsiooniprotsessi efektiivne teostusmudel (vt sele 3.25).

Protsesside arendus algab vastava protsessi väljundi (väljundite) fikseerimisest. Nii kliendi rahulolu tagamiseks kui ka ettevõtte tegevuste otstarbeka korraldamise eesmärgil, on väljundi täpsel spetsifitseerimisel kõikide protsesside väljatöötamise juures oluline koht. Väljundi tulemused ja nende vastavus planeeritule annavad ülevaate protsessi toimivusest ja edukusest.

Teiseks vajalikuks sammuks on sisendite määratlemine. Tüüpilisteks sisenditeks on materjalid, pooltooted, informatsioon, teave, energeetilised ressursid, tööjõud ja selle kompetentsus. Väljundi maksumus sõltub suurel määral sisendressursi maksumusest. Järelikult tuleb sisendeid planeerida ressursi säästvalt, heaperemehelikult ning keskkonnaaspekte arvestavalt. Sisendressursse saab kulutada vaid minimaalselt nõutaval määral. Siit tekivad raiskamisega seotud probleemid. Kui kasutada lihtsa tööoperatsiooni sooritamiseks kõrge kvalifikatsiooniga töötajat või suurte tehnoloogiliste võimalustega tööpinki, on vajalikud ressursid üledimensioneeritud. Samuti võivad töökoha või kogu tootmise halva organiseerimise tulemusena tekkida tarbetud seisakud, mis põhjustavad ettevõttele suuremaid kulutusi ja raiskamist. Kõik võimalikud raiskamiste tekkekohad tuleb ettevõttes elimineerida, mis ongi kulusäästliku tootmise aluseks.

Sisendite muundamine väljunditeks ongi transformatsiooniprotsess. Transformatsiooniprotsessil etendab olulist rolli kasutatav tehnoloogia, planeeritavate sündmuste olemus ja järjestus ning rakendatavad juhtimismeetodid. Parimate tulemuste saavutamiseks on otstarbekas

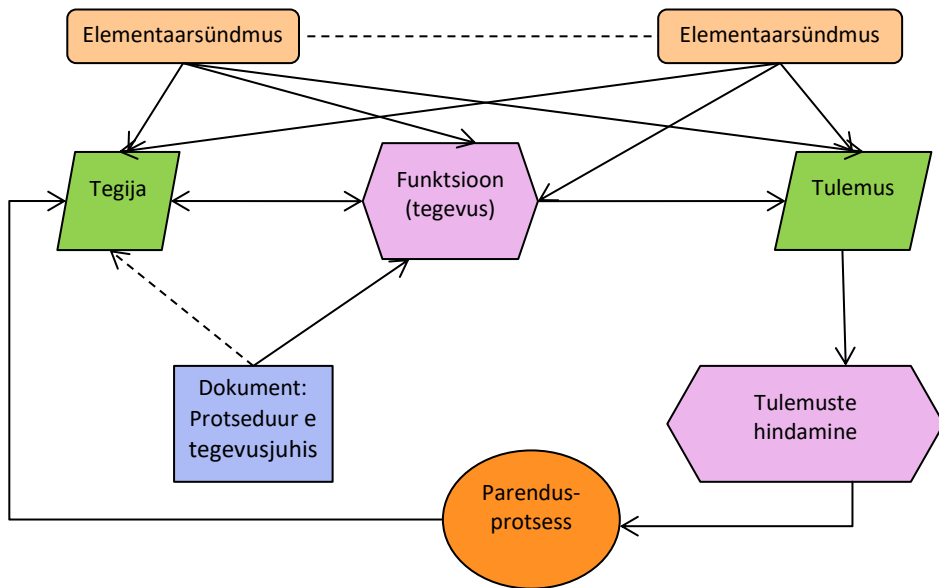
koostada protsessi mudelid ja neid siis erinevate matemaatiliste meetoditega (modelleerimine, optimeerimine, tabelotsustusmeetodid jms) lahendada. Kvaliteedi, tootlikkuse ja ressursisäästliku kasutamise eesmärkidel on matemaatiliste meetodite kasutamine protsesside arenduse juures hädavajalik. Vaid eelnevalt leitud õigete otsuste rakendamine ettevõtluses tagab garanteeritud kvaliteedi ja suure tootlikkuse võimalikult madala omahinna juures. Otsustusteooria meetodite otstarbekas rakendamine protsesside arenduse juures tagab nende kõrge tulemuslikkuse.

Protsessid on tüüpiliselt piisavalt komplitseeritud ja mitmetahulised ning kuigi nad on suunatud sissepoole (allüksus, tootmistsehh või ettevõtte), tuleb arvestada, et konkreetne protsess (ostutegevus, seadmete korrashoid, turundustegevus vms) on paratamatult seotud ka ettevõtte teiste protsessidega (nt tootmis-, arendustegevus) ja väliskeskkonnaga. Siit tulenevad täiendavad aspektid protsesside arenduse juures:

- arvestada tuleb kehtivat siseriiklikku ja rahvusvahelist seadusandlust;
- lähtuda tuleb ettevõtte olemasolevatest traditsioonidest, kompetentsist, võimalustest ning omanike soovidest;
- protsessid peavad olema võimalikult läbipaistvad, hästi dokumenteeritud ning seotud analüüsimehhanismiga;
- protsesse ei planeerita kuudeks, vaid aastateks – siit ka vajadus nende paindlikkuse ja jätkusuutlikkuse järele;
- protsessi lihtne integreeritavus teiste ettevõttesiseste protsessidega ning võimalus integratsioonitasandite kergeks muutmiseks seoses struktuuriliste muudatustega ettevõttes (haakub ka protsessi paindlikkuse nõudega);
- dünaamilisus, mis eeldab, et muutused nii ettevõtte arengus, kliendisuhetes kui ka turustusgeograafias peavad leidma kiire tagasiside ka protsessimudelis ning väljenduse protsessi teostuses.

Kui sele 3.25 käsitles protsesside tüüpelemente (sisend, muundumine, väljund), siis sele 3.26 on kujutatud protsessi toimimine vastavas töökeskkonnas. Elementaarsündmuste teostamisega kaasneb tegevuste kirjeldamine, teostaja(te) määratlemine ja tulemuste esitluse spetsifitseerimine. Sündmuste täitmise seotud tegevused võivad olla lihtsama olemusega või komplitseeritud. Keerulisematel juhtudel on kindlasti vajalik vastavate protseduurireeglite dokumenteerimine ehk vajalike tegevusjuhiste kirjutamine. Mida keerulisemad on teostavad protsessid, seda täpsemalt peaksid vajalikud tegevusjuhendid olema fikseeritud. See väldib eksimusi, tagab kvaliteedi ja tootlikkuse. Seetõttu on ka kvaliteedijuhtimissüsteemi (ISO 9001 standardi kohaselt [3.59]) oluliseks koostisosaks vastavate protseduuride kirjeldused.

Protsesside kirjeldamiseks on tüüpilisemad võimalused kas protsessi voodiagrammide [3.11, 3.60] või tasakaalustatud tulemuskaardi põhimõtete [3.61] kasutamine. Tabelis 3.4 on toodud näitena müügi protsessi juhtimine ettevõttes, kus on välja toodud vastavad mõõdikud (võtme-tulemusnäitajad), aga ka arendustegevused nende saavutamiseks.



Sele 3.26 Protsessi olemus ja toimivus ettevõttes

Tabel 3.4 Müügi- ja turundusprotsessi eesmärgipärane juhtimine (näide)

Eesmärk	Möödik	Sihttulemus	Tegevusprogramm
Uute turgude hõivamine	Müügi kasv Kasumimarginaali kasv	Netokäive +8% Kasumlikkus +5%	Analüüs
Hea kvaliteedi ja hinna suhe Laiem tarbijaskond	Kliendi uuring Sihtrühma uuring	75% peavad parimaks 100% kaardistatud	Kliendirahulolu tõstmise programm Usalduse võitmise programm
Klientide hoidmise tõhustamine	Klientide võitmise/kaotamise määr	65% taseme ületamine	Müügitoetusprogramm Sihtturundusprogramm
Turundusoskuste arendamine Kliendiandmebaasi koostamine	Strateegiliste oskuste olemasolu Kliendivajaduste kaardistamine	100% oskustest 2 aastaga 80% klientidest aastaga 95% klientidest 2 aastaga	Müügikoolitusprogramm Müügi- ja kliendiinfo kogumise programm

Protsessikeskne juhtimine on tulemustele orienteeritud (vt tabel 3.4). Protsessikeskne juhtimine eeldab ka kindlasti tulemite hindamist ja vajaduse korral vastavate korrigeerivate ja ennetavate tegevuste algatamist.

Protsesside juhtimise ja protsessidevahelise koostöö organiseerimise põhieesmärk on parandada ettevõtte tulemuslikkust ja seeläbi tagada konkurentsivõime. Kõik ettevõtte protsessid ja elementaarsündmused mõjutavad tulemust. Nagu eelpool kirjeldatud, on iga ettevõtte enda jaoks välja töötanud tulemuslikkuse kriteeriumid iga protsessi kohta eraldi ja loomulikult ettevõtte edukust väljendavad kompleksnäitajad (süsteemidekeskselt). Kokkuvõtlikult on tabelis 3.5 toodud ettevõtte protsesside tulemuslikkuse hinnangud ja analüüs.

Tabel 3.5 Protsessikeskse juhtimise tulemuslikkus ja analüüs

Hinnang	Analüüs
Tellimuse täitmise aja osatähtsus töökohal	Töötaja kasutamine (väärtuse loomise osatähtsus tootmisprotsessis)
Tootmise osatähtsus tellimuse käsitluse protsessis	Peamised põhjused mittetootlikuks tööks
Sisseostu maksumuse osatähtsus toote omahinnas	Eesmärkide saavutamise tase
Masinaaja osatähtsus tootmistsükli kestuses	Töötaja rahulolu indeks
Seadistuste ja paigalduste osatähtsus tootmises	Töötaja panus meeskonnas
Tühiaegade osatähtsus	Tõhususe dünaamika (muutused ja parendused ettevõttes ja nende tulemuslikkus)
Toote omahinna ja müügihinna suhe	Kulutused tootmises ja nende mõju tootlikkusele
	Kvaliteedi indeks

3.6.3 Äriprotsessid ettevõttes

Väärtuste loomine organisatsioonis põhineb erinevate äriprotsesside teostamisel. Olenevalt organisatsiooni strateegiast ja tegevusvaldkonnast võib äriprotsesside arv ja nende olemus olla suuresti erinev. Ettevõtte strateegia väljendub väärtusahela (vt sele 3.5) ehk äriketi olemuse kaudu. See väärtusahel on omakorda erinevate äriprotsesside kujundamise aluseks. Pelgalt lihtsale allhanketele orienteeritud ettevõttes on tüüpiliselt kasutusel vaid mõned äriprotsessid. Neil juhtudel on reeglina põhiprotsessiks tootmistegevus, mida toetavad näiteks ostuprotsess ja juhtimissüsteem. Mida lühem on väärtusahela pikkus ja mida lihtsakoelised tooted, seda vähem lisandväärtust tootele ettevõttes lisatakse ja seda vähem erinevaid äriprotsesse tüüpiliselt ka kasutatakse. Kui ettevõttes on väärtusahela kõik elemendid piisavalt võrdsel tasemel, on see ka rikas äriprotsesside poolest. Selliste ettevõtete tüüpilisteks äriprotsessideks võivad olla:

- ärijuhtimine;
- prognoosimine;
- finantsjuhtimine;
- tarneahela juhtimine;
- kvaliteedijuhtimine;

- personalijuhtimine;
- dokumendihaldus;
- turundustegevus;
- kliendisuhete haldus;
- ostutegevus;
- arendustegevus (toote arendus, tehnoloogia arendus, töökeskkonna arendus);
- tootmisprotsessiohje (tootmise planeerimine ja juhtimine tooteperekondade keskselt);
- toote kontroll;
- seadmete korrashoid;
- ladude logistika (sisseostu ladu, vahelaod, valmistoodangu ladu (laod));
- kauba pakkimine ja kohaletoimetamine;
- müügitgevus (müügijärgne teenindus);
- kliendi tagasiside (reklamatsioonide käsitlus);
- jms.

Reeglina on ettevõttes äriprotsesse tõesti palju ja nende ülesehitus sõltub ettevõtte suurus- sest, äristrateegiast, ettevõtte põhitegevusvaldkonnast aga ka kahtlemata juhtkonna ning arendusmeeskonna seisukohast ja teadmistest. Äriprotsessid pannakse sageli paika ja nende olemus fikseeritakse kvaliteedijuhtimissüsteemi (ISO 9001) [3.59] ettevõttes arenda- des. Arendustöid teevad kas oma ettevõtte pädevad töötajad või kasutatakse kompetentsete konsultantide teenuseid. Ettevõtte jätkusuutlikkuse ja konkurentsivõime tagamiseks on vaja äriprotsesse pidevalt edasi arendada, täiustada ja parendada. Nende tegevuste juures tuleb kindlasti toetuda kulusäästliku tootmise (*Lean tootmine*) [3.62], kuue sigma [3.63], ajastatud tootmise (**JIT**) [3.64], tervikliku kvaliteedijuhtimise (**TQM**) [3.9] või teistele teooriatele ja põhi- mõtetele.

Äriprotsesside olemus on kindlasti vaja ettevõttes fikseerida ehk kirja panna. Korrektseks kirjapanekuks sobib hästi kvaliteedijuhtimise süsteemide (ISO 9001) ülesehituse loogika. See baseerub ettevõtte protseduuride süsteemi väljatöötamisel.

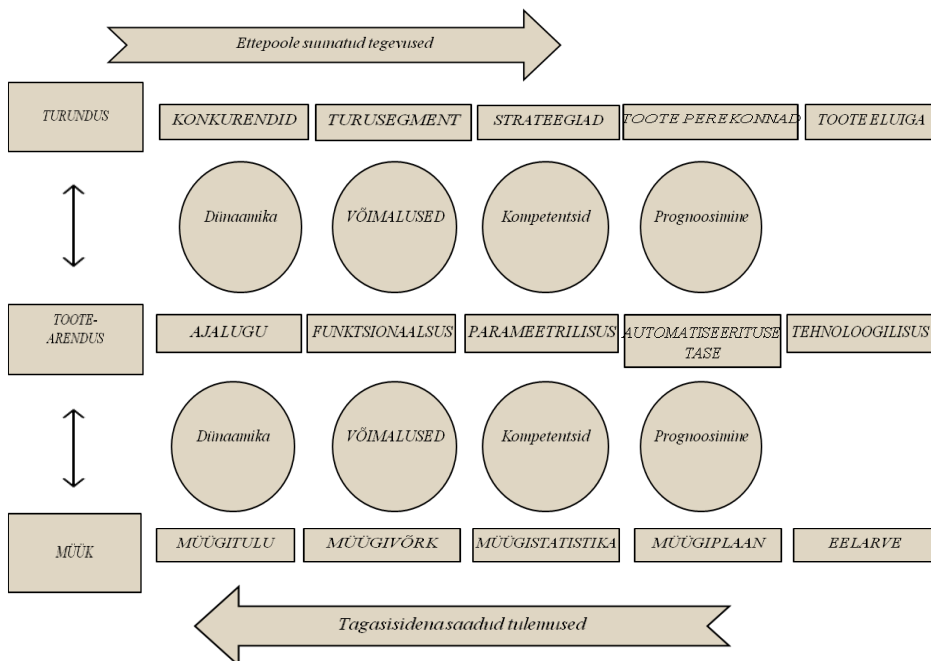
Ettevõtte arengu juures on äärmiselt oluline järjepidevus. Ilma vundamendita maja ehitamine reeglina ei õnnestu. Selle järjepidevuse loogiline ahel oli kujutatud seel 3.24, kus vundamen- diks oli kodukord ja tasakaalus tulemuskaardi põhimõtete rakendamine. Sealt edasi on juba võimalik suuremate sammudega täiuslikkuse suunas liikuda.

Organisatsiooni arenduse filosoofia on aluseks nii süsteemide arendamisel kui ka protses- side kujundamisel ja väljatöötamisel. Kui tarneahelate juhtimine ja kvaliteedijuhtimine olid globaalsed tegevused, mis sobivad rohkem käsitlemiseks süsteemide arenduse juures, siis ka protsesside puhul on kogu ettevõtet kui tervikut hõlmavaid protsesse. Eelkõige saaks siin- juures ära märkida tellimuse käsitluse ja kliendisuhete halduse protsessid. Pealegi on mõle- mad protsessid omavahel ka tihedasti seotud. Kliendisuhete haldus on üldisem teema ja reeglina kuulub see turundusvaldkonda. Tellimuse käsitluse protsess seab aga loogilisse ja ajalisse raamistikku kõik tegevused, mis saavad alguse heakskiidetud tellimusest või siis

ostu-müügilepingu sõlmimisest ja lõpevad kauba (toote) kohaletoimetamisega kliendile kokkulepitud tingimustes. Mõlemad protsessid on kogu ettevõtet hõlmavad ja seda eriti tellimuse käsitlemise protsessi puhul

Tootmistegevus ja müügitegevus on tüüpilised põhiprotsessid. Mõlemad on äärmiselt tähtsad ja nende protsesside suutlikkusest sõltub väga olulisel määral ettevõtte tulemuslikkus ja käekäik. Ostutegevus on tootmisele ja müügile oluline tugi. Kui pole midagi sisse ostetud, ei ole millele tugineda, et toota ja ka müüa. Tänapäeval peaks ettevõtte sisseostule väga tõsist tähelepanu pöörama. Hanked ja tarned moodustavad ka ettevõtte tarneahelate juhtimise juures olulise osa. Ikka kehtib põhimõte, et klient on kuningas. Ja üks tõepoolest, kui poleks kliente, oleks ka ettevõtte tegevus suhteliselt mõttetu. Kliendisuhete haldamine ja reklamatsioonide käsitlemine on tegelikult igale ettevõttele äärmiselt oluline tegevus. Kliendi arvamus ettevõttest kujuneb paljuski just läbi nimetatud tegevuste. Ka siin peavad olema välja töötatud oma protseduurireeglid, mida tuleb pidevalt täiendada ja arendada ning ka kohandada vastavalt klientidele.

Ettevõtte protsessid on vastastikusel seoses ja mõjutavad teineteist. Seel 3.27 on kujutatud turundus-, arendus- ja müügiprotsessi vastastikune seos ning eesmärgipüstitused. Turundustegevus on tüüpiliselt ettepoole suunatud tegevus, et kindlustada ettevõttele kasumlik toodete portfell. Seevastu müügiprotsess oma müügivõrgu arenduse ja müügiga jälgib planeeritud eesmärkide (eelarve) saavutamist.



Sele 3.27 Protsesside erinevad eesmärgid ja nende vastastikune seos

Turunduse ja müügi vahele jääb arendustegevus ja tootmine, kus planeeritu realiseeritakse kliendile vajalikeks toodeteks.

Arendustegevus lähtub turunduse sisenditest (kliendi soovid, turu üldisemad vajadused) ning arvestab turu reaalselt vastuvõtlikkust läbi müügitgevuse praktilise teostuse. See on klassikaline näide, kuidas ettevõttes on erinevad protsessid väga tihedalt omavahel seotud. Samuti on tootmises tootmistevõime realiseerimiseks vajalik tagada seadmete pidev korrasolek, tööriistamajanduse korraldamine, vajalike materjalidega varustamine, tööde jaotus töökohade vahel, aga ka kogu vajaliku tehnoloogilise ettevalmistuse korrektsus.

Protsesside väljatöötamine, nende elementaarsündmuste fikseerimine ja vastastikuste seoste fikseerimine on oluline loominguine protsess, millest saab alguse protsessi edukus. Edukust mõõdetakse aga juba konkreetsete võtmenäitajatega ehk vastavate KPI-dega.

3.7 Eesmärgipärane ja tulemuslik tootmine

Tootmise juhtimine ja adekvaatne tagasiside tootmisest on iga tootmisettevõtte tegevuste sõlmpunkt. **Tootmise juhtimine** on kavandatu elluviimine tähtajal ja kvaliteetselt väikseima võimaliku ressursikuluga. Tootmise juhtimine toimub tootmissüsteemis (vt 4. ptk) selleks kavandatud juhtimisskeemi alusel (kajastatud ettevõtte struktuuris). Tootmise juhtimine lähtub tootmisprogrammist. **Tootmisprogramm** on ettevõtte kõige üldisem tootmisalane strateegiline väljund. See kujundatakse eelarve baasil (läbi arutatud aktsionäride/omanikega) ja arvestab ettevõtte tootmisvõimsusi. **Tootmisvõimsus** omakorda kujuneb ettevõtte seadmepargi, nende arvu ja tehnoloogiliste võimaluste ning töötajate ja nende kompetentside alusel. Tootmisvõimsus väljendub tootmiskogustes, mis peab olema kajastatud tellimuste ja/või tootmisplaanis. Tootmisprogrammi realiseerimine toimub tootmisplaani alusel, mis fikseerib tootmiskogused tootmisallüksustes ajaperioodide lõikes. Tootmisplaan on planeerimistöö tulem, tootmistevõime korraldamine on aga juhtimistegevuse osa. Tootmistevõime korraldamine lähtub tootmisprotsessidest ja teostab vahetult tööde (tootmisoperatsioonide) jaotust töökohade vahel. Töökoht ühildab töötaja ja töövahendi, et tegevus oleks eesmärgipärane.

3.7.1 Protsesside efektiivsus

Nagu eeltoodust selgus, protsess on ajalises, ruumilises ja loogilises järjestuses olevate elementaarsündmuste jada, mis lõppkokkuvõttes muudab määratletud sisendid eesmärgipäraseks väljundiks, tarbib selleks vajalikke ressursse ja omab teatavat maksumust. Tootmises on väga oluline efektiivsus. Selle saavutamise esimeseks eesmärgiks on protsesside kestuse minimeerimine ehk igasuguste ajakadude likvideerimine. Tegevuste kestuste arvestamine toimub kindla hierarhia alusel:

- ettevõttekeskselt läbi kliendi tellimuse täitmise aja;
- tootmiskeskelt üksiktoote või toodete partii valmistamise tervikaja kaudu;
- töökohakeskselt, arvestades ajakulusid konkreetsel töökohal.

Tellimuse täitmise protsess on kogu ettevõtet ja erinevaid osakondi ning jaoskondi hõlmav protsess. Iga ettevõtte eesmärk on täita tellimus võimalikult väikese ressursikuluga, mis on eelduseks ka omahinna alandamisele. Ajalises kontekstis mõõdetakse tellimuse täitmise kulgu tellimuse täitmise kestusega.

Tellimuse täitmise kestus on aeg, mis kulub alates tellimuse täitmise alustamise allkirjastamisest ja toote koodi sisestamisest tellimuste plaani (tellimuse vastuvõtmine) kuni toote üleandmiseni tellijale (vt sele 3.28).

Tellimuse täitmise kestus ehk üldine tsükli-aeg (T_{TS}) koosneb kolmest olulisest ajakomponendist: T_{EL} – tootmise ettevalmistuse aja kestusest; T_{TT} – tootmistegevuse kestusest ja T_{KT} – toote kontrolli ja kohaletoimetamise aja kestusest.

$$T_{TS} = T_{EL} + T_{TT} + T_{KT} .$$

Oluline on üldise tsükliaja minimeerimine, kasutades agiilset tootmist (vt sele 3.28) ja jälgides kulutuste kokkuhoidu ning tagades pideva ressursikulu. Sel eesmärgil on vajalik analüüsida ettevõttesiseselt tsükliaja komponentide keskselt ja püüda avastada võimalikud raiskamiste tekkekohad ning põhjused, eesmärgiga olemasolevad kitsaskohad kõrvaldada ja ettevõtte tegevuslikkust parandada.

Tootmise ettevalmistust mõjutavad oluliselt kasutatavad inseneritarkvara (CAD, CAM, CAQ, ERP, PLM jms) süsteemid (vt 8. ptk), koostöövõrgustikud või klastrid [3.6] ning optimaalsed tarnestruktuurid [3.58]. Tootmise kestus sõltub kasutatavatest tootmisressurssidest ja automatiseerituse tasemest ning ettevõttesise ja -välise logistika korraldamisest [3.56, 3.57]. Toote kontrolli ja kohaletoimetamise aja minimeerimise tagab kontrolli raskuspunkti viimine töökohtadele ja kontrollioperatsioonide automatiseerimine ning kliendile kohaletoimetamise võimaluste analüüs ja JIT-i põhimõtete rakendamine kogu tarneahela ulatuses.

Tellimuse täitmise aja lühendamisele, aga ka toote omahinna alandamisele aitab väga tõhusalt kaasa koostöövõrgustike organiseerimine ning tarnestruktuuride sihipärane väljaehitamine. Tarneahel on ettevõtluse protsesside integratsioon lõpptarbijast kuni tarneahela alguseni (tarnijani). Seetõttu, tuginedes vertikaalsele integratsioonile, peab iga ettevõtte olulist tähelepanu osutama ja oma SCM- ja CRM-süsteemide oskuslikult arendama (vt tabel 1.1). Tellimuse täitmise aja lühendamine on nüüdisaegse tootmise üks olulisemaid väljakutseid, millele ka uus tootmise paradigma (tööstus 4.0) väga olulist tähelepanu pöörab (vt 12. ptk). Analüüs peab välja selgitama nõrgad kohad tellimuste täitmisel (äriprotsesside analüüs) ning leidma teid ja võimalusi nende kõrvaldamiseks. Lisaks tellimuse täitmise aja minimeerimisele protsesside juhtimise ja tootlikkuse suurendamise kaudu, on sama oluline (vahest isegi olulisem) kulutuste minimeerimine ehk toote omahinna hoidmine pidevalt konkurentsivõimelisena.

Need tegurid realiseeruvad lõplikult tootmises, kus planeeritud sisendid transformeeruvad kavandatud väljunditeks ehk toodeteks ja teenusteks. Tootmise organisatsiooniline tase ning kasutatavate tootmistehnoloogiate aja- ja asjakohasus on tulemuslikkuse saavutamise eeldusteks. Tulemuslikkus peegeldub toodete valmistamiseks kulutatavas ajas ning toote omahinnas.

Tootmistsükli kestus on summaarne aeg, mis kulub toote valmistamiseks tootmissüsteemis. Tootmistsükli kestus hõlmab kõiki toote valmistamisega seotud ajakulutusi erinevates tootmisallüksustes ja ka tootmise erinevates etappides (toorikute ja detailide tootmine, alamkoostude valmistamine, lõpptoote koostamine, värvimine, pakkimine jms).

Tootmistsükli kestuse määrab:

$$T_{TT} = \sum_{i=1}^m T_{SM_i} + \sum_{i=1}^p T_{P_i} + \sum_{i=1}^r T_{TR_i} + \sum_{i=1}^q T_{MK} + T_X,$$

kus T_{SM} – töötlemisoperatsiooni sooritamise aeg töökojal;

m – seadmete (töökohtade) arv;

T_P – töödeldava detaili paigaldamise, mahavõtmise aeg;

p – paigaldusoperatsioonide arv;

T_{TR} – transpordiaeg tsehhis;

r – transpordioperatsioonide arv;

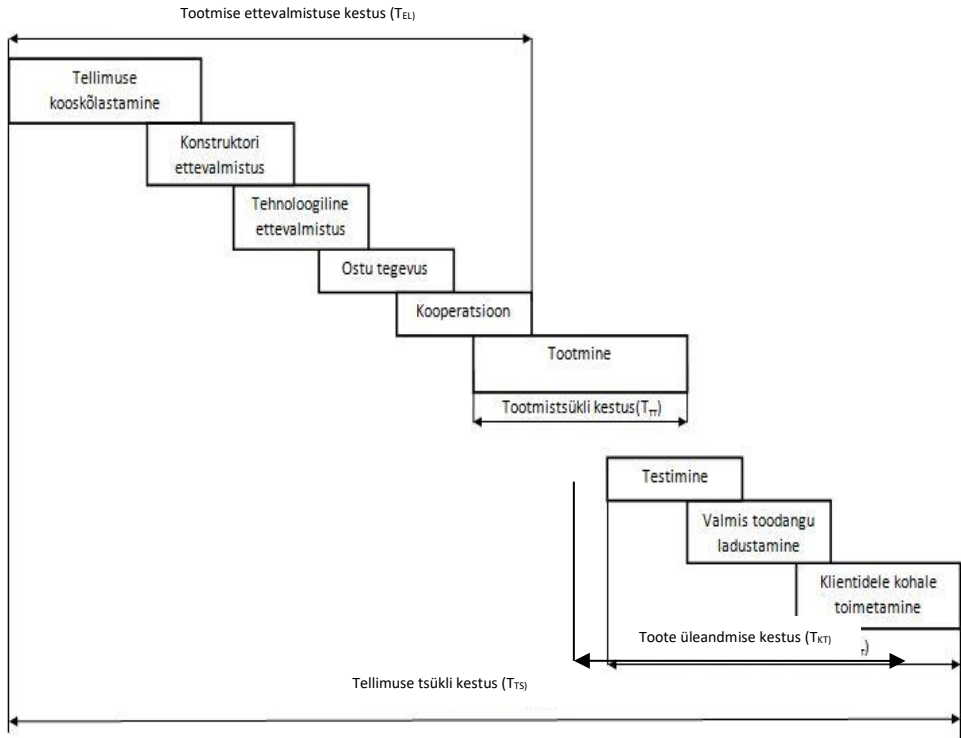
T_{MK} – mõõte- ja kontrolliaeg mõõtemasinas või mõõtepositsioonis;

q – mõõtekohtade arv toote valmistamisel;

T_{TR} – tühiajad tootmises.

Kui tootmise ettevalmistuse ja toote üleandmisega seotud ajakulude osatähtsus sõltub väga suuresti organisatsiooniliste tegevuste efektiivsusest ning ettevõttes olemasolevast kompetentsist, siis tootmisetegevusega seotud ajakulutuste osatähtsus on oluliselt sõltuv kasutatavatest tehnoloogiatest ning seadmete tehnoloogiliste võimaluste kasutamise tasemest aga nende koormatusest. Tootmistsükli kestust mõjutab väga tugevalt töökohtadel toimuv. Töökoht on iga ettevõtte kõige olulisem koostisosa. See integreerib ettevõtte süsteemid ja protsessid ning on tulemuslikkuse kujundamise elementaarrakuke. Töökohtade tulemuslikkuse mõõtmine ja parendamine on ettevõtte tulemuslikkuse tõstmise lähtekoht. Töökohta tulemuslikkus väljub sükliajas, eriti selle planeeritu ja tegelikkuse võrdlemises. Tulemuslikkust saab tõsta kulusäästliku tootmise tehnikate otstarbeka kasutamisega.

Eesmärk on $T_{TT} \rightarrow \min$ (vt sele 3.28 ja sele 3.29).



Sele 3.28 Tellimuse täitmise tsükliaja kujunemine

Tsükliäeg – on aeg, mis kulub töötlemisoperatsiooni kompleksseks sooritamiseks töökohal. Tootmisprotsessi põhilisteks optimaalsuskriteeriumiteks on tagada toodete valmistamise aja-komponentide miinimumväärtused töökohtadel. Tsükliäeg T_{SM} on avaldatav allpooltoodud valemiga:

$$T_{SM} = T_S + T_M + T_A + T_P + T_K + T_T + T_O + T_X,$$

- kus
- T_S – seadistusaeg;
 - T_M – masinaaeg (töötusaeg);
 - T_A – abiaeg (töötlemisega seotud ajakaod);
 - T_P – paigaldusaeg (tootmisega seotud ajakaod);
 - T_K – mõõte- ja kontrolliaeg töökohal (kvaliteediga seotud ajakaod);
 - T_T – tehnilise teeninduse aeg (hooldusega seotud ajakaod);
 - T_O – organisatsioonilise teeninduse aeg (organisatsioonilised ajakaod);
 - T_X – tühiaeg (mittetootlikud ajakaod).

Lisandväärtust andvate ajakomponentide juures (töötlemine, koostamine) on veel omaette ajakaod (tööpingi häälestamine, abistavad tegevused töötlemise juures, tööpingi koristamine jms), mis pikendavad valmistusprotsessi kestust ja vähendavad väärtustatud aegade osatähtsust. Valmistusprotsessi tüüpilised ajakadude tekkekohad on toodud alljärgnevalt:

- seade ja selle tehnoloogilised võimalused (võimalusel kasuta seadet, mis kõige enam sobib antud toote valmistamiseks);
- töötaja ja tema kompetentsid (võimalusel kasuta töötajat, kellel on nii teadmised, kogemused kui ka vilumus antud tööoperatsiooni sooritada);
- töö organiseerimine töökohal (hoia korda ja väldi raiskamisi);
- töö korraldamine jaoskonnas, tsehhis (õige tootmise planeerimine, tööde jaotus, tulemuste jälgimine, kvaliteedikontroll jms);
- tellimuste täitmine ettevõttes (õigeaegne varustamine, ootamatute häirete vältimine, soodne tellimuste portfell, partiide suurused jms).

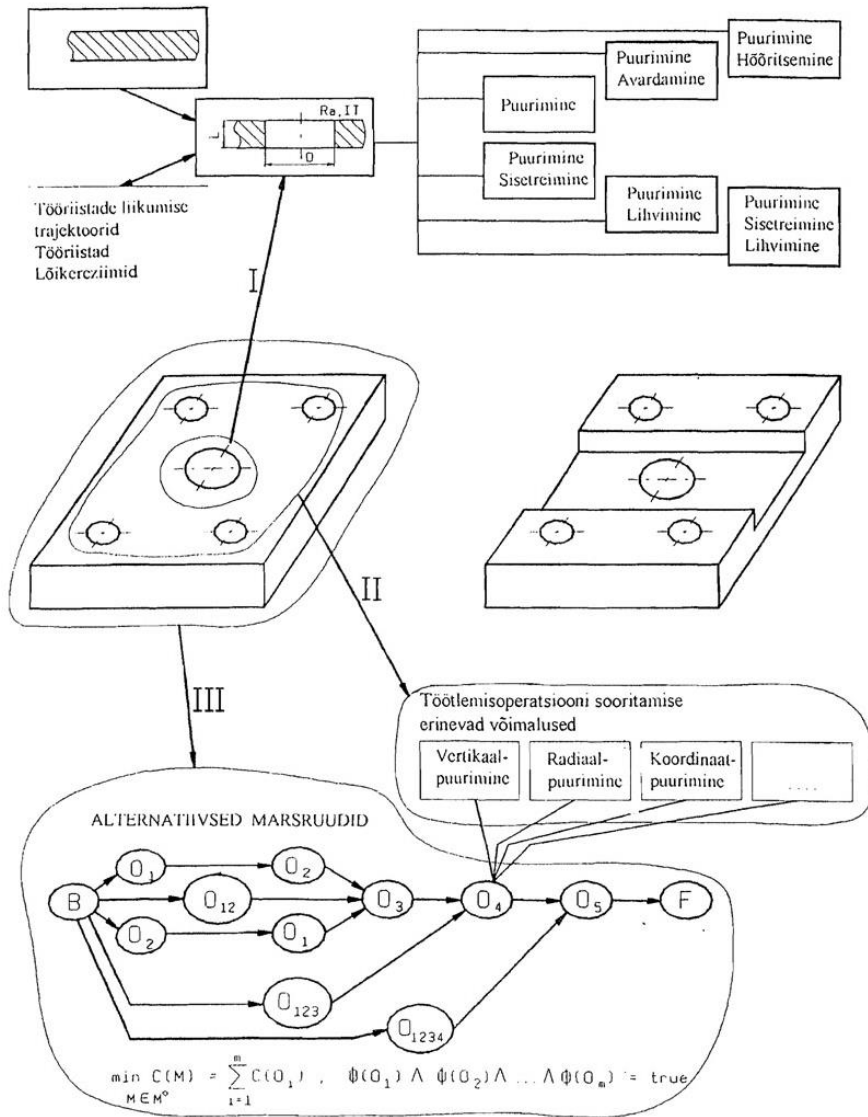
Ajakaod on küll paratamatud, kuid nende minimeerimine täiesti võimalik. Minimeerimise aluseks on tekkekoha ja tekkepõhjuse avastamine/määramine.

Kui tootmise ettevalmistuse ja toote üleandmisega seotud ajakulude osatähtsus sõltub väga suuresti organisatsiooniliste tegevuste efektiivsusest ning ettevõttes olemasolevast kompetentsist, siis tootmisetegevusega seotud ajakulutuste osatähtsust on oluliselt sõltuv kasutatavatest tehnoloogiatest ning seadmete tehnoloogiliste võimaluste kasutamise tasemest ja nende koormatusest.

Tehnoloogiliste ressursside vastavus, et täita ettevõtte tootmisülesandeid, on üks väga oluline sooritus efektiivsuse tegur. Optimeerimismudelid, mis tuginevad matemaatilise programmeerimise teooriale, on leidnud laialdast kasutamist mitmesuguste valiku ja kombinatoorika ülesannete lahendamisel, sh ka tööstusseadmete (tööpinkide, tööstusrobotite jms) optimaalse arvu määramisel. Samuti on optimeerimismudelid leidnud rakendust tootmise organisatsiooniliste vormide (tootmissüsteemi struktuur) määratlemisel. Neil juhtudel on oluliseimateks ülesanneteks (lisaks ressursside vajaliku arvu määratlemisele) tehnoloogiliste marsruutide optimeerimine ja tootmisoperatsioonide projekteerimine (vt sele 3.29).

Erinevate mudelite rakendusvajadus tuleneb äriprotsesside juhtimisega kaasnevatest strateegiatest. Siinjuures tuleb arvestada asjaolu, et ettevõttes on ressursid alati piiratud ja parimate tulemusteni saab jõuda erinevaid teid pidi. Samas, lähtudes äriketi olemusest (vt sele 3.5), on peaaegu alati kriitiliseks kohaks kõige nõrgem lüli väärtusahelas. Siit johtuvalt tervikult silmas pidades ei piisa, kui optimeeritakse näiteks tootmisprotsessid, samas aga jäetakse tähelepanu alt välja sisseostud või turundustegevus. Kõik ettevõtte protsessid on alati omavahelises sõltuvuses ja mõjutavad üksteist vastastikku. Äriprotsesside juhtimine on ühelt poolt nii teooria koos ettevõttes rakendatavate meetoditega, teisalt aga strateegia, mis baseerub olemasoleval kompetentsidel ja traditsioonidel.

Iga ettevõtte strateegiliste ülesannete hulka kuulub toote lisandväärtuse suurendamine. On selge, et mida enam asjastatud tööd suudetakse tootele juurde anda, seda suurem on ka selle toote lisandväärtus müügiturgudel.



Sele 3.29 Protsestitehnoloogia valik tsükliaja minimeerimiseks

Operatsiooni sooritamise operatiivaeg sõltub põhjajast ja abiajast, mis on vahetult seotud tööpingi tehnoloogiliste võimalustega ja nende kasutamise oskusega. Eesmärk on operatsiooni sooritamise aega $T(WP)$ minimeerida, mis loob eeldused operatsiooni omahinna $C(WP)$ ja kogu valmistamise maksumuse ja kestuse minimeerimiseks.

Toote minimaalne valmistamise maksumus $C(M)$ saab võimalikuks üksikute töötlemisoperatsioonide (i -ndas operatsioon) sooritamise omahinnast $C(O_i)$:

$$\text{Min } C(M) = \sum_{i=1}^m C(O_i),$$

kus m – tööpinkide (töökohtade) arv süsteemis.

Optimeerimisülesannet tuleb lahendada kahetasandiliselt:

- 1) arvestada otstarbekaimat töötlemisprotsessi oma ettevõtte keskselt (kaaludes ka võimalust minimeerida töökohtade arvu);
- 2) arvestada teostatavate operatsioonide jagamist partnerettevõtete vahel ehk tugineda spetsialiseerumisele ja võrgustikus tootmise korraldamisele.

3.7.2 Tulemuslikkuse kujundamine ja mõõtmine

Ettevõtte juhte huvitavad tulemused. Need näitavad, kas ülesanne on täidetud hästi või halvasti. Seega tulemusi on vaja mõõta. Tulemuslikkuse kujundamine on protsess, mis nagu juba eelnevalt öeldi, lähtub strateegiast, kasutab tasakaalustatud tulemuskaarti loogikat ning baseerub kriitilistel eduteguritel ja tulemuslikkuse võtmenäitajatel (vt sele 3.30). Kriitilised edutegurid ja tulemuslikkuse võtmenäitajad on vaid hinnangud, mis iseenesest konstateerivad olukorda, kuid seda kuidagi ei muuda. Muutused kutsuvad esile ikka inimesed läbi määratletud tegevuste. Seetõttu isiksuse roll organisatsioonis (eriti iseõppivates organisatsioonides) järjest suureneb.

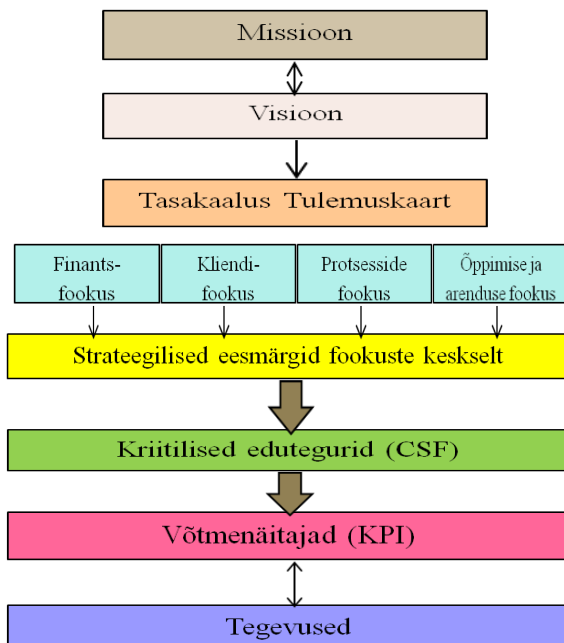
Ettevõtteid püüdleval oma strateegiliste eesmärkide poole ning seetõttu on seadnud konkreetseid ülesanded ja tulemused süsteemidele ja protsessidele. **Tasakaalustatud tulemuskaart (BSC)** vaatlleb ettevõtte tegevusi neljast selgesti erinevast, kuid ettevõtte tulemuslikkust üheskoos kujundavast aspektist: finantsid, kliendid, äriprotsessid, uuenduslikkus ja õppimisvõime [3.61]. Tänapäeval kasutatakse tasakaalustatud tulemuskaarti palju ja tulemuslikult. Tasakaalustatud tulemuskaardi rakendus lähtub ettevõtte strateegiast ja vastavalt sellele seatakse konkreetseid eesmärgid ning ülesanded igale tulemuslikkust kujundavale neljale aspektile. Nende aspektide eesmärkide täitmine peab kindlustama ettevõtte edukuse.

Ettevõtte edu defineerivad kriitilised edutegurid.

Strateegiast tulenevad ettevõttele olulised tegevusnäitajad – **kriitilised edutegurid (CSF)** [3.65]. Need on ettevõtte arengu analüüsi seisukohalt olulised näitajad. Kriitilised edutegurid töötab välja ettevõtte ise ja need võivad ettevõttes ajaliselt muutuda. Tähtis on, et nende järgi saaks otsustada ettevõtte edu või ebaedu üle. Kriitiliste edutegurite väljatöötamisel lähtutakse tasakaalustatud tulemuskaardi aspektidest, näiteks alltoodud viisil.

Finantsaspekt:

- käive;
- kasum;
- käive töötaja kohta;
- investeringute tasuvus.



Sele 3.30 Tulemuslikkuse mõõtmise ja kujundamise protsess

Kliendiaspekt:

- püsiklientide osatähtsus käibes;
- klientide arvu suurenemine;
- võtmeklientide osatähtsus käibes;
- edukus uutel turgudel.

Äriprotsesside aspekt:

- võidetud tellimuste osatähtsus tehtud pakkumiste arvust;
- uute brändide turule toomise aeg;
- tootearenduse ressursimahukus;
- tootmise automatiseerituse tase.

Uuenduslikkuse ja õppimisvõime aspekt:

- hinnang organisatsiooni arendamisele iseõppiva, agiilse, paindliku organisatsiooni suunas;
- uute infotehnoloogiliste süsteemide juurutamine ja nende tulemuslikkus;
- koolituskulude osatähtsus käibes;
- parendusettepanekutest saadud kasumlikkus.

Iga ettevõtte töötab ise lähtuvalt oma vajadustest ja strateegiast välja kriitilised edutegurid. Nende arv ja olemus on ettevõtte juhtkonna otsustada. Oluline ei ole mitte ainult kriitiliste edutegurite fikseerimine paberil, vaid töö nendega – analüüs, põhjuslike seoste leidmine,

raiskamiste ja probleemsete kohtade avastamine, oma tugevuste muutmine konkurentsieliseks võrreldes teistega. Seda aitab saavutada ettevõtte süsteemide ja protsesside sügavam võtmenäitajate analüüs ja tulemusliku tootmise meetodite rakendamine.

Tulemuse võtmenäitajad (KPI) kajastavad ettevõtte tegevuslikkuse tulemuslikkust erinevatest vaatenurkadest ja tegevusaspektidest [3.66, 3.67]. Ettevõtte tulemuse võtmenäitajaid (vt ka tabel 3.6) on oluliselt rohkem kui kriitilisi edutegureid. Kui kriitilised edutegurid on ettevõtte juhtkonna töövahendid, siis tulemusnäitajad on allüksuste juhtide, protsessihaldurite, projektijuhtide jt töövahendid. Tulemusnäitajaid ja nende muutuse dünaamikat jälgitakse pidevalt ning vastavalt näitudele (saavutatule) võetakse vajaduse korral kohe kasutusele korrigeerivad ja ennetavad tegevused.

Tabel 3.6 Võtmetulemusnäitajate grupeerimine

Võtmetulemusnäitajate grupid	Grupi iseloomustus
Tehtut peegeldavad	Peamiselt finantsilised näitajad, mis kajastavad saavutatut (lähtuvad minevikust suunaga tulevikku)
Ettepoole vaatavad	Tüüpiliselt mittefinantsilised tulemusnäitajad, mis võtavad arvesse tehtu parema tuleviku nimel
Sisendit käsitlevad	Mõõdavad tehtud ressursikulutusi suurema äriedu saavutamise nimel
Protsessi käsitlevad	Mõõdavad konkreetsete äri- või tehnoloogiliste protsesside tulemuslikkust (efektiivsust, tootlikkust, paindlikkust jms)
Väljundit käsitlevad	Mõõdavad finantsilisi või mittefinantsilisi tulemusi, mis kaasnevad konkreetsete tegevuste teostamisega (töökoha automatiseerimine, suuremate kompetentsidega töötaja kasutamine, uue tehnoloogia juurutamine jms)
Tegevuslikud	Mõõdavad muutuste tulemuslikkust ja dünaamikat
Suunavad	Mõõdavad edu või ebaedu suurust erinevate aspektide lõikes
Kvalitatiivsed	Kirjeldavad konkreetseid näitajaid ja muutujaid ning nende olemust
Kvantitatiivsed	Esitatakse konkreetseid numbrilised tulemused tabelite, graafikute vms kujul

Tuginedes tabelis 3.6 käsitletud võtmenäitajate olemuslikule grupeerimisele, on tabelis 3.7 näitena esitatud tulemuslikkuse võtmenäitajad, grupeerituna ettevõtte olulisemate tegevusvaldkondade (kliendi aspekt, tootmise aspekt, tarneahela aspekt) keskselt. Kahtlemata iga ettevõtte otsustab ise, kui palju ja milliste gruppide keskselt (tabel 3.6) ning milliste tulemusnäitajatega (tabel 3.7) konkreetset ta oma saavutusi tahab kajastada. Vastavate näitajate väljatöötamine ja nende kasutamine on ühelt poolt ettevõtte tippjuhtkonna, teisalt aga konkreetse tegevusvaldkonna eest vastutaja oluline tööülesanne.

Tabel 3.7 Tulemuslikkuse võtmenäitajad ettevõtte oluliste tegevusvaldkondade keskselt (KPI-de klassifitseerimine)

KPI-d Klientidega seotud	KPI-d Tootmisega seotud	KPI-d Tarneahelaga seotud
<ul style="list-style-type: none"> - tarnetäpsus - kvaliteet - paindlikkus - hinnatase - tootmisvõimsus - referentsid - oskusteave - suhtluse korrektsus - kliendi rahulolu - tellimuse täitmise kestus - ... 	<ul style="list-style-type: none"> - OEE - seadistusaegade osatähtsus - paindlikkuse tase - automatiseerituse tase - kvaliteeditase - tühiaegade osatähtsus - tootmistsükli kestus - protsessi tootlikkus - töötaja tootlikkus - reaktsiooni aeg - muudatuste aeg - tootmiskulud - ... 	<ul style="list-style-type: none"> - koostöövõrgustik - toote valmistamise osatähtsus - tarnekindlus - kvaliteeditase - paindlikkus - tarnijate usaldatavus - standardiseeritus - tsükli aeg - sertifikaadid - ISO 9001 - ISO 14001 - teise osapoole hinnangud - ...

Lähtudes tabelist 3.7, saame tootmisega seotud tulemusnäitajaid kajastada konkreetsemalt, näiteks nagu toodud tabelis 3.8.

Tabel 3.8 Tootmisprotsessi ja töökohaga seonduvad tulemusnäitajad

Mõõdetavad suurused	Analüüsi elemendid
Tootmisprotsessi kestus (T_{TT})	Kajastab vahetu valmistamisprotsessi kestust, soovime, min T_{SM}
Tootmisprotsessi osatähtsus tellimuse teostuse protsessis (T_{TT}/T_{TS})	Kajastab tootmise osatähtsust tellimuse käsitluse protsessis
Töökohaga seotud aja osatähtsus tootmisprotsessi siseselt (T_{SM}/T_{TS})	Näitab tootmise organiseeritust ja integreerituse taset
Masina-aja osatähtsus tootmisoperatsiooni sooritades töökohal (T_M/T_{SM})	Kajastab vahetu väärtuse loomise osa töökohal
Seadistusaegade osatähtsus töökohal (T_S/T_{SM})	Näitab seadistuse keerukust ja organiseeritust ning sellest johtuvalt SMED-i vajadust
Paigaldusaegade osatähtsus tööoperatsiooni sooritades (T_P/T_{SM})	Kajastab töökoha automatiseerituse taaste ja rakistuse osatähtsust tootmises
Mõõte ja kontrolliaegade osatähtsus töökohal (T_K/T_{SM})	Kajastab vajadust kontrollioperatsioonide lahutamist vahetust töötlemisest
Tähtaegade osatähtsus (T_X/T_{SM})	Näitab vajadust töö paremaks korraldamiseks

Eestvedamine peab saama alguse töökohtadel, protsessihaldurite või allüksuste juhtide initsiatiivil. Seetõttu kuulub nüüdisaegsete organisatsioonide juurde lahutamatu koostisosana avalikustamine. Saavutatud ja planeeritud tulemused peavad pidevalt olema võrreldavad ning olulisemate korrigeerivate tegevuste rakendamiseks juba eelnevalt väljatöötatud vastavad protseduurid. Siit tulenevalt ei tule mitte oodata käsklusi ja korraldusi, vaid oma tööloogis kohe tegutseda parendamise suunas vastavalt kooskõlastatud reeglilikule. Selline paindlik töökorraldus, kiire reageerimine vajaduste korral ning analüüsitulemuste arutamine vajab kiiret andmevahetust, informatsiooni kättesaadavust ja eeskujulikke kommunikatsioonisüsteemi. See on tänapäeva organisatsioonide arenduse juures üheks oluliseks võtmeküsimuseks.

3.7.3 Tulemuslikkuse tagamise mudel

Konkurentsivõime ja jätkusuutlikkuse aluseks on organisatsiooni tootlikkus, kompetentsus ja eestvedamine. Tegelikuses on äärmiselt oluline eestvedamine ja pidev parendamine. Just siit saab töuke arendustegevus, et eelkõige tõsta tootlikkust ning konkurentsivõimet. Arendustegevus peab olema dünaamiline, õigeaegne ja vajadustest tulenev. Arendustegevuse aluseks on uued tehnoloogiad, vajalikul tasemel automatiseerimine ning uued ärimudelid. Arendus on toimivuse aluseks ning edukaks tulemuslikkuseks on vajalik pidev arendus (vt sele 3.31).

Selle pideva protsessi juures ei saa ära unustada eesmärgi ja tulemusi. Lõppkokkuvõttes väljendub kogu tegevus **tulemuslikkuses**. Tulemuslikkuse mõõtmine on äärmiselt oluline. Strateegiliselt on otstarbekas määratleda need põhilised mõõdikud, mis on ülevaatlikud, peegeldavad arenguid erinevatest vaatenurkadest ning võimaluse korral võtavad arvesse mitmeid lähteparametreid korraga. Nii tekivad tulemuslikkuse võtmenäitajad (põhikriteeriumid), mille muutuse dünaamikat on oluline jälgida ja juhtida. Juhtimise juures tuleb põhitähelepanu pöörata arenduse ja toimivasse vastastikusele seotusele ning nende tasakaalustatuse vajadusele.

Tulemuslikkuse väljundsuurused on seotud **efektiivsuse**, **tõhususe** ja **paindlikkusega**. Mõõtmine võimaldab meil hinnata kasutatavate strateegiatega otstarbekust, aga ka kergemini leida probleemseid valdkondi erinevates tegevustes äriprotsesside juhtimisel.

Efektiivsus (säästlikkus) peegeldab tegelikult kulutatud ja planeeritud ressursside vahet, s.o tegelikult saavutatud tulemus võrrelduna sellega, mida oleks võinud saavutada võrdväärseid ressursse kasutades (raha, aeg, tööjõud, seadmed jms).

Efektiivsus kirjeldab süsteemi võimet muundada sisendid väljunditeks, s.t efektiivsus peegeldub **tootlikkuses**.

Tõhusus väljendab süsteemi kavandatud eesmärgi saavutamise taset. See võib avalduda suhtega: tegelik väljund jagatud planeeritud väljund. Kui säästlikkus tähendab teha asju õigesti, siis tõhusus tähendab teha õiget asja.

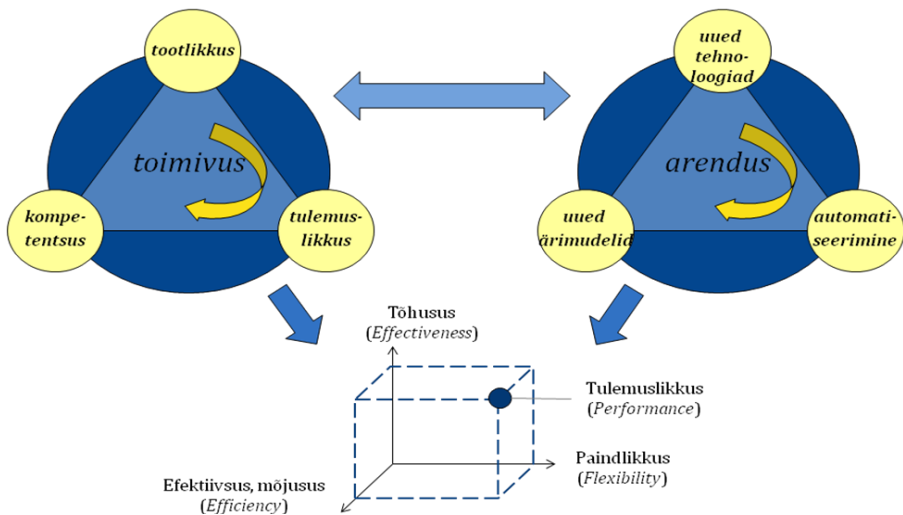
Süsteemi **paindlikkus** on süsteemi võime olla kiiresti ja kergesti ümberseadistatav ühelt toodete nomenklatuurilt teisele.

Süsteemi kohanemisvõime väljendub ühelt poolt ümberhäälestusajas ja teisalt toodete nomenklatuursuses (eriliigiliste toodete arv). Seadistusaegade lühendamine (**SMED**) on suur väljakutse nii tootmissüsteemide projekteerijatele kui ka kasutajatele.

Ettevõttekeskselt peavad arendus ja toimivus toimuma käsikäes (vt sele 3.31). On piisavalt näiteid, kui arendusega pingutatakse üle. Soetatakse nüüdisaegne tootmiseseade või tarkvarasüsteem, kuid muu organisatsioon, töötajate kompetentsus või teised äriprotsessid ei ole vastaval tasemel, et uus efektiivne tehnoloogia sujuvalt integreeruks ettevõttesse kui terviksüsteemi. Seetõttu järgnevad tüüpiliselt majanduslikud probleemid ja võib-olla ka edasine passiivsus arenduste suhtes. Samas tulemuslikkus saavutatakse vaid tasakaalustatud arenguga. Arengu raskuspunkt, ulatuslikkus ja teostuse kiirus tuleneb ettevõtte strateegiast ja seda korrigeerivad tegelikud võimalused ning üldine majanduslik olukord.

Strateegia peab olema uuenduslik, aga lähtuma turusituatsioonist, olemasolevatest ressursidest, konkurentidest, finantsolukorrast ja majanduse üldise arengu väljavaadetest.

Toimivus ja arendus on ettevõtte jaoks kaks äärmiselt olulist poolust, mis vastastikku teineteist pidevalt mõjutavad. Igasugune arendus on paraku kallid ja seetõttu peaks ideaaljuhul arendusega tegelema täpselt nii palju, kui on vaja, et tagada konkurentsivõime ja jätkusuutlikkus.



Sele 3.31 Konkurentsivõime kujundamise mudel

Toimivuse väljundiks on ettevõtte tulemuslikkus. Tulemuslikkuse aluseks on tootlikkus.

Tootlikkus on süsteemi (ettevõtte, struktuuriüksus, jaoskond, töökoht jms) teatava väljundi (toodangu hulk, teenuste maht) ja kulutatud sisendite (kapital, töö, materjal, energia jms) suhe [3.68, 3.69, 3.70].

Üldjuhul põhineb tootlikkuse (ehk tootluse või produktiivsuse) olemus ja mõõtmine järgneval põhivalemil:

$$\text{Tootlikkus} = \frac{\text{Väljundid}}{\text{Sisendid}} = \frac{\text{Toodang (teenused)}}{\text{Tehtud kulutused}}$$

Kui väljundid ja sisendid on mõlemad naturaalühikutes (tk, kg jms), siis võib nende suhet nimetada tehniliseks tootlikkuseks. Seda näitajat ei mõjuta hinnad. Kui aga väljundid ja sisendid on rahalistes väljendustes, siis võib nende suhet nimetada majanduslikuks tootlikkuseks.

Tootlikkus etendab iga ettevõtte tegevusnäitajates olulist kohta. Tulles tagasi organisatsiooni spetsiifika juurde, siis on näha, et organisatsiooni tulemuslikkuse olulisteks mõjuteguriteks on:

- töötaja;
- struktuuriüksus (kus ta töötab);
- protsess (millega ta on seotud);
- töökoht (mis on reeglina töötajat ja protsessi ühendav lüli, kui ei ole tegemist automatiseeritud töökohaga – näiteks robotkeevituse töökoht);
- seade (mis on töökooha oluline koostisosa ja millel on konkreetsed tehnoloogilised võimalused).

Siit tulenevalt mõõdetakse ettevõttes individuaalset, struktuuriüksuse, protsessi, töökooha ja seadme tootlikkust.

Tootlikkuse mudel analüüsib ettevõtte tootlikkust erinevatest aspektidest vaadelduna. Kui näiteks eesmärk on teatava väljundi (toodangu) mahu saavutamine, siis võib efektiivsus avalduda järgmise suhtega: tegelik väljund / planeeritud väljund. Seega efektiivsus võib iseloomustada kui hästi ehk mil määral teatud eesmärgid saavutati. Kitsamas aspektis võib efektiivsust kui majanduslikkust väljendada suhtega:

$$E = \frac{\text{Eesmärk (tulemus)}}{\text{Vahendid (kulud)}}$$

Kusjuures eesmärgiks võib olla süsteemi väljund (toodang, teenuste maht jms) ning vahenditeks vastava süsteemi sisendid: tööjõud, kapital, tooraine või energeetilised ressursid, informatsioon vms.

$$\text{Tootlikkus} = \frac{\text{Saavutatud väljundid}}{\text{Sisend(id)}} = \frac{\text{Efektiivsus}}{\text{Säästlikkus}}$$

Kui eelnevalt väideti, et organisatsioonis saab mõõta erinevate organisatsiooni komponentide tootlikkust, siis samuti on otstarbekas analüüsida erinevate funktsionaalsuste tootlikkust:

- tootmise tootlikkus = tootmiskulud/müügitulud;
- organisatsiooni tootlikkus = organisatsiooni kulud / müügitulud;
- müügitootlikkus = müügikulud/müügitulud;
- toote tootlikkus = toote maksumus / tootmiskulud;
- personali tootlikkus = tööjõukulud/müügitulud;
- kapitali tootlikkus = kapitali kulud / müügitulud.

Efektiivne ja säästlik tegutsemine tagab tootlikkuse kasvu, tagades nõutava paindlikkuse taseme (vt sele 3.31).

Tootmissüsteemi tulemuslikkus (suutlikkus) tähendab toota tooteid planeeritud kogustes tähtaegselt ja kvaliteetselt, tagades tootmissüsteemi ressursside ratsionaalse kasutamise ja kooskõlastatud tulemusnäitajate täitmise (saavutamise).

Tootlikkuse väljundina on kasutatud ka organisatsiooni kasumi kaudu leitavaid suhtarve, millest tuntumad on:

- omakapitali tootlikkus (**ROE**) – puhaskasumi ja omakapitali suhe;
- varade tootlikkus (**ROA**) – puhaskasumi ja varade suhe;
- investeeringute tootlikkus (**ROI**) – kasumi ja investeeringute suhe.

Sisuliselt peegeldavad viimati toodud kolm näitajat tegelikult ettevõtte rentaablust või tulukust ning ettevõtte tootlikkus tuleks ikkagi arvutada eelkõige lähtudes toodangu (teenuste) mahust, netokäibest või lisandväärtusest teatud kulude (töötatud tunnid, töötajate palk, materjalid, ressursikulud, kogukulud) suhtes.

Tootlikkust saab parandada läbi protsesside tulemuslikkuse tõstmise ja protsessikeskse juhtimise meetodite rakendamise ettevõttes. Tootlikkuse tõstmine omakorda aitab oluliselt kaasa ettevõtte konkurentsivõime suurenemisele ning tema jätkusuutlikkusele.

Tootlikkuse ja seeläbi ka tulemuslikkuse tõstmise oluliseks vahendiks on pidev parendamine ehk täiustumine ettevõttes. Pideva täiustumise veduriks on Demingi ring ehk PDCA tsükkel [3.6] ja selle realiseerimise mehhanismiks kulusäästlikku tootmise tehnikad, eelkõige: töökoha korrashoiu tagamine – 5S [3.71], seadmete ja töövahendite häälestamise- ja reguleerimisajade vähendamine – SMED [3.72], probleemide lahtimõtestamine ja võimaluste leidmine nende kõrvaldamiseks – 5 miksi [3.73], 20 võtme meetoodika [3.74] ning pidev parendamine – Kaizen [3.75,3.76]. **Kulusäästliku tootmise** tehnikad on tänapäeval ettevõtetes aktiivselt kasutuses ja nendest lähemalt saab lugeda käesoleva kõrgkooliõpiku 9. ptk-s.

Ülesanded peatükkidele 1–3

1. Mille poolest erinevad automatiseerituse tasemelt alljärgnevad tootmise realisatsioonivõimalused teineteisest:
 - a) konventsionaalne tööpink;
 - b) CNC-tööpink;
 - c) töötlemiskeskus;
 - d) paindtootmissüsteem?

Lahenduse käik

- 1.1. Teha selgeks, milles väljub tehnoloogilise sisseseade automatiseerituse tase.
- 1.2. Millised põhitunnused on omased eeltoodud tootmisvahenditele?
- 1.3. Tuua välja olulisemad erinevused automatiseerituse tasemelt eeltoodud tehnoloogiliste seadmete puhul.
- 1.4. Kus ja millisel puhul on automatiseerimine vajalik? Tuua näited.

NB! Soovitav kasutada ka neljanda peatüki materjale.

2. Mille poolest erineb ettevõttes vertikaalne integratsioon horisontaalsest?

Lahenduse käik

- 2.1. Milles seisneb vertikaalse integratsiooni olemus?
 - 2.2. Milles seisneb horisontaalse integratsiooni olemus?
 - 2.3. Tuua välja erinevused.
 - 2.4. Esita mõni konkreetne näide.
3. Kuidas seostada allpool toodud organisatsiooni põhielementide järjestusvariante (A, B) väärtusahela olemuse (sele 3.5) ja organisatsiooni ülesehituse alternatiividega (sele 3.6)?

A	B
Struktuur	Strateegia
Inimesed	Tehnoloogia
Tehnoloogia	Inimesed
Strateegia	Struktuur

Lahenduse käik

- 3.1. Mille poolest põhimõtteliselt erinevad ettevõtete strateegiad variantide A ja B puhul?
- 3.2. Kumba variandi puhul (A, B) on tüüpiliselt tegemist lühikese ja kumba variandi puhul pika väärtusahelaga (vt sele 3.5)? Miks?
- 3.3. Too näide ettevõttest ja tema tegevuslikkusest, mis vastaks variandile A.
- 3.4. Too näide ettevõttest ja tema tegevuslikkusest, mis vastaks variandile B.
- 3.5. Kas struktuur ja tehnoloogia peavad variantide A ja B puhul olema erinevad?

4. Kuidas ja milliste eesmärkidega toimub vertikaalne integratsioon ühe infotehnoloogilise taseme siseselt?

Lahenduse käik

- 4.1. Vali oma soovi kohaselt üks infotehnoloogiliste süsteemide paar tasandisiseselt (vt ka tabel 3.1 ja sele 3.7 ja 3.8). Näiteks: HRM–TQM; CRM–SMC; PLM–ERP; PLM–LIMS jms.
- 4.2. Defineeri kummagi infotehnoloogilise süsteemi põhifunktsioon.
- 4.3. Koosta ettevõtteskesne lihtne ülesanne kooskõlas valitud paari funktsionaalsustega.
- 4.4. Selgita valitud infotehnoloogiliste süsteemide rolli antud ülesande lahendamisel.

Oluline: kasuta infotehnoloogiliste süsteemide olemuse kohta täiendava informatsiooni saamiseks internetti.

5. Kuidas ja milliste eesmärkidega toimub vertikaalne integratsioon erinevate infotehnoloogilise tasemete vahel?

Lahenduse käik

- 5.1. Vali oma soovi kohaselt üks infotehnoloogiliste süsteemide paar tasemete vahelt tasandite vaheliselt (vt ka tabel 3.1 ja sele 3.7 ja 3.8). Näiteks: CRM–ERP; PLM–SMC; ERP–MES; PLM–CAM jms.
- 5.2. Defineeri kummagi infotehnoloogilise süsteemi põhifunktsioon.
- 5.3. Koosta ettevõtteskesne lihtne ülesanne kooskõlas valitud paari funktsionaalsustega.
- 5.4. Selgita valitud infotehnoloogiliste süsteemide rolli antud ülesande lahendamisel.

Oluline: kasuta infotehnoloogiliste süsteemide olemuse kohta täiendava informatsiooni saamiseks internetti.

6. Millised on olulisemad protsessid neljanda taseme süsteemil CRM (kliendisuhete juhtimine)? Milles seisneb nende olemus ja eesmärgid. Kuidas nad omavahel seotud on?

Lahenduse käik

- 6.1. Selgita välja CRM-i olemusskeem. Defineeri CRM-i põhieesmärk.
- 6.2. Defineeri CRM-i põhiülesanded ja -tulemid.
- 6.3. Kirjelda põhiprotsesside olemus oodatud tulemusteni jõudmiseks.
- 6.4. Kuidas on valitud põhiprotsessid omavahel seotud (andmete kasutamine, tulemusteni jõudmine, tulemuste interpreteerimine jms)?

7. Kirjeldage süsteemi ja protsessi olulisemaid erinevusi ja sarnasusi

Lahenduse käik

- 7.1. Defineerige süsteemi ja protsessi põhiolemus.
- 7.2. Defineerige süsteemi ja protsessi põhiülesanded.

- 7.3. Milles seisnevad süsteemi arenduse ja protsessi juhtimise eesmärgid?
- 7.4. Tooge välja süsteemi ja protsessi olulisemad sarnasused ja erinevused.

8. Milles seisneb süsteemi ja/või protsessi parendamine?

Lahenduse käik

- 8.1. Defineerige optimeerimise eesmärk.
- 8.2. Kuidas tekivad alternatiivsed variandid?
- 8.3. Tooge näide parima lahenduse saamiseks.
- 8.4. Kuidas hinnata tulemust?

9. Millised on olulisemad protsessid neljanda taseme süsteemil SCM (tarneahelate juhtimine)? Milles seisneb nende olemus ja eesmärgid? Kuidas nad omavahel seotud on?

Lahenduse käik

- 9.1. Selgita välja SCM-i olemusskeem. Defineeri SCM-i põhieesmärk.
- 9.2. Defineeri SCM-i põhiülesanded ja -tulemid.
- 9.3. Kirjelda põhiprotsesside olemus oodatud tulemusteni jõudmiseks.
- 9.4. Kuidas on valitud põhiprotsessid omavahel seotud (andmete kasutamine, tulemusteni jõudmine, tulemuste interpreteerimine jms)?

10. Kuidas juhitakse ostuprotsessi (tootearendusprotsessi vms) ettevõttes?

Lahenduse käik

- 10.1. Defineeri ostuprotsessi põhieesmärk ja põhietapid.
- 10.2. Defineeri ostuprotsessi põhisisendid ja peamised tulemid.
- 10.3. Kuidas ja milliste kriteeriumite alusel on otstarbekas hinnata ostuprotsessi tulemuslikkust?
- 10.4. Kirjelda, kuidas saaks parandada tulemusi (protsessi parendamine).

11. Milles seisneb tootearendusprotsessi ja turundusprotsessi (turundusprotsessi ja müügiprotsessi) omavaheline integratsioon?

Lahenduse käik

- 11.1. Defineeri tootearendusprotsessi ja turundusprotsessi põhieesmärgid ja -tulemid.
- 11.2. Milles seisneb nende protsesside ühisosa?
- 11.3. Kuidas nimetatud protsessid teineteist vastastikku mõjutavad?
- 11.4. Kirjelda, kuidas läbi hästitoimiva integratsiooni saaks parandada tulemusi.
- 11.5. Milles seisneb nimetatud protsesside integratsioon?

12. Milles seisneb tootmise juhtimise ja tootmistehnoloogia vaheline integratsioon?

Lahenduse käik

- 12.1. Pane kirja tootmise juhtimise põhilised ülesanded.
- 12.2. Pane kirja tootmistehnoloogiaga seotud põhiülesanded.

- 12.3. Mis eesmärki täidavad tootmise juhtimisega seotud ülesanded ja tootmistehnoloogiaga seotud ülesanded?
- 12.4. Kuidas nad on omavahel seotud läbi ühise põhieesmärgi? Milles see põhieesmärk väljendub ja kuidas seda mõõta?
- 13. Kuidas on töökoht ettevõttes integreeritud tootmissüsteemiga?

Lahenduse käik

- 13.1. Defineerige töökoht ja tema põhiolemus.
 - 13.2. Defineerige tootmissüsteem ja tema põhiolemus.
 - 13.3. Millised vahetud seosed on töökohal tootmissüsteemiga? Tooge näited nii infotehnoloogilistest seostest kui ka logistilistest.
 - 13.4. Kuidas nende seoste olemus väljendub praktikas?
 - 13.5. Mil viisil läbi vastavate seoste olemuse on võimalik optimeerida tulemuslikkust?
14. Kirjeldage tootmissüsteemi ja tootmisprotsessi ühisosadid ja erinevusi.

Lahenduse käik

- 14.1. Defineerige tootmissüsteem. Mis on tootmissüsteemi peamised koostisosad?
 - 14.2. Defineerige tootmisprotsess. Mis on tootmisprotsessi peamised koostisosad?
 - 14.3. Kuidas on tootmisprotsess seotud tootmissüsteemiga?
 - 14.4. Vaadeldge tootmissüsteemi ja tootmisprotsessi nii tootmise juhtimise kui ka tootmistehnoloogia seisukohtadest lähtuvalt.
15. Kuidas hinnata konkreetse süsteemi või protsessi tulemuslikkust?

Lahenduse käik

- 15.1. Milles seisneb tulemuslikkuse hindamine?
- 15.2. Kuidas valida tulemuslikkuse hindamise kriteeriumid?
- 15.3. Kuidas korraldada andmete kogumise protsessi?
- 15.4. Kuidas interpreteerida tulemusi?

Viited

- [3.1] Rembold,U., Nnaji,B. O., Storr, A. Computer Integrated Manufacturing and Engineering. Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
- [3.2] Virtual manufacturing [WWW] <http://arhiv.org/ftp/arhiv/papers/0748.0495> (15.04.2013)
- [3.3] Building the Infrastructure for e-Manufacturing. Executive Summary. Unifi Technology Group & Software Toolbox, Inc.
- [3.4] Koc, M., Ni, J., Lee, J., Bandyopadhyay, P. Introduction to e-Manufacturing. The Industrial Information Technology Handbook. CRC Press LLC, 2005.
- [3.5] Porter, M. E. The Competitive Advantage of Nations. First Free Press Edition, 1990.
- [3.6] Deming, W. E. The New Economics. Cambridge, MA, MIT, 1994.
- [3.7] Afuah, A. Business Models: A Strategic Management Approach. Boston, McGraw Hill / Irwin, 2007.
- [3.8] Oakland, J. S. Terviklik kvaliteedijuhtimine. OÜ Külim, 2006.
- [3.9] Scholtes, P. R. Juhi käsiraamat. Kuidas motiveerida meeskonda ja jõuda parima tulemuseni. Tallinn 2001.
- [3.10] Uuenduslik tootmine. Autorite kollektiiv. Tallinn 2011, 447 lk.
- [3.11] Perens, A. Projektijuhtimine. Kirjastus Külim. 1999.
- [3.12] Steinbuch, P. Projektorganisation und Projektmanagement. Ludwigshafen (Rhain): Khiel, 1998.
- [3.13] Wikipedia [WWW] https://en.wikipedia.org/wiki/Customer_relationship_management (15.04.2013)
- [3.14] Kumar, V., Reinartz, W. J. Customer Relationship Management: A Database Approach, 2007.
- [3.15] Lend, E. Äriolastika loengukonspekt, Tallinn, 2011.
- [3.16] Lambert, D. M. Supply Chain Management: Processes, Partnership, Performance (<http://www.scm-institute.org>) 3rd ed., 2008.
- [3.17] Hopp, W. J., Spearman, M. L. Factory Physics, 2-nd ed. Irwin. McGraw Hill, 2011.
- [3.18] Küttner, R. Production Planning for a Supply Chain in a Low-volume and Make-to-order Manufacturing Environment. Estonian Journal of Engineering, 2009, 15, I, pp 48-60.
- [3.19] Rosen, J. Development of Industrial Information Systems Based on Standards. Doctoral Thesis in Production Engineering. Stockholm, Sweden, 2010.
- [3.20] Waldner, J.-B. Principles of Computer Integrated Manufacturing. John Wiley & Sons, 1992.
- [3.21] Dorf, R. C., Kusiak, A. Handbook of Design, Manufacturing and Automation. 1994, p. 1014.
- [3.22] Bray, O. H., Computer Integrated Manufacturing – The Data Management Strategy. Digital Press, USA, 1998.
- [3.24] Kletti, J. Konzeption und Einführung von MES-Systemen: Zielorientierte Einführungsstrategie mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Fallbeispielen und Checklisten. Springer-Verlag, Berlin, 2011.
- [3.25] Becker, T., Kugeler, H., Rosemann, M. Process Management. A Guide for Design of Business Processes. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.

- [3.26] Pettai, E. Tootmise automatiseerimine. TTÜ elektriajamite ja jõuelektronika instituut. Tallinn, 2005.
- [3.27] Internet of Things Strategic Research Roadmap SINTEF, Norway; EUCommission, Belgium; ETSI, France; TXT, e-solutions, Italy; ATB GmbH, Germany; IoT-A Projects, France; ATOS Origin, Spain; EMF, UK; Institute of Manufacturing, University of Cambridge, UK; Fraunhofer FIT, Germany; Centre for Innovation in Distributed Systems, Institute of Technology, Ireland.
- [3.28] Chioreanu, A., Brad, S. Future Internet and ITIL for Intelligent Management in Industrial Robotics Systems. Bulletin of the Polytechnic Institute of IAȘI, 61, 6, 2011, pp. 23-30.
- [3.29] Onori, M., Maffei, A., Durand, F. Y. The IDEAS Plug & Produce System. International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies.
- [3.30] Miles, S. B., Sarma, S. E., John R. Williams, J. R. (eds.). RFID Technology and Applications. London: Cambridge University Press. 2011.
- [3.31] Alting, L. Manufacturing Engineering Processes. New York 1994.
- [3.32] Kulu, P. (toim). Mehaanikainseneri Käsiraamat. TTÜ kirjastus, Tallinn, 2012. (Mechanical and Metal Trades Handbook).
- [3.33] Kulu, P., Kübarsepp, J., Laansoo, A., Veinthal, R. Materjalitehnika II. Konstruktsioonmaterjalide tehnoloogia. TTÜ Kirjastus, Tallinn, 2015.
- [3.34] Gutowski, T. Machining, 2009. MIT.
- [3.35] Groover, M. P. Principles of Modern Manufacturing. Materials, Processes and Systems. Wiley, 2010.
- [3.36] Handbook of Manufacturing Engineering. Walker, J.,M. (editor). New York, Marcel Deccer, 1996.
- [3.37] Riives, J., Lavin, J. Tootmise korraldamine. Kutseõppeasutuste õpik. INNOVE, Tallinn 2014.
- [3.38] Harrington, H. J. Business Process Improvement: The Breakthrough Strategy for Total Quality, Productivity, and Competitiveness. New York. McGraw-Hill, 1991.
- [3.39] Hitomi, K. Manufacturing Systems Engineering. Osaka University. Japan. Taylor & Francis Ltd. London.
- [3.40] Systems Engineering Fundamentals. Defence Acquisition University Press, 2001.
- [3.41] Systems Engineering Handbook. NASA/SP-2007-6105 Rev 1, Dec.2007.
- [3.42] Olivwer, D. W., Kelliher, T. P., Keegan, J. G. Jr. Engineering Complex Systems with Models and Objectives. McGraw Hill, 1997.
- [3.43] EIA Standard IS-632. Systems Engineering, Dec. 1994.
- [3.44] Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Forschungsunion, Acatech. April 2013, Germany.
- [3.45] Vermesen, O., Friess, Pe., Guilleman, P. etc Internet of Things Strategic Research Roadmap. EMF, ETSI, SINTEF, etc. 2012.
- [3.46] Industry 4.0. Opportunities and Challenges of the Industrial Internet. PWC, 2014.
- [3.47] Festo Didactic Training factories and solutions. Factory 4.0. FESTO, 2014.
- [3.48] Lin, H. K., Harding, J. A. A manufacturing system engineering ontology model on the semantic web for inter-enterprise collaboration. Computers in Industry, 58 (2007), pp. 428-437.

- [3.49] Lin, H. K., Harding, J. A., Shahbaz, M. Manufacturing system engineering ontology for semantic interoperability across extended project teams. *International Journal of Production Research* 42 (24) 2004, 5099-5118.
- [3.50] Lõun, K., Lavin, J., Riives, J., Otto, T. High Performance Workplace Design Model. *Estonian Journal of Engineering*, 19, 1, 2013, pp 47-61.
- [3.51] Lõun, K. Company's Strategy Based Formation of e-Workplace Performance in the Engineering Industry. Doctoral Thesis on Mechanical Engineering. TUT Press, 2013.
- [3.52] Lõun, K., Riives, J., Otto, T. Evaluation of the Operation Expedience of Technological Resources in a Manufacturing Network. *Estonian Journal of Engineering*, 17, 1, 2011, pp 51-65.
- [3.53] Eversheim, W. *Prozessorientierte Unternehmensorganisation. Konzepte und Methoden zur Gestaltung schlenker Organisationen*. Springer-Verlag, Berlin, 1995.
- [3.54] Smith, H., Fingar, P. *Business Process Management: The Third Wave*.
- [3.55] Brache, A. P. *How Organizations Work: Taking a Holistic Approach to Enterprise Health*.
- [3.56] Harrison-Broninski, K. *Human Interactions: The Heart and Soul of Business Process Management*.
- [3.57] Harrington, H. J. *Business Process Improvement: The Breakthrough Strategy for Total Quality, Productivity, and Competitiveness*. New York. McGraw-Hill, 1991.
- [3.58] Becker, T., *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*. Springer Verlag, Berlin, 2005.
- [3.59] EVS-EN ISO 9001:2008. *Kvaliteedijuhtimissüsteemid*. Nõuded.
- [3.60] ISO 10628 *Flow Diagrams for Process Plants. General Rules*.
- [3.61] Kaplan, R. S., Norton, D. P. *Tasakaalus tulemuskaart: strateegialt tegudele*. Pegasus, Tallinn, 2003. (The Balanced Scorecard. From Strategy to Action).
- [3.62] Bell, S. *Lean Enterprise Systems: Using IT for Continuous Improvement*. New Jersey. John Wiley & Sons Inc., 2006.
- [3.63] Pande, P. S., Neumann, R. P., Cavanach, R. R. *Kuue sigma tee: kuidas GE, Motorola jt. tippettevõtted oma sooritusi lihvivad*. Pegasus, Tallinn, 2002. (The six sigma way : how GE, Motorola, and other top companies are honing their performance).
- [3.64] Hiroyuki, H., Furuya, M. *JITis Flow: Practice and Principles of Lean Manufacturing*. PCS Press, 2006.
- [3.65] Robbins, S. F., Judge T. A. *Organizational Behaviour*. 12-th ed. Pearson Education Inc., 2007.
- [3.66] Durkatcova, M., Lavin, J., Karjust, K. KPI Optimization for Product Development Process. *Annals of DAAAM for 2012*, 23, 1, pp 1079-1084.
- [3.67] Parmenter, D. *Key Performance Indicators (KPI). Developing, Implementing and Using Winning KPI-s*. Willey, 2010.
- [3.68] Sumanth, D. J. *Productivity Engineering and Managemamet*. McGraw – Hill Book Company, 1994.
- [3.69] Sumanth, D. J. *Total Productivity Management. A Systematic and Quantitative Approach to Compete in Quality, Price and Time*. St Luice Press, Florida, 1998.
- [3.70] Kalle, E. *Tootlikkuse kasvu juhtimine ettevõttes*. Kirjastus Külim, Tallinn, 2007.
- [3.71] Peterson, J., Smith, R. *The 5S Pocket Guide*. New York: Productivity Press, 1998.
- [3.72] Sheigo, S. *A Revolution in Manufacturing: The SMED System*. Productivity Press, 1985.

- [3.73] Bulsuk, K. G. An Introduction to 5-why. April 2, 2009 [WWW]. <http://www.bulsuk.com/2009/03/5-why-finding-root-causes.html> (31.01.2013)
- [3.74] Pajuste, A. Uus relv töösturitele – 20 võtit. Direktor, 5, 2004, lk 30-33.
- [3.75] Imai, M. Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success. New York, McGraw-Hill/Irwin, 1986.
- [3.76] Imai, M. Gemba Kaizen: A Common-sense, Low-Cost Approach to Management. 1-st ed. New York, McGraw-Hill/Irwin, 1997.

4. TOOTMISSÜSTEEMID. KAVANDAMINE JA KASUTAMINE

4.1 Tootmine

Tootvate ettevõtete põhitegevus on tootmine. See on tootele väärtust andev tegevus, mille alge peitub inimühiskonna vajadustes. **Toode** on kliendi vajadustele ja tehnilistele tingimustele vastav tootmistegevuse lõpliku staadiumi tulem. Tootmise paradigma on liikunud lihtsast ja odavast tootmisest kliendile orienteeritud looduskeskkonda säästva tootmise suunas, kusjuures toodete omadused ja kasutusotstarve järjest laienevad. Tooted muutuvad keeruliseks ja nende nomenklatuursus järjest laieneb.

Tänapäeva toodetele on omane:

- lühike planeeritud elukaar;
- suur nomenklatuursus;
- suhteliselt väike maksumus;
- suured funktsionaalsed võimalused;
- kõrge töökindlus;
- lihtne käsitlus;
- meeldiv disain;
- roheline mõtlemine, s.o taaskasutatavus.

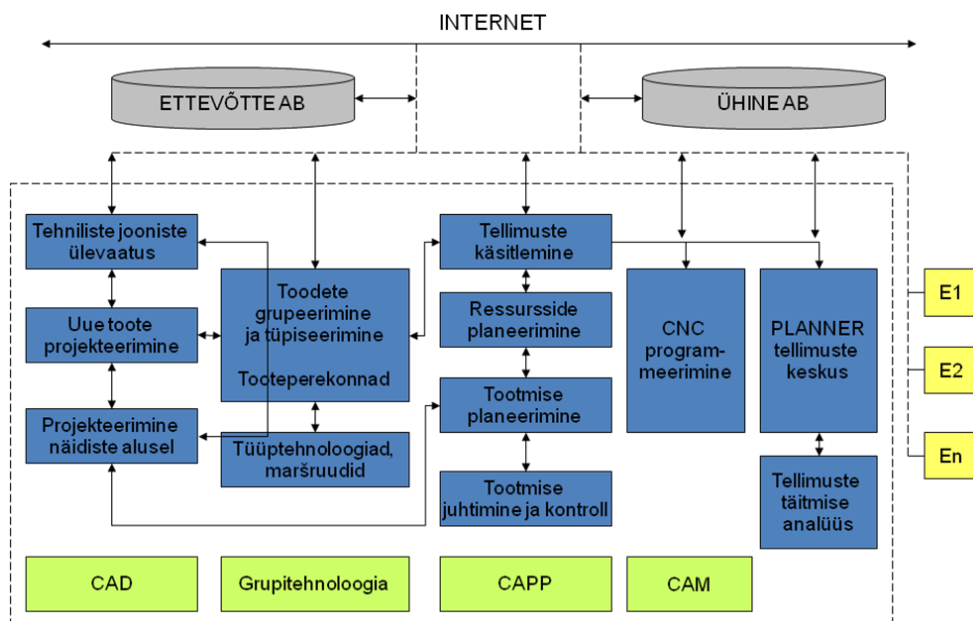
Seda kõike tuleb arvestada nii tootmissüsteeme kujundades kui ka tootmistegevust korraldades. **Tootmine** on oma olemuslikult seotud nii kogu ettevõtte (ettevõtte tasand) kui ka vahetult tootmiskeskonnas (tehase tasand) toimuvaga [4.1]. Ettevõtte tasandil on tegemist sagedamini tootmisprotsesside väljatöötamise ning tootmise planeerimise või siis hoopiski tootmissüsteemide kavandamisega (seadmete valik, seadmete arvu määramine, paigutus-skeemide väljatöötamine jms). Tootmiskeskonnas toimub juba vahetu tootmisprotsesside realiseerimine koos tootmise juhtimisega, materjalide liikumise voogude organiseerimise, kvaliteedikontrolli ja valmistoodete kohaletoimetamiseks ettevalmistamisega.

Tootmises kasutatakse masinaid, tööriistu ja tööjõudu, et toota tooteid või kaupu. Tootmine võib olla korraldatud erinevates mastaapides: käsitööstuslikust väiketootmisest kuni kõrgelt automatiseeritud masstootmiseni. Kõikidel juhtudel muudetakse toormaterjalid valmistootteks. Käsitööstuslikku tootmise ettevõtteid nimetati varem manufaktuurideks. Nimetus tuleneb ladina keelest: *manus* (käsi) ja *factus* (tegema), ingliskeelne väljend *manufacture* on ka sealt pärit *manu factus* (käega tegema). Tootmist tähistav ingliskeelne *production* tuleneb ladinakeelsest *producere* (edasi tooma). Inglise keeles kasutatakse tootmisest rääkides mõisteid *manufacturing* ja *production*.

Tootmise aluseks on tootmisprotsess (kuidas toodetakse) ja tootmissüsteem (kus toodetakse). **Tootmisprotsess** on tegevuste kogum (valmistamine, koostamine, pinnakatete paigaldamine, materjaliomaduste muutmine, mõõtmine, kontroll jne), mille tulemusena materjalid ja pooltooted muudetakse lähteülesandele vastavaks (geomeetriline kuju, mõõtmed, funktsioonid).

sionaalsed omadused, kvaliteet jms) valmistoodanguks. **Töötlemismeetod** on tehniline lahendus etteantud omaduste ja funktsionaalsustega toodete valmistamiseks. Töötlemismeetodite liigitust ja nende otstarbekat kasutamist on käsitletud antud kõrgkooliõpiku teistes peatükkides. Põhiliste töötlemismeetodite klassifikatsioon on toodud [4.2] ja nende olemuse kirjeldus [4.2, 4.3]. Töötlemismeetodi realisatsioon vastavas tehnoloogilises seadmes on aluseks tehnoloogilise protsessi konkreetse operatsiooni või operatsioonide grupi sooritamiseks. **Tehnoloogiline operatsioon** on tootmisprotsessi osa, mis toimub ühel ja samal töökohal. Tehnoloogilise operatsiooni käigus realiseerub suhe, mis iseloomustab protsessi automatiseerituse taset: inimene-masin (käsitsitöö või poolautomatiseeritud töö); masin-masin (pool- või täisautomatiseeritud töö).

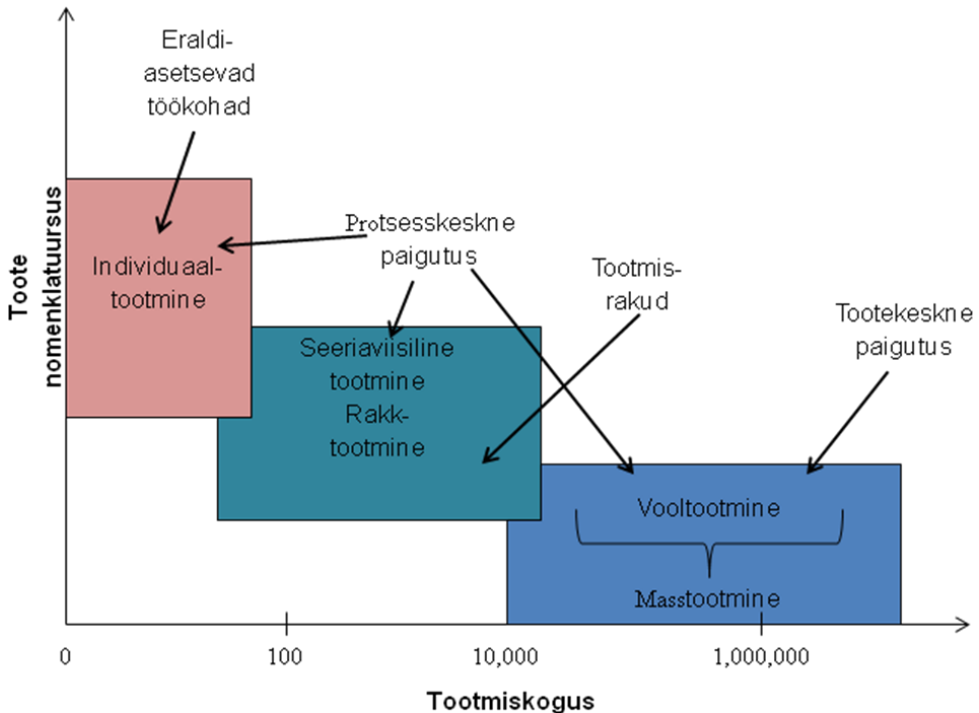
Manufacturing (valmistamine) on laiem mõiste ja hõlmab lisaks vahetule tootmisele ka kogu tootmise ümbrust (tootmistegevuse korraldamine). *Production (tootmine)* on konkreetsele tootmistehnoloogiale tuginev tegevus toote saamiseks ehk tootmisprotsessi realiseerimiseks. Eesti keeles kasutatakse terminit *tootmine* sageli nii kitsamas kui ka laiemas tähenduses. Toodete valmistamist lähteülesandest lõpptooteni, hõlmates ka korralduslike funktsioone, on kujutatud seel 4.1. Sele 4.1 käsitleb ka tootmise ettevalmistamist, mis on tootmistegevusega väga tihedalt seotud, aga ei ole siiski tootmise korraldamine või vahetu tootmine. Vahetu tootmise kõige olulisemateks koostisosadeks on **tootmiseseadmed** (mis) ja **tootmisprotsessid** (kuidas). Selleks, et toota tulemuslikult (odavalt, pidada tähtaegadest kinni ja säästa ressursse), on vaja ka tootmist planeerida ja juhtida. Kõigest eelnevast on vähe kasu, kui tootmissüsteem ise ei vasta ettevõtte vajadustele ja tegevusstrateegiatele.



Sele 4.1 Tootmistegevus ettevõttes (manufacturing)

4.1.1 Tootmistüübid

Sõltuvalt tootmismahudest, toodete nomenklatuursusest (eriliigiliste toodete arv), nende tootmise regulaarsusest (kui tihti samaliigiline toode uuesti tootmisse tuleb), stabiilsusest (kui pikka aega samaliigiline toode tootmises on) eristatakse kolme tüüpi tootmist: üksik-, seeria- ja masstootmine [4.1, 4.4]. Toodete nomenklatuursust ja tootmiskogust iseloomustav diagramm on kujutatud seel 4.2.



Sele 4.2 Erinevate tootmistüüpide rakendusvaldkonnad

Üksiktootmisele on iseloomulik laia nomenklatuuriga toodete valmistamine suhteliselt väikestes kogustes ja tihti ka üksikult. Toodete valmistamine kas ei kordu üldse või kordub mit-teperioodiliselt. Üksiktootmist iseloomustab erineva sisuga operatsioonide teostamine töö-kohtadel, sellepärast peavad tootmisseedmed olema universaalsed. Üksiktootmises valmis-tatakse tavaliselt tooteid individuaaltellimuste alusel, kus nõutakse kliendi eritingimuste täit-mist. Üksiktootmise eelised ja puudused on toodud tabelis 4.1.

Tabel 4.1 Üksiktootmise rakendus

Eelised	Puudused
Üksiklahendus on huvitav	Toote hind tavaliselt kõrgem
Kvaliteetne ja kliendile vastav toode	Madal tootlikkus
Unikaalne lahendus	Käsitöö suur osatähtsus
Töötaja peab oskama erinevaid operatsioone	Suured palgakulud
Tulemusele orienteeritus	Kõrged kompetentsinõuded
Universaalne töökoht	Kõrged koolituskulud

Üksiktootmise näide on toodud selel 4.3. Üksiktootmine või individuaaltootmine on sageli tellimusele orienteeritud tootmine. Tellija määrab, missugused on toote tehnilised tingimused ja kasutamisetstarve.



Sele 4.3 Raadioteleskoop – näide individuaaltellimusena valmistatavast tootest

Seeriatootmise puhul valmistatakse tooted partiide või seeriatena. Toodete seeriad korduvad kindla ajavahemiku järel. Seeriatootmine on laia nomenklatuuriga tootmine, kus üksikutele töökohtadel tehtavad erinevad operatsioonid korduvad perioodiliselt. Toote partii valmistatakse algusest lõpuni, seejärel kohe või teatava ajavahemiku järel asutakse uue partii tootmisele. Seeriaviisiliselt valmistatakse nii lõpptooteid kui tehakse ka allhanketöid. Seeriaviisiline tootmine eeldab pidevat nõudlust. Sarnaste või lähedaste omadustega toodete valmistamine (toote perekonnad) annab tootjale laialdasemaid võimalusi töökohtade korraldamiseks ja alandab tootmise omahinda. Seeriaviisilise tootmise eelised ja puudused on toodud tabelis 4.2.

Tabel 4.2 Seeriaviisilise tootmise rakendus

Eelised	Puudused
Suurem tootlikkus	Peab olema tagatud pidev nõudlus
Lihtsam tootmist planeerida	Püsiklientide olemasolu vajadus
Ettemääratud tootmisprotsessid ja seadmete planeeringud	Muudatused tootmises aeglased ja raskemini teostatavad
Madalam toote omahind	Kallim tootmissüsteem
Spetsifitseeritud töökohad võimaldavad kergemini tootmist organiseerida	Väiksem universaalsus nõuab pikemaid seadistusaegu
Madalamad tööjõukulud	Vajalik regulaarselt teostada uuendusi konkrentsis püsimiseks

Seeriaviisiliselt valmistatavate toodete näited on toodud seel 4.4.



Sele 4.4 Toodete perekond

Masstootmises (*mass production*) valmistatakse samanimelisi tooteid suurtes kogustes pidevalt pikema aja kestel. Masstootmist ei iseloomusta mitte niivõrd väljalastavate toodete arv, kuivõrd enamikule töökohtadele kinnistatud ainult ühe, alaliselt korduva operatsiooni täitmine. Väljalaskeprogramm masstootmises tingib võimalikult kitsast töökohtade spetsialiseerimist, kusjuures igale neist kinnistatakse ainult üks operatsioon, tootmisriistad asetatakse tootmisliinile tehnoloogilise protsessi teostuse järjekorras. Igal liinil valmistatakse vaid sellele omaseid tooteid. Kui kõigil töökohtadel on operatsiooni kestus võrdne või kordne ja vastab etteantud tootlikkusele, siis tehakse tööd liinil pideva vooluna ja ettemääratud **taktiga** (rüt-miga).

Vooltootmisel mõjutab takt (rütm) oluliselt tehnoloogilise protsessi koostist, kuna iga operatsiooni tükiaeg peab olema võrdne või kordne väljalaske taktiga, et kindlustada kõikide töökohtade ühtlane koormamine. Eeltoodust nähtub, et masstootmine on oma olemuselt nagu

pidev vooltootmine. Masstootmine on majanduslikult otstarbekas piisavalt suure tootmisprogrammi puhul.

Valmistamisprotsessi iseloomu järgi klassifitseeritakse tootmine:

- 1) pidevtootmiseks ja
- 2) tükitootmiseks.

Pidevtootmine toimub katkematu tehnoloogilise protsessi rakendamisel. Pidevprotsessi ehk pidevvalmistamise eripära seisneb võimaluses saada pidevalt lõpptoodangut. Pidevtootmise protsesse kasutatakse näiteks metallurgiatööstuses (raudteeliiprite kuumvaltsimine vahetult sulametallist jms), keemiatööstuses (bensiooni tootmine jms) või toiduainetetööstuses (õllepruulimine jms).

Tükitootmise puhul toimub tootmisprotsess üksikute järjestikuste etappidena reeglina erinevatel töökohtadel. Tükitootmine ehk toodete diskreetne valmistamine toimub kas individuaaltootmisena (üksik kordumatu toode), seeriaviisilise tootmisena (määratud suurusega partiid) või projektiviisilise tootmisena (organisatsiooniline vorm tellimuste täitmiseks ettevõttes).

Projektipõhise valmistussüsteemi loomist põhjustab tüüpiliselt valmistatava toote suur keerukus, originaalne komplitseeritud lahendus vms. Tänapäeval kasutatakse isegi autotööstuses (näiteks Audi Q5) või ka lennukitööstuses (Boeing 777) projektipõhise tootmise põhimõtteid.

Väljalaske takt on ajavahemik, mille vältel valmib iga järgmine samanimeline toode. Takt määratakse tehnoloogilise protsessi projekteerimisel vooltootmise tingimustes seosega:

$$T = \frac{F_a \cdot 60 \cdot K_o}{N} \quad \text{MIN / TK,}$$

kus F_a – tegelik aastane ajafond; K_o – tegur, mis võtab arvesse organisatsioonilis-tehnilised, ümberhäälestamise ja muud kaod ($K_o = 0,75-0,8$); N – aastaprogramm tk.

Samuti võib öelda, et vooltootmise kõige traditsioonilisemaks rakenduskohaks on senini olnud autotööstus (vt sele 4.5). Samas kliendid eelistavad erisusi, toodangu vahelduvust ja iseotsustusõigust. Kõik see on tinginud vajadused masstoomises (vooltootmises) kasutada individuaal- ja/või seeriaviisilise ja/või projektipõhise tootmise põhimõtteid. Sellist tootmiskorraldust, mis annab võimaluse suurele paindlikkusele ja kiirele ümberhäälestusele, kutsutakse kliendikeskseks masstootmiseks. Kliendikeskne masstootmine tähendab valmistada tooteid või pakkuda teenuseid igale individuaalsele tarbijale tema soovide järgi, kuid säilitades sealjuures masstootmise efektiivsuse (prof B. Joseph Pine, RWTH Aachen University).

Kui tootmisprogramm ei kindlusta töökohtade koormamist sama operatsiooniga pikema aja vältel, siis organiseeritakse **seeriatootmine**. Et seeriatootmises valmistatakse tooteid korduvate partiidena, siis rakendatakse seeriatootmises sisuliselt **vahelduv-vooltootmist**. Sellisel juhul kinnistatakse igale tööpingile tehnoloogiliselt ühetüübiliste, perioodiliselt töötlemisele tulevate detailide erinevad operatsioonid ning teatud ajavahemiku järel seadistatakse liin ümber uuele detailile.

Ka unifitseerimisel ja standardimisel on tänapäeval väga oluline koht nii ettevõtete tegevusstrateegiates kui ka tootmissüsteemide kavandamisel. Mõlemad aitavad vähendada tootmiskulusid ja toodete omahinda. Kui see ei õnnestu ühe ettevõtte piires, siis otsitakse võimalusi tarnestruktuuride planeerimisel.



Sele 4.5 Vooltootmise näide

Tootmispartii suurus, milleks on üheaegselt tootmisse antud toorikute arv, määratakse seeriatootmisel kindlaks terveist reast teguritest: aastane väljalase (aastaprogramm), väljalaske kalendrilised tähtajad, tööpinkide seadistamise töömahukus, töökohtade vaheladude optimaalne suurus jms. Igal juhul peab olema täidetud tingimus, et partii suurus oleks kordne vahetuse programmiga, vastasel juhul tuleb tööpinki seadistada rohkem kui üks kord vahetuses.

Seeriatootmises kasutatav **vooluviisiline** töö tagab:

- 1) tootmistsükli tunduva lühendamise;
- 2) operatsioonidevahelise varu ja lõpetamata toodangu vähendamise;
- 3) detailide liikumise planeerimise ja tootmise juhtimise lihtsustamise;
- 4) tootmisprotsessi kompleksse automatiseerimise võimaluse.

Tootmise tüüp määratakse operatsiooni kinnistusteguri K_s järgi:

$$K_s = \frac{T}{t_{tk}}, \text{ kus } t_{tk} = \frac{t_{tk}}{n}, \text{ kusjuures}$$

t_{tk} – operatsioonide keskmine tükiaeg; t_{tk} – i-nda operatsiooni tükiaeg; n – operatsioonide arv.

- Kui $K_s \leq 1$ – masstootmine;
 $K_s = 2 \dots 10$ – suurseriatootmine;
 $K_s = 10 \dots 20$ – keskseriatootmine;
 $K_s > 20$ – väikeseeriatootmine.

Lisaks eeltoodud kolmele põhitootmistüübile on tänapäeval oluline rõhuasetus alljärgnevatel tootmiskontseptsioonidel, mis tulenevad eelkirjeldatutest, kuid kuhu on lisatud mitmeid olulisi nüansse.

Paindlik tootmine [4.5, 4.6] kasutab numbriliselt juhitavaid seadmeid (**CNC-tööpingid**), mis on sageli lokaalvõrgustike abil ühendatud ühtsesse arvutite süsteemi. Kui lisaks tootmiseseadmetele on ühtsesse võrgustikku ühendatud ka projekteerimise töökohad, mõõte- ja kontrollioperatsioone sooritavad töökohad, siis taolist tootmist nimetatakse **raalintegreeritud tootmiseks** (CIM) [4.1, 4.7, 4.8]. Paindlik automatiseeritud tootmine võimaldab süsteeme kiiresti ümber häälestada ja seetõttu valmistada tooteid laia nomenklatuursusega ja väikeste partiidena, kuid suure tootlikkusega.

Kliendile orienteeritud tootmine on paind(automatiseeritud)tootmise abil kliendi soovidele vastavate toodete valmistamine [4.9, 4.10]. Kliendile orienteeritud tootmine lähtub masstootmisele omasest tootmise madalast maksumusest, kombineerides selle paindliku ja kliendikeskse tootmiskorraldusega. Selline kombinatsioon on võimalik vaid ettevõtte ressursside ja äriprotsesside väga ratsionaalse planeerimise ja kasutuse puhul. Eelnimetatutest on tänapäeval välja arenenud ka uue tööstusrevolutsiooni tööstus 4.0 põhimõtted.

Säästlik tootmine eeldab uudsete tehnoloogiate ja materjalide väljatöötamist, mis võimaldavad toota nii, et ei teki ohtlike jäätmeid ega kahjulikke emissioone õhku, maapinda ja vette. Säästlik tootmine eeldab samuti valmistatud toodete jääkide töötlemist ja taastootmisse suunamist pärast toote eluea lõppu [4.10].

Kõikidel eelkirjeldatud juhtudel etendab olulist osa integratsioon [4.11]. Seda integratsiooni võime vaadelda nii tootmisprotsessi- kui ka tootmissüsteemikeskselt.

Integratsioon tähendab koostisosadega kombineerimist millegi terviku saavutamise eesmärgil. Integratsiooni mõistet saab üle kanda ka tootmisse. Sel juhul mõistetakse integratsiooni all üksikute allüksuste niisugust sidustamist, mis võimaldab lühendada tootmistsükli kestust ning automatiseerida tootmist.

Ettevõtte erinevate allüksuste või neis olevate seadmete vajaduspõhist ühendamist käsitletakse kui füüsilist integratsiooni. Digitaalsüsteemide integratsiooni (vastavalt standardile ANSI 95.00) käsitleti käesoleva kõrgkooliõpiku eelmises peatükis. Seadmete ja digitaalsüsteemide integratsioon on tänapäeva tootmises väga ulatuslikult kasutatav. See on aluseks ka uutele e-tootmise või kiiresti ümberhäälestatava paindliku tootmise rakendustele, mis vahetult ka seotud neljanda tööstusrevolutsiooni (tööstus 4.0) lähtepõhimõtetega (vt ka 11. ptk).

4.1.2 Tootmistasemed

Enne tootmissüsteemide juurde asumist, tuleb täpsustada tootmise füüsiliste tasemete olemus. Tootmistasemetel on oma jäik hierarhia, olemus, funktsioonid, korraldus ja ulatus. Alltoodud nimistut võib ulatuse poolest käsitleda kui tagurpidi pööratud püramiidi. Viimane selles nimistus on pisut tinglik, kuid terviku mõttes täidab olulisi funktsioone, ja seetõttu välja jätta ei ole paslik. Nendeks olulisteks tasemeteks on:

- äri,
- tehas,
- tootmisjaoskond,
- tootmisrakk,
- töökoht,
- seade,
- täitur.

Äritegevus rajaneb ettevõtte äristrateegial, äriplaani, struktuuril ja sageli ka äri- ja tegevuskorraldust kirjeldavatel dokumentidel, standarditel, reeglitel, juhenditel jms (nt erinevad kvaliteedijuhtimissüsteemid ISO 9001:xx, AS 9001:xx, TQM jt). Äritegevuse üldeesmärk on äripartnerlussidemete ja ettevõttele otstarbekate tarneahelate arendus, kommunikatsioonidemete korraldamine ning andmehalduse kindlustamine ettevõtte äripartnerite (tellijad, tarnijad) vahel. Tulemuslik äritegevus kindlustab kasumliku tootmise. Kõik alltoodud tasemed peavad sellele kaasa aitama.

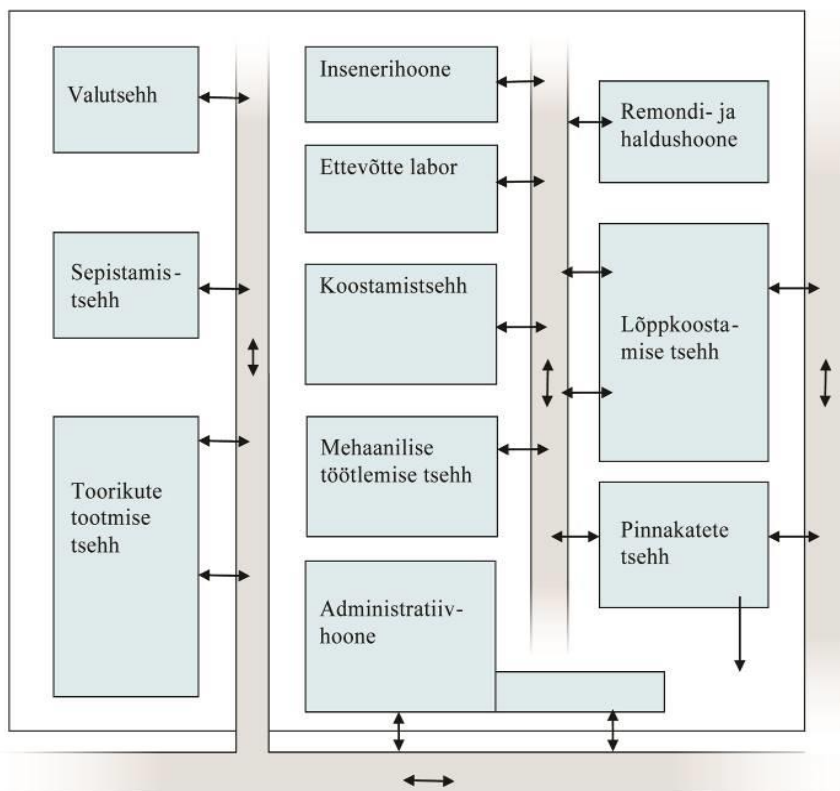
Tehas (ettevõtte) on keskkond (vt sele 4.6), kus toimub äri realiseerimine mitmesuguste toodete valmistamine kaudu (tootvate ettevõtete ehk tehaste puhul).



Sele 4.6 Tehas

Ettevõtte võivad töötajate arvu järgi olla suuremad või väiksemad; nad võivad valmistada lõpptooteid (autod, traktorid, triikraud, mobiiltelefonid, konveierid, laagrid jms) või teha allhanketöid (metallkonstruktsioon, reductor, eriliigilised pöördkehad, summuti). Tihti allhange (nt käigukast) on ühe ettevõtte lõpptoode, samas teisele ettevõttele aga vajalik osa lõpptoote (nt auto) valmistamiseks. Allhange võib samuti olla teostatud väga kõrgel tasemel.

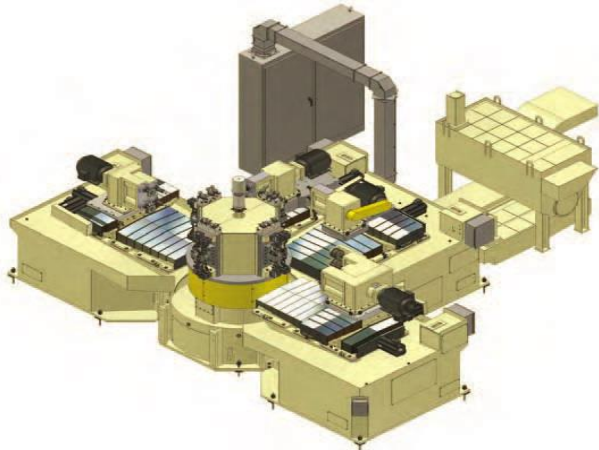
Jaoskond paikneb tavaliselt kas eraldi hoones või ruumis (vt sele 4.7), mis on sisustatud teatud kindlate seadmetega ja varustatud tehnoloogiatega mingi toote valmistamiseks, et teha koostamis- või remonttöid.



Sele 4.7 Allüksuste (jaoskondade) jaotus ettevõttes

Sõltuvalt ettevõtte äristrateegiast ja tootmise korraldamisest on jaoskonnas vastav seadmete paigutus, seadmete liigitus, sarnaste või erinevate tehnoloogiate tarbimine. Kõik need küsimused peavad saama vastused tootmissüsteeme kavandades ja vajadusel (tootmisprogrammide muutumisel) viiakse sisse vajalikud muudatused ja juba toimivate tehaste puhul. Ettevõtte restruktureerimine või tehase rekonfigureerimine on tänapäeval üsna tavaline tegevus, kuna muutuvad nii ärikeskkonnad kui ka -strateegiad.

Tootmisrakk (sele 4.8) on integreeritud kooslus või moodul, mis funktsionaalselt ühendab erinevaid tootmisega seotud füüsilisi osi (seadmed, töökohad, laosüsteemid jms) eesmärgiga võimaldada kompleksne toote/toodete tootmine ühes füüsilises keskkonnas. Tootmisrakk on seotud grupitehnoloogiaga, andes võimalusi tootepere terviklikuks valmistamiseks. Tootmisrakkude ehitust käsitletakse hiljem täpsemalt.



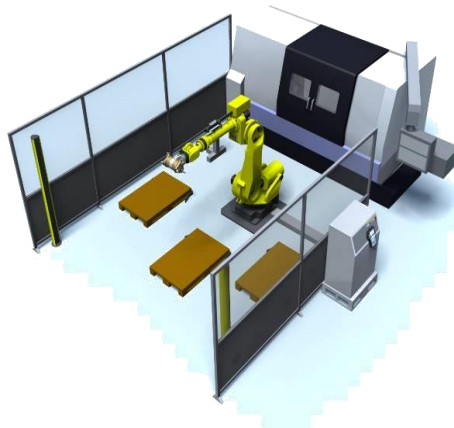
Sele 4.8 Tootmisrakk

Töökoht on tootmisjaoskonna/-raku koostisosa ja tema põhifunktsioon seisneb etteantud tootmisülesande tulemuslikus täitmisel, s.t valmistada etteantud toodete kogus õige ajaks ning kvaliteetselt, kasutades selleks olemasolevaid ressursse parimal võimalikul moel. Soorituseks on töökohal võimalik kasutada erinevaid põhimõttelisi lahendusi, mis erinevad automatiseerituse taseme poolest (vt sele 4.9).

Inimene Masin	Inimene Robot	Inimene Inimene
Robot Masin	Robot Robot	Masin Masin

Sele 4.9 Töökoha realiseerimisvõimalused

Tööd saab töökohal teha rohkem või vähem automatiseeritult või siis manuaalselt ehk käsitsi juhitavate seadmete, tööpinkide abil. Käsitöö teostuse töökoha traditsioonilised väljendusviisid on inimene-inimene (kasutatakse näiteks koostamistööde puhul) ja inimene-masin (näiteks keevituse töökoht, mehaanilise töötlemise töökoht jms). Automatiseeritud töökohad on robot-masin; masin-masin ja robot-robot. Robotiseeritud töökoha olemus on toodud selal 4.10. Erinevate töökohtade näiteid ja kasutamiststarbekust käsitletakse lähemalt edaspidi.



Sele 4.10 Robotiseeritud töökoht

Seade on vahetu töö teostuse füüsiline vahend. Vastava töö sooritamiseks kasutab seade olemasolevaid ja vajalikke tehnoloogilisi võimalusi ning vastavaid tehnoloogiaid. Seadmeid klassifitseeritakse tüüpidesse ja gruppidesse vastavalt realiseeritud töötlemismeetodite rakendamise järgi (näiteks mehaanilise töötlemise seadmed: treipingid treimiseks, puurpingid puurimiseks, freespingid freesimiseks, lihvipingid lihvimiseks jne). Olenevalt tooriku mõõtmetest on treipingid omakorda jaotatud padrunistöötlmise, tsentritega või karusselltreipinkideks). Selline klassifitseerimine oli väga aktuaalne konventsionaalsete tööpinkide puhul. CNC-töötlemine on vastava klassifitseerimise aktuaalsust tubliski vähendanud. Teatavad põhimõtted on ikka säilinud, kuid enam räägitakse tööpingi konstruktsioonist ja tehnoloogilistest võimalustest. Seadmetest, nende ehitusest ja olulisest rollist tootmissüsteemides tuleb edaspidi põhjalikumalt juttu.

4.2 Tootmissüsteemi mõiste ja olemus

Tootmissüsteem on keeruline kompleksüsteem, kus ühelt poolt on füüsiline keskkond, mida iseloomustavad seadmed ja nende juurde kuuluvad töötlemismeetodid ning teiselt poolt on intellektuaalne keskkond, mida iseloomustavad protsessid ja neid suuremal või väiksemal määral (sõltub automatiseerituse tasemest) teostavad inimesed [4.1, 4.5, 4.8].

Tootmissüsteem on kõikide tootvate ettevõtete põhiliseks süsteemiks ja toomisprotsess(id) põhiprotsessiks(ideks).

Tootmissüsteemi koosseisu võivad kuuluda väga erinevad seadmed, nende automatiseerituse tase võib olla vägagi erinev, samuti on nende paigutuse juures mitmeid erinevaid lähte-kohti. Kasutada võib ja sageli ka peab mitmeid alamsüsteeme (toorikute tootmine, mehaani-

line töötlemine, koostamine jms). Seadmete valikul on teatavad kindlad reeglid, nende kasutamine peab alluma kindlaksmääratud tingimustele ja seaduspärasustele ning kokkuvõttes tahab iga ettevõtte saavutada minimaalsete ressursikulutustega maksimaalselt hea tulemuse.

Tootmissüsteemi iseloomustatakse mitmest erinevast aspektist, nagu tootmissüsteemi keerukuse tase ettevõttes, tootmise maht, toodetavate toodete arv, süsteemi tootlikkus, kui kiiresti tellimust saab (on otstarbekas) täita, milliseid tooteid toodetakse tagamaks konkurentsivõime turul. Reeglina käsitletakse erinevaid tootmissüsteemi variante, nagu vooltootmise süsteemid, muudetavad tootmissüsteemid, paindtootmissüsteemid, ümberkonfigureeritavad tootmissüsteemid, varudeta tootmissüsteemid, kulusäästlikud tootmissüsteemid jt.

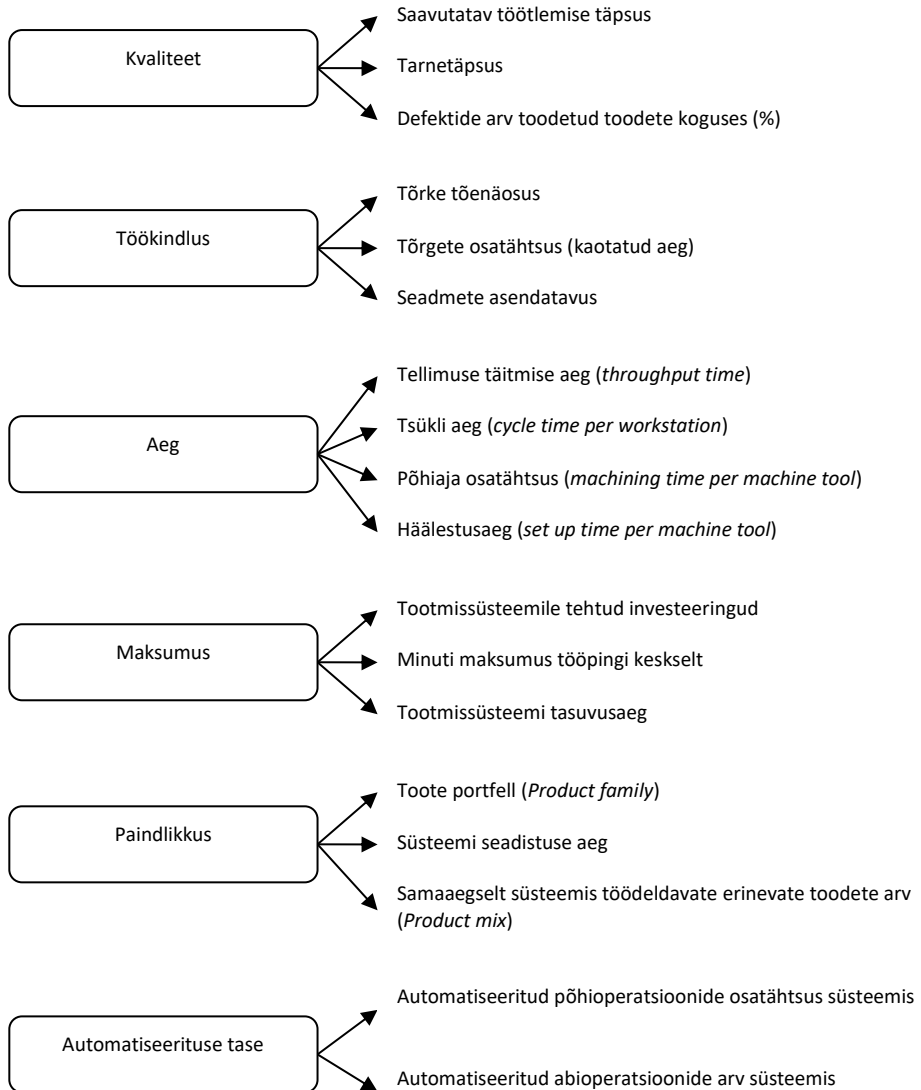
Olenevalt ettevõttest, valmistatavatest toodetest, tootmismahitudest, äristrateegiast, finantsilistest võimalustest, ambitsioonikusest jms võib tootmist ettevõttes üles ehitada üsna erineval moel. Tootmissüsteemi üldiseks iseloomustamiseks on erinevad kriteeriumid: kvaliteedi tagamine, süsteemi töökindlus, tootlikkus, süsteemi maksumus, süsteemi paindlikkus ja automatiseerituse tase, mis on täpsemalt selgitatud seel 4.11.

Tootmiseks vajatakse ressursse: inimesi, masinaid, tehnoloogiaid, materjale ja raha. Seega on tootmisel kaks tähendust: tehniline ja majanduslik. Inseneridel ja juhtidel on vaja tunda mõlema tähenduse sisu. Tootmise tulemuslikkus sõltub nii tehnilisest lahendusest kui ka selle rakenduse otstarbekusest. Liigsed raiskamised võivad tekkida nii seadmepargi ala- või üledimensioneerimisest kui ka kogu süsteemi või üksikute komponentide ebaotstarbekast kasutamisest. Raiskamised saavad alguse töökohtadel ja summeeruvad kogu tootmissüsteemi ulatuses.

Tootmissüsteemis on integreeritud seadmed (taristu, riistvara) ja inimressursid. Tootmissüsteemi ülesanne on teostada üks või enam valmistus- ja/või koostamisoperatsiooni, lähtudes toormaterjalist, toorikust või koostisosadest. Integreeritud seadmestik ja tootmiskorraldus seab töötajatele ühtse ülesande seda süsteemi reaalajas vahetuse jooksul (perioodiliselt) või pidevalt hallata.

Tootmissüsteemi taristu (riistvara) koosneb vastavalt eesmärgile teatud struktuuriga korraldatud tööpinkidest ja/või teistest tootmiseadmetest ning arvutisüsteemidest, mis täidavad ülesandeid tootmissüsteemi rakkudeks (*cells*) ja kogu tootmissüsteemi (*manufacturing system*) ulatuses.

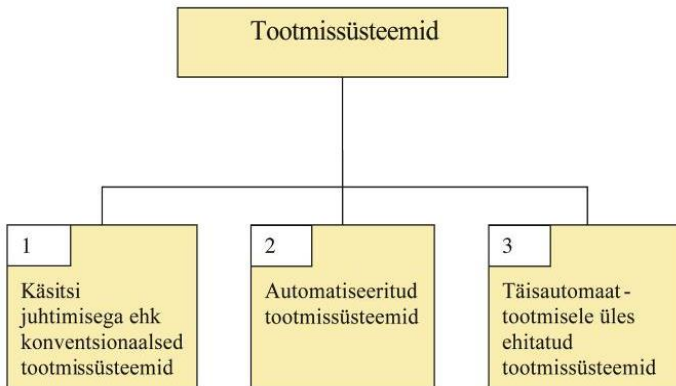
Tootmissüsteemi ülesanne on valmistada tooteid, teostades selleks ühe või mitu erinevat tootmisprotsessi (toorikute tootmine, toodete tootmine, koostamine jms). Toodete valmistamisel tootmissüsteemis on integreeritud kaks tähtsat osapoolt: tootmise juhtimine (organisatsiooniline tegevus) ja vahetu tootmine (tehniline tegevus). Tootmise planeerimiseks ja juhtimiseks (vt 8. ja 9. ptk) kasutatakse vastavaid teooriaid ja tugisüsteeme, tootmiseks aga konkreetseid valmistustehnoloogiaid, tootmisprotsesse ja vajalikku seadmeparki (vt 5. ja 6. ptk).



Sele 4.11 Tootmissüsteemi iseloomustamise üldindikaatorid (kriitilised edutegurid)

4.2.1 Tootmissüsteemide põhiliigitus

Tootmissüsteemide liigitamisel või klassifitseerimisel on mitmeid põhitunnuseid: automatiiseerituse tase, kasutusvaldkond ning rakendatud töötlemismeetodid. Automatiiseerituse taseme järgi jaotatakse tootmissüsteemid kolme gruppi (sele 4.12). Esimesel juhul domineerivad käsitsi juhtimisega tööpingid ja ka erinevad abioperatsioonid (tööriistade vahetus, töödeldavate detailide vahetus tööpingis, toorikute kohaletoomine jms) teostatakse käsitsi.



Sele 4.12 Tootmissüsteemide põhimõttelised olemusvariandid

Automatiseeritud tootmissüsteemide areng sai alguse numbriliselt juhitavate (APJ) tööpinkide kasutamisest tööstuses. Esimene APJ-tööpink loodi 1952. aastal. Esimene töötlemiskeskus koos tööriistamagasi ja tööriistade automatiseeritud vahetusseadmega võeti kasutussele 1958. aastal USA-s. Tänapäeval kasutatakse automatiseeritud tootmissüsteemides väga eriliigilisi paindtootmiseseadmeid ja tööstusroboteid. Üha rohkem funktsioone antakse inimestelt üle masinatele. Seda võimaldab adaptiivseadmete ja -juhtimise kasutuselevõtt. Sel puhul hindab masin ise tehnoloogilise protsessi teostust ja korrigeerib seda. Edasi liigutakse juba iseõppivate süsteemide arenduse suunas. Sellistel iseõppivatel süsteemidel on tavaliselt väga võimsad arvutid ja ekspertsüsteemid [4.4].

Vahel on otstarbekas kasutada ka suhteliselt jäika automatiseerimist ehk automaattootmiseseadmeid või automaatiine, mis on üldjuhul paindliku automatiseerimisega võrreldes odavamad ja võimaldavad protsessi veelgi kiirendada ning seega tõsta tootlikkust. Automaattootmine on sageli omane pidevprotsesside automatiseerimisele. Tükitootmise puhul on plasti survevaluautomaadid suhteliselt jäiga automatiseerimise heaks näiteks. Automaattootmine on tootlik, aga jäik. Automaattootmissüsteemid on üles ehitatud automaattööpinkide ja/või automaatiinide kasutamisele. Tootmise automatiseerimine on alguse saanud just jäigast mehaanilisest automatiseerimisest, mille tuntud esindajateks olid nukkautoomaadid.

Lisaks automatiseerituse tasemele on teiseks oluliseks tootmissüsteemide liigituse kriteeriumiks peamine kasutusvaldkond. Siit tulenevalt (teine tasand) jagatakse tootmissüsteemid nelja gruppi:

- toorikute tootmine;
- detailide valmistamine;
- koostamine;
- viimistlemine.

Edasiselt (ehk kolmanda tasandina) saab liigitada tootmissüsteeme juba põhigruppide (vastavalt esimese ja teise) siseselt kombineerituna, näiteks: CNC-tööpinkidega mehaanilise töötlemise, robotkeevitamise, lehtmaterjalide töötlemise, käsitsi koostamise, pinnakatete jms tootmissüsteeme.

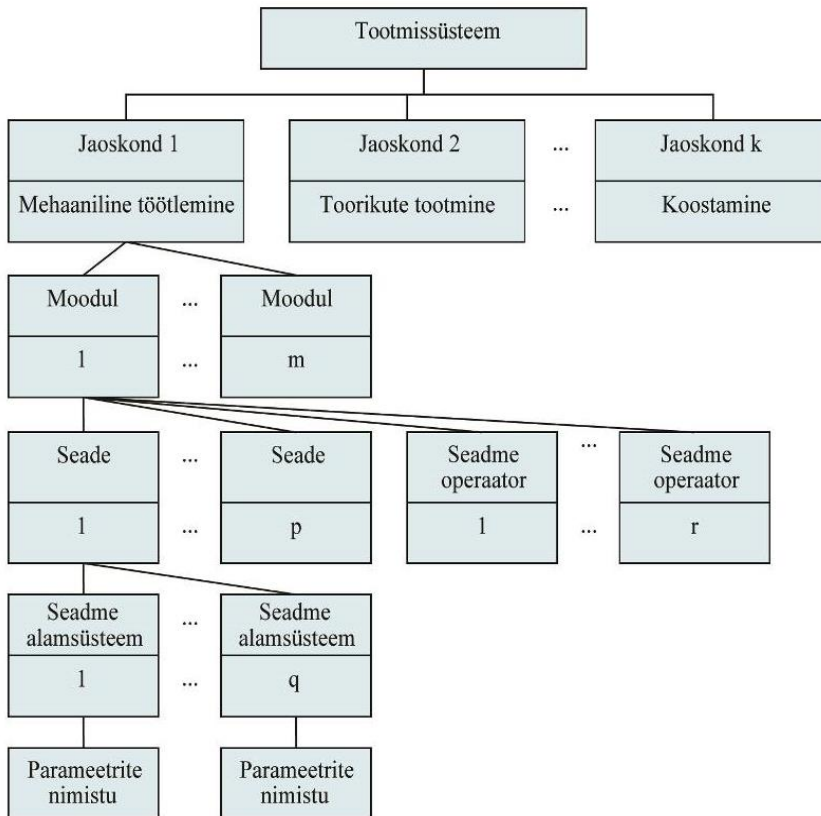
Veelgi detailsemaks saab minna (neljandas tasandis) lähtudes kasutatavatest töötlemismetoditest, mis määratlevad ka kasutatavate seadmete põhitehnoloogilise olemuse. Näiteks lehtmaterjalide töötlemise puhul on kasutatavateks võimalikeks seadmeteks lintsaed, valtspingid, painutuspingid, laserlõikepingid, plasmalõikepingid jms, olles siis ka vastavate tehnoloogiate kandjateks.

Siit saab teha ka järelduse, et tootmissüsteemi koosseisu kuuluvad erinevat tüüpi seadmed, mis on siis vastavate tehnoloogiate teostajad. Milliseid tehnoloogiaid tuleb kasutada, sõltub ettevõtte tooteporfelligist. Toodete keerukusest ja valmistatavast kogusest sõltub tootmisseadmete ja ka kogu tootmissüsteemi automatiseerituse tase. Siit tulenevalt saab esitada tootmissüsteemi põhimõttelise skeemi.

4.2.2 Tootmissüsteemi olemuse kujundamine

Eelnevalt esitati tootmissüsteemi üldine definitsioon. Nüüd lähtume eelkõige füüsilisest keskkonnast. **Tootmissüsteem** on tootmisallüksuste (tsehhid, jaoskonnad, osakonnad, töökohad jms) kooslus (vt sele 4.13), millel on ette nähtud täita kindlaksmääratud tehnoloogilisi ülesandeid (korduvad, ühekordsed) tellimuste täitmisel või seeriaviisilisel tootmisel. Tootmisallüksused on sageli moodustatud põhiliste tehnoloogiliste ülesannete alusel. Kui ettevõtte strateegia näeb ette komplekssete masinate või seadmete valmistamist (lumesahad või -puhurid, väiketraktorid, autode järelhaagised, väikelaevad jms), on tüüpilised tootmise allüksused:

- ettevalmistusjaoskond (toorikute tootmine);
- mehaanikajaoskond (mehaanilise töötlemise teel detailide ja vajadusel ka alamkoostude valmistamine);
- koostamisjaoskond;
- värvimisjaoskond (pinnakatted);
- lõppkoostamise (ja kontrolli ning pakkimise) jaoskond.



Sele 4.13 Tootmissüsteemi struktuur

Kõikidel tootmissüsteemi juurde kuuluvatel allüksustel on teatavat liiki seadmed, millele on omane vastav tehnoloogiline võimekus (valmistada teatavat liiki, kindlaks määratud mõõtude vahemikus, kindla täpsuse ja tootlikkusega tooteid). Seadmete ja töötajate koostöös kujuneb välja tootmissüsteemi (või tema alamsüsteemi) tehnoloogiline võimekus.

Tootmissüsteemi tehnoloogilist võimekust kujundavad tootmisjaoskonnad ja nendes paiknevate seadmete tehnoloogilised võimalused ning töötajate kompetentsid. Tehnoloogiline võimalus on seadme või tööpingi tehnilistest parameetritest lähtuv väljund valmistada teatavatele geomeetrilistele ja funktsionaalsetele parameetritele vastavaid tooteid.

Tootmissüsteemi olulisemad koostisosad on tootmisjaoskonnad ja töökohad.

Tootmisjaoskond on tootmissüsteemi osa, mis on ette nähtud ja vastutab teatavat liiki toodete valmistamise eest, tehes parimal võimalikul viisil kindlaksmääratud tehnoloogilisi operatsioone.

Töökoht on tootmissüsteemi ja tootmisprotsessi osa, mis täidab konkreetseid tehnoloogilisi ülesandeid (teostab töötlemisoperatsioone) vastavalt etteantud tingimustele, mis on toodud tööjoonisel ja tööjuhendis. Lisaks võib olla täpsemalt lahti kirjutatud operatsioonitehnoloogia ja/või kontrollitehnoloogia.

Tootmissüsteemi abstraktne kirjeldus näeb välja alljärgnev:

$S = \{ N, A, T, F, P \}$, kus

N – süsteemi komponentide nimed;

A – atribuutide kogum süsteemi komponentide kirjeldamiseks;

T – süsteemi struktuur;

F – funktsionaalsete seoste kogum süsteemi elementide vahel;

P – süsteemis teostatavate protsesside kogum.

Tootmissüsteemi formeerimise hierarhiline skeem oli kujutatud seel 4.13. Paigutades selle hierarhilise skeemi sõlmedesse konkreetsed komponendid oma konkreetsete omadustega, saadakse reaalne süsteemi. Seega tootmissüsteemi iseloomustab ühelt poolt füüsiline keskkond (seadmete arv, tüüp, mudel ja nende paigutus) ja teisalt funktsionaalne keskkond, mis seisneb seadmete tehnoloogilistes võimalustes.

Tulenevalt süsteemi hierarhilisest esitusest (sele 4.13) ja ülaltoodud süsteemi abstraktse kirjelduse põhimõtetest, on võimalik detailselt mudelina kirjeldada ükskõik millist tootmissüsteemi. Selle kirjelduse juures on ära fikseeritud tootmissüsteemi juurde kuuluvad alamsüsteemid (allüksused), seadmete nimistu ja nende tehnoloogilised võimalused, seadmete paigutus ja neid ühendava transpordi-laosüsteemi iseloomustus, kasutatavad juhtimiselemendid. Tootmissüsteemide kavandamise ülesannet detailsemalt käsitledes käesoleva peatüki lõpuosas, lähtutakse toodud abstraktsest kirjeldusest ja vaadeldakse detailselt vastavate erinevate ülesannete lahendamist.

Alljärgnevalt vaadeldakse põgusalt erinevate tootmissüsteemide olemust ja kasutamistotstarbekust.

4.3 Tootmissüsteemid ja nende kasutusvaldkonnad

4.3.1 Konventsionaalsed tootmissüsteemid

Konventsionaalsetes tootmissüsteemides domineerivad käsitsi juhtimisega tööpingid (vt sele 4.14), mis on üles ehitatud erinevate töötlemismeetodite realiseerimiseks.



Sele 4.14 Konventsionaalsed tööpingid (vasakul treipink, paremal freespink)

Käsitsi juhtimisega ehk konventsionaalsed tööpingid on universaalsed ning kohaldatud mitmesuguste tööde teostamiseks. On ka eriliigilisi ehk spetsiifilisi lahendusi, mis võimaldavad spetsialiseeruda teatavate kindlate tööoperatsioonide sooritamiseks ja niiviisi tõsta tootlikkust. Samas on välja töötatud ka võimalikult laia universaalsusega tööpinke. Laia universaalsusega, aga samas ka täpsed, on näiteks tööriistade valmistamise freespingid. Tasapindade töötlemiseks sobivad hästi vertikaalfreespingid. Keretüüpi detailide valmistamiseks on kasutusel peamiselt aga horisontaalfreespingid, kus töölaual kasutatakse ka jagamispead, et võimaldada toote valmistamisel teda erinevatest positsioonidest sama paigaldusega töödelda.

Samamoodi eristuvad ka teised tööpinkide grupid, näiteks:

- treipingid: tsentritega treipingid, padrunistöötlamise treipingid, poolautomaattreipingid, karuselltreipingid jt;
- lihvpingid: tasalihvpingid, ümarlihvpingid, tsentriteta lihvpingid, siselihvpingid jt;
- puurpingid: vertikaalpuurpingid, radiaalpuurpingid, sisetreipingid, koordinaatpuurpingid, teemantpuurpingid jt.

Töötlemismeetodite ja tootmiseseadmete klassifitseerimisest annab väga hea ülevaate monograafia [4.2] ja seda teemat käsitletakse lähemalt 6. ptk-s.

Käsitsi juhtimisega seadmed on traditsiooniliselt monofunktsionaalsed. Treimistöid teostatakse treipingis, puurimiseks on puurpingid, sisetreimiseks sisetreipingid, freesimiseks freesipingid, lihvimiseks lihvipingid jne. Kuna detailide mõõtmed, kuju ja geomeetrised elemendid on erinevad, liigitatakse käsitsi juhtimisega tööpinke veel alamgruppidesse (tsentritega treipingid, padrunistootmise treipingid, karuselltreipingid või näiteks tasalihvipingid, ümarlihvipingid, tsentriteta lihvipingid, siselihvipingid jne). Täiendavalt vaata erinevate töötlemismeetodite rakendusi [4.2, 4.3].

Monofunktsionaalsus tähendab, et tööpink on kohandatud teatavat konkreetset tüüpi detailide valmistamiseks või teatava tehnoloogilise operatsiooni sooritamiseks. Esimesel juhul võib näitena tuua pöördkehade valmistamise. Võlli tüüpi detailide valmistamiseks on võimalik kasutada tsentritega käsitsi juhtimisega treipinki. Puksi ja ketastüüpi detailide valmistamiseks kasutatakse padrunis töötlemisega treipinke ja suurema läbimõõduga ketas- või puksitüüpi detailide valmistamiseks on kasutusel karuselltreipingid. Tehnoloogilise operatsiooni sooritamise seisukohalt vaatleme näiteks hammaselementide töötlemise võimalusi. Eeltötluse juures on enamlevinud meetodid hambatõukamine, -freesimine ja -lõikamine. Esimesel juhul kasutatakse tööriistana hambatõukurit, teisel juhul freesi ja kolmandal juhul spetsiaalset lõiketera. Vajaliku täpsuse ja pinnakareduse saavutamiseks kasutatakse hambalihvimist, hambasoveldamist või hambahoonimist. Seadmetena on siis vastavalt kasutuses hambalihv- või hambahoonimispingid.

Nagu seelt 4.14 nähtub, on konventsionaalsetes tööpinkides kasutusel palju käsitsi juhtimise mehhanisme, mistõttu nende käsitlemine nõuab tööpingioperaatorilt spetsiifilisi oskusi ja kindlasti ka palju kogemusi. Keerulisi ja täpseid töid saab usaldada vaid kogunud spetsialistile. Suurte ja täpsete toodete valmistamine sisetreipingis nõuab vähemalt 4–5 aastast eelnevat praktikat ja väga pühendunud töösse suhtumist. Käsitsi juhtimisega tööpinkidel on pikad seadistusajad, seda eriti keeruliste ja suuregabariidiliste tööde puhul. Käsitsi juhtimisega sisetreipinkidel võib ühe tööülesande täitmine aega võtta ka mitu päeva. Sellepärast ei saa kõrget tootlikkust loota.

Konventsionaalsete tööpinkide kasutamine nõuab tööpingi operaatorilt põhjalikke tehnilisi teadmisi tööpingi ehituse kohta. Et täita keerulisi tööülesandeid, on vaja kõrge kvalifikatsiooniga oskustöölisi. Taoliste tööpinkide seadistamine on aeganõudev ja sageli on vaja kasutada spetsiaalseid tööpingirakiseid. Kuna toodete nomenklatuursus suureneb, nende elukaar lüheneb ja ettevõtte peab olema konkurentsivõimeline, peab ettevõtte tagama kõrge tootlikkuse, on kindel suund CNC-seadmete kasutamise suunas. CNC-töötlemine nõuab enam ruumilist mõtlemisvõimet ja infotehnoloogia kasutamisoskust, samas vähem tööpingi häälestamise alaseid teadmisi ning käsitsi töötamise oskusi.

Seetõttu konventsionaalsete seadmete kasutamise osatähtsus pidevalt väheneb. Kuid tänu nende suhteliselt odavale hinnale ja paljudel juhtudel (universaalreipingid, vertikaalpuurpingid jms) ka kasutamise lihtsusele, on teatavatel juhtudel (individuaaltootmine, lihtsad tooted, väikesed töökojad, remonttööd jms) nende kasutamine ikkagi otstarbekas. Samas aga näiteks suhteliselt lihtsat töötlemisoperatsiooni sooritavad lintsaed on üha rohkem ja rohkem asendatud numbriliselt juhitavate seadmetega. Sama kehtib ka teiste tööde puhul. Nii et

tugev tendents on ikkagi numbriliselt juhitavate seadmete (CNC tehnoloogia) kasutamise suunas.

Konventsionaalsetes tootmissüsteemides kasutatakse täiendavalt ka mitmesuguseid mehhaniseerimise vahendeid (etteandemehhanismid, tõstukid, elektritalid, manipulaatorid jms), et lühendada abioperatsioonidele kuluvat aega ja muuta tööprotsessi kergemaks.

4.3.2 Numbrilise juhtimisega tööpingid

Tänapäeval üha kasvab numbriliselt juhitavate (CNC) tööpinkide kasutamine. Esimene arvjuhtimisega või arvprogrammjuhtimisega (APJ) tööpink töötati välja 1952. aastal. Esimene töötlemiskeskus koos tööriistamagasi ja tööriistade automatiseeritud vahetuse seadmega võeti kasutusele 1958. aastal USA-s. Tänapäeval areneb tööpingi ehitus erakordselt kiiresti. Tööpinkide funktsionaalsus ja nende tehnoloogilised võimalused kasvavad väga kiire tempoga. On standardtoodang, aga samuti iga kasutaja võib tellida vajaliku tööpingi, lähtudes oma konkreetsetest vajadustest. Kõik tööpingi tootjad, juba reklaami huvides, oskavad väga põhjalikult ja ülevaatlikult välja tuua oma toodete klassifikatsiooni alused ja ka nende tehnoloogiliste võimaluste kirjeldused. Nii et tööpinkidega tutvumiseks, nende omadustest ja kasutamistotstarbekusest ülevaate saamiseks, tuleks kindlasti tutvuda tootjate kodulehekülgedega, näiteks:

- DMGMORI: <http://en.dmgmori.com>;
- MAKINO: <http://www.makino.com/machines/G5/>;
- OKUMA: www.okuma.com;
- DUROC: www.duroc.ee;
- HAAS: www.haascnc.com;
- PrimaPower: www.primapower.com;
- Trumf: www.us.trumpf.com/en/products/laser-technology.html.

Toodud loetelus on vaid väga väike osa mehaanilise töötlemise või lehtmaterjalist toodete valmistamise tööstusseadmete tootjatest. Enamikul sellest nimekirjast on oma esindused Eestis olemas ja paljud Eesti ettevõtted kasutavad nende tootjate toodangut.

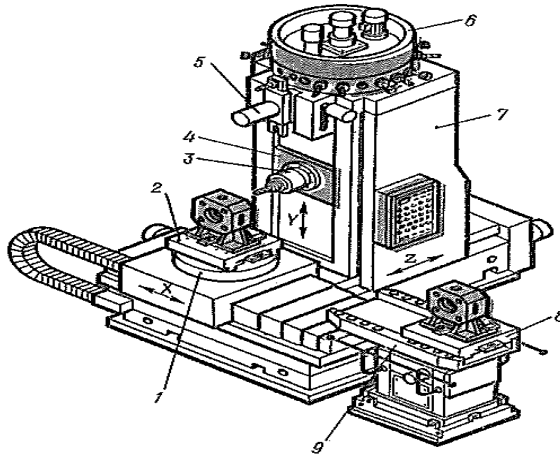
Nüüdisaegses tööstuses uueneb toodang üha kiiremini, kusjuures dominantne osa toodangust (ca 95%) valmistatakse väike- ja keskmise suurusega ettevõtetes (VKE). Toodangu maht ja nomenklatuursus kasvab pidevalt, samas aga seeriade suurus väheneb. Kõik see tingib tungiva vajaduse tootmise kiireks ja lihtsaks ümberhäälestamiseks, tagades sealjuures kõrge tootlikkuse ja kvaliteedi. Seetõttu kasutatakse tänapäeval üha enam numbriliselt juhitavaid tööpinke.

CNC-tööpinkide baasehitus on lähedane konventsionaalsetele tööpinkidele ja varustatud vastavate juhtimissüsteemidega. CNC-tööpinkide nomenklatuursus on väga lai ja nad erinevad oma tehnoloogiliste võimaluste, kasutamistotstarbekuse ja hinna poolest üsna oluliselt. Üks võimalik CNC-treipingi variant koos toorikute etteandemehhanismiga on kujutatud seel 4.15



Sele 4.15 Materjalide etteandesüsteemiga varustatud treipink

Töötlemiskeskused (vt sele 4.16) on mitmefunktsionaalsed APJ-tööpingid, mis on võimelised teostama erinevaid töötlemisoperatsioone ning läbi viima automaatset tööriista vahetust, kasutades tööpingi enda tööriistamagasini või eraldiseisvat tööriistade ladu.



Sele 4.16 Töötlemiskeskus ja tema peamised koostisosad

1 – töölaud, 2 – rakis koos töödeldava detailiga, 3 – tööpingi spindel, 4 – spindli konsool, 5 – tööriista vahetusseade, 6 – tööriista magasin, 7 – liikuv kolonn, 8 – vahetuspallet, 9 – töölaua vahetusseade

Kasutatakse tüüpiliselt 4–9-teljelisi töötlemiskeskusi, mis on kas treimis-, sisetreimis-, freemismis-, puurimis- või mitmeoperatsioonilised. Tänapäeval on levinumateks mitmeoperatsioonilised töötlemiskeskused, mis võimaldavad minimiseerida paigalduste arvu toote valmistamisel.

Töötlemiskeskused jagunevad vertikaal- ja horisontaalkeskusteks. Kasutatakse laialdaselt ka töötlemiskeskusi, mis võivad töötada nii vertikaalse kui ka horisontaalse spindliga. Samas võib kasutada ka mitut erinevat spindlit. Mitmeotstarbeliste seadmetega võib teha väga erili-

gillisi töötlemisoperatsioone. Tuntumateks keeruliste ja täpsete detailide valmistamisele kohandatud tööpinkide tootjateks on näiteks DMG, Makino ja Okuma. Üks võimalik näide keeruliste ja täpsete detailide valmistamiseks mõeldud freesimiskeskusest on kujutatud seel 4.17 ja treimiskeskus seel 4.18.



Sele 4.17 Makino 5-teljeline mitmeotstarbeline töötlemiskeskus G5

Pöördkehade valmistamiseks mõeldud töötlemiskeskus on toodud seel 4.18.



Sele 4.18 Mazak 9-teljeline mitmeotstarbeline töötlemiskeskus INTEGREX 200-IV ST

DMG, Makino ja Okuma tööpingid sobivad auto- ja lennukitööstusele, tööriistade valmistamiseks, meditsiinitehnika tootmiseks ning teistele sarnastele valdkondadele, kus on vajalik keeruliste ja täpsete toodete valmistamine.

Töötlemiskeskusest DMG 60 U annab hea ülevaate www.youtube.com/watch?v=UAhW-gXg11A ja 5-koordinaadilise töötlemiskeskuse töötamist saab jälgida www.youtube.com/watch?v=LSDKayRblAw.

CNC-töötlemiskäsitlevad allikad [4.12, 4.13, 4.14].

Tööpinkide maksumus on väga erinev. See kajastub otseselt toodete hinnas. Seetõttu peaks tööpingi valiku juures kõigepealt valima tootja ja saama aru tööpingi rakendusvaldkonnast. Seejärel vastavalt toodete tehnilistele nõuetele, valima tööpingi töölaua suuruse, tööpingi täpsuse ja juhitavate koordinaatide arvu. Üledimensioneerimine (ka aladimensioneerimine) läheb kalliks maksma. Tööpingi hind tõuseb väga kiiresti vastavalt töölaua mõõtmetele ja tööpingi täpsusele. Ka üheaegselt juhitavate koordinaatide arv, tööpingi peaelektrimootori võimsus ning tööriistade arv tööriistamagasinis suurendab kiiresti tööpingi maksumust.

Hinnalt odavamad, aga samuti laialdaste tehnoloogiliste võimalustega, on näiteks Haas Automation Inc ja Duroc AB (valmistaja Doosan) tööpingid. CNC-tööpinkide kasutamine nõuab teatavaid kogemusi, seetõttu peaks võimaluse korral alustama lihtsamate toodete ja odavamate tööpinkidega.

Tööpinkide valik on mitme kriteeriumiga optimeerimisülesanne, kus sihifunktsioonideks on tootlikkus ja toote valmistamise maksumus ning tagatud peab olema töötlemise täpsus ja kõigi nõutavate geomeetriliste elementide valmistamine valitud toodete puhul. Seega CNC-tööpinkide kasutamisega kaasneb ka töötlemiseks otstarbekate detailide valik. Nii viisi jõuame kombinatoorika ülesandeni, kus ühelt poolt on toodete portfelli ja tootmismahud ning teiselt poolt:

- erinevad tootmisvõimalused (monofunktsionaalsed tööpingid, töötlemiskeskused, paindootmismoodulid, paindootmisliinid, paindootmissüsteemid);
- erinevad tootjad (tööpinkide hinnad on väga erinevad);
- tehnoloogilised võimalused (juhitavate koordinaatide arv, üheaegselt juhitavate koordinaatide arv, peaspindli võimsus, töölaua mõõtmed, tööpingi täpsusklass, positsioneerimise täpsus, spindlite arv, tööriistade arv tööriistamagasinis, tööriista vahetuse aeg, töölaudade arv, töölaua vahetuse aeg, töölaua fikseeritud positsioonide arv, kiirpaigutuse kiirus jms).

Otstarbekate otsuste tegemine on tootmise otstarbekust silmas pidades väga tähtis. Valesid otsuseid on üsna kerge langetada. Seetõttu peaks kvaliteetsete otsuste tegemiseks olema otsustajal piisavalt palju kogemusi ja teadmisi või siis tuleks kasutada professionaalsete konsultantide abi.

4.3.3 Paindautomatiseeritud tootmissüsteemid

Tänapäeval sarnaselt autoga, mis komplekteeritakse vastavalt kliendi soovidele, ka töötlemiskeskused, paindmoodulid ja paindootmissüsteemid kujundatakse täpselt vastavalt kliendi soovidele ja tootmise iseloomule. Seetõttu on vajaliku sisseseade valik väga oluline ja ühtlasi keeruline ning loominguline inseneriülesanne.

Paindautomatiseeritud tootmise ja neis kasutatavate seadmete põhiliigitus on alljärgnev:

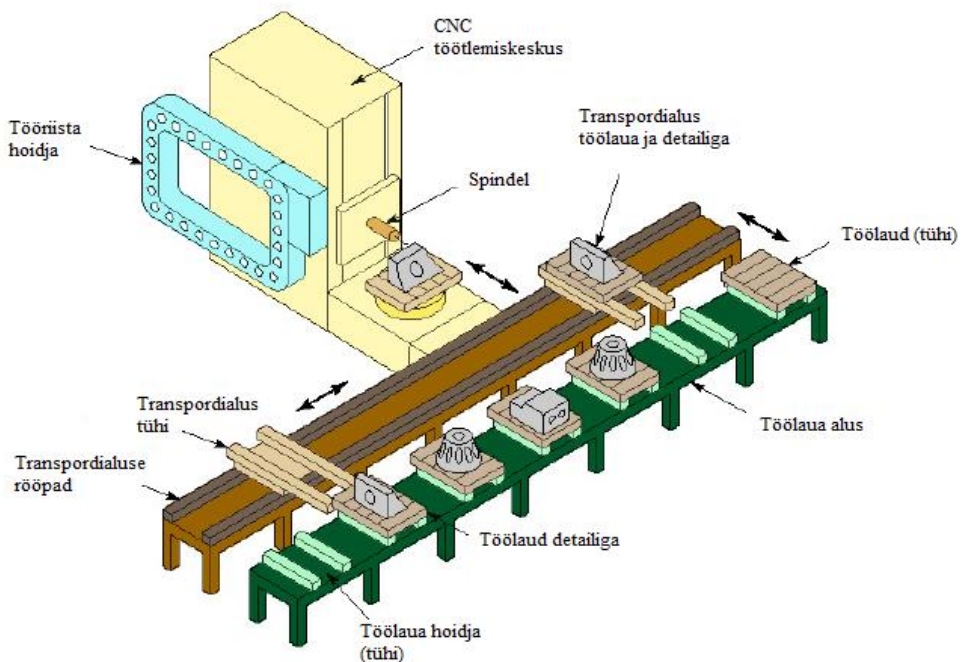
- numbriliselt juhitavad tööpingid;
- töötlemiskeskused;
- paindootmismoodulid;
- paindootmisliinid;

- paindootmissüsteemid (FMS);
- paindootmistehhid;
- paindtehased.

Keerulisemad ja laialdasemate võimalustega automatiseeritud tootmissüsteemid on paindootmismoodulid, -tootmisliinid ja -tootmissüsteemid. Veebipõhiste materjalidega nende olemusest ja kasutamisest saab tutvuda [4.15, 4.16, 4.17, 4.18].

Alltoodud pildimaterjal baseerub paljuski esimesel kahel viidatud õppekirjandusel.

Paindootmismoodul (vt sele 4.19) on realiseeritud ühe (mõnikord ka mitme) APJ-tööpingi või töötlemiskeskuse baasil, mida on täiustatud töödeldavate detailide ja tööriistade hoidmise ja automatiseeritud vahetuse seadmetega.

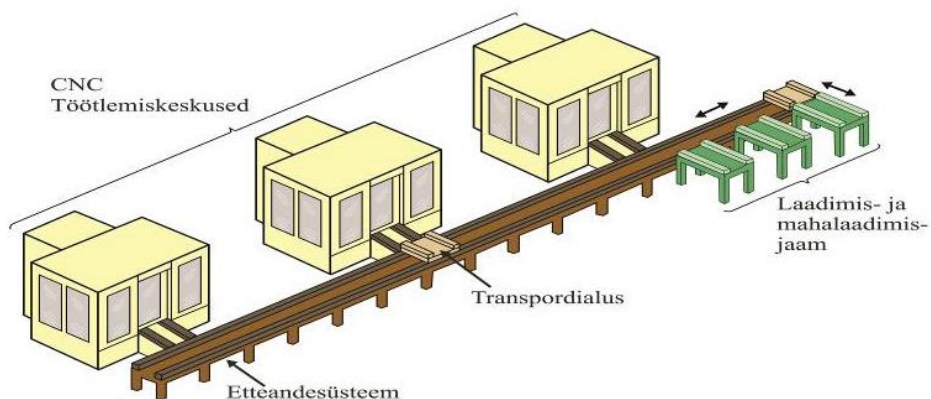


Sele 4.19 Ühe seadmega paindootmismoodul [4.16]

Selline kompleks on võimeline funktsioneerima iseseisvalt või on integreeritud mõne kõrge-
mat järku süsteemi koosseisu. Paindootmismooduli realisatsioonivariante on väga mitmesu-
guseid ja tööpingi valmistajad täiustavad neid pidevalt. Paindootmismoodulis püütakse toode
valmistada võimaluse korral ühe paigaldusega või siis toote uuesti asetamiseks kasutatakse
tööstusroboti abi.

Paindootmisliin (sele 4.20) koosneb mitmest APJ-tööpingist ja/või töötlemiskeskusest
ja/või paindootmismoodulist, mis on automatiseeritud transpordi-laosüsteemi abil ühendatud

ühtseks süsteemiks. Tööpinkide asetus süsteemis on lineaarne ja iga tööpink on vahetult ühendatud transpordi-laosüsteemiga, mis tõstab süsteemi paindlikkuse taset. Jäiga, aga tunduvalt lihtsama süsteemi puhul vastav liidestus puudub ning töötlemine toimub siis vastavalt tehnoloogiliste operatsioonide järjestusele, vältides detaili valmistamisel tagasikäike. Samas, kui tootmisliin on ühendatud tsentraallaoga, võib toode vajaduse korral liikuda tööpingist tööpinki suvalises järjekorras. Üldine püüdlus on ühetasemelise töötlemise suunas, et tagada suurem tootlikkus.



Sele 4.20 Painttootmisliin [4.16]

Painttootmisliini praktiline kasutusnäide Mehhatroonikumis on toodud seel 4.21.



Sele 4.21 Painttootmisliini realisatsioonivariant DMG tööpinkide baasil

Paindautomatiseeritud tootmissüsteem (FMS) (sele 4.22) koosneb mitmest numbriliselt juhitavast tööpingist (CNC) ja/või moodulist ja/või robotsüsteemist, mis on ühendatud üheks tervikuks automatiseeritud transpordi-laosüsteemi vahendusel. Seda kompleksi juhitakse automatiseeritud juhtimissüsteemi abil, mis reeglina omakorda on ühendatud ettevõtte lokaalvõrku (LAN) ja /või internetti [4.16].

Paindootmissüsteemide realiseerimisvariantide on väga palju. Teataval määral on aga need realiseerimisvariantid läbi transpordi-laosüsteemide lahenduste unifitseeritavad. Neid käsitletakse lähemalt tootmissüsteemide alamsüsteemide juures ja ka tootmissüsteemide asendi- ja paigutuse peatükis.

Paindootmismooduli ja -süsteemi kasutamistarbekuse võrdlus on toodud tabelis 4.3.

Tabel 4.3 Paindootmismooduli ja paindootmissüsteemi võrdlus

Paindootmismoodul (FMC)	Paindootmissüsteem (FMS)
1. Suur paindlikkus	1. Väga kõrge paindlikkus
2. Suhteliselt väike ladustamisvõimalus detaili programmi jaoks	2. Suur ladustamisvõimalus detaili programmi jaoks
3. Kulud ressursile on väiksemad	3. Keerulised seadmed, millest tingituna kulud ressurssidele on kõrgemad
4. Lihtsam tootmise ettevalmistus	4. Kõrged nõuded tootmise ettevalmistusele, planeerimisele ja teostamisele
5. Mõõdukas põhjendatuse protsess, mis vajab keskastme juhtimise nõusolekut	5. Keerukas põhjendamise protsess, mis vajab kõrgetasemelist nõusolekut
6. Vajab juhtkonna teatavat panustamist ja tuge	6. Vajab juhtkonna kõrgetasemelist panustamist ja tuge
7. Madalamad nõuded personalile ja koolitusele	7. Väga kõrged nõuded personalile ja koolitusele
8. Keskmine mõju teistele süsteemisestele protsessidele ja organisatsiooni tegevuslikkusele	8. Suur mõju teistele süsteemisestele protsessidele ja organisatsiooni tegevuslikkusele
9. Madal-keskmine risk installeerimisel ja minimaalsed muutused tsehhi taristus	9. Kõrge risk ja keerukus, palju muudatusi tsehhi taristu juures
10. Lühike planeerimise tsükkel	10. Pikk ja täpne planeerimise tsükkel
11. Kiire, praktiline õppimisaeg ja rakendamisperiood	11. Pikaldane, keerukas õppimisaeg ja rakendusperiood
12. Teised tugisüsteemid võivad seada piirangud süsteemi võimalustele ja paindlikkusele	12. Koos tööriista automatiseeritud kättetoimetamisega ja tööriistasüsteemi juhtimisega, avardab oluliselt süsteemi võimalusi ja paindlikkust



Sele 4.22 Paintootmissüsteem (Fastems Oy AB, www.fastems.com)

Paintootmisjaoskond ja **paintootmistsehh** (vt sele 4.23) on juba tootmise organisatsioonilised vormid. Need võivad koosneda programmjuhtimisega tööpinkidest, töötlemistsentritest ja/või paintootismoodulitest ja/või paintootmisliinist ning ühest või mitmest mõõte- ja pesemismasinast, mis on ühendatud üheks tervikuks ühtse transpordisüsteemi vahendusel. Sellist tehnoloogilist kompleksi juhitakse hierarhilise arvutite süsteemi vahendusel. Taolised süsteemid on võimelised määratletud aja jooksul (vahetus, ööpäev) iseseisvalt valmistama tooteid nii, et inimesed ei osale vahetult protsessis. Samas osutub selline täisautomatiseeritud tootmine võimalikuks vaid üksnes kõigi juhtimistasandite (vt 3. ptk) realiseerimisel.



Sele 4.23 Paintootmisjaoskond

Eelnevalt vaadeldi mehaanilise töötlemise paindtoomissüsteeme. Lisaks nendele kasutatakse tänapäeva tööstuses väga ulatuslikult lehtmaterjalide töötlemisele orienteeritud tootmissüsteeme. Stantsimistöodeks on kasutusel mitmesugused pressid (peamiselt ekstsentririkpressid või hüdraulilised pressid). Presside kasutamine nõuab vastavate tööriistade (stantsid) eelnevat valmistamist, mis on suhteliselt keerulised ja kallid. Seetõttu kasutatakse stantsimist suurte seeriade ja väikese toodangu nomenklatuursuse juures.

Lehtmaterjalide töötlemine on tänapäeva tööstuses väga levinud tootmise liik. Lehtmaterjalide töötlemiseks seeria-, väikeseeriatootmises kasutatakse plasma-, laser- või vesilõikust. Ka mulgustamine ja painutamine on tüüpilised lehtmaterjalide töötlemise tehnoloogiad, mis on realiseeritud vastavatel seadmetel. Analoogiliselt mehaanilisele töötlemisele kasutatakse tänapäeval üha enam numbriliselt juhitavaid tootmiseseadmeid (CNC-lasertöötlemisseade, CNC-plasmatöötlemisseade, CNC-vesilõikusseade, CNC-painutuspink vms). Samuti on kasutusel lehtmaterjalide töötlemise paindsüsteemid, mille koosseisu kuuluvad ka materjalide etteandmis- ja ladustamissüsteemid. Sellised süsteemid on üsna kallid ja nende soetamisel peab olema kindel vastavate tootmismahtude osas. Erinevate tehnoloogiate otstarbekat kasutamist käsitletakse põhjalikult 5. ja 6. ptk-s.

Lehtmaterjalist toodete valmistamise paindtootmissüsteem on toodud seel 4.24.

Vastav süsteem koosneb põhiseadmest, töötlemisseadmest ja seda teenindavast materjalide (antud juhul külmaltsitud lehtmaterjali) etteandesüsteemist. Ka valmisdetailid sorteeritakse ja materjalijääkide eemaldamine võib toimuda automatiseeritult. Veelgi suurema automatiseerituse taseme saavutamiseks ja erinevate töötlemiskeskuste integreerimiseks kasutatakse üha enam tööstusroboteid nii teenindavas kui ka transpordi funktsioonis.



Sele 4.24 Lehtmaterjalide töötlemise süsteem (Prima Power Oy)

Ka siin on suur tootjate hulk. Eestis on levinumad tootjad Prima Power ja Trumf. Lehtmaterjalide töötlemise kohta võib lugeda [4.13, 4.14].

Nii nagu mehaanilise töötlemise paindootmissüsteeme on ettevõtetes realiseeritud väga erineval moel, on võimalik üles ehitada ka lehtmaterjalist toodete valmistamise süsteemide erinevaid variante. Vastavate paindootmissüsteemide tüüpilisemateks koostisosadeks on valmistusseade (vastavalt kasutatavale tehnoloogiale), laosüsteem lehtede hoiustamiseks ja etteandmiseks ning valmistoodete hoiustamiseks ja robotisüsteem teenindamiseks (nii toorikute kui ka valmistoodete süsteemis). Kolmas oluline tootmisviis on masstootmine

4.3.4 Masstootmisele orienteeritud tootmissüsteemid

Masstootmist iseloomustavad suured tootmismahud ja sarnased tooted. Tooteid valmistatakse vahetpidamata suhteliselt suurearvuliselt ja küllaldaselt pika aja (näiteks mitme aasta) kestel. Masstootmist iseloomustab enamikule töökohtadele kinnistatud ainult ühe ajaliselts korduva operatsiooni täitmine. Tänapäeval kasutatakse masstootmises palju automaattööpinke või automaatliine, mis tagavad suure tootlikkuse.

Traditsioonilised masstootmise valdkonnad on toiduainetetööstus, plasttoodete (plastpudelid, -purgid, -korgid jms) valmistamine survevalupressidel, külmvaltsitud teraslehe tootmine, kuumvaltsitud raudteeliiprite tootmine, kuullaagrite valmistamine. Aastased tootmiskogused on väga suured. Tootmiskogustest sõltub ka tootmise automatiseerimise tase. Kui põhioperatsioonid toimuvad reeglina alati automaatseadmetega (näiteks plasti survevaluautomaadid), siis abistavad operatsioonid võivad toimuda mehhaniseeritult või samuti automaatselt (näiteks survevalu automaate teenindavad täielikult automatiseeritud režiimis robotid – üks või mitu olenevalt tootmistsükli ajast).

Masstootmise väljalaskeprogramm tingib kitsa töökohtadekeskse spetsialiseerimise ning seadmed asetatakse tehnoloogilise protsessi järjekorras. Tehnoloogiline süsteem realiseeritakse vooluliinidena, kus soovitatavalt kõikidel töökohtadel on operatsioonide kestus võrdne või kordne ja vastab etteantud liini tootlikkusele ja tootmise rütmile. Pideval vooltootmisel (massvooltootmisel) võrdub rütm ajavahemikuga, mille järel lastakse välja üks tooteühik [4.4]. Etteantud rütm mõjutab oluliselt tootmissüsteemi kooslust, kuna on vajadus viia iga operatsiooni tükiaeg suuruseni, mis on võrdne või kordne tootmise rütmiga. See nõuab tehnoloogilise protsessi vastavat jaotamist operatsioonideks ja vajadusel ka töökohtade dubleerimist vajaliku tootlikkuse saavutamiseks. Veidi on käsitletud vooltootmise põhimõtteid ka kirjanduses [4.16].

4.4 Tootmissüsteemide alamsüsteemid

Tootmine tootmisettevõttes on keeruline ja mitmetahuline ülesanne. Organisatsioonilises mõttes realiseerub tootmine erinevates tootmise allüksustes: tsehhid, jaoskonnad, osakonnad, töökohad. Organisatsioonilises mõttes on tootmist vaja planeerida ja juhtida, et tagada etteantud tootmisülesannete edukas täitmine. Tehnilises käsitluses on tootmissüsteemiga seotud tema erinevad alamsüsteemid: valmistamis-, transpordi-ladustamis-, mõõte-kontrolli- ning juhtimissüsteem. Tootmise füüsiline osa on keeruline ja kallis. See peab vastama võimalikult täpselt tootmisprogrammidele, et rakendada ratsionaalselt ressursse ja tagada konkurentsivõimeline toote omahind. Tootmissüsteem tervikuna kujuneb selle alamsüsteemidest. Vastavate alamsüsteemide olemust tuleb tunda, et teha otstarbekaid otsuseid.

4.4.1 Valmistamissüsteem

Valmistamissüsteemi põhikomponendid on tööpingid, tööriistad, mõõtevahendid ja mitmesugust liiki rakised. Antud alamsüsteem on ette nähtud toodete valmistamiseks. Tootmisprotsess tuleneb toote valmistamise nõuetest. See realiseerub kasutatavate tööpinkide baasil. Tööpinkide tehnoloogilised võimalused [4.19, 2.20] peavad vastama toote valmistamisnõuetele.

Seade, tööpink – kindlatele füüsilistele ja tehnoloogilistele omadustele vastav materiaalne ese, mis on ette nähtud konkreetseteks tööülesanneteks. See asub füüsiliselt kindlaksmääratud asukohas, mille koordinaatideks on ettevõtte ja jaoskond ning paiknevus jaoskonnasiselt.

Tehnoloogilised võimalused – seadme tehnoloogilisi võimalusi määratlev omaduste kogum saadakse vastava seadme ja tema üksikute alamosade (detaili-, tööriista-, kinemaatika-, juhtimissüsteem) andmestu parameetrilise kirjelduse alusel (mõningatel juhtudel võib üks kirjelduse tase puududa).

Tehnoloogiline võimekus – on määratud seadme tehnoloogiliste võimalustega ja seadet teenindava töötaja kompetentside hulgaga; tagab kliendile antud tööülesande täitmise kokkulepitud kvaliteediga ja vastavuses tehnilistele tingimustele.

Seadme tehnoloogilised võimalused kujunevad selle tehniliste parameetrite alusel.

Seal 4.25 on toodud DMG nüüdisaegne töötlemiskeskus DMC 100 U(A) ja tabelis 4.4 seadmete DMC 100 U(A) ja DMC 80 FD tehnilised parameetrid.



Sele 4.25 Töötlemiskeskus

Tööpinkide tehnoloogiliste võimaluste alusel kujunevad süsteemi tehnoloogilised võimalused. Süsteemi tehnoloogilistest võimalustest [4.19, 4.20] on valmistatavate toodete nomenklatuursus ja kõik toodete valmistamisega kaasnevad iseloomulikud parameetrid: detaili mõõtmed, kujupindade olemus, mõõtmete täpsus, pinnakaredus jms. Seadme ja/või tootmis-süsteemi tehnoloogilised võimalused peaksid vastama võimalikult täpselt valmistatavate toodete tehnilistele nõuetele.

Tabel 4.4 Kahe töötlemiskeskuse tehnilised näitajad

Parameeter	DMC 100 U	DMC 80 FD
1. Tööpingi tüüp	Horisontaalse/vertikaalse spindliga freesimiskeskus	Horisontaalse/vertikaalse spindliga freesimis/treimiskeskus
2. Telgede arv	5	7
3. Liikumised (X,Y,Z), mm	1000/1250/1000	800/1050/800
4. Töölaud, mm	1000 x 800	800 x 630
5. Koormus töölauale, max, kg	2000	1400
6. Töödeldava detaili maksimaalsed mõõtmed, mm	L=1000 B=1000 H=1600	D=900 H=1350
7. Töölaudade arv	2	2
8. Töölaua vahetusaeg, s	16	14
9. Töödeldavad materjalid	Teras Legeeritud teras Kõvasulamid Alumiiniumsulamid Titaan	Teras Legeeritud teras Kõvasulamid Alumiiniumsulamid Titaan

10. Spindli pöörlemisagedus (1/min) ja võimsus (kW)	30000 /85 kW.	30000/85 kW
11. Tööriistamagasin <ul style="list-style-type: none"> • Kohtade arv • Tüüp 	120 Vertikaalne/kett	120 Vertikaalne/kett
12. Tööriista vahetusaeg, s	4,1	3,8
13. Tööriista maksimaalsed mõõtmed, mm	D=120 L=650	D=120 L=650
14. Tööpingi aluse mõõtmed, (laius X pikkus), mm Pindala m ²	4123 x 6528 26,9	3740 x 5838 21,8
15. Juhtimissüsteem	Siemens 840 D / SolutionLine	Siemens 840 D/ SolutionLine

Tehnoloogilised võimalused on antud seadme, roboti, kompleksi või süsteemi omaduste kogum mingi tehnoloogilise ülesande täitmiseks.

Seadme (või süsteemi) tehnoloogiliste võimaluste kogumit võime vaadata hulgana TV_{TP} , kus hulga elemendid (v_1, v_2, \dots, v_m) väljendavad nii kvalitatiivselt kui ka kvantitatiivselt selle seadme (süsteemi) funktsionaalseid omadusi. Toote valmistamiseks on vajalikud teatavad tehnoloogilised võimalused, mis on kirjeldatavad hulgana TV_D .

Tehnoloogiliste võimaluste üldiseks mõõduks on valmistatava toodangu nomenklatuursus, keerulisus ning selle kvaliteet. Seadme ja töödeldava detaili tehnoloogiliste võimaluste vahe annab realiseerimata tehnoloogilised võimalused (TV_R).

$$TV_R = TV_{TP} - TV_D.$$

Otstarbekas on vastavat vahet püüda hoida minimaalsena. Mida suurem on TV_R , seda rohkem raisatakse ressursi. TV_R ei saa kunagi olla miinusemärgiga ehk toote valmistamiseks antud operatsioonil on vaja rohkem tööpingi tehnoloogilisi võimalusi, kui antud tööpingil on. Sel juhul tuleb antud toote valmistamiseks kasutada mitut erinevat tööpinkki.

Süsteemi kuuluvate tööpinkide tehnoloogiliste võimaluste ühisosa annab garanteeritud tehnoloogilised võimalused, s.t vastavate parameetrite alusel saab valida detaile, mida on võimalik töödelda kõikides süsteemi kuuluvates tööpinkides. Süsteemi kuuluvate tööpinkide tehnoloogiliste võimaluste üldosa aga näitab, mis on süsteemi suutlikkus erinevate toodete valmistamise seisukohast lähtudes (toodete nomenklatuursus).

Tööpigid on oma ehituselt muutunud järjest keerulisemaks, suurenenud on numbriliselt juhitavate telgede arv (5–9), sageli kasutatakse täiendavalt suuri või ülisuuriööriistamagasin (400–2000) ning töödeldavate detailide automatiseeritud vahetuse võimalust. Tööpingi peaspindli võimsused ulatuvad 40 kW ja enam ning pöörlemisagedused 20 000–40 000 1/min. See kõik suurendab tootlikkust, tõstab tööpinkide tehnoloogilisi võimalusi ja loob eeldused

nende järjest edukamaks kasutamiseks autonoomses režiimis, s.t ilma inimese vahetu osavõtuta töötlemisprotsessist. Või siis lihtsama variandina laienevad võimalused mitme tööpingi teenindamiseks.

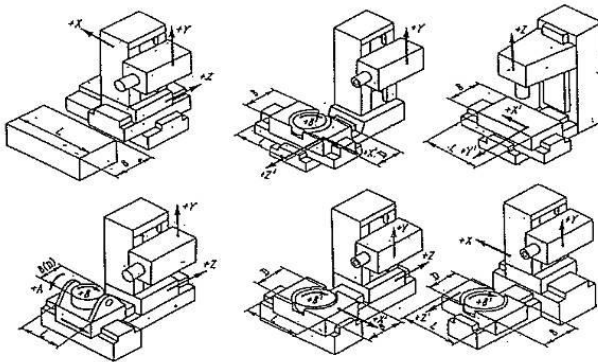
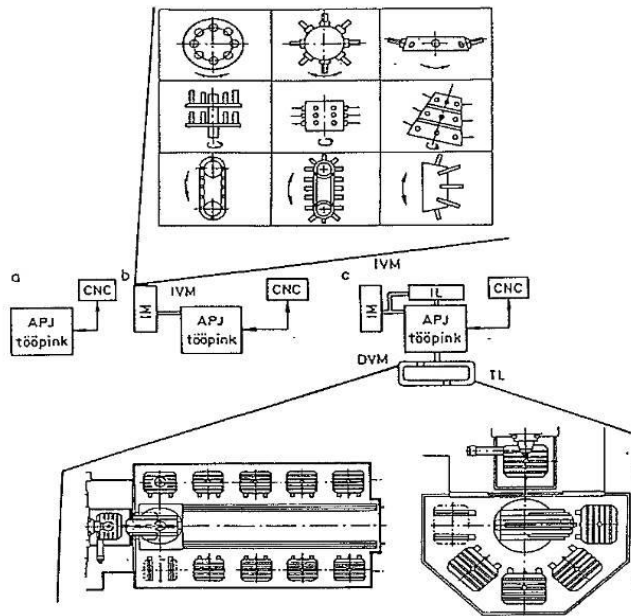
Tööpinkide tehnoloogiliste võimaluste laiendamine on kujutatud seel 4.26. Tööpinkide tehnoloogiliste võimaluste kujunemine aga seel 4.27. Nagu seelt 4.27 nähtub, moodustab nüüdisaegse tööpingi tema neli põhilist koostisosa: tööriista-, detaili-, kinemaatika- ja juhtimisüsteem. Neid omakorda iseloomustavad rida parameetreid, mis kokkuvõttes moodustavadki tööpingi tehnoloogilised võimalused. Tehnoloogiliste võimaluste laiendamine toimub eelkõige neljas põhimõttelises kategoorias: töötlemise täpsus, kasutatavate tööriistade arv tööriistamagasinis ja nende gabariidid, detailide hoidmine vahetult tööpingi juures (puhvrites) ja töölaudade automatiseeritud vahetamine ning tööpingi kinemaatika, mis võimaldab kasutada ühes tööpingis erinevaid töötlemismeetodeid. Nendega kombineerimine annab tänapäeval suured võimalused kujundada tööpink vastavalt konkreetsetele vajadustele.

Samas ikka tuleb toonitada, et iga täiendava ressursi lisamine tõstab küll tehnoloogilisi võimalusi, kuid see väljendub vahetult tööpingi hinnas. Tööpingi maksumus aga omakorda on oluliseks aluseks toote omahinna kujundamisel läbi tööpingi minuti maksumuse. Sellepärast on tööpinkide ratsionaalne valik tänapäeval ühelt poolt äärmiselt oluline ülesanne, et saada tellimusi, ja teisalt, et jääda ka pärast töötlemist kasumisse, arvestades pidevalt muutuvaid turusituatsioone.

Tööpingi tehnoloogilised võimalused määratlevad töödeldavate detailide spektri. Suurte tehnoloogiliste võimalustega tööpink eeldab ka, et sellel valmistatakse keerulisi tooteid ja vastu-pidi. Kasutades suurte tehnoloogiliste võimalustega tööpinki (töötlemiskeskus või tootmis-moodul) lihtsa detaili töötlemiseks, muutub valmistatava toote omahind konkurentsituat-kaliks, kuna vastavate tööpinkide maksumus ületab mitmekordselt lihtsate tööpinkide maksu-muse. Seetõttu peab ka alati hoolikalt valima, milliseid tooteid millistel tööpinkidel valmistada.

Tootmissüsteem on tootmise põhi- ja abiseadmete struktuuriline sihtotstarbeline kogum, millel on vastastikused informatiivsed ja logistilised seosed nii süsteemisiseselt kui ka välis-keskkonnaga. Tootmissüsteemi kirjelduse (formeerimise) hierarhiline skeem oli toodud seel 4.13.

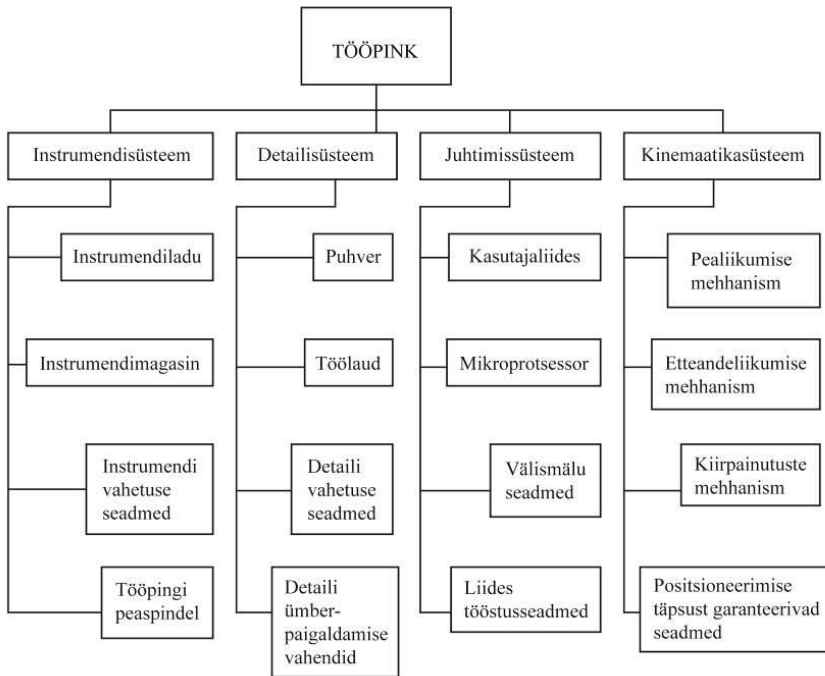
Kõikidel tootmissüsteemi juurde kuuluvatel allüksustel on teatavat liiki seadmed, millele on omane vastav tehnoloogiline võimekus (valmistada teatavat liiki, kindlaks määratud mõõtude vahemikus ja täpsusega ning etteantud tootlikkusega tooteid). Seadmete ja töötajate alusel kujuneb välja tootmissüsteemi (või tema alamsüsteemi) tehnoloogiline võimekus [4.19, 4.20].



Sele 4.26 Erinevate funktsionaalsustega tööpingi moodustamine

Tootmissüsteemi füüsilise osa moodustavad veel täiendavalt:

- abi- ja põhitööriistad koos teritusseadmete ja eelhäälestuse rakistega, mis etendavad väga olulist osa toodete geomeetriliste elementide ja kujupindade töötlemisel tootmisoperatsioonides;
- rakistus on vajalik töödeldavate detailide või koostatavate osade fikseerimiseks, et tagada töödeldavate pindade vastastikuse asendi täpsus ning tõsta tööviljakust;
- individuaalsed mõõte- ja kontrollivahendid loovad eelduse kvaliteedi tagamisele ja kindlustamisele töötlemisoperatsioonide sooritamisel töökohtades.



ALAMSÜSTEEMIDE TEHNOLOOGILISI VÕIMALUSI ISELOOMUSTAVAD NÄITAJAD

1. Instrumendiladude/ magasinide arv	1. Puhvrite arv	1. Juhtivate koordinaatide üldarv	1. Peaelektrimootori võimsus
2. Instrumendimagasinide tüüp	2. Kohtade arv puhvris	2. Üheaegselt juhivate arv	2. Lubatav pöörde- moment
3. Instrumentide arv laos/ magasinis	3. Tööpositsioonide arv	3. Paralleeltööks kasutatavate protsessorite arv	3. Juhivate koordi- naatide arv
4. Instrumenti vahetuse aeg laost spindlisse	4. Üheaegselt töötlemiseks ettenähtud detailide arv	4. Operatiivmälu maht	4. Üheaegselt juhi- tivate arv
5. Instrumenti vahetuse aeg magasinist spindlisse	5. Detaili maksimaal- mõõtmised	5. Info sisestamise/ väljas- tamise võimalused	5. Pöörlemissage- duste diapasoone
6. Spindlite arv	6. Detaili vahetuse aeg	6. Kasutatavad spetsiaal- režiimid	6. Ettenihete diapasoone
		7. Kasutatavad töörežiimid	7. Kiirpaigutuste max väärtused
			8. Positioneeri- mistäpsus

Sele 4.27 Tööpingi tehnoloogiliste võimaluste kujunemine

Nimetatud valmistamissüsteemi alamsüsteemid on tootlikkuse suurendamise ja kvaliteedi tagamise seisukohast lähtudes väga olulised. Seetõttu pöörame neile alljärgnevalt ka pisut enam tähelepanu.

4.4.1.1 Tööpinkide rakised ja toodete paigaldus

Tootlikkuse tõstmiseks ja valmistamistäpsuse tagamiseks on tööpingi rakise valik või vajadusel ka selle konstrueerimine väga oluline tehnoloogiline ülesanne. Tehnoloogiline rakistus aitab tõsta tootlikkust ja saada vajalik töötlemise täpsus. Töötlemise täpsus tagatakse eelkõige paigaldusvea ja summaarse töötlemisvea minimeerimisega.

Õigesti valitud ja kasutatud tööpingirakised aitavad olulisel määral kaasa, et saavutada töötlemise täpsus, kuna APJ-tööpinkide puhul on tooriku baseerimisviga rakisesse peamiseks summaarse töötlemisvea komponendiks. Tööpinkide positsioneerimise täpsused on väga kõrged (sõltuvad vajadustest ja mõjutavad oluliselt tööpingi maksumust) ning koordinaatide (tööpingi koordinaadisüsteem, detaili koordinaadisüsteem) nullpunktide sünkroniseerimine toimub automaatselt.

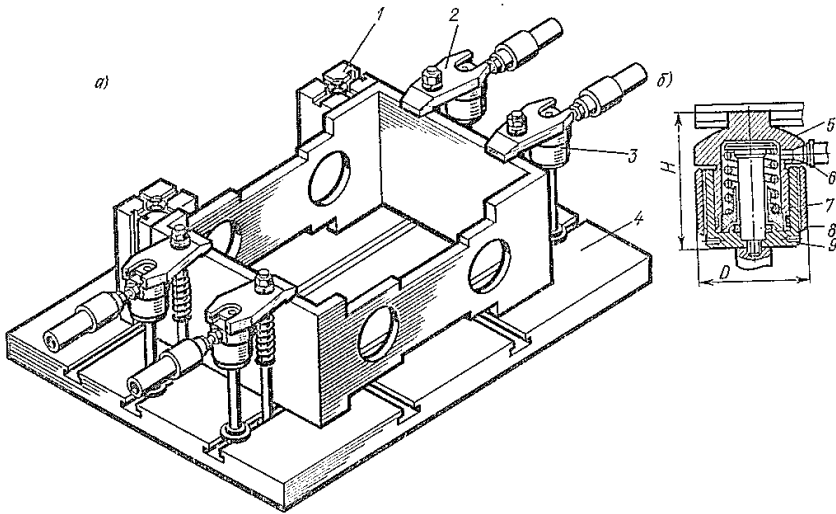
Puurimiskonduktorid ja kinnitusrakis on töödeldavat detaili paigaldav ja fikseeriv seade, mida kasutatakse toodete valmistamiseks. Puurimiskonduktorid on kasutusel peamiselt kätsi juhtimisega puur- ja sisetreipinkides. Puurimiskonduktorid aitavad positsioneerida tööriista vajalikku kohta detaili valmistamisel ning suunata paremini selle liikumist ja vähendada võimalikke kujuhälbeid.

Kinnitusrakised jagunevad üldotstarbelisteks (pöördlauad, kruustangid jms), spetsiaalseteks ja universaalseteks (nn universaalkoostatavad rakised) [4.21, 4.22]. Spetsiaalrakised on kasutusel suurseria või masstootmise puhul, eelkõige tootlikkuse tõstmiseks ja täpsuse tagamiseks. Universaalrakised on märkimisväärselt odavamad, nende kasutamine lihtne ja nad sobivad eriliigiliste detailide kinnitamiseks. Universaalrakiste tootjaid on palju, seetõttu peaks oskama turul teha õigeid valikuid.

Tööpingi rakised peavad tagama toorikute paigalduse kõrge täpsuse. Siin on peamiselt kolm vea tekkepõhjustajat: 1) baseerimisviga, välditakse baaspindade ühildamise teel ehk enne töötlemist APJ-tööpingis on baaspinnad juba ette valmistatud; 2) baseerimisviga aitab vähendada ka tooriku kinnitamisest põhjustatud hälbe minimeerimist. Seda saavutatakse eelkõige kinnitusjõu reguleerimisega, mis väldib olulisel moel tooriku deformatsioone kinnitusjõu mõjul (spetsiaalsed kinnitusjõudu kontrollivad kiirkinnitusmehhanismid); 3) rakise enda valmistamise täpsus ja rakise baaspindade kvaliteet. Täpsete tööde tegemisel tuleb olulist tähelepanu pöörata rakiste tootjate valikule [4.22]. Kui on kogemusi ja vastav tööpingipark, võib spetsiaalrakiseid ka ise valmistada. Tööpingirakised on kindlasti otstarbekam soetada teatud tuntud tootjatelt.

Lisaks sellele, et saavutada töötlemisel kõrge täpsus, on nüüdisaegsetel tööpingirakistel ka teine oluline ülesanne. Rakise asetus tööpingi töölauale peab olema lihtne ja töödeldava detaili kinnitamine rakisesse kiire. Rakise kiireks orienteerimiseks tööpingi töölauale tehakse

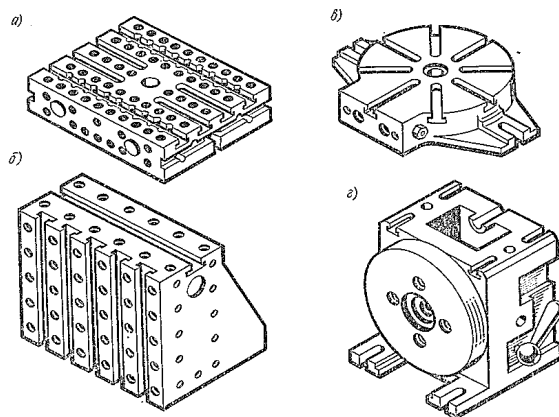
viimastesse lisaks pikibaasidele ka pöikibaasid või avad (või nii üks kui ka teine). Rakis baseeritakse tööpingi töölauda tehtud baseerimisvõimalusi arvestades. Universaal-koostatava tööpingi rakise kasutamisevariant on toodud seel 4.28.



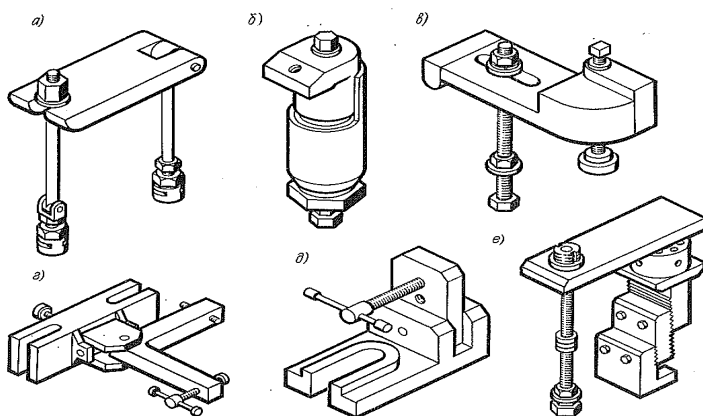
Sele 4.28 Universaal koostatav tööpingi rakis (1 – baaspinnad, 2 – reguleerimiskruvi, 3 – jõusilinder, rakise alus) koos kiirkinnitititega (valikukriteeriumid: silindri kõrgus H ja läbimõõt D)

Vastav tööpingi rakis on lihtne ja laialt kasutusel APJ-frees- ja puurpinkides, töötlemiskeskustes jm. Kinnituselemendid on universaalsed, võivad olla mehaanilised või automatiseeritud kinnitusega (hüdraulilised, pneumaatilised). Viimaseid kasutatakse kinnituskiiruse tõstmiseks, kui on vaja tootlikkust tõsta ja toimub seeriaviisiline tootmine. Seel 4.28 on toodud mõningad olulised tööpingi rakise elemendid: 1 – tugibaasid, 2 – hüdraulilised kiirkinnituselemendid; 3 – hüdrosilinder, 4 – rakise aluslaud või tööpingi töölaud. Kinnituselemendi töömõõtmeteks on silindri kõrgus – H ja silindri välisläbimõõt – D . Kinnituselemendi olulisemad koostisosad on: 9 – korpus, 5 – kolb tagasijõudu omava vedruga, 7, 8 – fikseerimismutter, 6 – ühendus hüdrosüsteemiga.

Freepinkide tehnoloogiliste võimaluste tõstmiseks kasutatakse tööpingi töölauale paigutatavaid seadistuselemente (vt sele 4.29) ja nende juurde kuuluvaid kinnituselemente (sele 4.30). Vastavad kinnituselemendid võivad samuti olla mehaanilised, hüdraulilised või pneumaatilised.



Sele 4.29 Tööpingi töölaudadel kasutatavad seadistusalused



Sele 4.30 Kinnituseelemendid

Selel 4.29 on kujutatud tööpingi töölauale asetatavad universaalsed rakised: a) koordinaatlaud, b) vertikaallaud, c) nurga alla pööratav laud, d) jagamispea. Selel 4.30 aga enamlevinud kinnituselemendid: a) õõtskinniti, b) hüdrauliline sulgur, c) reguleeritav kinnitusmehhanism, d) nurkkinniti, e) reguleeritav tugi, f) kõrguse suhtes reguleeritav kinnitussüsteem.

Keevitusrakised, koostamisrakised jt erinevad oluliselt tööpingirakistest, mida käsitleti eelpool. Rakiste projekteerimine on omaette tõsine inseneriülesanne. Tänapäeval ei pea kõiki töid tingimata ise ettevõttes tegema, eriti kui on tegemist VKE-ga. Tuleb jälgida informatsiooni internetist või kasutada teada-tuntud insenerifirmade teenuseid. Keevitusrakiste konstrueerimise kohta (vaid näide) saab informatsiooni [4.23].

Keevitusrakiste kohta vaata ka http://www.eagletoolinc.com/tooling_and ja www.cabbtool.com, tööpingirakiste kohta aga: T. Gutowski. Machining.pdf.

Tootmisettevõtte põhiülesanne on minimaalsete kulude ja maksimaalse kvaliteediga muuta toormaterjal valmistoodanguks, tagades optimaalse ressursikasutuse ning õigeaegsed tarned kliendile. Tootmise jaoks on väga oluline tagada tootmisliinide maksimaalne kasutamine, kuna iga masina seisakuga kaotatakse väärtuslikku aega, mille asemel saaks toota müügiks minevaid kaupu. Lisaks kaasneb ümberseadistuse keerukuse tõttu kõrgema kvalifikatsiooni ja kogemustega tööjõu vajadus, mis omakorda tõstab kulutusi inimressursile. Läbi SMED-i meetodika [4.24, 4.25] oskusliku rakendamise ümberseadistuse analüüsimisel, parendustegevuste määramisel ja ellu viimisel on võimalik ümberseadistuste aega ja kulu oluliselt vähendada.

Ümberseadistus on protsess, mille tulemusena tootmisliin või seade häälestatakse ümber ühe toote (toodete perekonna) valmistamisest uuele tootele või toodete perekonnale.

Ümberhäälestus on üks osa ümberseadistusest, kus toimub tööpingi töö ettevalmistamine vastava tehnilise ülesande täitmiseks (toote valmistamiseks) (<http://www.changeover.com>).

Lühend SMED tuleb inglise keelest (*Single Minute Exchange of Dies*) ning tähendab eesti keelde tõlgituna ümberseadistus minutiga. Meetodika nimetus pärineb Toyota autotehasest, kus ümberseadistuse aega suudeti lühendada mitmelt tunnilt mõnele minutile. Kuigi parimad näited kirjeldavad, kuidas ümberseadistust on võimalik teha alla ühe minuti, on meetodika algupärane eesmärk olnud ümberseadistus alla kümne minuti ehk ühekohalise minutite arvuga [4.24, 4.25].

Ümberseadistuse alla kuuluvad kõik tegevused, mis kaasnevad ühe toote valmistamisest teise toote valmistamisele ümberlülitumisega. Ümberseadistamise aja arvestus algab ühe tootmispartii viimasest heast toodangust kuni järgmise tootmispartii esimese hea tooteni. Põhilised ümberseadistuse tegevused on masina detaili kinnituseks (näiteks vormivahetus) ette valmistamine, lõpetatud tootmispartii vormi eemaldamine, järgmise tootmispartii vormi paigaldamine, masina käivitamine ja parameetrite seadistamine vastavalt uue tootmispartii nõuetele.

Ümberseadistusaegade vähendamine ja tegelikult minimeerimine on igale tootmisettevõttele väga oluline ülesanne. Hästiorganiseeritud seadme ümberhäälestamine võib väga oluliselt vähendada seadistusaegu. Tuginedes SMED-meetodikale, võib ümberhäälestusprotsessi ettevõttele kirjeldada alljärgnevalt:

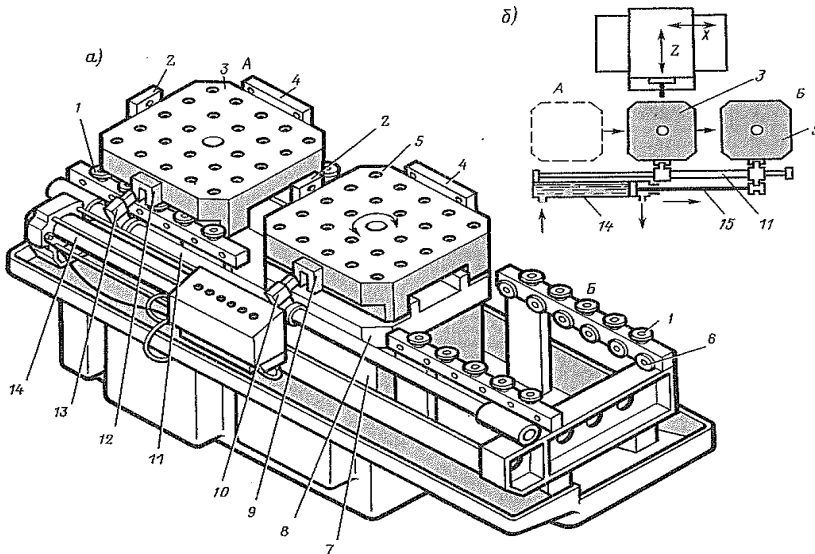
- 1) korrektselt teostada vajalik paberitöö. Kohusetundlikult järgmise tööülesande jaoks valmistada ette kõik vajalikud rakised, tööriistad, abitööriistad, kinnitusabinõud jms, ajal, kui sooritatakse veel eelmist operatsiooni;
- 2) hoiusta kogu riistvara korrektselt selleks ettenähtud kohtadel, vältida kõikvõimalikke ajakadusid otsimisele;
- 3) hoia sagedamini kasutatavad tööriistad lähemal ja paremini kättesaadavatel kohtadel;
- 4) tööta välja võimalikult detailselt ümberhäälestustegevuste jada ja nende olemus. Kõik töötajad peavad korrektselt jälgima ja teostama vajalikud tegevused kindlaksmääratud järjekorras;

- 5) hoia kogu aeg korras töökoht ja selle lähim ümbrus. Iga töötaja kohus on oma lähiümbruse koristamine ja selle korras hoidmine.

Lisaks eelnevale aitab ümberhäälestamist veel oluliselt efektiivsemaks teha alljärgneva SMED-strateegia rakendamine:

- 1) erista välised (väljaspool tööpingi tööala) ja sisemised (tööpingi tööala sees) ümberhäälestustoimingud;
- 2) veendu, et kõik välised ümberhäälestustoimingud on teostatud ajal, kui tööpink veel töötab;
- 3) püüa võimalikult palju sisemisi ümberhäälestamistoiminguid teisaldada välisteks;
- 4) täiusta pidevalt ümberhäälestusprotsessi.

Üks võimalusi, kuidas nii seadistus- kui ka paigaldusaegasid oluliselt vähendada, tuginedes eeltoodule, on kasutada vahetatavaid töölaudaid (vt sele 4.31). Vahetatavate töölaudade või nagu neid ka nimetatakse – puhvrite – realisatsioonivariante on palju. Need on kas vahetult seotud tööpingiga (sele 4.19) või on teataval määral autonoomsed (sele 4.31 b).



Sele 4.31 Palettide süsteem tööpingi juures (tööpingi puhversüsteem)

Puhversüsteemide olulisemad koostisosad on (vt sele 4.31): vahetatavad töölaudad 3, 5; baseerimiselemendid 1, 6, samas ka tugi- ja transpordirullikud; asendi fikseerimisplaadid 2, 4; alusraam 7; pöördalus 8; fikseerimislukud 9, 12; fiksaatorid 10, 13; transportimisseadisena kasutatav hüdrosilinder 14; hüdrosilindri vars 15. Vahetatavad töölaudad ja puhvisüsteemid

on omased tänapäeva CNC-tööpinkidele, eelkõige töötlemiskeskustele ja paindootmismoodulitele. Nad võimaldavad töödeldavat detaili seadistada väljaspool tööaega ja hoida sellega märkimisväärselt kokku ajakulusid ning suurendada tööpingi tööaja kasutamist ja tekitada lisandväärtust.

Koordinaatlauad võimaldavad ka paremini fikseerida töötlemise nullpunkte ja kasutada universaal-koostatavaid rakiseid koos vajaduspõhiste kiirkinnituselementidega. Põhieesmärk on ikka masinaaja osatähtsuse tõstmine ja igasuguste tühiaegade elimineerimine.

4.4.1.2 Tööriistade majandamissüsteem

Tööriistamajandus on valdkond, mis hõlmab kogu vastava tootmissüsteemi (tootmise alamsüsteemi) juures kasutatavaid tööriistu ja abivahendeid, nende hoiustamist, transporti ja nende kohta käivat informatsiooni [4.26, 4.27].

Tööriistamajanduse aluseks ettevõttes on tööriistad ja vajalikud abitööriistad. Nende tootjaid on maailmas palju ja nende areng on olnud väga kiire. Mõningate tööriistatootjate koduleheküljed on toodud alljärgnevalt, et tekiks ettekujutus vajaliku informatsiooni haldamise osas:

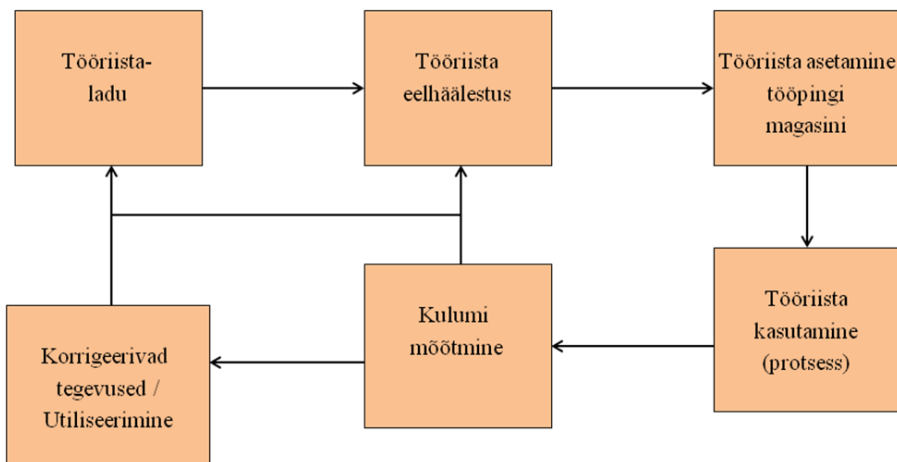
- Secotools: www.secotools.com;
- Iscar: www.iscar.com;
- Technix: www.technixltd.com;
- Hanser: www.hanser.com.

Tänapäeval võib tööriistamajandust ohjata käsitsi, mis on individuaaltootmise ja väikeste mahtude juures mõeldav. Suuremate tootmismahude ja suurema hulga tööriistade kasutamise puhul on kahtlemata otstarbekam kasutada automatiseeritud tööriistahaldust, näiteks PLM-süsteemide puhul nende olulise koostisosana.

Nüüdisaegne tööriistamajandus koosneb:

- riistvarast (tööriistad, abivahendid, vahetusmehhanismid, ladustamistarvikud, transpordivahendid) ja
- tarkvarast (andmebaasid ja/või infotöötlussüsteemid, näiteks PLM).

Tööriistamajanduse üldolemus on kujutatud seel 4.32. Suurte tootmismahude, spetsiaalmaterjalide töötlemise või väga intensiivsete töötlemisrežiimide kasutamise puhul on tööriistakulu ja -vajadus suur. Siis tekib erilisel suur vajadus võtta ettevõttes kasutusele tööriistade haldussüsteem [4.26, 4.27]. Vastava süsteemi aluseks on tööriistade andmebaas, kuhu on kantud kõik kasutuses olevad tööriistad (koos põhiparameetrite kirjeldustega). Tööriistade andmebaas jälgib ka nende püsivusaegu ning sisaldab samuti nende eelhäälestuse ja korrigeerimise tulemusi. Tööriistade halduse süsteem on tavaliselt realiseeritud ka PLM-süsteemides.



Sele 4.32 Tööriistamajanduse olulisemad funktsioonid

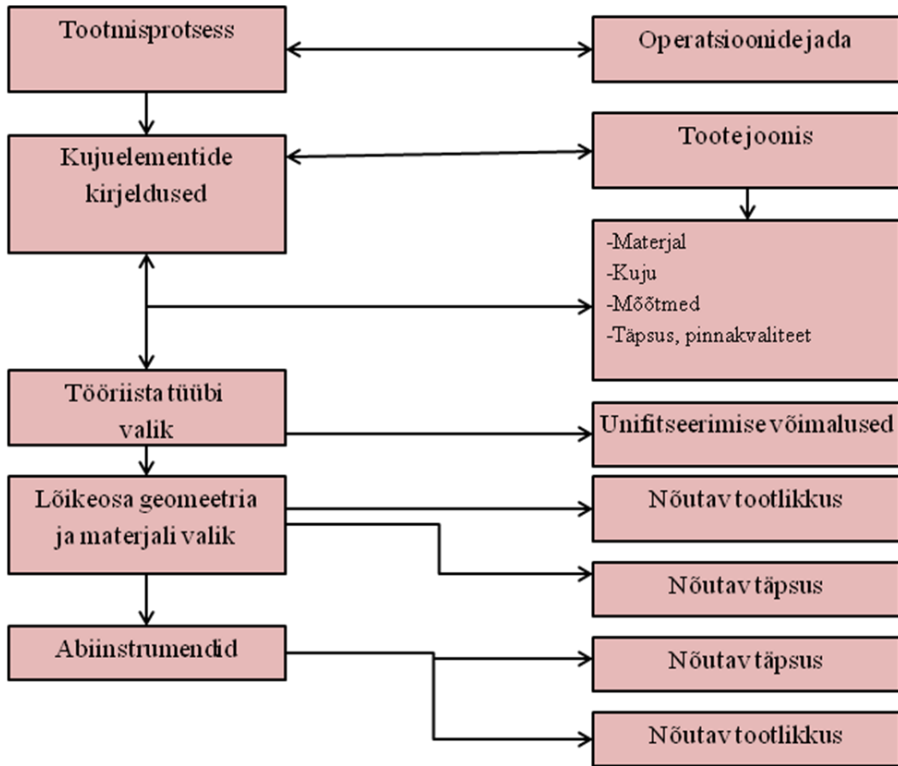
Tööriistamajanduse süsteemi arendusprotsess:

- 1) toodete klassifitseerimine (toote perekonnad, klassifitseerimise tunnused, näiteks plaaditüüpi detailid);
- 2) toote geomeetriseliste elementide klassifitseerimine: kujuelemendi geometria (näiteks silindriline läbiv ava vastavate mõõtmetega: D, L – läbimõõt, pikkus);
- 3) töödeldavad materjalid (näiteks titaan);
- 4) tööriistade klassifitseerimine (tööriistade grupid, tööriistade tüübid, tööriistade lõikeosa materjalid, tööriista kinnitusosa kirjeldused jms);
- 5) tööriistade andmiku koostamine;
- 6) tööriistade hoiustamine (tsentraallaos, kohtlaos tööpingi juures, ladude asukohtade määramine);
- 7) tööriistade kohaletoimetamine (käsitsi, automatiseeritult);
- 8) Abitööriistade andmiku koostamine;
- 9) tööriistade liidestamine abitööriistadega (tööriistalaos, tööpingi juures, häälestuspositsioonis);
- 10) tööriistade eelhäälestamine ja nullpunktide seadistamine (eelhäälestusrakises, tööpingis);
- 11) tööriistade püsivusaegade määramine ja nende kontroll (käsitsi, automatiseeritult);
- 12) tööriistade utiliseerimine.

Tööriistade kirjeldamise juures on eelkõige vajalik alljärgnev informatsioon: tööriista identifitseerimise number, tööriista tüüp, tööriista põhimõõtmed (D, L), lõikeosa tüüp, lõikeosa geometria kirjeldus, lõikeosa materjal, kinnitusosa mõõtmed (pikkus, läbimõõt, koonuse number), püsivusaeg, kasutamise eritingimused. Toodud andmed on hädavajalikud tööriistade kasutamise juures. Tööriistamajandus laiemas mõttes võib omada andmeid veel tootjate, maksumuste, kasutamissoovituste jms kohta.

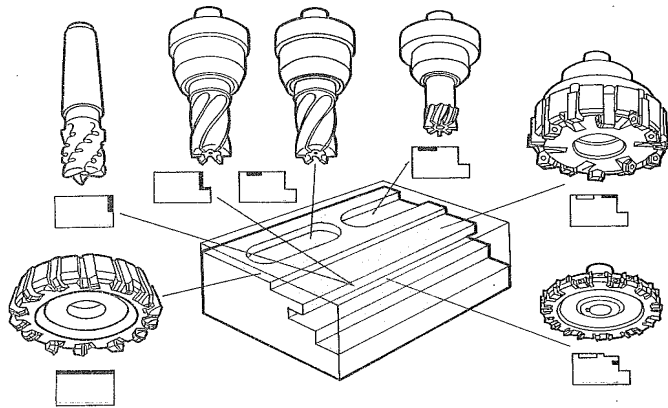
Tänapäeval on tööriistavalmistajaid palju. Neil on põhjalikud kataloogid tööriistade kohta kogu vajaliku informatsiooniga. Tööriistatootjatelt on võimalik saada ka informatsiooni nende valiku ja otstarbekate kasutamistingimuste kohta.

Tööriistade valiku üldpõhimõtted on toodud seel 4.33.



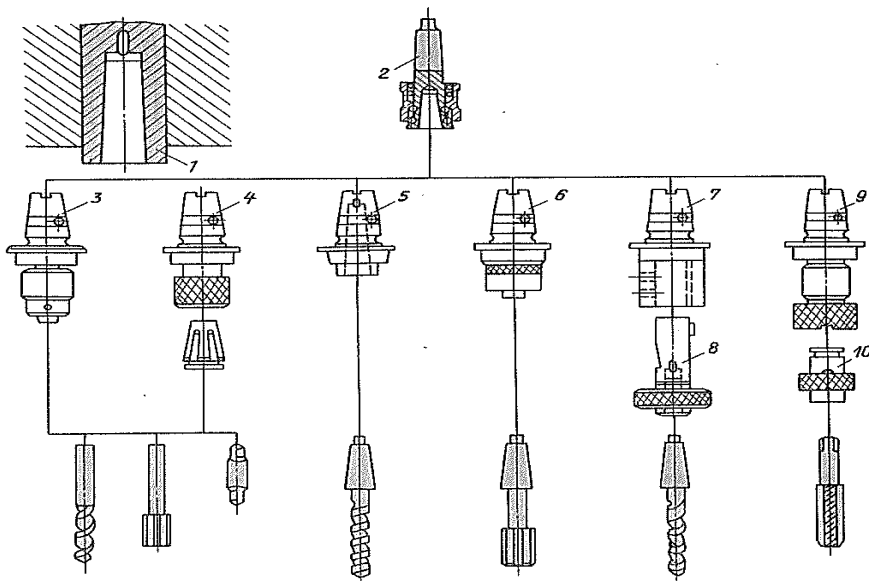
Sele 4.33 Tööriista valiku skeem

Tööriista valik sõltub tööülesandest. Kuna tänapäeval on tööriistade tootjaid palju ja ka alternatiivsete variantide hulk väga suur, siis on tööriista valik päris keeruline ülesanne. Peamisteks valiku kriteeriumiteks on kujuelemendi geomeetria tekitamine löikeprotsessis, tööriista tootlikkus, saavutatav pinnakvaliteet, töötlemise täpsus ja kahtlemata hind. Tööriistade kasutamine toote valmistamiseks on toodud seel 4.34.



Sele 4.34 Erinevad tööriistad lõikeprotsessis

Lisaks tööriistadele vajatakse abitööriistu. Tööriistasüsteemi füüsiline osa on toodud seel 4.35.



Sele 4.35 Tööriistasüsteemi füüsiline osa

1 – tööpingi spindel, 2 – kiirvahetuspadrun kuulnõutusega, 3 – tavaline puurimispadrun, 4 – tsangpadrun, 5 – sisemise Morse koonusega abitööriist, 6 – ujuvpadrun avardite kinnitamiseks, 7 – silindrilise ava ja kiilusoonega padrun 8 – reguleerimispuks, 9 – keermelõikurite kinnituspõrun, 10 – kiirvahetuspea

Tööriistahoidik on oluline vahelüli tööpingi spindli ja tööriista vahel. Tööriistasüsteemil on paindlikkus ja kiire vahetamise võimalus olulised eelised. Paindlikkus tagatakse vahetatavuse kaudu, mis võimaldab ühes tööpingis kasutada suurt hulka erinevat tüüpi ja erinevate tootjate tööriistu.

Tööriistamajanduse füüsilise osa moodustavad:

- tööriistaladu;
- tööriistade transpordivahendid (manuaalsed, automatiseeritud);
- tööriistamagasinid (erinevat tüüpi, erinevad suurused);
- tööriista vahetuse seadmed (manipulaatorid, robotid).

Tööriistamajanduse põhiinformatsioon töö teostuse seisukohast lähtudes on toodud tabelis 4.5.

Tabel 4.5 Tööriistamajanduse põhiandmik

Tööpink	Tööriistamajandus	Detail
Tööriista leidmise aeg Tööriista paigutamise aeg Tööriista vahetuse aeg	Tööriistade transpordi liik Tööriistade vahetuse seade Tööriistade kodeerimise liik Tööriistade ladustamise liik Tööriistade kohtade arv laos Ladude arv Tööriistade paigutuse aeg lattu Tööriistade vahetuse aeg tsentraallao ja tööpingi maga- sini vahel	Detaili number Detaili partii suurus Toote valmistusprotsess Toote operatsiooni kaart Tööriistade häälestuskaart Tööriistade kasutamisarjajekord (kohad tööriistamagasinis) Tööriistade püsivusajad

Toodete valmistamise juures on alati tähtsaks ülesandeks masinaaja osatähtsuse suurendamine. Ka töötlemise täpsuse tagamine on väga oluline. Kui toote valmistamise ajad on lühikesed, on igasuguste seisakute aegade lühendamise veelgi kriitilisem. Tööriistade eelhäälestamine on seetõttu tarvilik, eriti kui kasutatavate tööriistade arv on suur ja nende lõikesoleku ajad lühikesed.

Tööriistade eelhäälestatalse järgmise tööülesande tarvis eelmise operatsiooni sooritamise ajal.

Tööriistade eelhäälestusseadmeid ja nende tootjaid on palju. Valiku juures on olulisemateks parameetriteks:

- positsioneerimise täpsus;
- töötsooni suurus;
- eelhäälestatavate tööriistade mõõtmed (max, min);
- eelhäälestuse kiirus;
- monitori kvaliteet;

- suurenduse võimalused, valgustuse võimalused jms;
- andmete mahalaadimise võimalused ja andmete vahetu edastamise võimalused CNC-tööpingi juhtimissüsteemi;
- seadme integreerimise võimalused teiste tootmissüsteemi kuuluvate seadmetega (teised arvutid, iPad, printimisseadmed jms);
- seadme maksumus.

Tööriistade eelhäälestuse seadmetest ja nende kasutamisest on võimalik saada ülevaadet näiteks: <http://us.bigkaiser.com/products/tool-presetters> või <http://www.productionmachining.com/articles/reducing-downtime-with-tool-presetting>.

Tööriistade eelhäälestuse seadmete variatsioone on väga palju ja valiku esimeseks kriteeriumiks on eelhäälestatavate tööriistade nomenklatuur, mõõtmed, ja häälestustäpsus. Kindlasti on oluline ka häälestusprotsessi kiirus, kuvari võimalused, tarkvara lahendused ja integreerimisvõimalus kasutatava CAM-süsteemiga. Tuleks analüüsida alternatiivseid variante, arvestada hoolikalt oma vajadusi ja lähtuda ka seadme hinnast.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et koosluste või alamsüsteemide moodustamise aluseks on ühtne territoorium, ühtne või lähedane tegevusfunktsioon, sarnast liiki vastava süsteemi komponendid või elemendid.

Näiteks ühel tootmissüsteemil võib olla neli alamsüsteemi: lehtmaterjalide töötlemise alamsüsteem, mehaanilise töötlemise alamsüsteem, koostamise alamsüsteem ja värvimise alamsüsteem. Lehtmaterjalide töötlemise alamsüsteemis on omakorda üks töötlemismoodul – lehetöötlemiskeskus – ja neli lehetöötlemise tööpink, erinevate funktsionaalsustega (laseroõikus, plasmaloõikus jms). Vastava alamsüsteemi juures on oma rakistuse ja tööriistade süsteem, mis on ühildatud kogu tootmissüsteemi kui tervikuga.

4.4.2 Transpordi- ja ladustamissüsteem

Transpordisüsteem peab tagama töödeldavate detailide õigeaegse kohaletoimetamise töötlemispositsioonidesse vajalikes kogustes ja minimaalse ajakuluga.

Laosüsteem on ettenähtud materjalide, toorikute, pooltoodete ja ka valmistoodangu normatiivse koguse vastuvõtmiseks, hoiustamiseks ja väljaandmiseks kindlaksmääratud sagedusega ja vajalikes kogustes.

Transpordi- ja laosüsteemid on kas manuaalsed või automatiseeritud. Tootlikkuse suurendamiseks liigutakse üha enam automatiseeritud transpordi-laosüsteemide suunas. Põhilised tehnilised vahendid on nii manuaalsete kui ka automatiseeritud süsteemide puhul paljuski analoogilised. Toodete transportimiseks kasutatakse pidevtranspordivahendeid (lint-, rull-, kett-, vibro-, kruvi- vms konveiereid) või diskreetse transpordi vahendeid (liikurrobotid, transpordisõidukid, tõstusõidukid, kraanad, elektritalid jms).

Konveiersüsteemid on jäigemad ja kohaldatud kindla struktuuriga tootmissüsteemide teenindamiseks (lineaarne paigaldus, suletud paigaldus). Konveiersüsteemid eeldavad ka enam

püsivamaid tootmisprogramme ja võimalusel suurema operatsiooniajaga töid. Seevastu diskreetne transport on paindlikum. Siin siis võib töödeldavate detailide nomenklatuursus olla suurem, detailide valmistusajad lühemad ja valmistuskogused varieeruvad.

Automatiseeritud diskreetse transpordi vahendid võivad olla relssteedel liikuvad, induktiivsusprintsibil töötavad või vabalt programmeeritavad sõidukid või liikurrobotid. Kõige paindlikum transport on vabalt (programmeeritavalt) liikuvad mobiilsed robotid. Relssteedel liikuv automatiseeritud sõiduk on kujutatud selel 4.36.

Sageli püütakse tootmissüsteemide juures leida lahendusi, kus transpordi- ja laosüsteemi ühildatakse üheks tervikuks. Automatiseeritud transpordi-laosüsteemi põhikomponendid on: toorikute/detailide lattu sisestamine ja laost väljumise positsioon; toorikute/töödeldavate detailide hoidmise alused; Laosisene transpordivahend (liikurrobot, automatiseeritud tõstusõiduk vms) ja laoriilule süsteem.




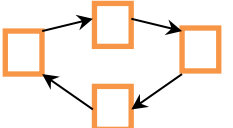
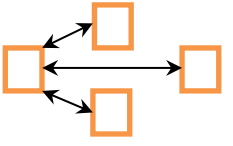
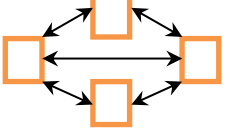
Sele 4.36 Automatiseeritud ladu (Mehhatroonikum)

Ladude tüüpilisemateks variantideks on:

- paletid (üks mõõde);
- lineaarladu (kaks mõõdet);
- plokkladu (kolm mõõdet);
- Tsirkulaar- või ringladu (kaks või kolm mõõdet).

Transpordisüsteem võib olla üles ehitatud mitmeti (vt tabel 4.6), lähtudes transportimisprintsibist.

Tabel 4.6 Erinevate transportimissüsteemide kasutamistarbekus

Transportimisprintsip		Paindlikkus		Detailide tsentraal-laos hoidmise võimalus
Struktuur	Ehitus	Liikumine	Töötlemismarsruut	
Lineaarne		Jäik	Jäik	Võimalik
Hargnev		Jäik	Tinglikult paindlik	Tinglikult võimalik
Tähekujuline		Paindlik	Paindlik	Vajalik
Võrgukujuline		Väga paindlik	Väga paindlik	Võimalik

Transpordi-laosüsteem moodustab sageli (paind)tootmissüsteemides ühtse terviku kogu ülejäänud süsteemiga. Töö rütmilisus ja transportimisele kulutatava aja osatähtsus sõltub suuresti transpordi-laosüsteemi ülesehitusest.

Transpordi-laosüsteemi insenerlikust lahendusest sõltub tööde planeerimise efektiivsus, majanduslikud näitajad ja ka paindlikkuse ja automatiseerituse tase.

Transpordisüsteemi realisatsioonivariante on põhimõtteliselt neli:

- 1) konveiersüsteemid;
- 2) liikursõidukid (https://en.wikipedia.org/wiki/Automated_guided_vehicle);
- 3) robotid (statsionaarsed, mobiilsed, portaalrobotid);
- 4) kombineeritud variandid.

Materjalide käsitlemise süsteemidest ja nende erinevatest realisatsioonivariantidest ja kasutamistarbekusest saab üsna hea ülevaate alljärgneva kirjanduse vahendusel [4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35].

4.4.2.1 Transpordi-laosüsteemi kavandamine

Automatiseeritud materjalide käitus- ja laosüsteem on reeglina igale tootmissüsteemile individuaalne lahendus.

Projekteerimisülesande lähteparameetrid on järgmised: töödeldavate detailide nomenklatuurisus ja kogused; töödeldavate detailide mõõtmed; töötlemise keskmine tsükli-aeg; tööpin-kide arv ja asetus süsteemis.

Lahendamisele kuuluvad põhilised ülesanded on alljärgnevad:

- transportimisprintsii ja laotüübi määramine;
- transpordivahendi liigi valik (tõstukiga liikursõiduk, konveier, mobiilne robot);
- transpordivahendite arvu määramine;
- ladustamisprintsii määramine (FIFO, FILO või muud kombinatsioonid);
- transpordivahendi tehnoloogiliste võimaluste määramine (kohtade arv transpordivahendis, transpordivahendi liikumiskiirus, palettide mõõtmed, palettide kandevõime jms);
- laoriulite ehitus (konstruktsioonelementide valik);
- lao mahutavus (kohtade arv laos);
- etteandmis-, mahavõtmis-, paigaldamis- jms mehhanismide valik;
- automatiseerituse taseme määramine;
- elektrooniliste tugikomponentide (sensorid, PLC jms) valik;
- juhtimissüsteemi kontseptsiooni valik.

Lahendatavaid ülesandeid on piisavalt palju ja need on ka küllaltki komplitseeritud ning seetõttu võiks automatiseeritud transpordi-laosüsteemi väljaarendamise ettevõttes jätta vastava valdkonna spetsialistidele. Kui tekib vajadus mõnd lihtsamat süsteemi realiseerida, siis kindel põhimõte peaks olema, et kasutada võimalikult palju unifitseeritud lahendusi ja standardkomponente, mida on kohe võimalik turult osta.

Transpordi-laosüsteemide kavandamine ja arendamise ülesanded on paljuski otsustusülesanded erinevate alternatiivsete variantide vahel.

Väga sageli on mitmesugust liiki otsustuste tegemiseks vaja kasutada suurt hulka eriliigilisi kriteeriume, mida matemaatiliste funktsioonide näol on tülikas või ebaotstarbekas väljendada. Kasutatavate kriteeriumite KR_i arv n , KR_i , $i = 1, 2, \dots, n$ ja nende olemus sõltub konkreetselt lahendatavast ülesandest. Mida suurem on kasutatavate kriteeriumite arv ja mida mitmekülgsemad nad on, seda ülevaatlikum ja täpsem tulemus reeglina saadakse. Teisalt muutub kriteeriumite arvu suurenedes ka ülesande lahendamine aeganõudvamaks ning sageli ka tervikuna komplitseeritumaks.

Niisiis tabelotsuste meetodi rakendamisel tehakse kõigepealt kindlaks kasutatavate kriteeriumite arv ja olemus. Kriteeriumite mõju lahendatava ülesande tulemusele võib olla varieeruv, mida saab väljendada koefitsiendiga

A_{ij} järgmisel viisil

$$A_{ij} = \begin{matrix} +1, \text{ soosiv} \\ 0, \text{ neutraalne} \\ +1, \text{ ebasoosiv,} \end{matrix}$$

Kus j – alternatiivseid variante kajastav indeks, $j = 1, 2, \dots, m$;

m – alternatiivsete variantide arv.

Lisaks soosivale või ebasoosivale hoiakule võib kriteeriumite osatähtsus olla ka erinev. Kriteeriumite tähtsuse hindamiseks konkreetse ülesande lahendamisel kasutatakse sageli eria-laekspertide nõuandeid. Tähtsuse väljendajaks on kriteeriumi kaal G_{ij} .

Kaalude määramisel kasutatakse sagedamini skaalasisid $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ või

$\{1, 2, 3, 4, \dots, 9, 10\}$. On võimalikud ka mitmesugused kombineeritud skaalad. Hinnangute kaalud on võimalik jäigalt kinnistada igale kriteeriumile või siis otsuse vastuvõtja (vastava valdkonna insener) ise otsustab, lähtudes objektiivsetest asjaoludest, milliseid kriteeriume ta peab vajalikuks arvestada ning kui suure kaaluga need on.

Arvestades kõike ülaltoodut, annab parima tulemuse püstitatud ülesande lahendamisel funktsionaal:

$$\text{PARIM} = \max \{ A_{ij} * G_{ij} * K_{ij} \}$$

üle kõikide j - ide

Kriteeriumite hulk, valikvastused ja konkreetsete punktide arvud kujutavad endast eksperthinnanguid ja on seega subjektiivsed ning kogunud projekteerija ei pruugi neid aktsepteerida. Seepärast peab selliseid mudeleid kasutatav projekteerimissüsteem võimaldama neid hinnanguid ja kriteeriume vajaduse korral muuta. Taolist meetodit on sobilik kasutada näiteks roboti grupi, liigi; tööpinkide asetusskeemi; transportimise printsiibi jm taoliste insenerlike ülesannete lahendamiseks.

Kogutud punktisumma põhjal saab ka hinnata, kui arvestatav on saadud tulemus. Minimaalse ja maksimaalse võimaliku punktisumma alusel saab leida keskmise punktide arvu. Kui võrrelda saadud punktisummat minimaalse, keskmise ja maksimaalse väärtusega, on võimalik hinnata tulemuse arvestatavust või enam punkte kogunud variandi realisatsiooni otstarbekust.

Tabelotsustuse meetodi kasutamisel on esmalt kajastatud vaid võimalike kriteeriumite mõjud ühe või teise alternatiivse variandi kasutamisevõimaluste osas. Täpsema eelistuse saamiseks tuleks lisada ka otstarbekuse eksperthinnangud ehk kriteeriumite kaalud. Eksperthinnangud sõltuvad aga juba konkreetse lahenduse kavandamisest, kus nii lähteülesanne kui ka teostusvõimalused on detailselt formuleeritud.

4.4.3 Kontrolli- ja mõõtesüsteem

Kontrolli- ja mõõtesüsteem on üks olulisemaid alamsüsteeme, sest lõppkokkuvõttes on just selle abil võimalik täielikult realiseerida üht tootmise olulist funktsiooni – saavutada nõutud toodangu kvaliteet.

Kontrolli- ja mõõtesüsteem on ette nähtud täitma alljärgnevat funktsiooni:

- koguma informatsiooni tootmisprotsessi kulgemise käigust, seadmete valmisolekust tööks ning hälvete olemasolu korral kohe reageerima nendele;
- prognoosima võimalikke tõrkeid;
- võrdlema faktilisi parameetreid (nii töötlemise täpsust, pinnakvaliteeti, pinnete paksust kui ka seadmete tööd iseloomustavad) etteantutega;
- edastama informatsiooni teostatud või tegemata jäetud toimingute kohta.

Kvaliteedi tagamise seisukohast lähtudes on ettevõttel täita ja korraldada kaks suurt ülesannete gruppi: kvaliteedi kindlustamine ja kvaliteedikontroll.

Kvaliteedi kindlustamine on planeeritud ja süstemaatiline tegevus, et juhtkond kasutaks kokkulepitud standarded, protseduure ja meetodeid ja tagaks nii kvaliteetse toodangu ja rahuldaks kliendi kvaliteedisoove. Tarnekindlus ja -täpsus on siin olulised näitajad. Kvaliteedijuhtimise standardite (ISO 9001 jms) ja tervikliku kvaliteedijuhtimise (TQM) põhimõtete järgimine on igale ettevõttele olulised tegevused. Lähemalt nendest on juttu 11. ptk-s.

Kvaliteedikontroll on erinevate vaatlus- ja mõõtetehniliste vahenditel baseeruv tegevuste kogum, et täita kvaliteedinõudeid. Kvaliteedinõuded on fikseeritud toote valmistamise tehnilises dokumentatsioonis (tööjoonised, koostejoonised jms) ning selle tõenduseks koostatakse vajalikud mõõteprotokollid või muud väljunddokumendid, mis põhinevad näiteks statistilise protsessiohje reeglitel [4.3, 4.36, 4.37].

Kõiki protsesse võib seirata ja kontrolli alla saada andmete kogumise ja nende kasutamise ning analüüsi abil. **Statistiline protsessiohje** (juhtimine) (SPC) [4.3, 4.36, 4.37] on vahend, et vähendada hajuvust, mis on peamine põhjus kvaliteediga seotud probleemide tekkeks.

Kvaliteedikontrolli ülesanne ettevõttes on avastada materjalide, toodete ja protsesside kõrvalekaldumisi ettenähtust, et parendada tegevusi tulevikus ning mitte lubada nõuetele mittevastavaid tooteid ettevõttest välja.

Töötlemisviga põhjustab ebatäpse mõõdu, mis on omakorda praaktoote tekkepõhjuseks. Mõõte- ja kontrollisüsteem peabki kindlustama täieliku kontrolli, et avastada mittevastavad tooted ning leida nende tekkepõhjused.

Valmistatava detaili summaarse vea võib kirjeldada valemiga:

$$\text{Summaarne viga} = \text{töötlemisviga} + \text{paigaldusviga} + \text{muud vead}$$

- Töötlemisviga põhjustavad pingi ebatäpsused. Nendeks võivad olla tööriistade kulumised, pingi kulumine, töölaua ebatäpsus, pingi mõõteriistade ebatäpsused jne.

- Paigaldusviga tuleneb detaili rakisesse kinnitamisel tekkivast veast. Viga suureneb, kui detaili pole võimalik valmistada ainult ühe paigaldusega, vaid toorikul tuleb asendit muuta.
- Muud vead tekivad väliste tegurite tulemusena. Nendeks on temperatuuride kõikumised, materjalide iseärasused, operaatorite oskused jne.

Erinevate kontrolliliikide iseloomustus on toodud tabelis 4.7.

Tabel 4.7 Kontrolliliikide klassifitseerimine

Klassifitseerimise tunnus	Kontrolliliik
Kontrolli eesmärk	Toodangu kvaliteedi kontroll Töökindluse kontroll
Lahendatav ülesanne	Vastuvõttev (kvaliteetne, mittekvaliteetne) Prognoosiv Profülaktiline
Toime objektile	Aktiivne (otsene, vahetu, teostuse ajal) Passiivne (pärast töötlemist)
Ajaline teostus	Pidev Perioodiline

Kontrolliliikide tundmine aitab ettevõtte kvaliteediinseneridel nendega kombineerida ja kasutades ka tehnoloogide väljatöötatud kontrollitehnoloogiaid tagada toodangu täielik kvaliteetus. Vastav teema muutub ettevõtetes üha aktuaalsemaks, kuna paljudel juhtudel on vaja minimaalse ajakuluga kontrollida kogu toodang. Seetõttu on ettevõtte kontrolli-mõõtesüsteem üles ehitatud vahendite ja seadmetega, mida on tinglikult võimalik jagada viide gruppi:

- käsitsi mõõtmise vahendid (digitaalsed või konventsionaalsed): mõõdulindid, nihikud, mikromeetrid, nurgikud, mõõtejoonlauad, loodid, pinnakareduse mõõdikud, šabloonid jms;
- mõõteandurid;
- tööpinkides kasutatavad vahetu kontrolli seadmed;
- mõõterobotid;
- mõõtemasinad.

Mõõte- ja kontrollisüsteemi ülesehitus jaoskonnas/tootmissüsteemis algab protsessi lõpust ehk esmalt tuleb välja selgitada, mida, kui sageli ja mis eesmärgil on vaja mõõta seoses töödeldava detaili kontrolli, seadme töökindluse, masinaja ratsionaalse kasutamise või tootlikkuse süsteemse suurendamisega. Kõik nimetatud valdkonnad on üksteisest vägagi erinevad. MES-i ja tootlikkuse suurendamist on eraldi käsitletud 9. ptk-s. Siinjuures keskendume põgusalt toote kvaliteeti kindlustavale riistvarale ja veidi ka kvaliteeditagamisele.

Kvaliteedikontrolli dokumentatsiooni (kontrollikaardid) eripärast ja nende kasutamiststarbekusest annab väga hea ülevaate [4.38].

Juba pikka aega on kasutatud täpsuse, pinnakvaliteedi ja pindade kuju mõõtmiseks mitmesuguseid **käitsi mõõtmise vahendeid**. Need on kõige sagedamini ja laialdasemalt kasutatavad kvaliteedikontrolli töövahendid. Tänapäeval on toimunud digitaliseerimine, mis teeb nende käsitlemise lihtsamaks, mõõtmistäpsuse suuremaks ja tulemuste kajastamise oluliselt kiiremaks (otseühendus arvutiga või teiste digitaalseadmetega).

Ettevõtetes kasutatakse kvaliteeti kindlustavate vahenditena ka mitmesugust liiki **mõõteandureid**: asendi-, geomeetriliste mõõtmete-, geomeetrilise kuju-, rõhu-, temperatuuri-, niiskusekiiruse-, vibratsiooni-, müra-, nägemis-, jm andurid. Andurite (sensorite) valmistajaid on väga palju ja veelgi enam on nende erinevaid realisatsioone, mis erinevad mõõtetäpsuse, töökindluse ja hinna poolest. Oluline on veel seadme toide ja andmeedastus- ning andmetöötlusmehhanism.

Seega tuleb valides kasutada teadmisi, kogemusi ja interneti. Alati on võimalik kaasata ka vastava valdkonna spetsialiste.

Töötlemise täpsuse tagamiseks on tänapäeval paljud tööpingid varustatud erinevate aktiivkontrolli seadmetega. Vastavate mõõteanduritega on võimalik kontrollida nii töödeldavate detailide mõõtmeid (sele 4.37) kui ka tööriista kulumise suurust (sele 4.38) ja seejärel vajaduse korral viia töötlemisprogrammi automaatselt sisse vajalikud korrektsioonid, et saavutada töödeldavate mõõtmete täpsus.



Sele 4.37 Tööpinkidel detailide täpsuse kontrolliks kasutatav firma Renishaw' mõõtesond OMP60.

Tüüpilised töödeldava detaili kontrolli vajadused on:

- töödeldavate tasapindade mõõtmete kontroll;
- töödeldavate avade mõõtude kontroll;
- samatelgsuse kontroll;
- töödeldavate avade tsentrite vahekauguse kontroll;
- töödeldavate tasapindade vastastikuse asendi kontroll;
- kujuhälvete kontroll (silindrilisus, koonilisus jms);
- vajaliku ava olemasolu kontroll jms.

Tööriistade kulumi mõõtmine ja selle automaatse korrigeerimise võimalus on nii töötlemise täpsuse tagamise kui ka tootlikkuse seisukohast oluline. Kaaluda tuleb ainult, kas otstarbekam on mõõta töötsoonis (raiskame masinaega, aga hoiame kokku transpordi- ja seadistus- aegu) või on ikkagi otstarbekam mõõta väljaspool tööpingi töötsooni.



Sele 4.38 Lõikurite kulumise mõõtmiseks kasutatakse tööpingis näiteks Blumi mõõtelaserit LaserControl NT-H.

Nagu eeltoodust selgub on täpsete ja kvaliteetsete toodete saamiseks vaja palju mõõta ja kontrollida, sageli teha ka mõõtude statistilist analüüsi ja seejärel võtta vastu otsuseid. Mida täpsemad on töödeldavad detailid, seda enam tuleb arvestada erinevate mõjuteguritega:

- töölaua asendi täpsus;
- spindli ristseisu täpsus töölauga;
- temperatuuri kõikumine töötlemise ajal;
- seadmete seadistus;
- seadme töötemperatuur ja selle hoidmise võimalus.

Vastavaid mõjutegureid peab kindlasti perioodiliselt kontrollima ja vastava kontrolli eest vastutab tavaliselt ettevõttes kvaliteediinsener. Sageli kaasatakse kontrolliprotsessi ka seadmete tootjafirmade esindajad või tellitakse vastav teenustöö.

Täpsete ja vastutusrikaste toodete puhul või suurte mõõtmismahtude juures kasutatakse mõõteprotsessi automatiseerimise eesmärgil mõõteroboteid või mõõtemasinaid.

Mõõterobotite areng on viimasel ajal olnud väga kiire. Mõõterobotitel peavad olema järgmised tehnoloogilised funktsioonid:

- kõrged dünaamilised näitajad (et mitte aeglustada tootmisprotsessi ja oleks võimalik kontrollida vajaduse korral 100% toodetavatest detailidest);
- neil peab olema vähemalt 6 vabaduseastet (et oleks võimalik üle mõõta igasuguse konfiguratsiooniga detaile);

- moodulkonstruksioon (võimaldab komplekteerida tööülesandele kõige enam sobivama roboti);
- peavad olema sõltumatud väliskeskkonna mõjudest;
- andmetöötlussüsteem peab olema paindlik ja kiire.

Mööteroboti juures on kaks olulist aspekti: ühelt poolt selle konstruktiivne ehitus, mis peab garanteerima eelkirjeldatud funktsionaalsed omadused, ja teisalt peab tema tööseadis (möötepea) suutma teostada vajaliku täpsusega vastava mööteprotseduuri (pinna kuju mõõtmine, geomeetrilise elemendi mõõtmete mõõtmine, pinnakareduse mõõtmine vms).

Koordinaat-möötemasinaid (CMM) kasutatakse kõige enam toodete lõppkontrollis. See on seade, mida kasutatakse füüsilise objekti geomeetriliste karakteristikute mõõtmiseks.

Koordinaat-möötemasinate ajalugu on juba üsna pikk [4.41]. Ka erinevaid tootjaid on suhteliselt palju, osa neist on toodud [4.39, 4.40, 4.42, 4.43].

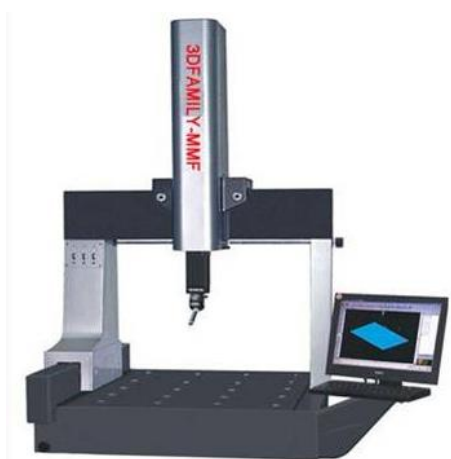
Peamisteks möötemasinate gruppideks on:

- käsitsi juhtimisega möötemasinaid;
- 2D-möötemasinaid;
- 3D-möötemasinaid.

Konstruksiooniliselt jagunevad möötemasinaid nelja peamisesse liiki:

- konsoolsed;
- portaalmöötemasinaid;
- kolonnidele toetuvad konstruktsioonid;
- horisontaalse spindliga möötemasinaid.

Konsoolsete möötemasinatega mõõdetakse peamiselt väiksemaid detaile; portaalsete ja kolonnidele toetuvate möötemasinatega mõõdetakse ja kontrollitakse suuri detaile/tooteid. Üks tüüpiline portaalse ehitusega möötemasin on kujutatud seel 4.39.



Sele 4.39 Koordinaat-möötemasina põhiolemus

Koordinaat-mõõtemasinate tehnilisi andmeid saab võrrelda ja analüüsida nende ühe tuntuma tootja Mitutoyo kataloogis. [4.39].

Paindlikkuses kaotavad mõõtemasinaid mõõterobotitele, kuid kui on seeriaviisiline tootmine ja suur mõõtmise osatähtsus ning suur mõõtetäpsus, on nad väga eelistatud seisundis. Mitmetes tehnoloogilistes valdkondades, nagu autotööstus, aeronautika, meditsiinitööstus, paljud energeetikatööstuse valdkonnad jms, on mõõtemasinate kasutamine lausa vältimatu. Kui kvaliteedijuhtimissüsteem nõuab toodete sajabrotsendilist kontrolli ja vastavate mõõteprotokollide koostamist ning nende kliendile edastamist koos toodetega, on samuti mõõtemasinate kasutamine väga otstarbekas.

Mitmekoordinaadilisi mõõtemasinaid kasutatakse peamiselt töödeldud detailide (toodete) lõppkontrolliks, keeruliste kujupindade kirjeldamiseks, toorikute töötlemiseelseks ülemõõtmiseks, aga ka kergesti töödeldavast materjalist toodete valmistamiseks.

Mõõtemasinal peab olema suur jäikus, väga head dünaamilised näitajad ja kõrge positsioneerimise täpsus. Et vältida temperatuuri mõjutusi, kasutatakse graniidist töölauda ja need paigutatakse sageli isoleeritud hermeetilistesse, konstantse temperatuuriga ruumidesse.

Tänapäeval toodetakse väga palju erinevate tehnoloogiliste võimalustega mõõtemasinaid, mis erinevad tunduvalt hinna poolest, aga samas on võimalik valida täpselt vajalik mõõtemasin konkreetse tööülesande täitmiseks. Mõõtemasina tüübi ja tehnoloogiliste võimaluste valik lähtub töödeldavate detailide spektrist ja nendele esitatud tehnilistest nõuetest.

Tootmise alamsüsteemide kasutamist paidtootmissüsteemide juures ning paintootmissüsteemide erinevatest struktuuridest ja realisatsioonivariantidest saab ülevaate [4.44, 4.45].

4.5 Tootmissüsteemide struktuurivariandid ja nende kasutamisotstarbekus

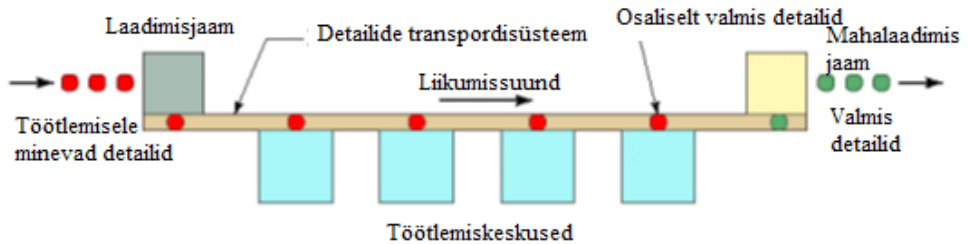
Tootmissüsteemi struktuur kujuneb tööpinkide asetusskeemist ja kasutatava transpordisüsteemi olemusest ning transpordivahendite ja seadmete omavahelisest paigutusest. Mida automatiseeritum on tootmine, seda korrastatum peab olema tema struktuur.

Paindtootmissüsteemid ehitatakse alati üles kindla struktuuri kohaselt, vastavalt vajadustele. Paindtootmissüsteemide peamised struktuurivariandid on [4.44, 4.45]:

- liin,
- silmus,
- redel,
- avatud,
- robotikeskne.

Liin-tüüpi struktuuris (vt sele 4.40) asetsevad seadmed ühes reas. See sobib süsteemidele, kus detailide liikumine ühest seadmest teise on kindlalt defineeritud. See on mõeldud erineva nomenklatuuriga toodete valmistamiseks, kusjuures eelistatakse pikema operatsioo-

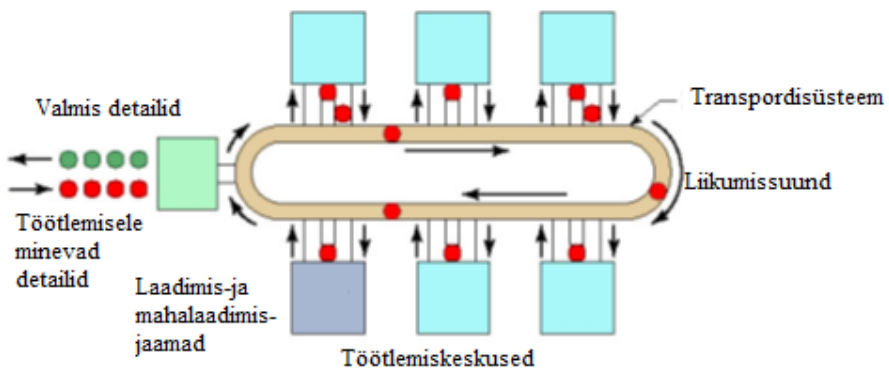
niajaga tooteid. Võib kasutada ühes positsioonis toodete valmistamist (paindmoodulid, töötlemiskeskused) või siis järjestikust operatsioonide järjestust suuremate toodete partiide puhul.



Sele 4.40 Liin-tüüpi struktuur

Selel 4.40 on kujutatud ühesuunaline detailide liikumine. See eeldab, et töötlemine toimub operatsioonide loogilises järjestuses. Tänapäeval liigutatakse liin-tüüpi struktuuride juures transpordiseadet tavaliselt mõlemas suunas. See suurendab tunduvalt süsteemi paindlikkust. Transpordivahendina on kõige enam levinud relss-sõidukid, mis võivad omakorda olla ühendatud tsentraallaoga ja liikuda ka vertikaalsuunas. Sellise süsteemi paindlikkuse aste on veelgi suurem, süsteemi ülesehitus aga piisavalt lihtne. Hea on jälgida nii tootmisprotsessi kui ka toorikute/detailide paiknemist tsentraallaos.

Silmus-tüüpi struktuuris (vt sele 4.41) liiguvad tooted reeglina ühes suunas mööda silmust, võimalusega peatuda ja liikuda järgmise seadme juurde. Laadimise/mahalaadimise asukoht on reeglina samas kohas, silmuse lõpus. Tööpinke on võimalik teenindada autonoomselt, mis lisab paindlikkust. See sobib suurte, töötlemisel aeganõudvate detailide ja toodete valmistamiseks.

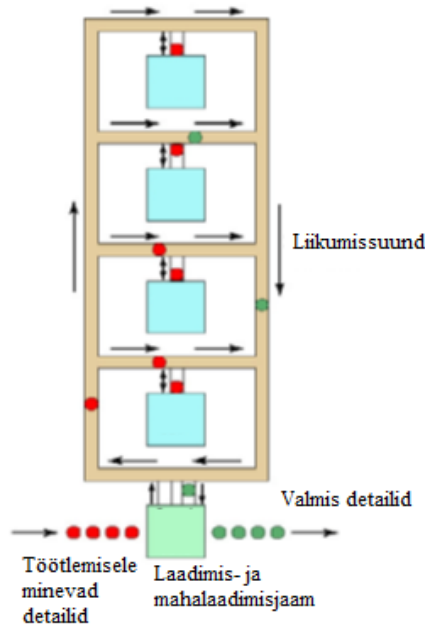


Sele 4.41 Silmus-tüüpi struktuur

Silmus-tüüpi struktuurides kasutatakse sageli konveiertransporti. Masinaehituses on enamlevinud rullkonveierid. Siis on nõutav ka mitmesugust liiki abimehhanismide kasutamine, mis suunavad ja positioneerivad töödeldavaid detaile. Tööpinkide teenindamine on autonoomne. Kasutades sellise süsteemi puhul töötlemiskeskuseid, on võimalik oluliselt tõsta töödeldavate detailide nomenklatuursust ja suurendada süsteemi tehnoloogilisi võimalusi. Süsteem on enamotstarbekas suure arvu tööpinkide puhul, kui on tegemist suurte tootmismahudega.

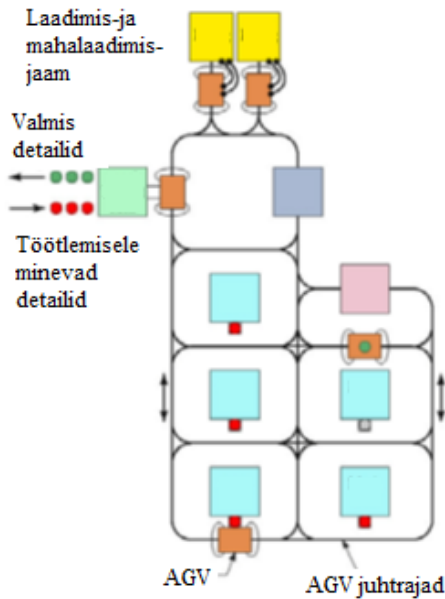
Redel-struktuuris (vt sele 4.42) asub laadimine/mahalaadimine tavaliselt ühes kohas. Detailide töötlemisel toimub nende liikumise järjestus ühest seadmest teise vabas järjestuses. Selline struktuur vähendab oluliselt transporditeekonda erinevate seadmete vahel. See sobib suure nomenklatuursusega eriliigiliste detailide tootmiseks, kus ka valmistusajad (või operatsiooniajad) on suhteliselt lühikesed.

Toote omadusi piiravad ainult süsteemi kuuluvate seadmete tehnoloogilised võimalused. Redel-struktuur on väga paindlik, kus võib kasutada nii automatiseeritud sõidukeid, mobiilseid roboteid kui ka pidevtransporti ehk konveiersüsteeme. Konveiersüsteemide puhul suurenevad teeninduskiirused veelgi, kuid liikumistrajektoord muutuvad jäigemateks.



Sele 4.42 Redel-tüüpi struktuur

Avatud struktuuris (vt sele 4.43) asub laadimine/mahalaadimine ühes kohas. Detail/toode liigub ühest töökeskusest teise automatiseeritud transpordivahenditel. See sobib suurte tootepere tootmiseks.

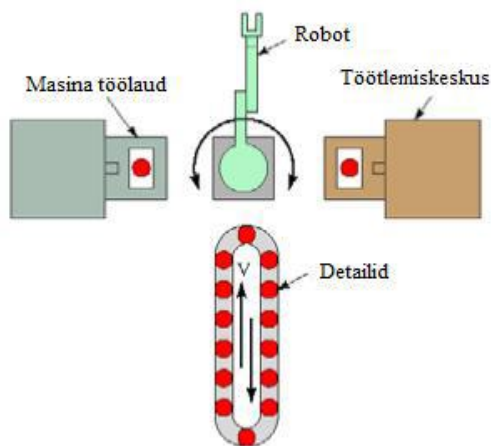


Sele 4.43 Avatud struktuur

Avatud struktuurid on tavaliselt kasutuses suuremahulistes tootmissüsteemides. Kasutatakse erinevate funktsionaalsustega tööpinke, mis laiendavad valmistatavate toodete nomenklatuursust. Avatud struktuuride puhul kasutatakse tavaliselt mobiilseid roboteid või automatiseeritud sõidukeid, mis on kas induktiivsuse abil juhitavad või nende liikumise trajektorid on vabalt programmeeritavad.

Robotikeskne struktuuris (vt sele 4.44) kasutatakse roboteid, et liigutada materjali ühest seadmest teise. Robotid on võimelised liigutama nii prismaatilisi kui ka silindrilisi detaile (kasutades haaratsit). See sobib nii prismaatiliste kui ka pöördkehade valmistamiseks. Seeriaviisiline tootmine on otstarbekas rakendusvaldkond. Otstarbekad partiide suurused sõltuvad juba konkreetsetest asjaoludest (häälestusaja ja valmistusaja suhtest, transporditeekonna pikkusest jms).

Ka sobivaima struktuurivariandi valik on otsustusülesanne. Otsust vastu võttes tuleb lähtuda toodetega seotud parameetritest: toote valmistusprotsessi iseloomustus (operatsioonide arv ja kestused), toodete nomenklatuursus ja toodetavad kogused. Otsustusprotsessi mõjutavad ka vahetult kasutatavad seadmed: monofunktsionaalsed seadmed on mõeldud peamiselt ühe konkreetse operatsiooni sooritamiseks, paljufunktsionaalsed seadmed nagu: töötlemiskeskused ja paindtootmismoodulid on kohaldatud toote valmistamiseks ühe paigaldusega ja suutelised sooritama erinevaid operatsioone.



Sele 4.44 Robotikeskne struktuur

Otsustusülesannet võib käsitleda optimeerimisülesandena, kus sihifunktsiooniks on näiteks toodangu omahind. Samas on optimeerimisülesande puhul sageli keeruline arvestada erinevaid olulisi nüansse. Seetõttu sobivad taoliste mittedetermineeritud ülesannete lahendamiseks ka lihtsamad ja erinevaid kriteerume arvestada lubavad tabelotsustusülesanded. Taolist ülesannet transpordiprintsiipide valiku puhul vaadeldi eelnevalt.

Tootmissüsteemide klassifitseerimiseks võib kasutada ka allpool toodud loogikat, mis teataval määral kattub süsteemide struktuurivariantide esitusega.

Järjestikune FMS – eelistatud on ainult ühe detaili partii tootmine. Järgmise detaili partii plaanimine ja ettevalmistus viiakse läbi, kui eelmise töötlemine on lõpetatud. See töötab nagu paindtootmisliin.

Juhuslik FMS – sobib iga juhusliku toote tüübi tootmiseks, mis vastab seadmete tehnoloogilistele võimalustele. Kasutatakse individuaaltootmise puhul. Kui toodete valmistusajad on lühikesed, võib kasutada redel-tüüpi struktuuri.

Suunatud FMS – toodetakse pidevalt pikemat aega muutumatuid, kuid piiratud erinevusega detailide partiisid. Vastavalt tööülesandele on eelistatavamad kas liin-tüüpi struktuur või hoopiski robotikeskne struktuur.

Plaanitud FMS – toodab sama toote perekonna tooteid kogu oma eluaja jooksul.

Modulaarne FMS – paindtootmissüsteem, mida kogunud haldaja võib muuta mistahes paindtootmissüsteemi tüübiks. Pigem enam peaks siin rääkima rekonfigureerimisest või ka süsteemi vajaduspõhisest laiendamisest. Siis peab igal juhul lähtuma võimalikult universaalsest ja modulariseeritud transpordi-laosüsteemist.

4.6 Robotid ja robot-tehnilised süsteemid

4.6.1. Robotiseerimine maailmas

2011. aasta lõpuks oli maailmas tootmises ja tööstuses kasutusel vahemikus 1,15–1,4 miljoni tööstusrobotit (n-õ toimivate robotite koguarv). Seda arvestusega, et roboti eeldatav kasutusiga on 12 aastat. Täiendavad uuringud (UNECE/IFR) on näidanud, et keskmine roboti kasutusiga võib olla kuni 15 aastat.

2011. aasta oli üks parimaid aastaid tööstuslike robotite ajaloos viimase 50 aasta jooksul. Alates esimesest roboti paigaldusest 1961. aastal on müüdud üle 2,3 miljoni roboti üle maailma ning robotitööstus vaatab optimistlikult tulevikku. Robotite müügi kasv suureneb igal aastal.

2011. aastal müüdi maailmas 165 000 tööstusrobotit, mis on üks kõrgemaid tasemeid/näitajaid ajaloos. See on 37% enam kui 2010 aastal. 2012. aastal langes müüdavate tööstusrobotite arv 160 000-ni, kuid käesoleval ajal robotite müüginumbrid jällegi suurenevad [4.46].

Kõige enim mõjutasid kasvu Hiina, USA ja Saksamaa. Nende maade kasvutempo oli vahemikus 39–51%. Kõik need kolm maad saavutasid küll uue tippulemuse, kuid siiski ei suutnud jõuda kahe suurima turu tasemeni (Jaapan, Korea). Jaapan saavutas esikoha 28 000 tööstusrobotiga, mis on 27% rohkem kui aastal 2010. Koreas tõusis robotite müük 9%, jõudes 25 000 ühikuni. Euroopa suurimaks tarbijaks on Saksamaa, kuhu 2012. aastal lisandus 17 000 uut robotit ning traditsiooniliselt tugev kasutaja on USA, kuhu müüdi 22 400 ühikut, mis oli 9% enam kui 2011. a. On prognoositud, et aastatel 2014–2020 kujuneb Taiwanist globaalne intelligentsete robotite tootmise keskus, seda eriti konkreetsetel turgudel (nt spetsiaalsed teeninduse ja meditsiini valdkonnad) [4.46].

Robotite kasutamine tööstuses üha laieneb nii arvuliselt kui ka kasutusvaldkondade keskselt. 10 põhjust, miks on otstarbekas investeerida robotiseeritud tootmisesse ja kasutada tööstusroboteid:

- 1) alanevad tootmiskulud (osaliselt seotud kliendi nõudmiste täitmisega);
- 2) tõuseb toodete kvaliteet ja ühtlus (vajadus tõsta toodete konkurentsivõimet);
- 3) töökeskkond paraneb (vajadus ratsionaliseerida raskete tööülesannete täitmist);
- 4) tootlikkus tõuseb (robotid on hea moodus õpetada kulusäästliku tootmise korraldust ja vajalikkust oma ettevõttes);
- 5) tootmine muutub paindlikumaks (tuleneb vajadusest tõsta ettevõtte konkurentsivõimet ja tootlikkust);
- 6) väheneb praak ja tootmisnorm kasvab (vajadus siduda robotid oma ettevõtte tootmisprotsessidega);
- 7) turvalisem ja tervislikum töökeskkond (tööalane turvalisus tõuseb, sest tervistkahjustavad tööd viiakse robotkompleksi);
- 8) alanevad tööjõukulud ja väheneb tööjõuvajadus (seotud kõrgelt kvalifitseeritud tööjõu puudusega);

- 9) vähenevad laovarud ja hoitakse kokku tootmispinnalt (kergemini realiseeritavad ajastatud tootmise (JIT) põhimõtted;
- 10) kõrgtehnoloogiliste rakenduste kasutuselevõtu tõttu tõuseb ettevõtte *imago*.

Antud loetelu annab üldised suunised selleks, et võimaldada ettevõttes üle vaadata olemasolevad protsessid ning neid analüüsida automatiseerimise otstarbekusest lähtuvalt. Selleks, et teha valik ühe või teise tehnilise lahenduse kasuks, on vaja teada tootmise iseärasusi ning robotite võimalusi tootmise parandamiseks. Samuti tuleb arvesse võtta tingimusi, mida seab ette tootmise seerialisus ja ettevõtte suurus.

Tööstusrobotite laia kasutamise põhjus on nende kõrgem tööviljakus ja -kvaliteet võrreldes inimtööga, robotitel on kõrge **usaldusväärsus** ja **korratavustäpsus**, nad vajavad harva hooldust ning on kergesti integreeritavad tootmisüsteemidesse. Toetudes faktile, et tööstusrobotid on kergesti ümber- ja ringiprogrammeeritavad ning kohaldatavad uute tootmisprotsessidega, siis rakendatakse neid järjest rohkem paindtootmises (*flexible manufacturing*). Lisaks on neil kindel väljund ka kulusäästvas (*lean manufacturing*) tootmise parendamisel. Tööstusrobotid on uue tootmise paradigma (*Industry 4.0*) üheks olulisemaks komponendiks. Viimastel aastatel on tööstusrobotid leidnud järjest laiemat kasutamist ka Eesti ettevõtetes. Tänu nende pidevale odavnemisele, samas aga tööjõukulude kasvule, muutub nende tasuvusaeg järjest lühemaks. Haruldus ei ole enam juhtumid, mil tasuvusaeg on 2 aastat või isegi lühem.

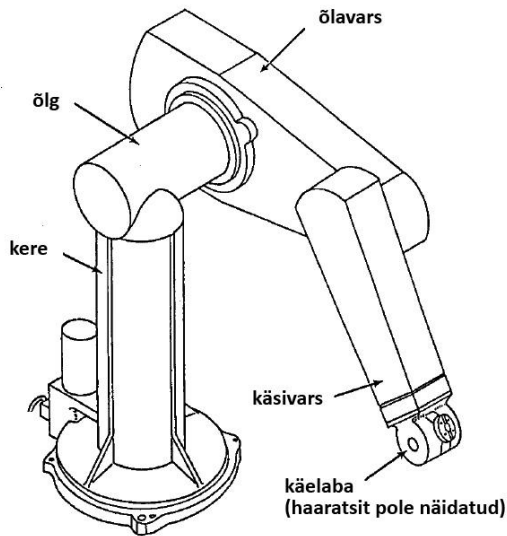
4.6.2. Tööstusrobotite olemus ja ehitus

Tööstusrobotiteks (vastavalt standardile ISO 8373) nimetatakse automatiseeritud seadmeid, mis koosnevad mitmesuguseid manipulatsioone sooritavast tööseadisest ja vabalt ümberprogrammeeritavast juhtsüsteemist selle tööseadise juhtimiseks [4.47, 4.48]. Üldinformatsiooni robotite kohta on võimalik saada näiteks [4.48, 4.49, 4.50]. Robotitest ülevaade on toodud [4.50, 4.51, 4.52].

Tööstusrobotid on võimelised täitma erinevaid funktsioone, mis on tavaliselt omased inimestele. Neid saab kasutada nii objektide teisaldamiseks, paigaldamiseks kui ka mitmesuguste töö- või kontrollioperatsioonide sooritamiseks. Töörobotite puhul on väga levinud keevitusrobotid (punkt- või kaarkeevitus), värvimis- ja koostamisrobotid. Viimastel aegadel suureneb robotite kasutamine ka valdkondades, kus varem valitsesid tööpingid, näiteks mehaanilises töötlemises. Liikurrobot koosneb programmjuhitavast veokist (sõidukist), millel võib paikneda üks või mitu manipulaatorit erineva otstarbega tööde sooritamiseks.

Selel 4.45 on skemaatiliselt esitatud tüüpilise tööstusroboti konstruktiivsed põhiosad. Nendeks on roboti alus ehk kere, õlg, käe alumine osa ehk õlavars, käe ülemine osa ehk käsivars ja käelaba haaratsi kinnitamiseks.

Ümberprogrammeeritava tööstusroboti ehituse skeem.



Sele 4.45 Roboti olulisemad koostisosad (kere, õlg, õlavars, käsivars, käelaba)

Tänapäeval toodetakse väga erineva konstruktsioonilise ehituse ja tehnoloogiliste võimalustega tööstusroboteid. Samas on tööstusrobotite puhul enamasti esitatud konstruktiivsed põhiosad säilinud.

Robotit iseloomustavad peamised tehnoloogilised võimalused on järgmised:

- roboti kasutusvaldkond (teisaldamine ja paigaldamine, tööoperatsiooni sooritamine, mõõtmine ja kontroll, transport);
- teisaldatav mass;
- koordinaatide arv (põhikoordinaadistik, tööseadise koordinaadisüsteem);
- toitepinge, toiteahela võimsus;
- tööseadise töö teostuse põhimõte;
- roboti osade (lülide) liikumisulatused, tööruumi kuju ja mõõtmed;
- positsioneerimise täpsus;
- lülide maksimaalsed liikumiskiirused ja kiirendused;
- roboti ja juhtseadme mass;
- töökeskkonna omadused;
- juhtimis- ja talitlusjärelvalve funktsioonid.

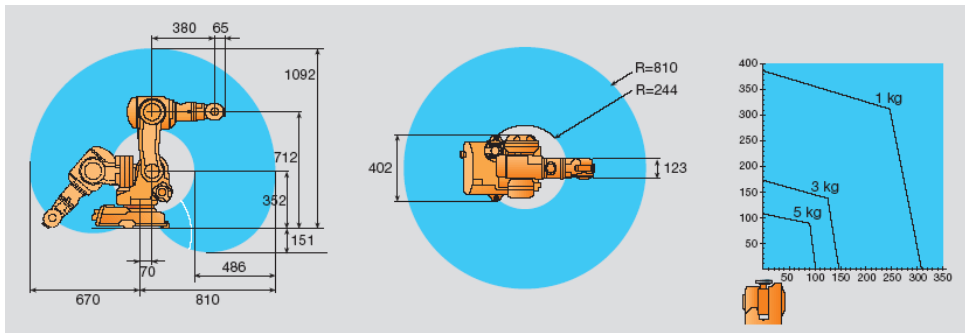
Näitena on toodud seel 4.46 ühe ABB tööstusroboti mõned tehnilised parameetrid kasutusotstarbekuse määramiseks. Tööstusrobotid erinevad oma tehnoloogilistelt võimalustelt üsna olulisel määral. Ka tootjate hulk on väga suur. Mõned veebilehed tööstusrobotite otsinguks:

www.abb.com;

www.fanucrobotics.de;

www.staubli.com;

www.comau.com;
www.kuka.com;
www.mitsubishi.com;
www.scara-robots.com;
www.motoman.com/products/robots;
www.universal-robots.com;
www.intelligentactuator.com/products/SCARA/;
www.peakrobotics.com;
<http://www.robotics.epson.com>;
<http://www.yamaharobotics.com/business/robot/index.html>.



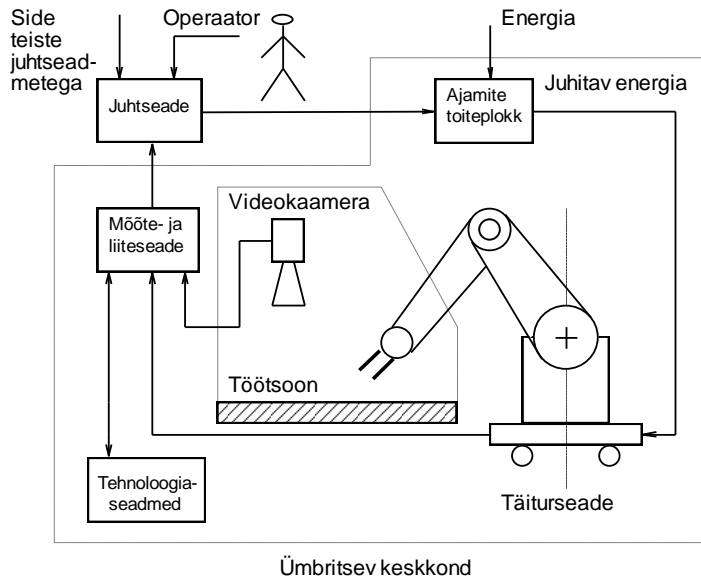
Sele. 4.46 ABB-roboti IRB 140 tööruum ja lubatud teiseldatast mass

Tegelikkuses on robotite tootjaid märksa rohkem kui eeltoodud loetelus. Paljudel tootjatel on väga detailselt välja arendatud toodete perekonnad, et robot vastaks võimalikult täpselt oma tehnoloogilistelt võimalustelt just tootmisülesandele. Seetõttu tuleb ka robotite valiku protsessi suhtuda täie tõsidusega ja vajadusel kasutada spetsialistide abi.

Robotsüsteemi võimalikud koostisosad on näidatud seel 4.47.

Tootmises on robotitel kolm asetuvõimalust:

- 1) robot asetseb tööstusseadmega ühes tasapinnas;
- 2) robot asetseb tööstusseadme kohal:
 - pikiportaal,
 - ristiportaal;
- 3) robot on vahetult kinnitatud tööstusseadmele ja moodustab sellega ühe terviku.



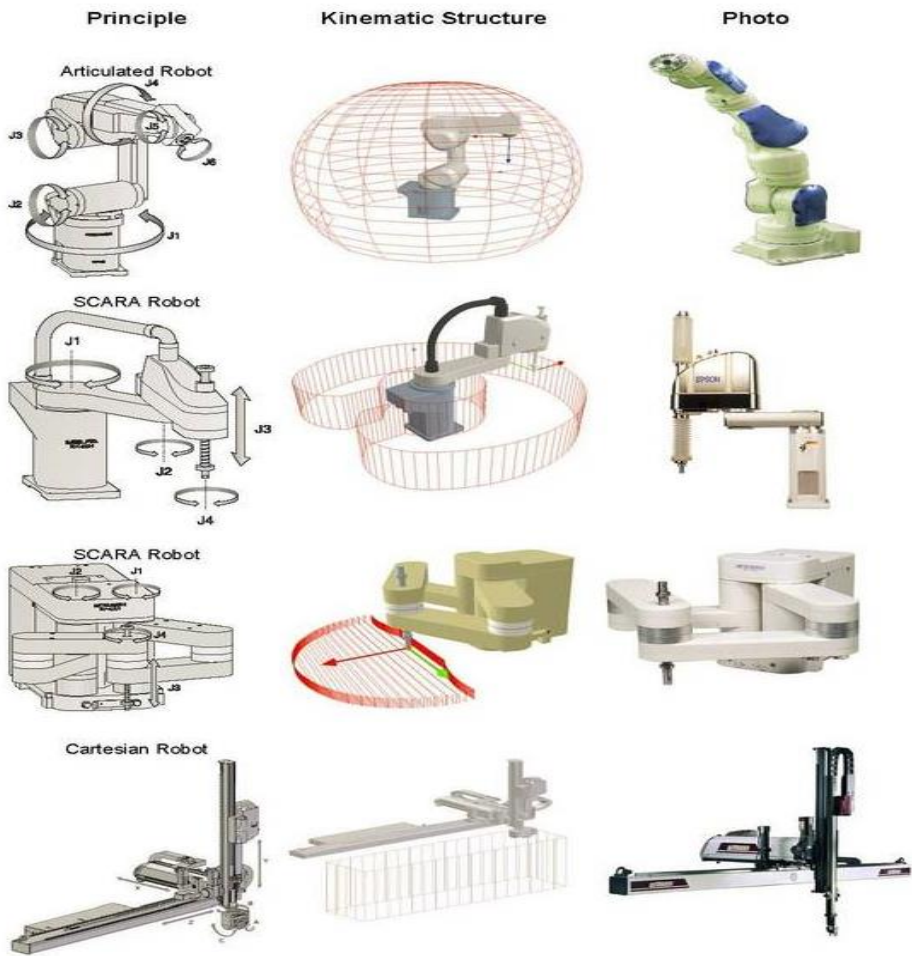
Sele 4.47 Robotsüsteem [4.53]

Robotite tööruumid ja vastavad koordinaadisüsteemid on:

- täisnurkne koordinaadisüsteem (XYZ);
- silindriline koordinaadisüsteem (XZA);
- sfääriline koordinaadisüsteem (XAB);
- šarniirne koordinaadisüsteem (ABC);
- segakoordinaadisüsteem (näiteks YZCDE või ABCZDE).

Sellest johtuvalt on välja töötatud robotite enamesinevad tüübid (vt sele 4.48).

Robotite koordinaadisüsteem on roboti kasutusfunktsionaalsuse seisukohast äärmiselt tähtis. Teostatava töö kirjeldus (tasapinna värvimine; toodete tööpinki paigaldamine ja sealt maha võtmine; punktkeevitus; lehtmaterjali löikamine; kaarkeevitus; keretüüpi detaili valmistamine: freesimine, puurimine jms; kujupinna koordinaatide ülemõõtmine jne) määrab ka vajalike liikumiste iseloomu nii positsioneerimiseks (reeglina roboti kere liikumised) kui ka vajaliku töö sooritamiseks (roboti täituri liikumised). Robotite põhitüübid ja kasutusvaldkonnad on toodud [4.54, 4.55].



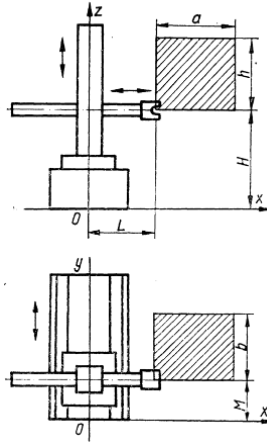
Sele 4.48 Robotite enamkasutatavad realisatsioonivariandid

Robotite koordinaadisüsteemide kujundamise aluseks on mehaaniliste liigendite tüübid, mida on kokku viis [4.55].

1. Linearliigend. Suhteline liikumine sisend- ja väljundlüli vahel on lineaarne.
2. Ristliigend. Suhteline liikumine sisend- ja väljundlüli vahel on lineaarne, aga väljundlüli ise moodustab ristseisu sisendlüliga.
3. Pöördliigend. Suhteline liikumine sisend- ja väljundlüli vahel on pöördliikumine, aga pöörde tulemusena toimub väljundlüli nurga muutus sisendlüli suhtes.
4. Väändliigend. Suhteline liikumine sisend- ja väljundlüli vahel on pöördliikumine, aga pöördliikumise pöördetelg ise on paralleelne nii sisend- kui ka väljundlüliga.
5. Revolverliigend. Sisendlüli telg on paralleelne lüli pöördeteljega, aga väljundlüli ise moodustab ristseisu vastava pöördetelje suhtes.

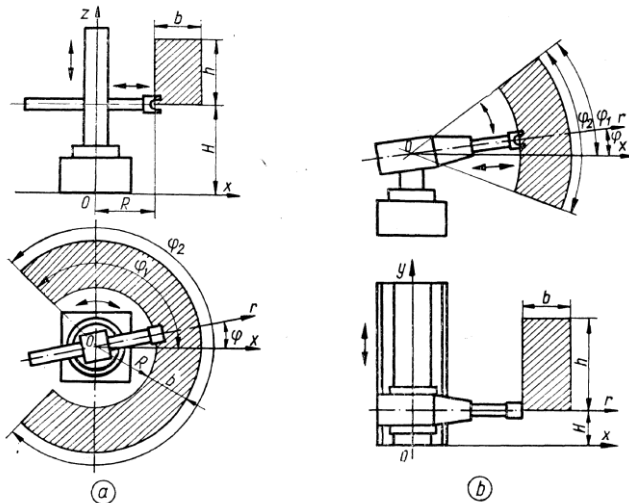
Robotite põhilisteks koordinaadisüsteemideks on polaarkoordinaadistik, ristkoordinaadistik, silindriline koordinaadistik, sfääriline koordinaadistik ja sega koordinaadistik.

Ristkoordinaadistikus töötava roboti töösooniks on risttahukas, mille külgede pikkused a , b , h vastavad tööseadise liikumisulatusesele, suurused L , M ja H aga määravad kindlaks töösooni asukoha ristkoordinaadistikus $Oxyz$ (vt sele 4.49).



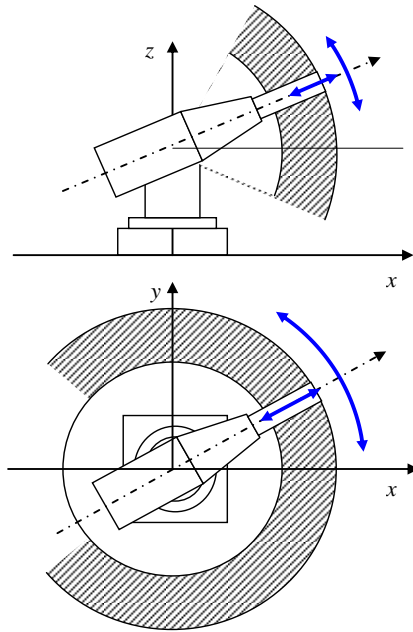
Sele 4.49 Ristkoordinaatides töötav robot

Silindrilises koordinaadistikus töötava roboti töösoon on osa õõnsast silindrist. Silindrilises koordinaadistikus töötava roboti kinemaatika ja tööruumi näited on toodud selal 4.50. Roboti paigalseisev alus on seotud baaskoordinaadistikuga. Tööseadise võimalikud asendid moodustavad roboti tööruumi, mis on antud juhul osa õõnsast silindrist (vt sele 4.50).



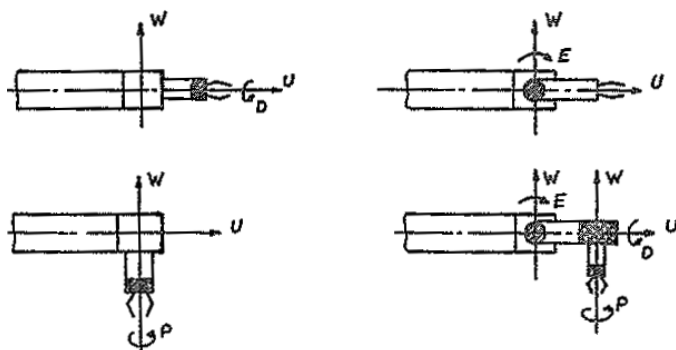
Sele. 4.50 Silindrilises koordinaadistikus töötav manipulaator: a – püstteljega töösoon, b – rõhtteljega töösoon

Sfäärilises koordinaadistikus (sele 4.51) ja **sfäärilises nurkkoordinaadistikus** (sele 4.45) töötava roboti tötsooniks on osa õõnsast kerast. Enamik nüüdisaegseid roboteid on vertikaaltasandil liikuva liigendkäega ning töötavad sfäärilises nurkkoordinaadistikus. Niisugused robotid kasutavad töötamisel ümbritsevat ruumi kõige tõhusamalt. Nende kokkutõmmatud liigendkäsi võtab vähe ruumi, kuid väljasirutatult ulatub see küllalt kaugemale ning roboti efektiivne tööruum on suur.



Sele 4.51 Sfäärilises koordinaadistikus töötava manipulaatori tötsoon

Roboti tööseadis [4.56, 4.57] määrab suuresti roboti kasutamiskõlblikkuse ja lisab robotile oluliselt tehnoloogilisi võimalusi. Nii võib öelda, et roboti funktsionaalsus kujuneb väga suurel määral roboti tööseadise kaudu. Algselt olid tööseadisteks peamiselt haaratsid, et teisaldada ja/või paigaldada objekti. Tänapäeval moodustavad üha suurema osatähtsuse töökäsi funktsioone (koostamine, keevitamine, mehaaniline töötlemine jms) sooritavad tööseadised. Tööseadis võib lisada olulisel määral roboti vabadusastmeid ehk juhitavate koordinaatide arvu. Töörobotite puhul on sageli roboti haaratsi ehitus väga oluline element roboti funktsionaalsuse suurendamiseks. Tihti tuleb ka haaratseid kiiresti vahetada ja seetõttu arendatakse välja üha uusi lahendusi roboti nende kiirvahetuseks. Nagu tööpinkidel on tööriistamagasinid, nii võivad ka tänapäeva robotitel olla tööseadiste magasinid. Roboti tööseadise ehituse baasvariandid on kujutatud selel 4.52.



Sele 4.52 Roboti tööseadise ehituse variandid

Tabelis 4.8 on kujutatud haaratsite tüüpvariante.

Tabel 4.8 Haaratsite tüüpkasutused

Tüüp	Kasutamine
Mehhaaniline haarats	Kaks või enam mehhaanilist sõrme objekti haaramiseks, mis on juhitud roboti juhtimissüsteemi vahendusel
Vaakuumhaarats	Vaakuumkuplid peamiselt tasapinnaliste objektide haaramiseks
Magnethaarats	Magnetiseerimisega tekitatakse rauda sisaldavate toodete teisaldamisvõime
Lihtmehhanismide kasutamine	Konksud, kopsikud jms vahendid, mida saab kasutada objektide teisaldamiseks
Kaksikhaarats	Haarats sisaldab kahte kinnituselementi objektide teisaldamiseks ja paigaldamiseks, et lühendada tsükliaga
Vahetatavad sõrmed	Haaratsi konstruktsioon võimaldab sõrmi vahetada, et oleks võimalik erinevate mõõtmetega objekte haarata
Sensorjuhtimisega sõrmed	Mehhaaniline haarats koos adaptiivjuhtimisega, et kontrollida näiteks haardetugevust
Paljusõrmeline haarats	Inimkätt meenutav haardeelement
Standardlahendused	Katalooglahendused, võimalik leida variant vastavalt tarbija soovidele

Nagu eelpool öeldud, siis on praktiliselt võimalikud mitmekäelised robotid, mitmehaaratsiga robotid, mitmesugusel viisil iseliikuvad jms robotid, mis on oma otstarvet teataval tingimusel tõestanud.

Robotite valikul etendab esimeses faasis erakordselt suurt tähtsust roboti juhtimis- ja koordinaadisüsteem, mis kujundab tema tööruumi.

Robotite juhtimissüsteemid võivad olla:

- **tsüklilised.** Sellise juhtimissüsteemiga roboteid loetakse kõige lihtsamaks. Tsüklilist juhtimist kasutatakse piiratud ja kindlalt fikseeritud manipulatsioonide sooritamiseks roboti poolt;
- **positsioonjuhtimisega.** Neid roboteid kasutatakse juhtudel, kui tööseadise liikumine punktist (positsioonist) punkti (positsiooni) on fikseeritud, samal ajal liikumise trajektoori täpselt aga kontrollida ei ole vaja (detaili asetamine tööpinki, objekti asetamine montaažilauale jms);
- **kontuurjuhtimisega** robotite kasutamine on vajalik juhtudel, kui tööseadise liikumise trajektoori peab kulgema täpselt ettemääratud (programmeeritud) teekonda pidi (keevitööde saavutamiseks, keerulise koostamistöe teostamisel, robotiga tööoperatsiooni sooritamisel, pindade värvimisel jms);
- **universaalsed juhtimissüsteemid** kujutavad endast polüfunktsionaalseid juhtimissüsteeme, sisaldades adaptiivjuhtimise, laserjuhtimise, tehisintellekti jms elemente. Mida enam vajatakse ülesande täitmiseks inimesele omaseid liigutusi ja käitumismaneere, seda enam on vastavaid juhtimissüsteeme vaja arendada.

Tänapäeval ühildatakse robotite juhtimissüsteem sensorsüsteemidega ja neilt saadava informatsiooniga. Peamiselt kasutatavad sensorite tüübid on toodud tabelis 4.9.

Tabel 4.9 Sensorite kasutamine robotite juures

Sensori tüüp	Kasutusvaldkond
Kompivad sensorid	Kasutatakse sensori ja teise objekti vahelise kontakti kindlaksmääramiseks. On kahte tüüpi sensoreid: puutetundlikud, mis fikseerivad kontakti olemasolu; puutejõudutundlikud, mis fikseerivad ka puutejõu suuruse
Lähedust tunnetavad sensorid	Fikseerivad sensori kauguse objektist
Optilised sensorid	Fikseerivad objekti olemasolu või puudumise. Kasutatakse ka koos lähedust tunnetavate sensoritega
Masinnägemine	Kasutatakse objektide kontrolliks, olemasolu määramiseks, kuju fikseerimiseks, teekonna määramiseks jm juhtudel
Teised võimalused	Kasutatakse mõõtesensoreid, vedelike survetugevuse määramise sensoreid, temperatuuri fikseerivaid sensoreid vm füüsiliste suuruste mõõtmiseks

Robotite **tööruumil**, mille kujundab tema **koordinaadisüsteem** (vt sele 4.49–4.52), on praktiliste ülesannete täitmisel erakordselt suur tähtsus. Kui vabadusastmete arvust ei piisa nõutava tööoperatsiooni sooritamiseks, ei ole enam olulised muud roboti valikul arvestatavad parameetrid (positsioneerimise kiirus, kandevõime, maksumus vms). Teisalt juhitud koordinaatide liigsus, samuti ka positsioneerimise täpsus ja kiirus, tõstavad kohe roboti hinna põhjendamatult kõrgeks. Kui neid ei kasutata ettenähtud tööde sooritamiseks, põhjustab see mõttetut ressursikulu, muudab roboti käsitlemise tarbetult keeruliseks ning see omakorda

tekkitab liigseid kulutusi ekspluatatsioonile ja teenindamisele. Näitena on seel 4.53 kujutatud tööstusrobotite tehnoloogiliste võimaluste võrdlus.

Tehnoloogilised võimalused	Vajalik tase		
	Madal	Keskmine	Kõrge
Vabadusastmete arv		T	K, P
Positsioneerimise täpsus		T	K,P
Töö kiirus		T, P	K
Tööriistade vahetamise kiirus	T		K,P
Juhtimissüsteemi võimekus		T	K,P
Sensorite kasutamisevajadus	T	P	K

Sele 4.53 Vajalike tehnoloogiliste võimaluste võrdlus erinevate tööülesannete puhul. T – tööpingi teenindamine, P – töö teostamine, K - koostamine

Toodud hinnang (sele 4.53) on subjektiivne, aga annab teatava ülevaate robotitele esitatavatest nõudmistest, et teha erinevaid töid.

Tööstusrobot on robot-tehnilise kompleksi oluline koostisosa, kuid kogu terviku moodustab ikkagi terviklik tehniline sisseseade (tööpink või tööpingid; töölaud koos vastava rakistusega; ladu nii toorikute/detailide hoidmiseks kui ka vajadusel tööriistaladu ja tööobjekt vms), mis on vajalik antud tehnoloogilise ülesande täitmiseks.

Tööstusrobotite kasutamist robot-tehnilistes süsteemides vaata näiteks:

<https://search.yahoo.com/yhs/search?hsp:>

<https://search.yahoo.com/yhs/search?hspart=avg&hsir.>

4.6.3. Robot-tehnilised süsteemid

Robot-tehnilised süsteemid (RS) kujutavad endast avatud tehnoloogilisi süsteeme, mille koosseisu kuulub üks või mitu tööstusrobotit ja/või eriliigilised tehnoloogilised seadmed, mis abistavad või teostavad toodete valmistamist.

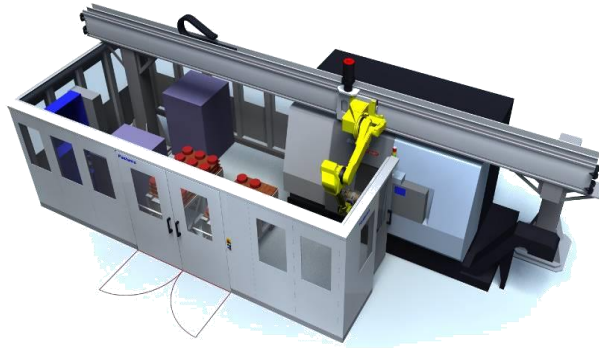
Robotiseeritud süsteemides võivad robotid esineda teenindavas või tööd teostavas funktsioonis. Mõlemal juhul on süsteemi oluliseks komponendiks tööstusrobot.

Teenindavas funktsioonis roboteid kasutatakse peamiselt töödeldavate detailide paigaldamiseks ja mahavõtmiseks. Seega töötab robot sünkroonis tööstusseadmega. Tööstusrobotit kasutatakse eriliigiliste tööstusseadmete teenindamiseks, mis annavad ka vastavale süsteemile nime:

- 1) mehaanilise töötlemise robotiseeritud süsteem;
- 2) lehtmaterjalist toodete valmistamise robotiseeritud süsteem;
- 3) kuumpressimise ja sepiamise robotiseeritud süsteemid;

- 4) valutoodete valmistamise robotiseeritud süsteem;
- 5) galvaanilise töötlemise robotiseeritud süsteem;
- 6) jms.

Mõned näited vastavate süsteemide olemusest on toodud seledel 4.54–4.56).



Sele 4.54 Portaalroboti kasutamine mehaanilise töötlemise automatiseerimiseks (Fastemsi näide)

Portaalroboti kasutamisel on teatavad eelised:

- 1) tööruumi kokkuvõid;
- 2) kerge ligipääsetavus seadmetele vastava konstruktsiooni puhul.

Süsteemi realisatsioon on samas sageli keerulisem ja tööpinkide teenindamine võib olla aeganõudvam.



Sele 4.55 Robotiseeritud süsteem integreerituna tsentraallaoga (Fastemsi näide)

Sele 4.55 näitab tööstusroboti kasutamise võimalust teenindavas funktsioonis, kus tsentraal-laost võetakse vajalikud toorikud ja valmistooted paigutatakse tsentraallattu tagasi. Kujutatud süsteem vastab põhimõttele „lisa ja kasuta“, mis tähendab, et vastav kompleks vastab täpselt toodangu iseloomule ja oluliste muutuste puhul on tooteportfellis võimalik vastav füüsiline keha välja vahetada, säilitades üldise integreeritud juhtimisarhitektuuri. Mitme seadme teenindamise näide on toodud seel 4.56.



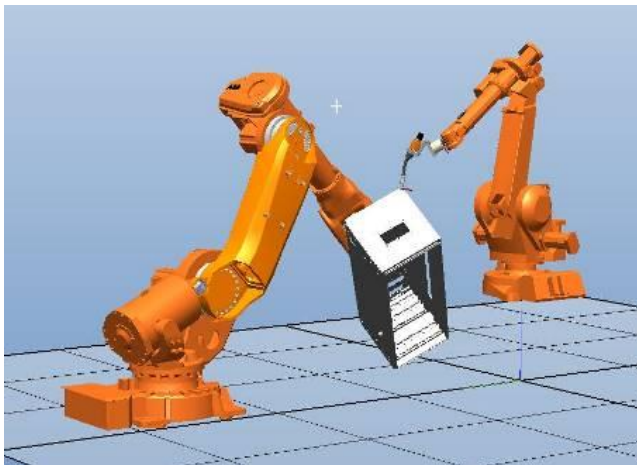
Sele 4.56 Robotiseeritud süsteemi asendiplaan (Motomani näide)

Tööd teostava robotiseeritud süsteemi oluliseks komponendiks on tööstusrobot, mille olemus ja funktsionaalsus kujundab vastava automatiseeritud süsteemi olemuse ja tema poolt täidetavad tehnoloogilised ülesanded. Autotööstuses on juba pikka aega kasutatud punktkeevituse süsteeme, mis võimaldasid väga olulisel määral lühendada autokere kokkupaneku aega. Väga laialdaselt on tuntud ka keevitus- ja värvimisfunktsioone täitvad robotid. Näide keevitusroboti kasutamisest on toodud seel 4.57.

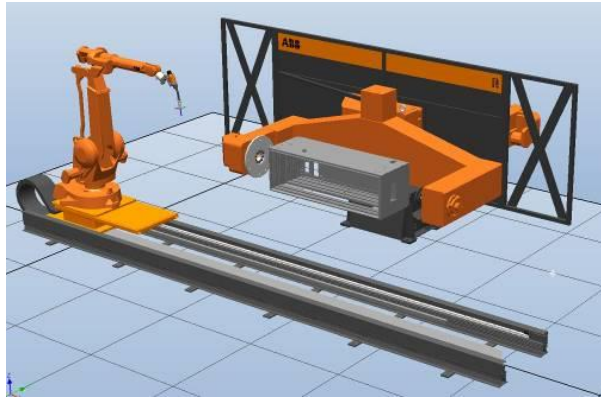


Sele 4.57 Keevitusroboti kasutusnäide

Koostamistöde robotiseerimisel (sh keevitamine) on väga oluline kogu töökoha planeerimine ja vajalike rakiste projekteerimine. Sageli ei saavutata oodatud tulemust just pooliku lahenduse tõttu. Üheks sõlmküsimuseks on rakistus, mis peab olema võimalikult universaalne (sobima erinevatele toodetele antud tooteportfellist) ja unifitseeritud (rakise omahinna alandamiseks kasutada võimalikult palju standardelemente). Olenevalt keevitusprotsessi kestusest peab olema valitud vajalik automatiseerituse tase (koos vajalike sensoritega), et viia paigalduse ja fikseerimise ajad miinimumini ning tuleb tagada, et koostatav toode oleks korralikult paigaldatud rakisesse (baseeritud).



Sele 4.58 Robotiseeritud keevituskompleks



Sele 4.59 Liikurrobotiga keevituskompleks

Keevitustööde robotiseerimise erinevad realisatsioonivariandid on kujutatud vastavalt seel 4.58 ja 4.59. Robot-tehniliste komplekside paremaks mõistmiseks ja nendest visuaalse pildi saamiseks on tänapäeval otstarbekas kasutada erinevaid modelleerimise süsteeme ja tehnikaid [4.60, 4.61].

Viimasel ajal on hakatud roboteid kasutama ka vahetu töö tegemise funktsioonis mehaanilisel töötlemisel. Võrreldes keeruliste mitmekoordinaadiliste töötlemiskeskustega on robotiseerimise lahendused palju paindlikumad, lihtsamad käsitleda ja nende teostus on vähem aeganõudvam. Samas töömahtude või toodete nomenklatuursuse muutumisel on neid põhimõtteliselt võimalik ja lihtne teisaldada. Näide mehaanilise töötlemise robotiseeritud süsteemist on kujutatud seel 4.60 ja tööriistade automatiseeritud vahetus seel 4.61 (Fastems Oy näited).



Sele 4.60 Mehaanilist töötlemist teostav robotsüsteem (Fastemsi lahendus)

Monofunktsionaalsed robotiseeritud süsteemid on ette nähtud ühte liiki tööde sooritamiseks. Kuuluvuse määramiseks on protsessi iseloom. Tänapäeval kasutatakse üha rohkem integreeritud robotiseeritud süsteeme, et valmistada tooteid võimalikult komplekselt. Sellised integreeritud süsteemid või moodulid on ette nähtud toote või toote konkreetse sõlme kompleksseks valmistamiseks, et suurendada tootlikkust igasuguste mittetootlike aegade (täiendavad paigaldused, transport, töövahendite kohaletoomine jms) elimineerimise teel. Selliseid mooduleid on ka omavahel võimalik ühendada, et teostada täielikult toote valmistamine.



Sele 4.61 Tööriistade automatiseeritud vahetus robotsüsteemis (Fastemsi lahendus)

Varustamisprobleemide lahendamiseks kasutatakse mobiilseid roboteid. Need võivad liikuda mööda liikumistrasse või kasutatakse spetsiaalseid juhtimissüsteeme (laserjuhtimine, signaaljuhtimine jms).

Kitsamas plaanis võib robotiseeritud süsteemi vaadelda ka töökoha raamistikus, kus inimene-masin asemel on robot-masin. Roboti funktsioon on kas teenindav või tööd teostav. Töökohtade kooslus moodustab juba süsteemi. Robotiseeritud süsteem on tavaliselt ettevõtte tootmissüsteemi üks konkreetne alamosa (osakond, jaoskond vms).

Tootmissüsteemi olemus ja asendiplaan sõltub väga olulisel määral valmistatavatest toodetest, toodangu nomenklatuursusest ja valmistuskogustest. Nüüdisaegse autotööstusettevõtte asendiplaan erineb oluliselt ja põhimõtteliselt autode haagiseid tootvast väikeettevõttest ning seeriaviisiliselt vintse ja reductoreid tootva ettevõtte asendiplaan on täiesti erinev suuri metallkonstruktsioone individuaaltootmisena valmistavast ettevõttest. Samas tuleb kõikidel juhtudel alustada toote (toodete) parameetrisest, funktsionaalsest ja tehnoloogilisest kirjeldusest. Kui on valitud robotiseeritud süsteemis valmistatavad tooted ja teada valmistustehnoloogiad, saab lahendada robotiseeritud tehnoloogilise süsteemi planeerimise ülesande, mille koostisosad on alljärgnevad:

- vajaliku osakonna (jaoskonna) asetus tehases ja sidusus teiste tootmise allüksustega;
- teised allüksuses kasutatavad tehnoloogiad ja nende seos planeeritava robot-tehnilise süsteemiga;
- robot-tehnilisele süsteemile määratud tootmisruumi analüüs;
- vajalikud automatiseerituse ja paindlikkuse tasemed;
- rekonfigureeritavuse vajadus;
- põhiseadmete nomenklatuuri ja arvu määramine;
- robotite valik;
- robotiseeritud süsteemi struktuuri määramine;
- detailiseeritud asendiplaani koostamine;
- ettevõttesisesese logistika põhiolomuse määramine;
- transpordi- ja laosüsteemi ning materjalide käsitluse komponentide (töölauad, paigaldus- ja mahavõtmispõhimõtted jms) olemuse määramine;
- rakiste ja tööriistasüsteemi planeerimine;
- valmistatavate toodete töötlemisjärjekorra määramine;
- optimaalsete partiide suuruste määramine;
- tsüklaegade eelnevad arvutused;
- tasuvusarvutused.

Antud ülesannetele saab mõningase vastuse käesoleva kõrgkooliõpiku erinevates peatükides. Mahupiirangud ei võimalda vastavaid küsimusi detailsemat käsitleda. Täiendavalt on võimalik saada vajalikku teavet kirjanduse [4.1,4. 55,4.62, 4.63] vahendusel.

4.7 Tootmisseadmete asetusplaanid

Asetusplaanide puhul on tegemist nii ettevõtte kui terviku ja tema üksikute allüksuste asetusplaaniga ja tootmisseadmete asetusplaanidega tootmisallüksustes. Põhieesmärgid on asetusplaanide väljatöötamisel sarnased:

- tagada hea tootmise jälgitavus ja maksimaalsed tootmismahud;
- saavutada seadmete kõrge koormatus ja tootlikkus;
- tagada toodangu kvaliteetsus;
- kasutada maksimaalselt hoonestuse ja hoonete pindu ning kubatuuri.

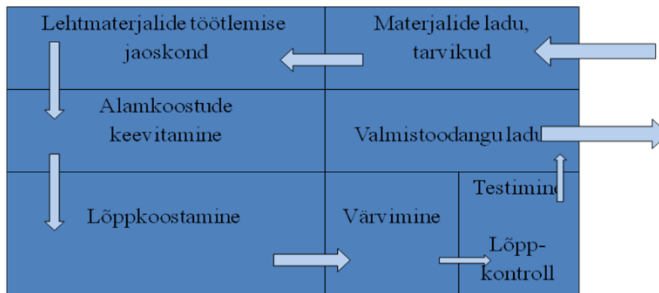
Ettevõtte asetusplaan fikseerib ettevõtte koosseisu kuuluvate üksikute rajatiste omavahelise paiknevuse ja nende ligipääsuteede kulgemise (vt sele 4.62).

Tänapäeva ettevõtted ehitatakse võimalikult kompaktsed ja seetõttu on erinevate hoonete arv minimaalne. Vaid hoonete erinev otstarve (nt insenerikeskus, näidisteruum, sepistamis-, valu- jms spetsiaaltootmised) põhjustab tavaliselt erinevate hoonete kasutamise.

Ettevõtte hoonestuse ja tootmisseadmete planeerimisele pööratakse tootmissüsteemides tänapäeva tootmise kavandamisel väga palju tähelepanu. Tootmise oskuslik korraldamine vähendab väga olulisel määral tootmiskulusid, eelkõige transporditeekondade optimeerimise

teel, aga ka ajakulu, elimineerides liigsed liigutused ja paigaldused eelkõige suuregabaritudiliste ja raskete toodete valmistamisel. Tootmise asendiplaanide väljatöötamise kohta saab teatava ülevaate [4.63].

Kui ettevõtte planeerimisel eelistatakse kompaktsust ja head terviklikku logistilist lahendust, siis tootmisallüksuste planeerimisel tootmise korraldamiseks eeldatakse samuti ruumi oskuslikku kasutamist ja tootmisjaoskondade loogilist asetust vastavalt tootmisprotsesside teostusele. Erinevate tootmisallüksuste paiknemist ühes tootmishoones kajastab sele 4.62. Nagu toodud selelt näha, on väga kindlaks eesmärgiks transporditeekondade minimeerimine.



Sele 4.62 Lehtmaterjalist toodete valmistamise ettevõtte allüksuste asetusplaan

Tootmissüsteem koosneb tootmise põhiseadmetest (tööpingid) ja tootmise juurde kuuluva test olulistest abisüsteemidest: transpordi-laosüsteem, tööriista- ja rakistesüsteem, mõõte- ja kontrollisüsteem jms.

Tootmisüksuse (mehaanilise töötlemise, alamkoostude keevitamise, lõppmontaaži jms) asendiplaan määrab kindlaks vastavasse allüksusesse kuuluvate tehniliste seadmete (vt eespool) omavahelise suhtelise asetuse ja materjalide liikumise teekonnad. Põhieesmärk on kindlustada töökeskkonnas kiire, veatu ja läbipaistev toodete, materjalide, töötajate ja informatsiooni liikumine. Olulist rolli etendavad seejuures põhitootmiseseadmed (sageli tööpingid).

Halva asetusplaani tavapärase tulemus on toodete kuhjumine töökohtade juurde. Sellega seonduvad raskendatud transpordivood, suuremad laoseisud, aga ka puudulik informatsioon (puudub selge ülevaade, kui palju tooteid täpselt kuskil kuhjas asetseb). Reaalselt väljendub see näitajates: tooted tootmises (WIP); tootmise läbilaskeaeg (T_{th}); summaarne seisakute aeg (T_{ID}).

Tulemustele orienteeritud tootmissüsteemides on **tööpinkide asetusplaanid** planeeritud ja teostatud kindla reeglistiku järgi.

Tootmiseseadmete asetusplaanis on neli enamkasutatud tüüpvarianti:

1. töökeskne;
2. protsessikeskne;
3. tootkeskne;
4. tootmisrakukeskne.

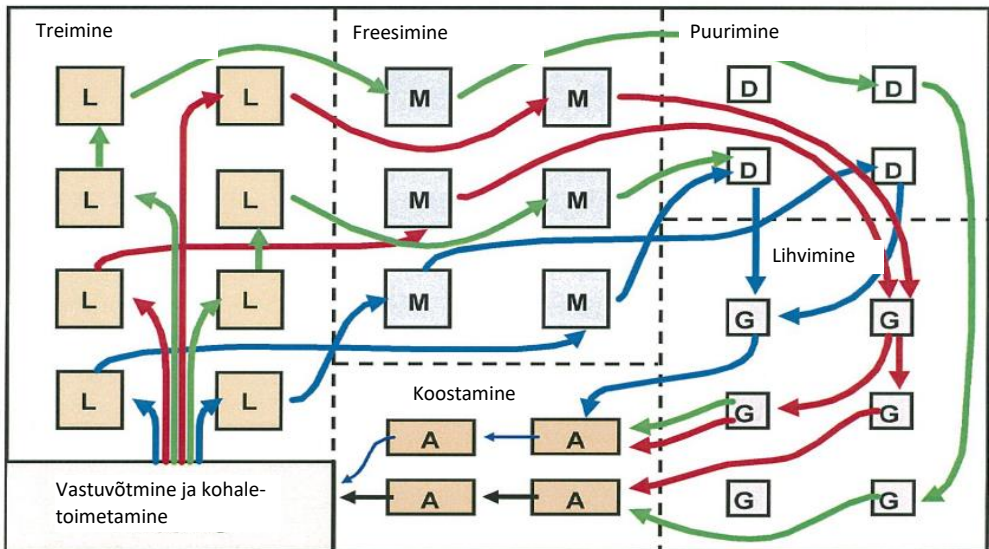
Otstarbeka ja tulemustele orienteeritud seadmete asetusplaani edukuse põhikriteeriumiteks on:

- maksimaalne paindlikkus;
- suur integratsioonivõimalus;
- maksimaalne tööruumi võimaluste ära kasutamine;
- maksimaalse juurdepääsetavuse tagamine;
- minimaalsete transporditeekondade tekitamine;
- minimaalne paigaldus-mahavõtmiste arvu tekitamine ja soodsate võimaluste loomine nimetatud toiminguteks.

Kõik eelloetletu peab looma soodsad lähtetingimused, et tootmisprotsessid oleksid efektiivsed [4.59, 4.64, 4.65, 4.66].

Töökeskne seadmete asetusplaani on kasutusel peamiselt suuregabriidiliste toodete valmistamisel (sillakonstruktsioonid või muud ehituskonstruktsioonid, suured katlad või mahutid, laeva-, lennukiehitus jms). Olulised tööoperatsioonid (eriliiigiline töötlemine, koostamine) tehakse ühes töökohas. Pinnaviimistlusoperatsioonide jaoks on eraldi eeltöötus ja/või värvimiskambrid. Materjale tuuakse tööpositsiooni järkjärguliselt, vastavalt vajadusele. Valmistatavat toodet transporditakse valmistusprotsessis minimaalselt. Töökese seadmete asetusplaani kohaselt toode reeglina ei liigu või liigub minimaalsel määral. Seadmed kas projekteeritakse spetsiaalselt toote jaoks või kasutatakse eriliigilisi seadmeid ühel töökohal.

Protsessikeskne asendiplaan on kasutusel kui tootmises on suur eriliigiliste toodete arv ning ühe toote tootmiskogused on suhteliselt väikesed. Protsessikeskne asendiplaan on kujutatud seel 4.63.



Sele 4.63 Protsessikeskne seadmete asetusplaani

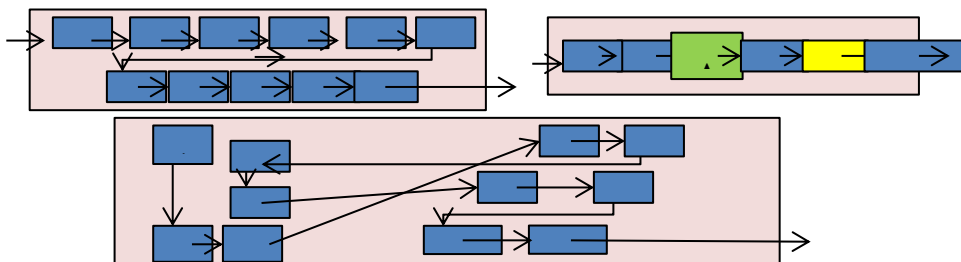
Nagu toodud pildilt nähtub, on seadmete protsessikeskse ehk funktsionaalse asetusskeemi puhul tegemist töötlemismeetodite kesksete kooslustega, millel võivad olla omavahel tihedad organisatsioonilised sidemed. Juhtimine toimub tootmisallüksustele seatud tootmisplaanide alusel ja see võimaldab teatavat detsentraliseeritust. Skeem sobib eelkõige allhankele orienteeritud toomise puhul. Funktsionaalne paigutus võimaldab ka paremini sobitada töödeldavaid detaile tööpinkidega, et nende tehnoloogilisi võimalusi otstarbekamalt kasutada. Protsessikeske asetuspilani kasutamise eelised ja puudused on toodud tabelis 4.10.

Tabel 4.10 Protsessikeskse asetuse eelised ja puudused

Eelised	Puudused
Võimalus varieeruda toodetega	Tootmise korraldamine keerulisem
Suur paindlikkus nii toodete nomenklatuuris kui ka tootmise korraldamises	Tootmisprotsessi kestused tavaliselt pikemad
Väiksemad investeeringud	Tootmises võivad tekkida seisakud
Töötajad teevad tavaliselt ühte operatsiooni, mis on hästi omandatud	Transporditeekonnad pikemad
Väiksemad tootmiskulud	Materjalide käsitluse automatiseerimine on keerulisem
Lihtsam tagada seadmete koormus	Toodete kuhjumise võimalus vaheladudesse
Väiksemad kulud tööjõu koolitusele	Madalam tootlikkus

Protsessikeskse paigutuse puhul võib olla lihtsam seadmete teenindamine ja remont, kuid keerulisemate detailide töötlemisel, mis nõuavad mitme operatsiooni kasutamist erinevatel seadmetel, muutuvad transporditeekonnad põhjendamatult pikaks. Samuti on sellise tööpinkide paigutuse puhul võrdlemisi raske jälgida tellimuse täitmise tervikolukorda, s.t kontrollida toote valmistamise kulgu ja vastavust tootmisplaanile. See omakorda võib põhjustada koostamisprotsessi ebarütmilisuse, kuna kõik detailid ei pruugi õigel ajal kohale jõuda tehniliste või organisatsiooniliste põhjuste tõttu.

Tootekeskne seadmete paigutus on kasutusel, kui tootmisprogramm näeb ette korduvate seeriatega tootmist ja toomispartiid on piisavalt suured. Tootmisprotsess on siis tavaliselt jagatud operatsioonide loogiliseks jadaks (vt sele 4.64 I ja II) ning püütakse vältida tagasikäike tootmises (vt sele 4.64 III). Ka tootmisprotsessi kompaktsuse saavutamine on tootlikkuse tõstmise seisukohast lähtudes eesmärk omaette.



Sele 4.64 Tootekeskne seadmete paigutus. Tootmisprotsessi osad: 1 – toorikute ettevalmistus, 2 – võlli otste freesimine ja tsentreerimine, 3 – mõlema võllipoole treimine, 4 – liistusoone freesimine, 5 – puurimine, 6 – hambafreesimine, 7 – termiline töötus, 8 – võllikaelte lihvimine, 9 – hammaste lihvimine, K – kvaliteedikontroll, L – pakkimine. A (variant II) ühildab operatsioonid 3, 4, 5, 6.

Mida suuremad tootmiskogused, seda otstarbekam on tootmiskeskne seadmete paigutus. Tootmiskeskne seadmete paigutus tagab suure tootlikkuse ja efektiivse tootmispindade kasutamise. Individuaal- ja väikeseeriatootmises ei pruugi kõik olemasolevad seadmed leida piisavalt rakendust.

Tootekeskse asetusskeemi põhitunnused:

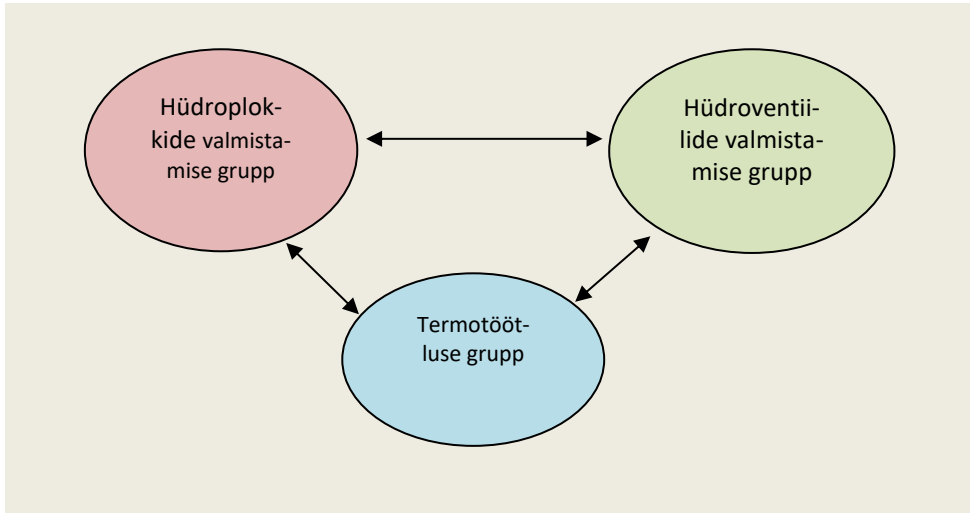
- eelistatakse kasutada spetsiaalseadmeid (eeldab suuri tootmiskoguseid);
- seadmete ümberhäälestus võib olla aeganõudev ja kallis;
- materjalide liikumine on sujuv ja tootmisprotsessi kulgemise taktis;
- väiksemad kontrolli ja monitooringu kulud (kui on eelhäälestatud seadmed);
- lihtne planeerimine ja hea tootmise korraldamine tagab protsessi sujuvuse;
- kõrge tootlikkus ja vaheladude vajadus võib puududa.

Olulisemad eelised ja puudused on tabelis 4.11.

Tabel 4.11 Tootekeskse paigutuse eelised ja puudused

Eelised	Puudused
Tootmismarsruut on loogiline ja lühike	Ühe seadme tõrge võib põhjustada probleeme kogu süsteemi töös
Lühikesed tootmise ajad	Vahel vaja kasutada duubelseadmeid
Lihtne tootmise planeerimine	Väike paindlikkus, eriti spetsiaalseadmete puhul, mis küll tõstavad tootlikkust
Lihtne tootmiskorraldus	Spetsiaalseadmed nõuavad pikemat ümberhäälestuse aega
Väikesed materjalide transpordiajad ja -kulud	Transpordiseadmed ise on kulukamad
Väike kogus tooteid korraga töös	Laokorraldus peab olema väga korrektne
Vähe kvalifitseeritud tööjõudu võimalik kasutada	Eeliste ja puuduste mõju ulatus sõltub paljuski spetsialiseerituse ja automatiseerituse tasemest

Seadmete **tootmisrakukestesse** koondamine on viimasel ajal üha populaarsem. Sellised tootmisrakud võivad ühendada erinevaid seadmeid, mis on koostööks integreeritud ühte tootmiskompleksi. Samas on võimalikud ka eraldiasetsevad seadmete grupid, mis kokku täidavad ühte eesmärki. Sellist seadmete asetust kutsutakse ka **grupiviisiliseks** asetuseks ja vastavat tootmist tootmisrakukestes tootmiseks (vt sele 4.65). Need tootmissaared või modulariseeritud tootmisüksused võivad olla omakorda suurema või väiksema integreeritusega. Suure integreerituse korral on kogu toode võimalik algusest lõpuni valmistada ühes modulariseeritud kompleksis, sooritades näiteks täisautomatiseeritud režiimis plastivalu, komponentide montaaži valatud korpusesse, toote testimise ja pakkimise. Selline tootmiskompleks on äärmiselt suure tootlikkusega ja lihtne ühendada ettevõtte teiste tootmise allüksustega.



Sele 4.65 Seadmete grupiviisiline asetusskeem

Autonoomsed tootmissaared (väiksem integreeritus, vt sele 4.65) annavad suurema paindlikkuse ja on kohaldatavad ka tellimustele orienteeritud tootmiskorralduse puhul. Siinjuures aitab paindautomatiseerimine tõsta tootlikkust eelkõige seadistusaegade lühendamise arvelt.

Tootmisseadmete grupiviisilise asetuse eelduseks on suuremal või vähemal määral tootmisprotsesside unifitseerimine ja tüpiseerimine. Tootmisprotsesside unifitseerimine ja tüpiseerimine nõuab omakorda töödeldavate detailide konstruktiiv-tehnoloogilist analüüsi. See tähendab, et valmistamisele kuuluvad tooted tuleb jagada klassidesse, detailid aga liigitada nende konstruktiiv-tehnoloogiliste tunnuste (gabariitmõõtmed ja mõõtmete täpsused, pindade kuju ja vastastikuse asendi täpsus, konstruktiivsed iseärasused, materjalid, sooritatavad operatsioonid jms) keskselt.

Tootmise asetuse efektiivsuse konkreetseks näitajaks on transpordikulutuste minimeerimine

$$\text{Min } (X_{ij} C_{ij}),$$

kus n on seadmete arv süsteemis, mida kasutatakse tootmisprotsessis,

i, j – seadmete indeksid;

X_{ij} – transporditeekondade ja paigalduste arv seadmest i seadmeni j;

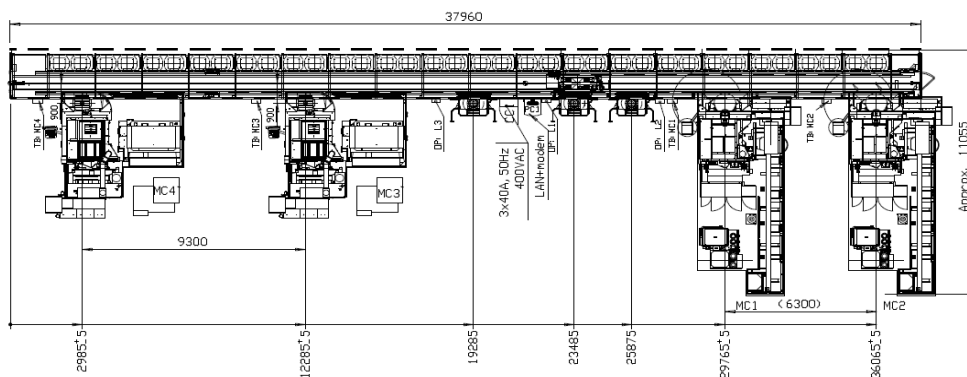
C_{ij} – ühe elementaarteekonna ja paigalduse maksumus.

Asetusskeemi efektiivsust võib hinnata ka transpordile kuluva aja osatähtsusega üldisest tootmistsükli ajast

$$EF_{tr} = T_{tr} : T_{ts},$$

kus T_{tr} on toodete valmistamisel transpordiks ja paigaldusteks kulunud aeg ja T_{ts} toodete valmistamise üldise tootmistsükli kestus.

Automatiseeritud tootmissüsteemide asetusplaanide kavandamine ja teostamine on tõsine inseneriülesanne, kuna erinevate seadmete (tööpingid, transpordivahendid, paigaldus-mahavõtmispositsioonid, pöördlauad, robotid) paigaldamisel peavad nad olema asetatud väga täpselt. See on äärmiselt oluline nende töö sünkroniseerimise seisukohast lähtudes. Kõik vajalikud liikumised, nende ulatused ja kiirused programmeeritakse. Seadmed saavad omavahel edukalt koos toimida vaid väga täpselt nende asukohti määratledes. Sellise detailise asendiplaani näide on toodud seel 4.66.



Sele 4.66 Tootmissüsteemi asendiplaani näidis Mehhatronikumi baasil (Deckel-Macho & Fastems)

Konventsionaalsete tööpinkidega tootmissüsteemides on asendiplaanidel töö tootlikkuse tagamisel samuti väga oluline roll, kuid millimeetritäpsusega seadmete paigutused ei ole olulised.

Seadmete head või halba esitust kujutab spagetidiagramm, mis peegeldab transporditeekondi toodete valmistamisel tootmistehhis. Kui asendiskeem on risti-rästi joonte rägastikus peaaegu must, on seadmete asetusplaan selgelt väga halb, mis väljendub raiskamistes ehk mõttetutes kulutustes tootmises.

4.8 Tootmissüsteemide olemusnäitajad

Tootmissüsteemide olemusnäitajad aitavad hinnata üldist tootmissüsteemi võimekust ja tulemuslikkust tootmisprotsessi teostusel. Tootmissüsteemi olemusnäitajaid on käsitletud [4.1, 4.2]. Need on kvantitatiivsed näitajad ja aitavad aru saada, kas tootmissüsteem vastab ootustele. Need ei ole tootmisprotsesside kesksed näitajad ega anna hinnangut tootmisprotsessi tõhususele, mis leiab aset tootmissüsteemis. Olulisemad olemusnäitajad on paindlikkus, tootmisvõimsus, süsteemi kasutamise hinnang, süsteemi töövoime, samaaegne toodangu hulk tootmises ja seadmete kasutamise efektiivsus. Tootmissüsteemi võimekust näitab ka tootmise läbilaskeaeg ja tootmistsükli kestus. Viimased sõltuvad aga suuresti juba ka töö organiseerimisest tootmissüsteemis.

Lõppkokkuvõttes huvitab meid, kui kaua aega kulub, et toode suudaks läbida tootmissüsteemi, s.o **tootmise läbilaskeaeg**

$$T_{\text{ths}} = T_c + T_{\text{tr}} + T_m + T_x,$$

kus

T_{ths} – tootmise läbilaskeaeg tootmissüsteemis;

T_c – tootmistsükli aeg (summaarne tootmistsüklike aegade summa);

T_{tr} – kogu transpordiks kulutatud aeg toote või toodete partii valmistamisel;

T_m – kõikide mõõte ja kontrollioperatsioonide summaarne aeg, mida tehakse väljas pool tööpinki toote või toodete partii valmistamisel;

T_x – kõikvõimalike ootamiste ja muude raiskamiste aegade summa toote või toodete partii valmistamisel.

Tootmistsükli kestus arvutatakse valemist

$$T_c = T_o + T_{\text{ph}} + T_{\text{th}} + T_{\text{mc}},$$

kus

T_c – tootmistsükli aeg (min/tk, näiteks minuteid ühe toote kohta);

T_o – vahetu tootmise aeg;

T_{ph} – toote tööpinki paigaldamise aeg;

T_{th} – tööriistade vahetuse aeg;

T_{mc} – mõõtmise ja kontrolli aeg vahetus töötsoonis.

Partii töötlemise tsükli aeg arvutatakse valemist

$$T_{\text{cp}} = T_{\text{su}} + Q T_c,$$

kus

T_{cp} – tootmistsükli aeg toodete partii valmistamiseks;

T_{su} – häälestus- ja seadistusaeg toodete partii kohta;

Q – toodete partii suurus.

Nii tootmistsükli sooritamiseks kulunud aeg kui ka tootmise läbilaskeaeg mõjutavad otseselt vastavaid tootlikkusi (operatsiooni tootlikkus, süsteemi tootlikkus). Tootlikkuse mõistet on käsitlenud [4.67]. Sageli on tootlikkus ja paindlikkus teataval määral vastandid. Suuremat tootlikkust on kergem saavutada, kui paindlikkus on väiksem. Tänapäeval aga etendab paindlikkus tootmissüsteemide juures erakordselt suurt rolli. Seetõttu vaatleme seda näitajat ka mitmest aspektist.

Paindlikkus on tootmissüsteemide väga oluline ja keskne näitaja. Et tagada madal toote omahind, peab süsteemil olema kõrge tootlikkus. Lihtsustatult võib öelda, et paindlikkus tähendabki vajalikus koguses sobiva hinnaga toodete valmistamist ja kiiret kohaletoimetamist vastavalt kliendi soovidele.

Tootmissüsteemidekesksele paindlikkuse käsitlemisele saab läheneda mitmeti. Ühelt poolt vaadeldakse paindlikkust süsteemi olemuse seisukohast lähtuvalt (tootmise, teostuse, tarne, strateegia ja võimsuse paindlikkus); teisest küljest aga süsteemi toimimise seisukohast lähtuvalt (seadme, tootmise, kogumi, toote, protsesside, tootmismahu ja laiendamise paindlikkus).

Süsteemi olemuse paindlikkuse näitajad:

- **tootmise paindlikkus** on võimekus valmistada erinevaid tooteid tühiste ümberseadistusaegadega, teha kiireid muudatusi tootmisprogrammis, toota korraga erinevaid tooteid või ka kiiresti muuta ja täiendada juba tootmises olevat toodet. Väga oluline on efektiivne sooritus, aga see sõltub juba oluliselt kasutatava seadmepargi tehnoloogilistest võimalustest. Eriti väärtustub tootmise paindlikkus kui toodete nomenklatuursus ja ka samaaegselt süsteemis valmistatavate toodete arv muutub suureks;
- **teostuse paindlikkus.** On võimekus häälestada kiiresti ja odavalt süsteem, et seal saaks valmistada spetsiaalselt kliendi soovide kohast toodet. Seda mõjutab samuti oluliselt kasutatava tehnoloogilise süsteemi tehnoloogilise lahenduse olemus (vt tootmissüsteemide alamsüsteemid);
- **tarne paindlikkus.** On näitaja, mis iseloomustab reageerimisvõimet erinevatele tellimustele ja nende täitmise kiirust. Sõltub kogu ettevõtte tellimuse käsitluse protsessi ülesehitusest ja nii tootmise kui ka teostuse paindlikkusest. Oluline on ka töötajate kompetentsitase;
- **strateegia paindlikkus.** On ettevõtte võimekus pakkuda klientidele laia toodete sortimenti, neid oskuslikult pidevalt täiustada ja õigel aegselt tuua turule klientidele ootuspäraseid tooteid. On keeruline kompleksnäitaja ja sõltub organisatsiooni kõikide tasemetelt (vt 3. ptk) nii tehnilisest kui ka organisatsioonilisest suutlikkusest;
- **võimsuse paindlikkus.** On võimekus varieeruda tootmisprogrammi ja toodetavate toodete kogustega. Kiiresti muuta tootmisvõimsusi vastavalt turunõudlusele. Eelkõige sõltub tootmise, teostuse ja tarne paindlikkusest.

Kui toodud paindlikkuse näitajad on suhteliselt üldised, siis märksa konkreetsemad on **toimimise paindlikkuse näitajad** (vt tabelid 4.12–4.18).

Tabel 4.12 Seadme paindlikkus

Olemus	Mõju
Võime kiiresti adapteerida antud seade tootmissüsteemi koosseisu ja tagada laia nomenklatuursusega toodete valmistamine	Seadistusaegade kestusele Juhtimisprogrammide sisestamise lihtsusele Tööriistamajanduse efektiivsusele Tööjõu kompetentsusele

Tabel 4.13 Tootmise paindlikkus

Olemus	Mõju
Võime valmistada suurt hulka erinevaid tooteid tootmissüsteemis tulemuslikult (konkurentsivõimeline hind ja suhteliselt väikesed ajakulud)	Iga individuaalse töökoha organiseeritus Seadmete tehnoloogilised võimalused Kogu tootmissüsteemi juhtimisvõimekus Olemasolevad kogemused nii juhtkonnal kui ka operaatoritel

Tabel 4.14 Kogumi paindlikkus

Olemus	Mõju
Võimekus välja vahetada kiiresti kogu toote-programm (samaaegselt süsteemis töödeldavate detailide kogum), säilitades süsteemi kõrge tootlikkuse ja toodete kvaliteetsuse	Valmistatavate toodete sarnasused ja erinevused Seadme paindlikkus Süsteemi paindlikkus Eelnevad kogemused

Tabel 4.15 Toote paindlikkus

Olemus	Mõju
Võimekus kiiresti üle minna uuele toote nomenklatuurile vastavalt turunõudlustele, arvestades nii tootmise planeerimist, tootmise tehnilist ettevalmistust kui ka tootmise juhtimist	Kasutatavad ERP ja PLM süsteemid <i>Online</i> ja <i>offline</i> programmeerimise võimalused Tootmise paindlikkus Seadmete paindlikkus

Tabel 4.16 Protsesside paindlikkus

Olemus	Mõju
Võimekus kasutada alternatiivseid tootmismarsruute/tootmisprotsesse samal ajal süsteemis töödeldavate toodete valmistamiseks, aga ka võimekus varieeruda samaaegselt süsteemis valmistatavate toodete olemusega	Toodete nomenklatuuri sarnasused ja erinevused Tööriistamajanduse olemus Toodete teisaldus- ja paigaldussüsteemide olemus Mõõte- ja kontrollisüsteemide olemus Juhtimissüsteemi olemus Seadmete paindlikkus Tootmise paindlikkus

Tabel 4.17 Tootmismahu paindlikkus

Olemus	Mõju
Süsteemi võimekus valmistada tooteid erinevates tootmiskogustes ja kiiresti muuta vajalike tootmiskoguste suuruseid, säilitades sealjuures kõrge efektiivsuse ja tulemuslikkuse	Seadmete paindlikkus Tootmise paindlikkus Protsesside paindlikkus Investeeringute suurus tootmissüsteemi

Tabel 4.18 Laiendamisevõime paindlikkus

Olemus	Mõju
Süsteemi võimekus muutuda (suuremaks aga vajadusel ka väiksemaks) niiviisi, mis ei põhjusta tõrkeid ega ebamugavusi süsteemi töös ja toimivuses	Seadmete asetusplaani muutmise võimalus Seadmete ja süsteemi juhtimissüsteemi muutmise võimalus Tööriistamajanduse olemus Transpordisüsteemi olemus Toodete käsitlemise süsteemi olemus Seadmete paindlikkus

Kokkuvõtvalt võib öelda, et süsteemi paindlikkust aitab suurendada süsteemi kuuluvate seadmete (põhi- ja abi-) tehnoloogiliste võimaluste laiendamine ja indikatiivselt iseloomustab seda kolm näitajat:

N_K – üldine eriliigiliste toodete arv, mida süsteemis on võimalik valmistada;

N_S – samal ajal süsteemis valmistatavate eriliigiliste toodete arv;

N_S/N_K – suhtarv, mis iseloomustab universaalsuse taset.

Süsteemi töö seisukohast on veel väga olulised [4.1]

- tootemaatriks – erinevate kujuelementide arv, mida süsteemis on tehniliselt võimalik valmistada ja
- tootepere – süsteemis samal ajal valmistatavad erinevad tooted.

Süsteemi arenduse aspektist vaadelduna on oluline teada alljärgnevaid süsteemi paindlikkust peegeldavaid näitajaid:

- süsteemi laiendamisevõime paindlikkus ehk võimekus piisavalt kiiresti süsteemi juurde integreerida uusi tehnilisi lahendusi;
- süsteemi protsesside paindlikkus ehk võime kasutada erinevaid alternatiivseid tootmis-teekondi toodete kiiremaks valmistamiseks süsteemis;
- kogumi paindlikkus ehk süsteemi võimekus kulutada minimaalselt aega eriliigiliste toodete paigaldamiseks ja mahavõtmiseks ning seadmete ümberhäälestamiseks.

Paindlikkuse näitaja aitab ühelt poolt tõsta oluliselt süsteemi tootlikkust, teiselt poolt aga muuta süsteem piisavalt universaalseks, et tema kasutusvaldkond laieneks. Paindlikkusel on hind ja seetõttu peab vajalikkude paindlikkuse taset määrates kindlasti majanduslikult kalkuleerima.

Tootmisvõimsus on defineeritud kui maksimaalne tootmiskogus, mida süsteem on võimeline turule tootma või väljastama vastavalt etteantud tingimustele.

Tootmisvõimsus on niisiis toodangu hulk või tootmiskogus ajaühikus.

$$PC = m \times S \times H \times R,$$

kus

m – süsteemis olevate seadmete arv;

S – vahetuste arv planeeritavas ajaperioodis (päev, nädal jms);

H – töötundide arv vahetuses (nt 8 tundi/vahetus);

R – toodetav kogus seadme kohta ajaühikus (kogus/tunnis).

Tootmisvõimsus on teataval määral teoreetiline näitaja. Kuna reaalselt sageli erinevate põhjuste tõttu seadme, tootmisliini või süsteemi väljalase on väiksem, siis saadakse **süsteemi kasutamise näitaja**

$$U = Q : PC,$$

kus

U – süsteemi kasutamise määr;

Q – tegelik toodete kogus, mis süsteemis valmistatud teatava ajaperioodi jooksul (tk/päevas, tk/nädalas vms).

Süsteemi töövõime on lähedane töökindluse näitajale. Süsteemi töövõime määramiseks kasutatakse kahte töökindluse näitajat: kasulik aeg kahe tõrke vahel (MTBF) ja tõrke kõrvaldamise aeg (MTTR).

Süsteemi töövõime arvutatakse valemist:

$$A = MTBF - MTTR : MTBF.$$

Nagu toodud valemist selgub, on töövõime seisukohast eriti oluline tõrke kõrvaldamiseks kuluv aeg. Kuna nüüdisaegsetes tootmissüsteemides kasutatavad seadmed on üldiselt kõrge maksumusega, siis igasugused raiskamised lähevad ettevõttele kalliks maksma. Mida vähem raiskamisi ja mida suurem tootlikkus, seda lühem toote kohaletoimetamise aeg, mis on sageli ka tellimuse võitmise argumendiks.

Toote kohaletoimetamise aeg on aeg, mis tervikuna kulub, et valmistada tellimusele vastav detail või toode tootmissüsteemis, arvestades kõikvõimalikke ajakulusid seotud seisakutega tootmises, laosoleku aegu, ümberhäälestusaegu, transpordiaegu ja ka seisakuid töökindluse põhjustel.

$$MLT = T_{su} + Q \times T_c + T_x,$$

kus

T_{su} – paigaldus ja ümberhäälestusajad kõikide seadmete ja operatsioonide puhul;

Q – tootmiskogus;

T_c – valmistamise tsükli aeg (kõikide tööpinkide ja operatsioonide arvestuses);

T_x – võimalike ajakadude või raiskamiste summa kogu antud tootmiskoguse valmistamiseks.

Toote kohaletoimetamise ajast sõltub teine oluline näitaja: samaaegne toodangu hulk tootmises, mida igati püütakse minimiseerida, kuna see on hetkeline kulu, mis ei anna ettevõttele mingit tulu.

Samaaegne toodangu hulk tootmises (WIP) on toodangu hulk tootmises, mille valmistamist on juba alustatud, kuid kõik vajalikud tootmisoperatsioonid ei ole lõpetatud ja seetõttu vastav kogus tooteid on kas tootmise vaheladudes, tööpinkide juures või on isegi ajutiselt toimetatud tsentraallattu mingite probleemide ilmsikstuleku tõttu.

Vastav näitaja arvutatakse valemist:

$$WIP = A \times U \times PC \times MLT : S \times H,$$

kus

A – süsteemi töövõime;

U – süsteemi kasutamise määr;

PC – tootmisvõimsus;

S – vahetuste arv nädalas (vahetus/nädalas);

H – töötunde vahetuses (8 tundi/vahetus).

Seadme üldine kasutamiseefektiivsus (OEE) on kogu ettevõttele oluline väljundnäitaja. See annab tervikülevaate süsteemi käitumisest ja pingutustest, mis tehtud edukuse saavutamiseks.

OEE mõõdab võimekust, tulemuslikkust ja kvaliteeti.

Võimekus väljendab planeeritud aja kasutamistotstarbekust.

$$\text{Võimekus} = \text{kasutatud aeg} / \text{planeeritud aeg}.$$

Näiteks ühevahetuselise töö puhul, arvestades planeeritud ajakadusid (30 min), saame planeeritud aja suuruseks $8 \text{ (tundi)} \times 60 \text{ (min tunnis)} - 30 = 450 \text{ min}$.

Paraku mitmete raiskamiste tõttu (90 min vahetuses) ei õnnestunud kogu aega otstarbekalt kasutada ja kasutatud ajaks kujunes: $450 - 90 = 360 \text{ min}$.

Siit siis

$$\text{võimekus} = 360 : 450 = 0,8 \text{ ehk } 80\%.$$

Tulemuslikkus väljendab tegeliku tootmiskoguse ja planeeritud tootmiskoguse suhet töökohas. Tootmisplaanis planeeriti, et töökohal valmistatakse 20 toodet. Erinevatel põhjustel (raiskamised töökohal ja organisatsioonilised vead) valmistati töökohal tegelikult 18 toodet.

$$\text{Tulemuslikkus} = 18 : 20 = 0,9 \text{ ehk } 90\%.$$

Kvaliteet väljendab tegelikult heakskiidetud toodete arvu planeeritud toodetest. Planeeritud 20 tootest jõuti valmistada 18 toodet ja nendest erinevatel põhjustel ostus 2 toodet praaktooteks. Siis kvaliteedinäitaja on:

$$\text{kvaliteet} = 16 : 20 = 0,8 \text{ ehk } 80\%.$$

Seadme üldine efektiivsus kokku on $0,8 \times 0,9 \times 0,8 = 0,57$ ehk 57%.

Toodud näitest on selgesti näha, et järeleandmised erinevatel etappidel lähevad kokku kalliks maksuma. Ehk kasutades kallist seadet, saab sellest vahetult töökohas antud juhul tagasi vaid 57%.

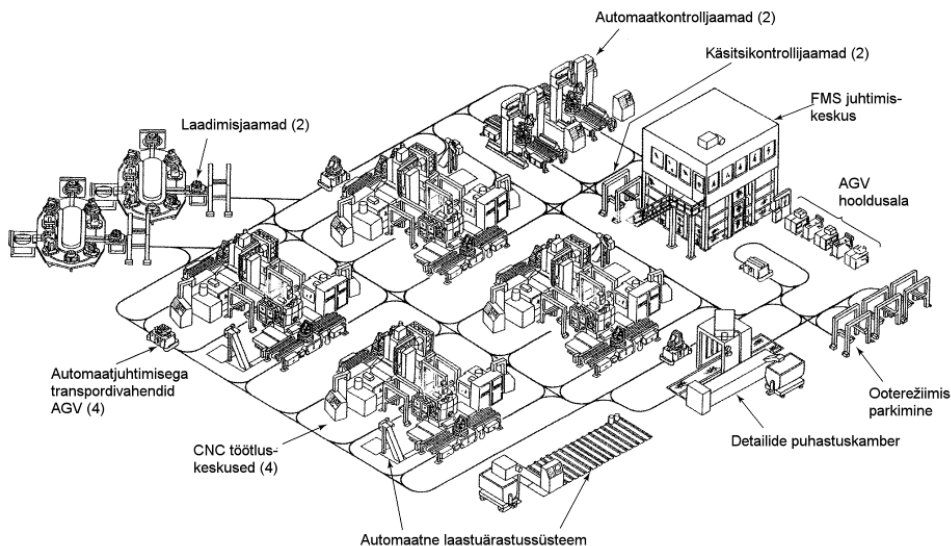
4.9 Tootmissüsteemide arendus

4.9.1 Kavandamisülesanded ja kavandamisprotsessi koht

Tootmissüsteemide kavandamine on oluline inseneriülesanne. Sellega on vaja tegeleda töötades välja täiesti uut jaoskonda, tsehhi või koguni tehast, aga ka moderniseerides või laiendades olemasolevat. Üks võimalik tootmissüsteemi olemusskeem on kujutatud seel 4.67.

Tootmissüsteemi kavandamine tähendab erinevate insener-tehniliste ülesannete lahendamist. Need ülesanded võib tinglikult klassifitseerida viide olulisemasse gruppi:

- 1) tootmissüsteemi põhiolomuse määramine (konventsionaalne tootmissüsteem, robot-tehniline kiiresti ümberkonfigureeritav tootmissüsteem, paindtootmissüsteem tema erinevates realiseerimisvariantides);
- 2) põhikomponentide (tootmisseadmed, robotid, transpordivahendid, laoelemendid ja laostruktuurid, paigaldus-mahavõtmissaadmed, mõõte-kontrollivahendid, tööriistade eelhäälestusrakised jms) valik;
- 3) tootmise põhikontseptsiooni valik ja võimalike alternatiivsete struktuurilahenduste analüüs;
- 4) ressursside arvu optimeerimine;
- 5) seadmete asetusskeemi detailne väljatöötamine (seadmete otstarbeka süsteemisese paigalduse määramine).



Sele 4.67 Tootmissüsteemi võimalik olemuskeem

Toodud loetelu väljendab peamisi kavandamisprotsessi ülesandeid. Samas kavandamine ise on vaid üks osa tootmissüsteemide arendusega seonduvatest ülesannetest. Tootmissüsteemide arenduse ja toimivuse juures on kolm suurt ülesannete gruppi ehk arendusetappi:

- 1) tootmissüsteemide planeerimine;
- 2) tootmissüsteemide kavandamine;
- 3) tootmissüsteemide toimimine.

Tootmissüsteemide planeerimine sisaldab tegevusi ja toiminguid (vt tabel 4.19), mis peavad andma konkreetse sisendi tootmissüsteemide kavandamise etappi.

Tabel 4.19 Tootmissüsteemide planeerimise ülesanded

Teema	Kirjeldus
Toote perekonna määramine	Otsuse langetamisel on otstarbekas lähtuda grupitehnoloogia põhimõtetest. Täieliku paindlikkuse tagamine on kindlasti kallis. Seetõttu tuleb leida otstarbekad lahendused seadmete paindlikkuse ja tootmise paindlikkuse määramisel. Seadmete paindlikkuse ja tootmise paindlikkuse juures on oluline mõjutegur ka tootmisprogrammi suurus.
Tootmise nõudmised	Lähtuda tuleb sellest, et otstarbekas toodete perekond või üldine toodete nomenklatuur on määratud. Edasiseks tuleb määratleda vajalikud töötlemismeetodid ja tulenevalt nendest kirjeldada võimalikud tootmisprotsessid. Protsessi paindlikkus ja kogumi paindlikkus on siin olulised.
Toodete parameetiline kirjeldus	Valmistatavate toodete mõõtmed ja mass on olulised. Kujuelementide kirjeldused. Kujuelementide erisused ja sarnasused. Toote 3D-mudelid on abiks otsustuste langetamisel.

Tootismahud	Eeldatavad tootismahud toodete lõikes peavad olema võimalikult täpselt määratletud. Kui see ei õnnestu, tuleks teha vastavad prognoosid ja ka riskianalüüs.
-------------	---

Tabel 4.20 Tootmissüsteemide kavandamise ülesanded

Teema	Kirjeldus
Tööpinkide valik	Tööpinkide valik on väga oluline ülesanne, et oleks tagatud vajalik paindlikkus, tootlikkus, töötlemise täpsus ja saavutatud ka sobiv hind. Tööpinkide maksumused kujundavad väga oluliselt süsteemi hinda ja seeläbi avaldavad mõju ka toote maksumusele. Tuleb arvestada ka millist automatiseerituse taset kavandatakse ja milline tootmisühik (ühetasandiline, mitmetasandiline) on otstarbekas
Tootmissüsteemi struktuuri, protsesside teostuse ja seadmete asendiplaani määramine	Kõik need ülesanded on väga oluliselt seotud töödeldavate detailide olemuse, sarnasuse või erinevuse nende nomenklatuursuse ja tootismahtudega. Lahendusvariante on palju. Kaalutleda tuleb, kas eesmärgiks on suurem tootlikkus või suurem paindlikkus. Samuti etendavad olulist osa investimisevõimalused kohe ja perspektiivselt.
Materjalide käsitlemise süsteem ja kasutatavad rakised	Materjalide käsitlemise süsteemi tehniline lahendus moodustab ühe terviku süsteemi struktuuriga ja on otseseks aluseks seadmete paigutusskeemi projekteerimisülesandele. Oluliseks sisendiks siin on abioperatsioonide automatiseerituse aste. Lõpplahendusena peame saama tsentraallao ja puhvrite kontseptsiooni, laosüsteemi integreerituse transpordisüsteemiga ning samuti ka kasutatavate töölaudade ja rakiste põhikontseptsioonid.
Tootmises olev (WIP)	WIP tase tuleb määrata, kuna see mõjutab väga oluliselt seadmete kasutamise taset ja süsteemi töö efektiivsust. Samuti tuleks OEE tase esialgselt planeerida. See omakorda mõjutab palju seadmete paindlikkust, tootmise paindlikkust, koosluse paindlikkust, protsesside paindlikkust. Üle tuleks uuesti vaadata tsentraallao ja vaheladude (puhvrite) vajalike kohtade arv. Iga koha maksumus on päris suur.
Tööriistamajanduse kavandamine	Lähtudes töödeldavatest detailidest (geomeetrilised iseärasused), saab ülevaate vajalike tööriistade arvust ja erisusest. Kui intensiivselt tööriistu kasutame (püsivusajad). Määrata tuleb tööriistade tsentraallao vajadus, tööpinkide tööriistamagasinide suurus. Tööriistade kohaletoimetamise süsteem, tööriistade eelhäälestamine ja kogu tööriistamajandust puudutava andmestu haldamine kuulub tööriistamajanduse juures lahendatavate ülesannete hulka.
Mõõte- ja kontrollisüsteemi kavandamine	Kvaliteedikindlustamise ja kvaliteeditagamise seisukohast lähtudes on mõõte- ja kontrollisüsteemi kavandamine väga oluline ülesanne. Tuleb valida kõik vajalikud tehnilised vahendid. Teha otsus mõõtemasinade või mõõterobotite kasutamise vajaduse ja kasutamistarbekuse kohta. Tuleb teha otsus protsessisisestest ja protsessivälisest mõõtetulemuste vajadusest ja otstarbekusest. Mõõtetulemuste haldamise ja analüüsi korraldamine on samuti otsene planeerimise ülesanne.

Tabel 4.21 Tootmise teostus tootmissüsteemides

Teema	Kirjeldus
Töökohtadele tootmise planeerimine	Lähtutakse tootmise planeerimise faasis koostatud tootmisplaanist (ERP ülesanne). Määratakse kindlaks kõikide toodete puhul, lähtudes nende valmistamise tootmisprotsessidest tööde alguse ja lõpu ajad vastavatel töökohtadel. Püütakse tagada kõikide seadmete optimaalne koormatus.
Tööde alustamine ja lõpetamine	Seadmete koormus on tagatud nende pideva tööga. Häälestamine, toorikute paigaldamine ja valmistoodete mahavõtmine vähendavad kasulikku tööaega. Nende toimingute optimaalne planeerimine ja teostamine on samuti tootmise vahetu ülesanne
Protsesside teostus	Tuleb jälgida väljatöötatud tootmisprotsesside realisatsiooni vastavust tootmisplaanile. MES-süsteem on abiks tulemuslikkuse hindamisel ja võimalike kõrvalekallete likvideerimisel
Toodete grupeerimine	Grupitehnoloogia põhimõtete järgimine on aluseks paremate tootmistulemuste saavutamisel.

Tootmissüsteeme tuleb pidevalt arendada ja täiendada, et konkurentsipüües püsida. See nõuab ettevõtelt, kes tahavad maailmaturul edukalt toimetada, toodangu kvaliteedi pidevat tõstmist, samas aga toodete müügihinna vähendamist ning tootmistsüklite olulist lühendamist.

Vastavate ülesannete lahendamiseks saadakse kogu lähteinformatsioon turundusest ning ettevõtte strateegilistest arengukavadest. Nii strateegilise arengukava kui ka turundusinformatsiooni olulisemaks dokumendiks on tootmisprogramm (aastaks, kaheks, viieks). Vaatamata kiiresti muutuvatele majandusmudelitele, on tootmise arenduse juures väga olulised head prognoosimismudelid ja oskus neid kasutada. Kogu tehniline seadmepark peab vastama valmistatavate toodete vajadustele (toodete gabariidid, geomeetriliste elementide parameetrid jms). Samas aga arvestama kindlasti ka toodete nomenklatuursust, seerialisust, aastaprogrammi suurus. Tänapäeva muutuv maailmas on kõik toodetega seonduv samuti pidevas muutumises, mis teeb tootmissüsteemide kavandamise ülesande tulemuslikuks tootmiseks veelgi raskemaks.

4.9.2 Kavandamisprotsessi üldolemus süsteemiarenduses

Süsteemide arendus tugineb süsteemitehnikal [4.68, 4.69, 4.70]. Süsteemitehnika on multidistsiplinaarne valdkond kindlustamaks klientide soovide rahuldamise arendatava süsteemi tulemusliku toimivuse teel. Süsteemitehnika teooriale tuginedes on süsteemide arendusel kaks valdkonda:

- süsteemi kavandamine;
- süsteemi arenduste juhtimine.

Süsteemide kavandamine lähtub valdkonna (robotkeevituskompleksi, mehaanilise töötlemise paindootmissüsteemi, konventsionaalsetest tööpinkidest koosneva tootmistsehhi jms) spetsiifilistest teadmistest ja vastavatest meetoditest ning vahenditest (matemaatilised mudelid, modelleerimine ja simulatsioon, süsteemi arhitektuur, optimeerimine, süsteemide dünaamika, analüüs, andmetöötlus jms).

Süsteemiarenduse juhtimine lähtub juhtimisteooriast ja projektijuhtimise meetoditest [4.68, 4.71].

Süsteemi arendus toimub pidevalt kogu süsteemi eluea jooksul. Ka süsteemi eluea määramine kuulub süsteemi arenduse tegevuste hulka. Süsteemi arendus on komplekstegevus, mille eesmärk on sisendite [I] (toodete perekond, toote funktsionaalne, geomeetiline ja tehnoloogiline kirjeldus ja tootmismahud) efektiivne transformatsiooniprotsess [T] määratud väljunditeks [O] (süsteemi detailne kirjeldus ja toimimispõhimõtted). Sisendite ja väljundite täpne määratlemine kuulub süsteemi arendusprotsessi juurde, samuti nagu ka transformatsiooniprotsessi teostuseks parimate vahendite ja meetodite leidmine.

Süsteemi arenduse põhiülesanded on kujutatud alljärgnevalt [4.72]:

- 1) süsteemi analüüs – välja selgitada [T, I ja O] olemus, tuues esile nende komponentide tunnusjooned, alternatiivsed variandid ja kasutamishinnangud;
- 2) süsteemi eksploatatsioon – ette on antud [T] ja [I] ning tuleb määratleda kõik vajalik, mis puudutab väljundit [O];
- 3) süsteemi inversioon – ette on antud [T] ja [O] ning tuleb määratleda sisendi [I] olemus ja omadused;
- 4) süsteemi süntees – teada on kõik sisendid [I] ja väljundid [O], leida tuleb kõige sobivam süsteemi variant [T] antud tingimustes;
- 5) süsteemi optimeerimine – leida tuleb [I, O ja T] nii, et etteantud kriteeriumite järgi süsteemi töö väljundväärtused oleksid optimaalsed.

Väljundsuurused ja -väärtused sõltuvad süsteemi iseloomust, kuid kõige universaalsemad väljundsuurused on süsteemi arhitektuur, seadmete tüübid ja nende tehnoloogilised võimalused, seadmete arv, seadmete asetuskeemid, aga ka süsteemi oodatav tootlikkus, toodete valmistamise planeeritud maksumus, valmistatavate toodete nomenklatuursus, süsteemi maksumus jms.

Mõistmaks süsteemi peame mõistma selle eesmärki, selle koostisosade omavahelise mõjutamise ja sõltuvuse mehhanisme. Kui süsteem dekomponeerida, kaotab see oma iseloomulikud tunnusjooned. Analüüs tähendab süsteemi üksikute osade uurimist. Süntees aga tähendab terviku vaatlemist tema ühtsuses, koosnevana üksikutest süsteemi osadest.

Süsteemiarendus toimub pidevalt, alates äriidee tekkimisest ning selle esmasest realiseerimisest ja jätkudes kogu süsteemi eluea jooksul. Süsteemiarendus on komplekstegevus ning selle eesmärgiks on sisendite (energia, materjalid, pooltooted, teadmised, informatsioon jms) efektiivne transformatsiooniprotsess väljunditeks (tooted, teenused, pooltooted, teave jms). Sisendite ja väljundite täpne määratlemine kuulub nii ettevõtte strateegia kui ka süsteemiarenduse valdkonda. Süsteemiarenduse põhikomponendid on toodud tabelis 4.22.

Tabel 4.22. Süsteemitehnika rakendus süsteemide arendamisel

Süsteemi arendus	Meetodid, vahendid	Teostusprojekti juhtimine
Tehnilise ülesande koostamine - nõuded süsteemile - kontseptsioon - automatiseerituse tase - paindlikkuse tase - alternatiivsed lahendused Süsteemi kavandamine - tehnilised lahendused - komponendid ja nende tehnoloogilised võimalused - komponentide arv - seosed komponentide vahel - asendiplaanid - juhtimisalgoritmide ja -süsteemide seire- ja kontrollisüsteemid - sisseostetavad komponendid ja nende spetsifikatsioonid Süsteemi realiseerimine - kasutustingimuste väljatöötamine - dokumenteerimine - testimine - üleandmine Süsteemi toimimine - juhtimine - tulemuste hindamine - otsuste vastuvõtmine - tulemuste parendamine	Planeerimine Kavandamine Riskide juhtimine Konfigureerimine Modelleerimine ja simulatsioon Statistika Analüüs Andmehaldus	Juhtimise planeerimine Ressursside juhtimine Teostuse juhtimine Üleandmine Dokumentatsiooni haldamine Parenduste juhtimine

Süsteemiarendus on protsess, millel on seitse olulist etappi, koos oma sisendite ja väljunditega.

- 1) Probleemi püstitus – põhjalik, täiuslik ning tehniliselt korrektne ülesande püstitus on väga oluline, et tagada lähteülesande tulemuslik lahendus ehk tellija soovide nõuetekohane rahuldamine. Siia juurde kuuluvad alaülesanded:
 - süsteemi kontseptsioon;
 - kasutamine ja demontaaž;
 - utiliseerimine ja edasiarendamine.
- 2) Variantide võrdlus – tuuakse esile võimalikud alternatiivsed lahendused ja toimub nende võrdlus (eelised, puudused, perspektiivid, ohud). Variantide võrdluse juures on äärmiselt oluline alljärgnev:
 - funktsionaalsusnõuete täitmine;
 - maksumus, teostuse keerukus, võtmenäitajad;
 - eesmärgid ja nende saavutamise tase.
- 3) Süsteemi mudeli väljatöötamine – süsteemi mudeli ja süsteemi modelleerimise abil püütakse elimineerida võimalikud kitsaskohad ja saavutada optimumilähedane tulemus. Selle etapi olulisemad ülesanded on:

- süsteemi arhitektuur;
 - süsteemi põhikomponendid;
 - põhikomponentide arv;
 - seadmete asetusplaan;
 - süsteemi animatsioon (võimalusel);
 - tehniline hinnang ja täiustamine;
 - otsustuste analüüs ja lõpliku otsuse langetamine.
- 4) Süsteemi väljatöötamine ja integratsioon – väljatöötamine tähendab kavandatu elluviimist konkreetsetel tööetapil. Oluline on horisontaalne integratsioon (materjalide liikumise voo-
gude arvestamine) ja vertikaalne integratsioon (infovoogude arvestamine ja planeeri-
mine). Süsteem peab töötama sujuvalt, paindlikult ja operatiivselt töötama koos teiste
süsteemidega ja lahendama integreeritult esilekerkivaid ülesandeid ning täima püstitatud
eesmärke.
- 5) Süsteemi kasutuselevõtt tähendab süsteemi tõrgeteta tööd antud töökeskkonnas vasta-
valt seatud võtmenäitajatele. Süsteemi kasutuselevõttuga kaasnevad konkreetsete tege-
vused:
- süsteemi üleandmine;
 - süsteemi funktsionaalsuse audit;
 - süsteemi tehniliste lahenduste audit;
 - otsustused;
 - edasiste tegevuste planeerimine.
- 6) Süsteemi väljundid – on tegelikult süsteemi realisatsiooni peamised eesmärgid. Süsteemi
väljundid peavad vastama püstitatud eesmärkidele ja kliendi ootustele. Ettevõtte peab
oma töökorraldusega tagama planeeritud väljundid ja neid hoidma. Võtmenäitajate ana-
lüüs on sellel etapil olulise tähtsusega.
- 7) Pidev täiustamine – see tähendab eelkõige Demingi ringi teostumist ettevõttes. Pidev
täiustamine on ettevõttes omaette äärmiselt oluline protsess. Süsteemi eluea korrigeeri-
mine on selle etapi lahutamatuks osaks

Süsteemitehnika on süsteemide arenduse oluline vahend (vt tabel 4.22). See on laiem
mõiste, mille üheks põhiosaks on süsteemiarenduse protsess. Süsteemi paremaks mõistmi-
seks peab lahti mõtestama alljärgneva loogilise jada:

- 1) süsteem on paljudest osadest koosnev tervik;
- 2) süsteemil (alamsüsteemil) on selgelt defineeritav eesmärk;
- 3) süsteemi iga osa toetab kogu süsteemi eesmärgi saavutamist, kuid ükski osa ei suuda
iseenesest ja omaette seda eesmärki saavutada;
- 4) süsteemi igal osal on omaette eesmärk, aga kogu süsteemi mõistmisel sõltub see teistest
osadest. Süsteemi osad (või ka alamsüsteemid) on seega vastastikusel sõltuvuses;
- 5) üksikut osa võime mõista selle järgi, kuidas see sobib süsteemi kui tervikusse. Ei ole
võimalik aga mõista süsteemi, õppides tundma kõiki selle üksikuid osi eraldi, ilma nendest
tervikut moodustamata.

- 6) osade omavahelisest koostööst arusaamine võib aidata paremini mõista, kuidas süsteem töötab, kuid selleks, et aru saada, miks see süsteem eksisteerib, peab vaatama süsteemist väljapoole;
- 7) mõistmaks süsteemi peab mõistma selle eesmärgi, selle koostisosade omavahelise sõltuvuse ja vastastikuse mõjutamise mehhanisme.

Tootmissüsteemi kavandamine kuulub keeruliste inseneriülesannete valdkonda.

Keerulisel otsustusülesandel on alljärgnevad tunnused:

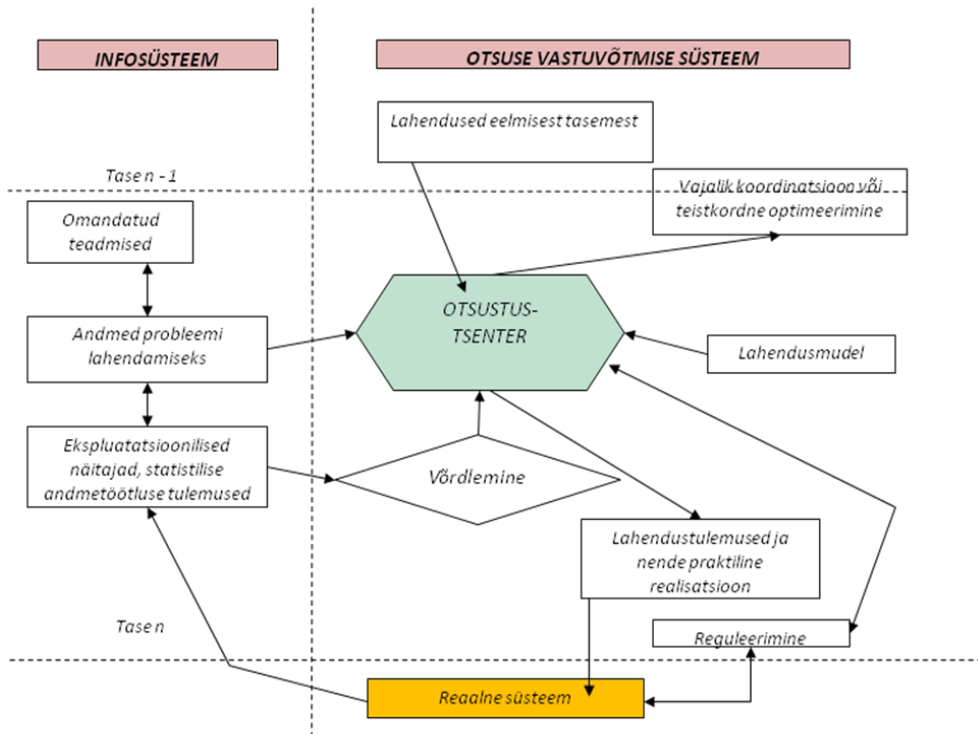
- ei pruugi olla ühest lahendit;
- lahendid sõltuvad paljudest omavahel seotud olevatest teguritest;
- otsustamiseks tuleb kasutada mitmeid kriteeriume ja sageli korraga;
- lõpliku otsuseni jõudmiseks on vaja eelnevalt vastu võtta mitmeid elementaarotsuseid;
- elementaarotsused võivad olla omavahel vasturääkivad.

Tootmissüsteemide kavandamisel kasutatakse järgmisi matemaatilisi mudeleid [4.73, 4.74, 4.75]:

- 1) tabelotsustuste mudelid;
- 2) matemaatilise (täisarvulise, lineaarse, mittelineaarse, dünaamilise) programmeerimise mudelid;
- 3) mitmekriteeriumilise optimeerimise mudelid;
- 4) modelleerimise mudelid;
- 5) simulatsiooni mudelid;
- 6) massiteeninduse mudelid jt.

Tootmissüsteemide väljatöötamise esmane ülesanne on analüüs. Süsteemianalüüsis eristatakse nii ülalt alla analüüsi kui ka analüüsi lahenduse lõpust lahendusprotsessi algusesse. Ülalt alla analüüs peab määrama kindlaks otsustusstaadiumid (mitu otsustuse taset on otsustarbekas kasutada) vastava süsteemi väljatöötamisel koos otsustustsentrite põhiolomusega (mille alusel ja kuidas tehakse otsus alternatiivsete variantide vahel). Reeglina kasutatakse ühe lõppotsuse saamiseks mitut otsustustsentrit, mis on omavahel seotud (vt sele 4.68). Eelmisel tasandil tehtud otsustus mõjutab kahtlemata järgmise tasandi otsustuste tulemusi.

Iga kavandamisülesanne sisaldab teatava arvu elementaarülesandeid, mille lahendamisejärjekord ja -meetodid tuleb igal konkreetsel juhul kindlaks määrata. Need elementaarülesanded omakorda fikseeritakse probleemi struktureerimise käigus. Ülalt alla analüüsi tulemusena spetsifitseeritakse probleemi lahendamise üldskeem ning põhimõtteliselt tehakse kindlaks kogu hierarhiline otsustuskeem koos vajaliku arvu otsustusnivoodega (vt detailsemalt tööpinkide valiku ja tööstusrobotite valiku ülesanne).



Sele 4.68 Otsustustsentri olemus ja koht otsustusülesandes

Alt üles analüüsi põhiolemus on detailiseerimine, mille puhul pööratakse põhitähelepanu järgmistele asjaoludele:

- otsustustsentris tehtud otsustuse olemus ja selle kasutamistotstarbekus;
- muutujad, mis mõjutasid otsustust või põhjustasid konkreetse otsustuse langetamise;
- otsustustsentri enda arhitektuur ja selle olemus üldises tootmissüsteemi kavandamise arhitektuuris;
- piiravad tingimused, mis mõjutasid antud otsustuse tegemist;
- kasutatava informatsiooni täiuslikkus otsustuse tegemise momendil;
- reeglid, mille järgi toimiti otsustuse vastuvõtmisel.

Igal juhul peab süsteemi arendajal olema välja töötatud ülesande lahendamise algoritm, tuginedes kavandamisülesande üldisele kontseptuaalsele skeemile. Keerulisemate ülesannete lahendamisel kujutab tulemuseni jõudmine endast elementaaroostuste vastuvõtmise ja saadud tulemuste analüüsile tuginevat protsessi. Selleks töötatakse igal konkreetsel juhul välja otsustusnivood (lahendusalgoritmi hierarhilised tasemed) ja koordineerimisitasandid (võimalike vasturääkivuste kõrvaldamiseks).

Otsustusnivood on kui kontsentraatorid, millele on koondatud teatavat liiki ühte eesmärki teevivate ülesannete lahendamise mehhanism. Nii näiteks võib tootmissüsteemide projekteerimisel otsustusnivoodena vaadata alljärgnevat:

- 1) süsteemikomponentide valik;
- 2) süsteemikomponentide arvu määramine;
- 3) süsteemi struktuuri määramine.

Hierarhilise otsustusülesande juures on kasutusel järgmised olulised mõisted:

E_i – kavandamisetaapi (lahendustaseme) tähistus, $i = 1, 2, \dots, M$;

S_i – sisendparameetrite vektor, $i = 1, 2, \dots, S$, (kohtsisendid);

V_i – väljundparameetrite vektor, $i = 1, 2, \dots, V$, (kohtväljundid);

U_i – ülekantavate parameetrite vektor, $i = 1, 2, \dots, U$;

R_i – reguleerimisvektor, $i = 1, 2, \dots, R$;

Q_i – lõpplahenduste vektor, $i = 1, 2, \dots, Q$.

Sisendparameetrite vektor kujutab endast kas kogu püstitatud ülesande lahendamise algandmeid või siis elementaarsisendeid mingi lokaalse ülesande lahendamiseks. Igal lokaalsel kavandamisülesandel või lahendusetapil, aga ka kogu püstitatud ülesandel on oma konkreetsed oodatavad väljundid. Lisaks lõpptulemustele tuleb ülesannete kompleksi lahendamiseks suur osa andmeid kanda ühest lahendusetapist teise. Niisuguseid suurusi ongi hakatud nimetama ülekantavate suuruste vektoriks. Osaliselt võivad vektorite V_i ja U_i parameetrid ka kattuda. Nii näiteks tehnoloogiliste protsesside projekteerimise tasandil määratakse kindlaks tööriistad (lõike-, abi- ja mõõteriistad). Vajalike tööriistade tüüp ja teised neid spetsifitseerivad parameetrid kantaksegi üle tootmissüsteemi projekteerimise tasemele. Samal ajal on need ka tehnoloogiliste protsesside projekteerimise taseme väljundparameetrid või tulemused, mis kantakse tehnoloogilise dokumentatsiooni (marsruut- või operatsioonikaartidele).

Mastaapsete, mitmeetapiliste projekteerimisülesannete lahendamisel ei pruugi lokaalsed optimumid tagada alati parimat lõpptulemust ehk globaalset optimumi. Jätkaes tööriistadega, võib selle väite selgitamiseks tuua järgmise näite. Tootmissüsteemis on vaja ette töödelda antud detailide grupp. Tehnoloogiliste protsesside projekteerimise tasemel valiti vastava algoritmi alusel välja parimad tööriistad kõikide antud gruppi kuuluvate detailide töötlemiseks. Seejärel tuli ilmsiks, et tööriistade nomenklatuursus ületab paljukordselt tööriistasüsteemis olevate pesade arvu, kuhu tööriistu saab asetada (vt tööriistasüsteemi tehnoloogilised võimalused). Selliseid ebakõlasid kõrvaldataksegi reguleerimisvektori abil.

Matemaatilistest meetoditest pakuvad tootmissüsteemide kavandamisel suurt tuge:

- otsustusteooria,
- optimeerimismeetodid,
- ekspertsüsteemid,
- modelleerimistehnika ja simulatsioonisüsteemid.

Igasugune kavandamisülesanne on loominguiline tegevus, mille aluseks on täieliku selguse ja ülevaate saamine käsitletavast ainevaldkonnast. Seda ülesannet täidab analüüsi etapp.

Edasi, tuginedes vastavalt vajadusele konkreetsele matemaatilisele aparatuurile, lahendatakse etapiliselt tootmissüsteemide kavandamisega seotud ülesanded. Lähtudes saadud tulemustest, püütakse enne lõpliku otsuse vastuvõtmist imiteerida või nagu öeldakse, läbi mängida tegelikke tööstuslikke (praktilisi) olukordi. Selleks kasutatakse modelleerimis- ja/või simulatsioonitehnikat ning võimalusel lahenduste animatsiooni. Lõplikud otsustused tehakse pärast tulemuste kompleksanalüüsi. Positiivsete resultaate korral tulemused vormistatakse kas graafiliselt, tekstiliselt või kombineeritud kujul, vastavalt vajadustele ja kasutaja soovidele.

4.9.3 Seadmete valiku ülesanne

Tootmissüsteemis kasutatakse eriotstarbelisi seadmeid (tööpingid; tööstusrobotid; transportvahendid toorikute/detailide koaletaimeetamiseks ja äraviimiseks; tsentraallaod toorikute, detailide, tööriistade hoidmiseks; puhvrid ja tööriistamagasinid; mõõtemasinad jms), et täita erinevaid tööülesandeid (töötlemine, koostamine, ladustamine, transport, paigaldus, mõõtmine- ja kontroll jms). Vastavalt seadme spetsiifikale ja töö iseloomule on konkreetsete valikukriteeriumid. Igal juhul on ettevõtte soov saada parim tulemus madalama maksumusega ja sageli arvestades ka tulevikuperspektiive. Kuna seadmete areng on tänapäeval äärmiselt kiire, siis ei ole väga otstarbekas lükata otsuste langetamine kaugesse tulevikku. Parima otsuse langetamisele aitavad tänapäeval väga olulisel määral kaasa ka seadmete tootjad ning nende esindajad. Siiski on kasulik, kui endal on otsustusprotsessist hea ülevaade. Alljärgnevalt vaadeldakse olulisi momente valmistusseadmete ja tööstusrobotite valikul. Mõlemal juhul on sisendiks teostatav tööülesanne, selle spetsiifilisus või universaalsus. Tööülesande täpsustamisel on olulisteks lähteparameetriteks:

- valmistatavate toodete nomenklatuursus ja kogused;
- toodete parameetiline kirjeldus (CAD-mudel või toote tehniline dokumentatsioon);
- tootmisprotsessi kirjeldus (teostatavad operatsioonid ja nende olemus);
- eraldi tuleb juhtida tähelepanu toote teenistuslikule otstarbele ja kvaliteedinõuetele, mis seadme võimaluste ja hinna kujundamisel samuti olulist rolli etendavad.

4.9.3.1 Tööpinkide valik

Lähteinformatsioonile tuginedes ja arvestades ülaltoodud loetelu viimast punkti, tuleks alustada võimaliku tootja valikust. Kui tööülesanne näeb ette lihtsate äärikute valmistamise, siis ei ole otstarbekas vajalikkude tööpinkide otsida tootjate hulgast, kelle tööpingid on orienteeritud näiteks auto- või lennutööstuse toodangu valmistamisele. Seadmete hinnad võivad erineda kümneid kordi (50 000 või 500 000 eurot maksval tööpingil on selgelt ka suured erinevused).

Tüüpiline tööpinkide valikupu on viietasandiline:

- tööpingi tootja valik;
- töötlemispõhimõtte valik;
- töötlemisvõimaluse valik;
- töötlemisotstarbekuse valik;
- efektiivsuse valik (tootlikkuse ja maksumuse kombinatsioon).

Esimesest tasemest oli eespool juttu.

Teisel tasemel tehtava valiku aluseks on detaili töötlemise (operatsiooni sooritamise) keerukus ja nende valmistamise kogus (vt sele 4.69). Tööpinkide puhul valitakse kolme alternatiivi vahel:

- 1) töötlemine automaattööpinkides;
- 2) töötlemine universaaltööpinkides;
- 3) töötlemine programmjuhtimisega tööpinkides (CNC).

Automaattööpinke iseloomustavad suured valmistuskogused (omased suurseria ja mass-tootmisele). Universaaltööpinke on otstarbekas kasutada eelkõige väikeste tootmiskoguste, individuaaltootmise ja suure toodete nomenklatuuri juures. CNC-tööpinkide otstarbekat kasutamist iseloomustab universaalne reegel: mida suurem on töödeldava detaili geomeetiline keerukus, mida enam tema töötlemiseks on vaja kasutada erinevaid tööriistu, mida suurem on nõutav töötlemise täpsus, seda otstarbekam on CNC-tööpinkide kasutamine.

Seega töötlemispõhimõtte valik on vahetult seotud tööülesande iseloomustusega (kui suures koguses, milliseid detaile/tooteid on vajalik valmistada).

Kolmandal tasemel kasutatakse kõige sagedamini loogilisi valikufunktsioone, mis määravad kindlaks mingi i -nda detaili töötlemise tingimused j -ndas tööpinkide grupis või tööpingis. Üldjuhul esitatuna on selliseks funktsiooniks avaldis:

$$\{W_{i1}\} \{ < , = , > \} \{Y_{j1}\}, \dots, \{W_{ik}\} \{ < , = , > \} \{Y_{jk}\},$$

Kus $\{W_i\}$ – töödeldava detaili parameetrite kogum (töödeldavate kujuelementide kirjeldused) saadakse CAD-mudeli või tööjoonise alusel;

$\{Y_j\}$ – j -nda tööpinkide grupi või tööpingi tehnoloogiliste võimaluste kogum;

k – vaadeldav piiravate tingimuste arv.

Vahetud piiravad tingimused tulenevad põhiliselt neljast lähteparameetrite grupist:

- tööülesandest tulenevad vajalikud töötlemismeetodid (määravad tööpingi tüübi: treipink, freespink, lihvpink, töötlemiskeskus, laserlöike lehekeskus, stantsimisautomaat jms);
- töödeldava toote mõõtmed ja kaal (määravad vajaliku tööpingi suuruse ja sageli ka peaelektrimootori võimsuse);
- töödeldavate pindade mõõdu-, kuju- ja vastastikuse asendi täpsus (määravad tööpingi täpsusklassi ja vajaliku positsioneerimise täpsuse);
- kujuelementide (astmeline silindriline ava, keermestatud ava, nuutvõll, kahekäiguline tigu) geomeetria, mõõtmed ja täpsus (mõjutab tööpingi spindlit, tööriistasüsteemi, aga ka täpsust).

Toodud piiravate tingimuste grupid on valiku juures väga olulised. Valearvestus võib välistada tööpingi kasutamise võimaluse. Samuti on halb, kui ostetud tööpingi hind on liiga kõrge.

Neljandal tasandil otsuse langetamiseks peab kindlasti arvestama tööpingi tehnoloogiliste võimalustega, mis võivad tõsta töötlemise efektiivsust, aga võivad olla ka lisakuluallikateks. Olulisemad tehnoloogilised võimalused on:

- tööriista vahetuse aeg;
- töödeldava detaili vahetamise aeg;
- mitme tööpositsiooni kasutamise võimalus (üheetapiline töötlemine, vt 4.4.1);
- võimalus kasutada mitut töölauda (seadistus väljaspool tööpositsiooni, SMED, vt 4.4.1.1);
- võimalus töödelda mitme tööriistaga korraga;
- mitme spindli kasutamisevõimalus;
- tööriistamagasini suurus;
- töörežiimide automatiseeritud muutmise võimalus;
- kiirpaigutuse kiirused;
- juhitavate koordinaatide arv ja samaaegselt juhitavate koordinaatide arv jne.

Kõik need kriteeriumid mõjutavad oluliselt tootlikkust, samas aga ka vahetult seadme valmistamise hinda. Lisaks tootlikkusele on otsuse langetamisel seega ka väga oluliseks näitajaks seadme maksumus.

Viielandal tasemel langetatakse lõplik otsus. Tuleb samaaegselt arvestada olulisi lõpliku valiku langetamise kriteeriume:

- tootlikkus;
- seadme maksumus;
- töökindlus;
- ettevalmistuseks (ümberhäälestamiseks) kuluv aeg;
- teenindamismugavus ja ohutus.

Toodud kriteeriumite mõju ja vastumõju arvestamiseks võib kasutada eksperthinnanguid, tabelotsustusmeetodeid või lahendada mitmekriteeriumiga optimeerimisülesanne.

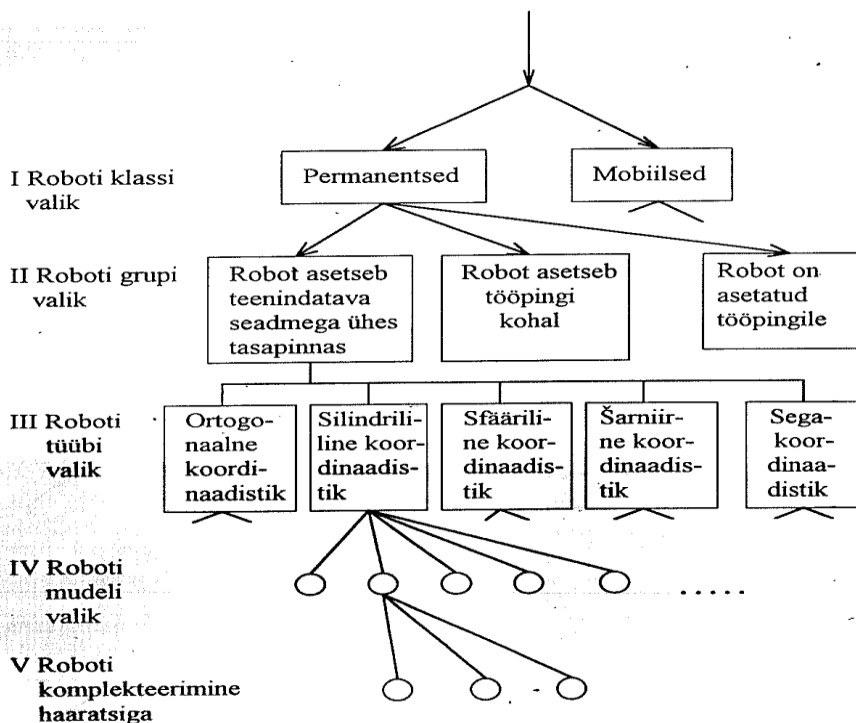
4.9.3.2 Tööstusrobotite valik

Tööstusrobot ei tööta tootmissüsteemides tavaliselt täiesti üksi. Ikka on tegemist mingi kooslusega. Tööstusroboti (vt sele 4.69) puhul on teiseks oluliseks elemendiks toode, mida valmistatakse, ja töökoht, kus toodetakse. Tootmisülesandeks on kas kaar- või punktkeevitus, värvimine, mehaaniline töötlemine, poleerimine vms. Töökohas on tavaliselt rakistus, valmistatava toote fikseerimiseks ja kinnitamiseks, koht, kus hoitakse toorikuid, ja positsioon, mis on eraldatud valmistoodetele. Seadme teenindusroboti (vt näiteks sele 4.61) puhul on roboti kaaslasena teenindatav seade (press, töötlemiskeskus vms). Koostamisoperatsioonide sooritamisel on robot või robotid ametis konkreetse koostu (toote) valmistamisega.

Kõikidel juhtudel on robot täitmas teatavaid funktsioone konkreetsetes töökeskkonnas. Nii täidetavad funktsioonid kui ka töökeskkond on oluliseks argumentideks roboti valikul.

Tööstusrobotite valikul tuleb lähtuda nende klassifikatsioonist, tunda nende tehnoloogilisi võimalusi ning arvestada mitmesuguseid kasutamistingimusi. Ka siin on otstarbekas kasutada

hierarhilist otsustuskeemi (vt selet 4.69), et lahendatavat ülesannet paremini lahti mõtestada ja otsustuskriteeriume oskuslikumalt kasutada.



Sele 4.69 Tööstusrobotite valikujärjestikune skeem

Esimesel tasemel otsustatakse tulenevalt tööülesandest roboti põhifunktsioon töökeskkonnas. Määratakse kindlaks roboti kasutatavus tootmissüsteemis:

- permanentne (paigalseisev) robot;
- mobiilne (liikuv) robot.

Peamiseks otsustuskriteeriumiks on ühe roboti poolt teenindavate objektide arv, aga ka vajalik tegevusulatus. Kui need ületavad roboti pakutavaid võimalusi ning ka mitut robotit ei saa või pole otstarbekas kasutada, tulebki edasi valida mobiilsete robotite hulgast.

Teisel tasemel on oluline otsustada roboti asukoht. Otsuse langetamisel on lähtekohaks tööruumi olemus ja tööülesanne. Roboti paiknevuse seisukohast on kasutusel peamiselt kolm varianti:

- robot asetseb teenindatava seadmega ühes tasapinnas;
- robot asetseb tööpingi (seadme) kohal (portaalrobotid);
- robot on monteeritud seadmele.

Igal vaadeldaval variandil on oma eelised ja puudused. Valik sõltub esmajoones konkreetsetest tootmistingimustest. Valiku tegemisel ülaltoodud variantide vahel tuleks arvestada eelkõige järgmisi kriteeriume: olemasolevat tööruumi jaoskonnas; tööruumi seadmete kohal; roboti massi, montaaži keerukust ja kulusid; võimalusi roboti rikke korral tööd tööpingis jätkata; remondi keerukust ja kulutusi; tehnoloogilise süsteemi robot-tööpink realiseerimise keerukust, aga ka roboti poolt teenindavate tööpinkide arvu.

Väiksemate toodete valmistamiseks ja suhteliselt vähe tööruumi võttev variant on (c). Puuduseks on asjaolu, et ühe seadme tõrke puhul, on kogu kompleks töövõimetu.

Portaalrobotite kasutamine tagab tavaliselt suure tootlikkuse, on kompaktned ja võtavad vähem tootmisruumi pinda. Hooldus ja remont on keerulisemad.

Kõige traditsioonilisem ja lai kasutusampluaa on variandi (a) puhul.

Kolmandal tasemel määratakse kindlaks roboti koordinaadisüsteem (kujundab tööruumi), mis on äärmiselt oluline, et täita tööülesannet. Kui vabadusastmete arvust ei piisa, et nõutavat tööd teha (objekti asetamine uuele kohale, kontuurkeevituse õmbluse sooritamine, lahti võetava liite moodustamine montaažil jne), ei ole enam tähtsust teistel roboti mudeli valikul arvestatavatel parameetritel (positsioneerimise täpsus, kandevõime, töökiirused jms) Teisalt juhitavate koordinaatide liigsus muudab kohe roboti hinna põhjendamatult kalliks. Nende mittekasutamine ettenähtud tööde sooritamisel põhjustab mõttetut ressursikulu, muudab roboti käsitlemise põhjendamatult keeruliseks ning see omakorda tekitab liigseid kulutusi eksploatatsioonile. Siit siis ka otsene vajadus roboti tööruumi ja nõutava vabadusastmete arvu võimalikult täpselt määratlemiseks.

Roboti tööruumi kasutamise juures on väga oluline määrata kindlaks, kuidas vajalikke liikumisi juhitakse. Juhtimissüsteemide realiseerimisele võivad robotid olla tsüklilise, positsioon-, kontuur-, adaptiiv- või universaalse juhtimisega.

Tsüklilise juhtimissüsteemiga roboteid loetakse kõige lihtsamaks. Tsüklilist juhtimissüsteemi kasutatakse piiratud ja kindlalt fikseeritud manipulatsioonide sooritamiseks roboti abil.

Positsioonjuhtimisega roboteid kasutatakse juhtudel, kui tööseadise liikumine punktist (positsioonist) punkti (positsiooni) on fikseeritud, samal ajal aga ei ole vaja liikumise trajektoori täpselt kontrollida (detaili asetamine tööpinki, objekti asetamine montaažilauale).

Kontuurjuhtimisega robotite kasutamine on vajalik juhtudel, kui tööseadise liikumise trajektoor peab kulgema täpselt ette programmeeritud teekonda pidi (keevitusõmbluse moodustamiseks, pindade värvimisel, keerulistel montaažitöödel, muude tööoperatsioonide sooritamiseks jne)

Universaalsed juhtimissüsteemid kujutavad endast polüfunktsionaalseid juhtimissüsteeme, sisaldades adaptiivjuhtimise, laserjuhtimise, tehisintellekti jm elemente.

Neljandal tasemel valitakse konkreetne tööstusroboti mudel. Siin hinnatakse nende kasutamist starbekust, tuginedes üldistele tehnoloogilistele võimalustele:

- kande- või tõstevõime;
- positsioneerimise täpsus;
- teeninduspiirkonna mõõtmed (raadius);

- sooritatavate funktsioonide loetelu (tähtis eelkõige töörobotitel);
- ajamite tüüp;
- kasutatavate sensorite liigid ja omadused;
- ümberhäälestuse võimalused (paindlikkus);
- adaptiivsus, intelligentsus jm analoogilised omadused;
- kaitstus ümbritseva keskkonna võimalike kahjulike mõjude eest.

Lõpliku otsuse langetamisel tuleb analüüsida, millistel robotite tootjatel on kõigi vajalike parameetritega robotid olemas. Lõplik valik tuleb teha roboti maksumuse, klienditeeninduse ja võimaluse korral ka töökindluse alusel.

Viiendal tasemelantakse robotile vajaliku tööülesande täitmise funktsioonja valitakse tööseadis. See toimub robotile esitatava tööülesande analüüsi alusel, arvestades allpooltoodud lähteparameetreid:

- tööülesande kirjeldus;
- andmed valmistatava toote kohta;
- töötingimused.

Toodud lähteparameetrid määravad haardeelemendi kuju, haardeulatuse, survejõu, samuti roboti kandevõime. Roboti töö paindlikumaks muutmiseks on otstarbekas komplekteerida robot erinevate haardeelementidega. See on esmajoones vajalik koosterobotite puhul, kuid mõningatel juhtudel väga oluline ka töörobotite juures. Teenindusrobotite puhul on haaratsil otsustav osa objekti kiireks ja mugavaks haaramiseks ning positsioneerimiseks seame tööruumi.

Robotite, nagu ka igasuguste teiste tööstusseadmete, valikul tuleb lähtuda põhimõttest, et nende konstruktiiv-tehnoloogilised omadused (tehnoloogilised võimalused) vastaksid võimalikult täpselt nõudmistele, mis tulenevad nõutava töö iseärasustest. Arvestades robotite suurt sortimenti, nende küllaltki erinevaid konstruktiiv-tehnoloogilisi lahendusi, üsnagi erinevaid realisatsioonivõimalusi, täiendavaid võimalusi komplekteerida ühte ja sama robotit erinevate haaratsitega jms, on robotite valikut kindlasti otstarbekas teostada mitmeetapiliselt (sele 4.69).

Tehnoloogiliste võimaluste tähtsus on erinevatel kasutamiseesmärkidel täiesti erinev. Seda peegeldab ilmekalt sele 4.58 ja allesitatud tabel 4.23.

Roboti kasutamise otstarbekust võib iseloomustada roboti tehnoloogiliste võimaluste rakendatuse astmega ja roboti koormusteguriga.

Esimene neist väljendab tehnilistes tingimustes toodud võimaluste kasutamise määra (juhitavate koordinaatide arv, positsioneerimistäpsus, kandevõime, teenindusraadius jt). Kui need võimalused ei ole täielikult rakendatud, siis on tehtud liigseid kulutusi, sest mida laialdasemad on roboti tehnoloogilised võimalused, seda kõrgem ka on tema hind.

Tabel 4.23 Tööstusrobotite tehnoloogiliste võimaluste kasutamisevajadus valdkonniti

Valikukriteeriumid	Lihtne koostamine	Keeruline koostamine	Punktkeevitus	Kaarkeevitus	Kontroll	Stantsimine
Vabadusastmete arv	>4	>6	>3	>5	>5	>3
Positsioneerimise täpsus	+/-0,07	+/-0,05	+/-0,1	+/-0,08	+/-0,005	+/-0,1
Keskmiised töökiirused	väga suured	väga suured	suured	keskmised	suured	suured
Objekti haaramise-vabastamise aeg	väga väike	väga väike	keskmine	keskmine	väike	väike
Eelistatavam juhtimissüsteem	positsioon	kontuur	positsioon	kontuur	kontuur	positsioon tsüklikiline
Sensorite olemasolu vajalikkus	vajalik	hädavajalik	pole oluline	soovitav	vajalik	pole oluline
Adaptiivjuhtimise vajalikkus	soovitav	vajalik	soovitav	soovitav	väga vajalik	pole oluline

Robotite koormustegurit väljendatakse suhtega

$$Q_{tr} = \frac{T_{tr}}{T_{ts}},$$

kus T_{tr} on roboti tööaeg (töös oleku aeg), T_{ts} aga detailipartii valmistamise tsükliäeg.

Loomulikult eeldatakse, et robot on maksimaalselt koormatud. Kuna koormatus määratakse suhtarvuna, on äärmiselt tähtis, et lisaks roboti tööaega vahetult mõjutatavatele parameetritele (roboti tööseadise liikumise kiirused, objekti haaramise ja vabastamise ajad ning haardeelemendi vahetamise ajad), oleks tagatud ka sujuv töö organiseerimine. Vastupidisel juhul tekib ressurside täiendav raiskamine. See tähendab, et on ostetud väga kõrgete tehnoloogiliste näitajatega ning suure tootlikkusega robot, aga enamus aega peab see tehnoloogiline vahend tööde väga halva organiseerimise tõttu tarbetult seisma.

4.9.4 Tootmissüsteemide edutegurid

Lisaks tootmissüsteemi füüsilisele osale on ka organisatsiooniline ehk korralduslik pool. Seda haldab tootmise juhtimine. Kui füüsiline osa on rohkem seotud tehnoloogiaga, s.o kuidas mingit toodet valmistatakse, siis organisatsiooniline osa on seotud protsessidega, ehk kuidas ja millises järjekorras on toodete valmistamine korraldatud. Tootmissüsteemis on protsessid, tehnoloogiad ja töötajad omavahel tihedasti integreeritud (vt 4. ptk). Protsessid määravad

paljuski süsteemis loodava lisandväärtuse efektiivsuse. Tootmissüsteemis asetleidvaid protsesse võib jagada kahte gruppi: lisandväärtust loovad ja lisandväärtust mittelooavad. Lisandväärtust ei loo transport, mõõtmine, ootamine, paigaldamine, seadistamine jms. Tootmisega vahetult seonduvad protsessid on lisandväärtust andvad protsessid.

Tootmisega seonduvates protsessides võib inimese roll olla suurem või väiksem. Automatiseeritud tootmise puhul on töötaja vahetu osa väiksem ja süsteemi efektiivsus saavutatakse paljuski eelnevate insenerilahenduste tulemusena. Konventsionaalsetes süsteemides (inimene-masin töökohad) on tulemuslikkuse kujundamisel inimese roll ja osatähtsus väga kõrge. Siin mängivad väga olulist rolli töötajate teadmised, oskused, vilumused, isiksuseomadused (kohusetunne, pingetaluvus, vastutustunne jms), aga ka motiveeritus ja meeskonnatöö kogemus.

Tootmissüsteemi tulemuslik kasutamine on iga ettevõtte igapäevane ja strateegiline ülesanne. Tootmissüsteemi tulemuslik kasutamine loob eeldused kogu ettevõtte tulemuslikkusele. Tootmissüsteemi tulemuslikkuse üldnäitajad on toodud tabelis 4.24.

Tabel 4.24. Tootmissüsteemi tulemuslikkuse üldnäitajad

Näitaja	Kriteeriumid
Kvaliteet	Saavutatav töötlemise täpsus Mittevastava toote esinemise sagedus Kliendi reklamatsioonide arv ajaühikus Praaktoodete poolt põhjustatud lisakulud
Töökindlus	Tõrgeteta töö tõenäosus Keskmine tõrgete arv ajaühikus Seadme prognoositav töökindlus
Tootlikkus	Tootmise tsükli aja osatähtsus tellimuse täitmise ajast Masinaaja osatähtsus töökohtadel Seadistusaegade osatähtsus töökohtadel
Maksumus	Süsteemi maksumus (investeering) Seadmete tasuvusajad Süsteemi tootlus (lisandväärtuse suhe investeeringusse)
Paindlikkus	Samal ajal toodetavate eriliigiliste toodete arv Üldine eriliigiliste toodete arv Ümberhäälestusaeg ühelt toodete perekonnalt teisele Seadistuse aeg toote valmistamiseks
Automatiseerituse tase	Käsi teostatavate toimingute arv süsteemis (töökohal) Automatiseeritult teostatavate toimingute arv süsteemis (töökohal)

4.10. Tööpinkide arvprogrammjuhtimine

4.10.1 Arvprogrammjuhtimine (NC, CNC)

Arv(programm)juhtimise kasutamine on oluliselt mõjutanud tootmistehnoloogia arengut ja tootmise automatiseerimist. Kolmandat tööstusrevolutsiooni (tööstus 3.0) seostatakse vahe-
tult arvprogrammjuhtimisega tööseadmete ning raalintegreeritud tootmisega. Arvutite abil juhitakse tänapäeval nii üksikuid seadmeid kui ka tootmisjaoskondi (tehaseid).

Ajalooliselt sai tööstuse paindlik automatiseerimine alguse esimese **numbriliselt juhitava** (NC) tööpingi kasutuselevõtuga tööstuses. Esimene NC pink loodi USA kaitseministeeriumi tellimusel 1947.–1950. aastatel keerukate kujupindade töötlemiseks Massachusettsi Tehnoloogiainstituudis (MIT) John T. Parsonsi eestvedamisel. Samal ajal võeti kasutusele numbrilist juhtimist (arvjuhtimist) tähistav termin NC. Need jõudsid USA-s turule 1950. aastate teises pooles.

NC-pingil oli iseloomulikuks täienduseks arvmudelitel põhinev juhtseade, mida ei olnud traditsioonilisel tööpingil. Tööpingi juhtimisprogramm esitati kodeeritud kujul (ISO 7-bit standard) ja infokandjaks oli perfolint (5- või 8-realine). NC-seadmete põhiliseks puuduseks oli süsteemi vähene paindlikkus, mis seisnes piiratud tehnoloogilistes võimalustes, nii näiteks tuli korreerimise vajaduse puhul juhtimisprogramm tervikuna uuesti koostada.

Integraalskeemide ja mikroprotsessortehnika kasutuselevõtt võimaldas 1957.–1960. aastatel välja arendada ja turule tuua **arvutijuhtimisega (arvutipõhised) tööpingid (CNC)**.

CNC-juhtimissüsteemide põhilised koostisosad on protsessor, mäluplakk, sisend-väljundliides. **Tänapäevased CNC juhtimisseadmed on teinud tohutu funktsionaalse arengu** (võrreldes näiteks mobiiltelefonide arenguga). Suundumuseks on juhtimisseadmete intelligentsuse suurendamine (juhtseade oskab ette öelda mida ja kuidas teha), visualiseerimise võimaluste loomine (reaalse töötlemise graafiline esitus juhtseadme ekraanil), igasuguste kokkupõrke võimaluste (tööriista kokkupõrge tööpingi osadega või töödeldava detailiga) kontroll, tööpingi juhtimise algoritmide täiustamine (eriti kujupindade paljukoordinaatsel töötlemisel).

CNC-tööpinkides on töötlemise projekteerimise aluseks tööriistade liikumise trajektoore projekteerimine koos vastavate töötlemistehnoloogia parameetrite määramisega. Tööriistade liikumise trajektoore projekteerimisel peab teadma tööpingi juhtimissüsteemi võimalusi.

CNC süsteemid jagunevad positsioon-, kontuur- ja kombineeritud juhtimisega süsteemideks.

Positsioonjuhtimisega süsteemides programmeeritakse töömehhanismi asendi järjestikused positsioonid, s.t määratakse punktide koordinaadid, kuhu seadme töömehhanismid peavad liikuma. Positsioonjuhtimisega süsteeme kasutatakse, kui tegemist on valdavalt paigaldusliikumistega, näiteks avade töötlemisel puurpingis, kus tööseadisel on vaja positsioneerida ava tsentrisse ja siis sooritada tööetenihe. Või siis tööstusroboti puhul, mis peab vaid sooritama töödeldava detaili paigaldust ja mahavõtmist.

Kontuurjuhtimissüsteem võimaldab programmeerida seadme töömehhanismi liikumise etteantud kiirusega mööda kindlat trajektoori (kontuurfreesimine freespingis või kaarkeevitus tööstusrobotiga). Juhtimissüsteemi omapäraks on seadme töömehhanismide liikumiskiiruste omavaheline funktsionaalne sõltuvus vastavate koordinaattelgede suunas. Juhtimissüsteem on eelnevaga võrreldes keerulisem ja seega ka kallim.

Kombineeritud süsteemid sisaldavad nii kontuur- kui ka positsioonjuhtimist.

Infovoogude olemuse järgi jaotatakse arvjuhtimissüsteemid lahtisteks (avatud), suletuteks ja adaptiivseteks.

Lahtisi juhtimissüsteeme (nimetatakse ka impulss- või sammsüsteemideks) iseloomustab ühesuunaline infovoog juhtimisprogrammist seadme töömehhanismini. Töömehhanismi tegelikku paigutust (liikumist) süsteem ei kontrolli. Vastavad juhtimissüsteemid on ehitatud sammajamite baasil. Kuna puudub töömehhanismi asendi kontroll, ei ole tehnoloogilise süsteemi täpsus eriti kõrge. Süsteemi kasutatakse lihtsamate ja odavamate seadmete puhul.

Suletud süsteemidel on kaesuunaline infovoog. Üks viib info juhtimissüsteemist töömehhanismi, teine seadme tagasisideanduritelt juhtimissüsteemi. Tagasiside võimaldab kontrollida juhtprogrammi tegelikku täitmist ja vajaduse korral kõrvaldada tekkinud hälbed. Võrreldes lahtiste süsteemidega on suletud süsteemid keerulisemad ja kallimad, kuid tagavad suurema töö täpsuse.

Adaptiivsed juhtimissüsteemid reageerivad tegelikule olukorrale ja väliskeskkonna muutustele. Nad on võimelised reaajas või teatava ajanihkega korrigeerima tööprotsessi kulgu sõltuvalt tehnoloogilise süsteemi (nt pink-rakis-tööriist-detail) deformatsioonidest või siis muudest teguritest (tööriista kulumine, töötemperatuuri äkiline muutus, töötlemisvaru muutus, tooriku kõvaduse kõikumine jms). On kahte tüüpi adaptiivjuhtimissüsteeme:

- piirreguleerimisega (piiravad löikejõu, seadme võimsuse või spindli pöördemomendi kasutamist);
- optimaalse reguleerimisega (reguleerimine ühe või mitme kriteeriumi järgi, näiteks maksimaalne tootlikkus, minimaalne omahind, minimaalne seadme tööaeg jms).

Tänapäeva CNC-pinkides kasutatakse kahte tüüpi adaptiivset juhtimist:

- geomeetriapõhine adaptiivne juhtimine;
- tehnoloogiapõhine adaptiivne juhtimine.

Geomeetriapõhine adaptiivjuhtimine põhineb detaili kuju ja mõõtude kontrollil, kasutades mõõtepäid (vt punkt 4.10.3). Mõõtmise tulemuste alusel korrigeeritakse löiketööriista trajektoori, tööpingi töörežiime jm [<https://www.renishaw.com/en/machine-tool-probes-and-software>].

Tehnoloogiapõhise adaptiivjuhtimise korral mõõdetakse anduritega reaajas löikeprotsessi parameetrite väärtusi (nt kasutatavat võimsust, pöördemomenti, löikejõudusid vm) ja korrigeeritakse automaatselt vastavalt löikerežiime.

Adaptiivjuhtimise süsteemid on kõige täiuslikumad, samas ka kõrgeima maksumusega, seetõttu tuleb nende kasutamistarbekust eelnevalt täpsustada.

Kaasajal on enamik NC-pinke arvutijuhtimisega (CNC) seadmed. CNC-pinkidega on võimalik teha erinevaid operatsioone nagu treimine, freesimine, puurimine, augustamine, erikujuliste detailide lõikus, graveerimine jm. Pingi kasutamist iseloomustavateks märksõnadeks on kõrgem tootlikkus, paindlikkus ja kvaliteet. Nii hinnatakse, et ühe CNC-pingi tootlikkus vastab 10–15 traditsioonilise pingi tootlikkusele.

Lisaks detaili töötlemisega seotud arvprogrammjuhtimisele saab kaasajal CNC-pinkide puhul, kasutades nutitelefone või tahvelarvuteid, realiseerida pingi valmistajapoolset kaughooldust. See suurendab oluliselt CNC-pinkide kasutamise otstarbekust.

Lisaks võimaldavad CNC juhtseadmed interneti võimalusi kasutades hinnata ka operatiivselt pingi kasutuse efektiivsust, näiteks OEE indikaatorite abil, sh hinnata töövalmistust, seisuaegasid jt näitajaid. Nii kaughoolduse kui ka -monitooringu rakendamine on seotud tööstus 4.0 üldiste arengutega.

Nii kaughoolduse kui ka -monitooringu kasutamine eeldab spetsiaalse tarkvara kasutamist.

4.10.2 Arv-programmjuhtimisega pinkide (CNC) juhtprogrammi koostamine

CNC-tööpingi juhtprogrammi koostamise põhimõtete tundmine võimaldab:

- 1) omandada oskusi lugeda ja mõista juhtprogrammi;
- 2) anda teadmisi ja oskusi programmi koostamiseks;
- 3) anda informatsiooni tööpingi seadistamiseks ja töötlemise ettevalmistamiseks;
- 4) anda informatsiooni tööpingi otstarbekaks kasutamiseks;
- 5) toetada nüüdisaegsete raalvalmistussüsteemide (CAM-süsteemide) kasutamist, sh postprotsessorite koostamist.

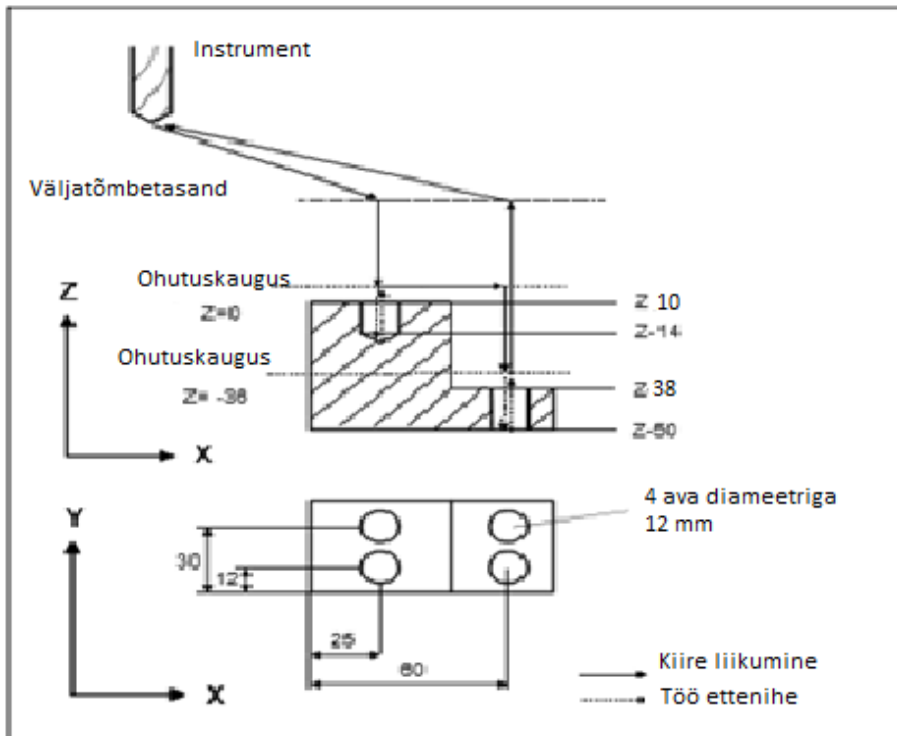
Programmi koostamiseks peab oskama:

- 1) kavandada kõiki tegevusi, mis on vajalikud antud detaili töötlemiseks CNC-pingis, sh määrama pingi otstarbekaks tööks vajalike tehnoloogiliste parameetrite suurused;
- 2) kavandada (ja realiseerida) kõiki pingi ettevalmistamiseks ja tööks vajalikke tegevusi;
- 3) määrata pingi, detaili ja tööriista koordinaatsüsteemide asendid, tööriista vahetamiseks ja töötlemise alustamiseks vajalikud ohutud kaugused, projekteerida otstarbekat tööriista trajektoori ning tundma koode (käsked), mis on vajalikud pingi tegevuste kirjeldamiseks;
- 4) seletada programmis kasutatud käskude vajalikkust;
- 5) mõista vaikimisi määratud tegevusi (hinnata käskude modaalsust).

Programmide koostamisel peaks lähtuma järgmisest soovitatavast tööde järjekorrast:

- 1) määrata tööpingi ja detaili koordinaatsüsteemid ja mõõtesüsteem. Projekteerida seadistus ja skeem tööriista trajektoori määramiseks (sele 4.70) ja määrata detaili nullpunkti asend;
- 2) määrata lõikur ja selle asend;
- 3) määrata antud lõikurile vajalikud lõikerežiimid (ettenihked ja lõikekiirused ning jahutuse kasutamine) antud lõikurile;

- 4) kirjeldada lõikuri liikumist töötlemise lähtepunkti (arvestades vajalikku ohutuskaugust);
- 5) kirjeldada töötlemisega seotud lõikuri liikumisi;
- 6) kirjeldada lõikuri eemaldamis töötlemistsoonist.
- 7) lõpetada programm.



Sele 4.70 Skeem lõiketööriista trajektoori määramiseks

Juhul kui on vaja töödelda mitme lõikuriga, siis täita iga lõikuri kohta punktid 2–6. Sellisel puhul võib kindel olla, et ei unusta mõnda olulist programmiosa arvesse võtta.

CNC-pingi juhtprogrammi koostamisel järgitakse järgmisi eesmärke:

- 1) tagada detaili töötlemine vastavalt nõuetele;
- 2) tagada CNC-pingi efektiivne kasutamine ja kõrge tootlikkus;
- 3) tagada vähim töömaht ja aeg programmi koostamiseks ja silumiseks;
- 4) lihtsustada muudatuste sisseviimist töötlemistingimuste/nõuete muutumisel.

Praktikas kasutatakse mitut erinevat juhtprogrammi koostamise meetodit.

Käsitsi juhtprogrammi koostamine. See on kõige vanem, töömahukam ja kõrget kvalifikatsiooni nõudev meetod. Programm kirjutatakse kasutades käskke, mida kasutab ka pingi juhtsüsteem. Meetod eeldab nii tööpingi kui ka juhtseadme võimaluste head tundmist.

Interaktiivne programmeerimine toimetamise režiimis. CNC-pingi juhtsüsteemi püsिमällu viiakse juhtprogramm vahetult juhtpuldist, lihtsustub programmi muutmine. Töötlemisprotsessi on võimalik simuleerida juhtarvutil. Seoses juhtsüsteemide arenguga, meetodi kasutamine laieneb.

Õpetav programmeerimismeetod. Programmeerija liigutab tööriista, mõõtesüsteem mõõdab trajektoori ja salvestab juhtsüsteemi mällu. Töötlemisel korratakse sisestatud trajektoori. Detailide töötlemiseks seda ei kasutata, kuna on ebatäpne. Leiab rakendust näiteks robotite programmeerimisel keevitus- ja värvimisprotsesside automatiseerimiseks.

Kõrgetasemelise programmeerimiskeele kasutamine. See on CNC-pingi juhtsüsteemist sõltumatu programmeerimismeetod (vt ptk 9.5), kus töötlemist kirjeldatakse kasutades probleemorienteeritud keelt (näiteks APT) ja arvutipõhist programmi ettevalmistust (CAM-süsteemi). Meetodi kasutamine asendub tänapäeval üha enam CAD/CAM-programmeerimisega.

CAD/CAM-programmeerimine. Detaili mudel koostatakse CAD-keskkonnas. CAM-keskkonnas lisatakse interaktiivselt tehnoloogiline info (töötlemismeetod, tööriistad, [löikekiirused](#), [ettenihked](#) jm) ning genereeritakse juhtprogramm (vt ptk 9.5). Tänapäeval on meetod laialdaselt kasutatav eriti keeruliste detailide töötlemiseks.

Juhtprogramm koosneb plokkidest, mis võivad sisaldada ühte või mitut käsku (funktsiooni). Pingi juhtsüsteem töötleb programmi plokkide järjestikku. Plokkid nummerdatakse ja tähistatakse näiteks kujul: N011 (plokk nr 11). Esialgsel programmi koostamisel on otstarbekas nummerdada plokkid teatud sammuga (nt N010, N020, N030 jne), et jätta võimalusi hiljem silumise käigus lisada vahele uusi plokkide.

Programmi käsk kujutab endast kindla järjestusega tähe ja numbrite kombinatsiooni, mis kirjeldab mingit pingi tegevust.

Kasutatakse kahte tüüpi käske:

- 1) modaalsed, mis aktiveeritakse antud plokkis. Modaalkäskud on tavaliselt jaotatud gruppidesse ja nad jäävad aktiivseks, kuni järgmine sama grupi modaalkäsk neid ei muuda;
- 2) mittemodaalsed, mis on aktiivsed ainult antud ploki piires.

Käskudes kasutatavad sümbolid on ISO standardiga määratud (vt tabel 4.25). Kuna juhtimis-süsteemide tootjad teevad vahel ka muudatusi või täiendusi, siis juhtprogrammi koostamisel tuleks kindlasti eelnevalt põhjalikult tutvuda vastava CNC-juhtimissüsteemi võimalustega.

Programmi ploki näide:

N001 G01 X12345 Y06789 M03,

kus N001 – tähistab ploki numbrit

G01 – modaalne käsk, mis tähistab lineaarse interpoleerimise kasutust

X12345 – käsk töölaua liikumiseks X koordinaadi suunas (sõltub kasutatavast formaadist, näiteks 123,45 mm)

Y06789 – käsk töölaua liikumiseks Y koordinaadi suunas (nt 67,89 mm)

M03 – spindli päripäeva pöörlemise sisselülitamine.

Käskudel on plokis kindel järjekord. Iga plokk algab järjekorranumbriga N, seejärel esitatakse vajaduse korral ettevalmistav funktsioon. Edasi kirjeldatakse liikumist esitav geomeetriline informatsioon, kus käskude järjekord on X, Y, Z, U, V, W, P, Q, R, I, J, K, A, B, C. Geomeetrilisele informatsioonile järgneb tehnoloogiline informatsioon: F, S, T, D ja lõpetuseks abistav funktsioon M.

CNC-pingi programmi põhifunktsioonid on järgmised:

- 1) **ettevalmistavad** käsud (funktsioonid) esitatakse G-koodidega: sh funktsioonid, nagu kasutatavate mõõtühikute täpsustamine, interpolaatori täpsustamine, liikumise kirjeldamiski viisi täpsustamine (absoluutsetes koordinaatides või juurdekasvudega), ringinterpolatsiooni mooduse kirjeldamine, lõikuri mõõtude korrektsiooni arvestamine jm;
- 2) **lõikuri liikumist kirjeldavad käsud**: sh paigutuste (liikumised X, Y, Z suunas) ja pöörlemiste (rotatsioonide) kirjeldamine (A, B, C liikumised). Täiendavad liikumised X, Y ja Z suunas kirjeldatakse vastavalt U, V, W käskudega;
- 3) **töötlemisrežiime kirjeldavad käsud**: spindli pöörlemissagedus (S) ja ettenihe (F);
- 4) **tööriista asukohta kirjeldavad käsud, T-kood**:ööriista koht hoidjas;
- 5) **abistavad ehk M-käsud**: spindli sisse- või väljalülitamine, spindli pöörlemissuuna muutmine, töölaua vahetus, kinnitusrakise kontroll, programmi lõpp jt.

Järgnevalt kirjeldame täpsemalt peamisi funktsioone. Põhjalikumalt võib erinevate funktsioonide kasutamisega tutvuda [4.3].

Ettevalmistavad funktsioonid esitatakse G-koodidega (ka RS-274).

G-koodid on põhiliseks töökeeleks arvutijuhtimisega tööpinkide programmeerimisel.

Tabelis 4.25 on toodud lühendatud väljavõtte peamistest kasutatavatest G-koodidest [4.3].

Tabel 4.25 Ettevalmistavad funktsioonid

Funktsioon (käsk)	Tähendus
G00	Kiirpaigutus
G01	Lineaarinterpolatsioon
G02	Ringinterpolatsioon päripäeva
G03	Ringinterpolatsioon vastupäeva
G04	Eelnevalt määratletud paus
G08	Kiirendus
G09	Pidurdus (täpne seismajäämine)
G17	Tasandi XY valik
G18	Tasandi ZX valik
G19	Tasandi YZ valik
G33	Keermelõikus, konstantne samm
G34	Keermelõikus, suurenev samm
G35	Keermelõikus, vähenev samm
G40	Tööriista korrektsiooni tühistamine
G41	Lõikuri korrektsioon, trajektoor vasakul detaili profiilist
G42	Lõikuri korrektsioon, trajektoor paremal detaili profiilist
G43	Lõikuri asendi korrektsioon, sisemine ekvidistant
G44	Lõikuri asendi korrektsioon, väline ekvidistant

G 53	Korrektsooni tühistamine
G54-G59	Nihe 1 kuni nihe 6
G74	Lähenemine referentspunktile
G80	Standardtsükli tühistamine
G81-G89	Standardtsükkel 1 kuni standardtsükkel 9
G90	Absoluutne koordinaadisüsteem
G91	Suhteline koordinaadisüsteem
G94	Ettenihe mm/min
G95	Ettenihe mm/pöördele
G96	Püsiv löikekiirus
G97	Spindli pöörlemisagedus 1/min

Lõikuri liikumist kirjeldavate käskude kirjeldamine

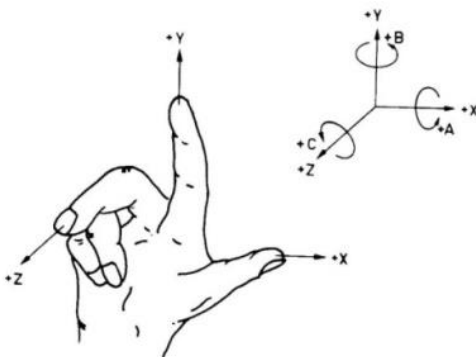
Detaili töötlemise programm kujutab endast lõikuri kindla punkti liikumist. Seda punkti, mille liikumist kirjeldatakse, nimetatakse lõikuri programmeeritavaks punktiks (ka tsentriks). Treimisel on näiteks treitera tsentriks treitera tipp. Lõikuri ja detaili omavahelise suhtelise liikumise tulemusena läbib lõikuri tsester teekonna, mida nimetatakse **lõikuri liikumise trajektooriks**.

Lõikuri liikumise trajektoor koosneb:

- tööliikumistest,
- tühiliikumistest,
- abiliikumistest.

Tööliikumised on seotud detaili töötlemisega. Tühiliikumised on seotud lõikuri positsioneerimisega. Abiliikumised on seotud lõikuri täiendavate liikumistega, et detaili saaks töödelda.

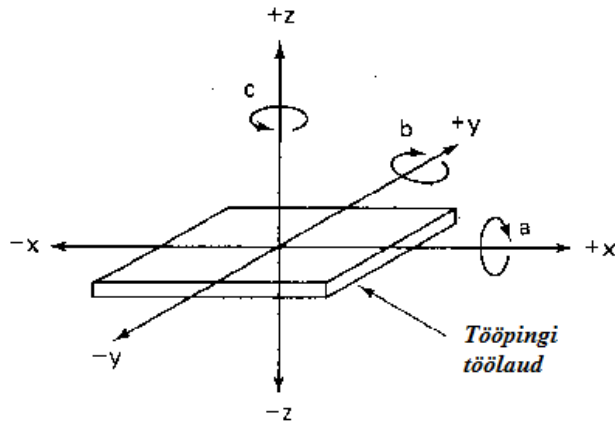
Tööriista liikumist kirjeldav koordinaadistik sõltub telgede arvust ja tööriista liikumisvõimalustest. Kaks koordinaati määravad punkti asukoha tasapinnal, kolm aga ruumis. Koordinaattelgede alguspunkti nimetatakse tavaliselt nullpunktiks. Kõikide programmeeritavate punktide koordinaadid antakse nullpunkti suhtes. Koordinaatide suuna määramisel kasutatakse parema käe reeglit (sele 4.71).



Sele 4.71 Koordinaatide määramine parema käe järgi [4.3]

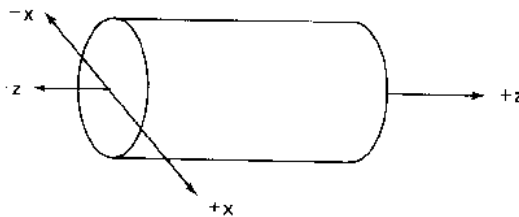
Parema käe reegli puhul: põial näitab X-telje positiivset suunda, nimetissõrm Y-telje positiivset suunda ja keskmine sõrm Z-telje suunda. Pöörlemisteljed A, B ja C vastavad koordinaattelgedele X, Y ja Z. Vaadates telje positiivses suunas, on positiivne pöörlemissuund päripäeva. Z-telg on alati tööpingi peaspindli suunas.

Selel 4.72 on näitena toodud CNC-freesepingi koordinaatsüsteem. Sama koordinaatsüsteemi kasutatakse ka puurpinkides.



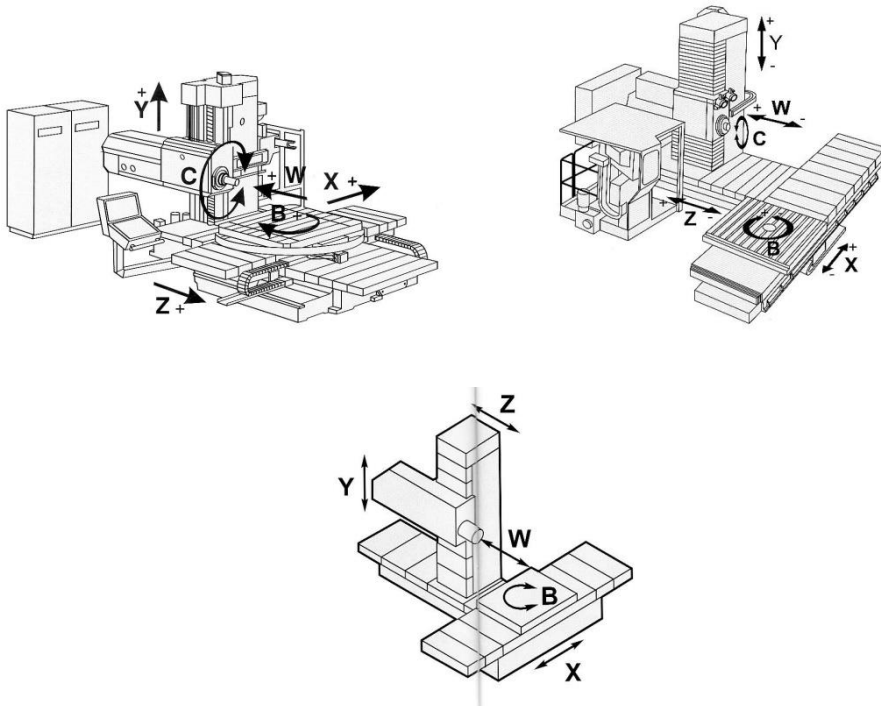
Sele 4.72 CNC-freesepingi peamised koordinaadid

Treipinkides kasutatav koordinaatsüsteem arvestab pöördekahade töötlemise iseloomu (sele 4.73).



Sele 4.73 CNC-treipingis kasutatavad põhikoordinaadid X ja Z.

Praktiline realisatsioon parema käe reegli kasutamisest erinevatele tööpinkidele on toodud selel 4.74.

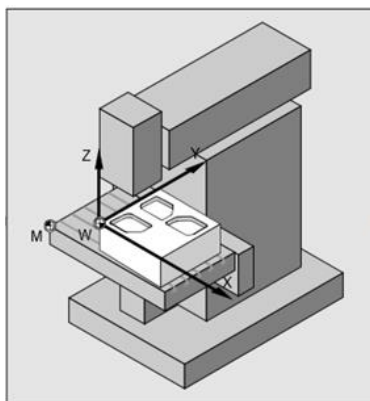


Sele 4.74 Koordinaatteljed erinevatel pinkidel [4.78]

Detaili töötlemisprogrammi koostamiseks tuleb kindlaks määrata:

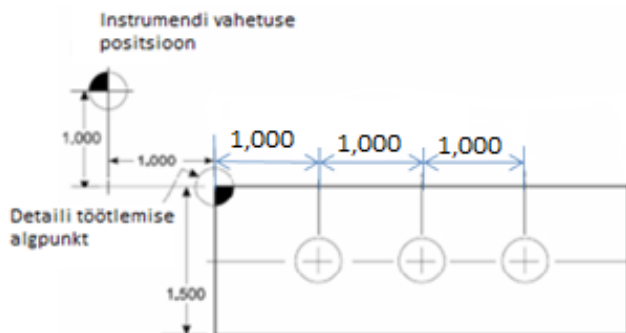
- tööpingi koordinaatsüsteem, sh tööpingi nullpunkt;
- detaili koordinaatsüsteem, sh detaili nullpunkt;
- lõikuri koordinaatsüsteem, sh lõikuri nullpunkt.

Detaili nullpunkt tööpingi nullpunkti suhtes määratakse detaili paigaldamisel rakisesse (sele 4.75).



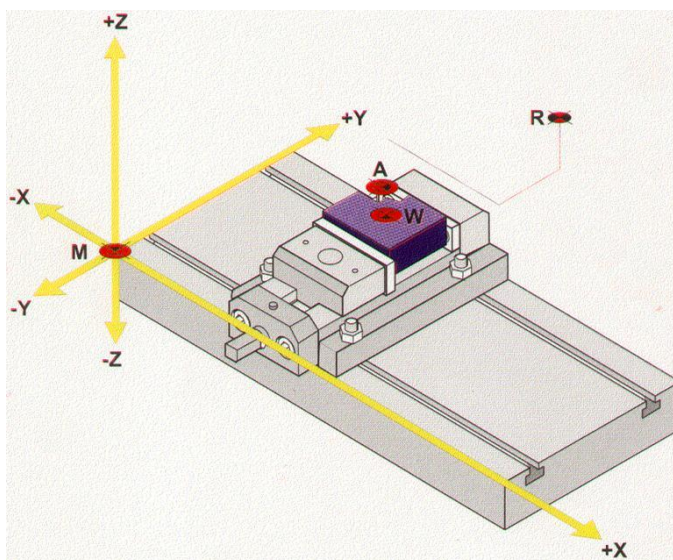
Sele 4.75 Tööpingi nullpunkt (M) ja detaili nullpunkt (W)

Koordinaatsüsteemide asendid määratakse seadistuskeemiga (sele 4.76). Töötlemist isoleerimustav mõõtudel esitatakse sõltuvalt absoluutse või suhtelise koordinaatsüsteemi (sele 4.79 ja 4.80) kasutamisest.

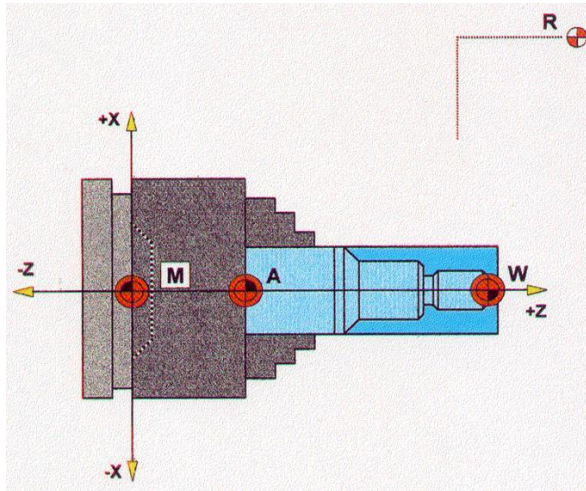


Sele 4.76 Seadistuskeem

Erinevatel pinkidel võivad need nullpunktid asetseda erinevates kohtades (sele 4.77 ja sele 4.78). Jälgida tuleb tööpingi valmistajapoolseid juhiseid nende paiknemise kohta.



Sele 4.77 CNC-freespingi tehnoloogilised nullpunktid



Sele 4.78 CNC-treipingi tehnoloogilised nullpunktid

Liikumist määrav käsk koosneb liikumist iseloomustava suuna tähisest (X, Y, Z, A, B, C, U, V, W) ja liikumise ulatust ning suunda kirjeldavast arvvärtusest, näiteks X150; Y-250, mis kirjeldab näiteks liikumist punkti (150, -250). Arvväärtuse esitamise formaat sõltub sealjuures kasutatavast juhtsüsteemist ja on ette antud.

Programmeerimises eristatakse absoluutset ja suhtelist koordinaadistikku. Kasutatav variant määratakse eelneva G-käsuga.

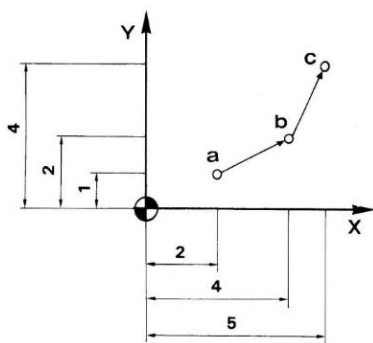
Absoluutse koordinaadistiku korral (G90) arvestatakse koordinaate nullpunktist, mis on alati ka lähtepunktiks.

Suhtelise (juurdekasvudega) koordinaatsüsteemi kasutamise korral (G91) on lähtepunktiks see punkt, kus tööriist asetseb. Suhtelist koordinaadistikku kasutatakse tavaliselt alamprogrammides, et neid saaks kasutada mitmes erinevas põhiprogrammi osas.

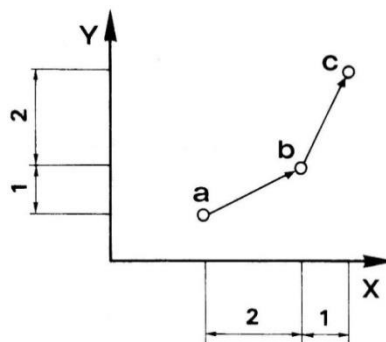
Puurimine on traditsiooniliselt operatsioon, mis toimub absoluutses koordinaatsüsteemis, seevastu freesimis- ja treimisoperatsioonid sooritatakse reeglina suhtelises koordinaatsüsteemis. Seledel 4.79 ja 4.80 on kajastatud absoluutse ja suhtelise koordinaatsüsteemi olemust.

Absoluutse koordinaadistiku korral (sele 4.79) toimub liikumine punkti b koordinaatidega $x_4;y_2$ ja sealt edasi punkti c koordinaatidega $x_5;y_4$.

Suhtelise koordinaadistiku korral (sele 4.80) toimub liikumine punkti b koordinaatidega $x_2;y_1$ ja sealt edasi punkti c koordinaatidega $x_1;y_2$.

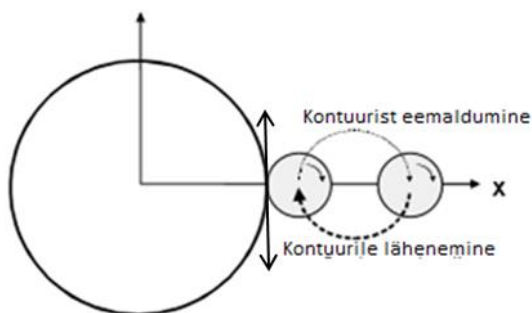


Sele 4.79 Absoluutne koordinaadistik



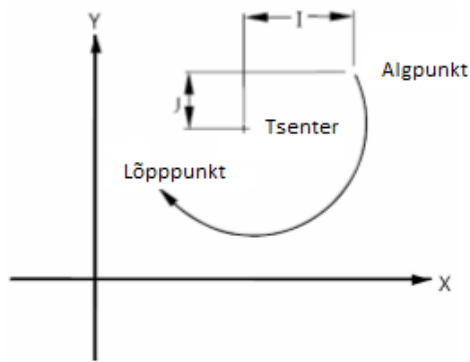
Sele 4.80 Suhteline koordinaadistik

Lõiketööriista trajektoori projekteerimisel on soovitatav töödeldud pinna defektide vältimiseks alustada ja lõpetada töötlemine töödeldava pinna puutuja suunas (tangentsiaalselt) (näide sele 4.81). Erinevaid näiteid ülemineku programmeerimisest kahe kontuurelemendi vahel (ringid ja sirgjooned) vaata [4.1].

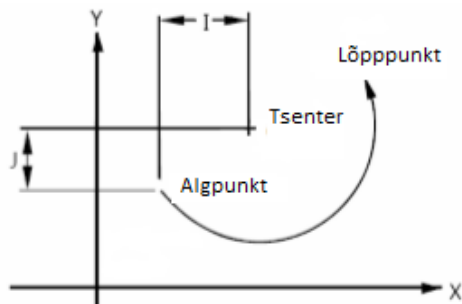


Sele 4.81 Soovitatav trajektoor töötlemise alustamiseks ja lõpetamiseks

Ringjoonelise liikumise (ringinterpolatsiooni) kirjeldamine. Ringjoonelise liikumise kirjeldamisel määratakse liikumise algpunkt käskudega X, Y ja Z ning ringjoone keskpunkt käskudega I, J, ja K (seled 4.82 ja 4.83).



Sele 4.82 Ringi töötlemine (päripäeva CW)



Sele 4.83 Ringi töötlemine (vastupäeva CCW)

Tegevused ringinterpolatsiooni kasutamisel:

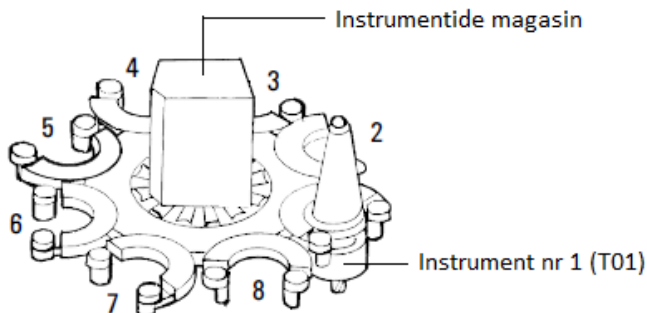
- 1) töötlemistasapinna valik;
- 2) liikumise algkoordinaadi määramine;
- 3) liikumise suuna määramine (kellaosuti liikumise suunas (CW) või vastupidi (CCW));
- 4) ringliikumise lõpp-punkti koordinaadi määramine;
- 5) ringjoone tsentri koordinaatide või raadiuse määramine.

Pingi töörežiimide etteandmine

Pingi töörežiime kirjeldatakse kahe käsuga: spindli pöörlemisajaga S (1/min) ja töölauda (*suport*) ettenihe (*feed*) käsuga F (mm/min). Näiteks $S1000 F250$, s.o pöörlemisajadus on 1000 1/min ja ettenihe 250 mm/min. Ühikuid võib muuta G-käsuga.

Instrumenti etteandmine

Lõiketööriista asukoht määratakse käsuga T, s.o näiteks T01 tähistab tööriistahoidjas (magasinis) kohal nr 1 (sele 4.84).



Sele 4.84 Tööriista kirjeldav käsk

Tööriista vahetus toimub käsuga M06, näiteks kujul:

..... T01 M06

Käskude M ja T koosinemisel liigub pink reeglina tööriista vahetuspunkti ja spindel seiskub.

T-käsu lugemisega loeb juhtsüsteem mälust automaatselt ka tööriistaga seotud korrektsiooni väärtuse (vaata mõõtude korrektsioon). Korrektsiooni iseloom määratakse ettevalmistava käsuga G.

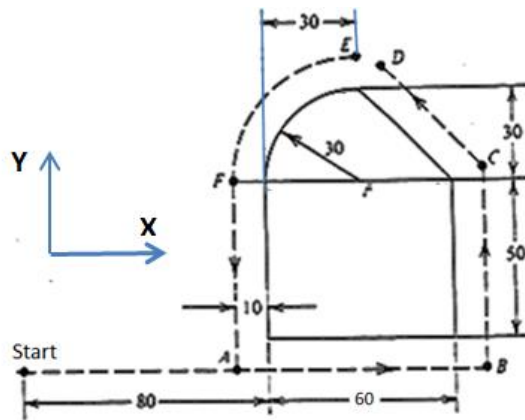
Tööpingi juhtimiskäskude kirjeldamine (abistavad ehk M-käsud)

Järgnevas tabelis on toodud peamised kasutatavad M-käsud. Konkreetset pingil kasutatavaid M-käske tuleb täpsustada.

Tabel 4.26 Abistavad funktsioonid

Funkt-sioon	Algus enne käiku	Algus peale käiku	Kehtib muut-miseni	Kehtib ühes plokis	Nimetus
M00		x		x	Programmeeritav peatus
M01		x		x	Peatus kinnitusega
M02		x		x	Programmi lõpp
M03	x		x		Spindli pöörlimine päripäeva
M04	x		x		Spindli pöörlimine vastupäeva
M05		x	x		Spindli seiskamine
M06				x	Lõikuri vahetus
M08	x		x		Jahutus sisse
M09	x		x		Jahutus välja
M10		x	x		Kinnitus rakisesse
M11	x		x		Vabastamine rakisest

Järgneval seel 4.85 on toodud näide kontuuri töötlemisprogrammi koostamiseks.



Sele 4.85 Kontuuri töötlemise programmi näide

Punktiirjoon tähistab tööriista liikumise trajektoori. Freesi läbimõõt on 20 mm, freesi ohutuskaugus töötlemispinnast Z-telje suunas on 40 mm, tööetenihe 500 mm/min, pöörlemiskiirus 1000 1/min, kiirettenihe on 2500 mm/min, töötlemisel kasutatakse jahutust.

Programmi näide:

- N100 G91 – mõõdud antakse suhtelistes koordinaatides juurdekasvudega
- N101 G01 X60 F 2500 – lineaarne interpolatsioon, liikumine kiirelt X60 mm
- N102 Z-40 S1000 M03 – spindli pöörlamine 1000 1/min sisse, lähenemine detailile
- N103 X10 F500 M08 – töötlemise algus, ettenihe 500 mm/min, jahutus sisse
- N104 X80 – töötlemine X suunas 80 mm (liikumine punktist A punkti B)
- N105 Y 64.14 – tööriista liikumine Y suunas punkti C
- N106 X-32.93 Y 32.93 – tööriista liikumine punkti D
- N107 Z0.5 – 0,5 vabalt valitud paigutus Z suunas
- N108 G03 X-7.07 Y2,93 I7.07 J 7.07 –
- N109 Z-0.5 – punktide D ja E vahel ei toimu töötlemist
- N110 X-40 Y-40 J50 F667 – raadiuse töötlemine
- N111 G01 Y-60 F500 – liikumine punkti A
- N112 X-70 Z40 F2500 M05 M09 – liikumine algpunkti, spindel ja jahutus välja
- N113 M02 – programmi lõpp

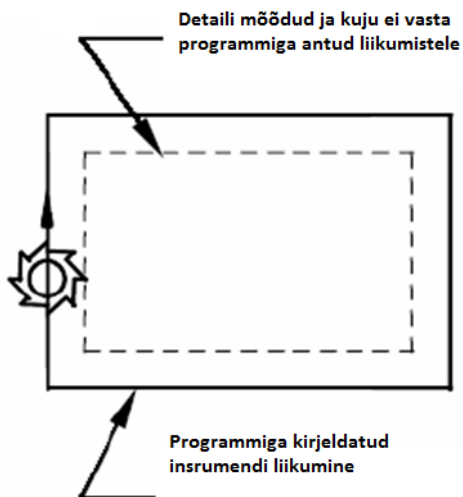
Mõõtude korrektsioon

Juhtprogramm kirjeldab lõiketööriista tsentri liikumise trajektoori ekvidistandina detaili profiilile (sele 4.86). Ekvidistandina antud trajektoori korral muutuvad tööriista mõõtude muutumisel vastavalt ka töödeldava detaili mõõdud. Reeglina koostatakse juhtprogramm sõltumatusa tööriistade mõõtudest ja tööriista mõõdud sisestatakse juhtsüsteemi eraldi pingi seadistamise käigus. Et saavutada õigeid detaili mõõtusid, tuleb vastavalt tööriista tsentri liikumise trajektoori korrigeerida (teha korrektsioon, *offset*), arvestades tööriista tegelikke mõõtusid (sele 4.88). Korrektsiooni numbrilised väärtused salvestatakse pingi seadistamisel juhtsüsteemi mälli ja neid kasutatakse programmis vahetult antud tööriista poole pöördumisel. Erinevates juhtsüsteemides on kasutusel erinevad lähenemised: võimalik on, et üks tööriist võetakse etaloniks ja teiste tööriistade puhul esitatakse kõrvalekalded etalonist. Rohkem kasutatakse varianti, kus korrektsiooni suurus määratakse kõikidele tööriistadele tööpingi fikseeritud mõõtebaasi suhtes. Üldiselt seotakse korrektsioon vastava tööriista (positsiooni) numbriga ja seda kasutatakse sõltuvalt lõiketööriista tüübist ja korrigeerimise vajadusest. Vanemates juhtsüsteemides kasutati korrektsiooni kirjeldamiseks käske H (tööriista pikkuse korrektsioon) ja D (tööriista läbimõõdu korrektsioon). Enamikul CNC-pinkidest on kasutusel vähemalt üks korrektsioon lõiketööriista kohta. Rohkema kui ühe korrektsiooni võimaldamiseks tuleb programmis siduda vastav korrektsioon tööriistaga [4.79].

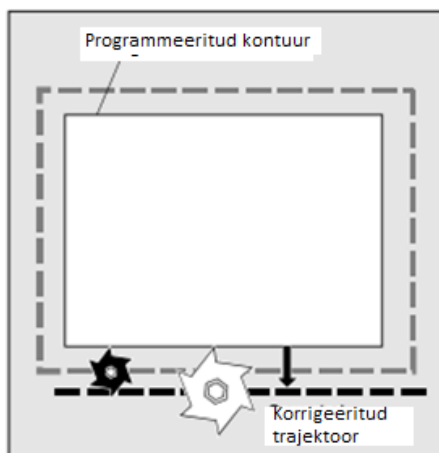
Korrektsioone kasutatakse näiteks:

- lõiketööriista pikkuse täpsustamiseks (näiteks puuri pikkus). Programm koostatakse tööriista pikkust arvestamata. Pingi seadistamisel mõõdetakse tööriista tegelik pikkus ja sisestatakse vastav korrektsioon;
- tööriista raadiuse täpsustamiseks. Näiteks kontuuri freesimisel moodustab tööriista trajektor ekvidistandi detaili kontuurile ja vajalik nihke ulatus sõltub freesi raadiusest (sele 4.87). Programm koostatakse sõltumatult tööriista raadiusest. Tegelik raadius mõõdetakse ja sisestatakse pingi seadistamisel vastava tööriista korrektsioonina. Analoogiliselt arvestatakse CNC-treipinkidel lõiketera tipu raadiuse korrektsiooni;
- CNC-pinkides, millel saab korrigeerida koordinaattelgede asendit, kasutatakse detaili paigalduse või nullpunkti korrektsiooni, see võimaldab korrigeerida detaili koordinaatsüsteemi nullpunkti asukohta. Nullpunkti korrektsioon võimaldab näiteks töödelda mitut sarnast detaili ühe paigaldusega sama programmiga.

Lõiketööriista korrektsioone võib kasutada samuti näiteks olukorras, kus sama programmiga on vajalik realiseerida erinevaid järjestikuseid läbimeid (kooriv ja siluv töötlemine), määrates erinevate läbimite mõõdud korrektsiooni abil [4.79].



Sele 4.86 Tööriista liikumise trajektoor kui ekvidistant detaili profiilile



Sele 4.87 Lõiketööriista raadiust arvestav programmi korrigeerimine

Lõiketööriista mõõdu korrigeerimise kasutamise peamised eelised on:

- 1) lihtsustub oluliselt trajektoori arvutus;
- 2) programmeeritakse detaili kontuur, mitte tööriista tsentri liikumine, seetõttu saab sama programmi kasutada erinevate tööriistade mõõtude puhul;
- 3) sama programmi saab kasutada nii kooriva kui ka siluva töötlemise tarvis.

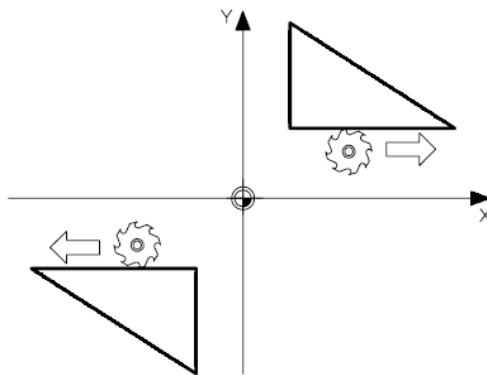
Programmeerimise täiendavad võimalused

Töötlemisel kasutatakse sageli programmi korduvaid osasid. Taoliste korduste programmeerimiseks on kasutusel **alamprogrammid ja makrod** [4.79, 4.80]. Alamprogrammid salvestatakse tavaliselt eraldi juhtsüsteemi mällu ja neid saab kutsuda põhiprogrammist, omistades eelnevalt parameetritele vajalikud väärtused. Parameetriline programmeerimine, kasutades makrosid, on juhtprogrammi koostamise meetod, mis võimaldab kasutada programmis muutujaid ning programmi lähteteksti osasid kopeerides ja parameetritele väärtusi omistades moodustada lõplik töötlemisprogramm. Makrode koostamisel on soovitatav kasutada suhtelist trajektoori esitamise moodust. Makrod on juhtsüsteemis salvestatud tavaliselt spetsiaalsesse makrode faili. Makrosid ja alamprogramme on otstarbekas kasutada sarnaste detailide pere (tootepere) töötlemise programmeerimisel, muutes programme ainult parameetrite muutmisega.

Fikseeritud G-tsüklid. Fikseeritud tsükleid kasutatakse programmeerimise lihtsustamiseks sagedasti esinevate töötlemisoperatsioonide programmeerimisel (nt avade mustri töötlemine, keermete töötlemine jms) ja neid kutsutakse välja G-käskudega (G81–G89). Ülevaate traditsioonilistest tsüklistest ja nende kasutamisest võib leida [4.3].

Mõned CNC-juhtsüsteemid võimaldavad kasutada programmiosade korduvaks kasutamiseks programmi **tsükleid**, mis võimaldavad korrata teatud programmi osasid etteantud arv kordi [4.80, 4.81].

Mõõtude poolest identsete, kuid geomeetriselt vastandlike (pööratud) detailide (või nende osade) töötlemise programmeerimiseks on kasutusel **kuju peegeldamise funktsioon** [4.79] (sele 4.88).



Sele 4.88 Kuju peegeldamise näide (X- ja Y-telje suhtes)

4.10.3 Mõõtmistsükliid CNC-pingis

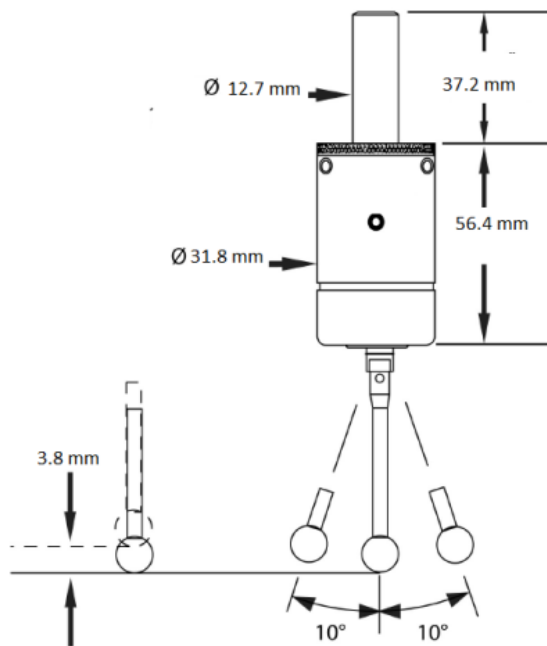
Otstarbekas CNC-seadmete kasutamine eeldab süsteemset lähenemist kontrollmõõtmiste süsteemi realiseerimisele.

Töötlemistäpsuse tagamiseks võib eristada järgmisi kontrollmõõtmiste süsteemi tasandeid:

- 1) töötlemiseelsed kontrollmõõtmised, peamiselt tehnoloogilise süsteemi (pink-rakis-tööriist-detail) eelnevaks seadistamiseks (vt ptk 11.1 „Töötamise seadistusaja lühendamine“);
- 2) kontrollmõõtmine töötlemise käigus, aktiivne kontroll ja monitooring ning protsessi korrigimine;
- 3) töötlemisjärgne kontrollmõõtmine, kasutades näiteks koordinaatmõõtemasinaid (CMM) ja teisi mõõteseadmeid.

CNC-seadmete programmeerimisega on põhiliselt seotud kontrollmõõtmised töötlemise käigus.

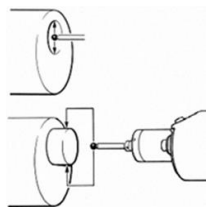
Standardprogrammid CNC-pinkide juhtsüsteemides võimaldavad töötlemisprotsessile lisada erinevaid mõõtmistsükkeid detaili ja/või tööriista mõõtude kontrolliks, sh ka tooriku asendi määramiseks. Mõõtmiseks on kasutusel puutega (sele 4.89) ja lasermõõtepead [4.79].



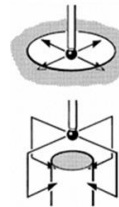
Sele 4.89 Näide puutega mõõtepeast töötlemistsentritele

Näiteks firma Renishaw [<https://www.renishaw.com/en/machine-tool-probes-and-software—6073>] pakub lahendusi lõiketööriistade mõõtmiseks tööpingi seadistamisel, töödeldud pindade täpsuse kontrolliks, sh tööpingi elastsete ja temperatuurist põhjustatud deformatsioonide mõõtmiseks, lõiketööriista ülemäärase kulumise või purunemise määramiseks, detaili baseerimise täpsustamiseks jm. CNC-pinkidel väheneb mõõtetüklite kasutamisel aeg seadistamisele kuni 90% ja töötlemise täpsus paraneb oluliselt.

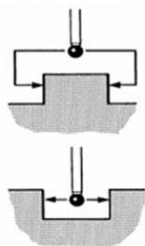
Järgmisel seel (sele 4.90 a–f) on toodud mõned mõõteskeemide näited mõõtmiseks CNC-pinkidel.



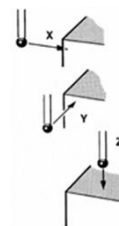
a) Diameetri mõõtmine treipingis kahes punktis



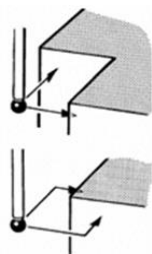
b) Diameetri mõõtmine töötlemistsentris



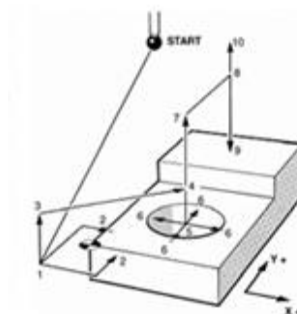
c) Astme ja tasku mõõtmine töötlemistsentris



d) Mõõtmised ühe koordinaattelje suunas



e) Nurga mõõtmised

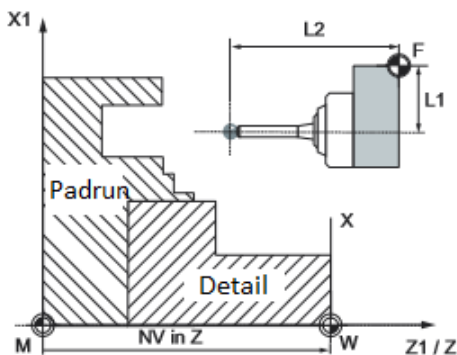


f) Mõõtepea liikumise trajektoori näide

Sele 4.90. a–f Mõõteskeemide näited mõõtmiseks CNC-pingis [<https://www.renishaw.com/en/machine-tool-probes-and-software>]

Mõõtmise lihtsustamiseks võimaldavad erinevad CNC-pingid kasutada standardmõõtmistsükleid. Nii näiteks on CNC-juhtsüsteemil Sinumerik 840D selleks kasutusel eraldi tsükliid lõiketööriista ja detaili mõõtmise (asendi) määramiseks [Sinumerik 840D Measuring cycles. Programming manual, <http://www.siemens.com/sinumerik>]. Süsteem korrigeerib automaatselt tööriista mõõtmiseid mõõtmistulemuste alusel.

Tööriista mõõdetakse tavaliselt pingi koordinaatsüsteemis (sele 4.91), detaili aga detaili koordinaatsüsteemis. Mõõtmisele peab eelnema mõõtepea kalibreerimine etaloniga, mille mõõdud on teada. Kalibreerimisel määratakse ja salvestatakse mõõtepea lülitatavad punktid, nagu maksimaalne ja minimaalne piirmõõt jt. Kalibreerimiseks kasutatakse spetsiaalseid tsükleid.



Sele 4.91 Koordinaatsüsteemid mõõtmisel treipingis, kus M, W ja F on vastavalt pingi, detaili ja mõõtepea nullpunkt. Kalibreerimise etalonina kasutatakse padrunis töödeldud soont

Järgnevalt näiteks mõned süsteemi Sinumerik mõõtmistsükliid:

- tsükkel CYCLE971: freesi pikkuse ja raadiuse mõõtmiseks (korrigeerimiseks);
- tsükkel CYCLE976: detaili silindrilise ava või tasapinna mõõtmise kalibreerimiseks etteantud telje suunas;
- tsükkel CYCLE977: koordinaatteljega paralleelse silindrilise ava, võlli, soone, astme või nurga mõõtmiseks (vaata mõõteskeemid sele 4.10.16 b, c ja e);
- tsükkel CYCLE 979: kolme või nelja punktiga mõõteskeem silindrilise ava, võlli, soone, astme või nurga mõõtmiseks;
- tsükkel CYCLE998 võimaldab täpsustada tooriku asendit, määraates pinna nurga asendi koordinaattelgedes suhtes;
- tsükkel CYCLE961: detaili pinna nurga asendi määramine detaili nullpunkti korrigeerimiseks.

Juhtsüsteem väljastab tavaliselt mõõtmise raporti. Erinevatel juhtsüsteemidel võivad esineda erinevad tsükliid ja enne nende kasutamist tuleb põhjalikult tutvuda juhtsüsteemiga.

4.10.4 Interaktiivse programmeerimise näited toimetamise režiimis. Tehnoloogilised tsüklid

Töötlemistsükleid võib kirjeldada erinevate G-koodidega. Käsiraamatus [4.3] on toodud töötlemistsüklite näited erinevate G-koodide kasutamisest trei-ja freespinkidel. Tänapäeva CNC-pinkidel saab juhtpuldilt juhtprogrammi operatiivselt sisestada ning kuvada programm juhtsüsteemi ekraanile, simuleerida programmi tegevusi graafiliselt, seda plokikaupa realiseerides, ja korrigeerida programmi. Nüüdisaegsed CNC-süsteemid võimaldavad programmeerimise lihtsustamiseks kasutada erinevaid interaktiivseid töötlemistsükleid, mis on eelnevalt ettevalmistatud tüüpiliste töötlemisoperatsioonide tarvis loodud.

Tavaliselt kasutatakse tsükleid enamlevinud puurimise, treimise ja freesimise operatsioonide, nagu erinevate avade mustrite, keermete, taskute jms freesimise jt tüüpiliste töötlemissituatsioonide kirjeldamiseks. Tsükliite kasutamine vähendab oluliselt programmi ettevalmistamisaega. Erinevad CNC-juhtsüsteemide tarnijad on eelnevalt sisestanud juhtsüsteemi märkimisväärse koguse tsükleid, mis katavad enamuse kasutatavatest töötlemise ja mõõtmise situatsioonidest. Nüüdisaegsed juhtsüsteemid võimaldavad vahetult (interaktiivselt) toetada tsükliit iseloomustavate parameetrite sisestamist ja graafiliselt simuleerida programmiga seotud tegevusi juhtsüsteemi arvutil, vähendades sellega oluliselt võimalike vigade arvu.

Enne tsükliite kasutamist tuleb programmis määrata töötlemise tasapind (käsud: G17, G18, G19), kus tsükkel toimib.

Näitena tsükli 100 (CYCLE 100) pöördumine.

Olgu tsükli parameetriteks:

FORM char: määrab töötlemise iseloomu, väärtused E ja F

MID real: töötlemissügavus

FFR real: ettenihe

VARI integer: töötlemisviis, väärtused: 0, 1 või 2

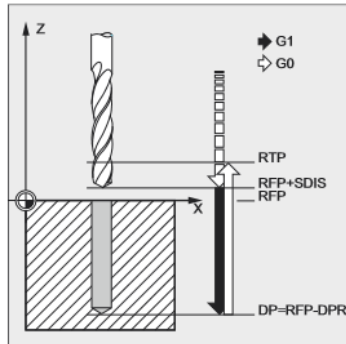
FAL real: töötlemisvaru siluvale töötlemisele.

Tsükli poole pöördumine toimub kujul Cycle100 (FORM, MID, FFR, VARI, FAL) ehk reaalsete parameetrite väärtustega:

CYCLE100 ("E". 5,0.1,1,0).

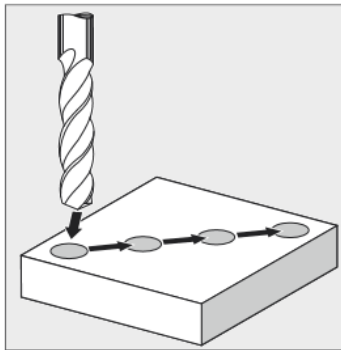
Järgnevalt on toodud mõned näited töötlemistsüklitest süsteemile Sinumerik [SINUMERIK Programming Guide. Programming Manual, Release 11/2006]].

Puurimistsükliid (*drilling, centering*) – CYCLE81

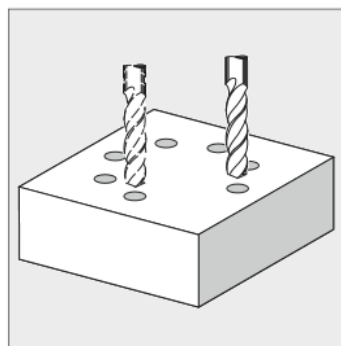


Sele 4.92 Puurimistsükkel, parameetrid määravad Z-sihis peamised positsioonid

Avade mustrite puurimine

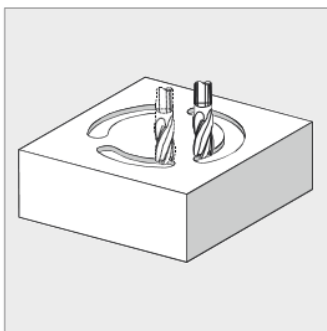


Sele 4.93 Lineaarne avade mustri puurimine, tsükkel HOLES1

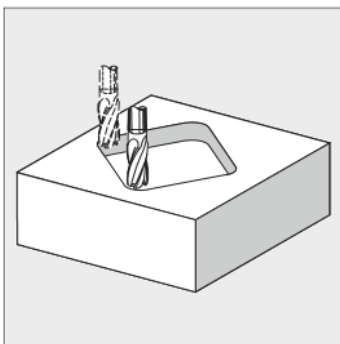


Sele 4.94 Avade muster ringil, tsükkel HOLES2

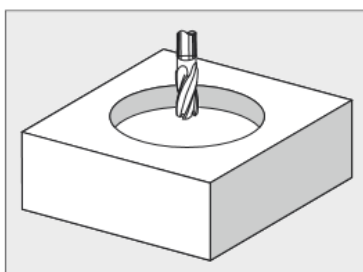
Freesimistsükliid



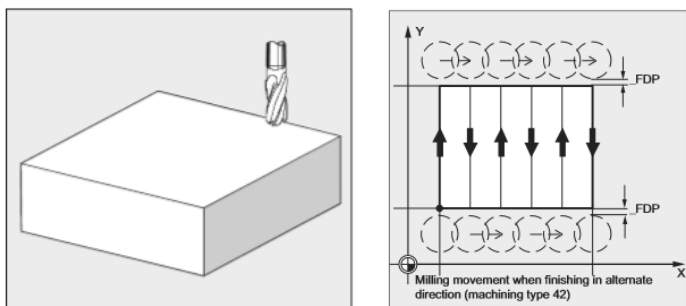
Sele 4.95 Ringikujulise soone freesimine, tsükkel SLOT2



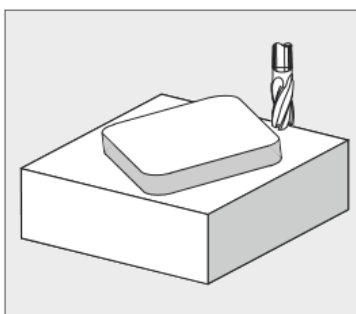
Sele 4.96 Täisnurkse süvendi freesimine, tsükkel POCKET1



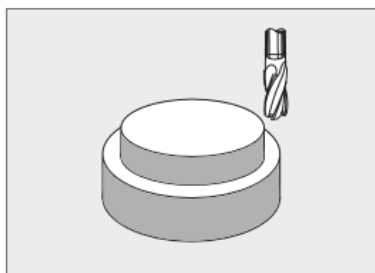
Sele 4.97 Silindrilise süvendi freesimine, tsükkel POCKET2



Sele 4.98 Täisnurkse tasapinna freesimine, tsükkel CYCLE71

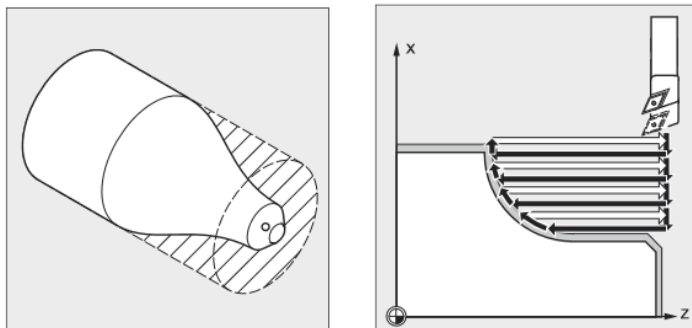


Sele 4.99 Täisnurkse astme freesimine, tsükkel CYCLE76

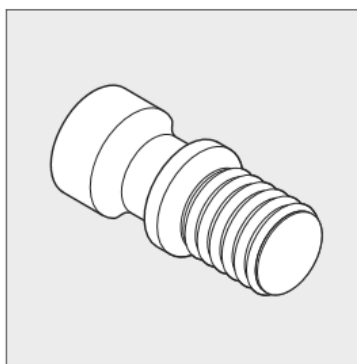


Sele 4.100 Ringikujulise astme freesimine, tsükkel CYCLE77

Treimise tsüklid



Sele 4.101 Tooriku materjali eemaldamine treimisega, tsükkel CYCLE95



Sele 4.102 Keerme lõikamise tsükkel CYCLE97

Keeruka detaili töötlemine koosneb järjestikku rakendatud tsüklite kasutamisest. Tsüklite kasutamine areneb üha keerukamate töötlemisjuhtumite programmeerimise suunas, kujudpindade töötlemine, multifunktsionaalsete töötlemiskeskuste (näiteks trei-frees CNC-pinkide) kasutamine erinevate hammasrataste näiteks töötlemiseks jm. Tsüklite kirjeldus sisaldab kogu töötlemise semantikat, määrates täpselt mida ja kuidas teha, seetõttu on tsüklite kasutamine üheks arengusuunaks ka rahvusvahelise standardi STEP NC (vaata pkt 9.5.1) arendamisel.

4.11 Robotiseerimise kasutusnäide: keevitusrobot

Tööstusrobotite ülesehitus ja paindlikkus võimaldab nende kasutamist erinevate tootmisprotsesside või -operatsioonide automatiseerimisel. Järjest arenevad programmeerimismeetodid (*online*, *offline*, puldiga) lihtsustavad robotite kasutuselevõttu ka väikese ja keskmise suurusga tootmise tingimustes.

Tööstusrobotit ei ole võimalik käsitleda tootmise seisukohalt eraldiseisva seadmena, sest ilma seda teenindavate või abistavate seadmeteta võib roboti kasutegur ja tööviljakus jääda madalaks. Robotit tuleb vaadelda robotkompleksi või süsteemi ühe osana, mis töötab koos kõikide teiste kompleksi kuuluvate seadmetega. Selline lahendus ja lähenemine tagavad tööstusroboti parema tööviljakuse ja kõrgema kasuteguri.

Tööstusroboti olemuse defineerimisel kasutatakse mitmeid lähenemisi, kuid seadme peamised omadused, nagu ümberprogrammeeritavus, mitmeteljeline konstruktsioon ja automaatsuhtimise olemasolu, avavad seda kõige paremini. Lähtudes antud jaotusest, tuleb robotit käsitleda kui tavalist CNC-seadet. Robot toimib seejuures kui protsessiseade, protsess sõltub töövahendist, mis on robotile külge monteeritud.

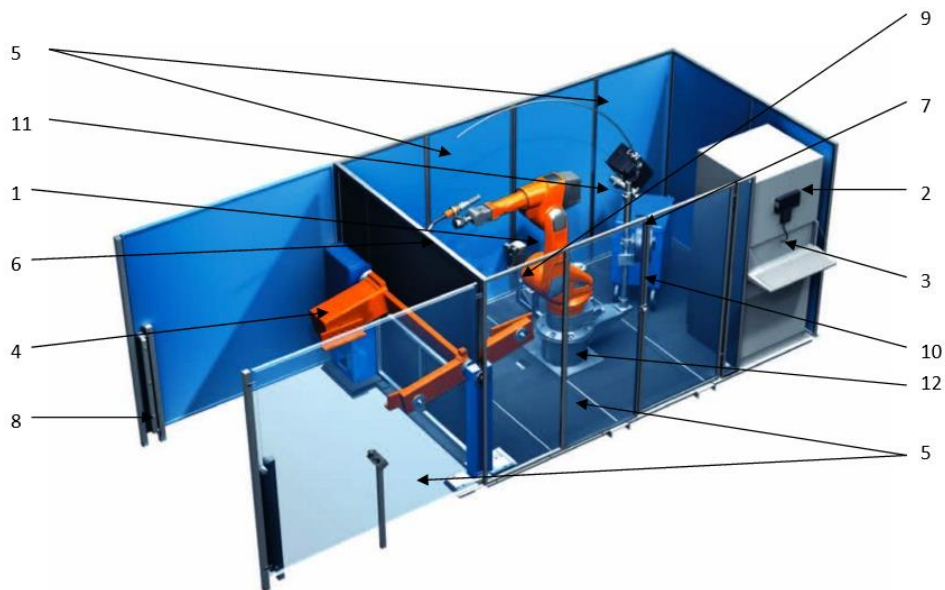
Kuna sobiliku robotsüsteemi komponentide valik ja juurutamine on küllaltki keerukas ülesanne, on allpool toodud robotkeevituse kompleksi kuuluvate komponentide iseloomustus ja nimetused.

Robotsüsteem või robotkompleks koosneb manipulaatorist, juhtseadmest, tööriistast ning tööalusest või -kassetist. Tavaliselt on roboti juhtsüsteem laiendatav ning võimeline juhtima korraga mitut manipulaatorit või mõnda täiendavat elektrijamit ning töötama koos teiste kontrolleri poolt juhitud seadmetega, milleks võivad olla arvjuhtimisega tööpingid. Andmevahetus seadmete vahel toimub tavaliselt tööstusliku andmevahetuse (*DeviceNet*, *TCP/IP*, *Profibus* jm) protokollide kaudu.

Robotkeevituse kompleksi kuuluvad lisaks manipulaatorile, tööriistale ja tööalusele ka lisa-seadmed, mis tulenevad teostatavast protsessist. Robotkeevituse kompleksis peab olema keevitusvoolu allikas ja traadi etteandeseade, mis ühildub roboti juhtseadmega, keevituspüstitoli puhastusseade ning ohutusseadmed, valguskardinad, piirded jms.

Robotsüsteemi (vt sele 4.103) tööaluseks on robotkeevituse lahenduste puhul positsioneer, mille tööosa külge kinnitatakse rakise kaasabil keevitatav toode. Robotkeevituse süsteemides ei ole laialdast rakendust leidnud karussell-tüüpi teenindamine.

Väga suur osa tööstusroboteid on kasutusel peamiselt masstootmises. Ülesanded, mida antud robotid peavad täitma, on enamasti korduvad ning ei muutu pika aja jooksul. Kriteerium, mida nende robotite kasutuselevõtul hinnatakse, on tsükliärg ning selle lühendamine. Võttes aga roboti kasutusele väike- ja keskmise suurusega seeriatootmises, muutuvad ka kriteeriumid, mida robotitele esitatakse. Kuna toodetavad seeriad on väikesed, siis on kiire seadistamise võimalus ja üleminek uutele toodetele ja protsessidele palju tähtsam kui ainult lühikesed tsükliajad.



Sele 4.103 Robotkeevituse kompleks (1 – tööstusrobot; 2 – juhtseade; 3 – õpetamispult; 4 – positsioneer; 5 – ohutuspiirded (läbipaistvad ja läbipaistmatud seinad); 6 – täitur või tööriist (antud juhul keevituspüstol); 7 – keevitusseade; 8 – ohutuspiire (valguskardin); 9 – keevituspüstoli puhastusseade; 10 – keevitustradi rull; 11 – traadi etteandemehhanism; 12 – baas)

Programmeeritavad robotid ja manipulaatorid on pea ideaalseks lahenduseks väikesaritootmise puhul erinevate toodete käsitlemiseks. VKE-dele on tähtis toota kuluefektiivselt kliendipõhiseid tooteid. Säilitamiseks kasumlikkust maailmaturul on tekkinud vajadus robotite järele, mis suudavad abistada inimesi tööprotsessis.

Tänapäevaste robotite juures on tähtis nende lihtne ja kiire programmeerimisvõimalus, mis ei eelda operaatorilt sügavaid teadmisi ei kommunikatsiooni ega ka protsessi vallas. Seetõttu on roboti protsessipõhine programmeerimine saanud viimasel kümnendil üheks oluliseks teemaks. Taoline lähenemine võimaldab roboteid kiiremini ja paindlikumalt tootmisprotsessi lülitada.

Nüüdisaegsed robotikeeled ja programmeerimisvõimalused võimaldavad läheneda robotiseeritud tootmisele protsessipõhiselt (mitte enam käsupõhiselt), mis lühendab nii robotite kasutuselevõttu kui ka lihtsustab roboti operaatori ja programmeerija tööd. Kasutusele võetud andurisüsteemid võimaldavad juhtida roboti tööd paindlikumalt (kujundituvastus, keevitusparameetrid, jõud) ning lihtsamalt programmeerida robotil tootmisprotsessi või -operatsiooni.

Robotsüsteemi juurutamise sammud (projekti etapid)

Selleks, et võtta robotkeevituse lahendus kasutusele VKE tingimustes, on oluline järgida kõiki olulisi juurutusetappe. Nendest mõne vahele jätmine võib osutada saatuslikuks projekti edukusele. Peamiste etappidena on toodud välja järgmised sammud:

- 1) toodete kaardistamine;
- 2) sobilike toodete valik robotkompleksis valmistamiseks;
- 3) robotkompleksi komponentide valik (erinevate lahenduste väljatöötamine);
- 4) rakise algse kontseptsiooni loomine;
- 5) robotkompleksi, rakise ja toote simuleerimine 3D-keskkonnas;
- 6) Kompleksi komponentide lõplik valik (baseerudes toodetel, tehnoloogial, rakistusel, laiendamisvajadustel) ja nende tellimine;
- 7) rakistuse ja muude tootmiseks vajalike sõlmede konstrueerimine;
- 8) robotkompleksi vastuvõtmine tarnijalt ja selle funktsionaalsuse kontroll;
- 9) kompleksi paigaldamine (pidades silmas tootmise vajadusi ja toodete liikumist tootmises);
- 10) kompleksi häälestamine (kalibreerimine, hooldusprogrammide loomine);
- 11) protsessikatsed, protsessi parameetrite leidmine ja juurutamine;
- 12) kasutajate koolitamine;
- 13) toodete juurutamine etappidena (sõltuvalt toodete arvust);
- 14) seadmepargi täiendamine, hooldamine, peenhäälestus, programmide korrigeerimine.

Sammud 1–5 on seotud otseselt inseneritööga, mis sisaldab ettevõtte tooteportfelli analüüsi, sobilike toodete valikut. Seejärel on võimalik virtuaalses roboti töökeskkonnas nende toodete valmistusaega simuleerida, hinnates nii ligipäasetavust kui ka sobilikke tööasendeid. Selles etapis saadakse info robotsüsteemi sobilikkuse kohta antud toote valmistamisel ning samuti kuluartiklid, et teha majanduslikke arvutusi. Juhul, kui antud sammud näitavad, et robotkompleksi soetamine on õigustatud, siis liigutakse edasi sammudega 6–10.

Sammud 11–14 – selle etapi kirjeldus ja vajadus.

Robotite programmeerimise võimalused

Tööstusrobotite programmeerimisel on kasutusel 3 peamist viisi:

- *online* programmeerimine;
- *offline* programmeerimine;
- õpetamispuldiga programmeerimine.

Teatud tüüpi robotite puhul (just inimesega koostöös toimivad robotid) on võimalus kasutada ka õpetamise teel programmeerimist.

Offline programmeerimine võimaldab roboti programmeerimist, kasutades vastavat tarkvara. Tavaliselt on vaja valmistatava toote ning rakise 3D-mudelit, mis omakorda laetakse virtuaalsesse roboti töökeskkonda. See on programmeerimise meetod, kus programm luuakse arvutis virtuaalses keskkonnas ning laetakse hiljem roboti kontrollerrisse. Antud lahenduse eelis on, et robotit saab samal ajal kasutada tootmisprotsessis.

Toote 3D-mudeli põhjal luuakse omakorda roboti liikumise trajektoor, mis sõltub protsessist (keevitus, värvimine, mehaaniline töötlemine). Valminud roboti programmi on võimalik simuleerida, et testida selle sobilikkust reaalsele süsteemile.

Pärast simulatsiooni ja kontrolli laetakse programm roboti kontrollerrisse ning vajadusel korrigeeritakse.

Online programmeerimine on roboti programmeerimise vahend ajal, mil robot töötab või teostab ülesandeid. See muutub tähtsaks tootmis- ja koostamisliinidega tootmisprotsessis, et hoida tootlikkus kõrge ka sellel ajal, kui robotit programmeeritakse mingit teist ülesannet tegema.

Õpetamispuldiga õpetamine on roboti ja/või manipulaatorsüsteemi tööpunktide asukohtade ja orientatsiooni salvestamisel kasutatav meetod. Robotit liigutatakse käsitsi ning teekond salvestatakse õpetamispuldiga, alustades algasukohast läbi soovitud punktide lõppasukohani.

Robotsüsteemide juurutamisel kasutatakse erinevaid tarkvarasid.

Üldine tarkvara, mis toetab mitmete robotitootjate roboteid:

- RoboMaster (toetab paljude robotite tootjate mudeleid);
- FAMOS robotic (toetab paljude robotite tootjate mudeleid);
- CimStation Robotics (toetab paljude robotite tootjate mudeleid);
- Workspace Robot Simulation;
- Delmia Robotics (Dassault Systems);
- RobCAD (Siemens Tecnomatix);
- Delfoi Robotics.

Robotitootja spetsiifilised tarkvarad (sisse viited):

- Roboguide (Fanuc);
- RobotStudio (ABB);
- MotoSIM EG (Yaskawa).

Selleks, et üles ehitada sobilik robotkompleks, on vaja kaardistada ettevõtte vajadused ning tooted ja selle põhjal otsustada komponentide valiku üle. Peamised robotkompleksi komponendid on:

- robot (6- või 7-teljeline manipulaator) tehnoloogilise protsessi teostamiseks;
- positsioneerija (ühe- või mitmeteljeline manipulaator) toodete positsioneerimiseks;
- rakistus (tootespetsiifiline, universaalne) toote ja positsioneerija omavaheliseks sidumiseks;
- protsessiseadmed (näiteks keevitusseadmed: põleti, traadi etteandeseade, keevitusseade);
- turvaseadmed (aiad, väravad, valguskardinad jms) inimeste turvalisuse tagamiseks;
- toodete etteandeseadmed (lisana).

Komponentide valik on seotud järgmiste parameetritega:

- toode (mass, gabariitmõõtmed, tootmiskogus);
- tootmistehnoloogia (tükiaeg, tehnoloogilised parameetrid);
- rakistus (mass, gabariitmõõtmed).

Näiteks robotkeevituskompleksi komponentide valikul on oluline teada toote ja rakise massi ning gabariitmõõtmeid sobiliku roboti ja positsioneerija valikuks, et tagada piisav ligipääsetavus. Keevitusparameetrid (voolutugevus, keevituspikkus, tootmiskogus) annavad aluse keevitusseadmestiku valikuks. Samuti on tootmiskoguse ja keevitusaja suhe vajalik, et hinnata toote sobilikkust robotkeevituskompleksis keevitamiseks.

Sobiliku toote valimine

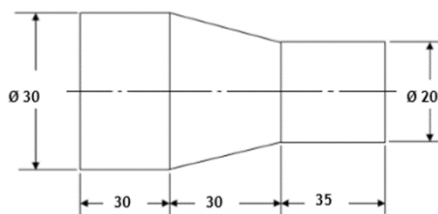
Toodete analüüs robotkeevituse sobivuse hindamiseks on võimalik sooritada meetodiga, grupeerides tooted keevitusaja ja tootmismahu järgi. Kogemustele põhinevalt jaotatakse tooted järgmiselt:

- 1) suure tootmismahuga ja väikese keevitusajaga tooted (keevitusaeg 20 sek – 5 min);
- 2) keskmise tootmismahuga ja keskmise keevitusajaga tooted (keevitusaeg 5–30 min);
- 3) väikese tootmismahuga ja suure keevitusajaga tooted (keevitusaeg 30–90 min).

Kordamisküsimused ja ülesanded

1. Iseloomustage peamisi tunnuseid, mis määravad CNC-tööpinkide kasutamise otstarbekuse.
 - 1.1 Millised töödeldava detaili kuju omadused suurendavad CNC-pinkide kasutamise otstarbekust (milliseid detaile on otstarbekas töödelda CNC-pinkidel)? Põhjendage valikuid.
 - 1.2 Kirjeldage põhilisi NC-pinkide arengutrende.
 - 1.3 Milliseid tootmist ettevalmistavaid tegevusi on otstarbekas kasutada CNC-pinkide kasutamise otstarbekuse tõstmiseks?
 - 1.4 Kirjeldage CNC-pinkide konstruktiivseid-tehnoloogilisi lahendusi, mis suurendavad nende pinkide kasutamise otstarbekust.
2. Kirjeldage kontrollmõõtmisüsteemi võimalikke realisatsioone töötlemiseks CNC-pinkidel nõutava täpsuse tagamiseks.
3. Hinnake mõõtepeade kasutamise vajadust ning otstarbekust CNC-pinkides.
4. Millistes töötlemistingimustes on otstarbekas kasutada interaktiivset programmeerimist toimetamise režiimis?
5. Koostage töötlemist iseloomustav skeem järgmisele programmi näitele

N10 G00 X60 Z2	liikumine ohutuskaugusesse
N11 G01 Z-40	silindrilise pinna töötlemine
N12 G02 X100 Z-60 I20 K0	ringi kaare töötlemine
N13 G01 X110	liikumine ohutuskaugusesse
6. Joonesta tööriista liikumise trajektoor vastavalt toodud programmi näitele.



Sele 1 a Treitav detail

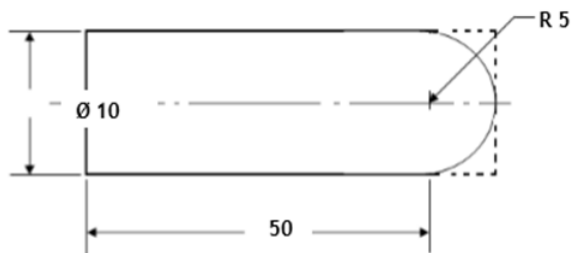
Näide 1

N01 G54 M03 S800
N05 G01 X-15 Z0 F2
N010 G00 Z1
N15 G00 X10
N20 G01 Z-36
N25 G01 X5 Z-30
N30 G00 X1 Z66
N35 M02

parameetrite määramine
töötlemise algpunkt
tööriista eraldumine
tööriista eraldumine(töövahet) tsentrist
astme treimine
koonuse treimine
tööriista lõppasend
trogrammi lõpp

Sele 1 b Treimise programmi näide

7. Joonesta tööriista liikumise trajektoori vastavalt toodud programmi näitele.



Sele 2 a Freesitav kontuur

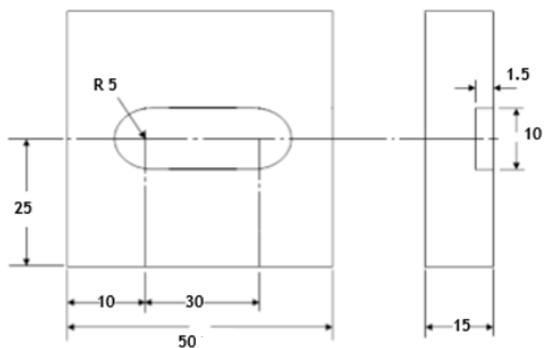
Näide 2

N01 G91 M03 S800
N05 G01 X-5 Z0 F1
N10 G02 X5 Z-5 I0 K5
N15 G00 X6 Z6
N20 M02

parameetrite määramine
töötlemise algpunkt
ringi töötlemine
tööriista lõppasend
programmi lõpp

Sele 2 b Programmi näide

8. Joonesta tööriista liikumise trajektoor vastavalt toodud programmi näitele.



Sele 3 a Freesitav liistusoon

Näide 3

N001 G17 G90 G54

parameetrite määramine, absoluutsed koordinaadid

N002 T2 L90

tööriist T02 ja alpositsioon (alamprogramm)

N003 G00 D2 Z50 M03 S700 X10 Y-25

töötlemise algasend

N004 G01 Z-1,5

sisselõige

N005 G01 X40 F100 M08

liistusoone freesimine

N006 G00 Z50 M09

löikest välja

N007 M02

programmi lõpetamine

Sele 3 b Programmi fragment

Viited

- [4.1] Groover, M. P. (2014). Automation. Production Systems and Computer Integrated Manufacturing. Prentice Hall Third Edition, 800 lk.
- [4.2] Lesko, J. (2008). Industrial Design. Materials and Manufacturing Guide. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 250 p.
- [4.3] Kulu, P. (toim.). Mehaanikainseneri käsiraamat. TTÜ kirjastus, Tallinn, 2012. (Mechanical and Metal Trades Handbook). 491 lk.
- [4.4] Pettai, E. (2005). Tootmise automatiseerimine. TTÜ elektrienergia ja jõuelektronika instituut. Tallinn. 336 lk.
- [4.5] Groover, M. P. (2010). Principles of Modern Manufacturing. Materials, Processes and Systems, Wiley, 1024 p.
- [4.6] Tolio, T. (2009). Design of Flexible Production Systems – Methodologies and Tools. Berlin. Springer Verlag.
- [4.7] Rembold, U., Nnaji, B. O., Storr, A. (1993). Computer Integrated Manufacturing and Engineering. Addison-Wesley. 664 p.
- [4.8] Kalpakjian, S. Schmid, S. (2006). Manufacturing engineering and technology. 5-th Ed. Prentice Hall. 1192 p.
- [4.9] Coltti, P.; Dichner, T. (2011). Mass Customization. An Exploration of European Characteristics. Heidelberg. Springer. X, 100 p.
- [4.10] Jovana, F., Westkämper, E., Williams, D. (2009). The Manufacture Road. Towards Competitive and Sustainable High-Adding-Value Manufacturing. Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg. 261 p.
- [4.11] Riives, J. Production Engineering. Web CT e.kursuse materjalid [WWW] <https://webct.e-uni.ee> (18.08.2011)
- [4.12] CNC töötlemine [WWW] www.sharno.com (24.04.2014)
- [4.13] CNC töötlemine [WWW] www.industrialmachines.com (24.04.2014)
- [4.14] Lehtmaterjalide töötlemine [WWW] <http://isearch.org.com/videos?> (24.04.2014)
- [4.15] Paintootmissüsteem [WWW] https://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_Manufacturing_System (03.08.2015)
- [4.16] Flexible manufacturing systems [WWW] http://www.nuigalway.ie/staff-sites/david_osullivan/dokuments/unit_15_flexible_manufacturing_systems.pdf
- [4.17] Luggan, W. W. (1991) Flexible Manufacturing Cells and Systems. Pearson College Div. 512 p.
- [4.18] Mechanical engineering [WWW] <https://mitocw.ups.edu.ec/courses/mechanical-engineering/> (01.12.2022)
- [4.19] Riives, J., Lõun, K., Otto, T. Framework for Extended Use of Technological Resources in the Network of Enterprises. 7-th International DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering, Tallinn. 2010.
- [4.20] Theory of constraints [WWW] https://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_constraints (02.12.2022)

- [4.21] Henriksen, E. K. (1973). Jig and Fixture Design Manual. New York, N.Y. Industrial Press Inc. 312 p.
- [4.22] Jig and Fixture Handbook [WWW] <https://www.coursehero.com/file/41374013/JIG-AND-FIXTURE-HANDBOOKpdf/>
- [4.23] Rakiste konstrueerimine detailide 3D jooniste alusel. Rapid creation of welding fixtures directly from 3D CAD. [WWW] www.camtek-software.com (24.04.2014)
- [4.24] Shigeo, S. (1985). A Revolution in Manufacturing: The SMED System. Routledge. 384 p.
- [4.25] Goldratt, E. M. (1999). Theory of Constraints. North River Press. 160 p.
- [4.26] Kief, H. B., Roschhiwal, H. A. (2007). NC/CNC Handbuch 2007/2008. Hanser, München, Leseprobe (<http://files.hanser.de/hanser/docs>) (24.04.2014)
- [4.27] Eversheim, W. (1981) Organisation in der Produktionstechnik Band 4. Fertigung und Montage. VDI-Verlag GmbH. VIII, 336 s.
- [4.28] Tööriistade eelhäälestamine [WWW] <http://us.bigkaiser.com/products/tool-presetters> (24.04.2014)
- [4.29] Tööriistade eelhäälestamine [WWW] <http://www.productionmachining.com/articles/reducing-downtime-with-tool-presetting> (24.04.2014)
- [4.30] Materjalide käsitus ettevõttes [WWW] www.graco.com/us/en/products (24.04.2014)
- [6.31] Tootmis automatiseerimise lahenduste tootja [WWW] www.factoryautomation.com (24.04.2014)
- [4.32] Tootmise automatiseerimise süsteemide tootja kodulehekülj [WWW] www.fastems.com (24.04.2014)
- [4.33] Tööpingi puhvrid [WWW] <http://specialityequipment.com> (24.04.2014)
- [4.34] Laosüsteemide tootja [WWW] www.warehouseequipment.com (24.04.2014)
- [4.35] Automatiseeritud transpordisõidukid [WWW] https://en.wikipedia.org/wiki/Automated_guided_vehicle (24.04.2014)
- [4.36] Oakland, J., (2002). Statistical Process Control. Butterworth-Heinemann. 445 p.
- [4.37] Salacinski, T. (2015). SPC – Statistical Process Control. The Warsaw University of Technology Publishing House. 156 p.
- [4.38] Kvaliteedikontrollikaartid [WWW] <http://documents.software.dell.com/statistics/Textbook/Quality-Control-Charts> (24.04.2014)
- [4.39] Koordinaat-mõõtemasinate kataloog [WWW] www.catalog.mitutoyo.com/coordinate-measuring-machines-c101.aspx (24.04.2014)
- [4.40] Koordinaat-mõõtemasinaid. Coordinate-measuring machine-topic-YouTube www.youtube.com/channel/UCucb01X9K7nY7Pn9BYgi-6w [WWW] (24.04.2014)
- [4.41] Koordinaat-mõõtemasinate ajalugu www.coord3-cmm.com/50-years-of-coordinate-measuring-machine-industry-developments-and-history [WWW] (24.04.2014)
- [4.42] 3D Koordinaat-mõõtemasinate tootjad

- www.directindustry.com/industrial-manufacturer/3d-measuring-machine-81145.html
(24.04.2014)
- [4.43] Koordinaat-mõõtemasinate kataloog [WWW] <http://us.bigkaiser.com/products/tool-presetters> (24.04.2014)
- [4.44] Flexible manufacturing systems [WWW] www.uky.edu/dsianita/611/fms.html (24.04.2014)
- [4.45] Painttootmissüsteemid (FMS) [WWW] me.emu.edu.tr/majid/ENG447/FMS.pdf
- [4.46] Statistics-IFR International Federation of Robotics [WWW] <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics> (24.04.2014)
- [4.47] Handbook of Industrial Robots (1999), 2-nd Ed. Wiley. ISBN 978-0-471-17783-0
- [4.48] Tööstusrobotid [WWW] https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_robot (24.04.2014)
- [4.49] ISO Standard 8373:1994. Manipulating Industrial Robots – Vocabulary
- [4.50] Robotite ülevaade. [WWW] http://www.worldrobotics.org/uploads/media/2011_Executive_summary.pdf (28.07.2015)
- [4.51] Robotite ülevaade. [WWW] http://www.worldrobotics.org/uploads/tx_zeifr/Executive_summary_WR.2014.pdf (06.08.2015)
- [4.52] Tööstusrobotid [WWW] <http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Featured-Articles> (09.01.2014)
- [4.53] Lehtla, T., Mür, M., Rätsep, T. (2014). Robotitehnika kutsekoolidele. INNOVE Kutseharidus, 2014. 201 lk.
- [4.54] Tööstusrobotite liigitus. [WWW] <http://blog.robotiq.com/bid/63528/what-are-the-different-types-of-industrial-robots> (04.08.2015)
- [4.55] www.nuigalway.ie/.../documents/unit_6_industrial_robotics-pdf (06.08.2015)
- [4.56] Roboti haarats [WWW] http://en.wikipedia.org/wiki/Robot_end_effector (25.03.2015)
- [4.57] Monkman, G. J., Hesse, S., Steinmann, R., Schunk, H. (2007) Robot Grippers. Wiley. 463 p.
- [4.58] Tajur [WWW] <https://et.wikipedia.org/wiki/Tajur> (25.03.2015)
- [4.59] Sensor [WWW] <https://en.wikipedia.org/wiki/Sensor> (25.03.2015)
- [4.60] RobotStudio [WWW] <https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio> (25.03.2015)
- [4.61] Curry, G. L., Feldman, R. M. (2011) Manufacturing Systems Modelling and Analysis. Springer. XVI, 338 p.
- [4.62] Dashchenko, A. I. (Ed). (2006). Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories. Springer. XXXIII, 731 p.
- [4.63] Riggs, J. L. (1987). Production Systems: Planning, Analysis and Control. Wiley. 3-rd Ed. 745 p.
- [4.64] Painttootmissüsteemid [WWW] www.uky.edu/dsianita/611/fms.html (06.08.2015)
- [4.65] Painttootmissüsteemid [WWW] www.me.emu.edu.tr/majid/ENG447/FMS.pdf (06.08.2015)
- [4.66] Tootmiseseadmete asetuskeemid [WWW] <http://thelibraryofmanufacturing.com/index.html> (06.08.2015)
- [4.67] Eedo, K. (2007). Tootlikkuse kasvu juhtimine ettevõttes. Kirjastus Külüm. Tallinn. 120 lk.
- [4.68] NASA Systems Engineering Handbook. (2016). NASA/SP-2007-6105 Rev 1. CreateSpace Independent Publishing Platform. 356 p.

- [4.69] Oliver, D. W., Kelliher, T. P., Keegan, J. G. Jr. (1997) Engineering Complex Systems with Models and Objectives. McGraw Hill. 325 p.
- [4.70] EIA Standard IS-632. Processes for Engineering a System, Jan. 1999. 137 p.
- [4.71] Uuenduslik tootmine: käsiraamat. (2011). TTÜ kirjastus. 446 lk.
- [4.72] Hitomi, K. Manufacturing Systems Engineering: a unified approach to manufacturing technology and production management. (1979). Taylor & Francis. 310 p.
- [4.73] Dorf, R. C., Kusiak, A. (1994). Handbook of Design, Manufacturing and Automation. 1014 pp.
- [4.74] Buede, D. M. (2000). The Engineering Design of Systems: Models and Methods. Wiley-Interscience. 462 p.
- [4.77] Askin, R. G., Stanridge, S. R. (1993). Modelling and Analysis of Manufacturing Systems. Wiley. 480 p.
- [4.78] Kimmel, A. (1992). Arvjuhtimisega metallilõikepinkide programmeerimine. Tallinna Tehnikaülikool. 117 lk.
- [4.79] Crandell, T. M. (2003). CNC machining and Programming. Industrial Press Inc. 606 pp.
- [4.80] Krar, S., Gill, A. (1990). CNC technology and programming. MCGraw-Hill Publ. Company. 378 pp.

5. TÖÖTLEMISMEETODID

5.1 Mehaaniline töötlemine

Mehaaniliseks töötlemiseks nimetatakse töödeldava materjali või mingi keha tükeldamist, sellelt mingi osa (ka kihi) eraldamist või materjali (kehasse) sisselõike tegemist. Töötlemisel rakendatakse mehaanilist energiat ehk töötlemine toimub mehaanilise deformeerimise tulemusena. Topoloogiliste tunnuste järgi on mehaaniline töötlemine sidemeid katkestav protsess ning küberneetiliste tunnuste järgi juhitud protsess – asjaolu, mis on nüüdisaegse paindotootmise seisukohast väga oluline. Kui protsess on juhitud, siis saab töötlemise lõpptulemust täpselt hinnata, ette prognoosida ja kogu protsessi optimeerida.

Selles peatükis kirjeldatakse levinumaid tööstustootmises kasutatavaid mehaanilisi töötlemismeetodeid.

Traditsioonilisteks mehaanilise töötlemise meetoditeks on nt treimine, freesimine, puurimine, avardamine, kammlõikamine, hõõveldamine, tõukamine ja saagimine. Nende meetodite eeliseks on töödeldud pinna väike karedus, mõõtmete väiksed tolerantsid, töötlemise väike maksumus ning võimalus töödelda keerulise kujuga pindu. Samas on mehaanilise töötlemise meetodite puuduseks töötlemise suur mõju töödeldud pinna omadustele, väike tootlikkus, suured materjalikaod laastudena, jahutus- ja määrvedelike suur kulu.

Mehaanilisel töötlemisel kasutatakse toorikutena peamiselt valtsmetalli, valandeid või sepi-seid. Mehaaniliselt töödeldavad detailid liigitatakse traditsiooniliselt kolme põhirühma:

- pöördkehad:
 - võllid, teljed jms ($L/D > 2$);
 - puksid, hülsid jms ($2 < L/D < 0,5$);
 - kettad, äärikud, rihma- ja hoorattad jms ($L/D < 0,5$);
- plaadi-tüüpi tooted;
- kere-tüüpi tooted.

Töötlemismeetoditest tulenevalt jagatakse töödeldavad pinnad:

- välised silindrilised pinnad;
- sisemised silindrilised pinnad;
- Tasapinnad;
- kujupinnad.

Väliste silindriliste pindade mehaanilise töötamise viisid saab liigitada alljärgnevalt.

- 1) Töötlemine laastu eraldamisega (terik-tüüpi lõikuriga): treimine, freesimine, hõõveldamine, tõukamine ja kammlõikamine.
- 2) Töötlemine laastu eraldamisega (abrasiivsete lõikuritega): lihvimine, superfiniš, plankimine ja poleerimine.
- 3) Töötlemine laastu eraldamiseta: rullimine, kalestamine ja haavlijoaga töötlemine.

Treitakse universaal- ja revolvertreipinkidel, mitmetera-treimispool-automaatidel, hüdroko-peertreipinkidel, ühe- ja mitmespindlilistel poolautomaatidel ja automaatidel, APJ-treipinkidel.

Tööpinkides (v.a revolverpingid) saab tooriku paigaldada nii padrunisse kui ka tsentrite vahele. Revolverpingis paigaldatakse toorik padrunisse. Pikkade ja vähejäikade võllide treimisel võib kasutada lisatugesid – lünnete (liikuvad ja liikumatud). Kasutatavate treilõikurite kuju valitakse vastavalt treimise eesmärgile (piki-, otsa-, soone-, mahalõike-, kujutera, treitera APJ-treipingile jm). Peentreimisel võetakse suure täpsuse ja pinnasileduse saavutamiseks minimaalne laastu põiklõige (t ja s), valitakse lõikesügavus ja maksimaalne lõikekiirus.

Välised silinderpinnad lihvitakse ümarlihvpinkidel, otsalihvpinkidel, tsentriteta lihvimise poolautomaatidel ja automaatidel. Ümar- ja otslihvpinkidel paigaldatakse toorik kas tsentrite vahele, padrunisse, tsangpadrunisse või erirakisesse. Lihvitakse kas piki- või põikiettenihkega. Põikiettenihet kasutatakse siis, kui lihvitava astme pikkus ei ületa lihvkaia paksust. Ülerullimist kasutatakse siledate silinderpindade, üleminekuraadiuste, soonte, keermete jm pindade puhul, eesmärgiga suurendada pinna tugevust ja ka pinna siledust. Ülerullimist tehakse pärast puhastreimist ja siis tõuseb täpsus ca 10–15%. Pealerullimist kasutatakse rihveldatud pindade saamiseks, kus täpsusel ja pinnasiledusel ei ole tähtsust.

Sisemisi silinderpindu töödeldakse:

- 1) teriklõikuritega: puurimine, avardamine, hõõritsemine, sisetreimine ja kammlõikamine;
- 2) abrasiivsete lõikuritega: lihvimine ja viimistlustöötlus;
- 3) laastu eraldamiseta: torniga kalibreerimine ja ülerullimine.

Silindrilised avad töödeldakse puurpinkidel (vertikaal- ja radiaalpuurpinkidel), sisetreipinkidel (horisontaal- ja koordinaatsisetreipinkidel), kammlõikepinkidel (horisontaal- ja vertikaalkammlõikepinkidel), igat liiki treipinkidel nii tavalistel kui ka APJ-tööpinkidel.

Puuritakse, avardatakse ja hõõritsetakse nii puur- kui ka treipinkides. Täismetalli võib spiraalpuuriga puurida ava läbimõõduga kuni 30 mm. Kui on vaja suuremat läbimõõtu, siis puuritakse kaks korda. Täpsus ja pinnasiledus jääb seejuures samaks.

Sisetreimisel kasutatakse kahte moodust:

- 1) treimisel pöörleb toorik (treipinkidel);
- 2) treimisel pöörleb lõikur (puurpinkidel, sisetreipinkidel).

Esimest moodust kasutatakse, kui toorik on pöördkeha. Teist moodust siis, kui toorikuks on keredetail.

Laialt kasutatakse kammlõikamist, mis ületab tootlikkuselt kõik muud töötlemisviisid. Lõikuri keerukuse ja kõrge hinna tõttu õigustab see end majanduslikult piisavalt suurte tootmiskoguste korral. Tootlikkuselt ületab see sisetreimist ca 10 korda. Lõikur-kammlõikur on paljuhambaline ja ühendab seega nii eel- kui puhastöötlamise etapi. Kammlõikamisega töödeldakse masstootmises ka silindrilisi avasid. Peamiselt kasutatakse seda aga hammasavade, liistusoonte jm kujuavade puhul.

Avad lihvitakse siselihvpinkidel, kusjuures tavapärase lõikeprotsessi kindlustamiseks peab lihvikäia läbimõõt olema alla 0,7 lihvitava ava läbimõödust.

Tasapindade töötlemise põhimeetodid

Hööveldamist kasutatakse üksik- ja väikeseeriatootmises, kuna võimaldab saada läbi ilma keeruliste rakiste ja lõikuriteta. On suhteliselt lihtsalt ümberhäälestatav töötlemisviis, samas aga vähetootlik (v.a pikkade ja kitsaste pindade töötlemine) suurte tühikäikude ja väikese võimaliku lõikekiiruse kasutamise võimaluse tõttu. Põikihöövelpinke kasutatakse väiksemate detailide, pikihöövelpinke aga suuremate detailide töötlemiseks.

Freesimine on tänapäeval peamine tasapindade töötlemise viis. Masstootmises on freesimine praktiliselt täielikult välja tõrjunud hööveldamise, v.a pikkade ja kitsaste pindade töötlemisel.

Freespingid jagunevad horisontaal-, vertikaal-, universaal-, karussell-, trummelfreespingid ja paljuoperatsioonilised tööpingid ehk töötlemiskeskused. Tänapäeval saadakse suurim tootlikkus APJ-freespinkidel. Laialt kasutatakse paljuteralisi freespäid, sest tööriista suur läbimõõt (~900 mm) kindlustab ka suure tootlikkuse.

Kammlõikamist kasutatakse suure tootlikkuse tõttu freesimise asemel väliste tasapindade töötlemisel. Seda eriti mass- ja suurseriatootmises, vaatamata lõikekammi ja -seadmete suhteliselt kõrgele hinnale.

Kaabitsemist kasutatakse tasapindade viimistlustöötusel. Käsitööna on see vähetootlik ja nõuab tööliselt kõrget kvalifikatsiooni. Kasutatakse abrasiivtöötuse asemel, kui viimane ei ole soovitatav (abrasiivterade kinnijäämise tõttu töödeldud pinnasesse). Töötlemise täpsus määratakse värvijälgede arvu järgi kontrollimisel ruuttollil (25 x 25 mm). Mida rohkem jälgi, seda täpsem. Puhastuskaabitsemisel on jälgede arv 6–10 ja Ra = 1,25 µm, peenkaabitsemisel 22 ja Ra = 0,08 µm. Laastu paksus kaabitsemisel on ca 0,005 mm.

Lihvimine on kasutusel tasapindade viimistlustöötusel. Tasapinnad lihvitakse tasalihvpinkidel lihvikäia silindrilise pinna (perifeeria) või otspinnaga nii tavalistel kui APJ-tööpinkidel. Karastatud detailide puhul on lihvimine ainus tasapindade puhastöötlemise viis.

Keermete töötlemise puhul kasutatakse kõige rohkem alljärgnevat töötlemismeetodeid.

Treilõikuri ja keermekammiga välis- ja sisekeermeid võib lõigata treipinkidel. Meetod on vähetootlik, kuna keere saadakse mitme töökäiguga. Meetodi eeliseks on treipinkide ja lõikurite universaalsus ja võimalus saada suure täpsusega keere. Samuti saab treipinkidel lõigata suure läbimõõduga keeret. Täpsust suurendatakse eel- ja puhastöötlemisel erinevate tööriistadega. Eristatakse kahte moodust kolmnurkkeerme lõikamiseks: radiaalettenihkega ja radiaal-telgettenihkega. Esimene moodus on täpsem, aga vähetootlik, seepärast tehakse eeltöötlemist teisel ja puhastöötlemist esimesel viisil. Tootlikkuse tõstmiseks kasutatakse treilõikuri asemel keermekammi. Keermekammi puhul lõikavad mitu hammast korraga ja nii saab vähendada töökäikude arvu (kuni üheni).

Keermelõikuriga lõigatakse keeret nii käsitsi kui ka trei-, puur- ja keermelõikepinkidel. Ümar kammilõikur paigaldatakse spetsiaalsesse peasse ja kinnitatakse kruviga. Meetod on vähetootlik.

Keermelõikepeaga lõikamine on täpsem ja tootlikum. Kasutatakse laialt seeria- ja masstootmises. Keermelõikepeaga lõigatakse treipingis, pool- ja täisautomaatides.

Freesimine on eelmistest töötlemisvõimalustest palju tootlikum. Kasutatakse laialt seeria- ja masstootmises nii välis- kui ka sisekeermete töötlemiseks keermefreespinkides. Kasutusel on nii ketas- kui ka rühma-, kammfreesid. Ketasfreesi kasutatakse suure sammu ja profiiliga (trapets- või täisnurk-) keermete lõikamiseks ühe, kahe või kolme töökäiguga. Lõikamisel frees pöörleb ja saab ettenihke liikumise telje suunas keermesammu võrra tooriku ühe pöörde kohta.

Kammfrees kujutab endast ketasfreeside kogumit (paketti) ja keere lõigatakse tooriku 1,2 pöörde puhul (0,2 pööret on vaja sisselõike katmiseks).

Keermepuuriga keermete lõikamine toimub väiksemate ava läbimõõtude puhul. Keere lõigatakse avasse kas masin- või käsipuuriga. Masinpuuriga võib keeret lõigata keermelõikepuur-, revolver-, treipinkidel ja -automaatidel. Keermepuuriga lõikamisel peab olema reverseeriv mehhanism käigu lõpus keermepuuri pöörlemis- ja liikumissuuna muutmiseks. Kasutatakse mitmesuguseid padroneid: jäiku, ujuvaid, toeni jõudmisel või pöördemomendi ülekoormusel ise väljalülituvaid. Jäiku padroneid kasutatakse pool- ja täisautomaatidel ja APJ-tööpinkidel. Ujuvaid padroneid kasutatakse siis, kui ava ja puuri samateljelisus ei ole kindlustatud.

Keermete lihvimist kasutatakse täpse keermesaaamise ning peamiselt terminiselt töödeldud detailide puhul. Lihvida võib nii välis- kui ka sisekeermesid mitmesugustel keermelihvpinkidel.

Eristatakse järgmisi keermelihvimise viise: üheprofiilse käiaga, mitmeprofiilse käiaga, piki- ja põikiettenihkega, laia- ja paljuprofiilse käiaga. Ümarprofiilse käiaga lihvimine on universaalne ja kindlustab suure täpsuse. Seda moodust kasutatakse keermepuuride ja täpsete keermete saamiseks. Masstootmises kasutatakse ka kõrge tootlikkusega tsentriteta lihvimist.

Keermerullimise puhul rullitakse keermesid detailidele spetsiaalsetes keermerullimispinkides kas tasapinnaliste keermesplaatide või keermerullidega. Keermesid rullitakse kas radiaal-, piki- või tangensiaalettenihkega. Suurim tootlikkus saadakse mitmetsükliliste keermerullimisautomaatidega. Kasutatakse ka kolmerullilisi keermerullimispäid, mis töötlemisel asuvad treipingi tagapukis. Rullitud keeret kasutatakse laialt kinnituspoltidel. Keeret võib rullida 0,3–150 mm terasdetailidel kõvadusega HB = 120–340 ja samuti värvilistest metallidest ja sulamitest detailidel.

Hammaste töötlemise mehaanilised meetodid

Eristatakse jõuhammasülekandeid, mis on ette nähtud märgatava pöördemomendi edasiandmiseks ja seejuures võllide pöörete arvu muutmiseks, ning kinemaatilisi hammasülekandeid pöörlemise edasiandmiseks suhteliselt väikeste pöördemomentide juures.

Kõige enam kasutatakse silinder-, koonus- ja tiguülekandeid. Hamba kujundamisest sõltuvalt eristatakse kahte meetodit: kopeerimine ja rullimine.

Kopeerimismeetodil lõigatakse hambad ketas- või moodulfreesiga. Pärast ühe hambapaari vahe freesimist pööratakse toorikut jaotusmehhanismi (jagamispea) abil ühe hambasammu võrra ja freesimine kordub. Meetod on vähetootlik.

Teise kopeerimismeetodina nii välis- kui ka sisehammaste saamiseks kasutatakse kammlõikamist. Meetod on väga tootlik, nagu see on iseloomulik kammlõikamisele üldse. Kasutatakse masstootmisel.

Rullumismeetodil toimub hammaste lõikamine hammaspaari omavahelise liikumise imiteerimisena nii hammas- kui ka tiguajamites. Seejuures kujuneb hamba pind (evolvent) lõikuri lõikeservade liikumistee mähisjoonena ning lõikuri iga lõikeserv võtab toorikult vaid teatud paksusega laastu. Silinderhammasratastel on sel viisil hammaste lõikamisel lõikuriks kas tigu frees (hambafreesimisel), ketastõukur (hambatõukamisel) või latt-tõukur (hamba hõõveldamisel).

Tigufreesiga lõigatakse hambad hambafreespingil. Meetod on tootlik. Frees paigaldatakse tooriku suhtes tigu free si niidi tõusunurka arvestades. Tigufreesile antakse algul radiaalne ettenihe hamba täiskõrguse saamiseni, seejuures ettenihe piki tooriku telge hamba täispikkuse saamiseks. Tootlikkuse suurendamiseks paigaldatakse tornile mitu toorikut.

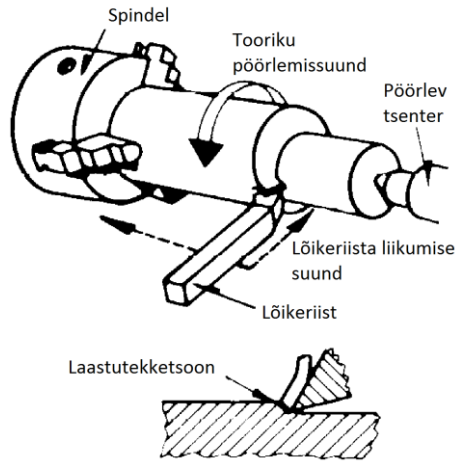
Hambatõukamist tehakse hambatõukepingis. Lõikur-tõukur kujutab endast evolventprofiiliga kukaldatud hammastega hammasrattast. Toorik ja tõukur saavad sundpöörlemise, nagu see on tavalisel hambumisel. Seejuures saab tõukur üles-alla lõikeliikumise ja radiaalse ettenihke. Ühe töökäiguga lõigatakse hambad $m = 1-2$ mm, kahe töökäiguga $m = 2-4$ mm ja kolme töökäiguga $m = 4$ mm. Hambatõukamine on väikeste läbimõõtudega hammasrattaste ainus viis sisehammaste lõikamiseks ja hammasblokkide väiksemate hammasvõõde saamiseks.

Hambahõõveldamine on tegelikult hambatõukamine latt-tõukuriga (hambakammiga). Hambahõõvelduspingid on nii vertikaalse kui ka horisontaalse tooriku pöördeteljega. Viimastel töödeldakse noolhammastega silinderhammasrattaid.

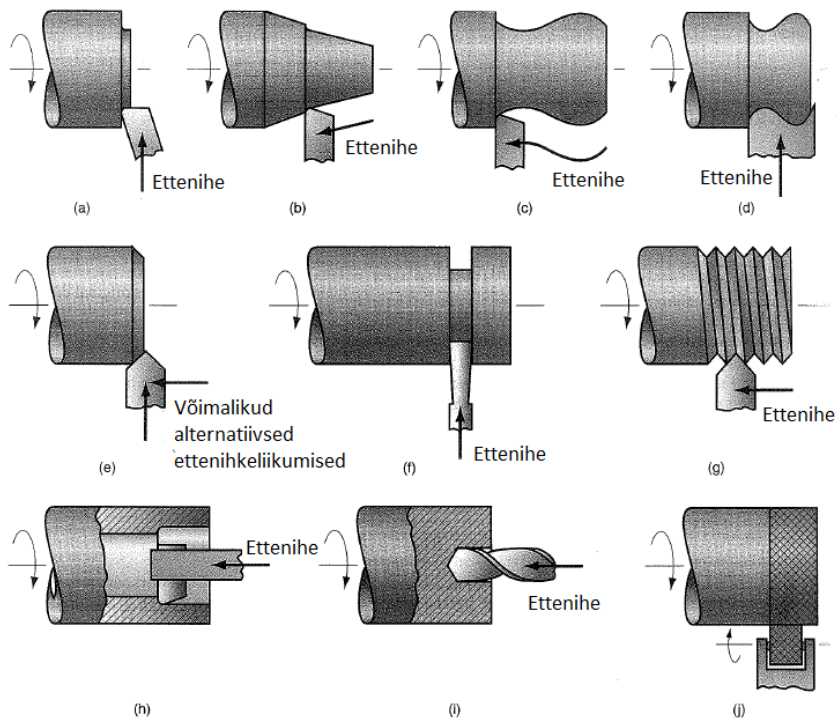
Hammaste rullimisel on märgatavad eelised võrreldes hambalõikamisega: 5–30 korda suurem tootlikkus, suureneb hammaste tugevus ja kulumiskindlus kalesumise tõttu, materjali kokkuhoid hammasratta valmistamisel. Eristatakse kuumalt ja külmalt pealerullimist. Toorik paigaldatakse tornile. Pealerullimine toimub spetsiaalses pingis pöörlevate hammasrullide abil. Sõltuvalt moodulist $m = 2-5$ mm kestab pealerullimine 0,5–2,0 min.

5.1.1 Treimine

Meetodi kirjeldus. Treimine on mehaanilise töötlemise meetod, mille jooksul lõikuriga (treiteraga) eemaldatakse pöörlevalt toorikult materjali. Treimise käigus toorikult eraldunud materjali osa nimetatakse laastuks.



Sele 5.1 Treimise üldine skeem



Sele 5.2 Enamlevinud treimisoperatsioonid: a – otspinnatreimine; b – koonilise pinna treimine; c – kontuuritreimine; d – kopeetreimine; e – faasitreimine; f – mahalõikamine; g – keermestamine; h – sisetreimine; i – tseetriava puurimine; j – rihveldamine [7]

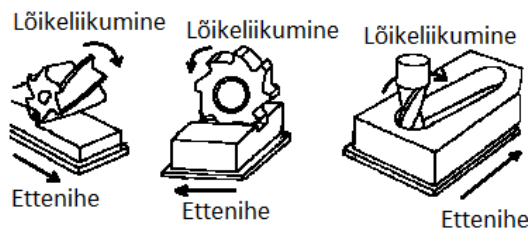
Töödeldavasse materjali surutakse lõikuri pind, mida nimetatakse esipinnaks. Esipinna ees on töödeldav materjal surutud ning selles tekib pingestatud ala. Joonel, kus pinged ületavad töödeldava materjali vastupanu nihkele, tekib nihe. Nihete (nihkejoonte) ulatumine töödeldavale pinnale on treimise oluliseks tunnuseks, samuti ka erinevuseks noaga lõikamisest. Nihete tulemusena materjal kalestub, selle vastupanu nihkele suureneb.

Kasutusala. Treimisel saab töödelda erinevaid ebakorrapärase kujuga silinder-, kontuur-, koonilisi- ja otspindu, välis- ja sisekeermeid (vt sele 5.2). Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,02–3,2 µm ja töötlustäpsus IT 6–7.

Töödeldavad materjalid. Treimisel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu teras, terasvalu, roostevaba teras, malm, pronks, klaas, puit, kummi, kivimid, värvilised metallid ja sulamid, erinevad plastid ja komposiitmaterjalid [5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5].

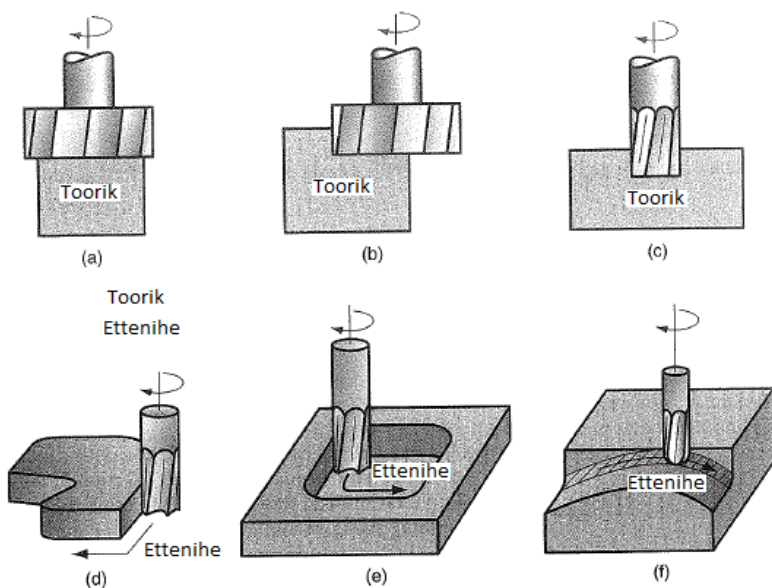
5.1.2 Freesimine

Meetodi kirjeldus. Freesimiseks nimetatakse mehaanilise lõiketöötlemise operatsiooni, kus freesiks nimetatava paljuhambalise lõikuriga eemaldatakse toorikult mingi materjali osa. Freesimisel antakse freesile pöörlev pealiikumine, toorikule aga sirgjooneline ettenihkeliikumine freesi suunas. Pöörleva freesi telg on risti ettenihkesuunaga, mis on ka üheks peamiseks erinevuseks puurimisest. Freesimine on suure tootlikkuse tõttu väga levinud metallide lõiketöötlemise viis. Lõikehammastega varustatud tööpindade kuju järgi liigitatakse freese silinder-, ots-, laup-, ketas-, sõrm- ja kujufreesideks. Nii silinder- kui ka ketasfreeside korral on võimalik kasutada ettenihkele kaasafreesimist või vastufreesimist. Viimane variant on lõikeprotsessi seisukohast ebasoodsam (hamba lõikesse minekul on lõigatava kihi paksus null, enne lõikamise alustamist tekib teatud ulatuses lõigatava materjali muljumine).



Sele 5.3 Freesimise üldine skeem: 1 – silinderfreesimine; 2 – ketasfreesimine; 3 – sõrmfreesimine

Kasutusala. Freesimisel saab töödelda erinevaid tasa- ja profiilpindu, rihvelpindu, sooni, hammasrattaid, kujupindu (vt sele 5.4). Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 3,2–6,3 µm ja töötlustäpsus IT 7.

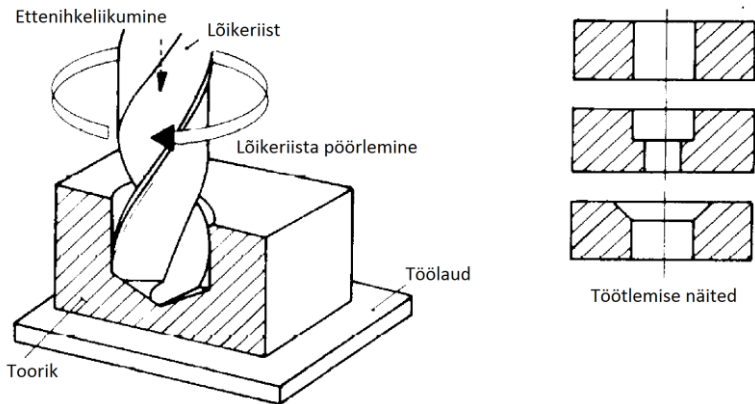


Sele 5.4 Freesimisoperatsioonid: a – tavapärase laupfreesimine; b – astme laupfreesimine; c – otsfreesimine; d – profiilfreesimine; e – taskufreesimine; f – kontuurfreesimine [7]

Tööeldavad materjalid. Freesimisel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu teras, terasvalu, roostevaba teras, malm, pronks, klaas, puit, kummi, kivimid, värvilised metallid ja sulamid, erinevad plastid ja komposiitmaterjalid [5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5].

5.1.3 Puurimine

Meetodi kirjeldus. Puurimine on läbiminevate ja umbsete avade saamine töödeldaval detailil. Puurimisel antakse puurile pöörlev pealiikumine ja sirgjooneline ettenihkeliikumine, mille koostoime tulemusena eemaldatakse toorikult materjali osa. Avade puurimisel võib anda pöörleva tööliikumise (pealiikumise) nii toorikule kui ka lõikurile (puurile). Lõikerežiimi elemendid puurimisel on lõikekiirus, ettenihe, lõikesügavus, laastu ristlõike pind ja masinaaeg. Kõige enam levinud lõikur puurimisel on spiraalpuur ehk keerdpuur. Puur koosneb tööosast, kaelast ja sabast. Tööosa koosneb lõike- ja juhtosast. Spiraaljooned on mõeldud laastu eemaldamiseks puuritavast avast. Lisaks spiraalpuurile kasutatakse ka eripüre.



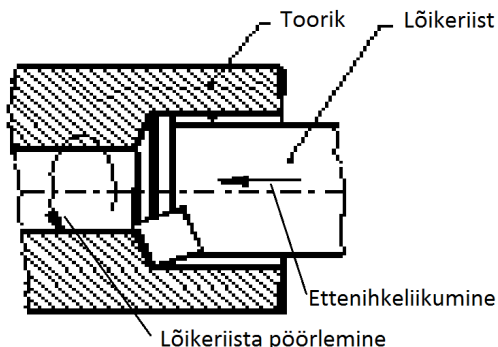
Sele 5.5 Puurimise üldine skeem

Kasutusala. Puurimisel saab töödelda erinevaid ümaraid ja silindrilisi läbivaid ja umbavu. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 1,5–2,5 μm ja töötlustäpsus IT 6.

Töödeldavad materjalid. Puurimisel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu teras, terasvalu, roostevaba teras, malm, pronks, klaas, puit, kummi, kivimid, värvilised metallid ja sulamid, erinevad plastid ja komposiitmaterjalid [5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5].

5.1.4 Avardamine

Meetodi kirjeldus. Avardamine on olemasolevate avade läbimõõdu suurendamine juhtudel, kus eraldatava kihi paksus on suur. Suurema jäikuse tõttu võimaldavad avardid intensiivsemaid lõikerežiime. Avardit suunab töödeldud ava ning tuleb jälgida avardi ja töödeldava ava telgede ühtivust. Töödeldava kuju järgi liigitatakse avardeid kolme gruppi: silindrilised, koonilised ja kombineeritud avardid.



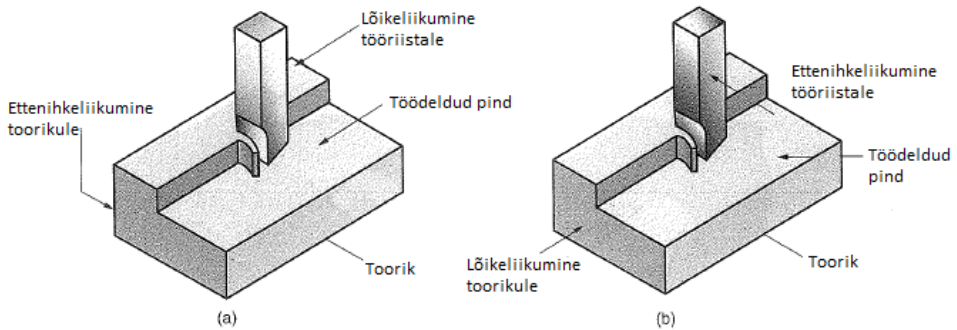
Sele 5.6 Avardamise üldine skeem

Kasutusala. Avardamisel saab töödelda erinevaid ümaraid ja silindrilisi läbivaid ja umb-
avu ning koonilisi pindu. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 1,6–6,3 μm ja töötlustäpsus
IT 3–5.

Töödeldavad materjalid. Avardamisel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu teras,
terasvalu, roostevaba teras, malm, pronks, klaas, puit, värvilised metallid ja sulamid, erinevad
plastid [5.2, 5.4, 5.6].

5.1.5 Hõõveldamine ja tõukamine

Meetodi kirjeldus. Hõõveldamine ja tõukamine on sarnased operatsioonid ning mõeldud
horisontaal-, vertikaal-, kaldtasapindade ja kujutasapindade, soonte ning teiste süvendite
töötlemiseks spetsiaalteredega.

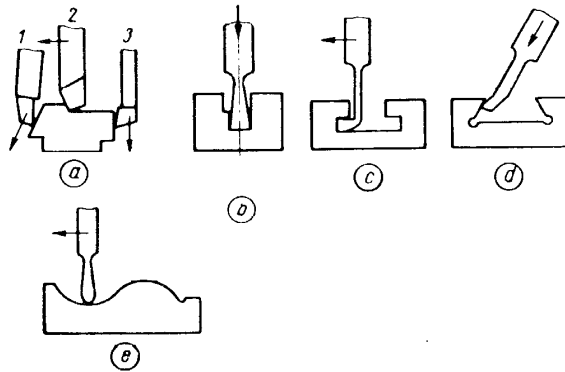


Sele 5.7 Tõukamise (a) ja hõõveldamise (b) üldine skeem [5.7]

Tooriku töötlemine on katkendlik, sest tera sooritab nii töö- kui ka tühikäigu. Neid töötlemis-
protsesse iseloomustavad lõikerežiimi järgmised elemendid: lõikekiirus, ettenihe, lõikesüga-
vus, laastu ristlõike pind ja masinaaeg. Hõõveldamise ja tõukamise erinevus seisneb pea ja
ettenihkeliikumises, kus hõõveldamisel saab pealiikumise toorik ja ettenihkeliikumise lõikur
ning tõukamisel pealiikumise lõikur ja ettenihkeliikumise toorik.

Kasutusala. Hõõveldamisel ja tõukamisel saab töödelda erinevaid horisontaal-, vertikaal- ja
kaldu tasapindu; sooni ja kujupindu (vt sele 5.8). Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 1,6–
12,5 μm ja töötlustäpsus IT 3–4.

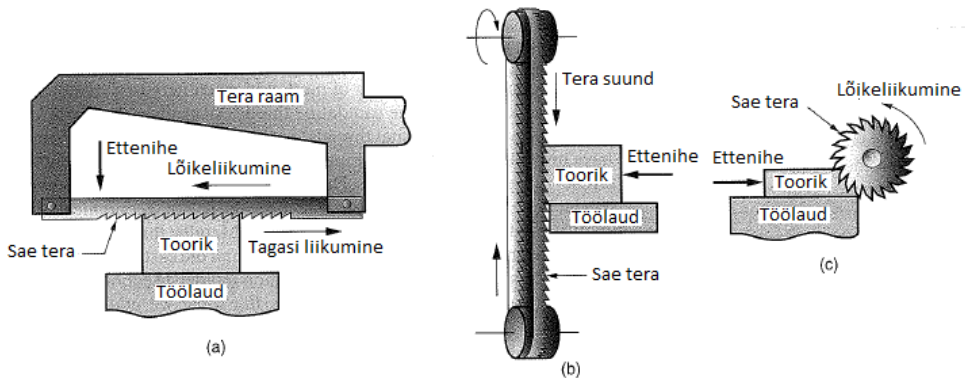
Töödeldavad materjalid. Hõõveldamisel ja tõukamisel saab töödelda väga erinevaid mater-
jale, nagu teras, terasvalu, malm, puit, värvilised metallid, sulamid ja erinevad plastid [5.1,
5.2, 5.3, 5.4, 5.5].



Sele 5.8 Hõõveldamis- ja tõukamisoperatsioonid: horisontaal-, vertikaal- ja kaldu tasapindade töötlemine (a); soonte töötlemine (b, c, d); kujupindade töötlemine (e)

5.1.6 Saagimine

Meetodi kirjeldus. Saagimine on sirgjoonsete ja kõverate pindade töötlemine sae tera surumisega töödeldavasse toorikusse. Sae tera koosneb võrdsel kaugusel ja kõrgusel paiknevatest hammastest. Saagimist kasutatakse kas tooriku lahutamiseks kaheks erinevaks osaks või mittevajaliku osa eemaldamiseks toorikust. Saagimisel antakse tööliikumine lõikurile (sae terale) ning toorik on kas paigal või saab ettenihkeliikumise. Eristatakse kolme põhilist saagimise tüüpi vastavalt sae tera liikumise suunale: lineaarsaagimine ehk edasi-tagasi liikumisega saagimine, lintsaagimine ja ketassaagimine.



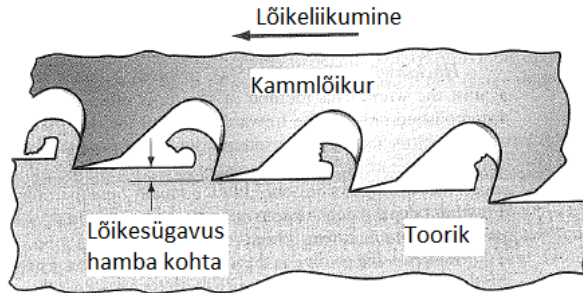
Sele 5.9 Saagimise üldised tüübid: (a) lineaarsaagimine, (b) lintsaagimine, (c) ketassaagimine [5.7]

Kasutusala. Saagimisel saab töödelda erinevaid tasapindu, kaldpindu, otspindu, sooni. Saa-
vutatav pinnakaredus on piires Ra 0,8–12,5 µm ja tööstlustäpsus IT 11–14.

Töödeldavad materjalid. Saagimisel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu teras, pronks, värvilised metallid, sulamid ja plastid [5.2, 5.4, 5.6].

5.1.7 Kammlõikamine

Meetodi kirjeldus. Kammlõikamine on välispindade ja avade kõrgtootlik töötlemise meetod, mis ühe töökäiguga töötleb nii koorivalt kui ka puhtalt. Kammlõikamisele on iseloomulik suur tootlikkus, kõrge töötlustäpsus ja hea töödeldud pinna kvaliteet. Lõikuriks on lõikehammaste kammlõikur, mis saab sirgjoonelise pealiikumise ja eraldab kogu töötlusvaru ühe töökäiguga. Pinna minimaalse pikkuse, mida on kohane töödelda kammlõikuriga, määrab üheaegselt lõikes olevate hammaste arv, see ei tohiks olla alla 3, kuna lõikamine muutuks liigselt löögiliseks ja võib põhjustada vibratsiooni.

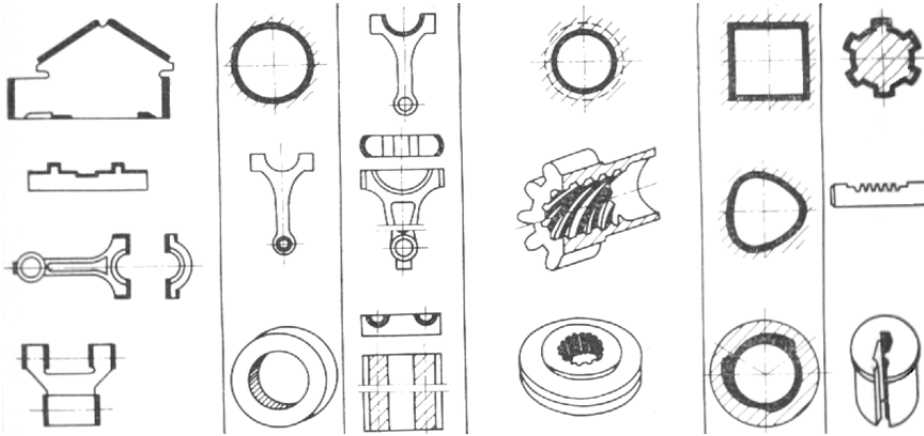


Sele 5.10 Kammlõikamise üldine skeem [5.7]

Kammlõikurid jagatakse kahte tüüpi: välis- ja sisepindade töötlemise kammlõikurid. Töötlemisel lõikavad kõik lõikes olevad kammlõikuri hambad laaste, kusjuures iga järgmine hammas on eelmisest kõrgem. Kammlõikurid on spetsiaalsed lõikurid (nende kujundus sõltub töödeldud ja tooriku pinna kujust) ning küllaltki kallid, mistõttu leiavad kasutamist peamiselt mass- ja suurseriatootmisel, harvem seriatootmisel.

Kasutusala. Kammlõikamisel saab töödelda erinevaid avasid, kujupindu, hambaid, kõverpindu ja sooni (vt sele 5.11). Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,8–2,25 μm ja töötlustäpsus IT 7.

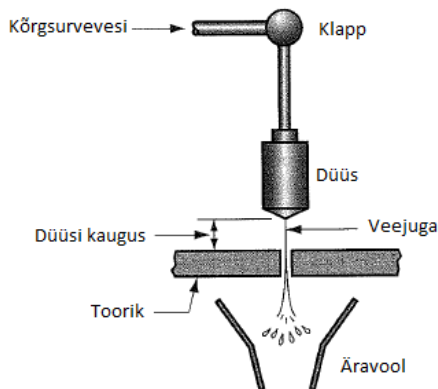
Töödeldavad materjalid. Kammlõikamisel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu teras, malm, alumiinium ja erinevad plastid [5.2, 5.4, 5.6].



Sele 5.11 Kammlõikamisega saadavad pinnad [5.7]

5.1.8 Veejugatöötlus

Meetodi kirjeldus. Veejugatöötlus on ebaregulaarsete pindade ja kujupindade töötlus kõrge survega (kuni 400 MPa) veejoa suunamisel vastu töödeldavat materjali kiirusega 900 m/s, mis purustab pinnakihi ja eemaldab eraldunud materjaliosakesed tööstustsoonist. Esmalt leidis meetod kasutust klaasplastplaatide ja lainelise materjali lõikamisel. Lõikuriks on veejuga, mis töötlemise käigus ei kulu, lisaks ei teki töötlemisel soojust ning seoses sellega ei mõjutata termiliselt töödeldava materjali struktuuri. Meetodi oluliseks puuduseks on seadme kallidus. Lõikerežiimi elemendid veejugatöötlusel on lõikepea kaugus lõigatavast materjalist, lõikepea ava läbimõõt, veejoa surve ja ettenihkekiirus.



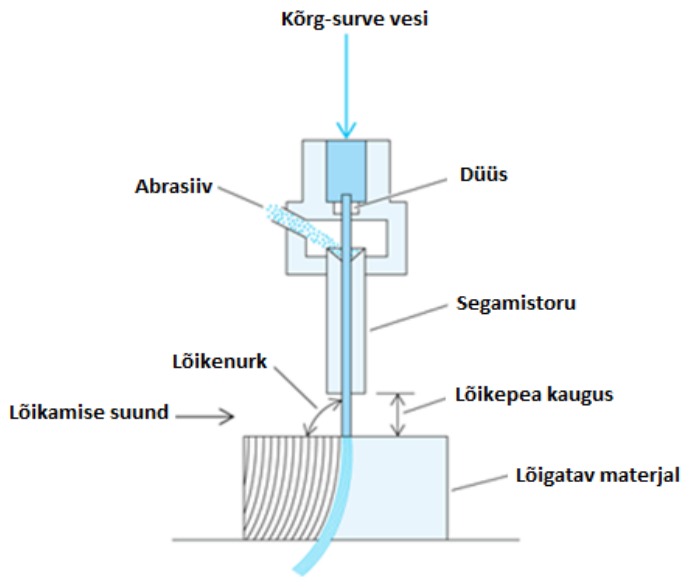
Sele 5.12 Veejugatöötluste üldine skeem

Kasutusala. Veejugatöötlusel saab töödelda erinevaid ebaregulaarseid pindu ja kujupindu. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,32–1,60 μm ja tööstustäpsus IT 7.

Töödeldavad materjalid. Veejugatöötusel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu metallid, kiudmaterjalid, tekstiil, kivimid, keraamika, kummi, klaas, puit, kork, vaigud, polümeerid, plastid ja komposiitmaterjalid [5.2, 5.4].

5.1.9 Abrasiivveejugatöötlus

Meetodi kirjeldus. Abrasiivveejugatöötlus on töötlemine abrasiivi ja vedeliku (tavaliselt vee) suspensiooni joaga. Juga suunatakse töödeldavale pinnale kas hüdraulilise pumba, suruõhu või tsentrifugaaljõu abil. Kasutatakse ränikarbiidi või elektrokorundi vesisuspensiooni. Mida suurem on õhu surve, seda suurem on tootlikkus, kuid majanduslikult on sobivaks surveks 0,6–0,8 N/mm². Paremad tulemused saavutatakse siis, kui düüs on töödeldavast pinnast 40–50 mm kaugusel ja 45 kraadise nurga all. Antud kaugus tagab abrasiivteradele maksimaalse kiiruse ja pörkenurk suurima tootlikkuse. Abrasiivina kasutatakse ränikarbiidi, alumiiniumoksiidi või elektrokorundi. Abrasiiviosakesi lisatakse veejossa 0,25 kg/min. Mida suurem on tera, seda suurem on tootlikkus, kuid kasvab pinnakaredus. Tera suurus üle 120 µm tootlikkust enam oluliselt ei mõjuta. Tootlikkus sõltub õhu rõhust, abrasiivterade läbimõõdust, pörkenurgast, düüsi ja pinna vahelisest kaugusest ja ettenihke suurusest.



Sele 5.13 Abrasiivjugatöötuse üldine skeem

Kasutusala. Abrasiivveejugatöötusel saab töödelda erinevaid tasapindu, kujupindu ja väikeste raadiustega pindu. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,1–0,63 µm ja töötlustäpsus

IT 7. Abrasiivjugatööstlust kasutatakse järgmistes valdkondades: pindade puhastamine (valandid, sepsed jm); pindade ettevalmistamine edaspidiseks pindade katmiseks (lakkimine, galvaanilised katted, emailimine jne); pindade ettevalmistamine liimimiseks; keerulise kujuga detaili pindade pinnakareduse vähendamine eelneva täpsuse säilitamisega; dekoratiivtööstlus.

Töödeldavad materjalid. Abrasiivveejugatööstlusel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu teras, malm, alumiiniumsulam, vasesulam ja tsink [5.2, 5.4].

5.2 Metallide keevitamine

Keevitamine on liitmisprotsess, millega saadakse mittelaktiivõetav kinnisliide ehk keeviskoost kahe või enama liidetava detaili kohaliku kuumutamise, surve abil või kombineeritult nii kuumutamist kui ka survet kasutades. Vajadusel tuuakse õmblusesse lisamaterjal traadi, varda või pulbri kujul. Keevitamist kasutatakse peamiselt metallide liitmisel, vähemal määral ka plastide ja komposiitmaterjalide liitmisel.

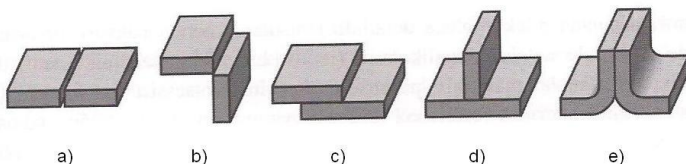
Keevitamise ajalugu ulatub aastatuhandete taha ning jätkub ka tänapäeval järjest uute innovaatiliste lahendustega väga laias diapasoonis, nt keevitusmetallurgias, protsessiparameetrite reguleerimises, protsesside omavahelises kombineerimises, seadmete arengus, protsessi adaptiivses juhtimises ja kvaliteedi automatiseeritud kontrollimises.

Täiesti uute keevitusprotsesside leiutamise viimane laine jääb 1950. aastatesse. Isegi sellised tööstuses alles 1980. aastatel laiemalt kasutusele võetud protsessid, nagu elektronkiir- ja laserkeevitamine, on tuntud juba 1957. ja 1960. aastast. Ka 1991. aastal patenteeritud ja kohe tööstuses rakendust leidnud otshõõrdkeevitus FSW on oma tööpõhimõttelt juba varem tuntud hõõrdkeevitusprotsessi (1957) edasiarendus. Tuntud protsesside kasutusvõimaluste laiendamine protsessi modifikatsioonide kaudu ongi üks kaarkeevitamise tänaseid arengu trende.

5.2.1 Keevisliited ja -õmblused

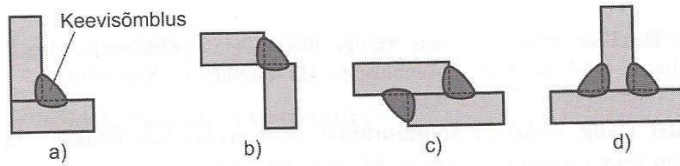
Keevitamisel moodustuvad keevisõmblused ja valmivad keevisliited. Keevisliide on kahest või enamast osast keevisõmblusega ühendatud kinnisliide. Ühendus tekib liidetavate pindade või liidetavate servade kontaktpinnas.

Keevisliited jaotatakse olenevalt ühendatavate detailide vastastikusest asendist järgmiselt: pötkliide, nurkliide, katteliide, T-liide ehk vastakliide ja servliide (sele 5.14).



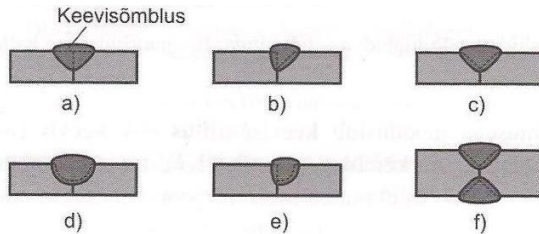
Sele 5.14 Keevisliited a) pötkliide, b) nurkliide, c) katteliide, d) T-liide ehk vastakliide e) servliide

Keevisõmblused jagunevad: nurkõmblus, põkkõmblus, korkõmblus, soonõmblus, punktõmblus ja joonõmblus. Nurkõmblused võivad olla ühe- või kahepoolsed (sele 5.15).



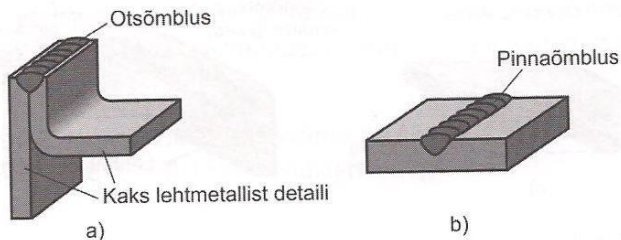
Sele 5.15 Nurkõmblused a) ühepoolne vastakliites, b) ühepoolne nurkliites, c) kahepoolne katteliites d) kahepoolne vastakliites

Põkkõmblustel on parema läbikleepituse saavutamiseks liidetavad servad kas ühelt või mõlemalt poolt töödeldud (faasitud) (sele 5.16).

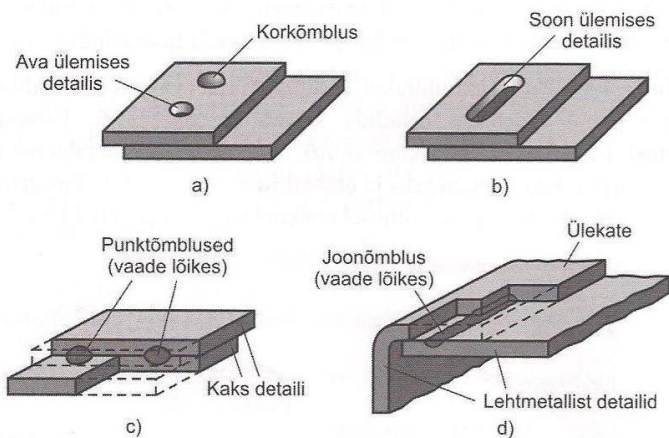


Sele 5.16 a) I-õmblus, b) PV-õmblus, c) V-õmblus, d) U-õmblus, e) J-õmblus. f) X-õmblus

Õhukeste lehtede keevitamisel kasutatakse sageli otsõmblust, kus üks servadest või mõlemad on painutatud (sele 5.17 a). Tuntakse veel pinnaõmblust, kus läbimid keevitatakse detaili pinnale (sele 5.17 b).

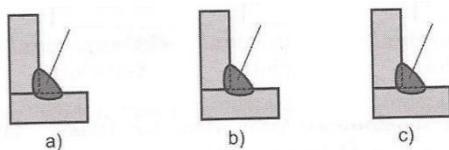


Sele 5.17 Otsõmblus ja pinnaõmblus



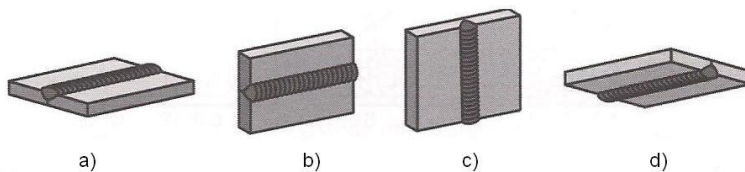
Sele 5.18 a) korkõmblus, b) soonõmblus, c) punktõmblus, d) joonõmblus

Õmbelse ristlõikekuju järgi jagatakse kumer-, tasa-, ja nõgusõmbelus (sele 5.19).



Sele 5.19 a) kumerõmblus, b) tasaõmblus, c) nõgusõmblus

Keevitamise ruumilise asendi järgi jagatakse õmbused all-, rõht-, püst- ja laeõmblusteks (sele 5.20).



Sele 5.20 a) allõmblus, b) rõhtõmblus, c) püstõmblus, d) laeõmblus

Päittäisliitos	Pienaliitos	Putkenhitsaus	Pienaliitos
 AWS: 1G EN: PA	 AWS: 1F EN: PA	 AWS: 1G EN: PA	 AWS: 2F EN: PB
 AWS: 2G EN: PC	 AWS: 2F EN: PB	 AWS: 2G EN: PC	 AWS: 2F EN: PB
 AWS: 3G EN: PG (alaspäin) PF (ylöspäin)	 AWS: 3F EN: PG (alaspäin) PF (ylöspäin)	 AWS: 5G EN: PG (alaspäin) PF (ylöspäin)	 AWS: 5F EN: PG (alaspäin) PF (ylöspäin)
 AWS: 4G EN: PE	 AWS: 4F EN: PD	 AWS: 6G EN: H-L045	 AWS: 4F EN: PD

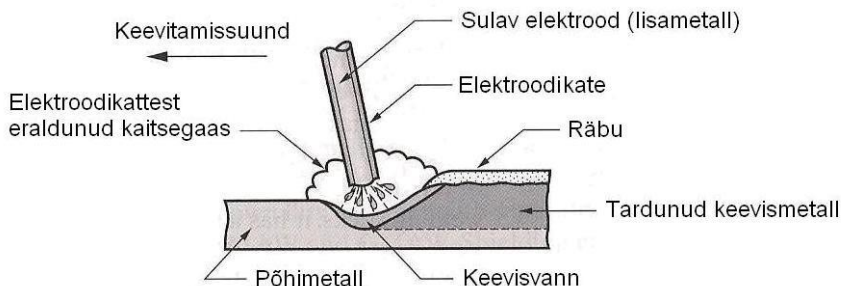
Sele 5.21 Ömbluste keevitamise ruumilise asendi tähistused AWS ja EN järgi

5.2.2 Keevitusprotsessid

Erinevaid keevitusprotsesse ja -meetodeid on teada üle saja. Enamikus tööstusharudes on enamlevinud metallide kaarkeevitamine. Tähtsamad kaarkeevitusprotsessid on MMA (111), MAG (135 ja 136), MIG (131), SAW (12), TIG (141) ja PAW (15). Sulgudes on keevitusprotsesside numbertunnused standardi EN ISO 4063 järgi. Kasutatava lisametalli koguse järgi otsustades on kaarkeevitusprotsessidest enim kasutusel protsessid MIG, MAG ja SAW.

Käsikaarkeevitus (MMA)

Käsikaarkeevitus on protsess, kus kaarleek põleb kaetud sulava elektroodi ja keevitava detaili vahel. Keevituselektroodi liigutatakse käsitsi. Keevitusseade on lihtne ja kompaktne, seetõttu on isegi ajutise keevitustöökoha organiseerimine lihtne. See protsess võimaldab keevitada kõikides ruumilistes asendites, nii sees kui ka välitingimustes ja isegi vee all. Keevitada saab materjali paksusega alates 1,0 mm.



Sele 5.22 Käsikaarkeevitus

Protsessi eelisteks on head keevitusomadused, väga rikkalik lisamaterjali valik, lihtsad ja odavad seadmed, keevitusparameetrite lihtne seadistamine, hea juurdepääsetavus, suur tööpiirkond (pikad kaablid), võimalus kasutada välitingimustes ja montaažitöödel.

Puudusteks on madal kasutegur, väike tootlikkus, süttimine, tekib palju alustus- ja lõpetuskohti elektroodi vahetamise tõttu, räbupesad, elektroodide säilitamine ja raapaisujäljed.

Keevitatavad materjalid on peamiselt terasesulamid ja malmid, samuti nikli- ja vasesulamid. Alumiiniumsulameid keevitatakse peamiselt remonttöödel.

Käsikaarkeevitus oli enamlevinud keevitusprotsess möödunud sajandil. Praegu kasutatakse seda arenenud tööstusriikides peamiselt remontkeevitusena.

MIG-keevitus ja MAG-keevitus

Need on kaarkeevitusprotsessid, kus kaarleek põleb sulava elektroodi ehk keevitustraadi ja keevitatava detaili vahel. Kaarleeki ja sulametallivanni kaitseb kaitsegaas. MIG-keevitusel kasutatakse keevitatava metalli suhtes inertset kaitsegaasi, MAG-keevitusel aga aktiivset kaitsegaasi.

MIG/MAG-keevitusseade koosneb vooluallikast, keevitustraadi etteande mehhanismist, maanduskaablist, keevituspõletist, vajadusel vesijahutusseadmest ning kaitsegaasiballonist või gaasivõrgu ühendusest. Keevitusseadmed on tihti modulaarsed, kus vooluallikas, keevitustraadi etteande mehhanism ja jahutusseade on moodulitena, mida võib vastavalt vajadusele kokku sobitada. Keevitustraadi etteande mehhanismi ülesandeks on sööta keevitustraati traadipoolilt või traaditünnist põletini. Keevitustraadi etteande mehhanism võib asetseada vooluallikast eraldi, seega pole vaja kogu keevitusseadet töö käigus pidevalt teisaldada. Keevitustraadi etteande mehhanismi kaudu saab seadet ka sisse ja välja lülitada ning seadet reguleerida. Keevitamise ajal keevituspüstol kuumeneb, seepärast tuleb seda jahutada kas gaasi või vedelikuga. Gaasjahutusega püstolis jahutab püstolit kasutatav kaitsegaas. Vedelikjahutusega püstoli korral on vajalik vesijahutusseade, mille abil jahutusvedelik ringleb.

MIG/MAG-keevituse põhiparameetrid on keevitustraadi läbimõõt, traadi etteandekiirus, voolukontakti kaugus, keevitusvoolu tugevus, kaare pinge, keevituskiirus, keevituspüstoli asend.

Seda on võimalik kasutada kõikides keevitamise ruumilistes asendites. Keevitada saab terase ja alumiiniumsulameid, samuti vase-, nikli-, ja titaanisulameid. Keevitatava materjali paksumus on alates 0,3 mm. Võrreldes käsikaarkeevitusega on eeliseks tunduvalt suurem tootlikkus, õmblust pole vaja puhastada rübust, on kergesti automatiseeritav ja robotiseeritav. Puuduseks on tundlikkus tõmbetuulele ja vajadus pritsmetest puhastada.

Madala soojussisestusega MIG/MAG protsessi modifikatsioonid

Üha õhemate lehtmetailide kasutuselevõtt eelkõige autotööstuses, aga ka teistes tööstusharudes, ning järjest kasvavad nõuded kvaliteedile ja tootlikkusele, on sundinud keevitusseadmete valmistajaid tegema arendustööd kaarleegi karakteristikute ja seadmete juhtimise vallas.

Õhukese lehtmetaili keevitamisel on deformatsioonide vähendamise seisukohalt oluline keevitada madala soojussisestusega. Seejuures ei tohi tekkida pritsmeid ja tootlikkus peab olema kõrge. Sellise tulemuse võib saavutada laserkeevitamisega, kuid selle protsessi kasutamist takistavad tihti liiga kõrged nõuded õmbluse ettevalmistuse täpsusele. Laialt kasutusel oleva MIG/MAG protsessi puhul on ka lühiskaarega keevitamisel soojussisestus ikkagi liiga suur ning lisaks tekib palju pritsmeid.

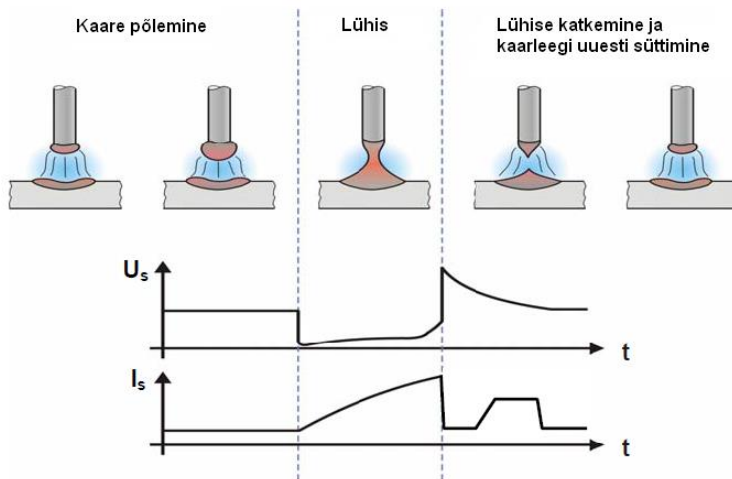
Pritsmete tekkimine ja raskesti hallatav sulametallivann on olnud probleemiks ka juurelābimi keevitamisel traditsioonilise MIG/MAG-protsessiga. Tavaliselt juurelābimi keevitamisel kasutatavatest MMA-, TIG- ja MIG/MAG-protsessidest on aga viimane tootlikuim. Juurelābim on mitmelābimilise õmbluse esimene lābim ja selle keevitamine on vastutusrikas ja sageli aeganõudev tööoperatsioon. Seetõttu on selle tõhustamine tootlikkuse vaatevinklist eriti oluline. Seetõttu on MIG/MAG-protsessi arendamisel pööratud tähelepanu ka lühiskaarkeevituse omaduste parandamisele juurelābimi keevitamisel.

Arenenud digitaaltehnik keevitusseadmetes võimaldab nüüd senisest tunduvalt kiiremat seadme juhtimist ning erinevate tarkvara rakenduste kasutamist MIG/MAG-protsessis toimuva materjalisiirde paremaks juhtimiseks. Kiir-kaamera kasutamine on olnud vältimatu lisamaterjali siirde jälgimises ja protsessi parameetrite mõju mõistmisel.

Keevitusseadmete arendustegevuse tulemusena on sündinud mitmeid erinevaid MIG/MAG-protsessi lühiskaarkeevituse modifikatsioone, kus jälgides ja muutes kasvootugevust, kaare pinget, polaarsust või lisamaterjali liikumissuunda, saavutatakse pritsmeteta õmblus ning see on madala soojussisestuse ja suure tootlikkusega.

Järgnevalt on kirjeldatud mõned keevitusseadmete valmistajate välja töötatud MIG/MAG-protsessi lühiskaarkeevituse modifikatsioonid.

ColdArc meetodi töötab välja keevitusseadmete valmistaja EWM. See on MIG/MAG-protsessi modifikatsioon, et savutada väga madalat soojussisestust. Meetod põhineb pideval pingel mõõtmisel ning võimsuse muutmisel vajalikul hetkel. Keevitusseadme kiire reageerimine põhineb digitaalse signaali kiire töötlemise võimalusel. Tööpõhimõtteks on võimsuse väga kiire langetamine vähem kui 1 μ s jooksul vahetult enne süttimist, tänu millele süttimine toimub väga pehmelt ning pritsmeid tekib väga vähe (sele 5.23).



Sele 5.23 Keevitusvoolu ja pinge muutused lisamaterjali siirdumise eri etappidel Cold Arc meetodil

See meetod võimaldab keevitada väga õhukesi materjale, paksusega alates 0,3 mm. Liidetavad materjalid, kas keevitamise või jootmise teel, on süsinikteras, roostevaba teras, tsingitud teras, segaliited nagu teras + Al, teras + Mg, Al + Mg ja magneesiumisulamid. Selle meetodiga on võimalik kasutada keevituskiiruseid kuni 4 m/min. [5.8]

CMT-keevitusmeetodi töötas välja keevitusseadmete tootja Fronius. Meetod erineb teistest siin kirjeldatutest oluliselt selle poolest, et põhineb keevitustraadi liikumissuuna muutmisel. Traadi liikumise reguleerimine on lõimitud alluma kogu protsessi parameetrite kontrollile.

1. Kaarleegi põledes liigub keevitustraad keevisvanni suunas.
2. Hetkel, kui traat kastetakse sulavanni, kaarleek kustub. Samal ajal vähendatakse voolutugevust.
3. Traat tõmmatakse tagasi, mis aitab kaasa tilga irdumisele. Voolutugevus hoitakse madal.
4. Traat liigub keevisvanni suunas ning tsükkel algab uuesti.

Seda meetodit kasutatakse õhukeste alates 0,3 mm materjalide keevitamiseks ja kaarjootmiseks. Keevitatavad materjalid on süsinikteras, roostevaba teras, tsingitud teras, Al ja teras-alumiiniumi segaliited. [5.9]



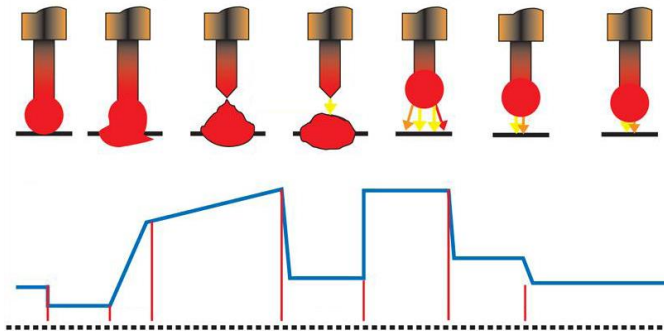
Sele 5.24 CMT-meetodi faasid

Cold Processi ehk CP arendas keevitusseadmete valmistaja Cloos (Carl Cloos Schweiss-technik GmbH). See on MIG/MAG-protsessi modifikatsioon õhukeste (0,7–2 mm) materjalide keevitamiseks.

Madalam soojussisestus saavutatakse keevitustraadi polaarsuse hetkelise muutmisega positiivsest negatiivseks. Sel hetkel põhimaterjali sulatav energiahulk väheneb ning keevitustraadi sulamine kasvab järsult. Negatiivse faasi aega on võimalik reguleerida vastavalt valitud karakteristikule. Kuna põhimaterjal on külmem, on põkuga õmbluste keevitamine lihtsam. Pritsmeid tekib vähe. Väiksema soojussisestuse tõttu tekib vähem deformatsioone. Sobib õhukese süsinikerase, roostevaba terase, kõrgtugeva terase, alumiiniumi, tsingitud terase keevitamiseks ja kaarjootmiseks. [5.10]

RMD (Regulated Metal Deposition) on Miller Electric Mfg Co meetod, millega saavutatakse 5–20% väiksem soojussisestus. RMD põhineb voolutugevuse pideval jälgimisel ja reguleerimisel kaarleegi erinevates faasides.

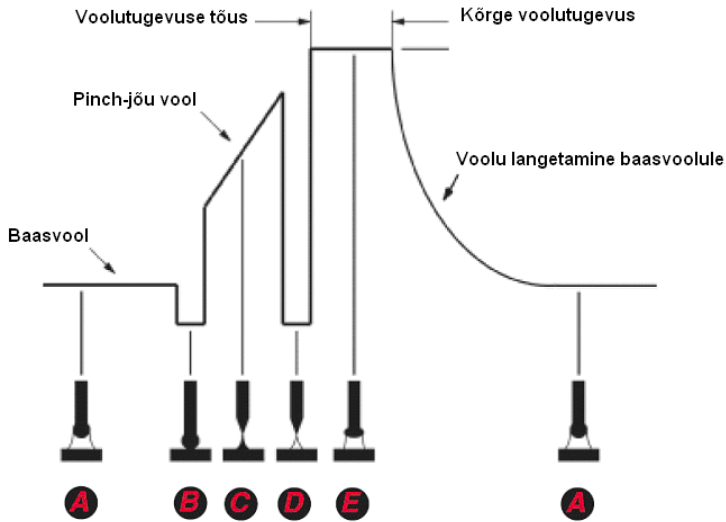
RMD-protsessis kaarleegi põledes keevitusvool hoitakse madal seni, kuni lisamaterjalitilk kasvab piisavalt suureks, et ulatuda sulavanni. Lühise tekkimisel hakatakse voolutugevust tõstma, et tekitada pintšjõudu. Kui pintšjõu tekkimiseks on saavutatud piisavalt suur keevitusvool, hoitakse seda konstantsena tilga irdumiseni. Samal ajal jälgitakse pidevalt irdumisetke. Kui seade avastab tilga irdumise, mis toimub enne tegelikku lühise avanemist, vähendatakse kiiresti voolutugevust, mis vähendab pritsmete teket. Tilga eraldudes tõstetakse voolutugevust lisamaterjali sulatamiseks. Tilga sündides voolutugevust vähendatakse ja tilk hakkab kasvama, kuni tekib uus lühis. Kui aga lühise tekkimine kestab kaua, vähendatakse voolutugevust veelgi, et kaarleegi surve ei suruks sulavanni lohku. Seel 5.25 on näha keevitusvoolu muutused lisamaterjali siirdumise eri etappidel. [5.11]



Sele 5.25 Keevitusvoolu muutused lisamaterjali siirdumise eri etappidel RMD-meetodil [5.11]

STT ehk *Surface Tension Transfer* meetodi patenteeris Lincoln Electric Company juba 1988. aastal, kuid tõi selle turule alles 1994. aastal. STT-protsessis kasutatakse voolu tõstmist kahe erineva impulssiga. Lisamaterjalitilk hakkab moodustuma juba põhivoolul. Kui tilk puutub vanni, tekib lühis ja hetkeks vähendatakse voolutugevust põhivoolust madalamale tasemele.

Seejärel algab esimene voolu kasvuetapp, mis suurendab pintšjõudu ja lisamaterjalitilk hakkab irduma. Tilk eraldub kõrgel voolutugevusel, mille järel taas hetkeks vähendatakse voolutugevust põhivoolust madalamale tasemele. Seejärel tuleb veel kõrge vooluimpulss, mille eesmärk on kujundada sulavanni ja tagada sobiv soojussisestus.



Sele 5.26 Keevitusvoolu muutused lisamaterjali siirdumise eri etappidel STT-meetodil



Sele 5.27 Kiir-kaamera pildid lisamaterjali siirdumisest STT-meetodil

See meetod sobib juureõmbluste ja õhukeste teraste, roostevaba teraste ja tsingitud teraste keevitamiseks. [5.12]

WiseRoot ja **WiseThin** on samasse perre kuuluvad MIG/MAG-protsessi modifikatsioonid. Kuna vajadused kaarleegi reguleerimisele ja sulavanni käitumise kontrollile juureõmbluse keevitamisel erinevad veidi nõuetest õhukese materjali keevitamisel, on Kemppi Oy-s välja töötanud **WiseRoot** meetodi juureõmbluse keevitamiseks ning **WiseThin** meetodi õhukese materjali keevitamiseks.

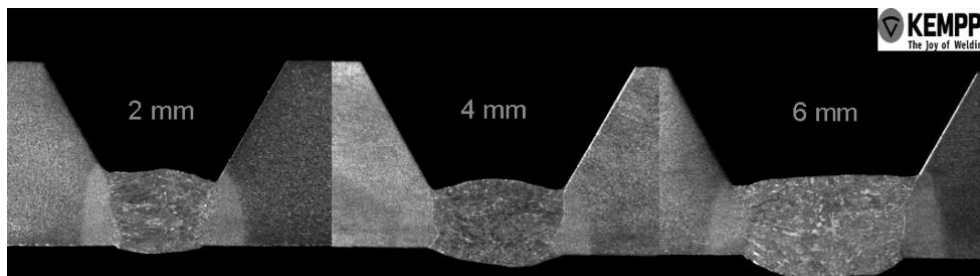
WiseRoot meetod on modifitseeritud MIG/MAG keevitusprotsess, mis on välja töötatud spetsiaalselt juureõmbluse keevitamiseks. See põhineb lisamaterjali siirdumise jälgimisel ja voolutugevuse kiirel reguleerimisel, mida kontrollib seadme tarkvara.

Protsessi põhimõte on näha seel 5.28, kus on näidatud voolutugevuse muutused lisamaterjali siirdumise etappidel. See protsess koosneb kahest erinevast voolutõusu etapist. Esimese voolutõusu etapi käigus tekib lühis ja lisamaterjal läheb sulavanni. Nagu seel on näha, on enne esimest voolu tõusu lühiajaline madalam voolutugevuse tõus, mil lisamaterjal liigub sulavanni. Voolu kiire tõstmine tekitab pintšjõu, mis põhjustab lisamaterjalitilga irdumise. Tilga irdumisele aidatakse kaasa vähendades aeglaselt voolutugevust. Kui tilk on täielikult irdunud, süttib kaarleek ja algab teine voolu tõusuetapp, mis kujundab sulavanni ja tagab piisava läbikuumituse. Keevitusseade jälgib tilga irdumist ja õigeaegne voolu langus ja tõus tagavad, et kaarleek süttib pritsmeteta.



Sele 5.28 Voolu muutused lisamaterjali siirdumise eri etappidel WiseRoot meetodil

See võimaldab keevitada juureõmbelusi põku suurusega 1–10 mm ning muutuva põku suurusega õmbelusi ilma voolutugevust muutmata (sele 5.29).



Sele 5.29 Erineva põkuga õmbelused on keevitatud sama voolutugevusega

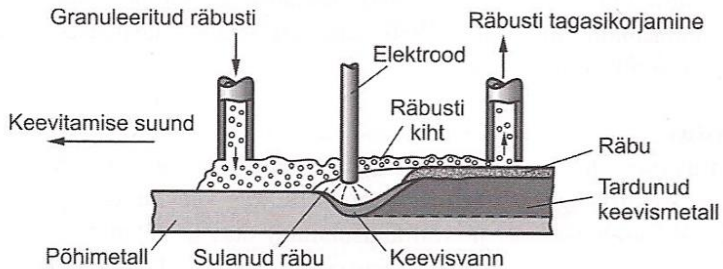
WiseThin meetodiga saavutatakse 5–25% väiksem soojussisestus kui tavalise lühiskaarega. See on oluline nii õhukese lehtmaterjali keevitamisel kui ka kõrgtugevate teraste puhul. Tööpõhimõte on sarnane WiseRoot meetodiga, erinevused on karakteristikutes. [5.13]



Sele 5.30 WiseThin meetodiga saavutatakse madal soojussisestus ja optimaalne keevisõmbuluse geometria. Materjali paksus 1,0 mm [5.13]

Räbustikaarkeevitus (SAW)

Räbustikaarkeevitus on kaarkeevitusprotsess, kus kaarleek põleb keevitustraadi ja keevitava detaili vahel räbusti kihi all (sele 5.31).



Sele 5.31 Räbustikaarkeevitus

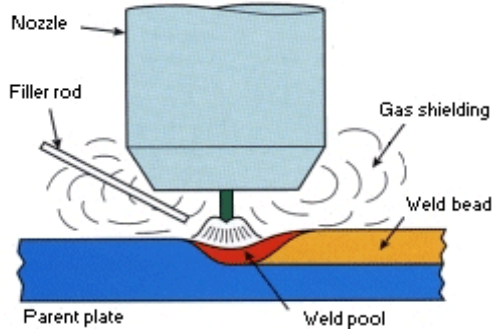
Keevisvanni ja kaarleeki kaitseb ümbritseva õhu eest räbustikiht ja räbustist tekkinud sula räbu. Keevituselektroodina ja lisamaterjalina kasutatakse ühte või ka mitut traati korraga, mõnikord ka linti.

On võimalik keevitada ka välitingimustes, kuna kaarleek ja keevisvann on hästi kaitstud. Sobib pökk- ja nurkõmbuluste keevitamiseks allasendis.

Protsessi eelisteks on keevisõmbuluse hea kvaliteet, suur tootlikus, suur keevituskiirus, sügav läbikeevitus, ei teki pritsmeid, see on tuntetu tõmbetuulele ja kergesti automatiseeritav. Puudusteks on rangemad nõuded detailide valmistus- ja koostamistäpsusele, piiratud keevitusasend, kallid seadmed.

TIG-keevitus

TIG-keevitus on protsess, kus kaarleek põleb sulamatu elektroodi ja keevitatava metalli vahel. Kaarleeki ja sulametallivanni kaitstakse inertgaasiga. Vajadusel tuuakse õmblesse liisametall varda või traadi kujul. Kasutatakse peamiselt käsitsi keevitamisel ja sarnaneb keevitustehnika poolst gaaskeevitamisega. Protsessi on võimalik ka mehhaniseerida.



Sele 5.32 TIG-keevitus

Selle protsessi peamiseks eeliseks on hästi hallatav keevisvann ja läbikeevitus. See on laialt kasutatud protsess, mis on mõnikord kvaliteetse õmbelse saavutamiseks ainuvõimalik. See on parim valik, kui juureõmblust on vaja keevitada ühelt poolt.

Sobib kõikide keevitatavate materjalide keevitamiseks. Enamasti legeerteraste ja alumiiniumisulamite keevitamise või kõrgete kvaliteedinõuetega õmbluste või nende juurelähimite keevitamisel.

Kasutatakse õhukeste materjalide, paksusega alates 0,1 mm keevitamisel või paksude materjalide juureõmbelse või traagelõmbelse keevitamisel.

Kuna kaarleegi energiatihedus ja termiline kasutegur on madalamad kui muudel kaarkeevitusprotsessidel, ei ole see protsess tootlik suuremate paksustega materjalide keevitamisel.

Õmbelse pind on puhas ja üldjuhul ei vaja puhastamist, räbu- ja oksiidipesasid ei teki.

Sobib kõikide liidete keevitamiseks kõikides ruumilistes asendites nii tootmises, montaaži- kui ka remonttöödel. Väli tingimustes keevitamiseks tuleb luua kaitse tõmbetuule eest.

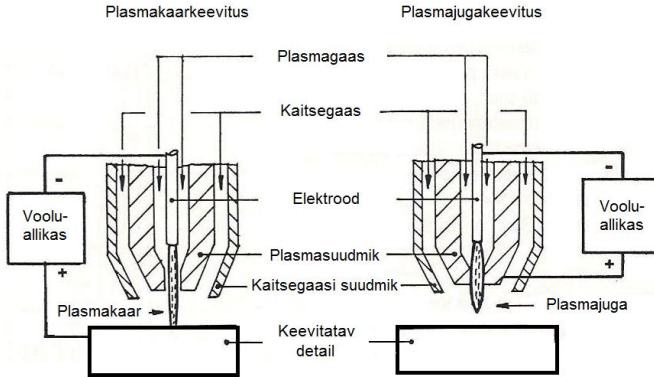
See on oluline ja laialdaselt kasutatav protsess, kuigi lisamaterjali kulutusena halvasti võrreldav teistega, kuna lisamaterjali kasutamine minimaalne.

Räbustikaarkeevituse eelised on õmbelse hea kvaliteet, hästi hallatav keevisvann ja läbikeevitatus, sobib hästi õhukeste materjalide keevitamiseks, puuduvad pritsmed, ei teki räbu, kompaktne seade ja kerge põleti.

Puudusteks on madal tootlikkus paksude materjalide keevitamisel, tundlik tõmbetuulele ning õmbelse juure pool vajab kaitset.

Plasmakeevitus (PAW)

Plasmakeevitus on protsess, kus keevitava detaili sulatamiseks kasutatakse plasmakaart või -juga. Plasmakaarkeevitusel põleb kaarleek sulamatu elektroodi ja keevitava detaili vahel. Kasutatakse elektrit juhtivate materjalide keevitamiseks. Plasmajugakeevitusel põleb kaarleek sulamatu elektroodi ja plasmasuudmiku vahel. Kasutatakse plasmalõikamisel, pindamisel ja elektrit mittejuhtivate materjalide liitmisel.

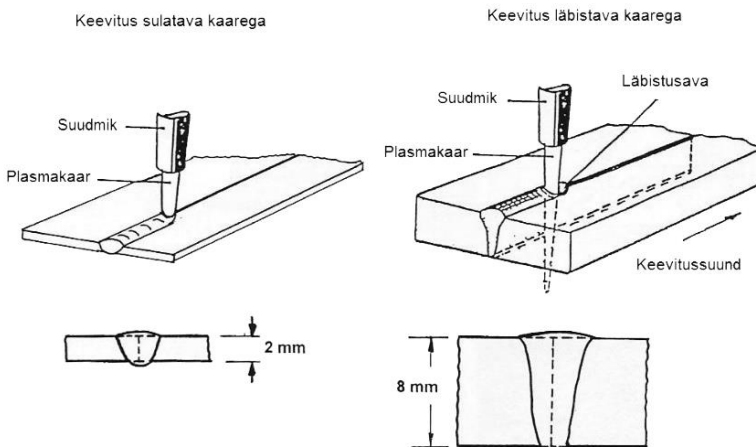


Sele 5.33 Plasmakaarkeevitus ja plasmajugakeevitus

Keevitatakse peamiselt allasendis, aga ka vertikaal ja horisontaalasendis (AI).

Kasutatakse õhemate materjalide keevitamisel, materjali paksus alates 0,01 mm. Peamiselt keevitatakse vastakliiteid materjalipaksusega 3–8 mm. Üle 10 mm materjalide korral keevitatakse vaid esimene läbim ja järgmised mõne tootlikuma protsessiga.

Tööpõhimõtte ja kasutatava voolutugevuse järgi jagatakse protsess sulatava kaarega ja läbistava kaarega plasmakeevituseks.



Sele 5.34 Plasmakaarkeevitussulatava ja läbistava kaarega

Sulatava kaarega plasmakeevitusel kasutatakse voolutugevusi kuni 200 A ja keevitatava materjali paksus on kuni 3 mm. Eriti õhukeste materjalide, paksusega 0,1–0,50 mm, keevitamist, kus kasutatavad voolutugevused on 0,1–15 A tuntakse mikroplasma keevitusena.

Läbistava kaarega plasmakeevitusel keevitatava materjali paksus 3–12 mm ja kasutatav keevitusvool 100–500 A.

Seda kasutatakse laialdaselt mahutite ja torustike keevitamisel, autotööstuses jne.

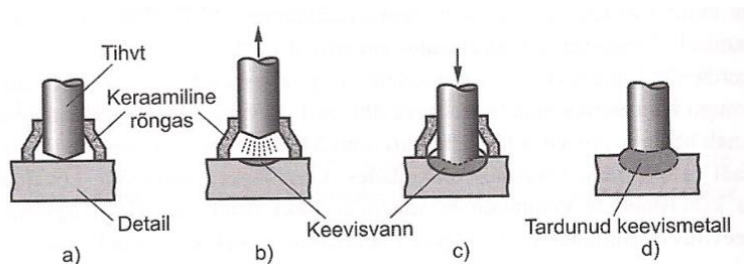
Keevitatavad materjalid on terased, alumiiniumi-, nikli-, vase- ja titaanisulamid.

Protsessi eelisteks on keevisõmbluse väga hea kvaliteet, suur keevituskiirus, madal ja ühtlane õmblus, väikesed deformatsioonid ning ei teki pritsmeid.

Puudusteks on seadmete kõrge hind ning põletil on suuremad gabariidid kui teistel kaarkeevitusprotsessidel, mis piirab kasutusala.

Vastakkaarkeevitus

Vastakkaarkeevitus on protsess, mida kasutatakse mitmesuguste terasest, vasest ja alumiiniumsulamitest poltide, tikkpoltide, tihvtide jms plaatide külge keevitamisel. Keeviskaart kaitstakse õhu mõju eest detaili ümber asetatava keeramilise rõngaga. Protsessi etapid on illustreeritud seil 5.35. Protsessi eeliseks on suur tootlikkus ja keevisliite kõrge kvaliteet.

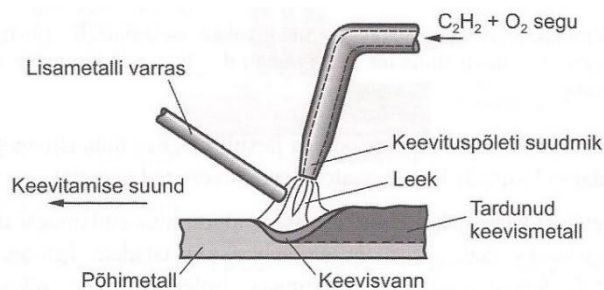


Sele 5.35 Vastakkaarkeevituse etapid: a – tihvti kohale asetamine; b – tihvti eemaldamine ja kaare süütamine; c – tihvti surumine keevisvanni; d-liite moodustumine ja keeramilise rõnga eemaldamine

Gaaskeevitus

Gaaskeevitus on sulakeevitusprotsess, kus energiaallikaks on põlevgaasi ja hapniku segu põlemisel tekkiv leek. Põlevgaasina kasutatakse tavaliselt atsetüleenit. Paksemate materjalide keevitamisel kasutatakse lisametalli vardaid.

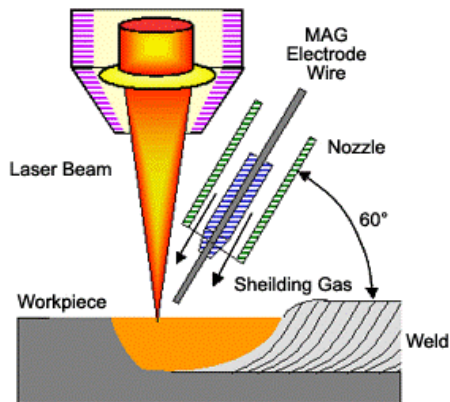
Kuna gaaskeevitus on väikese tootlikkusega, kasutatakse seda peamiselt remontkeevitusena. Saab keevitada teraseid, malme, vase- ja alumiiniumsulameid. On võimalik keevitada kõikides ruumilistes asendites.



Sele 5.36 Gaaskeevitus

Laserkeevitus

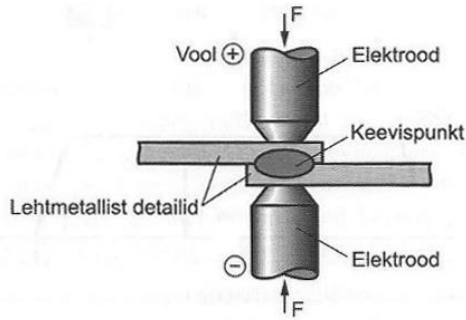
Laserkeevitus on protsess, kus keevitava materjali sulatamiseks suunatakse liitekohale laserkiir. Kaitsegaasina kasutatakse argooni (Ar) või heeliumit (He) või nende segusid. Laserkeevitus saab kasutada suuri keevituskiirusi ja keevitada kitsaid õmblusi ning see põhjustab vähe deformatsioone. Puuduseks on laserkiire täpse fokuseerimise vajadus, mis eeldab detailide täpset valmistamist ja paigaldamist. Tootlikkuse kasvatamiseks kasutatakse laserhübriidkeevitust, kus laserkeevitusele on liidetud MIG/MAG-protsess. Keevitatavad materjalid on metallid, plastid ja komposiitmaterjalid.



Sele 5.37 Laserhübriidkeevitus

Kontaktkeevitus

Kontaktkeevitus on keevitusprotsesside rühm, kus liitekohta kuumutatakse läbiva elektrivoolu toimel ja liidetavatele osadele avaldatakse survet. Enamlevinud kontaktkeevitusmeetod on punktkontaktkeevitus (sele 5.38).



Sele 5.38 Punktkontaktkeevitus

Punktkontaktkeevitust kasutatakse peamiselt lehtmetailist toodete keevitamisel, näiteks autotööstuses, kus see on pea täielikult robotiseeritud.

Keevitatavad materjalid on süsinikeras, roostevaba teras ja alumiinium. Punktkontaktkeevituse eelisteks on suur tootlikus ja lihtne automatiseeritavus.

Puudusteks on õmbluste madal tõmbe- ja väsimustugevus ning defektset õmblust ei saa parandada.

Lisaks punktkontaktkeevitusele kasutatakse veel reljeefkontaktkeevitust, kus keevisõmblus tekib ühe või mõlema detaili pinnast väljaulatuvate osade vahel ja joonkontaktkeevitust, kus keevisõmblus tekib katteliites detailide vahel neid kokkusuruvate ja keevitusvoolu rakendavate ketaselektroodide toimel.

Pökk-kontaktkeevitust kasutatakse pökkliidete saamiseks. Detailid liidetakse terve ristlõike ulatuses, sulatades neid läbiva elektrivooluga või kasutades induktsoonkuumutust ja rakendades seejärel survejõudu. Eristatakse järgmisi protsesse: sulatuspökk-kontaktkeevitus, takistuspökk-kontaktkeevitus, löökkontaktkeevitus, kõrgsageduskontaktkeevitus ja kõrgsagedusinduktsioonkeevitus

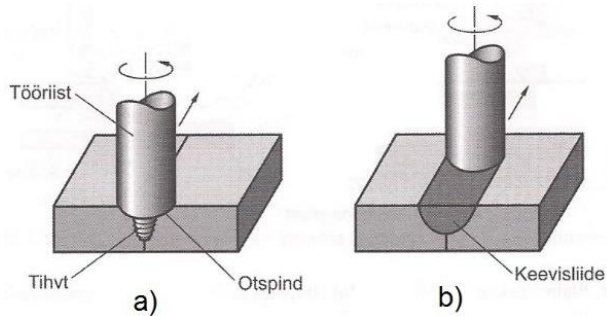
Tardfaaskeevitusprotsessid

Tardfaaskeevitus on keevitusprotsesside rühm, kus detailide ühendamise toimub allpool materjalide sulamistemperatuurini. Kuna metalli ei kuumutata sulamistemperatuurini, siis keeviliitel puudub termomõjutsoon ja keevisõmblust ümbritsev ala säilitab oma esialgsed mehhaanilised omadused.

Tardfaaskeevitusprotsessid on sepakeevitus, külmkeevitus, valtskeevitus, hõõrdkeevitus, otshõõrdkeevitus, plahvatuskeevitus, ultrahelikeevitus ja difusioonkeevitus.

Otshõordkeevitus

Otshõordekeevitus on mehaanilisel energial põhinev tardfaaskeevituse protsess materjali kuumutamise ja tööriista otspinna pöörlemisel tekkiva hõõrdesoojuse toime ja järgneva ümberpaigutamisega.

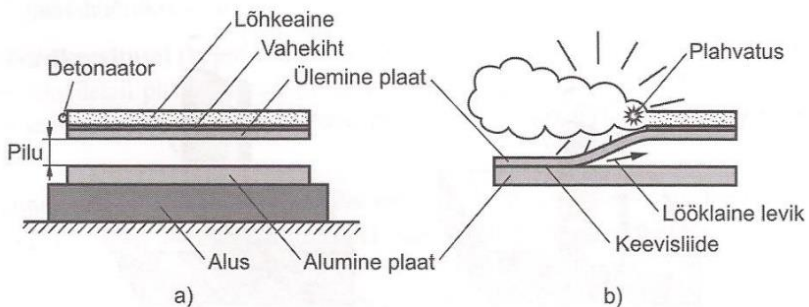


Sele 5.39 Otshõordekeevitus a) lähteolek, b) õmbluse moodustumine

Otshõordekeevitust kasutatakse plastsete metallide nagu Al, Cu, Zn ja Mg keevitamisel, aga ka alumiiniumi liitmisel terasega.

Plahvatuskeevitus

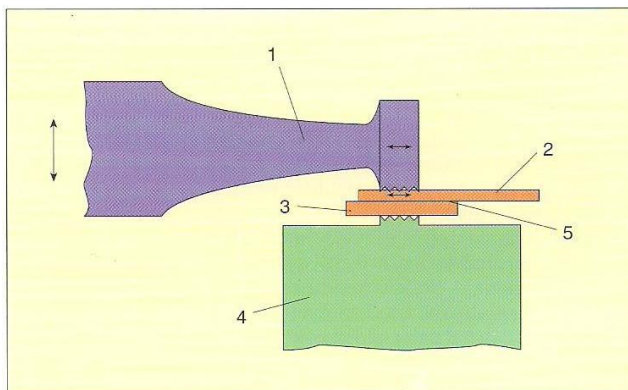
Plahvatuskeevitus on tardfaaskeevituse protsess, kus keevisliide tekib plahvatuse toimele tekkinud plastse deformatsiooni tulemusena. Peamine kasutusala on materjalide pindamine. Plahvatuskeevitusega on võimalik liita pea kõiki metalle.



Sele 5.40 Plahvatuskeevitus. a) detailid lähteolekus, b) keevitamise protsess

Ultrahelikeevitus

Ultrahelikeevitus on üks tardfaaskeevituse protsessidest, kus keevisliide saadakse liidetavate pindadega paralleelselt toimuva ultraheli võnkumise tulemusena, kusjuures liidetavatele pindadele rakendatakse väikest survet.



Sele 5.41 Ultrahelikeevitus. 1 – sonotrood, 2,3 – liidetavad detailid, 4 – alus, 5 – keevituspiirkond. Kasutatakse peamiselt Al ja Cu ning nende sulamite keevitamiseks, harvem teiste metallide liitmisel.

5.2.3 Keevitamise tootlikkuse hindamine ja tootlikkuse parandamine

Keevitamisel mõistetakse tootlikkuse all seda, kui palju keevisõmbulusi või -liiteid on keevitatud selliste ressurssidega nagu tööjõud, seadmed, materjalid jms.

Tootlikkuse hindamisel kasutatavaid näitajaid on mitmeid:

- keevituskiirus (nt cm/min);
- keevitusprotsessi toodang (nt keevisliidet/h);
- keevituse sulatusvõimsus ehk sulatatud lisamaterjali kogus ajaühikus (nt kg/h);
- keevituse kaareaja protsent (%);
- keevitatud tootete arv ajaühikus (nt tk/h);
- keevitatud toodete maht ajaühikus (nt tonni terast/aastas);
- defektide määr (nt defektide arv 100 keevisliite kohta);
- keevitatud toodete protsent ettenähtust, normitaitmise protsent (%).

Tootlikkuse hindamisel võib kasutada ühte näitajat või ka mitut koos. Tähtis ei ole kasutatavate näitajate hulk, vaid tuleb valida näitaja(d), mis annab tootlikkust ja selle muutusi kõige arusaadavamalt iseloomustavat informatsiooni ettevõttes.

Keevitatud toodete arv või keevisõmbuluse meetrid on tootega seotud näitajad ning neid on raske võrrelda ettevõtte teiste näitajatega. Kuid need võimaldavad jälgida tootlikkuse arengusuunda toote valmistamisel ettevõttesiseselt.

Sulatusvõimsus ja kaareajaprotsent on enim kasutatud näitajad. Sulatusvõimsus on ajaühikus sulatatud lisamaterjali kogus (kg/h). See on laialtkasutatud näitaja MIG/MAG- ja SAW-keevituse tootlikkuse jälgimisel. Kaareaja protsent on kaarleegi põlemise aja ning toote keevitamiseks kulunud aja suhe. Sulatusvõimsus ja kaareaja protsent on näitajad, mida on lihtne kasutada keevitusprotsesside ja keevitustöö tootlikkuse võrdlemisel.

Ettevõtte tootlikkuse parandamine on terviklik protsess, mis peab hõlmama kogu organisatsiooni. J. R. Barkhoff on esitanud viis peamist printsiipi keevitamise tootlikkuse parandamiseks ettevõttes [5.14].

1. Vähendada tarbetut keevismetalli mahtu. Kindluse mõttes nõutust suuremate õmbluste keevitamine lisab töö- ja materjalikuludid. Veel lisab asjatu soojussisestus deformatsioone keeviskonstruktsioonis.
2. Vähendada kaareaega s.t kasvatada keevitamise kiirust, kasutades optimaalseid keevitusmeetodeid, parameetreid, materjale, asendeid jne, et saada võimalikult väike kaare-aeg igale keevisele.
3. Vältida praaki ja töö ümbertegemist. Teha üks kord ja korralikult. Praagi parandamiseks kuluvad aja- ning ka materjali ressursid vähendavad tootlikkust.
4. Vähendada töö tegemise vaeva. Inimene on loomult laisk. Ükskõik millist füüsilist tööd inimene teeb, ta teeb seda minimaalse pingutusega. Tänapäeva mehhaniseerimise ja automatiseerimise võimaluste juures tuleb kõik igav, raske ja ohtlik, mida saab teha masinatega, teha masinatega.
5. Vähendada liikumise ja ooteaega. Töö on tehtud tõhusalt, kui see näib lihtne ja liikumine on graatsiline. See kehtib nii keevitamisel kui ka tantsimisel. Tuleb vältida tarbetuid liigutusi.

Keevitamise tootlikkuse tõstmine ei eelda tingimata investeringuid, vähemalt mitte suuri, kui planeerida töökorraldust, kasutada õigeid töövõtteid ja tööd kergendavaid abivahendeid ning vähendada praagi tekkimist. Pelgalt keevituskiiruse kasvatamine ei ole seega ainus viis tootlikkuse tõstmiseks.

5.2.4 Keevitamise automatiseerimine

Uued MIG/MAG-protsessi modifikatsioonid tõstavad keevitamise tootlikkust käsitsi keevitamisel, ent võimaldavad tihti kasutada inimvõimete piire ületavaid keevituskiirusi. Et täielikult ära kasutada seda potentsiaali, on loomulik nende kasutamine ka mehhaniseeritud, automatiseeritud ja robotiseeritud keevitamisel. Lisaks keevituskiiruse tõstmisele, kasvatab automatiseerimine keevitamise tootlikkust ka paranenud ergonoomia ning keeviste parema ja ühtlasema kvaliteedi kaudu.

Kuigi tihti nähakse automatiseerimise võimalikkust vaid mass- või suurseriatoonitootmises, siis erinevat tüüpi seadmed on rentaablid ka väikeseeria ning isegi üksiktootmises. Keevitamise mehhaniseerimine ja automatiseerimine ei tähenda ainult keerulisi automaatliine või robotkomplekse. See võib olla ka kergmehhaniseerimine, nt keevitustraktorid, portaalid jne. Täna-

päeval on võimalik ka mehhaniseerimise seadmetesse saada lisamõistust ja primitiivset programmeerimise võimalust ning sestap ongi sageli raske öelda, kas on tegemist mehhaniseerimise või automatiseerimisega.

Keevitamise mehhaniseerimise ja automatiseerimise kohta on mitmeid erinevaid definitsioone. Mõne kohaselt on automatiseerimine mehhaniseerimise osa [5.15], teised loevad mehhaniseerimist üheks automatiseerimise tasemetest [5.16, 5.17]. Järgnevas tekstis mõistetakse automatiseerimise all ka mehhaniseerimist ja robotiseerimist. Tabelis 5.1 on esitatud näide lihtsast jagamisest tasemeteks.

Tabel 5.1 Automatiseerimise tasemed [5.18]

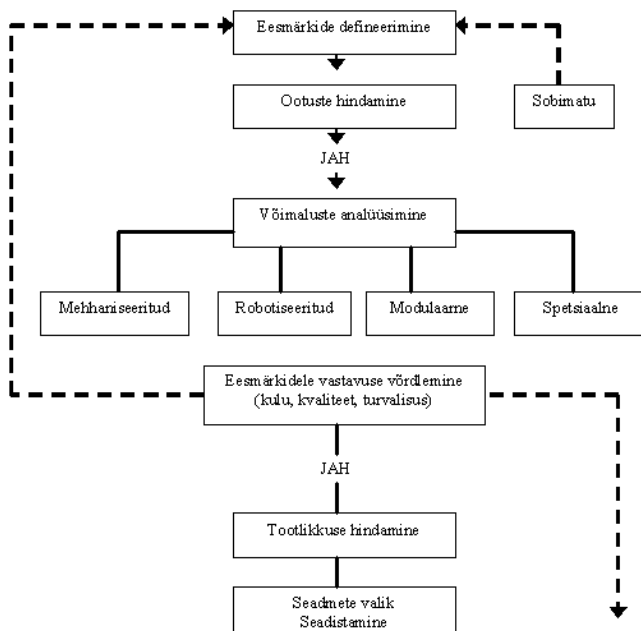
Automatiseerimise tase	Näide
Käsitsi keevitus	MMA
Poolautomaatne keevitus	Käsitsi MIG/MAG (mehhaniseeritud keevitustraadi etteandmine)
Mehhaniseeritud keevitus	SAW (mehhaniseeritud keevitustraadi etteandmine ja põleti liikumine)
Püsiprogrammiga automaatne keevitus	Keevitusautomaat
Ümberprogrammeeritav automaatne keevitus	Robotkeevitus
Adaptiivne keevitus	Keevitus põleti liikumise ja parameetrite reguleerimine reaajas
Optimeeriv adaptiivne keevitus	Kõik protsessi parameetrid mõõdetakse süsteemi poolt ja tootlikus ning kvaliteet optimeeritakse

Kuigi tabelis 5.1 on käsitsi keevitamiseks klassifitseeritud vaid MMA, mõistetakse tänapäeval käsitsi keevitamise all ka käsitsi MIG/MAG-keevitamist, sest traadi automaatne etteandmine on nii iseenesest mõistetav nagu automaatne uste avanemine ja sulgumine tänapäeva liftides.

Lihtsustatult võib öelda, et mehhaniseeritud keevitusega keevitatakse õmblusi, keevitusautomaadiga liiteid ja robotiga tooteid.

Optimaalse tulemuse saavutamiseks keevitamise automatiseerimisel on oluline osa planeerimisel. Keevitamise automatiseerimise projekti planeerimise osad ja järjekord on kujutatud seel 5.42.

Automatiseerimise otustamise skeem



Sele 5.42 Keevitamise automatiseerimise projekti planeerimise osad ja järjekord [5.19]

5.2.5 Keevitustehnoloogia arengusuunad

Keevitustööde maht maailmas kasvab, seda peamiselt arengumaades. Kuid ka Euroopas püsib vajadus keevitustööde järele. Kasvab metallkonstruktsioonide kasutamine ehitustööstuses. Samuti kaasneb tuule- ja päikeseenergia sektori kasvuga metallkonstruktsioonide vajadus.

Rakendatakse uusi protsesside modifikatsioone. Nt alumiiniumisulamite keevitamisel efektiivseks osutunud FSW kasutamine terase keevitamisel. Jätkub ka juba 80 aastat kasutatud SAW-keevituse arendamine. MIG/MAG-keevitusel on arengu eesmärkideks saavutada keevituskiirus 4 m/min ja sulatatud lisamaterjali üle 20 kg/h.

Seadme valmistajatelt saab osta kliendile individuaaltellimusel karakteristikuid konkreetsele tootele või isegi kuni konkreetsele õmblusele. Lisaks on seadmetes võimalus kasutatud keevitusparameetrite, kasutaja info, parameetrite tolerantside ületamise, tõrgete salvestamine ja siirdamine kliendi andmebaasi nii keevitamise kvaliteedi kui ka tootlikkuse jälgimiseks. Seadmed annavad ka nõu, tekib dialoog keevitaja ja seadme vahel. Optimaalsete parameetrite valik ja seadme reguleerimine hõlbustab ning see leevendab vajadust väga kõrge kvalifikatsiooniga tööjõu järele. Üha enam pakuvad seadmete valmistajad ka teenuseid, sh tuge ja koolitust mitte ainult seadmete kasutamise ja keevituse soorustehnika osas, vaid ka keevitustehnoloogia välja töötamisel.

Suurt keevitamise kiirust võimaldavad keevitusmeetodid ning ka tööjõu nappus sunnivad automatiseerima. Seda toetavad paindlike robotkomplekside kasutajasõbralikkus ja nende mõistlik hind. Paraneb keevitusseadmete ja keevitusrobotite vaheline kommunikatsioon. Keevitusseadme ja roboti juhtimine lõimuvad ühisesse juhtimispaneeli. On tõenäoline, et keevitustehnika ning teisalt kõrgemad nõuded kvaliteedile ja töö organiseerimisele, kasvatab vajadust keevitustehnikute ja -inseneride järele. Samuti kujuneb oluliseks rahvusvaheliselt tunnustatud pädevusega keevituspersonali koolitamine.

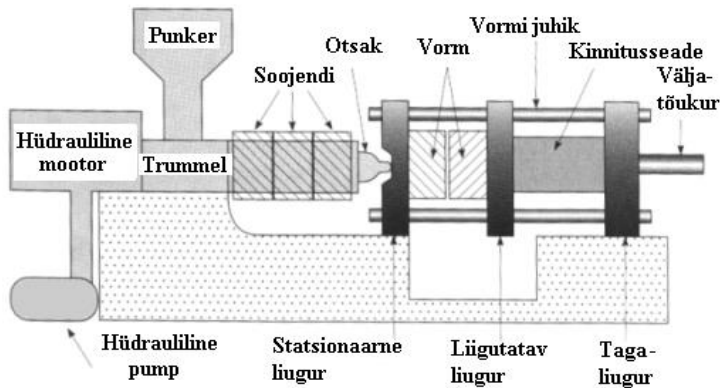
5.3. Plastide töötlemine

Selles peatükis käsitletakse levinumaid ja uudsemaid plastide töötlemise meetodeid neid lühidalt kirjeldades, esitades põhilised kasutusala, iseloomulikud joonised ning kõige enam kasutatavad materjalid.

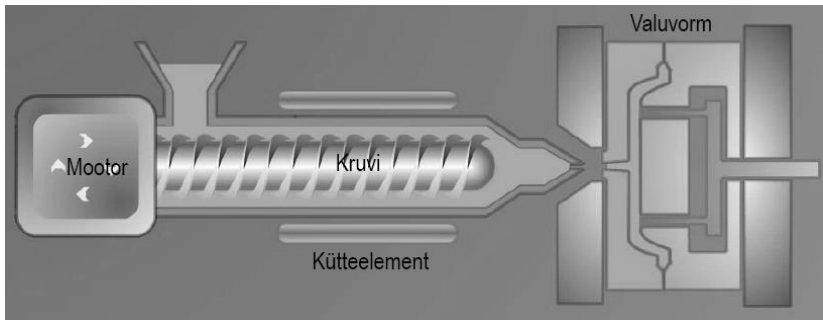
5.3.1 Survevaluvormimine

Meetodi kirjeldus. Survevaluvormimine on kõige enam levinud nii termoplastide kui ka termoreaktiivide töötlemise meetod. Survevaluvormimise käigus kuumutatud plastid või termoreaktiivid muutuvad pehmeks ja tänu suurtele survetele vormitavaks ning viimase etapina jahutamise tulemusena kõvaks. Survevaluvormimise protsess toimub järgmiselt: granuleeritud toormaterjal antakse punkrist (etteandeseade) ette silindri/kruvi ühte otsa (soojendav seade). Graanulid kuumutatakse ning voolavaks muutunud materjal surutakse teisest silindri/kruvi otsast välja (graanulid on jätkuvalt sulas olekus) läbi valukanalite suhteliselt külma vormi (jahutamine). Samal ajal hoitakse vormi klambrite või kinnititega koos. Kuumutatud materjal jahtub vormis ning kõveneb seni, kuni on täielikult tardunud. Seejärel avatakse vorm ning eemaldatakse valmis detailid.

Valamisel on rõhk väga kõrge, sõltuvalt materjalist võib see tõusta kuni saja megapaskalini. Seetõttu on tiguvoollid ehitatud koonusekujulised, et suruda plasti valuvormi võimalikult suure rõhu all. Valumasina iseloomulikeks parameetriteks on vormi sulgemisjõud, valandi maht ja protsessi rõhk.



Sele 5.43 Survealuvormimise üldine skeem [5.20]



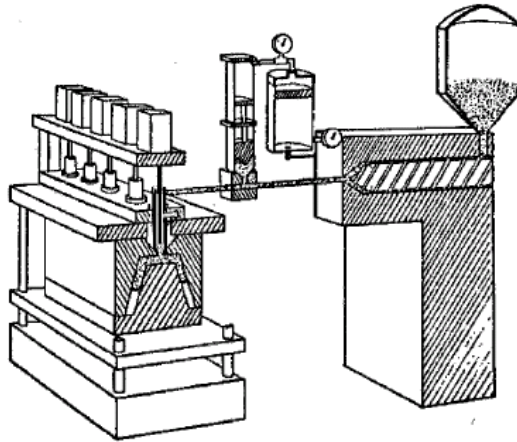
Sele 5.44 Survealuvormimise täpsustatud skeem [5.21]

Kasutusala. Kasutatakse paljude auto-, mööbli-, olmeelektroonikatööstuse mass- või suurseriatoodete identsete detailide tootmisel, nt televiisorite, kuvarite ja mobiiltelefonide korpused, kaitsekiivrid, plastist kausid, plastist kinnitusdetailid jm ning meditsiinidetailide valmistamiseks.

Kasutatavad materjalid: akrüül-niitriil-butadieenstüreen (ABS), lineaarne madaltihe polüetüleen (LLDPE), ABS-i/nailoni segu, polüpropüleen (PP), ABS/TPU, polüfenüüloksiid (PPO), polüoksümetüleen (POM) atsetaal, polüstüreen, polümetüülmetakrülaad (PMMA), sündiotaktiline polüstüreen (SPS), etüleen-vinüülatsetaat (EVA), polüsulfoon, nailon 6, nailon 6.6, nailon 12, nailon 6.12, polüeetersulfoon (PES), termoplastne uretaan (TPU), vedelkristallpolümeer (LCP), polükarbonaat, polüvinüülkloriid (PVC), polükarbonaadi ja ABS-i segu, stüreen-akrüloniitriil (SAN), termoplastne elastomeer (TPE), kõrgtihe polüetüleen (HDPE), madaltihe polüetüleen (LDPE) [5.22, 5.23].

5.3.1.1 Abistatud survevaluvormimine

Meetodi kirjeldus. Lisakomponentidega survevaluvormimisprotsess (gaas ja strukturealne vaht) on analoogne tavasurvevaluvormimisega, ainus erinevus seisneb lisakomponentides ja nende etteandeseadmetes. Gaas ja vaht aitavad lihtsustada suurte detailide valamist madala surve all. Peale selle lihtsustab nende kasutamine survevaluvormimise kahte põhilist ülesannet: kiirem vormi täitmine sulava plastiga ning plasti kahanemise kompenseerimine selle jahtumisel. Lisakomponentide kasutuselevõtt viis selleni, et kui algselt kasutati söögisoodat (naatriumvesinikkarbonaat (CHNaO_3)), siis hiljem võeti surumisfaasis lisaainena kasutusele lämmastikgaas. Teisalt kasutatakse abistatud survevaluvormimise korral peale lämmastikgaasi surumisfaasis ka vett.



Sele 5.45 Lisakomponentidega survevaluvormimise iseloomulik skeem [5.22]

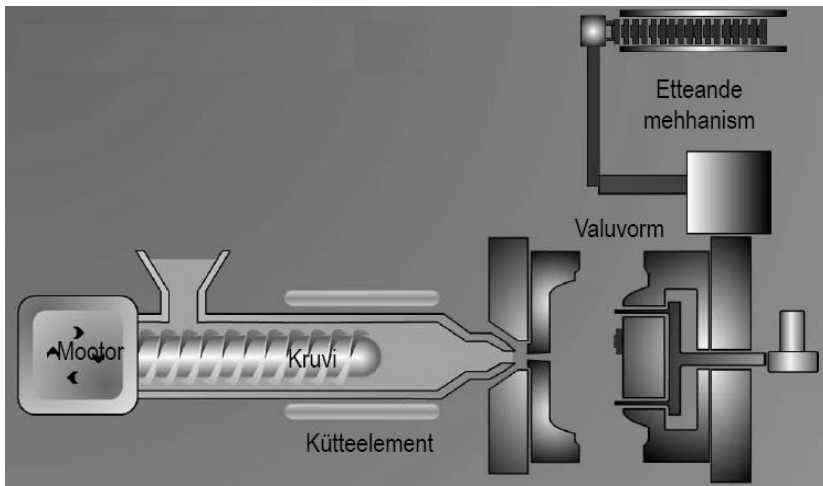
Kasutusala. Kasutatakse paljude auto-, mööbli-, olmeelektroonikatööstuse mass- või suurseriitoodete identsete detailide tootmisel, nt robitatud kastid, korpusdetailid, riulite, toolid jm ning meditsiinidetailide valmistamiseks.

Kasutatavad materjalid: akrüülnitriil-butadien-stüreen (ABS), lineaarne madala tihedusega polüetüleen (LLDPE), ABS-i/nailoni segu, polüpropüleen (PP), ABS/TPU, polüfenüüloksiid (PPO), polüoksümetüleen (POM) atsetaal, polüstüreen, polümetüül metakrülaatakrüül (PMMA), sündiotaktiline polüstüreen (SPS), etüleen-vinüül-atsetaat (EVA), polüsulfoon, nailon 6, nailon 6.6, nailon 12, nailon 6.12, polüeeter-sulfoon (PES), termoplast-polüuretaan (TPU), vedelkristalne polümeer (LCP), polükarbonaat, polüvinüülkloriid (PVC), polükarbonaadi-ABS-i segu, stüreen-akrülonitriil (SAN), termoplast-elastomer (TPE), suure tihedusega polüetüleen (HDPE), väikese tihedusega polüetüleen (LDPE) [5.22, 5.23].

5.3.1.2. Sisetükiga survevaluvormimine

Meetodi kirjeldus. Sisetükiga survevaluvormimine on sarnane tavalisele survevaluvormimisega: pulbrikujuline plast kuumutatakse ekstruuderis sulamistemperatuurini. Enne kui sulaplast kruvi abil valuvormi surutakse, sisestatakse valuvormi sisetükk. Kui plast on valuvormis piisavalt maha jahtunud, avatakse vormipooled ja valmis toode koos sisetükiga eemaldatakse valuvormist.

Enamik sissepandavaid tükke tehakse metalsest materjalist, tavaliselt vasest, mis on tunduvalt kõvem ja vastupidavam materjal kui enamik plaste. Keermestatud sisetükkide puhul on just tõmbetugevus see näitaja, mille poolest metalsed materjalid on plastsetest palju paremad. Sageli kasutatakse vase asemel ka roostevaba terast, kui keere peab olema eriti tugev.



Sele 5.46 Sisetükiga survevaluvormimise iseloomulik skeem [5.21]

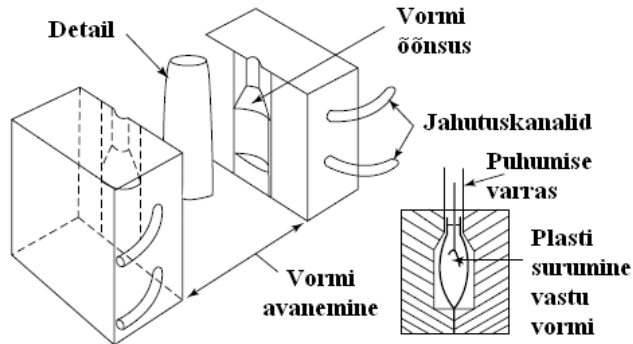
Kasutusala. Kasutatakse paljude auto-, mööbli-, olmeelektronikatööstuse mass- või suurseriatoodete identsete detailide tootmisel ning meditsiinidetailide valmistamiseks.

Kasutatavad materjalid: akrüülnitril-butadieen-stüreen (ABS), polüpropüleen (PP), polüamiid (PA), polüstüreen (PS) ja polükarbonaat (PC) [5.21, 5.22, 5.24].

5.3.2 Puhumisvormimine

Meetodi kirjeldus. Puhumisvormimise protsess toimub järgnevalt: toorikuks on plasttoru, mis on kolmest küljest suletud ning ühest küljest avatud. Avatud küljest puhutakse õhk toru sisse, mille tulemusena toru suureneb – toru seina paksus väheneb. Põhimõte on sama, kui puhuda õhupalli. Puhumisvormimise protsess algab plastist tooriku/toru eelkuumutusega. Toorik asetatakse vormi õõnsuste vahele ning seejärel surutakse vorm kokku. Õhk puhutakse tooriku avatud osast sisse, mille tulemusena toorik paisub ning kuum plast surutakse vormi õõnsuste vastu – toorik kopeerib vormi kuju. Vorm jahutatakse veega maha ning koos

vormi jahtumisega jahtub ka plastdetail selle sees. Kui detail on jahtunud, siis vormi pooled avatakse ning valmis detail eemaldatakse.



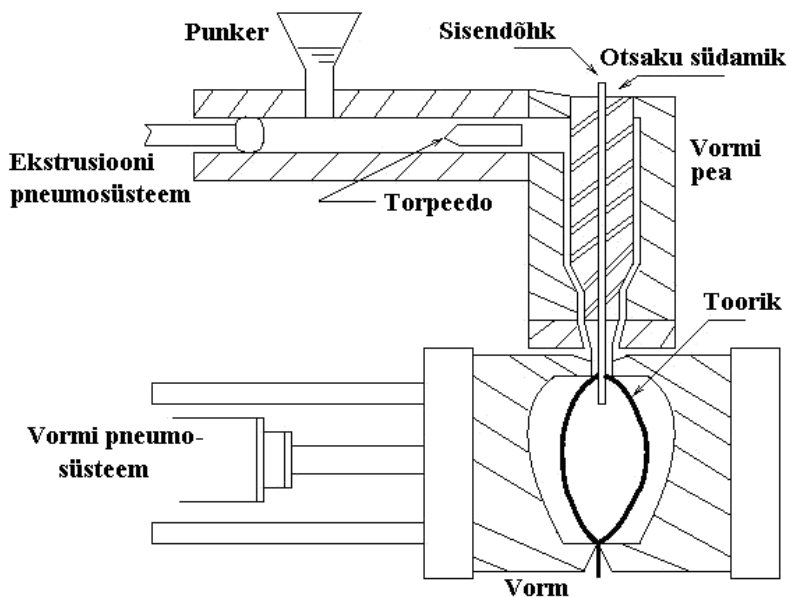
Sele 5.47 Puhumisvormimise iseloomulik skeem [5.22]

Kasutusala. Põhiliselt kasutatakse pudelite tootmiseks, aga ka lennunduse, autotööstuse, mööbli-, elektroonika- ja meditsiinitööstuse detailide valmistamiseks, nt pudelid, pakendid, struktuurset paneelid, pallid, mänguasjad, bensiinipaagid, topeltseinaga karbid jne.

Kasutatavad materjalid: väikese tihedusega polüetüleen (LLDPE), suure tihedusega polüetüleen (HDPE), polüpropüleen (PP), polüvinüülkloriid (PVC), polükarbonaat (PC), polüetüleenftalaat (PET), nailon (PA) ja fluoropolümeer [5.22, 5.24].

5.3.2.1 Ekstrusioonpuhumisvormimine

Meetodi kirjeldus. Ekstrusioonpuhumisvormimise võib jagada kaheks: pidevvormimine ja vahelduvvormimine. Pidevvormimise käigus muudetakse plastid ekstruuderis kuumas silindris pöörleva teo toimele plastseteks. Peale selle muudab ekstruuder plasti läbi silma surudes pikaks torujaks detailiks. Kui detail on soovitud pikkusega, siis viiakse see vormi, mille sulgemise tagajärjel lõigatakse torujas detail katki. Järgmises etapis viiakse vorm teise asendisse, kus toimub õhu sissepuhumine, mille tagajärjel plast omandab vormi kuju. Samal ajal kui vorm viiakse teise asendisse, tuuakse uus vorm etteandenasendisse, et uut torujat detaili saaks vormi suunata. Pärast jahutamist vorm avatakse ja valmis toode eemaldatakse vormist. Vormimisprotsessi käigus toimuvad eelnimetatud etapid paralleelselt, mis tagab terve protsessi kiirema käitumise. Vahelduvvormimise protsess on analoogne pidevvormimisega, kuid ekstruuderis ja vormi vahel on veel akumulaator, kuhu suunatakse pidevalt ekstruuderist voolavat plasti ning kui vorm on etteandenasendis, siis antakse akumulaatorist toormaterjali vormi.



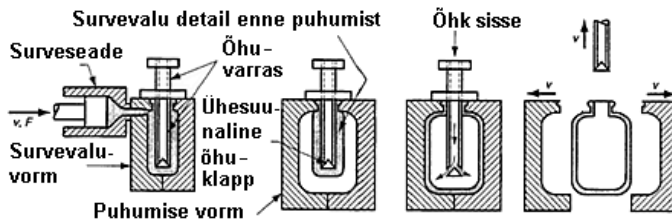
Sele 5.48 Ekstrusioon puhumisvormimise iseloomulik skeem [5.25]

Kasutusala: pudelid, pakendid, struktuursed paneelid, jäätmeanumad jne.

Kasutatavad materjalid: kasutatakse peamiselt järgmisi polümeere: polüetüleen (PE), polüpropüleen (PP), polüvinüülkloriid (PVC) ja polüetüleen-tereftalaat (PET) [5.22, 5.24, 5.25].

5.3.2.2 Puhumissurvevormimine

Meetodi kirjeldus. Protsessi kasutatakse väikesemõõtmeliste detailide tootmisel, kui kogused ja toote täpsusnõuded on suured. See on ideaalne nii kitsa kui ka laia suuavaga toodete täielikuks ja lõplikuks valmistamiseks. Puhumissurvevormimise protsess koosneb kolmest operatsioonist: plasti sissepritsest, puhumisest ja toote eemaldamisest. Valumasin koosneb ekstruuderi kuumast silindrist ja teost, mis sulatavad pulbrilist polümeeri. Vedel polümeer surutakse kuuma seest õõnsasse ja südamikuga varustatud eelvaluvormi. Eelvaluvormis saab toode endale väliskuju, mille annab vorm ja sisekuju, mille moodustab vormi eelnevalt asetatud südamik. Seejärel eelvaluvorm avatakse ja pöörlev südamik koos kuuma plastiga asetatakse seest õõnsasse jahedasse puhumisvormi. Läbi südamiku puhutava suruõhu toimel surutakse kuum plast puhumisvormi seinte külge, selle abil moodustub lõpptoote kuju. Pärast jahutamist puhumisvorm avaneb ja pöörlev südamik viiakse toote eemaldamise positsiooni. Toode lükatakse südamiku pealt maha ja viiakse enne pakendamist lekkekatsetusele. Eelvaluvormil ja puhumisvormil võib olla palju pesasid, tavaliselt kolm kuni kuusteist, sõltuvalt toote suurusest ja nõutavast kogusest.



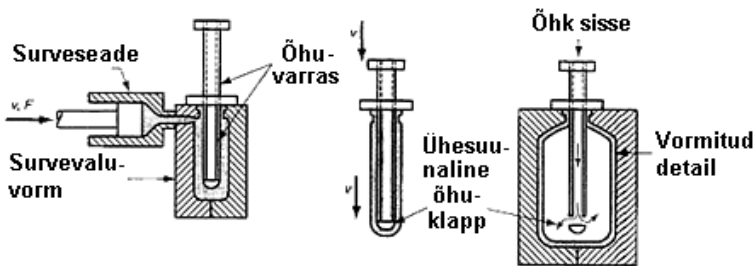
Sele 5.49 Puhumissurvevormimise iseloomulik skeem [5.27]

Kasutusala: seest õõnsad tooted, nagu pudelid, purgid, anumad jne.

Kasutatavad materjalid: akrüül-niitriil-butadieen-stüreen (ABS), akrüül, polüester, polüstüreen, silikoon, polüuretaan, polübutüleen, ionomeer, fenool [5.21, 5.26, 5.27].

5.3.2.3 Venitus-puhumisvormimine

Meetodi kirjeldus. Protsessi võib jagada neljaks erinevaks operatsiooniks: plasti sissepritse, kuumutamine, puhumine ja toote eemaldamine. Sulas olekus polümeer surutakse läbi kuuma valukanali eelvaluvormi, milles on südamik. Südamik vormib toote sisekuju, eelvaluvorm annab tootele väliskuju. Kuna eelvaluvorm jahtub sissepritse staadiumis kiiresti, siis kõigub toote temperatuur erinevates kohtades sõltuvalt seina paksusest. Et kindlustada toote ühtlane kvaliteet, peab plast olema ühtlase temperatuuriga. Selle saavutamiseks kuumutatakse plasti uuesti. Kui plast on saavutanud õige ja ühtlase temperatuuri, algab venitus-puhumisooperatsioon. Toode viiakse puhumisvormi ja vorm suletakse. Seejärel sisestatakse venitusvarras, mis kõigepealt venitab toodet pikkupidi ja siis kaheetapilise suruõhuga radiaalselt. Pärast teatud aega jahutamist avatakse puhumisvorm ja toode eemaldatakse.



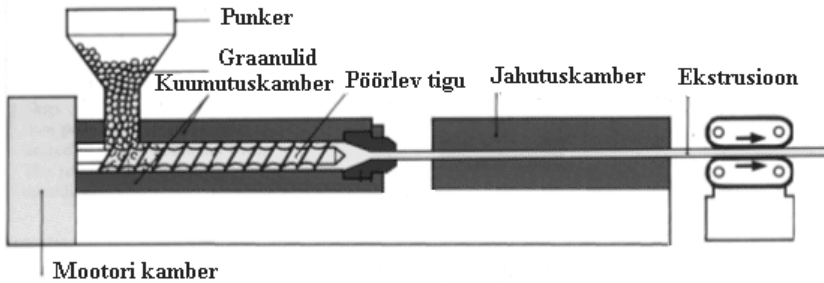
Sele 5.50 Venitus-puhumisvormimise iseloomulik skeem [5.27]

Kasutusala: karastusjookide pudelid, toiduõlipudelid, hügieenitarbed, vannitoatarbed.

Kasutatavad materjalid: kasutatakse peamiselt polüetüleen-tereftalaati (PET), aga ka polüpropüleeni (PP), polüvinüülkloriidi (PVC), polüakrülniitriili (PAN) [5.21, 5.26, 5.27].

5.3.3 Ekstrusioonvormimine

Meetodi kirjeldus. Ekstrusioonvormimisel kasutatakse analoogseid seadmeid nagu survevaluvormimisel. Plastist graanulid viiakse teo abil punkrist soojendisse. Soojendis graanulid sulatatakse ning surutakse läbi vormi silma, mille tulemusena tekib pikk ja ühtlane torujas detail. Detaili kuju sõltub vormi silma kujust. Pärast materjali silmast läbisurumist see jahutatakse ning tükeldatakse sobivasse pikkusesse.



Sele 5.51 Ekstrusioonvormimise iseloomulik skeem [5.21]

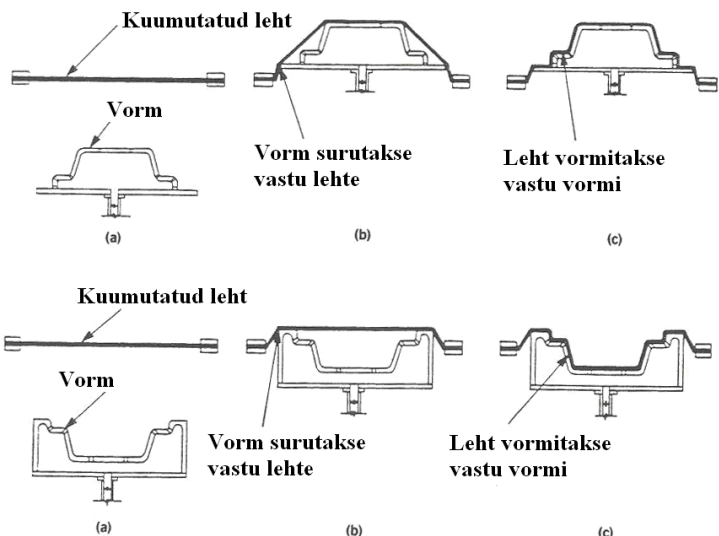
Kasutusala: plastist liistud, tihendid, torud.

Kasutatavad materjalid: polüvinüülkloriid (PVC), lineaarne väikese tihedusega polüetüleen (LLDPE), polüpropüleen, akrüül, polükarbonaat, akrüül-nitriil-butadieen-stüreen (ABS), nailon, polüester [5.21, 5.22, 5.24].

5.3.4 Termovormimine

Meetodi kirjeldus. Termovormimine erineb muudest plastide töötlemise meetoditest selle poolest, et ei nõua suuri surveid ja seetõttu saab kasutada odavamaid vorme kui nt survevaluvormimise ja puhumisvormimise korral. Protsessis kasutatakse kuumust, vaakumit ja mõningatel juhtudel ka survet, et vormida plastleht vastu vormi pinda. Plastleht kuumutatakse ning kasutades vaakumit või survet, tõmmatakse/surutakse pehme leht vastu vormi pinda. Plast kopeerib vormi kuju, siis see jahutatakse ning eemaldatakse vormist. Viimase etapina toimub vormitud detaili lõikamine. Detaili pind ei vaja viimistlevat töötlemist.

Termovormimisel on väga palju erinevaid alaliike: otse vaakumvormimine; tagant haarav vaakumvormimine – sisetööriist/vorm; mulliks puhutud tagant haarav vaakumvormimine – sisetööriist/vorm; toega toetatav vaakumvormimine – välistööriist/vorm; toega toetatav survevormimine – välistööriist/vorm; mulliks puhutud toega toetatav vaakumvormimine/survevormimine – välistööriist/vorm.



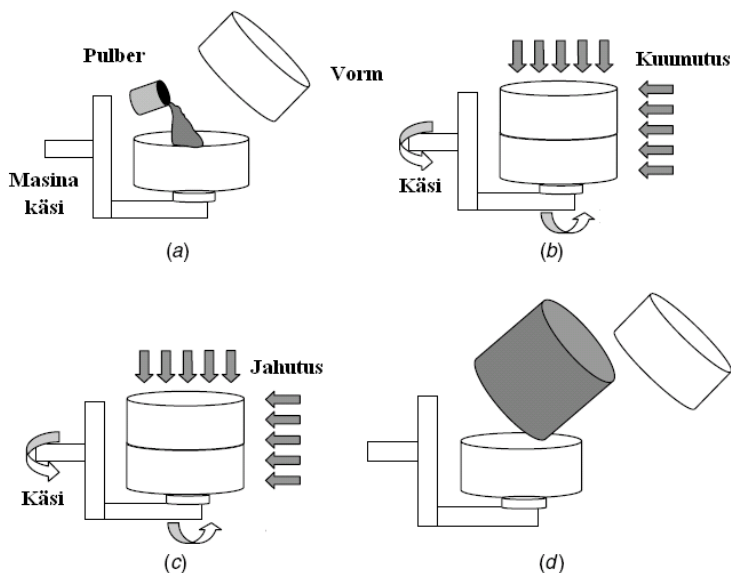
Sele 5.52 Termovormimise iseloomulik skeem [5.30]

Kasutusala: suuregabariidilised plasttooted, nt konteinerid, anumad, dušialused, vannid, paadid, basseinid, autode plastist keredetailid, lennukite ja autode tuuleklaasid, meditsiini-komponendid jne.

Kasutatavad materjalid: enamik termoplaste, nagu polüstüreen, polüvinüülkloriid (PVC), polüester, polüetüleen jne, aga ka akrüül, polükarbonaat, akrüülnitriil-butadien-stüreen (ABS), nailon [5.28, 5.29, 5.30].

5.3.5 Rotatsioonvormimine

Meetodi kirjeldus. Detailid vormitakse vedelast või pulbrilisest termoplastist. Vormimise käigus on vorm suletud ning pöörleb soojenduskambris. Tagamaks, et vorm pöörleb kahes tasapinnas, pöörleb spindel ümber peatelje ning vorm ümber abitelje. Rotatsioonvormimisel on neli peamist etappi: täitmine (a – vedel või pulbriline plast kallatakse vormi, mis suletakse klambrite või poltidega); kuumutamine ja pöörlemine (b – vormile antakse kaheteljeline pöörlemine ning viiakse kuumutusahju, mille tulemusena plastist materjal sulab ning surutakse vastu vormi); jahutamine (c – kui materjal on võtnud vormi kuju, siis viiakse vorm jahtuma, seni kuni plast on kristalliseerunud. Jahtumisprotsessi käigus jätkatakse vormi pöörlemist, et vähendada kahanemise defekte) ning detaili eemaldamine (d – jahtunud detail eemaldatakse vormist).



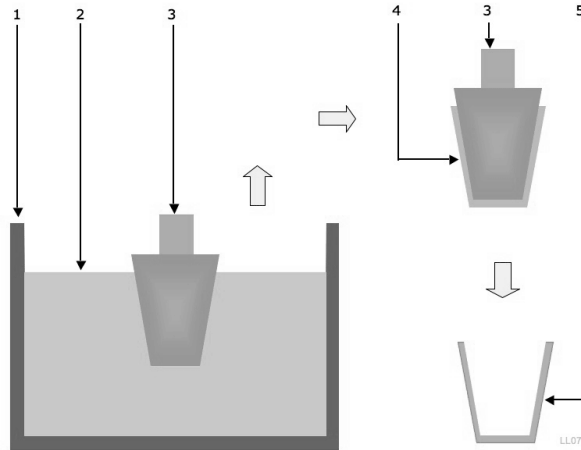
Sele 5.53 Rotatsioonvormimise iseloomulik skeem [5.22]

Kasutusala. Peamiselt kasutatakse suurte õõnsate detailide tootmiseks, mis nõuavad pingevaba vormimist, head pinnatöötlust, ühtlast seinapaksust ning sisaldavad keerulisi pindu. Kasutatakse autotööstuses, elektri- ja elektroonikatööstuses, laevaehituses, meditsiiniseadmete tootmisel, nt tööstuskonteinerid, anumad, kanistrid, paatide toolid, kaubaalused, implantaadid, täispuhutavad maskid jne.

Kasutatavad materjalid: enamik termoplaste, kuid põhiliselt polüetüleen, veel ka akrüülnitriil-butadien-stüreen (ABS), akrüül, polüester, polüstüreen, polübutüleen, silikoon, polüuretaan, epoksiid, ionomeerid, fenool [5.21, 5.22, 5.24].

5.3.6 Sissekastev vormimine

Meetodi kirjeldus. Sissekastev vormimine seisneb selles, et kuumutatud metallvorm kastetakse vedelasse plasti. Kuum metallvorm tõmbab madalama temperatuuriga sulaplasti enda külge, pärast mida tõstetakse vormid vedelast plastist välja ning viiakse järelkuumutusahju, et suurendada plasti kinnitumist. Viimase etapina plast jahutatakse ning eemaldatakse vormi küljest. Seejärel võib plastidetaile edasi töödelda (lõigata, lihvida jne). Meetodi puudusteks on suured tolerantsi kõikumised.



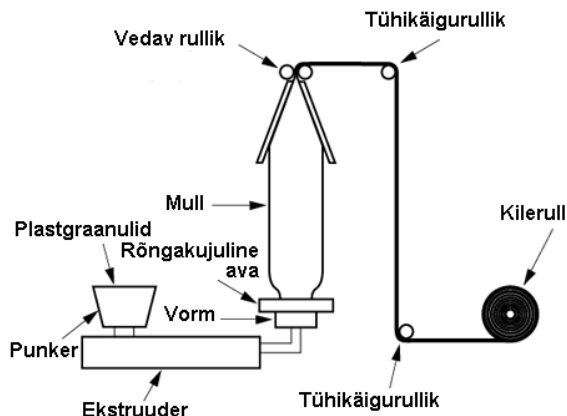
Sele 5.54 Sissekastva vormimise iseloomulik skeem [5.31]

Kasutusala: kummikindad, tööriistade käepidemed, korgid, katted, pistikud.

Kasutatavad materjalid: sobivad erinevad plastid, mis on kasutamisel siledad ja läikivad, nt plastisol [5.31, 5.32].

5.3.7 Kile puhumine

Meetodi kirjeldus. Kõige levinum viis kilede valmistamiseks on kile puhumine ekstrusioonmeetodil. Protsess hõlmab plasti ekstrusiooni läbi ringikujulise vormi, millele järgneb kile mullikujuline paisutamine. Kilede valmistusprotsess kulgeb järgmiselt: sulaplast surutakse läbi vertikaalselt asetseva vormi, millel on rõngakujuline ava. Selle tagajärjel moodustub õhukeseseinaline toru. Protsessi käigus puhutakse läbi vormi sees oleva augu õhku, mille tulemusena tekib torujas balloon. Vormi tipus olev võru jahutab kuuma kilet, mille järel torujas kile suunatakse rullide vahele, kus sellest tehakse kokkuvajutatud toru. Edasi läbib kile veel mitmeid rulle, kus toimub ka toru sees oleva õhu vahetus, mida nimetatakse sisemiseks mulli jahutuseks. Pärast neid protsesse kile kas jäetakse nii, nagu ta on, või lõigatakse äärtest lahti, mille tulemusena saadakse kahekihiline kileleht ning seejärel keeratakse rullidele.



Sele 5.55 Kile puhumise iseloomulik skeem [5.33]

Kasutusala. erinevat tüüpi kiled, pakkekiled, tööstuskiled.

Kasutatavad materjalid: polüetüleenid [kõrgtihe polüetüleen (HDPE), madaltihe polüetüleen (LDPE) ja lineaarne madaltihe polüetüleen (LLDPE)], aga ka polüpropüleen (PP), polüamiid (PA) [5.21, 5.24, 5.33].

5.4 Lehtmaterjalide töötlemine

Lehtmaterjalide töötlemine on üks vanimaid ja tähtsamaid materjalide töötlemistehnoloogiasid. Lehtmaterjalist saab toota loendamatu hulgal erineva kujuga tooteid kas erinevate survetöötlemis- või termokeemiliste meetoditega. **Lehtmaterjali survetöötlemine** hõlmab lõikestanssimist ja augustamist, painutamist, ääristamist ja tõmbamist. **Termokeemilisteks töötlemismeetoditeks** on gaas-, elektrihaar- ja laserlõikamine, millele on lisandunud abrasiiv-veejuuga lõikamine [5.34].

Survetöötlemisel, mis toimub pressitööriista tekitatava lühiajalise kõrge survega, mille mõjul toimub tooriku lõikamine või plastiline deformatsioon, on muude lõiketöötlemisviiside ees rida eeliseid:

- saab valmistada väikese massiga, väga keerukaid, kuid konstruktsioonilt jäiku ja vastupidavaid tooteid, kuna lehtmaterjalil on kõrge elastsusmoodul ja voolavuspiir;
- saab valmistada rangete täpsusnõuetega tooteid, mis ei vaja täiendavat töötlemist;
- materjali säästlik kasutamine, väike jäätmete hulk;
- seadmete suur tootlikkus, protsessi mehhaniseerimise ja automatiseerimise võimalus, toodete madal maksumus.

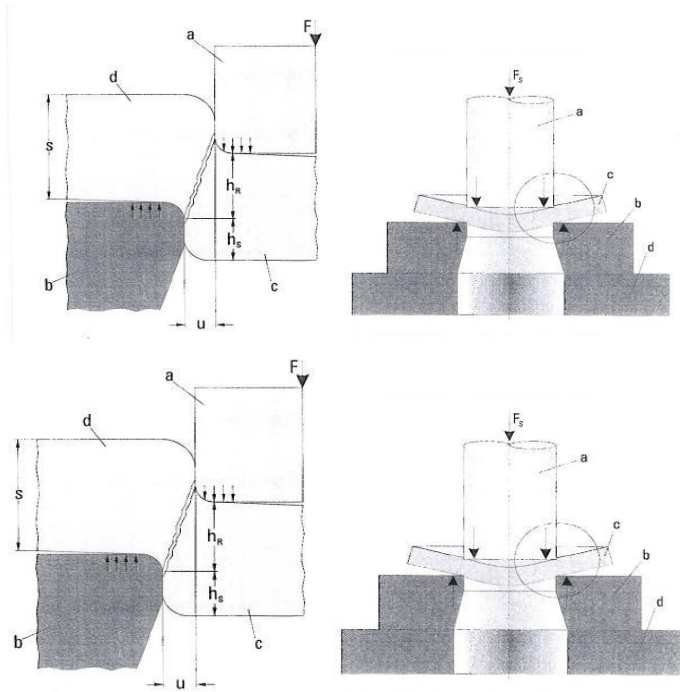
5.4.1 Lõikestantsimine

Lõikestantsimiseks nimetatakse suletud kontuuriga toodete väljalõikamist lehtmaterjalist pressitööriista lõikejõu mõjul. Suurseeria korral toimub lõikestantsimine rullmaterjalist. Väike-seeria korral toimub lõikestantsimine tükktoorikutest, mis tuleb ribastada kuumalt- või külmaltsititud lehtedest. Rullmaterjali ribadeks lõikamisel kasutatakse ketaskääre. Lehtede tükeldamiseks kasutatakse sirgete paralleelsete nugade või sirgete kaldu nugadega giljo-tiinkääre.

Lõikestantsimise skeem on esitatud seel 5.56. Lõikejõud F_S kasvab templi a alla liikudes nullist kuni suuruseni, mis vastab materjali vastupanujõule. Lõigatav materjal – lehttoorik c paksusega s – on asetatud matriitsile b. Tempel lõikab matriitsi avasse lõigates välja toote e.

F_S – lõikejõud
a – tempel
b – matriits
c – lehttoorik
d – alusplaat
e – toode
s – lehe paksus

F_S – lõikejõud
a – tempel
b – matriits
c – lehttoorik
d – alusplaat
e – toode
s – lehe paksus
u – stantsi lõtk
 h_S – lõikevöö kõrgus
 h_R – rebendi kõrgus

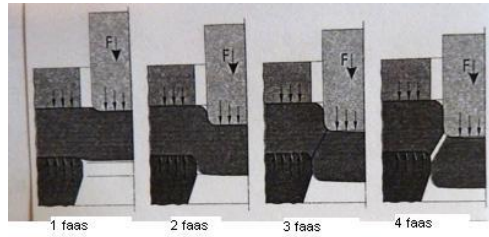


Sele 5.56 Lõikestantsimise protsess

Templi otspinna all ning matriitsi pinnal toimib surve templi otspinnaga risti oleva telje suunas. Radiaalsuunas toimib tõmme. Sisselõikumisel materjal deformeerub. Pinge- ja deformatsiooniolukord on nihe külgsurvega, mitte puhas lõige.

Väljalõigatud toote serval võib eristada järgmisi alasid:

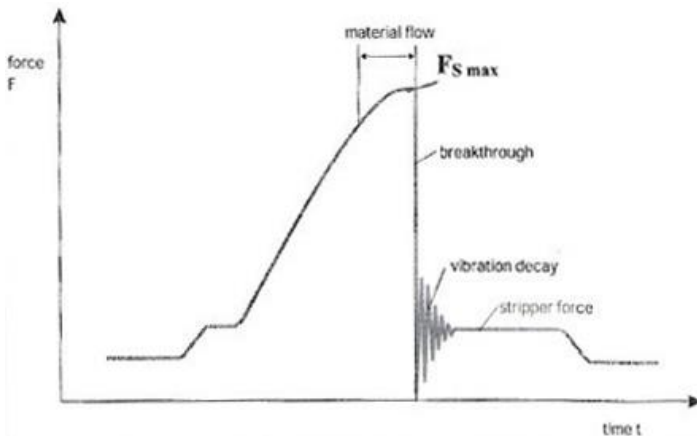
- templi tekitatud deformatsiooni tõttu tekkiva serva ümardumise ja lõikevöö kõrgus h_S ;
- purunemisala kõrgus h_R , sõltuvalt templi ja matriitsi vahelise stantsi lõtkust u;
- kraadi kõrgus, sõltuvalt templi raadiusest, mis tekib templi kulumisel.



Sele 5.57 Lõikestantsimise faasid

Templi süvenemisel lehttoorikusse painutatakse materjali elastselt, pinged materjalis ei ületa elastsuspiiri – 1. faas seel 5.4.2. Templi edasisel liikumisel toimub templi sisenemine mitte kogu otspinnaga, vaid mingi vöö väärtuses – 2. faas. Metall surutakse liikumise suunas kokku, rist-suunas venitatakse välja. Kõige intensiivsem pikenedamine kulgeb lõikeservade piirkonnas. Toimuva plastilise deformatsiooniga kaasneb metalli kalestumine. Templi edasisel süvenemisel metalli plastilisus ammandub. Matriitsi lõikeservade ees tekivad praod – 3. faas. Templi edasisel süvenemisel tekivad praod ka templi lõikeservade ees ning väljalõigatud detail surutakse matriitsi – 4. faas. Rebenemise osakesed võivad keevituda templi külge (adhe-sioonkulumine). Pärast pragudevahelise sisepinna purunemist on väljalõigatud toote mõõt-med matriitsi ava mõõdetest suuremad. Toote matriitsist läbilükkamisel toimub matriitsi külgekulumine. Toote eraldumisel radiaaljõud järsult vähenevad. Materjal ümbritseb templit vedruna. Templi kättesaamiseks on vaja mahatõmbejõudu F_R , mis moodustab ~10% lõike-jõust F_S .

Lõikejõu ajalisel muutumisel seel 5.58 võib eristada elastse deformatsiooni faasi, materjali voolamisega kaasnevat lõikefaasi, katkemisfaasi, vibratsioonifaasi ja mahatõmbefaasi.



Sele 5.58 Lõikejõu ajalane muutumine lõikestantsimisel

Maksimaalne löikejõud löikestantsimisel:

$$F_{s \max} = l_s \cdot s \cdot \tau_1 [N], \text{ kus}$$

l_s – löikekontuuri pikkus mm;

s – materjali paksus mm;

τ_1 – materjali löiketugevus N/mm^2 .

Matriitsi ja templi vahelise lõtku optimaalse väärtuse korral on materjali löiketugevus:

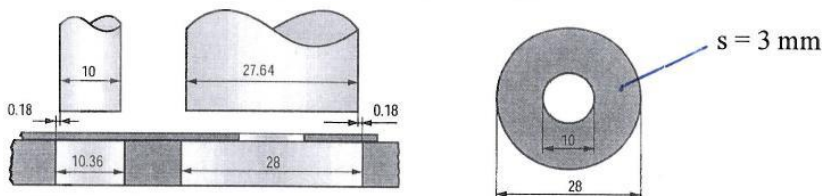
$$\tau_1 = 0,8 \cdot R_m [N/mm^2], \text{ kus } R_m \text{ – materjali tõmbetugevus } N/mm^2.$$

Materjali löiketugevus sõltub materjali omadustest ja paksusest, stantsimise kiirusest, lõtkust, löikeservade kulumisest, määrimisest.

Löikestantsid jagunevad [5.35]:

- üksikoperatsiooni löikestants, kus detaili valmistamise iga operatsioon: augustamine, väliskontuuri stantsimine, toimub eri stantsis;
- järjestiktoimeline löikestants, kus detaili väliskontuuri ja avade stantsimine toimub üksteisele järgnevates sammudes;
- koostoimega löikestantsid.

Löikestantsimisel tuleb templi ja matriitsi mõõtmete määramisel juhinduda sellest, et augustamisel määrab ava läbimõõdu tempel ning kontuuri stantsimisel määrab toote välismõõtme matriits (vt sele 5.59).

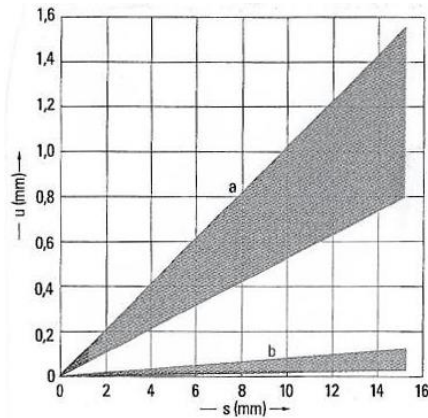


Sele 5.59 Stantsi matriitsi ja templi mõõtmete kindlaksmääramine

Tavastantsimisel, sõltuvalt materjalist, on templi ja matriitsi vaheline optimaalne ühepoolne lõtk u 5–10% lehtmaterjali paksusest (vt sele 5.60 a). Sellise lõtkuga saadakse löikevöö kõrgus h_s 10–30% materjali paksusest s [5.36].

Oluliselt erinev on lõtku suurus silelöikestantsimisel, kus optimaalne ühepoolne lõtk moodustab vaid 0,5–1,0% lehtmaterjali paksusest s (vt sele 5.60 b).

Sõltuvalt materjalist saavutatakse löikevöö kõrguseks 50–100% materjali paksusest s .



Sele 5.60 Matriitsi ja templi vaheline lõtk lõikestantsimisel

5.4.2 Silelõikestantsimine

Silelõikestantsimist eristab tavalõikestantsimisest oluliselt erinev lõtku suurus, kolmiktoimega presside kasutamine, koostoimega stantsi konstruktsioon ja stantsitava materjali erinevused [5.37].

Silelõikestantsimisel kasutatavatel kolmiktoimega pressidel on mehaaniline või hüdrauliline lõikejõuajam, materjali fikseeriva surveribi survejõu ja tasapinnalisust tagava vastusurvejõuajamid on hüdraulilised.

Kolmiktoimega pressi kogujõud on F_{Σ} (vt sele 5.68):

$$F_{\Sigma} = F_S + F_R + F_G$$

Kus F_S – lõikejõud
 F_R – surveribi survejõud
 F_G – vastusurvejõud

Lõikejõud F_S :

$$F_S = l_s \times s \times \tau_l, \text{ kus}$$

l_s – üheaegselt lõigatava väliskontuuri ja augustatavate avade kontuuri pikkus mm;

s – lehtmaterjali paksus mm;

$\tau_l = (0,6-0,9)R_m$ – materjali lõiketugevus.

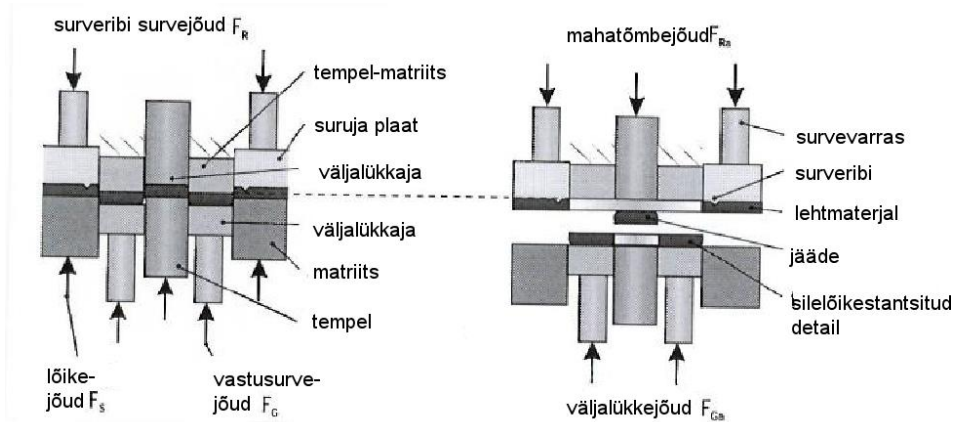
Surveribi survejõud F_R :

$$F_R = l_R \times h \times 4 R_m, \text{ kus}$$

l_R – surveribi serva kogupikkus, mm;

h – surveribi kõrgus;

R_m – materjali tõmbetugevus.



$$F_{\Sigma} = F_S + F_R + F_G, \text{ kus}$$

F_S – löikejõud; F_R – surveribi survejõud; F_G – vastusurvejõud

Sele 5.61 Silelõikestantsimisel mõjuvad jõud

Detaili läbipainde vältimiseks surutakse materjal vastu templit vastusurvejõuga F_G :

$$F_G = A_s \times q_G, \text{ kus}$$

A_s – väljalükkajaga kokkupuutuv pind mm^2 ;

q_G – vastusurvepinge ($20\text{--}70 \text{ N/mm}^2$).

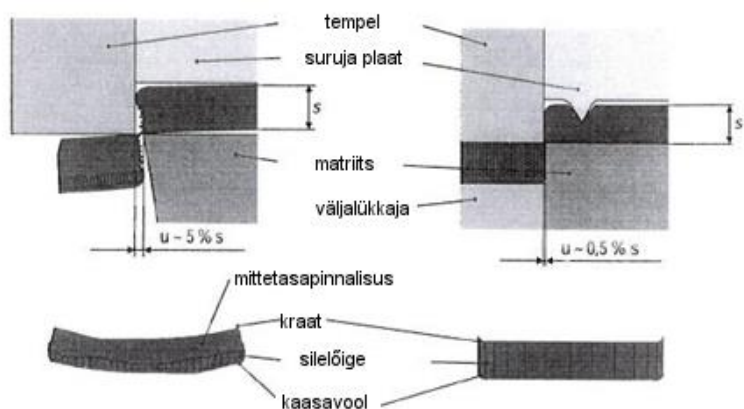
Pärast väljalõikamist surutakse detail matriitsist välja väljalükkejõuga F_{GA} :

$$F_{GA} = 0,1\text{--}0,15 F_S.$$

Mahatõmbe- ja väljalükkejõud F_{RA} :

$$F_{RA} = 0,1\text{--}0,15 F_S.$$

Materjali paksusega võrreldava löikevöö kõrgus silelõikestantsimisel saadakse väiksema lõtku ja fikseeriva surveribiga, tasapinnalisuse tagab vastusurve. Oluliselt mõjutavad toote kvaliteeti stantsitava materjali omadused. Silelõikestantsitud tooted tavaliselt karastatakse, mistõttu kasutatavad suurendatud süsinikusisaldusega legeritud terased lõõmutatakse teralisele tsementiitstruktuurile [5.38].

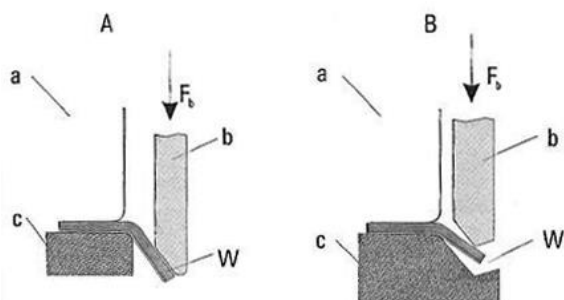


Sele 5.62 Detailide kvaliteet tavastantsimisel ja sileõikestantsimisel

5.4.3 Lehtmaterjali painutamine

Tooriku kuju muutmist plastse deformatsiooni teel pressitööriista sirgjoonelisel liikumisel nimetatakse **lehtmaterjali painutamiseks**. Eristatakse vaba painet (vt sele 5.63 A) või fikseeritud painet (sele 5.63 B). **Vaba painde** korral saavutatakse paine vaid templi mõjul, **fikseeritud painde** korral surutakse materjal templi ja matriitsi vahele.

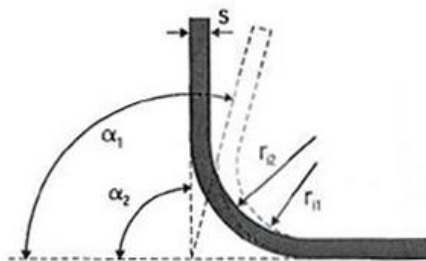
- a – materjali suruk
- b – paindetempel
- c – paindematriits
- W – lehtmaterjal
- F_b – paindejõud



Sele 5.63 Lehtmaterjali painutamine

Lehtmaterjali painutamisel mõjuvad materjali välimistes kihtides tõmbepinged kihtide pikisuunalise pikenemise tõttu. Sisekihtides mõjuvad survepinged kihtide pikisuunalise lühenemise tõttu. Seetõttu ei vasta toote paindenurk lehtmaterjali painutamisel tööriista nurgale. Alati on tegemist elastse tagasivetrumisega, mille suurus sõltub toote sisemise painderaadiuse ning lehe paksuse suhtest r_{12}/s ning painutatava lehtmaterjali omadustest (vt sele 5.64).

- α_1 – tööriista nurk
- α_2 – toote paindenurk
pärast tagasivetrumist
- s – lehe paksus
- r_{i1} – tööriista painderaadius
- r_{i2} – toote sisemine painde-
raadius pärast tagasivetrumist



Sele 5.64 Elastne tagasivetrumine paindel

Elastse tagasivetrumise kompenseerimiseks kasutatakse taganurgaga templit. Lehtmaterjali painutamisel toimub paindekoha serva moonutus: paindekoha väliskihitides lehe laius väheneb, sisekihtides aga suureneb.

Minimaalne võimalik painderaadius, mil painutamisel ei teki pragusid, oleneb lehe sisekihi maksimaalsest lubatavast deformatsioonist, mis sõltub materjali plastisusest, lehe laiuse ja paksuse suhtest. Tavaliselt praod ei teki, kui $r_{i \min} = 1,0-1,5 S$.

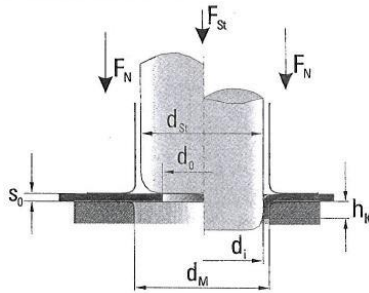
5.4.4 Lehtmaterjali ääristamine ja tõmbamine

Ääristamine on lehtmaterjali väliskontuuri või ava ääre vormimine materjali venitamise teel. Suure ümardusraadiusega ja madala silindrilise osaga servade ääristamist kasutatakse välisserva jäikuse ja tugevuse suurendamiseks. Kõrge silindrilise osaga avade ääristamist kasutatakse väikese läbimõõduga keermeavade või pressistuga tihvtiavade jaoks.

Teoreetiline silindrilise osa kõrgus h_{kteor} ava ääristamisel (vt sele 5.65):

$$h_{kteor} = S_o \times (d_m^2 - d_o^2) / (d_m^2 - d_{st}^2)$$

- d_o – etteaugustatud ava läbimõõt,
- d_f – vormitava kantserva siseläbimõõt,
- d_{st} – templi läbimõõt,
- d_M – matriitsi läbimõõt,
- h_k – kantserva kõrgus,
- S_o – lehe paksus,
- F_{st} – templi survejõud,
- F_N – survejõud lehe fikseerimiseks.



Sele 5.65 Ava serva vormimine

Vormitava serva deformatsiooniastet iseloomustab vormitava kantserva ääristustegur $W_{\text{äär}} = d_i/d_o$, mis sõltub kasutatava materjali omadustest, etteaugustatud ava ja lehe paksuse suhtest d_o/S_o , kraadi olemasolust. Mida väiksem on suhe d_o/S_o , seda suurema ääristusteguri $W_{\text{äär}}$ võib saavutada, seda kõrgema ääre saab vormida. Kraati olemasolul tekivad praod ja rebendid. Kraat peab jääma ääre siseküljele.

Oluliselt mõjutab kantserva kõrgust templi ja matriitsi vaheline lõtk ning matriitsi ümardusraadius, mille kasvades suureneb kantserva kõrgus.

Ääristusjõu suurus:

$$F_{st} = F_a + F_b = \pi \times S_o \times R_e (d_i - d_o), \text{ kus}$$

F_a – templi survejõu komponent;

F_b – templi paindejõu komponent;

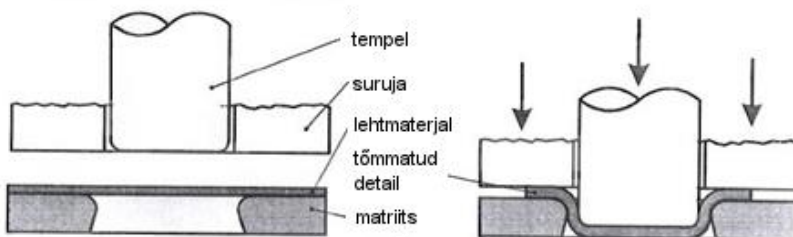
S_o – lehe paksus;

R_e – materjali voolavuspiir N/mm^2 ;

d_o – etteaugustatud ava läbimõõt;

d_i – vormitava kantserva siseläbimõõt.

Lehtmaterjali tõmbamist kasutatakse silindrilise või koonilise seinaga põhjaga õõnesdetailide valmistamiseks. Tõmmatud detailid võivad olla äärikuga või ilma äärikuta. Silindrilise seinaga õõnesvormi võib tõmmata lehtmetailist toorikust templi survejõu mõjul ühe operatsiooniga (vt sele 5.66). Lainelisuse tekkimist välditakse suruja survega, millega reguleeritakse materjali voolamist.



Sele 5.66 Ühe operatsiooniga õõnesvormi tõmbamine

Templi survejõu mõjul tekivad õõnesvormi seintes tõmbepinged, mis suurenevad deformatsiooniastme suurenemisega. Operatsiooni deformatsiooniaste, kui ei toimu õõnesvormi sein ja põhja õhenemist, sõltub tõmbetegurist $\beta = d_0/d_1$, kus d_0 – tooriku läbimõõt, $d_1 = d_{st}$ – templi läbimõõt, S_0 – lehe paksus.

Tõmbeoperatsiooni tõmbeteguri β väärtus sõltub materjali tõmbetugevusest R_m , templi läbimõõdu ja lehe paksuse suhtest d_1/S_0 , määrimistingimustest, tööriista ümardusraadiusest ja pinnatöötlustest. Madala süsinikusisaldusega terastel on β väärtus vahemikus 1,8–2,0. Mitme operatsiooniga tõmmatava toote puhul võetakse tõmbeteguri β väärtused erinevates operatsioonides tavaliselt võrdsed. Mida suurem on tõmbetegur, seda paremini kasutatakse ära materjali plastsus ja seda väiksem on vajalike operatsioonide arv. Seejuures tuleb arvestada deformatsioonitakistust, et tõmbepinged ei ületaks materjali tugevust ja õõnesvormi põhi ei rebeneks. Lehtmaterjali tõmmatakse pneumo- või hüdropadjaga ühekäigulistel ekstsentrikpressidel või siis kahe- või kolmekäigulistel hüdropressidel.

5.4.5 Lehtmaterjali stantsimine töötlemiskeskustes

Paljude erineva kaju ja mõõtmetega avade ja piludega detailide väikeste seeriatega (5 000–10 000 tk) valmistamiseks ei ole otstarbekas kasutada kallihinnalisi lõikestantsse. Tõhusam on neid valmistada CNC-töötlemiskeskustes, kus kasutatakse elementide järgi stantsimise põhimõtet, mis seisneb detaili kontuuri moodustavate lihtsate elementide – sirg- ja kõverjoonte ning ringide – stantsimises universaalsete tööriistakomplektidega.

5.4.6 Lehtmaterjali lõikamise ja tükeldamise protsessid

Tööstuses kasutatakse mitmesuguseid mehaanilisi, keemilisi ja termilisi lehtmaterjali lõikamise protsesse. Mehaaniliste meetodite hulka kuuluvad giljotiinlõikamine, lõikestantsimine, kuid väiksemate partiide puhul kasutatakse ka vähemtootlikke meetodeid, nagu freesimine, saagimine jm.

Keemiliste ja termiliste meetodite hulka kuuluvad gaas-, elektrihaar- ja laserlõikamine, millele on lisandunud abrasiiv-veejugalõikamine [5.34].

5.4.6.1 Giljotiinlõikamine

Lõikamine giljotiiniga on kasutusel suurte suhteliselt õhukeste (<50 mm) toorikute lõikamiseks. Giljotiinlõikamisel asetatakse lõigatav metallitükk statsionaarse alumise lõikenõela ja liikuva ülemise lõikenõela vahele. Lõikamiseks surutakse ülemine nõela alla, mille tulemusena metall tükeldatakse. Selliselt saab lõigata lehtmaterjali ja ka mitmesuguse ristlõikega ribamaterjali (ring, ruut jne). Sel puhul peaks olema lõikenõelal lõigatava materjaliga sarnane geometria, vastasel korral on lõigatava otsa ristlõike moonutused liiga suured.

Toodetakse giljotiine, millega saab ühel operatsioonil lõigata kuni 9 m laiusi detaile (ka suuremate seadmete ehitamine on võimalik). Giljotiini kasutatakse tavaliselt materjali puhul, mille

kõvadus jääb alla 30 HRC. Meetod on piiratud täpsuse ja kvaliteediga. Saab kasutada mitmesuguste materjalide puhul, sh pehmed metallid, plastid, paber, papp jne.

5.4.6.2 Gaasileegiga lõikamine (hapniklõikamine)

Hapniklõikamisel kasutatakse materjali tükeldamiseks juhitud keemilist reaktsiooni, kus ettekuumutatud metall eemaldatakse kiire oksüdeerimise abil puhta hapniku joas. Kasutatakse peamiselt madalsüsinik- ja madallegeerteraste puhul. Protsessis kuumutatakse lõigatav materjal gaasipõletiga (gaaskütuse ja hapniku segu) süttimistemperatuurini, misjärel jätkatakse lõikamist vaid puhta hapniku joaga. Selle meetodi abil saab lõigata ka väga suure paksusega materjali, isegi 750 mm ja rohkem.

Hapniklõikamise täpsus on suhteliselt madal ja ka lõikepinna kvaliteet on tagasihoidlik. Samuti on probleemiks lai termomõjupiirkond.

Lihtsaim hapniklõikamise seade koosneb kahest gaasiballoonist (hapnik ja gaaskütus), gaasi regulaatoritest ja manomeetritest, gaasivoolikutest ning gaasipõletist. Selline käsitsiopereeritav süsteem on odav ja mobiilne. Hapniklõikamise tööpingid võivad koosneda mitmest gaasipõletist ja kasutada erinevat liiki juhtsüsteeme, sh ka arvprogrammjuhtimist (APJ).

5.4.6.3 Elektriaga lõikamine

Elektriaga lõikamine on meetod, mille puhul metalli lõikamine toimub materjali sulatamise või oksüdeerimisega, kuumutades materjali elektriaga. Kuna temperatuur tõuseb äärmiselt kõrgeks, võib seda meetodit kasutada kõikide metallide puhul. Modifitseeritud protsess võib hõlmata gaaside kasutamist töödeldava materjali kiireks oksüdeerimiseks (või selle vältimiseks), s.t kaasab mõningaid hapniklõikamise aspekte.

Elektriaga lõikamise alla kuulub hulk meetodeid, millest levinumad on plasmalõikus, hapnik-kaarlõikus ja õhk-süsinik-kaarlõikus.

Plasmalõikus on erosiooniprotsess, mis kasutab elektri ja kiiret ioniseeritud gaasijuga metalli eemaldamiseks. Protsessis saavutatakse kõrge temperatuur (kuni 28 000 °C) ning see ei sõltu gaasi ja töödeldava materjali vahelisest keemilisest reaktsioonist. Enamasti lõigatakse materjale paksusega 0,5–50 (kuni 150) mm. Süsinikteraste puhul, mille paksus on alla 75 mm, on plasmalõikus oluliselt kiirem kui gaaslõikus. Termomõjupiirkond on võrreldes gaaslõikusega kitsam. Nüüdisaegsed plasmalõikussüsteemid kasutavad mitut lõikepead ja on varustatud APJ-süsteemiga.

5.4.6.4 Laseriga lõikamine

Laserite tööstusrakendused koguvad järjest enam populaarsust tänu laserite kasvanud võimekusele. Lõikamisel kasutatavad laserid on universaalsed, sama masinaga saab lõigata nii terast kui ka riidet, paberit ja plasti. Tehnoloogia paindlikkuse tõttu on tegu prototüüpide ja väikeseeria toodete tootmise ideaalse töövahendiga. Kuna tegu on kontaktivaba tehnoloogiaga, siis tööriist ei kulu. Laseritega saab lõigata keeruka kujuga detaile (2–5-teljised sead-

med), kusjuures lõikejoon võib olla suvalise kujuga. Täpsus on tavaliselt $\pm 0,025$ mm ja lõikepinna kvaliteet Ra terase korral $1,3 \mu\text{m}$ või parem ning mittemetallide puhul $0,5 \mu\text{m}$. Laserlõikus annab suhteliselt puhta lõikepinna, mistõttu võib viimistlevaid operatsioone, nagu näiteks kraatide eemaldamine, kas vähendada või päris ära jätta.

Laserlõikuse omadusi on võrreldud muude lõiketehnoloogiatega tabelis 5.2.

5.4.6.5 Vesi-abrasiivlõikamine

Vesi-abrasiivlõikamine põhineb suure kiirusega pihustataval veejoal, millesse on materjali eemaldamiseks lisatud abrasiivmaterjali. Protsessis materjal ei kuumene, mistõttu materjaliomadused ei muutu. Sageli on lõikepind hea kvaliteediga, mille tõttu ei ole iga kord vaja viimistlevat töötlust, nt kraatide eemaldamist.

Ühtlane juga luuakse kõrgsurve vee surumisel läbi väikse avaga safiirdüüsi. Veejoasse lisatakse abrasiivosakesi ja need pihustatakse läbi kõvasulamist suudmiku välja. Seejuures liigub vesi ja abrasiivmaterjal joas üle kahekordse helikiiruse, mille tulemuseks on võimalus kasutada seda meetodit põhimõtteliselt kõigi materjalide lõikamiseks, sh teras, supersulamid, titaan, keraamika, komposiidid ja plastid. Meetodi võime lõigata ilma termilise mõju ja lõigatava materjali mehaanilise deformeerimiseta annab talle olulise eelise.

5.4.6.6 Lõikeprotsesside võrdlus

Allpool on võrreldud kirjeldatud erinevate lõikeprotsesside kasutusotstarbekust.

Tabel 5.2 Lõikeprotsesside võrdlus [5.39]

	Tehnoloogia			
	Laserlõikus	Vesi-abrasiivlõikus	Plasmalõikus	Hapnikulõikus
Materjali liik	Kõik homogeensed	Kõik	Metallid	Metallid
Maksimaalne paksus (teras), mm	30	100	50	300
Termomõjupiirkonna laius, mm	0,05	0	>0,4	>0,6
Lõigatud serva suhteline kvaliteet	Täisnurkne, sile	Täisnurkne, sile	Kaldus, ebatasane	Täisnurkne, ebatasane
Lõigatud serva pinnakaredus Ra, μm	1–10	2–6,5	(Väga suur)	(Väga suur)
Väiksema lõigatava ava diameeter, mm	0,5	>1,5	>1,5	>20
Suhteline energiakulu	Väike	Väike	Suur	Keskmine
Suhtelised investeermiskulud	1	1	0,1	0,01
Suhteline tootlikkus	Suur	Keskmine/väike	Keskmine	Väike

5.5 Viimistlustehnoloogiad

Viimistlustehnoloogiad kuuluvad tootmisprotsessi viimaste operatsioonide hulka, seega on äärmiselt oluline, et suudetaks valida just oma tingimustele ning endale vajalik viimistlustehnoloogia, et suurendada tootlikkust, kvaliteeti ning kasumlikkust. Viimistlustehnoloogiad ning nende valik sõltuvad erinevatest faktoritest, nagu ranged toote kvaliteedi-, keskkonna- ja tervisekaitse nõuded, tootlikkuse suurendamise, tööaegade ja tootmise maksumuse vähendamise nõue. Erinevate nõuete ja eeskirjade tõttu püütakse leida viimistlustehnoloogiaid, mis vastaksid eelnimetatud nõuetele. Näiteks on masinatööstus võtnud suuna ilma jahutusvedeliketa tootmismeetoditele, mis aitab vähendada tootmiskulusid 7–17%. Teatud materjale, nagu messing ja malm, on lihtsam freesida ja treida ilma jahutusvedeliketa kui muid analoogseid metalle. Samas eeldab enamik ava töötlemise operatsioone ka jahutusvedelike kasutamist. Mitte kõikides operatsioonides ei saa jahutusvedelike eemaldamisega eeliseid, kuna kõrgete temperatuuride ja survejõudude tõttu suureneb näiteks tööriista kulumine ning suurenevad pinna deformatsioonid. Sellest lähtuvalt püütakse kasutada peaaegu kuiva töötlemist, kus jahutusvedelike pihustatakse töödeldavatesse piirkondadesse tilkade või uduna. Peale selle arendatakse erinevaid meetodeid ja tööriistu, nagu puuride hea määrduvusega pinnakatted, vaakumimamine, gravitatsiooni abil laastu eraldamine pööratud spindliga puurimisel jne.

Selles peatükis kirjeldatakse lühidalt levinumaid tööstustootmises kasutatavaid viimistlustehnoloogiaid ja nende iseloomulikke parameetreid, et lihtsustada erinevate meetodite valikut.

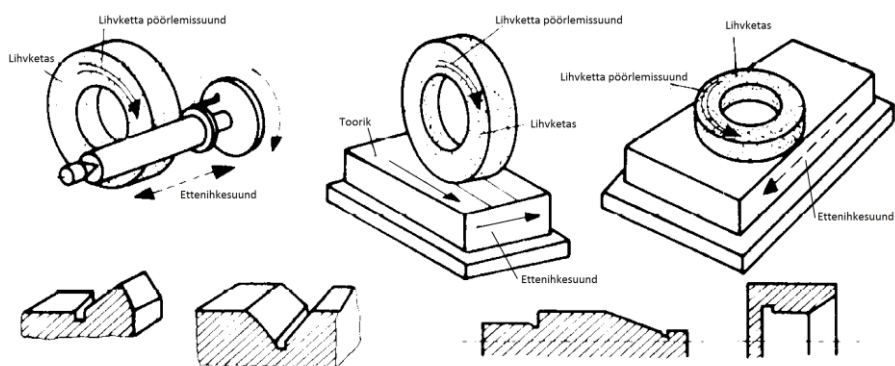
Üldiselt jaotatakse viimistlevad meetodid lõikamisel kasutatava energia või protsessi liigi järgi nelja erinevasse rühma: mehaanilised viimistlustehnoloogiad, kus lõikamisel rakendatakse mehaanilist energiat ja lõikamine toimub mehaanilise deformeerimise tulemusena ning lõikeprotsess on hästi juhitud; keemilised viimistlustehnoloogiad, kus lõikamisel kasutatakse keemilisi protsesse ning lõikeprotsess on halvasti juhitud; elektrilised viimistlustehnoloogiad, kus lõikamisel kasutatakse elektrilisi protsesse ning töödeldakse ainult elektrit juhtivaid materjale; termilised viimistlustehnoloogiad, kus lõikamisel kasutatakse soojuslikke protsesse ning lõikeprotsess on juhitud. Võimalik on ka erinevate energialiikide ja keemiliste protsesside koos kasutamine.

5.5.1 Mehaanilised viimistlustehnoloogiad

5.5.1.1 Lihvimine (mikroteriklõikamine)

Meetodi kirjeldus. Lihvimine on puhastöötlusmeetod mille tulemusena vähendatakse töödeldava pinna karedust. Lihvimine toimub abrasiivtöötlusel, kus kas pastas, suspensioonis, õhujoas või abrasiivlõikuri (lihvketta, luisu) pinnal olevad abrasiivterad kujundavad töödeldavat pinda. Sõltuvalt abrasiivtera väljaulatusest riista pinnast, kujust ja lõigatava kihi paksusest töödeldava pinnaga kontakteeruv abrasiivtera lõikab või muljub sellesse soone. Enamasti toimuvad mõlemad protsessid samal ajal. Väikest töödeldud pinna karedust võimaldab lõikamisest osavõtvate abrasiivterade suur hulk. Lõikerežiimi elementideks on lõikekiirus (lihvketta

joonkiirus), ettenihe (töödeldava detaili nihutuse suurus ühe pöörde vältel piki telge), lõikesügavus (metallikihi paksus, mille lihvketas eemaldab ühe käiguga), masinaaeg (aeg, mis kulutatakse vahetult metalli lõikamiseks lihvkettaga). Lihvimisel kasutatakse lõikurina lintlihv, liivapabereid ja lihvkettaid. Lihvketas koosneb abrasiivteradest ja sideainest. Abrasiivterad lõikavad töödeldavat materjali ja sideaine hoiab terasid kettas. Lihvketta mõõtmed on välis- ja siseläbimõõt ning paksus. Lihvkettad valmistatakse looduslikest (teemant, korund) ja tehiskivist abrasiivmaterjalidest (elektrokorund, ränikarbiid). Abrasiivmaterjali tera on väga kõva, kuumuskindel ning purunemisel tekivad teravad servad. Lihvketta teralisus avaldab mõju lihvitud pinna kvaliteedile, mida peenem on tera, seda siledam saadakse pind. Abrasiivterade sideainena kasutatakse anorgaanilist, keraamilist, silikaatset ning orgaanilist bakeliitset ja vulkaniitset sideainet. Ketta kõvadus mõjutab oluliselt lihvimist ja eelkõige ketta iseterituvust. Iseteritumine tähendab nürinenud terade kettast eraldumist ja uute teravate servadega terade paljastumist. Kuju järgi liigitatakse lihvkettad järgmiselt: sirge profiiliga tasased kettad välisümar-, sise-, tsentriteta ja tasalihvimiseks; koonilise profiiliga tasased kettad keerde, hammaste lihvimiseks; avardatud auguga tasased kettad ümar- ja otslihvimiseks; lehtkettad paksusega 0,5–5 mm maha ja läbilõiketöödeks rõngas ja kauskettad tasalihvimiseks ketta otsaga [5.40, 5.41, 5.42, 5.43, 5.44, 5.45, 5.46, 5.51].



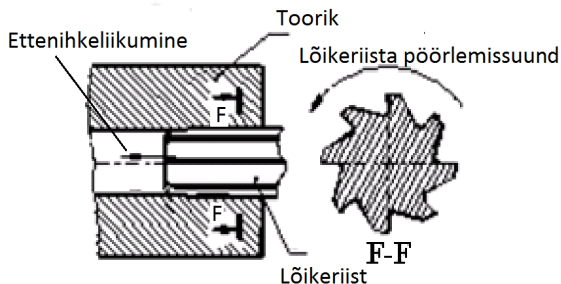
Sele 5.67 Lihvimise üldine skeem: 1 – lihvkettaga silindripinna töötlemine, 2 – lihvkettaga tasapinna töötlemine, 3 – lihvketta otspinnaga tasapinna töötlemine

Kasutusala. Lihvimisel saab töödelda erinevaid silinder-, tasa- ja kujupindu, sooni, sfäärilisi pindu, keerdeid ning hambaid. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,04–0,32 μm ja töötlustäpsus IT 5–6.

Töödeldavad materjalid. Lihvimisel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu teras, hallmalm, pronks, kõvasulam, kivimid, keraamika, klaas, puit, plastid, komposiitmaterjalid [5.40, 5.41, 5.42, 5.43, 5.44, 5.45, 5.46].

5.5.1.2 Hõõritsemine

Meetodi kirjeldus. Hõõritsemine on puhastöötlusmeetod, mida kasutatakse avade viimistlemisel suurema täpsuse ning väiksema pinnakareduse saavutamiseks pärast puurimist või avardamist. Hõõritsatega eraldatav töötlusvaru ulatub kümnendike mm-teni. Hõõritsat suunab ettetöödeldud ava ning tuleb tagada hõõritsa ja ava telgede ühtivus. Hõõritsat võib jäigalt kinnitada vaid juhul, kui kinnitus tagab hõõritsa ja ava telgede ühtivuse, vastasel juhul kasutatakse kiikuv- või ujuvkinnitusrakiseid. Vastavalt töödeldava augu kujule liigitatakse hõõritsaid silindrilisteks ja koonilisteks. Hõõritsemiseks saab kasutada normaaltäpsusega pinke (puur-, trei-, koordinaat-sisetrei-, revolver- ja automaatpinke). Hõõritsemisega on võimalik töödelda avasid alates läbimõõdust 0,1 mm.



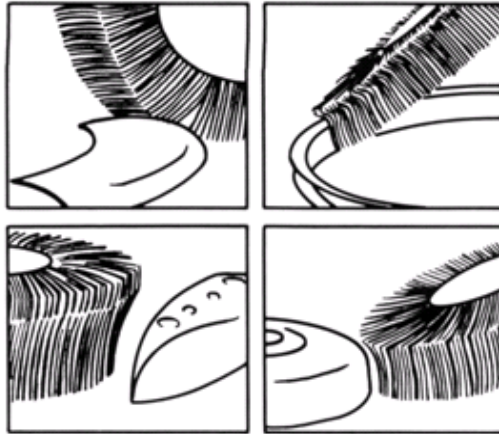
Sele 5.68 Hõõritsemise üldine skeem

Kasutusala. Hõõritsemisel saab töödelda erinevaid silindripindu ja koonilisi pindu. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,08–0,63 μm ja tööstustäpsus IT 5–6.

Töödeldavad materjalid. Hõõritsemisel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu teras, malm, värvilised metallid ja sulamid [5.40, 5.41, 5.42, 5.43, 5.44, 5.45, 5.46].

5.5.1.3 Poleerimine

Meetodi kirjeldus. Poleerimine (*polishing*) on pinnakareduse vähendamiseks kõige enam kasutatavam meetod, kus tooriku geomeetria töötlemise käigus ei muutu. Poleerimisel toimub tooriku ja pehme poleertööriista (ketas, valts, hari jne) suhtelise liikumise tulemusena pinna silumine poleerpasta abil. Poleerimisel võib tekkida õhukeses pinnakihis küllalt kõrge temperatuur (200–600, kohati isegi üle 1000°C), mille tulemusena muutuvad pinna omadused kuni 10 mikromeetri sügavuseni. Pinnakihis peenenevad kristallid, selle tulemusena paranevad ekspluatatsiooniomadused nagu väsimustugevus ja korrosioonikindlus. Abrasiivlõikuriks on elastne ketas (riidest, nahast või vildist), mille pinnale kantakse peeneteraline abrasiiv. Poleeritakse ka elastsele kettale kantava poleerpastaga. Vedelaid poleerimisvahendeid kasutatakse peamiselt automatiseeritud poleerimisel samuti roostevaba terase ja värviliste metallide poleerimisel. Vedelpoleervahendi jahutav toime on suurem kui pastadel, mille tõttu võib kasutada suuremaid kiiruseid ja surveid [2, 4, 7, 8, 12].



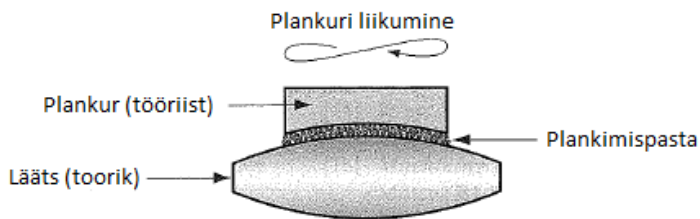
Sele 5.69 Poleerimise üldine skeem

Kasutusala. Poleerimisel saab töödelda erinevaid silindrilisi ja koonilisi pindu, tasa- ning kujupindu. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,05–0,1 μm ja töötlustäpsus IT 4.

Töödeldavad materjalid. Poleerimisel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu teras, roostevaba teras, malm, vask, klaas, plastid, graniit, alumiinium, kuld ja hõbe [5.40, 5.41, 5.42, 5.43, 5.44, 5.45, 5.46].

5.5.1.4 Plankimine (soveldamine)

Meetodi kirjeldus. Plankimine kuulub vaba abrasiiviga töötlemismeetodite hulka, mille puhul abrasiiviosakesed on surutud töödeldava pinna ja suhteliselt pehmest materjalist (vaske, malm) plankuri vahele. Plankuril on töödeldava pinnaga sama kuju. Materjali eemaldamine toimub vaba abrasiiviga pastadena või abrasiivi ja vedeliku suspensioonina. Suhteline liikumine abrasiivkeskkonnas saadakse olenevalt töötlemise liigist. Plankimisel on abrasiivi kandjaks tööriist-plankur. Protsessi eesmärgiks on pinnakareduse vähendamine, mõõtmete ja kujutäpsuse tõstmine. Nii nagu paljude töötlusviiside juures nii ka siin pinnakihti sügavusega kuni 0,1 μm võivad jääda absorbeerunud gaasid, vesi, hapendid, rasv ja abrasiivijäätmel, mis võivad oluliselt muuta pinna füüsikalisi-mehaanilisi omadusi. Nii näiteks plankimisel suureneb kulumiskindlus korrosioonikindlusega. Abrasiiviks kasutatakse ränikarbiide, valget korundi, erijuhtudel boorkarbiidi ja teemante. Pinnale, eriti kõrgete nõudmistega korral, rauaoksiide, kroomoksiidi, põlevkivituhka ja savi. Abrasiivi valikul on reegel: mida kõvem on tooriku materjal, seda kõvemad peavad olema abrasiiviterad. Plankimissegu koosneb eeltoodud abrasiivist ja vedelikust või pastast. Vedelikena kasutatakse petrooleumi, õli, tärpentini, bensini, bensooli, alkoholi, soodavett ja vett. Pastade valmistamisel kasutatakse rasva, vaha, steariini ja parafiini [5.41, 5.43, 5.46, 5.47, 5.51].



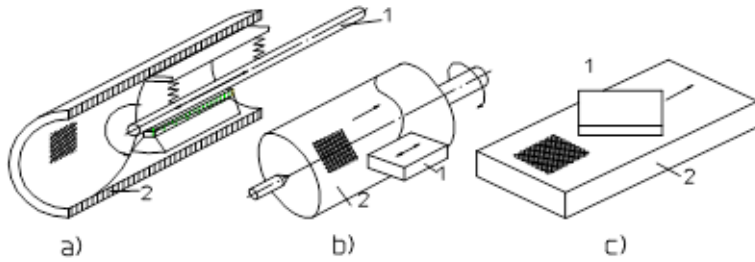
Sele 5.70 Plankimise üldine skeem

Kasutusala. Plankimisel saab töödelda erinevaid silinderpindu, koonilisi pindu, sfäärilisi pindu ja tasapindu. Plankimist kasutatakse hammasrataste, ventiilide, kraanide, klappide jm valmistamisel. Plankimist kasutatakse peale ülaltoodu ka pooljuhtide detailide valmistamisel (on plangitud 0,06 mm paksusega detaile). Plankimisel peab tooriku välisläbimõõt olema suurem kui 2 mm. Plangitakse ka profiilpindu (näiteks kuullaagrite kuule). Saavutatav pinnakarvus on piires Ra 0,01–0,08 μm ja töötlustäpsus IT 2–3.

Töödeldavad materjalid. Plankimisel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu teras, malm, pronks, alumiinium, messing, kõvasulam [5.41, 5.43 5.46, 5.47].

5.5.1.5 Hoonimine

Meetodi kirjeldus. Hoonimine on viimistlev lõiketöötlus üheaegselt mitme abrasiivluisuga. Tooriku ja lõikuri (hooni) vahel toimub kaks suhtelist liikumist: pöörlemine ja edasi-tagasi liikumine. Hoonimisega on võimalik töödelda nii välis- kui ka sisepöördpindu ja ka tasapindu. Enamlevinud on sisepöördpindade töötlemine. Abrasiivlõikuriks on peeneteralised hooni kinnitatud hoonimisluisud. Luiskude arv hoonis oleneb töödeldava silindrilise pinna läbimõõdust ja on minimaalselt 2, ulatudes kümneteni suure läbimõõduga avade viimistlemisel. Hoonimisel tekivad lõikuvad töötlemisjäljed. Selline pind on soodus kulumiskindluse seisukohalt. Töötlemisjälgede vaheline nurk oleneb pöörleva ja edasi-tagasi liikumiskiiruste vahekorrast. Hoonimine on lõppviimistlusviis. See võib olla kas ühe- või mitmekordne (tavaliselt kahekordne: eel- ja puhashoonimine). Eel- ja puhashoonimisel kasutatakse erineva teralisusega luiske. Kaheastmelise hoonimise puhul kasutatakse kahte pinki või ühte kahespindilist pinki. Hoonimisel kasutatakse jahutus-määrdevedelikku, mille ülesandeks on peale jahutamise ka eraldunud tooriku ning lõikuri osakeste äraviimine töötlemise tsoonist [5.41, 5.43, 5.46, 5.47, 5.51].



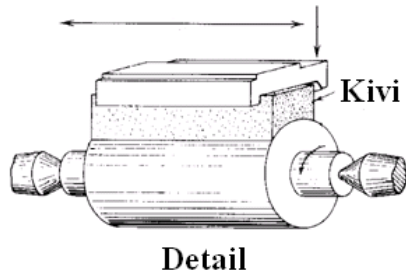
Sele 5.71 Hoonimise üldine skeem: a – silindrilise sisepinna hoonimine, b – silindrilise välispinna hoonimine, c – tasapinna hoonimine

Kasutusala. Hoonimisel saab töödelda erinevaid silindripindu (läbiv- ja umbavad), tasapindu, toroidaalpindu ja sooni. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,02–0,32 μm ja töötlustäpsus IT 4–6.

Töödeldavad materjalid. Hoonimisel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu teras, malm, anodeeritud alumiinium, alumiinium, pronks ja messing [5.41, 5.43, 5.46, 5.47].

5.5.1.6 Superfiniš

Meetodi kirjeldus. Superfiniš on töötlemine abrasiivluiskudega, kus on üldjuhul kolm liikumist: tööliikumine, ettenihkeliikumine ja luiskude võnkumine ettenihkeliikumise sihil amplituudiga 2–8 mm ja sagedusega 1000–3000 võnget minutis. Peamine eesmärk on pinnakareduse vähendamine ($R_z = 0,05\text{--}0,02 \mu\text{m}$), kuid eeltöötuse pinnakonaruse piirides on võimalik tösta ka mõõtme- ja kujutäpsust. Meetodi eeliseks on võimalus saavutada kõrge suhtelise tugipinna suurus (70–95%). Superfinišiga on võimalik parandada kujuviga ristlõikes ja lainelisust (soodsatel tingimustel kuni 95% võrra võrreldes eelneva töötlusviisiga). Tulemused sõltuvad nagu hoonimiselgi luiskude mõõtmetest, teralisusest, abrasiivi liigist, sideainest ja kõvadusest. Mõõtmed peavad olema sellised, et luiskude summaarne haardenurk toorikuga oleks umbes 60–80°, mis tähendab, et luiskude laius võrdub tooriku raadiusega. See tagab hea pinnakvaliteedi ja kujutäpsuse. Paremate tulemuste saamiseks peab luiskude kontaktpind olema profileeritud tooriku järgi. Luiskude normaallaius on umbes 60 mm. Liiga laiade luiskude korral on surve liiga suur ja on ka oht, et luisu keskele ei pääse jahutusmäärdevedelik. Selle vea parandamiseks kasutatakse mitme, kitsama luisuga (laius umbes 30 mm) tööriista. Abrasiivina kasutatakse ränikarbiidi, korundi ja teemante [5.41, 5.43, 5.46, 5.47, 5.51].



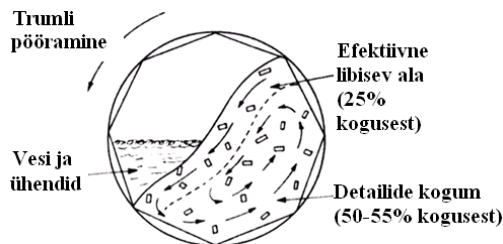
Sele 5.72 Superfiniši üldine skeem

Kasutusala. Superfinišil saab töödelda erinevaid silinderpindu, tasapindu ja koonilisi pindu. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,01–0,16 μm ja tööstustäpsus IT 3–5.

Töödeldavad materjalid. Põhimõtteliselt on superfinišiga töödeldavad kõik metallid, kuid praktiliselt on meetod kasutusel järgmiste materjalide töötlemiseks: malm, terasvalu, kõva kroom, karastatud ja karastamata teras, alumiiniumsulamid, vaskvalu ja valgevask [5.41, 5.43, 5.46, 5.47].

5.5.1.7 Trummeldamine

Meetodi kirjeldus. Trummeldamine (*tumbling, barrel finishing*) on tooriku pindade silumine abrasiivaine ja tooriku liikumisega trumlis, viimase pöörlemise või vibreerimisega. Peamine eesmärk on pinnakareduse vähendamine, kuidmuudetakse ka tooriku kuju muutmine. On sobiv viimistlusmeetod väikeste detailide ja suurte koguste korral. Trumlid on polügoni ristlõikega (6- või 8-nurksed). Töötlemisprotsessist võtab üheaegselt osa ainult 1/7 trumli sisust. Libisemise kiirus väheneb kaugenemisel tsentrist. Protsessile avaldavad mõju tooriku kõvadus, sitkus ja elastsus. Näiteks pehmete materjalide töötlemisel kulgeb protsess intensiivsemalt, kuid saadakse matt pind. Oluline on ka legerivate elementide ja struktuuri mõju. Kasutatakse järgmisi täitematerjale: looduslikud kivimid (basaltkivi, diabas, dolomiit, kvarts, graniit, liivakivi ja savi); metallsed täidised (karastatud teraskuulikesed (läbimõõduga 5–8 mm) sageli segamini silindrikestega ja koonustega. Kasutatakse ka metallijäätmeid ja värvilistest metallidest osakesi); sünteetilised ained (klaas, pähklikoored, kõva puit, plastmassid, šlakid, nahk ja vilt).



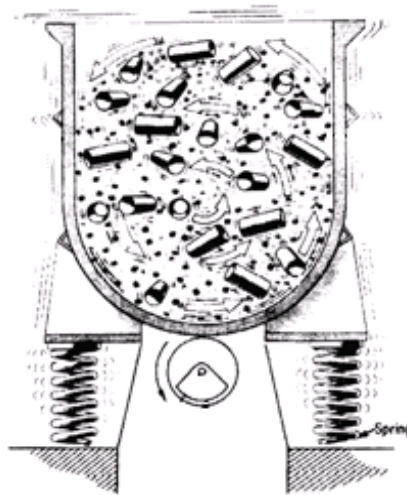
Sele 5.73 Trummeldamise üldine skeem

Kasutusala. Trummeldamisel saab töödelda erinevaid ebaregulaarseid pindu ja kujupindu. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,16–0,63 μm ja tööstlustäpsus IT 7.

Töödeldavad materjalid. Trummeldamisel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu metallid, plastid ja keraamika [5.41, 5.43, 5.46, 5.47].

5.5.1.8 Vibrotöötlus

Meetodi kirjeldus. Vibrotöötlus (*vibratory finishing*) on analoogne viimistlusmeetod trummeldamisega, kus töötlemine toimub trumli sisemuse kõikides punktides enam-vähem ühtlaselt, mille tõttu protsess kulgeb intensiivsemalt. Erinevalt trummeldamisest viiakse vibrotöötlus läbi avatud mahutites. Kasutatakse järgmisi täitematerjale: looduslikud kivimid (basaltkivi, diabas, dolomiit, kvarts, graniit, liivakivi ja savi) ja metallsed täidised (karastatud teraskuulikesed (läbimõõduga 5–8 mm), mis on sageli segamini silindrikestega ja koonustega. Kasutatakse ka metallijäätmeid ja värvilistest metallidest osakesi) ja sünteetilisi aineid (klaas, pähklikoorred, kõva puit, plastmassid, šlakid, nahk ja vilt). Vibrotöötuse protsess on lihtne ja efektiivne ning võimaldab töödelda suure hulga detaile partiide kaupa. Pehmetest mitterauasulameist detailide viimistlusaeg on lühike (ca 10 min), samas kõvemate teraste viimistlusaeg võib ulatuda paari tunnini [5.41, 5.43, 5.46, 5.47, 5.51].



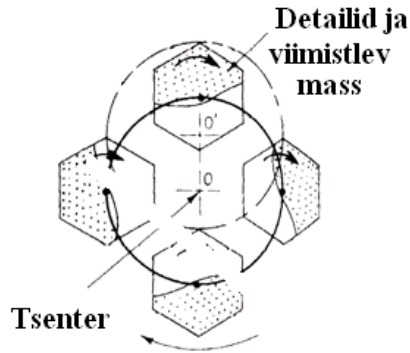
Sele 5.74 Vibrotöötuse üldine skeem

Kasutusala. Vibrotöötlusel saab töödelda erinevaid ebaregulaarseid pindu, kujupindu, eemaldada kraate ja tagi. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,16–0,63 μm ja tööstlustäpsus IT 7.

Töödeldavad materjalid. Vibrotöötlusel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu metallid, plastid ja keraamika [5.41, 5.43, 5.46, 5.47].

5.5.1.9 Tsentrifugaaltöötlus

Meetodi kirjeldus. Tsentrifugaaltöötlus (*centrifugal finishing*) on viimistlusmeetod, kus detailid ja viimistlev mass pöörleb trumlites ümber trumli tsentri ja trumlid pöörlevad omakorda ümber muutuva tsentri. Erinevus vibrotööstlusest on trumlite suuruses ja arvus. Töödeldakse väikesemõõtmelisi detaile partiide kaupa.



Sele 5.75 Tsentrifugaaltöötluse üldine skeem

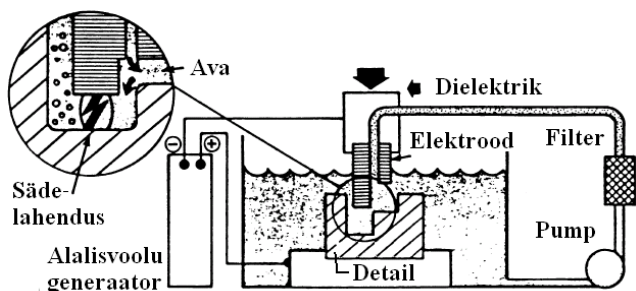
Kasutusala. Tsentrifugaaltöötusel saab töödelda erinevaid ebaregulaarseid pindu ja kuju-pindu. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,16–0,63 μm ja tööstustäpsus IT 7.

Töödeldavad materjalid. Tsentrifugaaltöötusel saab töödelda väga erinevaid materjale, nagu metallid, plastid ja keraamika [5.41, 5.43, 5.46, 5.47].

5.5.2 Elektrilised ja keemilised viimistlustehnoloogiad

5.5.2.1 Elektroerosioontöötlus

Meetodi kirjeldus. Elektroerosioontöötlus (*electrical discharge machining*) põhineb pinna purunemisel elektrilise impulsslaengu (sädelahenduse) soojuslikul toimel. Sädelahenduse tekkimiseks peab toimuma läbilöök tooriku ja tööriista vahelises pilus. Sädelahenduse kontsentreerimiseks sukeldatakse tööriist ja toorik dielektrikusse. Selleks võib olla parafiin, õli vm. Samuti aitab dielektrik jahutada elektroodi ja eemaldada pilust aineosakesi. Metallide erosioon toimub mõlemal elektroodil, kuid negatiivselt elektroodilt eemaldatakse vähem kui positiivselt. Arvestades seda tingimust, võetakse tööriistaks negatiivne elektrood. Säde temperatuur tõuseb kuni 20 000 °C. Tulenevalt sellest, et säde mõjumise aeg on lühike, aurustub metall väga lühikese ajaga. Selle töötlusviisiga saab töödelda ainult elektrit juhtivaid materjale. Samuti on piiranguks väike tootlikkus. Seda piiravad just lühike lahenduse kestus ja pikad vaheajad. Samuti võtab töötlus palju aega, kui nõutakse kõrget pinna kvaliteeti. Selle meetodi puuduseks võib lugeda lahenduseks vajalikku kõrget voolutugevust ja tekkivat kõrget temperatuuri [2, 4, 9, 10, 12].



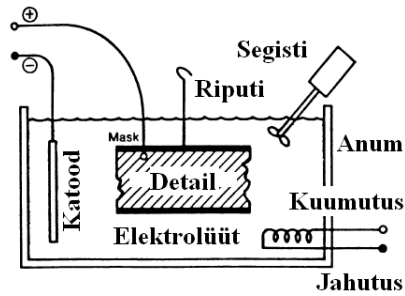
Sele 5.76 Elektroerosioontötluse üldine skeem

Kasutusala. Elektroerosioontötlusel saab töödelda erinevaid tasa- ja kujupindu. Kasutatakse kraatide eemaldamiseks ja pinnakonaruste silumiseks, puurimiseks (Protsess kulgeb peamiselt tööriista otspinna ja töödeldava ava põhja vahelises pilus. Ava läbimõdu konstantsus tagatakse tööriista külgpinna isoleerimisega.), kujupindade töötlemiseks; elektrokeemiliseks lihvimiseks (lihvkäi koosneb elektrit mittejuhtivatest abrasiivteradest ja elektrit juhtivast sideainest. Lihvkäi on katoodiks, toorik anoodiks. Lihvkäia abrasiivterad kujundavad katoodi ja anoodi vahelise pilu, kuhu suunatakse elektrolüüt); elektrokeemiliseks kaartötluseks (elektrokeemiline kaartötlus on elektrokeemilise ja elektrisädetötluse kombinatsioon, kus dielektrikut asendab elektrolüüt). Saavutatav pinnakaredus elektroerosioontötlusel on piires Ra 1,6–3,2 μm ja tööstustäpsus IT 6–13.

Töödeldavad materjalid. Elektroerosioontötlusel saab töödelda elektrit ja soojust juhtivaid materjale [5.41, 5.43, 5.48, 5.49, 5.51].

5.5.2.2 Elektropoleerimine

Meetodi kirjeldus. Elektropoleerimine (*elektropolishing*) on vastupidine protsess elektrokeemilisele pindamisele, kus materjali eemaldamine pinnalt on analoogne selle sinna sadestamisega. Meetodit kasutatakse metallpindade poleerimisel. Töödeldav detail on anoodiks ning uputatakse elektrolüüti. Katoodi lisamisega elektrolüüti, alalisvoolu elektropoleerimisseadmes elektrivoolu rakendamisel, eraldub materjal detaili pinnalt, eelistatumalt kõrgematelt pinnakonarustelt. Suhteliselt sileda lähtepinna korral on tulemuseks peegelpind. Esialgu kasutati elektropoleerimist metallograafias mikrolihvide valmistamiseks, hiljem hakati kasutama rooste- ja teraslehtede ja teiste toodete poleerimiseks.



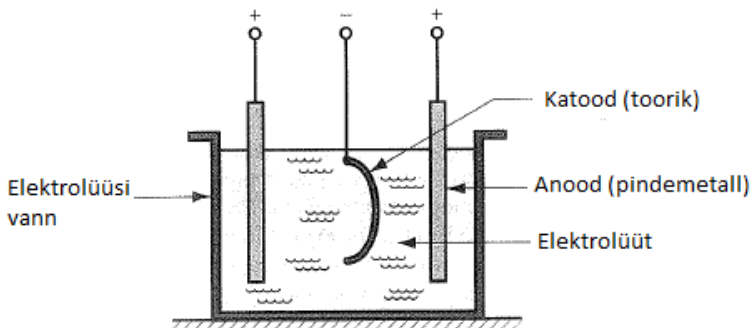
Sele 5.77 Elektropoleerimise üldine skeem

Kasutusala. Elektropoleerimisel saab töödelda erinevaid kujupindu. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,1–0,8 μm .

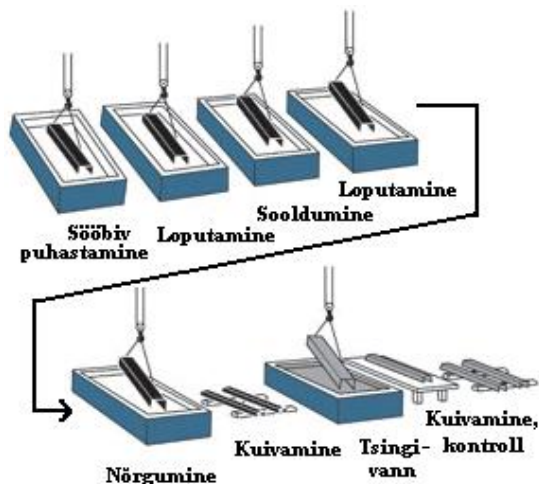
Töödeldavad materjalid. Elektropoleerimisel saab töödelda erinevaid materjale, nagu madal- ja kõrgsüsinikteras, messing, tööriistateras, pronks, nikkel, titaan, vask, hõbe, kuumuskindlad sulamid (W) [5.41, 5.43, 5.48, 5.49].

5.5.2.3 Galvaaniline katmine (elektrolüütiline katmine metalliga)

Meetodi kirjeldus. Galvaaniline katmine (*electroplating, electrochemical plating*) on viimistlusmeetod detailide katmiseks õhukese metalli kihiga. Detail on katoodiks, mis asetatakse galvaanilisse vanni elektrolüüdi lahusesse. Kaetav metall on anoodiks ning elektrivoolu rakendamisel metalliosakesed kinnituvad detaili pinnale. Parema tulemuse saavutamiseks tuleb kaetavad detailid eelnevalt keemiliselt puhastada.



Sele 5.78 Galvaanilise katmise skemaatiline kirjeldus



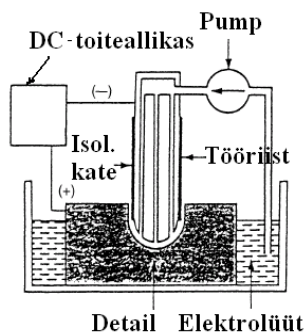
Sele 5.79 Galvaanilise katmise üldine skeem

Kasutusala. Galvaanilisel katmisel saab töödelda erinevaid tasa- ja kujupindu.

Töödeldavad materjalid. Galvaanilisel katmisel saab töödelda erinevaid materjale, nagu raud, teras ja alumiinium ning pinnakattena kasutatakse eelkõige niklit, kroomi ja tsinki [5.41, 5.43, 5.48, 5.49].

5.5.2.4 Elektrokeemiline töötlus

Meetodi kirjeldus. Elektrokeemiline töötlus (*electrochemical machining*) on elektrolüütiline protsess, kus metall eemaldatakse toorikult (anoodilt) elektrokeemilisel teel. Elektrolüüsi ajal tooriku pinnal olevad konarused lahustuvad ja tekib sile, poleeritud pind. Kasutatavamaks voolutiheduseks on $0,02 \text{ A/cm}^2$, kusjuures eemaldatakse kuni $10 \text{ }\mu\text{m}$ konarused. Elektrokeemilise töötusega tuleb sama kvaliteedi saavutamiseks eemaldada oluliselt rohkem materjali kui elektropoleerimisel. Oluline tähtsus pinnakvaliteedi kujunemisel on elektrolüüdil. Sõltuvalt töödeldavast metallist põhjustavad mõned elektrolüüdid graveeritud välimusega pinna tekkimise. Seda tingivad erinevate peegeldusomadustega kristallide tahud, mis on tekkinud nende ebaühtlase elektrokeemilise lahustumise tagajärjel. Selline graveeritud matt pind moodustub näiteks nikkelteraste elektrokeemilisel töötusel naatriumkloriidis, kus tüüpiliseks pinnakareduseks on $Ra 1 \text{ }\mu\text{m}$. Kui soovitakse poleeritud pinda, peab pinnale peale EKT-d jääma õhuke oksiidikiht. Pinna kvaliteedile avaldab mõju ka voolutihedus ja elektrodide vahel voolava elektrolüüdi kiirus. Kui nikli töötlemisel elektrolüüdi ühtlase voolukiiruse juures suurendati voolutihedust $8\text{--}19 \text{ A/cm}^2$, muutus pind matist poleerituks. Sarnane efekt esineb ka elektrolüüdi voolukiiruse suurendamise tagajärjel. Uuringud on näidanud, et erikraanide abil on protsessi võimalik suunata kitsamale pinnale, mis suurendab töötlemise täpsust. Seda nimetatakse mikroelektrokeemiliseks töötuseks [5.41, 5.43, 5.46, 5.51].



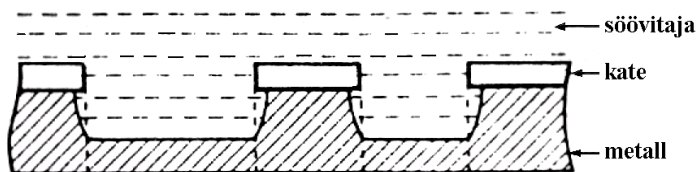
Sele 5.80 Elektrokeemilise töötuse üldine skeem

Kasutusala. Elektrokeemilisel töötusel saab töödelda erinevaid tasapindu, kujupindu ja silindrilisi avasid. Kasutatakse ka kraatide eemaldamiseks ja pinnakonaruste silumiseks, puurimiseks, kujupindade töötlemiseks. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,1–1,0 μm ja töötlustäpsus IT 6–13.

Töödeldavad materjalid. Elektrokeemilisel töötusel saab töödelda elektrit ja soojust juhtivad materjale [5.41, 5.43, 5.46].

5.5.2.5 Keemiline töötlus

Meetodi kirjeldus. Keemilisel töötusel (*chemical machining*) eemaldatakse materjali toorikult söövitades. Pinnaosad, kus materjali tahetakse säilitada, kaetakse kummi või plastikuga. Söövitajana kasutatakse mitmesuguseid aluselisi ja happelisi lahuseid. Materjali eemaldatakse intensiivsusega 0,025 mm/min. Keemilise töötlusena on tuntud järgmised materjali eemaldusviisid: keemiline freesimine, keemiline väljalõikus ja keemiline graveerimine. [5.41, 5.43, 5.46, 5.50, 5.51].



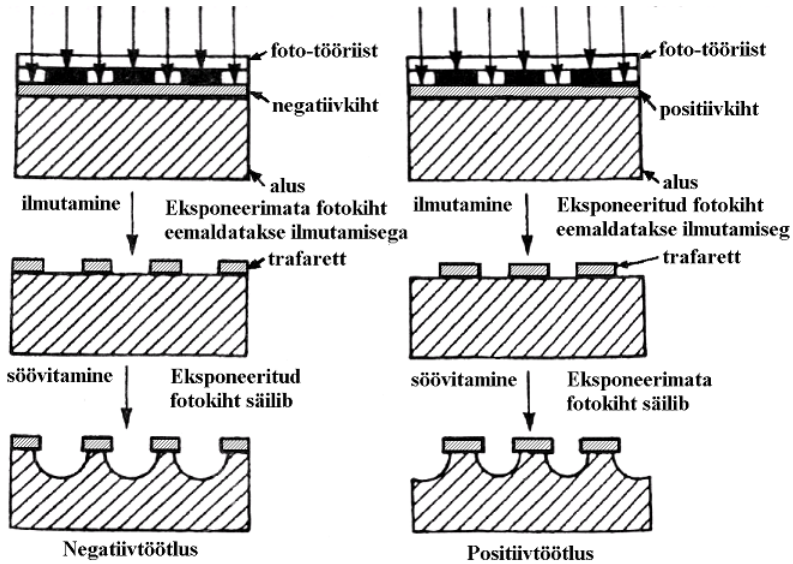
Sele 5.81 Keemilise töötuse üldine skeem

Kasutusala. Keemilisel töötusel saab töödelda erinevaid tasapindu ja süvendeid. Keemilist töötust kasutatakse materjali eemaldamiseks (freesimiseks) soovitud aladelt, trükiplaatide valmistamisel, täpsete istude tagamiseks (näiteks šarniirühendustes). Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,1–6,3 μm . Tolerants on eemaldatava kihi paksuse piires.

Töödeldavad materjalid. Keemilisel töötusel saab töödelda erinevaid metalseid ja mittemetalseid materjale [5.41, 5.43, 5.46, 5.50, 5.51].

5.5.2.6 Fotokeemiline töötlus

Meetodi kirjeldus. Fotokeemiline töötlus (*photochemical machining*) on tuntud ka fotosöövituse nime all. Töötlamine toimub järgmiste etappidena: fotošabloon valmistamine fotokilel või -plaadil (negatiiv või positiiv); metallplaadi keemiline puhastamine ja katmine valgustundliku kilega; šabloonil oleva kujundi kopeerimine valgustundliku kilega kaetud plaadile (selleks kasutatakse tavaliselt ultravioletvalgust); plaadi ilmutamine; plaadi söövitamine. Fotosöövitamist kasutatakse laialt mitmesuguste märkide, siltide, instruksioonitahvlite jne valmistamisel.



Sele 5.82 Fotokeemilise töötluste üldine skeem

Kasutusala. Fotokeemilisel töötlusel saab töödelda erinevaid süvendeid ja kujupindu.

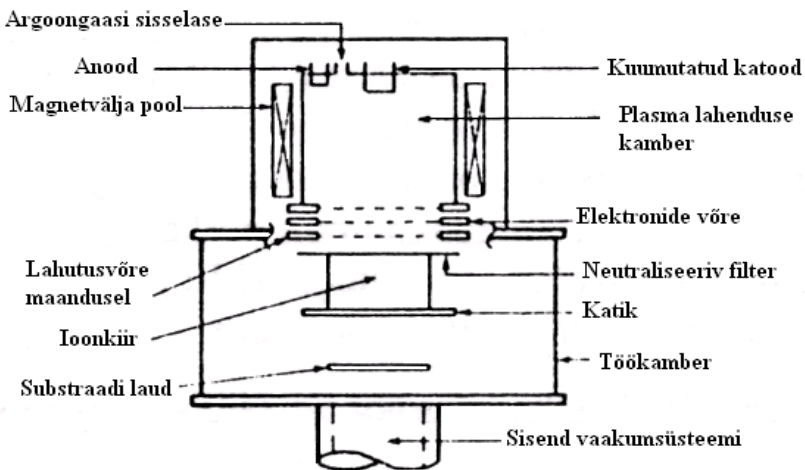
Tööeldavad materjalid. Fotokeemilisel töötlusel saab töödelda erinevaid metalseid ja mittemetalseid materjale [5.41, 5.43, 5.46, 5.50, 5.51].

5.5.3 Termilised viimistlustehnoloogiad

5.5.3.1 Ioonkiirtöötlus

Meetodi kirjeldus. Ioonkiirtöötlus (*ion beam machining*) toimub vaakumis. Ioonide vool suunatakse vastu töödeldavat pinda samuti nagu elektronkiirtöötluse puhul, kuid materjali eraldumise mehhanism erineb oluliselt. Ioonkiirtöötluse seade koosneb kolmest peamisest osast: plasmaallikast, mis genereerib ioone; plasmast; ioone eraldavatest võredest ja töölauast.

Katoodilt, milleks on tavaliselt volframist hõõgniit, eralduvaid elektrone kiirendatakse 1 kV kõrgepingega. Teel anoodile pörkuvad elektronid kokku argooni aatomitega, tekitades positiivseid argooni ioone. Elektronide liikumise teekonna ja ka kiiruse suurendamiseks muundatakse nende trajektor kas elektri- või püsिमagnetiga spiraaliks. Argooni ioonid eraldatakse plasmakambrist spetsiaalsete võrede abil. Alumisel võrel on anoodist tunduvalt negatiivsem potentsiaal, mis tekitab negatiivse välja, mille mõjul eemaldataksegi ioonid plasmast. Keskmise võre negatiivne potentsiaal on madalam kui alumisel võrel, et takistada elektronide väljavoolu plasmakambrist ning nende difundeerumist töökambrist tagasi plasmakambrisse. Pealmise võre potentsiaal hoitakse võrdne anoodi omaga. See soodustab ioonide eraldamist. Töödeldav objekt on paigutatud vesijahutussüsteemiga ja muudetava asendiga töölauale. Ioonid, pörkudes vastu töödeldavat pinda, löövad sealt välja aatomeid [5.41, 5.43, 5.48, 5.51].



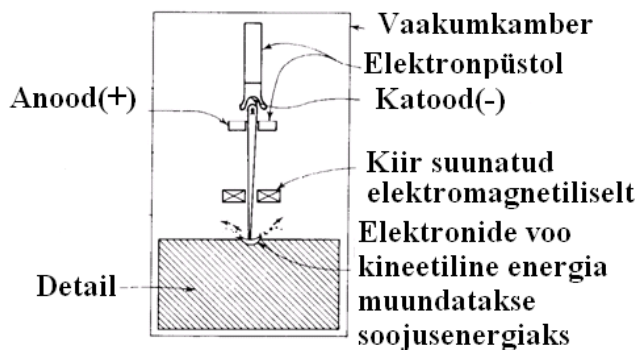
Sele 5.83 Ioonkiirtöötluse üldine skeem

Kasutusala. Ioonkiirtöötlusel saab töödelda erinevaid ebaregulaarseid vorme ja kujupindu, laserpeegleid, mitmesuguseid kilesid ja membraane. Ioonkiirega töödeldakse veel mikroskoopilisi kujupindu, teostatakse mikroskoopilist õhendamist, poleerimist ja freesimist. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 1,0 µm ja töötlustäpsus IT 2–3.

Töödeldavad materjalid. Ioonkiirtöötlusel saab töödelda erinevaid materjale, nagu keraamika, klaas, kuld, hõbe, teemant, kvartsignaadi ja fotoresistentsed materjalid [5.41, 5.43, 5.48].

5.5.3.2 Elektronkiirtöötlus

Meetodi kirjeldus. Elektronkiirtöötlus (*electron beam machining*) põhineb elektronide voo koondamisel töödeldavasse alasse, kus elektronide kineetiline energia muundub soojuseks. Lokaliseeritud tööalas energia suure tiheduse tõttu materjal sulab ja aurustub. Töötlamine toimub vaakumkambris, kus rõhk on 100 kPa. Elektronide emiteerimiseks kasutatakse elektronkahurit, mis koosneb katoodist, negatiivselt laetud võrest ja anoodist. Katoodiks on volframniit, mis on kuumutatud 2500–3000 °C. Katoodilt emiteeruvaid elektrone kiirendatakse 30–150 kV kõrgepingega. Kiirendatud elektrone fokusseeritakse negatiivselt laetud võrega ja seda selleks, et elektronid läbiks anoodis oleva ava. Elektronide põrkumisel vastu tooriku 0,025 mm läbimõõduga ala muutub kineetiline energia soojusenergiaks, tooriku temperatuur tõuseb üle keemispunkti (kuni 6000 °C) ja metall aurustub (energiatihedus protsessi käigus on 1,55 MW/mm²). Selleks, et soojuse levik metallis oleks väiksem, kasutatakse pulseerivat elektronkiirt maksimaalse sagedusega 102 Hz. Impulsisrežiim valitakse nii, et toorik kuumeheks tsükli vältel ainult vahetult kokkupuutekohas kiirega. Impulsi kestus on 10,4–10,6 s. Elektronkiirt on võimalik fokuseerida läbimõõduni kuni 1 µm [5.41, 5.43, 5.48, 5.51].



Sele 5.84 Elektronkiirtöötluse üldine skeem

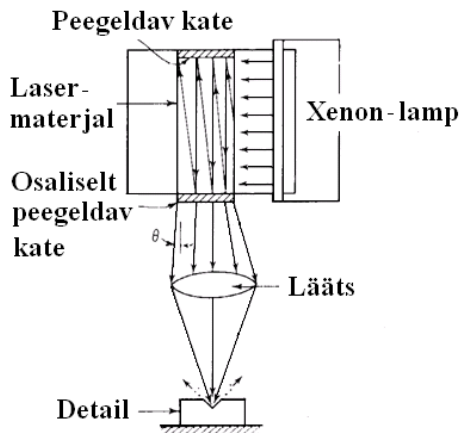
Kasutusala. Elektronkiirtöötlus leiab kasutamist väikese läbimõõduga (1–10 µm) avade puurimisel, kitsaste pilude töötlemisel, keerukate kontuuride lõikamisel, õhukese lehtmaterjali perforatsioonil, integraalskeemide, filtrite ja teleri kinesiikopide valmistamisel jm. Elektronkiirega saab kanda toorikule õhukesi, mõne mikromeetri paksuseid kattekilesid. Elektronkiirega töödeldakse mehaaniliselt raskelt töödeldavaid metalle ja mittemetalle (rubiin, keraamika, kvarts, pooljuhid). Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,1–6,3 µm ja tööstustäpsus IT 2–3.

Töödeldavad materjalid. Elektronkiirtöötlusel saab töödelda erinevaid materjale, nagu metallsed ja mittemetallsed materjalid, nõuab vaakumkambrist [5.41, 5.43, 5.48, 5.51].

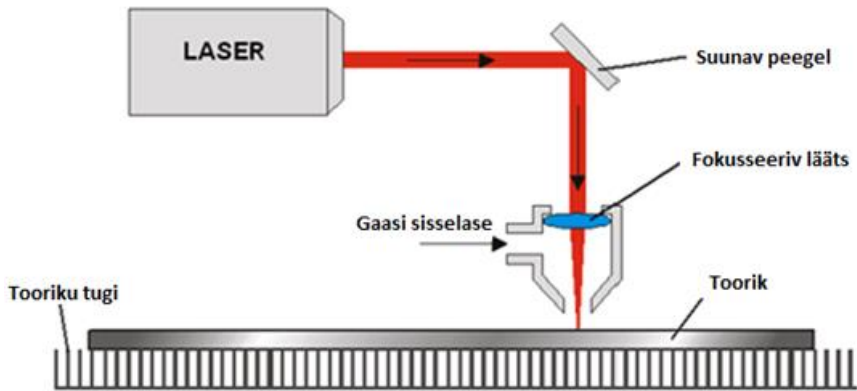
5.5.3.3 Lasertöötlus

Meetodi kirjeldus. Lasertöötlus (*laser beam machining*) põhineb kontsentreeritud energiaga valguskiire soojuslikul toimel. Valguskiire allikaks on optiline kvartsgeneraator ehk laser. Tööstuslikes lasertöötlusseadmetes kasutatakse enim tahket laserit, mille tööelemendiks on rubiin (Al_2O_3 ja 0,03% Cr). Rubiinlaser töötab impulssrežiimil, genereerides koherentse, suure monokromaatilisusega punase valguse impulsse. Laseri töösse lülitamisel muundub kondensaatorpatareidesse salvestatud elektrienergia impulsslambi valgusenergiaks. Lambi valgus fokuseeritakse peegeldajaga rubiinvardasse ja aatomid saavad ergastatud oleku. Ergastatud olekust normaalolekusse tagasi tulles kiirgavad nad 0,69–2,1 μm lainepikkusega footoneid. Footonite voog fokuseeritakse omakorda optiliste läätsede süsteemiga ja suunatakse töödeldavale toorikule. Kiire läbimõõt fookuses on umbes 0,01 mm, mistõttu temperatuur ületab töötlemiskohas 6000–8000 °C. Sellest piisab, et fookuses olev materjal sulaks ja aurustuks momentaanselt.

Meetodi eelised: suur valikuvõimalus erinevate töötlemismeetodite ja töödeldavate materjalide vahel (sealhulgas ka need, mis tegelikult mehaanilisele töötusele üldse ei allu); suhteliselt kiire töötlemiskiirus; töötlusoperatsioonide hea automatiseeritavus ja sellega kaasneva tootlikkuse kasv; kõrge töötlemistäpsus; töötusala selektiivsus (töötusalaast välja jääv materjal jääb puutumatuks) [5.41, 5.43, 5.48, 5.51].



Sele 5.85 Laserkiirtöötuse skeemaatiline kirjeldus



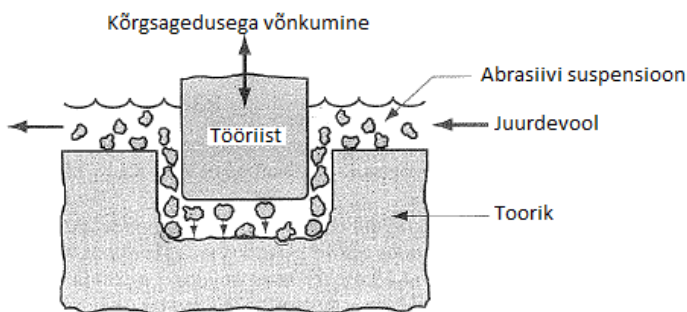
Sele 5.86 Laserkiirtöötuse üldine skeem

Kasutusala. Laserkiirtöötusel saab töödelda erinevaid ebaregulaarseid kontuure ja väikseid avasid. Saavutatav pinnakaredus on piires Ra 0,04–6,3 µm.

Töödeldavad materjalid. Laserkiirtöötusel saab töödelda erinevaid metalseid ja mittemetalseid materjale. Laserkiirega on võimalik töödelda mitmesuguste omadustega materjale: kvartsi, asbesti, kummi, vineeri, paberit, plastikuid, metalle jne. Eriti efektiivne on sel meetodil töödelda materjale, mis ei allu klassikalistele töötlusviisidele, nagu teemant, karastatud terased jt haprad ja sitked materjalid [5.41, 5.43, 5.48, 5.51].

5.5.3.4 Ultrahelitöötus

Meetodi kirjeldus. Ultrahelitöötuses (*ultrasonic machining*) töödeldakse materjali, kasutades ultraheli. Meetod põhineb töödeldava materjali eemaldamisel abrasiiviosakeste poolt, millele ultrahelisagedusega ja väikese amplituudiga võnkuv tööriist annab kiirendava liikumise. Tööriist võngub telje sihis sagedusega 20–40 kHz. Selline võnkumine tekitatakse magnetostriksiooni abil (ferromagnetilised materjalid muudavad magnetväljas pikkust vastavalt välja võnkumissagedusele). Võnkuva tööriista ja tooriku vahele juhitakse peeneteralise abrasiivi (boornitriid, alumiiniumdioksiid või ränikarbiid) vesisuspensioon. Staatilise surve ja ultraheli võnkumise koosmõjul tungivad abrasiivi terad toorikusse ja eemaldavad sellest laastudena materjali. Tööriista materjal peab olema kõrge kulumiskindluse ja väsimustugevusega. Tööriista kulumise intensiivsus sõltub töödeldavast materjalist. Abrasiivi kõvadus peab olema suurem või võrdne tooriku kõvadusega. Sellest hoolimata abrasiiviterad nürinevad ning töötlemisalasse on vaja pidevalt juhtida värsket suspensiooni, mis tagab suspensiooni jahutamise ja jäätmete eemaldamise töötlemisalast. Tootlikkust mõjutavad tööriista võnkumise amplituud; sagedus; staatiline jõud, millega tööriist surutakse vastu toorikut; abrasiivterakeste suurus; suspensiooni kontsentratsioon; tooriku kõvadus ning tooriku ja tööriista kõvaduste suhe. Neist kõige suuremat mõju tootlikkusele omavad amplituud ja staatiline jõud [5.41, 5.43, 5.48, 5.51].



Sele 5.87 Ultrahelitöötuse üldine kirjeldus

Kasutusala. Ultrahelitöötusega saab töödelda erinevaid muutuva ristlõikega avasid. Ringikujulise ristlõikega avade puurimisel kasutatakse pöörlevaid puure. Puurile antakse võnkumine sagedusega umbes 20 kHz ja amplituud alla 1 mm, sealjuures ei kasutata abrasiivi suspensiooni. Sellisel viisil on puuritud 75 mm sügavusega avasid keraamikasse ja 300 mm sügavusega 1,5 mm läbimõõduga avasid klaasi. Pöörleva puuriga ultraheli seadmed on tavalistest oluliselt kallimad, kuid tootlikkus on 2–5 korda suurem. Ultrahelitöötlust on rakendatud keerme töötlemiseks keraamikas, kraatide eemaldamiseks ja kombineeritult teiste töötlusviisidega, nagu plankimine, kammilõikamine ja soveldamine.

Töödeldavad materjalid. Ultrahelitöötusega saab töödelda enamasti kõiki materjale. Otsustav on selle meetodiga töödelda hapraid ja suure kõvadusega materjale pinna suurusega vähem kui 1000 mm². Eriti efektiivne on muutuva ristlõikega avade töötlemine habrastes materjalides, nagu klaas, keraamika, kalliskivid, luu, hambad jm [5.41, 5.43, 5.48, 5.51].

5.6 Koostamistehnoloogiad

5.6.1 Koostamine

Koostamine on nagu toote detailide kvaliteedialane kohtumõistmine.

Koostamine (*assembly*) on protsess, kus detailide kokkuühendamise tulemusena sünnib **koost** (alamkoost) või toode [5.52]. Peale koostamisoperatsiooni (*part mating*) reaalse toimimise viisi on oluline kogu projekteerimise, tootmise ning logistika integreeritus. Toode jääb koostamata juhul, kui kas või üks kõige vähemtähtsam komponent ei ole koostamise hetkeks valminud, koostamistöökohale saabunud või ei sobi mingil põhjusel koostu. Koostamistehnoloogia lahutamatuks osaks on saanud ka kontroll, katsetamine ning dokumenteerimine. Koostamisel avastatud defekte on hilisema avastamisega võrreldes oluliselt odavam kõrvaldada. Kuna koostamine on toote valmistamise lõppetapp, siis määrab see paljuski ka toote lõppkvaliteedi ja kasutusnäitajad.

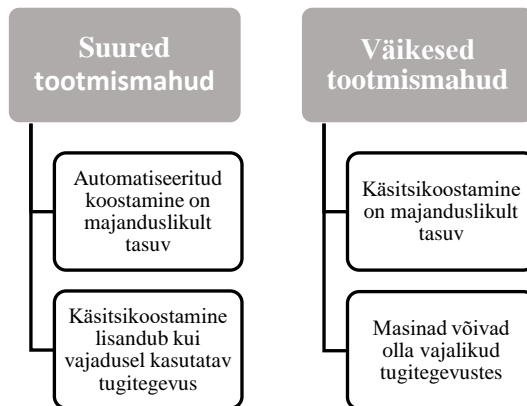
Tänapäevane koostamine eeldab, et toote detailide partiisesed erinevused on lubatud piirhälvete piires, materjal vastab määratletud standarditele ja kõikide detailide päritolu on kontrollitav.

5.6.2 Koostamisprotsessi planeerimise lähteandmed

Koostamisprotsessi kaks kõige põhilisemat mõjutajat on koostamisoperatsioonide keerukus ning koostamisoperatsioonide arvuline maht.

Keerukus sõltub toote (alamkoostu) konstruktsioonist ja gabariitidest. Toote projekteerimisel on võimalik arvesse võtta toote koostamise iseärasusi ning olemasolevaid koostamise tehnoloogilisi võimalusi (*design for assembly* – DFA) [5.53] ning seeläbi koostamisprotsessi oluliselt lihtsustada. Koostamise keerukus kasvab märkimisväärselt, kui koostamisel on vaja kasutada täiendavat peenhäälestust, käsitleda väga väikeseid või vastupidi – ülisuuri – detaile, samuti vähese kujukindlusega (elastseid) detaile (viimane on keeruliselt automatiseeritav). Käsitsi koostamisel on oluline, et erinevad detailid poleks omavahel segiaetavad ja koostamiskoht koostus oleks koostajale hästi ligipääsetav ning nähtav. Koostamise keerukusest lähemalt on peatükis 5.6.6.

Mahud. Planeeritavatest mahtudest sõltub koostamise automatiseerimise tasuvus ning sellega seotult ka koostamise abivahendite, seadmete, pinna ja inimtööjõu vajadus [5.54]. Mahtudest sõltub ka komponentide tootmise või komponentide ostukogused. Sellega on seega seotud ka lao ja logistika planeerimine, samuti valmistoodangu transport kliendini.



Sele 5.88 Koostamise automatiseerituse tasuvus

Koostamisprotsessi võib edukaks pidada siis, kui vajalik kogus tooteid saab tootele etteantud tehnilisi tingimusi (*key characteristics* – KC) [5.54] täites tähtajaks valmis. Kui tähtaegadest ei peeta kinni ning tooted ei vasta tehnilistele nõuetele, tähendab see tootjale lisakulutusi.

5.6.3 Koostamisega seotud tegevused

Koostamisprotsesside korraldamiseks on vaja tagada teatud eeltööd ja järeltoimingud. Nendeks on:

- koostamiseks vajalike detailide õigeaegse hankimise korraldamine (eeltöö);
- detailide transport koostamiskohta (eeltöö);
- koostamisoperatsioonide tegemine (põhitöö);
- kontroll ja katsetamine (nii põhitöö kui ka järeltoiming);
- dokumenteerimine (järeltoiming).

Mitmeid nendest toimingutest käsitletakse põhjalikumalt selle kõrgkooliõpiku muudes peatükides märksõnade ostutegevus, laiendatud tarneahela juhtimine, *kanban*, *just in time*, logistika ja PLM all. Samas on koostamisoperatsioonide korraldamisega tihedalt seotud ka kõik kvaliteedi- ja juhtimismeetodid ning neid tuleb koostamist planeerides arvesse võtta.

5.6.4 Koostamisoperatsioonide sisu

Koostamisoperatsioon toimub selleks ettenähtud koostamistöökohal selleks ettenähtud tootele ja koostajale sobivates keskkonningimustes (õhuniiskus, staatiliste kiirgusväljadeta ja saasteta keskkond, temperatuur, müra). Kui tegemist on erinevate valdkondade (elektroonika, mehaanika, optika jne) kooseksisteerimisega ühes tootes, siis on koostamisel oluline jälgida kõige tundlikuma valdkonna nõudeid. Näiteks peab koostamisel jälgima ESD nõudeid, kui midagi lihtsasse tootesse on liidetud mikroelektroonika komponente.

Toodet projekteerides ja tootmist planeerides on targalt talitades võimalik koostamise arvelt kulusid oluliselt kokku hoida. Olles teadlik ja rakendades olemasolevaid koostamistingimusi (olemasolevat sisseseadet, ruume, personali, kontrollitud tarneahelat, nüüdisaegseid laosüsteeme, toimivat dokumentatsioonisüsteemi PDM/PLM), saab juba eelnevate õnnestunud toodete koostamise kogemusi ära kasutada uusi kooste ja koostamistöid planeerida lihtsamate, kiiremini teostatavate, vähem lississeseadet nõudvate ning kvaliteetsematena. Selleks on vaja koostamisoperatsioone klassifitseerida.

Koostamisoperatsioone klassifitseeritakse [5.55] alljärgnevalt.

Koostamisoperatsioonide järjestuse alusel:

- järjestikuline;
- paralleelne;
- järjestik-paralleelne (kombineeritud).

Automatiseerimise astme järgi:

- käsitsikoostamine;
- mehhaniseeritud käsitsi koostamine;
- automatiseeritud jäik koostamine;
- automatiseeritud paindikoostamine.

Objekti järgi:

- üldkoostamine (koostatakse terviktoode);
- sõlmkoostamine (koostatakse koost või sõlm vastavalt selle tehnoloogilisele ühtsusele ja valdkonna nõuetele).

Objekti liikuvuse järgi:

- pideva liikumisega;
- perioodilise liikumisega;
- statsionaarne.

Koostamisprotsessi etapi alusel:

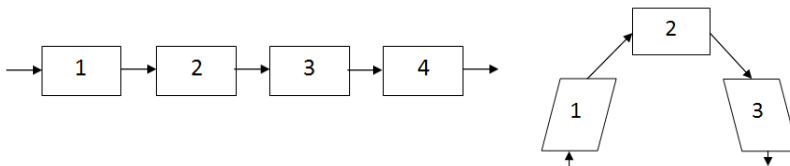
- eelkoostamine – tooriku, koostude või toote koostamine hilisema lahtivõtmisega, näiteks kompensaatorite lisamiseks;
- vahekoostamine ehk proovikoostamine – toorikute koostamine nende töötlemisel;
- koostamine rakisele – ettevalmistav koostamine lõppkoostamiseks;
- lõppkoostamine – tootja ei võta toodet enam lahti;
- remondijärgne ehk osaline koostamine – koostatakse vaid eelnevalt osandatud toote osa.

Koostamise täpsuse alusel:

- koostatavate detailide täisvahetatavusega koostamine;
- mittetäieliku vahetatavusega koostamine;
- rühm vahetatavusega koostamine;
- sobitamise koostamine;
- reguleerimisega koostamine;
- kompensaatoritega koostamine.

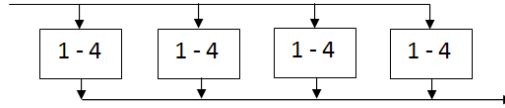
5.6.4.1 Koostamisoperatsioonide järjestus

Järjestikkoostamisel tehakse koostamisoperatsioonid kindlas järjekorras ja üks koosteoperatsioon ühel koostamistöökohal (sele 5.96). Operatsiooni teeb kas inimene või masin. Seda kasutatakse juhul, kui erinevad koosteoperatsioonid on sarnase keerukuse ja ajamahukusega. U-kujulisel paigutusel tagab esimese ja viimase töökoha töötaja lähestikku paiknemine parema suhtluse. Selle eelis on korralduse ja kontrolli lihtsus ning tõhusus ning või-malus kasutada käsitsi koostamist vaheldumisi robotkoostamisega. Puuduseks on keerukama toote korral suur arv koostamistöokohti, samuti on tootmismahude kasvu korral koostamisvõimsuse suurendamiseks vaja käivitada terve uus järjestikliin.



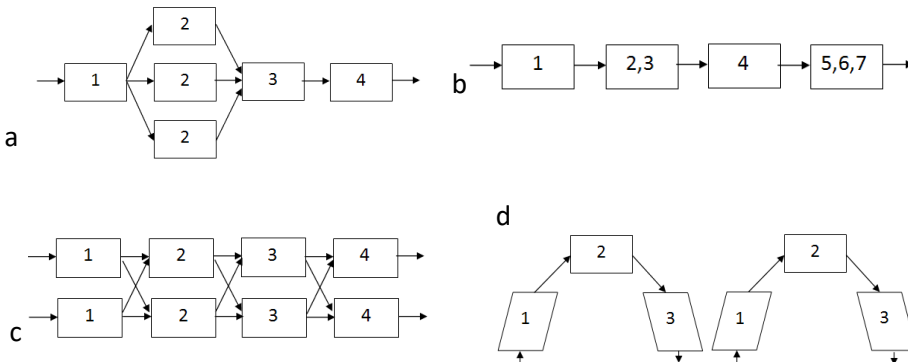
Sele 5.89 Järjestikkoostamine, järjestikku paiknevate ja U-kujuliselt paiknevate töökohtadega

Paralleelsel koostamisel teeb koostaja ühel töökohal kõik või teatud hulga koostamisooperatsioone. Käsitsi koostajal on võimalik koostamisjärjekorda vajadusel muuta. Sarnaseid koostamistöo kohti võib paralleelselt paikneda määramata hulk, vastavalt hetkevajadusele. Peale eelmainitu on käsitsi koostamise korral eeliseks veel mitmekülgsem töö, meeskonnatöö võimalus ning koostamisprotsessi jätkumine ühe lüli mittetoimimise korral. Puudusteks on suurem praagiprotsent, keerukam väljaõpe ning automatiseerimise korral vajadus mitmekülgsema roboti järele.



Sele 5.90 Paralleelne koostamine

Kombineeritud koostamisel kasutatakse järjestikulist ja paralleelset koostamist vajadusele vastavas kombinatsioonis. Need võivad olla järgmised: keskmisest taktist pikema koostamisajaga operatsioonile mitu paralleelset töökohta luues (sele 5.91 a); keskmisest taktist lühemaid operatsioone ühele töökohale mitu kinnistades (sele 5.91 b) või rakendades tööle mitu paralleelset järjestikliini nii järjestikku paiknevaid (c) kui ka U-kujulisi (d). Eeliseks on suurem paindlikkus, puuduseks keerukam kvaliteediseire.



Sele 5.91 Kombineeritud koostamine

Järjestuse valik sõltub oluliselt tootmise organiseerimise stiilist ning koostatavast tootest. Olulised märksõnad on töö tõhusus, paindlikkus, töötajate rahulolu ja kvaliteedikontroll.

5.6.4.2 Koostamise automatiseeritus

Käsitsi mehhaniseerimata koostamisel on oluline tähtsus valdkondades, kus on vajalikud ainulaadsed tooted. Peale koostamise on toote algkomponendid sageli samuti käsitööna valmistatud ning koostaja on peale koostamistöö tegemise ka veel omamoodi sünergia looja, sobitades lubatud piires erinevaid detaile toimivasse koostu ning andes seega ka juhusele võimaluse toote lõpptulemi varieerumiseks – seda kõike selleks, et kliendile jääks võimalus valida endale meelepärane pisut erinevate, kuid sisult ühesuguste toodete vahel. Meetod esitab vähe nõudeid töökohtale, kuid äärmiselt oluline on inimfaktor ja tema professionaalne tase. Sellist meetodit kasutavad kontsertmuusikariistade ning mitmesuguste luksuskaupade (autod, mööbel, rõivad, mudelid) tootjad tänini. Näiteks võib tuua Estonia Klaverivabrikku.

Mehhaniseeritud käsitsi koostamine toimub inimese vahetul osavõtul, kuid protsessi juhuslikkust vähendavate töövõtete, -korralduse, erirakiste ning üldkasutatavate tööriistade vahendusel. Meetod nõuab kõige vähem investeeeringuid nii tööjõudu kui ka töökohta ja on äärmiselt paindlik. Kui koostamisliigutus on piisavalt lihtne, siis saab oskusteta tööline sellega hakkama ilma pikaajalise koolitusega. Samas on koostamise tempo seotud otseselt töötaja kogemustega. Negatiivsest küljest mõjutavad meetodit kõik inimlikud vead – väsimus, juhuslikud ja pahatahtlikud eksimused, motivatsiooni puudumine jne. See omakorda teeb koostamisprotsessi planeerimise keeruliseks. Meetodit kasutavad enamik allhanketöid tegevaid väiketootjaid.

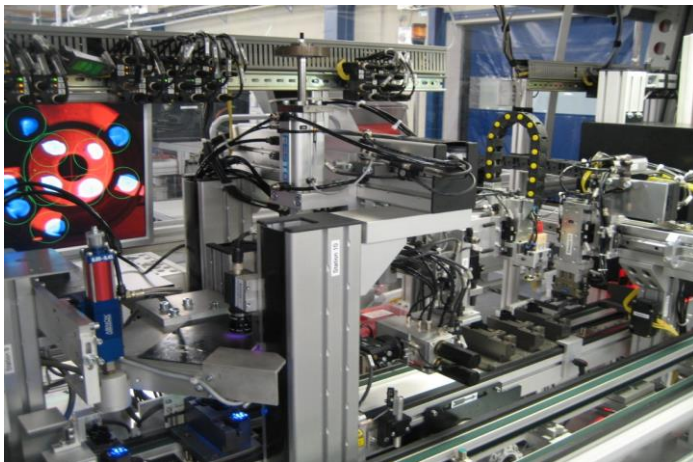
Eelmainitud negatiivse inimliku eksimise mõju vältimiseks ja kvaliteedinõuete tagamiseks on välja töötatud rida abinõusid, nagu näiteks lihtsad automaatkontroll-lahendused ja mehaanilised vigade vältimise rakised (Poka-Yoke). Samuti kasutatakse igapäevast tootmistulemuste ning inimitöö tõhususe jälgimist. Nende abinõude kasutamine tagab koostamisel suurepärase paindlikkuse ning samaaegselt kvaliteedi. Sellist edasiarendatud mehhaniseeritud käsitsi koostamise meetodit kasutab mitu kohalikku nii väike- kui ka suurseeriatootjat, viimastest võib näitena tuua AS-i Norma.



Sele 5.92 Mehhaniseeritud käsitsi koostamise U-töökoht

Automatiseeritud jäik koostamine toimub kindla koostamisprotsessi tarbeks projekteeritud pikaajaliseks ja suuremahuliseks kasutamiseks planeeritud seadmete abil. Tööliikumistes puudub ülevõtte vabadus ning juhtprogrammi ei saa lihtsalt muuta (näiteks nukkmehhanism). Kui aastakümneid tagasi oli see ainus automatiseerimise meetod, siis praegu kasutatakse jäika lähenemist vaid lihtsuse ja töökindluse huvides. Selle eeliseks masstootmise korral on koostamise madal omahind. Põhipuuduseks on seejuures vaid seadme ühekülgus, koostamisprotsessis on pea võimatu muuta. Inimese osavõtt tööprotsessis on toodangu kvaliteedikontrolli ning koostamisliini töös hoidmise tagamiseks oluline. Eesti tööstuses on kasutanud sellist koostamismeetodit enamik okupatsiooniaegsete suurettevõtete järeltulijaid.

Automatiseeritud paindkoostamine erineb jäigast koostamisest muudetava (tsentraalse või individuaalse) juhtprogrammi ning manipulaatori olemasolu poolest. Need erinevused võimaldavad universaalseid koostamismoduleid kasutada samaaegselt mitme erineva koostamisliigutuse tegemiseks. Samuti võib moduleid paindlikult terviklikuks koostamisliiniks ühendada ning teatud piires (detailide erinev mass ja gabariidid piiravad lõputu paindlikkuse) erinevaid tooteid koostada. Võimalikud on ka koostamismoduleite vahelised puhverlaod, mis võimaldavad koostamistöö jätkamist ühe mooduli seiskumisel. Ka keerukamad kontrolloperatsioonid (nt tehismägemine, vt sele 5.100 vasakus servas kaamera abil kontrollimas ja võrdlemas nõutavaga määrdeaine olemasolu ja asukohti) võivad olla tervikliini integreeritud.



Sele 5.93 Automatiseeritud paindkoosteliini lõik

Puudusteks on täiendav vajadus kõrge kvalifikatsiooniga seadistajate (CAM-inseneride) järele, samuti ei ole tööjõudlus sama investeeringu mahu juures tavaliselt sama suur kui jäigal automaatikal.

Koostamisoperatsioonide sisule on võimatu teha ettekirjutusi, kuidas täpselt toimida – see on loomulik tegevus ja iga koostaja enda otsustada. Võib vaid välja tuua kasulike nõuannete loetelu, kus see, millal üht või teist nõuannet rakendada, jääb ikkagi kohapealsele otsustajale. Siinkohal valik selliseid nõuandeid:

- tee koostööd tootearendusmeeskonnaga nii, et selle tulemusena koostamisoperatsioonid lihtsustuksid, detailide arv (koos sellega ka koostamisoperatsioonide arv) väheneks, kuid toote enda kvaliteet jääks samaks või paraneks;
- jaga koostamisoperatsioonid alamoperatsioonideks nii, et tehnoloogiliselt sobivaid alamkooste saaks lihtsalt katsetada ning et vastava valdkonna (elektroonika, optika jne) koostamishõuded oleks lihtsamini täidetavad;
- kui koostamismahud kasvavad suuremaks kui planeeritud, siis võib ka poole tootmistsükli pealt automatiseerituse astet kasvatada ning koostamise omahinda kokkuvõttes vähendada. Samas arvesta, millise koostamismeetodi tarbeks on toode projekteeritud ning automatiseeri pigem ohtlikud ja rutiinsed protsessid;
- ära püüa iga hinna eest automatiseerida kõiki operatsioone, vaid lähtu majanduslikest kaalutlustest ning kombineeri käsitsi koostamist automatiseeritud tööga;
- alusta kõikvõimaliku tooteinfo kogumist kohe uue koostamisprotsessi käivitumisel, nii saad kiiremini täiuslikuma teadmuste baasi;
- dokumenteeri ja kaardista kohe kõik tegevused, et vältida mustade aukude teket personali voolavuse korral;
- koostamiskoha puhtus ja kord on kõige otsesemalt seotud koostekvaliteedi paranemisega;
- automatiseeritud koostamise eelduseks on täisvahetatavuse tingimusi täitev detailide täpsus, alternatiiviks on detailide mõõtmete täiendav automaatkontroll ning ebasobivate detailide väljasõelumine vahetult enne koostamist.

5.6.5 Enamlevinud liidete liigitus

Koostamisoperatsioonide käigus sünnib rida erinevaid liiteid. Liite olemusest sõltub, kui keerukas on toote koostamine, kuid samas on sellega seotud ka muid toote omadusi – eelkõige remonditavus ja osandatavus materjalide taaskasutuseks. On ilmselge, et klippliitega plastikorpust on lihtne koostada, kuid korduval avamisel muutub see kergesti töökõlbmatuks. Samas on klippliide koostamise seisukohalt vaieldamatult kõige efektiivsem liide, sest kaitseb toote sisemust suurepäraselt ka oskamatu parandaja eest. Sama saab tagada ka vähemlevinud kruvipea (viisnurk ehk *5 node*, kolmnurk ehk *tri-wing* jne) kasutamisega volitamata remontija ligipääsemise piiramist ning samas jääb liide siiski turvaliselt avatavaks. Seega tuleb liidete valikul peale toote koostatavusnõuete täitmise arvestada ka kogu tulevase elukaare head kulgemist (hea koospüsimine ja vajalikul tasemel osandatavus).

Levinumaid liiteid võib liigitada järgmiste tunnuste alusel [5.55].

Konstruktivse tunnuse alusel:

- lahtivõetavad kinnisliited;
- lahtivõetamatud (vähemalt üks detailidest puruneb lahtivõtmisel) kinnisliited;
- lahtivõetavad liikuvad liited;
- lahtivõetamatud liikuvad liited.

Tehnoloogilise tunnuse alusel:

- keermesliited;
- neetliited;
- pressliited;
- valtsliited;
- klemmliited;
- keevisliited;
- joodisliited;
- liimliited;
- klippliited.

Kontaktitingimuste alusel:

- liidete ühenduspindade otsene kontakt:
 - üldine (pidev);
 - kohalik (osaline);
 - joonkontakt;
 - punktkontakt;
- liidete ühenduspindade kontakt vahekihi kaudu:
 - üldine (pidev);
 - kohalik (osaline).

Koostamisviisi tehnoloogilise iseloomu järgi:

- liited koostatakse **detailide paigaldamisega** haaravate (haaratavate) pindade või rakiste seadeelementide abil ilma jõudu rakendamata;
- kinnitusdetailide või ühendatavate detailide **plastne deformeerimine** (kärnimine, neetimine, valtsimine, painutamine, splintimine jne);
- liite detailide **elastne deformeerimine** (lõhisstopperrõngad, vedrufiksaatorid, elastsed õõnestihvtid, juhtmeotsakud, plastfiksaatorikinnitid, voolikute ühendused jne);
- **hõõrdejõudude kasutamine** (keermesliited, kiilud, liistud, silindrilised ja koonilised tihvtid);
- **täiendava kihi** viimine kontakteeruvate liitepindade vahele (sulametall keevitamisel, joodis, liim, mastiks jne);
- liited, mis koostatakse **erimeetoditega** (katmine sulametalli või -plastmassiga, seostamine traadiga, õhukeseseinaliste tasapinnaliste metall- või plastdetailide ühendamine klambrite või õblemisega jne). Meetodit kasutatakse suhteliselt harva;
- viimasena sobib siia loetelusse lisada ka viidatud allikas toodud liidetele lisaks liited, kus detailid on **prinditud liitesse** juba terviktoote või detaili 3D-printimise käigus. Viimane on hea näide valdkondade (nagu seda on detailide tootmine ja detailidest toote koostamine) piiride hajumisest, detaili tootes samaaegselt juba koostatakse kaudselt terviktoodet.

Ka liidete valikul ei ole soovitatav kõrgkooliõpiku tasandil ettekirjutusi teha. Eriti juhul, kui tegevusvaldkond ei ole täpselt kindlaks määratud. Nõuannetena saab anda aga järgmisi vihjeid.

- 1) Liidete valiku teeb enamikul juhtudel tootearendusosakond, siinkohal on taas igati kohane mainida koostajate ja tootearendajate vahelist head koostööd, et tagada lihtsat koostatavust koos toote remonditavusega.
- 2) Iga liite koostamise täpne protseduur on vaja reaalsuses katsetega peenhäälestada, seda mis tahes automatiseerituse puhul.
- 3) Mida väiksemad on toote mõõtmed, seda kriitilisem on koostamistingimuste täpne järgimine.
- 4) Praeguse konkurentsi tingimustes peavad liikuvad liited tagama kohe vajaliku täpsuse või siis tuleb liited sisse töötada juba koostamise käigus.
- 5) Kõiki lahtivõetavaid ja reguleeritavaid liiteid on keerukam koostada ja need vähendavad toote töökindluse näitajaid.
- 6) Eksisteerib kogum liiteid, mille puhul tuleb kindlalt järgida protsessi õiget tööjärjekorda.

5.6.6 Koostamiskeskne projekteerimine

Koostamise täpsem sisu sõltub konkreetse koostu ehitusest. Viimase määrab toote projekteerija. Tema jaoks on esmatähtis toote funktsionaalne täiuslikkus (et toode vastaks täielikult talle esitatavatele nõuetele ning täidaks etteantud funktsioone). Samas on kõikvõimalikke lisaparameetreid, mida projekteerija peab arvesse võtma, et säiliks kõikide põhifunktsioonide parim täitmine. Enamlevinud näideteks sellistest lisaparameetritest on toote koostatavus, testitavus, remonditavus, hooldatavus, ümbertöödeldavus, transporditavus jne.

Esimene neist – koostatavus – ongi koostamiskeskse projekteerimise huviobjekt. Kui toode on projekteeritud väikeseeria tootmisesse käsitsi koostamist silmas pidades, siis pole ebaõnnestunud disain või koostamise keerukus nii suureks probleemiks. Kui aga toodet koostatakse suurte partiidena, siis on iga liigne koostamisele kulunud sekund rahaliselt mõõdetuna suure kaaluga. Lihtne arvutus tõestab, et miljonise tootepartii koostamisaega lühendades 1 sekund iga toote kohta hoiab kokku 34,7 kaheksatunnist tööpäeva.

Seega on projekteerijal võimalus tootmisprotsessi, hoolduskorraldust, remondivõtteid ning ümbertöötlemises kehtivaid reegleid tundes kõigi mainitud valdkondade protsesse parandada. Tõstes seeläbi toote konkurentsivõimet ning rajades vundamenti kaubamärgi kiirele tõusule. Loomulikult tuleb teha valikuid, mida eelistada ja mida mitte, kuna juba ainuüksi siin toodud viie näite nõuded on sageli omavahel vastuolus. Näiteks toote koostatavust parandades väheneb reeglina toote testitavus, hooldatavus ja remonditavus.

5.6.6.1 Põhilised koostamisaega mõjutavad tegurid

Sõltumata koostamise iseloomust on kaks selget ja lihtsasti projekteerija poolt ennustatavat ning mõjutatavat koostamisaega määravat tegurit. Nendeks on:

- 1) koostatavate detailide arv koostus;
- 2) koostu koostamise keerukus.

Esimene neist kahest, detailide arv, on mõjutavaks teguriks ka teistele tootmise etappidele, nagu näiteks planeerimine, logistika ja ladu. Mainitud osakonnad näevad rõõmuga kahanevat kulu väiksema arvu käsitletavate detailide ostutegevustes ja hoiustamises. Samuti on väiksema arvu detailide käsitlemisega koostu koostamiskesksust projekteerival lihtsam optimeerida [5.56]. Oluline on siin mitte segi ajada peatükis 5.6.2 mainitud toodete (koostude) arvu partiis äsjamainitud detailide arvuga koostus. Toodete (koostude) arv partiis ehk siis tootmismaht osundab sellele, kas ja kui palju tootmist tasub automatiseerida. Detailide arv koostus aga määrab selle, kui mitu liigutust tuleb detaili haaramiseks ning koostu asetamiseks inimesel või masinal teha enne, kui üks konkreetne toode saab koostatud.

Teine koostu koostamise keerukus on vastuolulisem ja nõuab sageli abivahendina nüüdisaegset käsiraamatut, projekteerija head kogemuste baasi või kannatlikku katsetamist. Samas on uued tehnilised lahendused, nagu näiteks pindmontaaž elektroonikakoostude tootmises (SMT) koostamisprotsessi lihtsustanud. [5.57]

Vaatleme pisut lähemalt mõlemat tegurit ning analüüsime, mida kasutoovat saab lugejale rõhutada. Esmalt vaatleme lähemalt detailide arvu koostus.

Detailide arv koostus on optimaalne, kui koostu funktsionaalsus on tagatud ning samas enam ühtegi üleliigset detaili koostus ei leidu. Siinkohal on erandiks on töökindluse tõstmise eesmärgil loodud dubleerimised [5.58] ja visuaalset erisust rõhutavad detailid. Samas tuleb jälgida, et iga dubleerimine ei taga töökindluse kasvu – näiteks kahe paralleelselt asetseva ventiiliga autorehv tühjeneb kindlasti suurema tõenäosusega kui ühe ventiiliga rehvi.

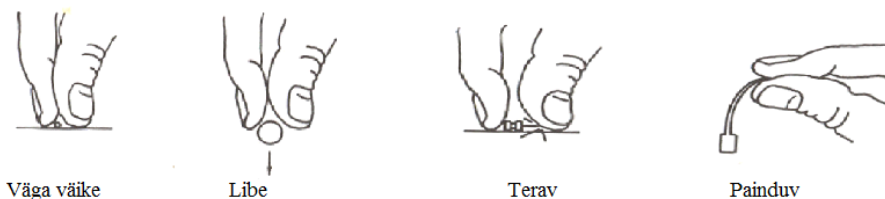
Enamik detailide arvu vähendamise võtteid põhineb kas toote katsetamisel välja selgitatud üleliigseteks osutuvate detailide kõrvalejätmisel (näiteks täiendava järelreguleerimise mehhanismi likvideerimine) või siis detailide funktsionaalsel ühendamisel (näiteks lukustuva mutri kasutamine mutri ja vedruseibi asemel). Viimasena mainitud ühendamismeetodil tuleb arvestada hea tasakaaluga detaili tootmise keerukuse ning koostamise keerukuse vahel. Samuti tuleb arvestada remonditavuse aspektiga. Liigselt ühte koondatud keerulise detaili tootmise hind kasvab oluliselt ning väikeste vigastuste korral tuleb remontijal asendada terve keerukas ja kallis detail.

Teine põhikomponent koostamise ajas on koostamise keerukus. Seda vaadeltakse kahes jaos:

- 1) käsitlemine (detaili haaramine, orienteerimine ja liigutamine);
- 2) paigaldamine (detaili lisamine ja kinnitamine teisele detailile või koostule).

Automaatkoostamisel võivad need kaks sulanduda ka ühte liigutusse, seega rõhutame, et ennekõike tasub neid kahte tegevust eristada just käsitsi koostamise korral.

Esimene eeltoodud tegevustest, käsitlemine, on seotud eelkõige detaili geomeetria ja materjali omadustega (kuju, suurus, paindumus, teravus, libedus, temperatuur). Sõltuvalt eelmainitud omadustest on seda kas lihtne või keeruline haarata, eraldada, orienteerida või liigutada. Arusaadavalt on vaevumärgatavalt ebasümmeetrilist, teravat, kuuma, libedat, imeväikest või tohutult suurt detaili raskem käsitleda kui ühe käega vabalt teisaldatavat sümmeetrilist toatemperatuuril olevat jäika detaili.



Sele 5.94 Keerulise käsitlemise mõned näited [5.59]

Teine tegevus, paigaldamine, on seotud nii detaili omaduste (samad, mis käsitlemisel loetletud) kui ka asetamiskoha iseärasustega (asetamise visuaalne kontrollitavus, ligipääsetavus, suund, täpsus, koostamisjõud, kinnikiilumisoh, uuesti asetatavus).

5.6.7 Kokkuvõte

Koostamise innovaatus on tihedalt seotud erinevate tootmistehnoloogiate ning materjali-teaduse uuendustega. Samas on käsitsi koostamisel väga lihtne otsida katse-eksitusmeeto-dil uuendusi ilma olulise peidetud riski suurenemiseta. Väikese Eesti vabariigi parema ma-jandusliku tuleviku huvides on perspektiivikas arendada robot- ehk paindkoostamist kui ühis-tegevust, investeerides kallimatesse paindkoosteliinidesse tööstusharude kaupa ja luues koostamisalased klastrid ehk ühistöövõrgustikud. Samas võib tõhusaks osutada ka CAM-i pädevusega meeskonna loomine, kes paindkoosteliine teenuse korras erinevates tootmiset-tevõtetes ümber häälestamas käivad. Siis ei koorma kahe ümberhäälestuse vahel jõude istuv CAM-insener liiga palju ettevõtte palgafondi.

5.7 Kihtlisandustehnoloogiad

5.7.1 Põhimõisted

Kihtlisandustehnoloogia (*additive layer manufacturing* või *additive manufacturing*) – mater-jali lisamisel baseeruv kihthaaval valmistamistehnoloogia [5.60, 5.61]. Edaspidi kasutatakse kihtlisandustehnoloogia asemel rahvusvaheliselt levinud lühendit **ALT**.

3D-printimine (*3D printing*) – tavakeeles rohkelt kasutatav mõiste kihtlisandustehnoloogiate kohta. Esialgu tähendas 3D-printimine ühte konkreetset pulbriliimimisel baseeruvat tehnoloogia, ent nüüd kasutatakse seda tihtilugu kõigi kihtlisandustehnoloogiate kohta.

Kiirprototüüpimine ehk prototüüpide kiirvalmistus (*rapid prototyping*) – protsess, mille käigus valmistatakse kiiresti toote näidis.

Kiirtootmine (*rapid manufacturing*) – protsess, mille käigus valmistatakse kiiresti lõpptoode.

Tööriistade kiirvalmistus (*rapid tooling*) – protsess, mille tulemusena valmib seeriatootmise tööriist (nt survealuvorm, stants) või selle osa.

Kiirvalmistus – hõlmab kiirprototüüpimist, kiirtootmist jne (*automated fabrication, solid free-form fabrication, layer-based manufacturing*).

Digitaalne otsetootmine – (*direct digital manufacturing*) protsess, mille puhul valmistatakse lõpptoode automaatselt otse digitaalsest mudelist (inimese minimaalse sekkumisega). Mõned autorid eelistavad seda terminit kihtlisandustehnoloogiale.

5.7.1.1 Olemus

Kihtlisandustehnoloogia on tootmisprotsess, kus füüsilised detailid valmistatakse otse 3D-CAD-mudelist, kasutades tehnoloogiaid, mis lisavad materjali kihthaaval. Seejuures ei kasutata eririkiseid ja käsitöö osakaal on minimaalne. Kihtlisandustehnoloogia on üldine mõiste, mis hõlmab erineva taseme tehnoloogiaid. Tootmise kontekstis räägitakse sagedamini digitaalsest otsetootmisest, mille protsess on põhimõtteliselt sama nagu prototüüpide kiirvalmistusel, kuid valmistatakse lõpptooteid, mitte prototüüpe, s.t toodete omadused (tugevus, täpsus, pinnakvaliteet jne) on piisavalt head, et kasutada neid lõpptootes. Selles protsessis puudub otsene vajadus detaili jooniste järele, kuigi lisaoperatsioonide tarbeks, nt kvaliteedikontroll, võidakse neid siiski kasutada, ning samuti pole tarvis töötlusprogrammide koostamist (see toimub automaatselt). See omakorda võimaldab vältida vigade tekkimist (kuna tehnoloogiline ahel on lühem) ning vähendab töömahtu. Protsessi saab arvutisüsteemide abil kergesti hallata.

5.7.1.2 Kihtlisandustehnoloogia üldine tööprotsess

Kihtlisandustehnoloogia protsess hõlmab tervet hulka erinevaid etappe, alates kolmemõõtmelise digitaalmodeli loomisest kuni viimistletud füüsilise tooteni. Sõltuvalt konkreetsest tehnoloogiast võib esineda teatud erinevusi, kuid üldiselt koosneb protsess kaheksast etapist.

- 1) **3D-CAD-mudeli loomine** – ALT algab valmistatava toote kolmemõõtmelise digitaalmodeli loomisest. See mudel peab täielikult kirjeldama kõiki objekti pindu. Modelleerimiseks sobib enamik professionaalseks kasutamiseks mõeldud 3D-CAD-süsteeme, mis võimaldavad luua tahkekeha- või pindmudeleid. Kasutada saab ka mudeleid, mis on loodud pöördprojekteerimise (kasutades nt 3D-skannerit) abil.
- 2) **Mudeli konverteerimine STL-formaati** – see on vaheformaat, mis sobib peaaegu kõigile ALT-süsteemidele. Tegemist on lihtsustatud 3D-mudeliga, kus objekti kõik pinnad on esitatud kolmnurksete tükikestena. STL-formaadis mudelit kasutatakse kihtideks jagamisel. On kasutusele võetud küll ka uus spetsiaalne andmevahetusformaad – AMF [5.3], kuid esialgu on STL levinuim.
- 3) **Andmete viimine ALT-süsteemi juhtprogrammi ja STL-mudeliga manipuleerimine** – STL-kujul olev mudel viiakse seadme juhtsüsteemi või sellega ühenduses olevasse arvutisse. Selles etapis paigutatakse mudelid sobivasse asendisse ja asukohta, vajadusel luuakse toed jne.

- 4) **Masina seadistamine** – enne valmistamist tuleb masina juhtsüsteemis reguleerida vajalikud tööparameetrid, nagu näiteks materjaliga seotud parameetrid, kihi paksus, töö kiirust määravad parameetrid jne.
- 5) **Valmistamisprotsess** – see on ALT-süsteemides automatiseeritud protsess, mis toimub enamasti ilma inimese sekkumiseta. Vajalik on vaid kindlustada seade materjali, elektrienergia, vajadusel gaasiga jmt.
- 6) **Detailide eemaldamine seadmest** – kui detailid on valmis, tuleb need masinast välja võtta.
- 7) **Järeltöötlus** – pärast masinast eemaldamist võivad detailid vajada mõningaid lisaoperatsioone. Siia kuulub, sõltuvalt kasutatavast tehnoloogiast ja nõudmistest, puhastamine, tugevdamine, termotöötlus, lihvimine, värvimine jne.
- 8) **Kasutamine.**

5.7.1.3 Eelised

Kihtlisandustehnoloogiad pakuvad traditsiooniliste tehnoloogiate (põhinevad lõiketöölusel ja valutehnoloogial) ees tervet rida eeliseid:

- vähem detaili geomeetria piiranguid;
- ei vajata rakiseid ega tööriistu;
- protsess on automatiseeritud;
- valmistamine suhteliselt kiire – detaili/toote saab valmis juba mõne tunni või päevaga, kusjuures ühekorraga saab valmistada terve hulga detaile (eeldusel, et need seadme tööplatvormile ära mahuvad);
- uut tüüpi materjalid (FGM) ja konstruktsiooni võimalused – saab teha selliseid tooteid, mida traditsiooniliste tehnoloogiatega ei ole võimalik valmistada;
- tõhus energiakasutus – energiat kulutatakse ainult toote valmistamiseks. Traditsiooniliste lõiketöölusel põhinevate tehnoloogiate puhul kulutatakse energiat materjalibloki (tooriku) valmistamiseks, seejärel suure osa materjali eemaldamiseks sellest blokist;
- Tõhus materjalikasutus – materjali kasutatakse enamalt jaolt vaid toote loomiseks, kaod on minimaalsed.

5.7.1.4 Kihtlisandustehnoloogia ja CNC-lõiketöötlemise erinevused

Olgu alustuseks kohe öeldud, et kihtlisandus toimub teatud tüüpi arvjuhtimisega masinatel ehk CNC-tööpinkidel, kuid tavamõistes on CNC-tööpink selline, mis põhineb materjali eemaldamisel (nt freesimine, treimine, laserlõikus, plasmalõikus vmt) või kuju muutmisel (painutamine, vormimine vmt). Kihtlisandustehnoloogiate puhul valmistatakse detail nii, et lisatakse materjali.

CNC (*computer numerical control*) on arvjuhtimine, mõiste, mida kasutatakse tööpingi elektronilise juhtsüsteemi (sisaldab arvutit) kohta, mille puhul tööseadiste liikumist ning mitmeid muid funktsioone juhitakse programmi abil [5.64, 5.65].

Materjalid

ALT-süsteemid põhinesid algselt polümeermaterjalide, paberlaminaadi või vaha kasutamisel. Nüüdseks on võimalik valmistada erinevate süsteemide abil kõigi põhiliste materjalirühmade mudeleid, kuigi igal üksikseadmel on väga kindel piiratud materjalide valik. Erinevalt ALT-ist saab CNC-lõiketöötusega töödelda enamikke materjale, alates pehmetest plastidest ja konstruktsioonivahtudest ning lõpetades metalli ja keraamikaga. Üldiselt kasutatakse CNC-lõiketöötlust pehmete materjalide puhul põhiliselt mitmeetapilistes protsessides, nt valumudelite tegemiseks. Lõpptootmises sobib CNC-lõiketöötlus eriti just kõvemate ning rabedamate materjalide puhul, nagu metallid. Siin on võimalik tagada hea täpsus ja saada paremini etteennustatavate omadustega homogeenne toode. Seevastu võib suur osa ALT-iga valmistatud detailidest sisaldada tühimikke ja nende omadused on anisotroopsed, sõltudes detaili asendist valmistamisel ning paljudest protsessi parameetritest.

Kiirus

Kiire CNC-töötlus (nt kiirfreesimine) võimaldab eemaldada materjali oluliselt kiiremini, kui ALT-masinaid sarnast kogust juurde lisada suudavad. Sellest ei saa siiski järeldada, et ALT oleks aeglasem, sest ALT-i puhul valmistatakse üheainsa operatsiooniga kogu detail. Seevastu vajab CNC-lõiketöötlus arvestatavat hulka planeerimist, ülesseadmist, rakiseid, lõikuru ja seda eriti keerukamate detailide puhul. CNC-lõiketöötlus on pigem mitmeetapiline töötlusprotsess, mis nõuab töötlemist mitme erineva masinaga. Samas võib detaili valmistamine ALT-seadmel võtta mitmeid tunde, kuid korraga saab valmistada terve hulga detaile. Ehkki sõltuvalt tehnoloogiast võib vaja minna viimistlust (mis kestab tunde või koguni päevi), võib kuluda sama koguse detailide valmistamiseks CNC-lõiketöötlemisega nädalaid.

Keerukus

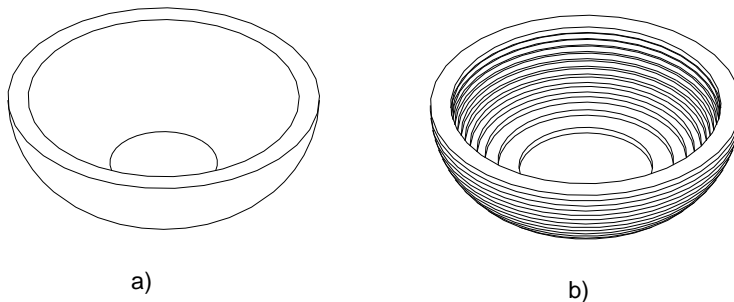
Nagu eelnevalt mainitud, mida keerukama geomeetriaga on toode, seda kaalukamad on ALT-i kasutamise eelised CNC-lõiketöötlemise ees. Kui detail soovitakse valmistada ühes tükis, kasutades freesimist, siis tuleb arvestada, et freesiga ei pääse kõigile pindadele ligi ning võib tekkida tööpingi osade ja rakiste kokkupõrke oht. Suurt hulka detaile ei saa valmistada lõiketöötusega, kui neid ei lahutata osadeks. Hea näide on laevamudel pudelis. CNC-töötusega tuleks valmistada laev ja pudel osadena ja seejärel leida viis, kuidas neid koostada. ALT-süsteemidega saab teha laeva ja pudeli ühes tükis korraga, ilma koostamisoperatsioonideta. CNC-töötuse puhul peab insener iga detaili põhjalikult analüüsima ja planeerima kõik töötlusprotsessid eraldi. ALT-i puhul puudub enamus geomeetriapiirangutest, mistõttu ei ole tarvis eritehnoloogiat ette valmistada.

Täpsus

ALT-il põhinevate seadmete resolutsioon on tavaliselt sajandikmillimeetrites. Enamasti on nende seadmete telgedel erinev resolutsioon, kusjuures vertikaali resolutsioon (z-telg) on määratud kihi paksusega ja on halvem kui horisontaalpinna (x-y-tasapind) resolutsioon. Viimasena mainitu on määratud mehhanismi omadustega, mis tööseadist liigutavad, hõlmates mingit tüüpi mootoreid ja jõuülekandeid. Kasutatav mehhanism määrab muuhulgas kindlaks ehitatava objekti minimaalse suuruse. Näiteks stereolitograafia puhul kasutatakse detaili valmistamiseks laserikiirt. Laserikiire liigutamine toimub galvanomeetrilise peeglikallutusmehhanismi abil, kusjuures minimaalse seinapaksuse määrab ära laserikiire fookustäpi diameeter. CNC-tööpinkide täpsus on määratud tööriista positsioneerimistäpsuse, jäikuse, lõikuri omaduste jm parameetritega. Mõned omadused, nagu näiteks minimaalsed sisemised raadiused, on määratud tööriista geomeetriaga, kuid seina paksus võib olla väiksem kui tööriista läbimõõt. Mõlema tehnoloogia puhul sõltub täpsus ka töödeldavast materjalist.

Programmeerimine

ALT-süsteemide puhul lahutatakse keerukas 3D-geomeetria terveks hulgaks lihtsateks tasapinnalisteks 2D-ristlõigeteks, millel on ühtlane paksus. Sellisel kaob vajadus keerukate 3D-pindade ühendamiseks ja üleminekud on määratud ristlõigetevahelise kaugusega. Sellest tulenevalt on ehitatav pind astmeline (vt sele 5.95).



Sele 5.95 Kihthaaval valmistatud mudel: a) originaalne mudel ja b) valmisdetail

CNC-lõiketöötlemise puhul on lõikuri tööradade genereerimine enamasti keerukas ja aeganõudev ülesanne, mida vähegi keerukamate objektide puhul ei ole võimalik programmiga automaatselt teha. Tööprogrammide ettevalmistamiseks kasutatakse erilisi CAM-süsteeme ja see eeldab tehnoloogia täpset projekteerimist, sealhulgas lõikuri ja rakiste valikut, lõikeparameetrite valikut, tööseadiste liikumistrajektoride kindlaksmääramist jne. Valesti koostatud programm võib mitte ainult rikkuda valmistatava detaili, vaid koguni kahjustada tööpinki või olla isegi ohtlik pingioperaatorile. Samas toimub ALT-i puhul töötlusprogrammi ettevalmistus enamasti täisautomaatselt ja suhteliselt kiiresti ning ehkki insener saab teatud parameetreid ise muuta, on enamikel juhtudel suurim risk, mis võib juhtuda, ebakvaliteetne detail.

5.7.2 Protsesside kirjeldus

On olemas terve rida erinevatel tööpõhimõtetel toimivaid otsevalmistustehnoloogiaid. Konkreetse tehnoloogia valik sõltub eelkõige selle võimekusest tagada nõutavate omadustega toode ja majanduslikest kaalutlustest. Allpool on tutvustatud levinumaid tehnoloogiaid.

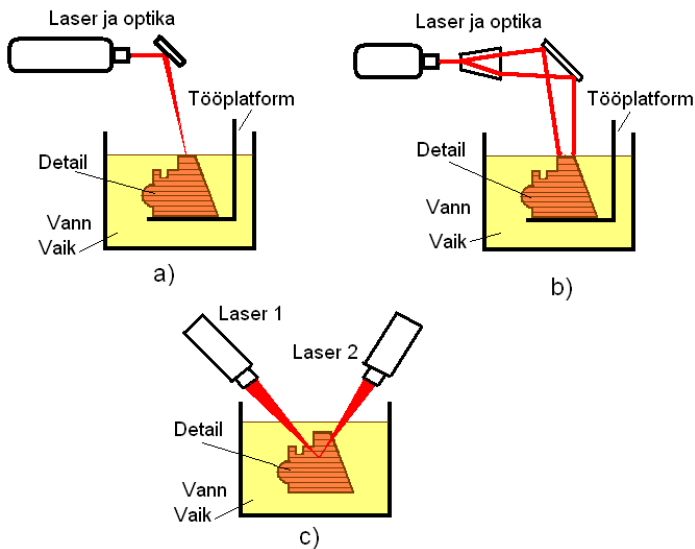
5.7.2.1 Fotopolümeerisatsiooni protsessid

Fotopolümeerisatsiooni protsessides kasutatakse materjalina valguskiirguse toimele tahkestuvat vaiku ja fotopolümeeri. Enamik kasutatavaid vaike tahkestub ultravioletvalguse toimele, kuid on ka silmale nähtavas valguses tahkestuvad.

Sel põhimõttel toimivais masinais kasutatakse erinevaid kiirgusallikaid, sealhulgas selliseid, mis kasutavad gammakiirgust, elektroniirgust, UV-kiirgust ja nähtavat valgust.

Vaigu vannis kasutatakse kolme selektiivse kõvendamise protsessi [5.61]:

- 1) punkthaaval skaneerimine ehk vektorskaneerimine (vt sele 5.96 a);
- 2) mask-projektsioon (vt sele 5.96 b);
- 3) kahe footoni meetod (vt sele 5.96 c).



Sele 5.96 Kolm fotopolümeerisatsiooni protsessi

Punkthaaval skaneerimise ja kahe footoni meetodil läheb tarvis laserikiirt. Seevastu mask-projektsiooni meetodil kõvendatakse vaiku kiirega, mida suunab digitaalne mikropeeglite seade (*digital micromirror device*) ja valgusallikaks võib olla laser või lamp. Kahe footoni meetodi puhul toimub vaigu kõvenemine kahe laserikiire ristumispunktis. Enamik fotopolümeerisatsioonil töötavatest seadmetest kasutab punkthaaval skaneerimist ühe laserikiirega. Seda

meetodit nimetatakse stereolitograafiaks. Stereolitograafia oligi kõige esimene kiirvalmistusmeetod, mis jõudis ärikasutusse ja on siiani maailmas kõige levinum meetod.

Stereolitograafia seadmetega valmistatakse mudel järgmiste etappidena:

- 1) esimese kihi valmistamiseks tõstetakse alus vaigust veidi välja, alusele jääb õhuke kiht vaiku, mida kõvendatakse laserikiirega;
- 2) järgmise kihi töötlemiseks lastakse alust vaigu sisse nii, et vedel vaik kataks juba töödeldud kihi;
- 3) alus tõstetakse vaigust välja nii, et kõvendatud kiht on veidi kõrgemal vaigutasapinnast vannis. Vedel vaigukiht jääb kõvendatud kihi peale;
- 4) pühkija liigub üle aluse, jättes alles vaid nii paksu vaigukihi, kui on vaja järgmise kihi kõvendamiseks;
- 5) alus langetatakse, kuni viimane kiht jääb samale tasemele vaigu pinnaga vannis;
- 6) kui vaigu pind vannis on stabiliseerunud, kõvendab laser kihi.

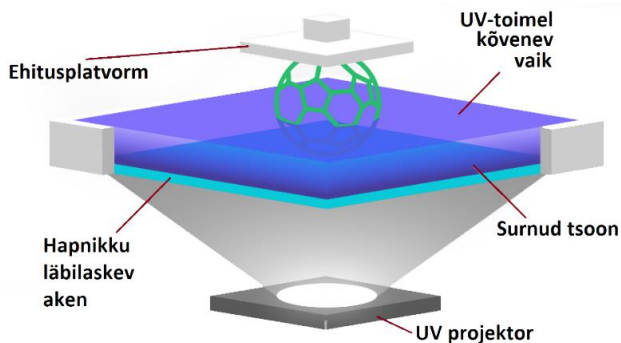
Protsessi täpsuse seisukohalt on oluline, et vaigu tasapinna kõrgus vannis oleks täpselt reguleeritud. Selleks otstarbeks on mõõtmissüsteem, mis võtab arvesse võimalikud mahumuutused, näiteks soojuspaisumisest tingitud mahumuutus ja reguleerib vaigu taset vannis, vastavat silindrit uputades või välja tõstes.

Kui kõik kihid on töödeldud, tõstetakse alus detailiga vaigust välja, liigne vaik eraldatakse, detail pestakse ja võetakse aluse küljest lahti. Kuna detail on vaid osaliselt kõvenenud, siis tuleb see täielikuks kõvendamiseks asetada ahju, kus see ultraviolettkiirguse ja temperatuuri toimel tahkub ja saab oma lõplikud omadused.

Kuna mudeli ehitamise protsessis tekib tahkestatud kiht vedela vaigu peale, mis piisavat toetust ei paku, siis tuleb kasutada tugikonstruktsioone. Need genereeritakse automaatselt ja on oma olemuselt peenikesed pulgad, mida on hiljem lihtne eemaldada. Tugikonstruktsioonid eemaldatakse viimases etapis. Pinda võib nüüd vastavalt vajadusele lihvida ja värvida.

Üks odavamaid ja lihtsamaid fotopolümeere kasutavaid protsesse on firmalt Stratasys (endine Object Geometries Ltd). Protsessis kasutatakse tindiprinteri printimispea põhimõttel töötavat printimispead, millel on terve rida materjali pihusteid. Pihustid pritsivad kiht kihi järel polümeeri vajalikesse kohtadesse. Pärast iga kihi pritsimist valgustatakse see üle ultraviolettlambiga.

Üks käesoleva aja kiiremaid kihtlisandustehnoloogiad on CLIP [5.67], mis baseerub fotopolümeersel vaigudel ja UV-projektoril. Selle tehnoloogia on arendanud firma Carbon3D Inc. Protsess toimub vaigu vannis, millel on spetsiaalne valgust ning hapnikku läbilaskev põhi. Mudelite ehitamine toimub pööratult, s.t tööplatvorm tõstetakse vaigu vannist välja ja projektor kõvendab altpoolt (vt sele 5.97). Protsessi muudab eriliseks asjaolu, et kasutades hapnikku, hoitakse ehitatava detaili ja vaigu vanni põhja vahel surnud tsoon, mis ei lase vaigul põhja külge kinni jääda. Selle abil ei toimu protsess kihthaaval, vaid sujuvalt. Kihilisuse vältimine aitab suurendada töökiirust, tõsta täpsust ja parandada pinna kvaliteeti. CLIP-seadmetega saab mudeleid valmistada mitte tundidega, nagu enamiku teiste seadmetega, vaid minutitega.



Sele 5.97 CLIP-i põhimõtteline skeem [5.67]

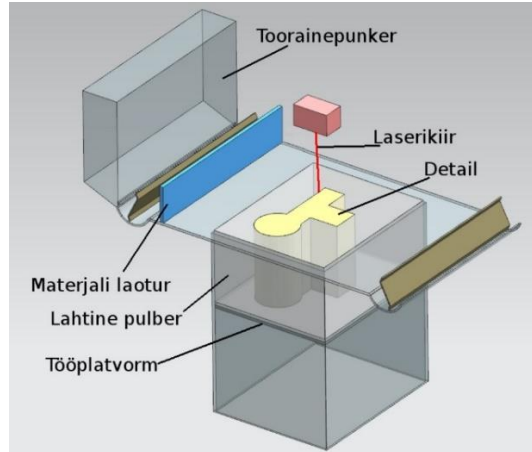
Praegusel ajal toodavad mitmed firmad fotopolümeerisatsiooni põhimõttel töötavaid seadmeid. Tuntuim ja ühtlasi ka turuliider on 3D Systems. Seadmed on suhteliselt levinud ja arenenud. Kasutada saab erinevate omadustega materjale (ent vaid polümeere), kuid esialgu enamikel juhtudel selle meetodiga lõpptoodetesse detaile valmistada ei saa, sest tooted kipuvad ajapikku omadusi muutma (lähevad rabedaks, muudavad värvi jne).

5.7.2.2 Pulbriliitmise protsessid

Sellesse klassi kuuluvatele protsessidele on iseloomulik, et toormaterjal on pulbri kujul. Tegemist on ühe vanima lähenemisega, mida ka tänapäeval väga laialt kasutatakse. Neis protsessides kasutatakse pulbriosakeste kokkuliitmiseks erinevaid meetodeid. Eristatakse viit liiki pulbriosakeste kokkuliitmise viisi [5.61].

- 1) **Osakeste kokkuliimimine.** Pulbriosakesi hoiab koos neile pealekantud liim. Detaili tugevus on määratud liimi tugevusega. Sellel põhineb 3D-printimine, kus pulbrikihtidele printitakse tindiprinterisarnase seadmega liimi, mis hakkab mudelit koos hoidma. Seadmed on suhteliselt lihtsad ja odavad, kuid selliselt loodud detailide mehaanilised omadused on kesised.
- 2) **Keemiliselt indutseeritud paagutamine.** See põhineb kahte liiki pulbriosakeste vahelistel või pulbriosakeste ja töökeskkonnas olevate gaaside vahelistel termiliselt aktiveeritud keemilistel reaktsioonidel, milles tekkiv kõrvalsaadus liidab osakesed kokku. See on laserpaagutusel keraamiliste pulbrite liitmise põhimehhanism.
- 3) **Tahkefaasiline paagutamine.** Pulbriosakesed liidetakse ilma neid sulatamata, põhimehhanismiks on osakestevaheline difusioon.
- 4) **Vedelfaasiline ja osalise sulatamisega paagutamine.** Siin on osa pulbriosakesi sulanud, kuid ülejäänud on endiselt tahkes olekus. Sulanud osakesed liimivad jahtudes ülejäänud osakesed omavahel kokku, moodustades tahke objekti. Sageli kasutatakse kõrgema sulamistemperatuuriga pulbrit segatuna sideainega. Sideaine võib olla kas eraldi pulbrina, komposiitpulbrina (osakesed sisaldavad nii sideainet kui ka põhimaterjali) või sideainega kaetud osakeste kujul.

- 5) **Täielik sulatamine.** See on metallpulbrite paagutamise levinuim mehhanism. Protsessis sulatatakse täielikult kogu pulbrikiht, liites uue kihi eelmise külge (skeemi vt sealt 5.98). Kuumutamiseks kasutatakse enamasti kas laserit või elektronkiirt, mis on piisavalt võimas, et sulatada uuesti ka osa eelmistest kihtidest. Selliselt saadakse nii metallidest kui ka polümeeridest suhteliselt tugevad vähepoorsed objektid.



Sele 5.98 Laserpaagutuse skeem

Protsesside tugevaks küljeks on võimalus kasutada erinevaid materjale. Tänu pulbri toetavale funktsioonile ei ole enamasti vaja luua tugikonstruktsioone (v.a metallide puhul). Siia klassi kuuluvad meetodid on ühed kõige perspektiivsemad kasutamiseks digitaalses otsevalmistuses.

Äriotstarbel toodavad metalli ja keraamika paagutamise laseritel põhinevaid süsteeme EOS GmbH (Saksamaa), 3D Systems (USA), Renishaw plc (Suurbritannia), Concept Laser GmbH (Saksamaa), Realizer GmbH jt.

5.7.2.3 Vedelas olekus materjali ekstrusioonil või pihustamisel põhinevad protsessid

Vedelas olekus materjali ekstrusioonil või pihustamisel põhinevates protsessides valmistatakse detail vedelas olekus materjali (kas sulas olekus termoplasti või ajapikku tarduvat vedelikku) kihthaaval pihustades. Pärast pihustamist või ekstrusiooni kleepub vedelas olekus materjal eelmisel kihil oleva materjali külge ning tardub, moodustades tahke detaili. Siia klassi kuuluvad protsessid, kus detaili ristlõike luuakse sulatatud termoplastse traadiga joonistades (*fused deposition modeling*, *fused filament fabrication*) ja protsessid, mida sageli kutsutakse ka 3D-printimiseks, sest ristlõiked ehitatakse tindiprinteri printimispea sarnaselt vedelat materjali piiskhaaval tasapinnale printides. Neis protsessides tuleb kasutada tugikonstruktsioone, mida genereeritakse automaatselt ja mis ehitatakse tavaliselt erimaterjalist. Pärast valmistamist eemaldatakse need tugikonstruktsioonid selleks ettenähtud lahustega või mehaaniliselt.

Sel põhimõttel töötavad seadmed on suhteliselt levinud. Tuntuim seadmete valmistaja on Stratasys. Materjalina kasutatakse põhiliselt polümeere, nagu ABS ja PLA, kuid mõned seadmed võimaldavad kasutada vaha, keraamikat, toiduainematerjale jmt.

5.7.2.4 Lehtede lamineerimise protsessid

Üks suhteliselt lihtsal põhimõttel toimiv protsess on lamineerimine (*laminated object manufacturing*, LOM). Selles protsessis luuakse objekt lehtmaterjalist väljalõigatud ristlõikeid üksteise peale liimides. Kõige lihtsamates variantides kasutatakse materjalina paberit, millel on ühel pool termiliselt aktiveeritava liimi kiht. Protsessis kantakse eelmisele kihile värsket paberi kihti ja surutakse see kinni kuumaga, mis aktiveerib liimi. Seejärel lõigatakse valmistatava detaili ristlõige välja laseri või muud tüüpi lõikevahendiga. Detaili ristlõikest väljapoole jääv materjaliosa jääb tugimaterjaliks, see tükeldatakse hilisemaks paremaks eemaldamiseks. Mõnes süsteemis lõigatakse ristlõiked enne välja ja alles seejärel asetatakse eelmisele kihile.

Kihtide omavaheliseks liitmiseks liimitakse kontaktliimiga või termiliselt aktiveeritava liimiga, mehaanilist kinnitamist klambrite, poltide või tihtvõrkudega, jootmist või ka ultrahelikeevitust.

Kõige levinum materjal on tavaline paber. Kasutatakse ka mitmesuguseid muid materjale, nagu näiteks plastkiled, keraamilised lindid ja metall-lindid, sh ka roostevaba teras, volframkarbiid, Si_3N_4 , SiC , Al_2O_3 , AlN , BaTi , Si_3N_4 , ZrO_2 jne. Kasutades metall- või keraamilisi materjale, tuleb mudel asetada veel ahju, et eemaldada sideainet ja tõsta tihedust (tihedus pärast paigutamist on kuni 99%). Paigutamisel mudel kahaneb 18–20%. Juhul kui ei soovi suurt tihedust, võib mudelit immutada epovaiguga.

5.7.2.5 Kiirega sadestamise protsessid

Kiirega sadestamise protsessid võimaldavad luua objekte laseri, plasma vmt kiirega pulbrilist või traadi kujul olevat materjali sulatades ja sadestades. Ehkki töö põhimõte toimib nii polümeeride, keraamika kui ka metallide korral, kasutatakse neid protsesse ennekõike metallide puhul.

Nendes protsessides kasutatakse mingit tüüpi energiat koondatuna kitsasse piirkonda (ehk kiirt), et kuumutada pealekantavat materjali. Erinevalt eespool kirjeldatud pulbriliitmise protsessidest, mille puhul laotati esmalt pulbri kiht ja seejärel see sulatati, toimub kiirega sadestamise korral tooraine sulatamine samal ajal selle paigutamisega tööpiirkonda. Tüüpiline seade sisaldab pihustuspead, mis koosneb laseroptikast, pulbri etteandedüüsist ja inertgaasi düüsist. Pihustuspead võib liigutada kas kolme- või enamteljelise servoajami või robotmanipulaatoriga. Mõned süsteemid võimaldavad kasutada korruga mitut materjali, kombineerides jooksvalt lõpptoote koostist. Selliselt saab valmistada tooteid, mille koostis ja seega ka omadused on toote eri osades erinevad. Osad seadmed on kombineeritud CNC-freesimiskeskusega ning võimaldavad kombineerida nii lasertöötlust kui ka freesimise positiivseid omadusi [5.68]. Traditsiooniliste meetoditega on selliseid tooteid kas väga keeruline või võimatu valmistada.

5.7.3 Tehnoloogiavaliku põhimõtted

Nagu kõigi muude tootmistehnoloogiate puhul, nii on ka siin erinevatel protsessidel teatud eelised ja puudused. Kuna kihtlisandustehnoloogiate valdkond on uus ja areneb kiiresti, siis on tehnoloogiavalikul oluline selgeks teha, millised on nõudmised, ning teisalt pidevalt jälgida, milliseid võimalusi erinevad tehnoloogiad pakuvad.

Ei ole olemas seadmeid, mis täidaksid kõik nõudmised või suudaksid kõike väga hästi teha (nt hea pinnakvaliteet, suur valmistamiskiirus, head mehaanilised omadused, odav jne). Teisalt on turul palju teenusepakkujaid, kes võimaldavad erinevate tehnoloogiatega kiiresti detaile valmistada (piltlikult öeldes: detailid järgmiseks päevaks kätte). Seetõttu võib osutada majanduslikult otstarbekaks valmistada erinevaid tooteid/detaile erinevate tehnoloogiatega ja/või tellida erinevatelt tarnijatelt.

Tehnoloogiavalikul on olulisemad aspektid hind, täpsus, detailide nõutavad omadused (nt pinnakvaliteet, kõvadus, tugevusomadused, värv, pinnakate jne), materjalid, tarneaeg, geomeetria keerukus jm. Kuna aspekte on palju, võib optimaalse tehnoloogia valik olla keerukas, kuid samas on sageli piiravaks teguriks mingi detaili omadus (nt tugevus või pinnakvaliteet), mida suudab pakkuda vaid mõni üksik tehnoloogia või seade. See piirab võimalike valikute arvu oluliselt. Internetis on võimalik leida mitmete firmade kodulehelt protsessivaliku abiprogramme, millega saab välja selgitada olulised kriteeriumid ja neid arvestada.

5.7.4 Projekteerimine, arvestades digitaalse otsevalmistuse eripära

Üks oluline põhimõte, millega tootearenduses tuleb paratamatult arvestada, on tootmis-keskne projekteerimine (*design for manufacture and assembly*, DFMA), mille kohaselt tuleb juba toodet projekteerides tagada selle valmistatavus (võimalikult odavalt, lihtsalt, kiiresti, arvestades olemasolevat tootmistehnoloogiat jne). Kuna digitaalne otsevalmistus erineb traditsioonilistest tehnoloogiatest selle poolest, et geomeetriapiiranguid on oluliselt vähem, tuleb seda tõsisiasja ka parimate tulemuste saavutamiseks ära kasutada. Inglise keeles kasutatakse mõistet *design for additive manufacturing* (DFAM), mis tähistab tootearendusprotseduure, kus üritatakse arvesse võtta võimalusi, mida pakub ALT.

Peamised aspektid, mida tuleb arvestada digitaalse otsetootmise toodete projekteerimisel, on järgmised.

- 1) Geomeetria keerukus. ALT võimaldab kasutada tootearenduse eesmärkide saavutamiseks keerukat geomeetriat, kus ei ole erinevalt lihtsast geomeetriast kasvanud kulused ega ajakadusid. Kujupiirangud peaaegu puuduvad.
- 2) Isikupärane toode. ALT võimaldab luua personaalseid tooteid otse 3D-digitaalmudelist, arvestades konkreetse tellija/projekti nõudeid, s.t seeriatootmine, kus kõik tooted võivad olla erinevad.
- 3) Integreeritud koostud. ALT-i puhul saab edukalt ühendada detaile ja integreerida funktsioone üheks keerukaks detailiks ilma koostamisprobleemideta, kusjuures valmistada saab isegi üksteise suhtes liikuvaid sõlmi.

- 4) Tavatootmistehnoloogiate piirangute kõrvaldamine.
- 5) Hierarhiline keerukus. Detaili kujuseärasuste keerukuse võib projekteerida erinevatel suuruskaaladel, alates nano/mikrostruktuuri tasandist (nt pinnatekstuur) ja lõpetades detailisuuruste makrostruktuuridega.
- 6) Funktsionaalne keerukus. Terved funktsionaalsed tooted (mitte ainult üksikdetailid nagu traditsiooniliste tehnoloogiate puhul) võib valmistada ühe korraga.
- 7) Materjali keerukus. Materjali võib töödelda (ehk detaili valmistada) kas punktthaaval või kihthaaval ühest materjalist või siis kombineerides erinevaid materjale.
- 8) Otsene valmistamine 3D-digitaalmodeli põhjal. Jääb ära rakiste ja tööriistade projekteerimine ning valmistamine.

Nendest omadustest tulenevalt avanevad täiesti uued innovaatiliste toodete loomise ning tootmise võimalused, kus paljud detailid ja funktsioonid on integreeritud. Erinevalt DFMA-st võiks DFAM-i eesmärk kõlada järgmiselt: toote suutlikkuse maksimeerimine kuju, suuruste, hierarhiliste struktuuride ja materjali koostise sünteesi abil, arvestades ALT-i pakutavate võimalustega.

5.7.5 Arenguperspektiivid

Järgnevat aastat kasvatatakse kindlalt ALT-i osakaal tootmises. Samuti jätkub uute rakenduste otsimine, mille puhul detailide kuju keerukus on väikeseeria- ning üksiktootmise oluliseks kriteeriumiks. Pikemas perspektiivis kasvab rakenduste osakaal, mis kasutavad ära funktsionaalse keerukuse (nt mehhanismid, sisseehitatud elektroonikakomponendid) ja materjali keerukuse (detaili eri osades sujuvalt muutuva koostisega materjal) võimalusi.

Tehnoloogia arendamise seisukohalt tegeletakse intensiivselt uute materjalide väljaarendamisega (tugevamad, vastupidavamad, odavamad jmt materjalid). Samuti üritatakse adapteerida olemasolevaid kihtvalmistustehnoloogiaid digitaalse otsetootmise nõuetele paremini vastama. Tekivad uued kasutusala, nagu näiteks alljärgnevad.

- 1) Inimeste tervisega seotud abivahendid – personaalselt projekteeritud implantaadid, personaalsed kuuldeaparaadid, läätsed jne.
- 2) Uued tootedisainivõimalused mittespetsialistidele – võib-olla saab klient edaspidi disainida endale isikupärase kommunikatsiooni/meelelahutusvahendi (tuleviku mobiiltelefon) või koduse robotabimehe.
- 3) Komponentidesse integreeritakse andurid, mis võimaldavad komponendi olukorda hinnata, nt tuvastada väsimust, ülekoormust vm ning teavitada sellest juhtsüsteemi.

Tehnoloogia arenedes on ALT-rakendused piiratud tegelikult vaid kasutajate kujutlusvõimega. Selge on see, et teatud kriitilise arengutaseme ja kasutajate hulga juures hakkab ALT väga oluliselt mõjutama tootmist ja majandust ning ettevõtlust tervikuna.

5.8 Värvimistehnoloogiad

5.8.1 Korrosiooni olemus ja osatähtsus

Aastane kulu korrosioonile on maailmas üle 3% SKP-st. Korrosioon on looduslikult esinev nähtus, mida defineeritakse tavaliselt materjali halvenemisega. Korrosiooni all mõeldakse sageli ainult metallide roostetamist, kuid see iseloomustab kõigi ehitusmaterjalide keemilist või elektrokeemilist hävimist keskkonna mõjul. Metallide korrosioon on füüsikalise-keemiline reaktsioon keskkonna ja metalli vahel. Korrosioon tekitab metalli omaduste muutusi, millega võivad kaasneda metalli, selle ümbruskonna või tehnilise süsteemi kahjustused. Reaktsioon on oma loomult tavaliselt elektrokeemiline, selle keskkonnaks on alati mingis olekus vesi. Metallid esinevad looduses peamiselt maakidena, mh oksiidide ja sulfiididena. Et valmistada neist ühendeist puhtaid metalle, nõuab palju energiat. Tootmisel üritab metallidega seotud energia vabaneda ja metall naaseb algupärasesse stabiilsemat olukorda meenutavasse seisundisse (mh korrosioonilmingute abil).

Metalli korrosioon põhineb korrosioonipaaride ehk kohalike galvaaniliste elementide tekkel metalli pinnal. Kohalik galvaaniline element võib moodustuda kahe erineva metalli ühenduskohas, kuid võib tuleneda ka sama metalli struktuuri või pinna erinevusest. Lisaks sellele on vajalik elektrit juhtiv lahus ehk elektrolüüt. Kõige sagedamini on elektrolüüdiks vesi. Paari teke võib tuleneda ka elektrolüüdi mingi komponendi, näiteks hapnikusisalduse erinevusest erinevate kohtade vahel.

Korrosioonipaaris on anoodiks vähemväärtuslik metall või metalli osa ja väärtuslikum metall on katoodiks, nende ühiseks nimetuseks on elektroodid (vt sele 5.99). Elektroodidel on lahuses alati elektrokeemiline potentsiaal. Korrosioonireaktsioonis anood sööbib ja katood säilib. Reaktsiooni kiirust mõjutavad anoodi ja katoodi vaheline pingete vahe ning keskkonnatingimused. [5.69]

5.8.1.1 Atmosfäärikorrosiooni olemus

Atmosfäärikorrosiooni kiirust mõjutavad muuhulgas õhu suhteline niiskus, temperatuur, mustus, pinna asend ja asukoht konstruktsioonis. Atmosfäärikorrosiooni tugevuse hindamiseks võib ilmastikutingimused klassifitseerida maa-, linna-, tööstus- ja mereilmastikuks.

Märjana oleku aeg. Atmosfäärikorrosioon tekib, kui metalli pind on kaetud elektrolüüdiga. Seda perioodi, mille kestel pind on niiskuse mõju all, nimetatakse märjana oleku ajaks. Pind võib saada märjaks sademete udu või niiskuse kondenseerumise tagajärjel. Enamikel metallidel eksisteerib kriitiline suhtelise niiskuse näitaja, millest suurema niiskuse korral on korrosiooni teke oluliselt kiirem. Sõltuvalt metalli kvaliteedist ja teistest võimalikest mõjutajatest kõigub kriitilise niiskuse näitaja vahemikus 60–95%. Kui roostetamine on alanud, piisab selle jätkumiseks ka madalamast õhuniiskuse tasemest. Juhul kui metalli pinnal on kloori sisaldavaid soolasisi, võib terase sööbimine alata ka siis, kui õhu suhteline niiskus on alla 40%.

Väärtuslikum metall (katood)

Plaatina

Kuld

Hõbe

Roostevaba teras

Nikkel

Monel (2/3 Ni, 1/3 Cu)

Alumiiniumpronks

Vask

Valgevask

Tina

Plii

Valumalm, sadestamata

Teras, vähesadestatud

Süsinikteras, valtsitud

Kaadium

Alumiinium

Tsink

Magneesium

Vähemväärtuslik metall (anood)

Sele 5.99 Metallide galvaaniline pingerida merevees temperatuuril +25 °C [5.69]

Temperatuur. Temperatuuri tõustes korrosiooni kiirus suureneb. Vee külmumispunkti madalamal temperatuuril on korrosioon vähene või ei ole seda üldse, kuid ebapuhtal pinnal võib roostetamine jätkuda isegi kerge pakase korral, sest mitmed soolad alandavad elektrolüüdina toimiva vee külmumispunkti.

Õhu saasted. Kaks tähtsaimat õhu saastet, mis kiirendavad metalli korrosiooni, on kloriidid ja vääveldioksiid. Rannikualadel on kloriidid pärit mereveest ja nende mõju rannikult sisemaa suunas langeb kiiresti. Sisemaal võib kloriidi allikas olla näiteks maanteedele puistatav sool. Kloriidi mõjul langeb pindade märgumiseks vajaliku õhu suhteline niiskus.

Peamiselt väävlit sisaldavatest kütustest pärit vääveldioksiidi hulk õhus muutub sõltuvalt kohast ja ajast. Vääveldioksiid moodustab õhu niiskusega reageerides väävelhapet, metalli pinnal muutub väävelhape sulfaadiks. Sulfaadi ionide mõju mehhanism metalli korrosioonile on erinevatel metallidel erinev.

5.8.1.2 Korrosiooni olemus vees

Korrosiooni kiirus vees sõltub sellest, kui kiiresti hapnik pääseb metalli pinnale. Seda mõjutavad muuhulgas vee voolamiskiirus, hapnikusisaldus, temperatuur, bioloogiline tegevus ja lahustunud soolad. Loodusliku vee söövitavus vaheldub sõltuvalt vee keemilisest koostisest. Kõige kiirem on korrosioon merevees.

5.8.1.3 Korrosiooni olemus pinnases

Korrosiooni tase pinnases kõigub enamasti vees ja õhus tekkiva korrosioonitaseme vahel. Söövitava keskkonnana on pinnas heterogeenne, poorne keskkond ja korrosiooni kiirus võib erinevates kohtades olla väga erinev. Üldine korrosioon toimub ühtlaselt, peaaegu ühesuguse kiirusega kogu pinnal. Selle näideteks on terase korrosioon atmosfääris ja kemikaalide mõju all olevate metallpindade korrosioon.

Täpilise korrosiooni korral sööbib metall väikestel pindaladel, tekitades aukjaid süvendeid. Näiteks pinna karedus, lahuse kiire vool pinna suunas ja kloriidioonid võivad tekitada osalist sööbimist. Täpiline korrosioon esineb tavaliselt metallidel, mille korrosioonikindlus põhineb pinda kaitsval passiivsel kihil. Sellisteks on näiteks alumiinium ja roostevaba teras.

Metalli pinnal olevate korrosioonisaaduste või värvipinna piiril võib esineda kihialune korrosioon. Plekiline korrosioon esineb kitsastes pragudes ja avades, kus on vähe hapnikku. Kloriidi ioon kiirendab nii kihialust kui ka plekilist korrosiooni. Roostevaba teras on väga tundlik seda tüüpi korrosiooni suhtes. Juhul kui väärtuslik ja väheväärtuslik metall on kaetud sama elektrolüüdiga, näiteks mereveega, ja on omavahel on elektriliselt ühendatud, tekib galvaaniline korrosioon, mille tagajärjel vähemväärtuslik metall sööbib. Sööbimine on seda kiirem, mida väiksem on vähemväärtusliku metalli pind võrreldes väärtuslikuma metalli pindalaga ja mida suurem vahe on metallidel pingereas. Näiteks neetliite korral ei tohi neetideks valida liidetavatest materjalidest vähemväärtuslikku metalli.

Pingekorrosioon, väsimiskorrosioon, pinnakihi kulumine ja kavitatsioonikorrosioon esineb juhul, kui lisaks korrosioonile mõjutab metalli mehaaniline pinge või kulumine.

5.8.2 Värvimine korrosioonikaitsemeetodina

Korrosioonikaitsevärvimisega üritatakse kaitsta metalli pinda korrosiooni eest ja samal ajal anda objektile soovitud väljanägemine. Värvikihi võime takistada korrosiooni põhineb värvikihis sisalduvatel korrosioonikaitse pigmentidel või katoodse kaitse tagavatel pigmentidel ning värvikihi tihedusel ja heal nakkuvusel alusega Sageli moodustub kaitsemõju nimetatud faktorite kombinatsioonist.

Värvimissüsteem koosneb värvitava pinna eeltöötlemisest ja pinna kaitsmiseks kasutatavatest värvidest. Värvimissüsteemi võib kuuluda üks värv, mis kantakse peale ühe- või mitmekordselt, kuid tavaliselt kuulub süsteemi mitu värvi, mis täiendavad üksteist.

Erinevate värvikihtide ülesanded. Kasutamiskorra kohaselt nimetatakse värve krunt-, vahe- ja pinnavärvideks. Värvimissüsteemi korrosioonikaitsemehhanism põhineb suurele elektritakistusel, korrosioonikaitsepigmentidel või katoodkaitsel. Värvimissüsteemi erinevad värvid võivad kaitsta erineval viisil, näiteks pinnavärvil on suur elektritakistus ja kruntvärv on korrosioonikaitsepigment.

Kruntvärv on värvimissüsteemi esimene värv. Kruntvärvid peavad hästi nakkuma alusega ja kaitsma metalli korrosiooni eest kas korrosioonikaitsepigmentidega, suure elektritakistuse ja/või tihedusega.

Vahevärv on järjekorras teine värvimissüsteemi värvikiht. Sellel on hea nakkuvus kruntvärviga. See on väga tähtis, sest osa värvimisest tehakse tehases ja osa paigaldamiskohas, seega on värvimiste vaheajad pikad. Vahevärvina kasutatakse kas krunt- või pinnavärvi. Vahevärvina võib kasutada ka erilist paksu kihiga värvi, mille abil suurendatakse värvikihi kogupaksust.

Pinnavärv toimib korrosiooni takistava isoleeriva kihina, mis vähendab hapniku vee ja keemikaalide pääsu vahe- ja kruntvärvi kihtidesse. Pinnavärv annab värvitava detailile välimuse, seega esitatakse suuri nõudmisi selle läikele ja värvitoonile.

5.8.2.1 Värvimissüsteemi valik

Värvimissüsteemi valikul tuleb arvestada järgmiste teguritega:

- 1) koormusklass;
- 2) värvitava pinna materjal;
- 3) pinna töötlemise kulud konstruktsiooni kogu kasutamisaja kestel.

Kui konstruktsiooni mingitele osadele ei ole edaspidi võimalik teostada hooldusvärvimist, tuleb nende osade jaoks valida kogu kasutamisaja jooksul kestev pinnatöötlus. Muus osas peab värvi pind vastu pidama soovitud hooldusvahemiku jooksul. Ülevärvimine on tavaliselt palju kallim kui esialgne värvimine, seega kogukulutuste seisukohast on tavaliselt soodsam valida piisavalt vastupidav värvimissüsteem, eriti neil juhtudel, mil konstruktsiooni omadused ja asukoht raskendavad hooldus- või ülevärvimist. (näiteks meretranspordil jne). Eeltöötlemise meetodid ja värvimise koht sobivus peavad vastama valitud värvimissüsteemile (näiteks kas töö tehakse sisetingimustes või tuleb värvida paigaldamiskohas talvel).

Värvimise abil võib takistada korrosiooni:

- 1) takistades katoodreaktsiooni;
- 2) takistades anoodreaktsiooni;
- 3) tagades suure takistuse korrosioonipaari vooluahelas.

Värvides kasutatavad korrosioonikaitse omadusi parendavad lisaained ja pigmendid takistavad sageli nii katood- kui ka anoodreaktsioone.

Värvimissüsteemi vastupidavust hinnatakse **Standard EN ISO 12944-1** järgi, mis jaotab värvimissüsteemide vastupidavuse kolme klassi: madal (L) 2–5 aastat; mõõdukas (M) 5–15 aastat; kõrge (H) üle 15 aasta. Klassifikatsiooni all mõeldakse oletuslikku aega, mille kestel kaitsevärvisüsteem peab vastu esimese suurema hooldusvärvimiseni. Eeldatav vastupidavusaeg ei ole garantiiaeg (mõiste on mainitud ka standardis 12944 osa 1).

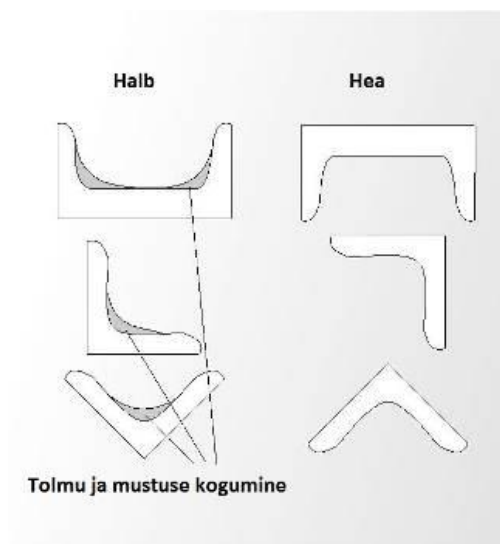
5.8.3 Pinnatöötlusega arvestamine teraskonstruktsioonide projekteerimisel

Töödeldud pindade vastupidavus sõltub alati terviklikest otsustest. Õnnestunud lõpptulemust mõjutavad paljud muudki tegurid kui ainult koormustingimustes vastupidav värvisüsteem või kasutatud värvid. Üheks tähtsaimaks konstruktsiooni korrosioonikindlust mõjutavaks teguriks on teraskonstruktsiooni projekteerimine. Korraliku pinnatöötlemise alus luuakse sageli juba n-ö

joonestuslauul, leides ka pinnatöötuse seisukohast otstarbekohased lahendused. Selleks, et saavutada optimaalne korrosioonikindlus ja kvaliteetselt töödeldud pind, tuleb projekteerimisel võtta arvesse kogu pinnatöötlust vajav objekt ja konstruktsiooni käitumine valmistamise ja kasutamise ajal. Korrosioonikindlust mõjutavateks teguriteks on muuhulgas pinnatöötuse läbiviimise aeg, koht ja kestus, hooldusvärvimise võimalused ning paigaldamisviis, samuti aeg ja koht. Töödeldud pinna vastupidavust mõjutavad ka konstruktsiooni keskkond, mikrokliima aastaegade muutumine, muudatused või seisakud tööprotsessis.

Standardis EN ISO 12944-3 antakse juhendeid korrosiooni tõkestamise ja korrosioonikindluse seisukohalt hea teraskonstruktsiooni projekteerimiseks. Projekteerija võimalused mõjutada konstruktsiooni korrosioonikindlust on mitmesugused. Korrosioonikaitsega arvestav õige lahendus peab olema tehniliselt ja majanduslikult läbi mõeldud vähemalt järgmistest seisukohtadest:

- **söövitavate tingimuste vältimine.** Konstruktsiooni osad paigutatakse nii, et konstruktsiooni oleks võimalik hoida puhta ja kuivana ja hoolitsetakse selle eest, et pinnale sadanud, pritsinud või kondenseerunud vesi voolaks ära. Profileeritud terased võivad koguda tolmu, vett, protsessi käigus tilkuvaid aineid jne. Need suurendavad korrosiooniriski ja konstruktsioonide koormust. Kui vedelikke koguvaid taskuid ei ole võimalik vältida, tuleb konstruktsiooni kõige madalam koht varustada tingimuste suhtes piisavalt suure avaga ja üritada juhtida tilkuv vedelik muust konstruktsioonist mööda;



Sele 5.100 Näiteid vett, niiskust ja mustust koguvatest konstruktsioonidest ning sellest, kuidas samu konstruktsioone võib korrosioonikaitsest lähtuvalt paremini vormida [5.69]

- **õige materjali ja kaitseviisi valik.** Ohtlike galvaaniliste paaride teket võib vältida materjalide valikuga, hoides vähemväärtusliku metalli pinna suuremana kui väärtuslikuma, isoleerides metallid teineteisest või kattes vähemväärtusliku metalli kas teise süsteemi paremini sobiva metalliga või isoleerides pinnakattega, nagu näiteks korrosioonikaitsevärvi;
- **korrosioonitundlike ja värvimistehniliselt ebasoodsate konstruktsioonide vältimine.** Konstruktsiooni vorm ja asukoht mõjutavad otseselt korrosioonikaitse- ja hooldusvärvimist ning selle kaudu ka värvikatte vastupidavust ja kasutamisaega. Korrosioonikaitsevärvi kaetava teraskonstruktsiooni kõik pinnad tuleb paigutada nii, et neid oleks võimalik korralikult eeltöödelda, värvida ja kontrollida. Samuti on oluline kasutada korrosioonikaitse seisukohalt maksimaalselt sobivaid konstruktsioonide vorme. Hea konstruktsiooni projekteerimisel valitakse nii lihtsad geomeetrilised vormid kui võimalik, vältides värvimist raskendavaid teravaid nurki;
- **pinnatöötlus enne kokkupanekut.** Pinnad, mida ei ole võimalik töödelda pärast kokkupanekut või paigaldamist, töödeldakse eelnevalt või valmistatakse korrosioonikindlast materjalist.
- **pinnatöötlus ja hooldusvärvimised pärast kokkupanekut.** Projekteerimisel tuleb arvestada, et ka peale konstruktsioonide monteerimist oleks võimalik teostada pinnatöötlust ja hooldusvärvimist. Konstruktsioonid tuleb varustada hooldusvärvimiseks vajalike konsoolide ja läbipääsudega. Heaks näiteks on uute sildade teraskonstruktsioonid või mahutid;
- **mehaaniliste kahjustuste vähendamine.** Projekteerimisel tuleb arvestada, et konstruktsiooni liigutamisel ja kasutamisel ei tekiks metallile mehhaanilisi kahjustusi, mis võiksid põhjustada roostetamist.

Standardis EN ISO 12944-3 on toodud juhendid lähestikku asetsevate pindade minimaalsete kauguste jaoks. Et oleks võimalik pinda eeltöödelda, värvida ja hooldada, peab töötaja seda nägema ja ulatuma oma tööriistadega pinnani. Seetõttu on tähtis, et pind oleks näha ja selleni oleks võimalik ulatuda.

Meelespea korrosioonikaitse seisukohast hea teraskonstruktsiooni või masina projekteerimiseks.

- 1) Vali õiged materjalid.
- 2) Projekteeri võimalikult lihtne, selge ja puhtana püsiv konstruktsioon.
- 3) Täpsusta, kas konstruktsioon vajab tulekaitsevärvimist. Arvesta sellega tehniliste arvestuste juures.
- 4) Kindlusta juurdepääs nii, et konstruktsiooni kõiki pindu oleks võimalik puhastada, värvida ja kontrollida. Kontrolli standardist EN ISO 12944-3 konstruktsioonidevahelisi minimaalseid kaugusi.
- 5) Välti vett ja prahti koguvaid renne.
- 6) Vältimatud rennid varusta piisavalt suurte veeäravooluavadega.
- 7) Välti tasapindu, mille peal püsivad lumi ja vesi.

- 8) Välti teravaid nurki. Pööra tähelepanu asjaolule, et lõigatud pleki nurgas on kaks teravat nurka, mida värv peaaegu üldse ei kata.
- 9) Pea meeles, et värv ei ole pahtel, see ei täida isegi väikseid pragusid, vaid jätab need avatuks ja osaliselt prakku tungides jätab ka prao servad peaaegu paljaks.
- 10) Välti katkendlikke keevisõmbusi, need roostetavad peaaegu kindlasti.
- 11) Välti punktkeevitusõmbusi, millesse satub vesi.
- 12) Pea meeles, et täiesti suletud torud ja karbikujulised konstruktsioonid ei korrodeeru seestpoolt, kuid need korrodeeruvad avatuna.
- 13) Välti kahe erineva metalli isoleerimata ühenduskohti.
- 14) Ära kasuta roostetavaid pisidetaile, hingi, kinnitusedetaile jne.
- 15) Pea meeles, et poltühenduses värvi pind puruneb sageli ja algab roostetamine. Abiks on sobivad seibid.
- 16) Ära projekteeri mitut väikest hooldusluuki, vaid pigem üks ja korralik.
- 17) Pea meeles, et näiteks mahutites on luuk lisaks läbipääsule vajalik ka puhastusmaterjali eemaldamiseks ja tuulutamiseks.
- 18) Määra terase töötlemise kvaliteediasse (ISO 8501-3).
- 19) Vali näiteks masina löökide suhtes tundlike kohtade jaoks tumedad värvitoonid, et kahjustused oleksid vähem näha.
- 20) Iga konstruktsiooniosa juures küsi, kas siin on korrosioonitundlikke kohti? Kas detail on vajalik, kas see peab olema just selline, just siin jne?

ISO 12944-2 kohane klassifikatsioon ei arvesta pinnatöötlemiseks kasutatud värvidele või pinnakatetele esitatavaid üksikasjalikke erinõudmisi, nagu sobivus kontaktiks toiduainete või joogiveega. Ka erinevate kemikaalide, lahustite, õli poolt tekitatud ja mehaanilisi koormusi ei ole standardis arvestatud. Värvimissüsteemi valikul tuleb nende koormustega siiski arvestada ja vajadusel teha standardi süsteemidest erinev valik kui värvi valmistaja poolt objektile soovitatud värvimissüsteem.

5.8.4 Korrosioonikaitsevärvimise standardid

Korrosioonikaitsevärvimise standardite eesmärgiks on kindlustada parem ja ühtlasem värvimise kvaliteet. Head standardid on abiks asjatundjate kogemustele, kuid ei asenda neid kunagi.

5.8.4.1 Standardite tähtsus

Standardiseerimise abil luuakse ühtsed terminid, hindamise alused ja nõudmised, mis hõlbustavad tervikliku ettekujutuse tekkimist vastavast tehnilisest valdkonnast. Standardites on määratud ühine keel ja ühesugused tööviisid, mis lihtsustavad projekteerimist, ühtlustavad tööd, hoiavad kokku kulused ja aitavad vältida töö dubleerimist.

Standardid on tavaliselt soovitusliku iseloomuga. Määrustes ja direktiivides võib siiski viidata standarditele, sellisel juhul on need viitestandardid siduvad dokumendid. Nii rahvuslikes kui

ka rahvusvahelistes korrosioonikaitsevärvimise standardites esitatakse nõudmisi värvimisüsteemidele, eeltöötlemisele, värvimisele ja kvaliteedijärelevalvele. Värvide komponentidele ja värvidele ei esitata tavaliselt täpseid nõudmisi koostise osas, vaid eeldatakse, et igal värvitüübil on määratud omadused.

5.8.4.2 Rahvusvahelised standardid

Rahvusvaheliselt reguleerivad korrosiooni-kaitsevärvimisega seotud töid järgmised ISO ja EN ISO standardid:

ISO 12944: 1–8. Värvid ja lakid. Teraskonstruktsioonide korrosioonitõrje kaitsevärvisüsteemidega.

Osa 1: üldist;

Osa 2: keskkonningimuste klassifikatsioon;

Osa 3: konstruktsiooni projekteerimisega seotud seisukohad;

Osa 4: pinna tüübid ja pinna eeltöötlus;

Osa 5: kaitsevärvisüsteemid;

Osa 6: laboratoorsed meetodid testimiseks;

Osa 7: värvimistöe teostamine ja järelevalve;

Osa 8: uusstruktsioonide värvimise ja hooldus värvimistöede spetsifikatsioonide koostamine.

Standardi süsteemide piiratus. ISO 12944 käsitleb ainult värvisüsteemide korrosioonikaitseomadusi. Muid kaitsvaid omadusi, nagu kaitset mikroorganismide kemikaalide (happed, leelised, lahustid jne), mehaaniliste koormuste või tule eest, see standard ei käsitle. Standard käsitleb ainult konstruktsioone, mille paksus on vähemalt 3 mm ja mis on valmistatud süsinik- või vähelegeeritud terasest ja mis on kas katteta, tsingitud, difusioonkattega, tehnoloogilise kruntvärviga kaetud või värvitud. Standard ei käsitle õhukesest lehtmaterjalist, alumiiniumist või roostevabast terasest valmistatud konstruktsioonide värvimist. Ka katete valik on piiratud. Muuhulgas ei käsitle standard pulber- ja muid soojuse mõjul kõvastuvaid värve.

ISO 8501:1–3. Teraspindade töötlemine enne katmist värvi või muude vastavate toodetega. Pinna puhtuse visuaalne hindamine.

Osa 1: katmata teraspindade ja eelnevatest katematerjalidest täielikult puhastatud teraspindade roostetamisastmed ja eeltötlusastmed.

Osa 2: eelnevalt kaetud teraspindade eeltötlusastmed peale varasema katte osalist eemaldamist.

Osa 3: keevituskohtade, lõikekohtade ja teiste defektsete kohtade eeltötlusastmed.

ISO/DIS 8501-4: Kaetud ja katmata metallpindade eeltötlusastmed peale rooste ja eelneva katte eemaldamist pritspuhastamise teel.

ISO 8503:1–4. Teraspindade töötlemine enne värvi või muude vastavate toodetega katmist. Pritspuhastuse teel puhastatud pindade kareduse määratlemine.

Osa 1: kvaliteedinõuded ja formuleeringud ISO-pinnaprofiili standardijärgse näidisega pritspuhastatud pinna hindamiseks;

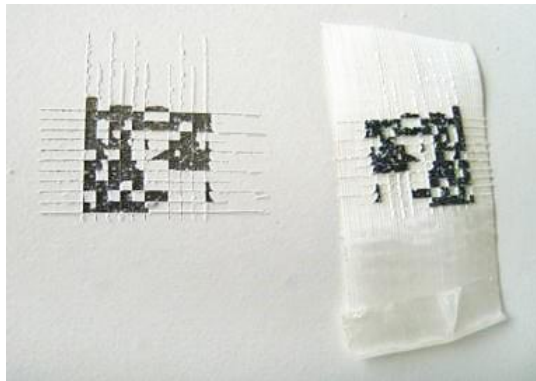
Osa 2: pinnaprofiili hindamismeetod pritspuhastatud terasele. Võrdlusdetaili meetod;

Osa 3: ISO võrdlusdetaili kalibreerimis-meetod ja pinna profiili määratlus. Mikroskoobimeetod;

Osa 4: ISO võrdlusdetaili kalibreerimismeetod ja pinna profiili määratlus.

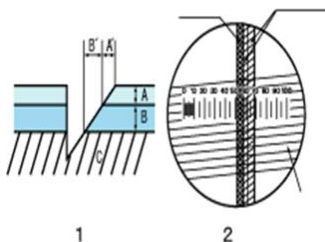
EN 1023. Automaatselt pritspuhastatud ja tehnoloogilise kruntvärviga kaetud terasest metallkonstruktsioonid.

ISO 2409. Värvid ja lakid. Nakkuvustest. (*cross-cut test*) (vt sele 5.101)



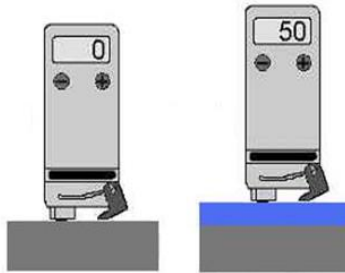
Sele 5.101 Nakkuvustesti näide

ISO 2808. Värvid ja lakid (2007. a). Värvikihi paksuse määramine (vt sele 5.102). Värvikihi paksuse mõõtmist on nii värvikihti kahjustavat kui ka mittekahjustavat. Metallselt pinnalt (Fe) kuiva värvikihi mõõtmine magnetilisel meetodil. Osa seadmeid, millega on võimalik mõõta alumiiniumpindadelt. (Non-Fe). Samuti sobib värvikihi paksuse mõõtmiseks mikroskoobi meetod. Tugeva V-kujulise metallteraga veetakse värvitud metallile vagu, mida saab valgustatud mikroskoobiga mõõta. Mõõta saab värvikihi paksust ja kihtide arvu.



Sele 5.102 V-cut ISO 2808 näide

ISO 19840. Värvid ja lakid (2012. a). Värvikihi paksuse määratlemine haaveldatud pinnalt.



Sele 5.103 Kuivanud värvikihi mõõtmine

ISO 2813. Värvid ja lakid. Läike määratlemine mittemetalsetele värvikihtidele 20°, 60° ja 85°-se nurga all.

Läikegrupp	60°	Nimetus	Läikearv
1		täisläikiv	üle 90
2		läikiv	60–89
3		poolläikiv	30–59
4		poolmatt	11–29
5		matt	6–10
6		täismatt	0–5

ISO 4624. Värvid ja lakid. Nakkuvuse hindamine venitus testi abil (vt sele 5.104).



Sele 5.104 Venitustesti seadmed (*pull-off test*)

ISO 4628 1–8. Värvid ja lakid. Pinnakatete halvenemise hindamine. Tavaliste veatüüpide esinemise tugevuse, määra ja suuruse klassifitseerimine.

Osa 1: üldosa ja tähistussüsteem;

Osa 2: üleskerkimisastme (mullitamise) hindamine;

Osa 3: roostetamisastme hindamine;

Osa 4: pragunemisastme hindamine;

Osa 5: koorumisastme hindamine;

Osa 6: pudenemisastme hindamine.

Inglise standard BS 5493:1977. BS 5493:1977 *Code of practice for protective coating of iron and steel structures against corrosion* käsitleb laialt terase töötlemiseks kasutatavaid pinnakatteid, seda põhiliselt Briti saarte tingimustes. Standard sisaldab nii metallist kui ka orgaaniliste pinnakatetega seotud korrosiooni kaitsemeetodeid. Seal on oma koormusklasside jaotus: maakoha, tööstus-, ranniku- ja tööstuslik rannikuilmastik, sademete eest kaitstud konstruktsioonid, kuivad ja niisked siseruumid ning lisaks sellele 12 erikoormust. Soovitatud pinnakatted on rühmitatud vastupidavusklassidesse.

Rootsi standardid BSK 99. Rootsis on kasutusel Boverketi käsiraamatus „*Boverkets handbok om Styllkonstruktioner*” (BSK 99) sisalduvad soovitusel teraskonstruktsioonide korrosioonitõkestusvärvimiseks ja teraskonstruktsioonide projekteerimiseks. BSK 99 põhineb suures osas standardil ISO 12944. BSK 99 olevad värvisüsteemid määratakse vastavatesse klassidesse tabelite 8:72 a–f kohaselt. S-süsteemid vastavad standardile EN ISO 12944-5 ja N-süsteemid on rahvuslikud.

Rootsi standardid (SSG standardid). Rootsi Skogsindustrielle Standardiseringsgruppeni on koostanud värvimise standardid paberi- ja tselluloositööstuse jaoks.

Soome standardid. Soomes on korrosioonikaitsevärvimise reguleerimiseks lisaks rahvusvahelistele standarditele välja töötatud ka mõned rahvuslikud standardid. **SFS 5873** – metallkonstruktsioonide korrosioonitõkestus kaitsevärvisüsteemidega. Kasutussoovitus protsessi- ja metallitööstusele. **SFS 8145** – korrosioonikaitsevärvimine. Pritspuhastatud ja tööstusliku kruntvärviga töödeldud teraspindade mehhaanilised eeltötlusmeetodid ja kvaliteeditasemed. **PSK 2701** – metallkonstruktsioonide korrosioonitõkestus kaitsevärvisüsteemidega ning hankedokumendid.

Ettevõttekohased standardid. Mitmed ettevõtted on oma tarbeks välja töötanud standardid, kus arvestatakse erinõudmistega, mida tootmisettevõtted esitavad. Nende hulka kuuluvad ka iga projekti jaoks eraldi koostatud värvimistöe kirjeldused, milles määratletakse värvisüsteem ja järgitav kvaliteeditase.

5.8.5 Pinna puhastamine ja eeltöötlemine

Värvitava pinna puhastamine ja eeltöötlemine sisaldab kõiki neid toiminguid, mille abil parandatakse värvikihi nakkuvust ja vastupidavust. Hoolikas ja asjakohaselt valitud eeltöötlemine on õnnestunud värvimise aluseks. Värvimise defektidest 50–70% tuleneb halvast eeltöötlemisest. Otstarbekohane ja ökonoomne eeltöötlemise meetod valitakse töödeldava pinna seisukorra ja objekti paigaldusaegse või lõpliku asukoha koormuse tingimuste alusel. Samas arvestatakse ka värvisüsteemi nõudmiste ja värvitava eseme vormiga ning pinnatöötlusteostamise kohaga (väli- või sisetingimustes).

Eeltöötlemise meetodeid tähistavad tunnused. Eeltöötlemise meetodeid tähistavaid tunnuseid kasutatakse seoses valitud värvimiskombinatsiooniga värvimistöös selgitustes. Tunnused on toodud all tabelis.

Tabel 5.3 Eeltöötlemise meetodeid tähistavad tunnused

Eeltöötlemise toiming	Tunnus
Happega söövitamine	Be
Terasharjaga töötlemine	St
Pritspuhastus	Sa
Leekpuhastus	F
Osaline pritspuhastus	PSa
Osaline puhastus käsi- või mehaaniliste tööriistadega	PSt
Osaline mehaaniline puhastus	PMa

Roostetamisastmed. Standard ISO 8501-1 määrab värvimata terase jaoks neli valtsimistagi ja roostetamisastet, mida tähistatakse tähtedega A, B, C ja D. Standardis on neid kirjeldatud nii teksti kui ka fotode abil. **A** – terase pind, mis on laialt kaetud hästi kinni oleva valtsimistagi kihiga, kuid kus roostet on väga vähe või ei ole üldse. **B** – terase pind, millel on algav roostetamine ja millel valtsimistagi kiht on hakanud lahti tulema. **C** – terase pind, millelt valtsimistagi on maha roostetanud või millelt võib selle maha kaapida, kuid millel võib märgata ainult vähest täpilist korrosiooni. **D** – terase pind, millelt valtsimistagi on maha roostetanud ja millel võib märgata üldist täpilist korrosiooni. Ülevaatus tehakse kas päevavalgusel või sama hea tehisvalgustuse juures. Roostetamisastmeks märgitakse värvitava eseme kõige suurem roostetamise tase.



A



B



C



D

Sele 5.105 Terase roostetamisastmed

Ka varem värvitud pinna jaoks võib määrata standardi ISO 4628-3 alusel roostetamisastme, mille korral kasutatakse markeeringut Ri 0 – Ri 5 vastavalt sellele, kui suur osa värvitud pinnast on roostetanud. Standardis on näidisfotod nii värvitud pinna roostetamise kui ka pragunemise, kestendamise ja mullitamise hindamiseks (vt tabel 5.4).

Tabel 5.4 Värvitud pinna roostetamisastmed (ISO 4628-3) ja vastav roostetanud pindala ning vastavused muude värvitud pinna roostetamise astmete standarditega.

Tase	Roostetanud pindala (%)	Euroopa standard D610	ASTM
Ri 0	0	Re 0	10
Ri 1	0,05	Re 1	9
Ri 2	0,5	Re 2	7
Ri 3	1	Re 3	6
Ri 4	8	Re 5	4
Ri 5	40/50	Re 7	1–2

Eelpuhastus. Eelpuhastuse käigus eemaldatakse värvitavalt pinnalt erinevate mustuse ja rasva eemaldamise meetodite abil rooste eemaldamist ja värvimist segavad saasted. Tahke mustus, nagu jää, betooni-, mördi- ja värvijäätmed ning paks soola ja roostekiht murtakse, kaabitakse või eemaldatakse harjaga. Soolad ja muu vees lahustuva mustuse võib pesta

maha veega, harjaga hõõrudes, kõrgsurve, auru või leelisega pestes. Rasva ja mustuse eemaldamiseks pestakse tavaliselt lahusti, emulsiooni või leelisega. Emulsiooni ja leelisega pesemine nõuab alati hoolikat loputamist.

- **Mustuse ja määrde eemaldamine eelpuhastusel.** Pesemismeetodi ja kasutatavate ainete valikut mõjutavad mitmed tegurid, nagu näiteks tootmise kvaliteet ja maht, mustuse liik ja hulk ning järgmine pinnatöötuse etapp. Veega pestes võib pinnalt eemaldada vees lahustuvaid ühendeid, nagu soolad ja happe jäänused. Pesemise tõhusust võib tõsta temperatuuri tõstmise või mehaanilise mõjutamise abil. Mehaaniline mõju saadakse näiteks harjaga pesemisel, segades või kasutades kõrgsurvega veejuga. Võib kasutada ka auruga puhastamist kõrgsurvega pihustades. Selle meetodi eeliseks on pinna kiire kuivamine ja väike vee kulu. Veega pesemisel ja auruga puhastamisel võib kasutada pesemisvahendeid. Nii paraneb vedeliku läbitungivus mustuse kihtidesse. Veega pesemisel võib pesemisvahendi asemel kasutada niisutava aina ka alkoholi, sellisel juhul ei ole vaja eraldi loputada. **Tähelepanu!** Kui jätta teraskonstruksiooni pinnal olevad soolad ja rasv eemaldamata, siis määrduv määrrib pritspuhastussüsteemis olev puhastussmaterjal ja nii kandub mustus hiljem töödeldavatele detailidele.
- **Aluseline pesu.** Aluseline pesu eemaldab määrde, õli ja vees lahustuva mustuse. Aluselised pesemisvahendid mõjuvad kõige paremini soojalt, pesemistemperatuur on tavaliselt 60–90 °C. Aluseliste pesemisvahendite segud on erinevaks otstarbeks tsiingi ja alumiiniumi puhastamiseks tuleb kasutada nende metallide jaoks ette nähtud lisandeid vältimaks sööbimist. Pesemisvahendi valikut mõjutab lisaks metallile ka õli ja määrde lisanditega mustuse koostis. Tugevalt aluselised pesemisvahendid võivad mõningatel juhtudel lahustada mustuse kihte valikuliselt, nii et ainult osa õlidest või määretest lahustub ja pinnale jääva mustuse eemaldamine muutub raskemaks.
- **Lahustiga pesu.** Lahustid, nagu näiteks lakibensiin lahustid, tärpentin, ja aromaatsed süsivesinikud, nagu ksüleen ja toluen. Lahustiga pesemine teostatakse praktikas sageli lakibensiiniga üle pühkides. Nii tehtud pesemise lõpptulemus on küsitav, sest pühkimisel läheb rasv tavaliselt ühest kohast teise üle. Lahusteid tuleks kasutada ainult kas statsionaarsetes või teisaldatavates puhastuskambrites, milles on võimalik asjakohaselt tagada lahusti aurude tuulutus ja lahusti kogumine.
- **Emulsioonpesu.** Emulsioonpesemise korral sisaldab pesulahus vett, lahustit ja emulgaatoreid. Emulgaatorite ülesandeks on muuta mustus selliseks, et see ei nakuks uuesti pinnale. Emulsioonpesemine eemaldab hästi erinevaid mustuse kihte, kuid pinnale võib jääda õhuke õlikile. Emulsioonpesemist kasutatakse sageli eelpuhastamiseks enne aluselist pesu või lahustiga puhastamist. Emulgaatoreid võib lisada ka määrdeainena kasutatavatele õlile, sellisel juhul võib pinna pärast töötlemist loputada veega.
- **Kuivatamine.** Kui eeltöötlemisel kasutatakse vesilahustega teostatavaid määrde eemaldamise või fosfaatimise meetodeid, tuleb detailid enne värvimist kuivatada.

Eeltöötlusastmed. Pinna puhtus määratletakse visuaalsel kontrollimisel ning defineeritakse standardis ISO 8501-1 esitatud eeltöötlusastmete abil. Need on jaotatud kõige sagedamini kasutatavateks pinna ettevalmistamise meetoditeks järgmiselt: käsitööriistade või masinaga

tehtud puhastus (St), pritspuhastus (Sa), leekpuhastus (Fl) ja happega söövitamine (Be). Eeltötlusastmed määratletakse puhastatud pinna välimuse kirjelduse põhjal koos selgitavate näidistotodega. Pinna osalise puhastamise eeltötlusastmete sümbolid on järgmised: PSa – osaline pritspuhastus (osalise puhastusega); PMA – osaline mehaaniline puhastus; PST – osaline puhastus käsitööriistade või masinaga.

Tähelepanu! Kemikaalidega töötlemise meetodite kohta ei ole seni välja töötatud standardiseeritud eeltötlusastmeid, kuid on soovitud, kuidas saavutada korralik pind värvimise teostamiseks.

Eeltötluse kvaliteediasemed. Värvimisele eelnevad tööd ei piirdu ainult pinna puhastamisega roostest, valtsimistagist, määrdest, läikevedelike jääkidest, mustusest ja vanast värvist. Oluline on arvesse võtta ka näiteks keevisõmbuluste läikepindade ja terase pinna kahjustuste töötlemist. Standardis ISO 8501-3 määratletakse pritspuhastatud ja tehnoloogilise kruntvärviga töödeldud terase pindade mehaanilised eeltötluse meetodid ja kvaliteediasemed. Defektidega pindade värvimiskõlblikuks muutmiseks on kolm eeltötlustaset: P1 – kerge eeltötlus: enne värvi peale kandmist peetakse vajalikuks minimaalset eeltötlust. P2 – põhjalik eeltötlus: enamik defektidest on eemaldatud. P3 – väga põhjalik eeltötlus: nähtavad defektid on eemaldatud.

St 2. Hoolikas käsitööriistadega või masinaga tehtud puhastus. Visuaalselt kontrollitud pinnal ei tohi olla tolmu, määret ja mustust ega ka nõrgalt kinni olevat valtsimistagi, roostet värvi ega reostusaineid.

- **Pritspuhastus, Sa.** Terasest ja malmist detailide puhastamiseks kasutatakse tavaliselt pritspuhastust mis on tõhusaim meetod valtsimistagi ja rooste eemaldamisel. Pritspuhastuse all, mida tähistatakse lühendiga Sa, mõistetakse mehaanilist pinna puhastamist, mille korral mustus eemaldatakse abrasiivpuhastuse teel. Kui on tegemist osalise puhastusega, kasutatakse markeeringut PSa. Pritspuhastamisel kasutatakse avatud joa, vaakumjoa, vesijoa (märgpuhastus) ja reaktiivjoaga puhastusseadmeid. Kerget või pühkivat pritspuhastust kasutatakse kuumtsingitud pinna, alumiiniumi ning vana terve värvipinna puhastamiseks ja karestamiseks vahetult enne värvimist. Sellisel juhul tuleb pritspuhastus teostada metallivabade materjalidega ja madala rõhuga, et vältida pinna või pinna katte kahjustamist. Puhutava materjali terade suurus peaks olema 0,2–0,5 mm ja rõhk alla 4 bar-i, otsiku kaugus töödeldavast pinnast 0,5–0,8 m.
- **Pritspuhastuse eeltötlusastmed (ISO 8501-1).** **Sa 1 kerge pritspuhastus** – visuaalsel kontrollimisel ei tohi pinnal olla nähtavat õli, määret, mustust ega nõrgalt kinni olevat valtsimistagi, roostet, värvi või reostusaineid. **Sa 2 hoolikas pritspuhastus** – visuaalsel kontrollimisel ei tohi pinnal olla nähtavat õli, määret ega mustust, võib olla tainult vähe valtsimistagi, roostet, värvi või reostusaineid. Pinnale jääv mustus peab olema hästi aluse küljes kinni. **Sa 2½ väga hoolikas pritspuhastus** – visuaalsel kontrollimisel ei tohi pinnal olla nähtavat õli, määret või mustust ega valtsimistagi, roostet, värvi või reostusaineid. Pinnale jääv mustus on näha mitte enam kui nõrga värvimuutusena, laigulise või võõdilise varjuna. Sa 2½, mis on tänapäeval enimkasutatud eeltötlusaste, on ISO 12944-5 (2007. a) tabelites on hetkel ainuke mainitud puhastusaste. Vanemas standardi versioonis oli

tabelites ka St 2 puhastusaste. **Sa 3 pritspuhastus metalli pinnani** – visuaalsel kontrollimisel ei tohi pinnal olla nähtavat õli, määret või mustust ega valtsimistagi, roostet, värvi või muid reostusaineid. Sa 3 kasutatakse ainult siis, kui koormuse tingimused on eriti rasked.

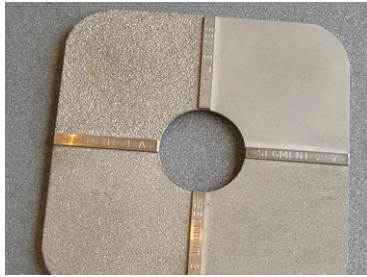
- **Puhastusmaterjalid.** Abrasiivina võib kasutada mitmeid erinevaid materjale. Kasutataval abrasiivi tüübil ja selle terade kujul on otsene mõju puhastatud pinna välimusele ja pinna profiilile. Metallpindade puhastamiseks kasutatakse peamiselt järgmisi materjale: **kor-duvkasutatavad materjalid:**
 - malmi või terase abrasiiv, mis on nii ümmarguste kui ka nurgeliste teradena;
 - terastraadi lõigud või teraslehe puru (*shot* ja *grit*);
 - mõningatel erijuhtudel kasutatakse ka alumiiniumoksiidi ja alumiiniumsilikaati;
 - alumiiniumi ja roostevaba terase puhastamiseks kasutatakse klaaskuule.

Ühekordselt kasutatavad materjalid:

- mitmesugused räbutooted;
- kvartsliid;
- looduslik liiv.

Loodusliku liiva kasutamist üritatakse vältida, sest on oht, et tolm võib sattuda kopsudesse. Abrasiivi võib ka segada veega, sellisel juhul on tegemist märgpuhastamisega. Abrasiivi valikut mõjutavateks teguriteks on materjali kulumiskindlus ja kõvadus. Vastupidavamateks materjalideks on terastraadi lõigud ja terase liiv. Kõige kiiremini kuluvad malmi liiv ja looduslik liiv. Puhastamismaterjalid ei tohi sisaldada vees lahustuvaid soolaid või muid kaitsevõimet vähendavaid aineid. Puhastamismaterjalile esitatavad nõudmised on toodud standardites ISO 11124 (metallist abrasiivid) ja ISO 11126 (mittemetallist abrasiivid).

- **Pinna profiil.** Pinna profiil on pinna mikrokaredus, mida tavaliselt väljendatakse kõrgete tippude ja sügavaimate vagude suhtarvuna. Puhastamisel kasutatava abrasiivi terade suurus, vorm ja liik tuleb valida selliselt, et oleks kindlustatud pinnakatte seisukohalt sobiv pinnakaredus ehk pinna profiil. Pinna profiili võib hinnata standardi ISO 8503 (terase pinna määratlemine) kohaste ISO pinnaprofiilide standardijärgsete võrdlusnäidiste abil. Ümmarguste teradega ($S = \textit{shot}$) saadakse võrdlemisi ümar pinna profiil ja nurgeliste teradega ($G = \textit{grit}$) terav. Standard klassifitseerib pinnaprofiili tasaseks keskmise karedusega ja karedaks, eraldi mõlema tera vormi jaoks. Standardijärgsete näidiste abil võrreldakse pritspuhastatud pindu visuaalselt või puudutades.



Sele 5.106 Komperaator ISO 8503

Vesipritspuhastus. Pritspuhastamiseks võib kasutada ka vett. Kõrgsurvega vesipritsimise (>70 MPa) teel eemaldatakse pinnalt vana värv ja rooste. Kuna puhastamiseks kasutatakse ainult vee survet, abrasiivseid aineid kasutamata, ei muuda see meetod töödeldava pinna profiili ega kahjusta pinda. Kõrgsurvega vesipritspuhastust kasutatakse üldiselt hooldusvärvimise puhul. Eeltötlusastmed nimetatud puhastusmeetodi tarvis on toodud standardis ISO/DIS 8501-4.

Termilised meetodid. Termilistest meetoditest kasutatakse näiteks leekpuhastust, mille abil eemaldatakse liinitootmises teraslehtedelt rasv. Leekpuhastust tähistatakse lühendiga FI (*flame*).

Keemilised meetodid. Keemilise rooste eemaldamise ehk söövitamise korral eemaldatakse valtsimistagi ja rooste antud metallile sobiva söövitamisainega. Söövitamiseks võib kasutada hapet või leelist. Happega söövitamisel kasutatakse näiteks sool-, väävel- või lämmastikhapet. Hape valitakse söövitatava metalli järgi. Hape on praktikas kasutusel kuumtsinkimisliinil (rooste eemaldus soolhappes).

Fosfaatimine. Fosfaatimine parendab värvikihi nakkuvust metalli pinnaga ja värvitud pinna korrosioonikindlust. Fosfaatimiseks sobivad malm-, teras-, tsink- ja tsingitud pinnad, mõningatel juhtudel ka alumiiniumpinnad. Fosfaatimisel moodustub metalli pinnale õhuke kristalliline metallfosfaadi kile, millega värv nakkub paremini, kui sileda metalli pinnaga. Fosfaadi kiht parandab värvitud pinna korrosioonikindlust, isoleerides terase pinna mikroanoodid ja katoodid teineteisest, vähendades sel teel elektrokeemilist korrosiooni. Enamlevinud fosfaatimise meetodid on raud- ja tsinkfosfaatimine. Fosfaatimine toimub kas pihustamise või kastmise teel.

Nakkevärvimine. Nakkevärve kasutatakse esimese värvikihina tsingi-, kergmetalli-, tina-, vask-, roostevabast terasest ja külmvaltsitud terasest pindade jaoks värvi nakkuvuse tagamiseks. Nakkevärvid on tavaliselt kahekomponentsed fosforhapet sisaldavad polüvinüülbutüraalvärvid või polüvinüülbutaraalvaiguga modifitseeritud polüamiidkõvendiga epoksüüdvärvid. Viimasena nimetatud on vähem tundlikud värvimiskoha tingimuste suhtes ja on seepärast populaarsemad tööstuslikes tingimustes.

Tehnoloogiline kruntvärvimine. Tehnoloogilise kruntvärvimise all mõistetakse terase pinna ajutist kaitset õhukese värvikihiga. Eeltöötlemiseks kasutatakse pritspuhastust astmeni Sa 2½. Tehnoloogiliste kruntvärvide kohta kasutatakse sageli ka nimetust *shop-primer*. Väarvi-

dest kasutatakse tavaliselt tsinkepoksoüd- (EPZ), tsinksilikaat- (ESIZ) või tehnoloogilisi epoksoüidkruntvärve (EPF). Kasutatakse ka ühe- või kahekomponentseid polüvinüülbutüraal tehnoloogilisi kruntvärve (PVBF). Seoses edasise värvimisega, tuleb välja selgitada ja värvimise spetsifikatsioonis määratleda, milline oli eeltöötlusaste enne tehnoloogilist kruntvärvimist, millist tehnoloogilist kruntvärvi kasutada ja kuidas see sobib edasiseks värvimiseks. Tavaliselt puhastatakse tehnoloogilise kruntvärviga kaetud pind enne edasist värvimist määrdest ja mustusest ning tehakse kerge pritspuhastus. Uputuskoormuse alla paigutatavatelt objektidelt eemaldatakse tehnoloogiline kruntvärv täielikult.

5.8.6 Korrosioonkaitsevärvimise meetodid ja seadmed

5.8.6.1 Pintsliga värvimine

Korrosioonkaitsevärvimine teostatakse hooldus- ja remondivärvimise korral sageli pintsliga. Nii tungib värv hästi näiteks roostetanud pinda. Pintsliit kasutatakse ka varjatud kohtade, nagu sise- ja välisnurgad, avad, keevised ja muud raskesti ligipääsetavad pinnad, töötlemiseks enne pihustusvärvimist.

Pintsli valik. Pintsli valikut antud töö jaoks mõjutavad pealekantava värvi tüüp, detaili vorm ja soovitatav pinna kvaliteet. Peaaegu kõiki pintsliite tüüpe valmistatakse nii looduslikust harjast kui ka mitmetest sünteetilisest materjalidest.

Värvivalik. Pintsliga värvides tuleb arvestada värvivalikut. Raske on saavutada suuremaid kihipaksusi ja siledat värvikihti. Võimatu (visuaalselt kole) on värvida metallikoone, kuna metallik jääb vaoliseks, mida ei juhtu pihustades. Kahekomponentsed värvid võivad olla lühikese elueaga (*potlife*) ja pintsli kipub kuivama enne kui toode on värvitud.



Sele 5.107 Eelnevalt kohtvärvitud pinnad enne pihustusvärvimist

5.8.6.2 Rulliga värvimine

Korrosioonkaitsevärvimisel kasutatakse rulliga värvimist võrdlemisi vähe, kuna rulli jälg ei ole tasane ja mõningate värvitüüpide korral tekitab rulliga värvimine vahtu. Korrosioonkaitsevärvid on harva sellise koostisega, et rulliga värvimisel oleks võimalik saavutada hea pinna kvaliteet. Värvirulle valmistatakse erinevaks otstarbeks ja erinevatest materjalidest (polüester, akrüül, mohäär, lambavill). Rulli (nagu ka pintsli) valikul tuleb arvestada toote omadustega

ning värvitava objekti kareduse poorsuse, suurusega jne. Rulliga värvimist kasutatakse sageli hooldus- ja remondivärvimise korral, kui pinnakvaliteedile pole kõrgeid nõudeid.

5.8.6.3 Lisaõhuga pihustamine

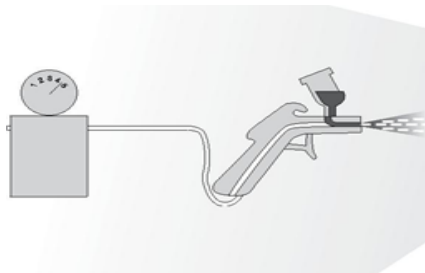
Tuleb märkida, et kogu nüüdisaegne pihustusvärvimise tehnika sai alguse külgõhuseadmest, millega värvimist nimetatakse mitme erineva nimetusega hajutatud õhuga, külgõhuga, madalsurve. anumpritsiga või konventsionaalseks pihustamiseks. Meetodi põhimõte seisneb värvi pihustamises suruõhuga, kasutusel on seejuures mitmeid erinevaid värvi pealekandmise meetodeid. Pihustusvärvimise meetodi leiutajaks loetakse ameeriklast doktor Allen De Vilbist, kes juba 1800. aastatel töötas välja esimese vedelikupritsi. Tema eesmärgiks ei olnud küll värvimine, vaid ravimi pihustamine patsiendi kurku ja ninna. Värvipritsid töötati selle alusel välja alles mõned aastad hiljem. Esimesena kohaldati neid värvipritse mööbli- ja autotööstuses.

Lisaõhuga pihustamise eelised ja puudused. Allpool on loetletud mõningad lisaõhuga pihustamise meetodi eelised ja puudused. **Lisaõhuga pihustusvärvimise eeliseks on:**

- 1) lõpptulemuse kõrge kvaliteet;
- 2) kuna on võimalik pihustada väikeseid koguseid, vajatakse väikeseid koguseid toonitud värve;
- 3) võimaldab töödelda erinevate vormide tüüpide ja mõõtmetega detaile;
- 4) võimaldab värviga katta ka keerulisi pinnakattevahendeid;
- 5) madalad hanke- ja kasutamiskulud;
- 6) värvilehvikku kuju ja värvi hulga reguleerimine.

Lisaõhuga pihustusvärvimise puudusteks on:

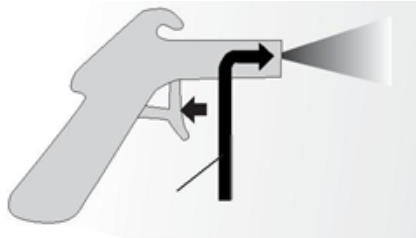
- 1) seadme väike võimsus, värvi pinnale kandmine võtab palju aega;
- 2) vajadus värvi vedeldamiseks (soovitav viskoossus pihustamisel 15–30 sekundit);
- 3) DIN 4 cup-iga mõõtmisel sõltuvalt värvi ja pihusti tüübist;
- 4) ühekordsel värvimisel saadakse õhuke värvikiht;
- 5) suur värvikulu möödapihustamise tõttu;
- 6) suured keskkonnanõuded.



Sele 5.108 Imutoitega pihustuspüstol, värvimahuti püstoli peal [5.69]

5.8.6.4 Kõrgsurvepihustamine

Tänapäeval on kõrgsurvepihustamine enamkasutatud värvide pealekandmise meetod mehaanika- ja laevaehitustehastes ning üldse korrosioonikaitsevärvimisel. Seda meetodit kasutatakse laialdaselt ka puitpindade ning puidutoodete ning ehitiste värvimiseks.



Sele 5.109 Kõrgsurvepüstoli iseloomulik skeem [5.69]

Kõrgsurvevärvimise põhimõte. Kõrgsurvevärvimisel söödetakse värv survevooliku kaudu suure surve all värvimispüstolisse, kus värv surutakse läbi väikese läbimõõduga kõvasulamist pihusti. Värv hajub õhu takistuse ja tekkiva rõhuvahe mõjul uduks. Värvide surve tekitatakse kolb- või membraanpumba abil. Ajamiseks on suruõhk, elekter, sisepõlemismootor või kasutatakse vedelikajamiga kolbpumpa. Suruõhu kõrgsurvepihusti koosneb õhkmootorist ja värvi toitepumbast. Kolvi ristlõike pindala suhe värvipumba ristlõike pindalaga on seadme rõhusuhe, mis näitab seadme võimsust. Näiteks, suhte 40 : 1 korral tagab pump 5 bar'ise rõhu korral teoreetiliselt 200 bar'ise algrõhu värvile. Lõplikku survet pihustis mõjutab ka läbimõõt, filtrite arv ning tihedus, pihustite suurus, värvi tüüp ning värvi temperatuur. Kõrgsurve-seadme valikul tuleb lisaks rõhu suhtele pöörata tähelepanu ka pumba võimsusele liitrites ehk sellele võimsusele, mida väljendatakse tavaliselt l/min. Liiga väike võimsus liitrites suuremate otsikute kasutamisel, olgugi et rõhu suhe on piisavalt suur. See ilmneb lehviku pulseeriva kõikumisena. Samuti kuulub väikse liitritootlusega pump kiiremini. Rõhu kasutamisel tuleb püüda kasutada minimaalset rõhku, mille korral antud värv hajub piisavalt hästi. Ülerõhk suurendab värvi kulu ja koormab seadet ning voolikuid. Alküdvärvid hajuvad hästi juba 80–150 bar'ise algrõhu juures. Paksu kihiga epoksüüdvärvid nõuavad suuremaid rõhke. Lahustivabad epoksüüd- ja polüuretaanvärvid vajavad piisavaks hajumiseks isegi 200–300 bar'ilist rõhku pihustis. Liiga madal algrõhk või rõhu suhtes liiga paks värv on selgelt näha pihustamisviisil joonistusena. Rõhu tarvet võib vähendada värvi soojendamise teel piirini või värvi valmistaja soovitude kohase vedeldi lisamise teel.

Kahekomponentsed kõrgsurvepüstolid. Epoksüüd- ja polüuretaanvärvide turgudele toomise tõttu on pihustite valmistajad töötanud välja erinevat tüüpi kahekomponentseid pihusteid. See on vältimatu, sest eespool nimetatud toodete kasutamisaeg on kohati väga lühike, ainult mõned minutid. Väga sageli kasutatakse ka värvi soojendamise seadmeid. Ka värvivoolikud on kaetud soojusisolatsiooniga peaaegu püstolini, vaid mõni meeter lõpuosas on painduv voolik, mis muudab töötamise paindlikumaks. Doseerivate kahekomponentsete

pihustite abil välditakse materjali kadu, sest valmis segatud värvi ei ole rohkem kui segamistorst pihustini.

Kahekomponentse pihustamise eelised:

- 1) segamissuhe on alati õige;
- 2) segu on ühtlase kvaliteediga;
- 3) pesemishusti vajadus on väiksem;
- 4) pesemisaeg on lühem;
- 5) lahustite saasted on väiksemad, sest süsteem on suletud;
- 6) parem tööohutus;
- 7) värvi tarned suuremates pakendites;
- 8) värvikaod väiksemad;
- 9) seeriatootmises pidevalt samade värvitoonidega värvimine on majanduslikult kõige soodsam.

Kõrgsurvevärvimise meetodi eelised ja puudused. Kõrgsurvepihustuse eeliseks muude värvimismeetoditega võrreldes on suur võimsus ja väike vedeldamisvajadus. Värvida võib paksu kihiga (isegi > 500 µm) ühekordse pealekandmisega, seega soovitud kihi kogupaksus saadakse väiksema värvimiskordade arvuga kui näiteks lisaõhuga pihustamisel või pintsliga värvimisel. Kõrgsurvevärvimise puudusteks on valgumise vältimise raskus keeruliste ristkonstruktsioonide värvimisel ja seadmete kõrge hankehind.

Kõrgsurve värvipüstolil ei saa reguleerida lehviku vormi, vaid reguleeritakse sobiva otsiku valimise teel. Peenreguleerimine toimub toote viskoossuse reguleerimise ja sobiva tööõhu valiku abil. On olemas ka reguleeritavad otsikud, millel saab reguleerida lehviku laiust. Need sobivad kõige paremini paksu kihiga värvide jaoks, kui pinnale esitatavad nõudmised ei ole väga ranged.

Miks värvi soojendatakse? Värvil soojendamise eesmärgiks on vähendada värvi viskoossust, mis omalt poolt vähendab vedeldamise ja pihustamisrõhu vajadust ning parendab pihustamise kasutegurit. Värvil pihustamisel otsikust toimub vedeldi kiire hajumine ja samaaegselt piiskadeks muutunud (atomiseerunud) värvi temperatuur langeb väga kiiresti. Võrreldes soojenduseta kõrgsurvepihustamisega on vajalik värvi pihustamiseks kasutatav madalam rõhk. Värvil kiirus pihustamisetapil langeb ning paraneb lehviku juhitavus. Lisaks sellele ei voola värv nii hõlpsalt ja on võimalik suurendada kihi paksust võrreldes soojendamata värviga.

Kasutajale on eespool toodud teguritest järgmised eelised:

- 1) värvi kokkuhoid;
- 2) parem värvimise tulemus;
- 3) vähem pritsimisjäätmete puhastamist;
- 4) täiendav puhtus ja tööhügieen;
- 5) väiksem pumba kulumine;
- 6) otsikute pikem kasutamisaeg.

Mõningatel juhtudel on värvi liigne kuumutamine siiski kahjulik.

Kõrgsurveotsikud. Otsiku valikut mõjutavad pihustatav värv, kihi paksuse nõue ning värvitava detaili vorm ja mõõtmed. Otsikuid on kahte põhitüüpi: lehvik- ja ümarotsikud. Viimaseid kasutatakse tavaliselt ainult elektrostaatilise pihustamise korral. Kõrgsurveotsiku südamik on tavaliselt kõvasulamist, mis muudab selle võimalikult kulumiskindlaks. Otsikul on sõltuvalt kasutamistarbust ja värvi tüübist erineva suurusega ava, mille suurust väljendatakse tolli tuhandikosades. Ava suurus valitakse soovitud värvikihi paksuse, kasutatava värvitüübi teralisuse ja viskoossuse alusel.

Näiteks läikega pinnavärvid pihustatakse tavaliselt otsikuga, mille läbimõõt on 0,011–0,015 mm, samal ajal paksu kihiga epoksüüdkruntvärvid eeldavad 0,015–0,026 mm otsikute kasutamist. Sama kehtib ka kõrge viskoossusega krunt- ja pinnavärvide suhtes, nagu näiteks vaiguga modifitseeritud epoksüüdvärvid. Jämedateralisi spetsiaalseid pigmente sisaldavad spetsiaalsed pinnakatted võivad nõuda veelgi suurema avaga otsikute kasutamist.

Teiseks tähtsaks teguriks otsiku valikul on lehviku nimirk, mis määrab värvilehviku laiuse. Väiksemate võrekonstruktsioonide värvimisel kasutatakse värvikao vähendamiseks väikese nurgaga otsikut, näiteks 20–30°.

Läikega toodete kasutamisel võib alla kolmekümne kraadine nurk tekitada pinnale õhku. Näiteks plaatpindade automaatse värvimise korral kasutatakse sageli 90° nurgaga otsikuid. Hea universaalse otsiku nurk on 40°.

Kui uue otsiku näitajad on kasutuselevõtmise hetkel sobivad, siis tuleb arvestada asjaoluga, et need muutuvad kulumise tagajärjel. See eeldab, et otsiku andmeid kontrollitakse regulaarselt, näiteks võrreldakse samasuguse uue otsikuga, ja vajadusel tuleb otsik asendada uuega. Kulunud otsikuga värvimine kulutab liialt värvi ja halvendab värvipinda, eriti läikivate toodete puhul.

Lisaks kõvasulamist otsikutele kasutatakse reguleeritavaid otsikuid, mille ava võib reguleerida määratud piirides. Sellisel juhul võib vastavalt vajadusele muuta värvi hulka ja lehviku vormi. Lisaks sellele valmistatakse ka pööratavaid otsikuid. Pööratavates otsikutes võib kuu- lile või silindrilise monteeritud otsiku ümber pöörata ja päästikule vajutusega praht n-õ tulistatakse minema ja puhastatud otsik pööratakse tagasi pihustamisasendisse. See otsik on võrdlemisi populaarne eriti jämedateraliste toodete kasutamisel, sest pööratavus hõlbustab oluliselt puhastamist.

Kõrgsurvevärvimine õhu abil. Kõrgsurvevärvimisel õhu abil kasutatakse nii kõrgsurvepihustamise kui ka lisaõhuga pihustamise meetodeid. Meetodi korral kasutatakse lisaõhku kõrgsurve pihustamislehviku reguleerimiseks. Pumba rõhusuhte kindlustamiseks kasutatakse tavaliselt pumпасid 25–60:1. Otsiku tööõhk on vahemikus 80–250 *bar*'i ja hajutusõhu rõhk 1–3 *bar*'i. (Õhu kulu 50–100 l/min.) Meetodit võib paindlikult täiendada elektrostaatikaga.



Sele 5.110 Kõrgsurvepüstoli näide

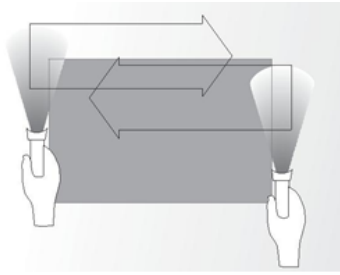
Pihustamistehnika. Pihustamisvärvimise põhiküsimused lahendatakse juba värvimise alustamisel, kui valitakse otsikud ja värvid. Korrosioonikaitsevärvimisel kasutatakse sagedamini kõrgsurvepihustamist. Pihusti võimsus peab olema värvile sobiv. Värvimise alustamisel peab vaatama tootja soovitusi, millise rõhu ja otsikuga on soovitatav värvida. Värvimise alustamisel tuleb eelnevalt selgeks teha, kuidas on kõige parem värvimispüstolit juhtida. Töötamisviiside eelnev hoolikas planeerimine tagab selge kulude kokkuhoiu ja tõstab tunduvalt värvimise võimsust.

Püstoli päästiku kasutamine. Pihustiga värvimise alustamisel tuleb pöörata erilist tähelepanu päästiku kasutamisele. Tuleb õppida katkestama värvi pihustamine õigel hetkel. Näiteks kuhjub värv detaili otstesse, juhul kui pihustamist ei alustata ega lõpetata väljaspool värvitava detaili gabariite.

Kiiruse ja kauguse suhe. Õige kauguse ja pihustamiskiiruse suhte õpib värvija selgeks ainult harjutades. Erinevatel maalritel on see suhe erinev. Tähtis on jälgida, et värvi tuleks pinnale piisavalt, et kogu pind märguks. Kui värvi on liiga vähe, muutub pind karedaks, kui aga värvi on liiga palju, hakkab värv püstpindadel voolama

5.8.6.5 Plaadi värvimine

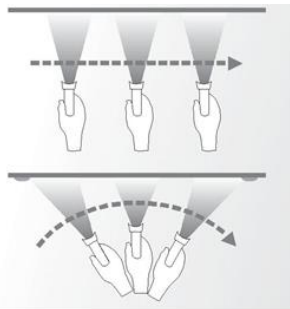
Plaadi värvimisel alustatakse pihustamisega väljaspool plaati ja päästikule vajutatakse veidi enne, kui püstol ületab plaadi serva taseme. Päästik vabastatakse vastavalt plaadi teises otsas, kui püstol on ületanud vastaspoolse serva tasapinna. Tavaliselt tuleb töö teha sirgete ühtlaste ribadena nii, et järgmine riba katab alati umbes 50% eelmisest ribast. Mida lähedamal pinnale hoitakse püstolit, seda rohkem koguneb värvi pinnale, mistõttu tuleb värvi voolamise vältimiseks püstolit kiiremini liigutada. Juhul kui püstolit hoitakse värvitavast esemest liiga kaugel, on värvikiht liiga kuiv ja tekib palju hajutusudu. Iga järgmine riba katab alati u 50% eelmisest ribast. Päästiku sujuv kasutamine on pihustamistehnika juures määravaks teguriks. Pihustamise alustamisel on tähtsaim alati tabada täpselt värvitava eseme serva ja saavutada kohe täielik värviga katmine ilma mööda pihustamiseta.



Sele 5.111 Lehtmaterjalist konstruktsiooni värvimine [5.69]

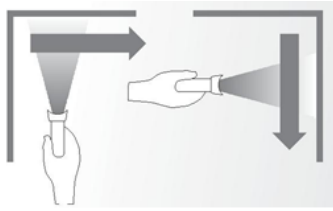
Pikamõõtmeliste esemete värvimine. Pikamõõtmeliste toodete all mõeldakse tooteid, mida ei ole võimalik värvida ühe pihustamisribaga, vaid pihustamisribasid on mitu. Pikamõõtmelise toote värvimisel jagatakse pind lõikudeks u 0,6–1,5 m. Pihustamisel kasutatakse samasugust päästikutehnikat nagu ka väiksemate pindade värvimisel, kus iga lõik katab osaliselt eelmise. Sama tehnikat kasutatakse ka suurte ühtsete pindade värvimisel, nagu näiteks katused ja seinad.

Püstoli kaugus värvitavast objektist. Pihustades tuleb hoida püstolit stabiilsel kaugusel. Kui püstol on pinnale liiga lähedal ja samal ajal ei suurendata püstoli liikumiskiirust, koguneb värv väikesele pinnale ja tekib valgumine. Püstoli kaugus värvitavast esemest peaks lisahuga pihustamisel olema 150–300 mm ja kõrgsurvevärvimisel u 200–400 mm. Püstoli kaugus ei tohi muutuda kogu pinna värvimise jooksul. Püstolit ei tohi liigutada kaarjoont mööda, kui värvimisobjektiks on tasapind.

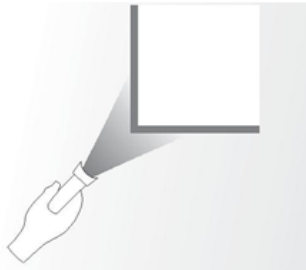


Sele 5.112 Püstol hoitakse värvitava pinna suhtes täisnurga all. Kui püstolit pööratakse nii, et nurk muutub, on pind ebaühtlane. Servades tekib värviudu [5.69]

Sise- ja välisnurkade värvimine. Sisenurkade värvimisel tuleb iga pind värvida eraldi. Kui sisenurga värvimisel üritatakse suunata lehviki ristis nurga suunas selleks, et värvida ühe ribana mõlemad nurga moodustavad küljed, jaguneb värv ebaühtlaselt ja tekib ilmne valgumise oht. Külgede ja välisnurkade värvimisel suunatakse püstol täisnurga all nurga suunas. Sellisel juhul värvitakse nurk ja tasapinna esiosa. Seejärel värvitakse tahud nii, nagu on eespool selgitatud.



Sele 5.113 Nurga värvimisel värvitakse mõlemad seinad täisnurga all, liikudes nurgast eemale [5.69]



Sele 5.114 Õige püstoli asend nurga värvimisel [5.69]

Kitsaste kohtade värvimine. Pihustuslehviku laius määratakse värvitava eseme järgi. Kitsa detaili värvimiseks ei kasutata laia lehvikut. Teisalt ei tohi üritada töötada liiga kitsa lehvikuga. Möödapihustamist vähendatakse, kasutades objekti jaoks kõige paremini sobivat lehviku vormi. Suurte ja keerulise vormiga esemete värvimisel tuleb eelnevalt täpselt planeerida töökord.

Kõrgsurvepihustamise ohutusjuhendid. Kõrgsurvepihustamisel tekitab vedeliku vool hõõrdumist, mis võib seadmetes põhjustada elektrostaatilise laengu ning tekitada sädemeid. Plahvatusohu vältimiseks tuleb seadmed ja värvitavad objektid maandada. Juhul kui tekib kahtlusi maandamise osas, tuleb seade, värvitav objekt ja püstol maandada eraldi juhtmega. Värvilehvikut ei tohi suunata teise inimese või iseenda suunas. Kõrge pihustamisrõhk tekitab vahetu vigastuse. Seadmetes kasutatavad voolikud, püstol ja ühendusmuhvid ning muud detailid peavad vastu pidama seadme maksimaalsele rõhule. Kõrgsurvevoolikuid tuleb käsitseda ettevaatlikult. Voolikute painutusraadius ei tohi olla alla 20 cm. Rikke korral või pihustusotsiku vahetamisel tuleb lülitada sisse püstoli kaitseriiv ja vabastada rõhk seadmest, enne kui hakata otsima riket või seadet remontima.

5.8.6.6 Elektrostaatiline pihustamine

Elektrostaatilise pihustamise korral saab pihustatav materjal püstoli otsikus elektilaengu. Värvitav detail maandatakse ja see moodustab vastupidise laenguga pooluse. Värviosakesed suunatakse elektrivälja mõjul värvitavale esemele ja selle ümbrusesse. Meetodi eeliseks on

vähene möödapihustamine ning võimalus väiksemaid esemeid värvida ümberringi. Välja võimsus sõltub järgmistest teguritest:

- **püstoli ja objekti vaheline kaugus ja pinge.** Värvitav ese maandatakse ja pinge vahe moodustatakse värvi osakestele laengu andmisega püstoli otsikul. Pihustamispüstolis kasutatakse sõltuvalt seadmest pinget 30–90 kV;
- **pihustamiskaugus.** Mida väiksem on kaugus, seda tugevam on elektriväli. Praktikas siiski ei soovitata viia püstolit objektile liiga lähedale, vaid kasutada sama kaugust, mis tavalise pihustamise korral. Mõnedes seadmetes reguleeritakse pinget sõltuvalt pihustamiskaugusest;
- **pihustatava värvi kineetiline energia.** Mida väiksem on kineetiline energia, seda suurem on võimalus pingeenergia abil võita see kineetiline energia ja nii keerata värviosakesed värvitava eseme ümber. Värviosakesed peaks olema võimalikult väikesed, seega on nende mass väiksem. Veel tähtsam oleks vähendada osakeste kiirust. Sellisel juhul paraneb oluliselt kasutegur;
- **pihustatava värvi elektrilised omadused.** Värv või lakk peab teatud määral juhtima elektrit, kuid ka takistus peab olema piisav. Tavaliselt mõõdetakse värvi elektrijuhtivust oommeetriga ja vajadusel reguleeritakse spetsiaalsete vedelditega soovitud suuruseni;
- **värvitava detaili konstruktsioon ja vorm.** Elektrostaatiline pihustamine on mõjutatud Faraday efektist. Värvi osakesed üritavad liikuda mööda jõujoonte välju lähimatesse punktidesse ja seega on raske saada värvi sisenurkadesse;
- **õhuvahetus värvimisruumis.** Elektrostaatilise pihustamise korral ei tohi pihustamiskambri õhuvoolu kiirus ületada 0,5 meetrit sekundis. Juhul kui õhuvool on tugevam, langeb värvimise kasutegur, kuna tugev õhuvool viib kaasa kergemad värviosakesed;
- **maandus.** Maandus peab alati olema efektiivne. Värvimisliini ja -konkse tuleb puhastada piisavalt sageli. Halb maandus vähendab kasutegurit ja võib tekitada ka tuleohtu. Elektrostaatilist pihustamist ei soovitata kergestisüttivaid lahusteid sisaldavate värvide korral.

5.8.6.7 Pihustamisautomaadid

Pinnatöötlemist võib ratsionaliseerida samal viisil nagu ka muid tootmismeetodeid, mh automaatika abil. Automaatne pihustamisvärvimine on mõistlik siis, kui samasugust pinnatöötlust vajavaid tooteid on suurtes kogustes. Pihustamismeetodi määravad detaili vorm ja tooraine ning kasutatav värvi tüüp. Automaatsete seadmete tähtsaimaks nõudmiseks on töökindlus. Automaatse pihustamise eelisteks on:

- 1) suur võimsus;
- 2) ühtlane kvaliteet;
- 3) väiksemad tööjõukulud;
- 4) väike värvikadu;
- 5) parem töökeskkond.

Enamlevinud pihustamisautomaatideks on traavers ja karusell tüüpi pihustamisautomaadid. Traaversite all mõeldakse seadmeid, mis liigutavad pihusteid lineaarselt püsiva kiirusega. Selle löögipikkust ja liikumiskiirust saab enamasti reguleerida. Pihustite kauguse reguleerimine on tavaliselt manuaalne. Traaversid jaotatakse tööasendi kohaselt püst- ja rõhtsuunalisteks traaversiteks. Püstsuunalisel traaversil on tavaliselt üks või kaks automaatset püstolit järjestikku. Nendega on tavaliselt ühendatud elektrostaatika. Liini kiirus on 1–3 meetrit minutis. Rõhtsuunalisel traaversil on enamasti neli pihustit ja liini kiirus 1,5–9 meetrit minutis. Karussellpihustites võib püstoleid olla kaksteist, millest pooled on kruntvärvi jaoks ja pooled viimistlusvärvi jaoks. Liini kiirus on samasugune nagu rõhtsuunalise traaversi korral.

5.8.6.8 Värvimisrobotid

Pihustusrobot on heaks lahenduseks kitsastes ruumides värvimiseks ning nendel juhtudel, kui tulemus peab olema väga kõrge kvaliteediga. Kaasajal on roboteid, mis valmistatakse spetsiaalselt värvimiseks. Pihustusrobotid on tavaliselt varustatud standardse programmeerimist hõlbustava manuaalse õppeprogrammiga. Tavaliselt programmeerib kogunud pihustaja robotisse teatud detaili parimaks värvimiseks sobiva programmi ning tarkvara salvestab selle. Robotit on võimalik vajadusel ümberprogrammeerida.

Tähtsaimateks kriteeriumiteks, millega arvestada, kui kaaluda värvimisroboti tehnikate kasutuselevõtmist on pihustrajektoori täpsus, töökoormuse taluvus ja jõudlus.

5.8.6.9 Kastmisvärvimine

Kastmismeetod on meetodina lihtne. Lõpptulemuses võib siiski esineda veidi valgumist ja tilkumiskohtades kuivanud värvipiisku. Värv viskoossus mõjutab oluliselt värvimise tulemust. Viskoossust tuleb jälgida iga päev. Vesialuselistel värvidel, mis tavaliselt sobivad suurepäraselt kastmisvärvimiseks, tuleb jälgida ka värvi pH taset. Meetodi headeks külgedeks on:

- 1) hea katvus;
- 2) kiirus;
- 3) sobib detailidele, mille värvimine pihustamisega ei ole võimalik;
- 4) vesialuselistel kastmisvärvidel on hea töökeskkond need reostavad keskkonda vähem
- 5) värvi kokkuhoid.

Meetodi halbadeks külgedeks on:

- 1) basseini suurus (suhteliselt suured) ja kasutatava värvi suur hulk;
- 2) värv vahetub liiga aeglaselt – hangumisrisk;
- 3) ühekordse kastmise tulemusena saavutatakse kihi paksus ainult 30–50 µm, ülaservides jääb kihi paksus väiksemaks ning koos detailidega võivad basseini sattuda ka mustus ja määrded;
- 4) detailidel ei tohi olla taskuid;
- 5) ei sobi kahekomponentsete värvide jaoks;
- 6) Väikesed ja kerged esemed ei upu basseini;

- 7) basseinis peab olema pidev ringlus vältimaks värvi settimist;
- 8) mõningatel juhtudel on vajalik värvi soojusvaheti ühtlase temperatuuri säilitamiseks.

5.8.6.10 Valamisvärvimine

Valamisvärvimine annab kastmisvärvimisega võrreldava lõpptulemuse. Valamisvärvimise korral on kasutatava värvi vahetumine piisavalt kiire. Värvi siirdamiseks ja laialikandmiseks kasutatakse pumpa, mille tootlus peab olema piisav. Lahustiga vedeldatavate värvide kasutamisel tuleb värvimiskoht eraldada muust töökeskkonnast õhuvahetuskambriga.

5.8.6.11 Pulbervärvimine

Pulbervärvimiseks on vajalikud märgade värvide värvimisseadmetest erinevad pulbri pealekandmise seadmed. Lisaks sellele vajavad pulbervärvid ahjus kõvastumiseks kuumutamist temperatuuril 150–200 °C.

Pulbervärvimisel kasutatakse pulbri elektrilaengut. Mööda pihustatud pulbri võib koguda kokku ja uuesti kasutada. Pulbervärvimise seadmed koosnevad pulbri mahutist, pulbri pumbast, juhtimispuhdist ja püstolist. Püstolid on kõrgepinge või hõõrdelaadimisega käsi- või automaatpüstolid. Pulbrimahutil on kaks ülesannet: värvi säilitamine ja värvi hoidmine kohevana. Pulbri kohevana hoidmiseks peab ringluses kasutatav suruõhk olema kuiv ja õlivaba, et pulber ei paakuks. Võrreldes muude värvimismeetoditega on pulbervärvimine investeringute mahu poolest kalleim. Soojuskuivatamine nõuab energiat ning ei sobi suuremõõtmeliste keerulise kujuga toodete jaoks ega toodetele, mida ei tohi soojendada. Eeliseks on täielik lahustite puudumine.

5.8.7 Värvimistingimused

Värvi tarnija annab juhendid värvimistingimuste kohta ja vastavalt neile tuleb teha värvitavate pindade eeltöötlemine ja värvimistöö. Värvimistingimusi mõjutavateks teguriteks on temperatuur ja niiskus. Need tegurid avaldavad mõju ka pärast värvimist, kui pind kuivab.

Niiskuse ja temperatuuri mõju. Õhu suhteline niiskus mõjutab erineval viisil erinevate värvitüüpide kuivamise ja kihi moodustumise omadusi. Üldiseks reegliks peetakse, et korrosioonikaitsevärvimise ja värvi kuivamise ajal peavad õhu, pinna ja värvi temperatuur ning suhteline niiskus olema samad või paremad, kui värvi tehnilistes andmetes antud värvimistingimuste minimaalsed näitajad. Lahustiga vedeldatavate värvide kasutamisel ei tohiks suhteline niiskus ületada 80%.

Vesilahuseliste värvidega värvimisel soovitatakse, et õhu suhteline niiskus peaks olema vahemikus 20–70%. Liiga kõrge niiskus aeglustab värvi kuivamist. Liiga madal suhteline niiskus võib tekitada pinnakahjustusi. Puhastel ja läikivatel metallpindadel kondenseerub veeaur niiskuseks kui õhu suhteline niiskus on 100%. Karedal ja ebapuhtal pinnal võib niiskuse kondenseerumine esineda, kui õhu suhteline niiskus on tunduvalt madalam. Pritspuhastatud terase pinna korrosioon algab 60–70%-lise õhu suhtelise niiskuse juures. Seepärast tuleb prits-

puhastada sellistes tingimustes, kus õhu suhteline niiskus on madal. Pritspuhastatud pind tuleb värvida kohe pärast puhastamist vältimaks pinna korrosiooni.

Juhul kui metalli pinna temperatuur on madalam kui ümbritseva õhu temperatuur, võib teatud tingimustes esineda kondenseerumist, olgugi et õhu suhteline niiskus on madal. Seetõttu on tähtis, et metalli pinna temperatuur on piisavalt (+ 3 °C) kõrgem õhu kondenseerumise punktist. Kondenseerumise punkt on temperatuur, milleni õhk peab jahtuma, et suhteline niiskus tõuseks 100%. Kui õhu temperatuur on alla 0 °C, tuleb kontrollida, et värvitava pinnal ei oleks jääd. Keskkonna niiskustingimusi võib parendada õhu soojendamise või kuivatamise teel.

Õhu temperatuur ja värvikihi moodustumine. Temperatuur avaldab olulist mõju värvi kuivamisajale ja kihi moodustumisele. Rusikareegliski on see, et mida kõrgem temperatuur, seda kiirem on kuivamine. Eriti märgatavalt kiireneb temperatuuri tõusu korral keemiliselt kuivavate värvide kuivamine.

Tähelepanu!

Värvides alküüdvärvidega paksemaid kihte või mitmekihilist süsteemi, on oht, et pealispind kuivab, kuid põhi mitte, eriti kui metall on jahe või tooted lükatakse peale värvimist päikese kätte. Vesialuselised värvid eeldavad tavaliselt temperatuuri vähemalt +10 °C kuni +15 °C, selleks et moodustuks korralik kiht. Ka liiga kõrge temperatuur võib tekitada probleeme.

5.8.8 Värvitüübid

Värvid koosnevad sideainetest, pigmentidest, lahustitest ja abiainetest. Värvide võib jaotada värvitüüpideks mitmel erineval viisil. Tavaliselt liigitatakse värve neis sisalduva sideaine või sideaine kuivamisaja alusel. Sideaine on tähtsaim värvi omadusi mõjutav tegur. Värvisüsteemi markeerimisel kasutatavad värvitüüpide tunnused ISO 12944 standardis on toodud allpool.

Värvi tüüp	Tunnus
Alküüdvärvid	AK
Akrüülvärvid	AY
Epoksüüdvärvid	EP
Kloorkautšukvärv	CR
Polüuretaanvärvid	PUR
Polüvinüülbutüraalvärvid	PVB
Silikoovärvid	SI
Tsinksilikaatvärvid	ESIZn(R)
Vinüülvärvid	PVC
Tsinkepoksüüdvärvid	EPZn(R)
Kivisöetõrva epoksüüdvärvid	CTE

Füüsikaliselt kuivavad värvid. Füüsikaliselt kuivavate värvide kiht moodustub lahustite haihtumisel, kui sideaine molekulid on üksteisele piisavalt lähedal. Kuivamine sõltub lahustite lendumiskiirusest ja kihi paksusest. Kuiv värvikiht lahustub uuesti oma lahustis ja pehmeneb soojuse mõjul. Vesialuseliste värvide kiht kuivab ka füüsikaliselt vee ja abilahustite haihtumisel, kuid pärast kuivamist kiht uuesti enam ei lahustu. Füüsikaliselt kuivavateks värvideks on näiteks kloorakautšuk-, vinüül- ja akrüülvärvid.

Keemiliselt kuivavad värvid. Keemiliselt kuivavate värvide kiht moodustub keemilises reaktsioonis, mille käigus vedelik, väikemolekulaarne sideaine kristalliseerub ja suureneb selle molekulide suurus. Kui värv sisaldab lahustit või vett, algab kuivamine nende haihtumisega. Kristalliseerunud värvikiht ei ole termoplastne ehk see ei pehmene soojuse mõjul. Värvikiht ei lahustu lahustites, kuid kui kristalliseerumise tase on madal, pundub värvikiht lahustite mõjul. Keemiliselt kuivavad värvid võib jaotada järgmiselt:

- 1) hapniku mõjul kuivavad värvid, mis kristalliseeruvad õhu hapniku toimel (alküüdid);
- 2) niiskuse mõjul kõvastuvad värvid, mille sideaine reageerib õhuniiskusega (niiskuskõvastuvad polüuretaanid ja etüül-tsinksilikaatvärvid);
- 3) kahekomponentsed värvid, milles värvi erinevate komponentide vahel toimub keemiline reaktsioon (epoksüüd, polüuretaan);
- 4) kuumvärvid, mis kristalliseeruvad kõrge temperatuuri juures sideaine omavahelise reaktsiooni tulemusel.

Vesialuselised värvid. Vesialuselistes värvides kasutatakse sama tüüpi vaike kui lahustipõhistes epoksüüd-, akrüül-, polüuretaan ja alküüdvärvides. Seetõttu tunduvad vesilahuseliste värvide omadused olevat sarnased vastavate lahustipõhiste värvide omadustega. Vesialuseliste värvide kasutamisel on lisaks keskkonnasõbralikkusele ka muid eeliseid võrreldes teiste värvitüüpidega: nende kasutamine vähendab tulekahju ja plahvatuseohtu ning parandab töökeskkonda; vett on võimalik kasutada nii vedeldina kui ka puhastamiseks lahusti asemel. Vesialuseliste toodete kasutamisel on ka mõned puudused. Nende kasutamisel ei tohi kaetaval pinnal olla õli ega määreid, seetõttu peab pind olema väga hästi puhastatud.

Alküüdvärvid. Alküüdid on polüestrid, mis sisaldavad taimsetest õlidest, näiteks linaõlist, sojaõlist, kastoorõlist või männi rasvhapest valmistatud rasvhappeid. Kuivavat õli (nagu lina- või sojaõli) või kuivavate õlide rasvhappeid (nagu männi rasvhape) sisaldavaid alküüde kasutatakse õhku kuivavates värvides. Mittekuivavatest õlidest valmistatud alküüde kasutatakse kuumvärvides. Alküüdvärvide kuivamisel lahustid haihtuvad ja sideaine reageerib õhu hapnikuga. Hapniku mõjul toimuv kuivamine nõuab aega ja alküüdvärvid saavutavad neile tüüpilised kaitseomadused kahe nädala pärast. Kuivamine aeglustub temperatuuri langemisel. Kihi moodustumine eeldab temperatuuri vähemalt +5 °C. Alküüdvärvide lahustina kasutatakse kõige sagedamini lakibensiini või ksüleeni.

Erinevate alküüdvärvide pealevärvitavus on erinev. Kui liiga vara üle värvida, võib kiht kortsu tõmbuda (tõstmisaeg) või kõige raskemal juhul aluse küljest lahti tulla. Ka lihvimine või liiga tugevad lahustid pinnavärvis võivad kutsuda esile alküüdvärvi pinna küljest lahtituleku.



Sele 5.115 Alkүүdvärv on tõmbunud kortsu, kuna ülevärvimise aeg on vale

Alkүүdvärvide tooteselgitustes tuuakse ära sobivad pealevärvimise ajad ja pinnavärvid. Ülevärvimise intervall on toodud tavaliselt 23 °C juures kuivale kihile umbes 40–60 µm. Tuleb arvestada, et kuivamistemperatuuri langus või kihi paksuse suurenemine pikendab pealevärvimise aega. Alkүүdvärvidel on hea ilmastiku- ja kulumiskindlus. Need on ühekomponentsed, neid on hea pihustada ja need on hinnalt soodsad. Need peavad suhteliselt hästi vastu temperatuuri, õli, vee ning kütuse pritsmete mõjule. Alkүүdvärvide vastupidavus leelistele ja hapetele on seevastu piiratud. Alkүүdvärve võib kasutada siseruumides kerge gaasi- ja kemikaalide koormuste tingimustes ning välisõhus linna-, tööstus- ja mereilmastikus.

Epoksüestrid ja uretaanalkүүdid on samuti hapniku mõjul kuivavad sideained, mis oma omadustelt meenutavad alkүүde. Nende kulumis- ja kemikaalikindlus on veidi parem kui alkүүdidel. Epoksüestereid kasutatakse tavaliselt ainult kruntvärvides. Alkүүdvärvide omadusi võib parendada ka näiteks vinüül-, fenool- või akrүүlsideainete abil.

Epoksүүdvärvid. Epoksүүdvärvid on kahekomponentsed värvid, milles värviosa sisaldab epoksүүdvaiku ja kõvendiosa polüamiini või polüamiidi, amiidi või amiiniadukti. Kõvendi valikuga võib reguleerida värvi omadusi. Tahket epoksүүdvaiku kasutatakse tavaliselt lahustiga vedeldatavates ja vedelat epoksүүdvaiku lahustivabades epoksүүdvärvides. Värviosa ja kõvendiosa segatakse teineteisega õiges suhtes. Pärast komponentide ühendamist on värvil piiratud kasutamisaeg, mille jooksul tuleks värv peale kanda enne, kui värvisegu muutub liiga paksuks. Keemilise reaktsiooni tulemusena saadakse kristalliseerunud värvikiht, mis ei lahustu lahustites ega pehmene temperatuuri mõjul. Epoksүүdvärvide kemikaali- ja kulumiskindlus on hea. Värvikiht on kõva ja elastne, nakkuvus metallpindadega on hea.

Lahustiga vedeldatud epoksүүdvärve kasutatakse kemikaalide koormuse ja mehaanilise koormuse alla sattuvatel metalli ja betoonpindadel koormuse klassides C2, C3, C4, C5-I ja C5-M vastavalt standardile ISO 12944. UV-kiirgusega (päikesepaistega) kokku puutudes võivad epoksүүdvärvid n-õ kriidistuda. See tähendab, et nad muutuvad matiks ja kaotavad värvi. Vaatamata sellele kasutatakse neid värve sageli välistingimustes ja agressiivsetes keemilistes keskkondades. Värvitoon peab välistingimustes olema selline, et kriidistumise efekt oleks minimaalne.

Epoksüüdvärve võib modifitseerida erinevaks otstarbeks. Varem kasutati modifitseerimiseks tavaliselt kivisöetõrva, kuid praegu on selle kasutamisest loobutud tööohutuse tõttu ja kasutatakse selleks sobivaid vaike.

Polüuretaanvärvid. Kahekomponentsete polüuretaanvärvide baasiks on tavaliselt polüester-, akrüül-, polüester- või epoksüüdvaik, mis sisaldab hüdroksürühmi. Kõvendi osa koosneb aroomaatsest või alifaatsest isotsüanaadist, mis värvi osaga reageerimisel moodustab polüuretaani. Värv ja kõvendi segamise järgselt on värv piiratud kasutamisajaga (*pot-life*). Värv omadusi reguleeritakse komponentide valiku abil. Alifaatset kõvendit kasutades saadakse ilmastikukindlad ja mittekolletuvad värvid. Aroomaatseid kõvendeid kasutatakse ainult sise- ja välisobjektidel. Polüuretaanvärvid on kemikaalikiindlad. Neid kasutatakse tavaliselt pinnavärvina kõigi ilmastikukoormuste korral.

Polüuretaanvärv moodustab läiget ja värvitooni säilitava, kergelt puhastatava, kriidistumatu pinna. Neid kasutatakse tihti epoksüüdsüsteemide pinnavärvidega näiteks mahutite välispindade, terasmastide, transpordivahendite, teraskonstruktsioonide ning masinate ja seadmete värvimiseks.

Akrüülvärvid. Lahustipõhiseid akrüülvärve kasutatakse kloorikautšuk- ja vinüülvärvide asendamiseks sel juhul, kui soovitakse vältida klooritud sideaineid sisaldavate värvide kasutamist. Akrüülvärvid on vastupidavuse ja värvimisomaduste poolest kloorikautšukvärvidega samal tasemel. Akrüülvärve kasutatakse mahutite, torustike, sildade jm ilmastikukoormuse all olevate teraskonstruktsioonide värvimiseks.

Tsinkvärvid. Tsinki sisaldavateks värvideks nimetatakse värve, mille kuivainesisaldusest üle 75 kaaluprotsendi on tsinkpulber. Erinevates standardites on erinevad tsingi sisalduse nõuded 75–90 kaaluprotsenti. Tsinkvärvi kiht kaitseb terast katoodselt. Selle sideaineks võib olla näiteks epoksüüdvaik, alküülsilikaat või mingi füüsikaliselt kuivav vaik. Sideaine vaik on tähtis, kuna tsinkvärvide kõvadus, elastsus ja nakkuvus alusega ning pealevärvitavus määratakse peamiselt sideaine järgi.

Tsinksilikaatvärvid on kahekomponentsed värvid, mille sideaineks on kas etüül- või leelissilikaat. Etüülsilikaatvärvid on lahustiga vedeldatavad ja leelissilikaatvärvid on vesialuselised värvid. Etüülsilikaatvärve kasutatakse laiemalt. Etüülsilikaatvärvid kõvastuvad õhuniiskuse mõjul, seega õhu suhteline niiskus peab olema suhteliselt kõrge (u 80%). Etüülsilikaatvärve võib kasutada ka madala temperatuuri juures. Etüülsilikaatvärve kasutatakse lahustikiindlatel objektidel ning pinnavärvina välisilmastiku koormuse tingimustes.

Silikoonvärvid. Silikoonvärvide sideainena kasutatakse silikoonvaike. Värvikihi moodustumine eeldab temperatuuri vähemalt +5°C ja lõplik kuivamine toimub alles temperatuuril 200–230°C. Silikoonvärve kasutatakse ilmastikukindlate pinnavärvidega ja alumiiniumiga pigmenteeritult kuumade pindade värvimiseks. Silikoonkuumvärve võib kasutada linna-, mere- ja tööstusilmastikus.

Puhas silikoonvärv talub kuiva temperatuuri +650°C ja kantuna tsinksilikaatkrundi peale +400°C. Silikoonvärve kasutatakse metallpindade värvimiseks sise- ja välistingimustes, kui

soovitakse kuumuskindlat värvi, näiteks saunakerised, tulepesade luugid, suitsutorud ja väljalasketorud. Silikoonvärve valmistatakse erinevates värvitoonides, kuid toonide valik on piiratud.

Tehnoloogilised kruntvärvid. Need on tavaliselt kahekomponentsed värvid, mis baseeruvad epoksüüd- ja silikaatvaigul. Kasutatakse enamasti metallpindade ajutiseks kaitsmiseks.

Tulekaitsevärvid. Tulekaitsevärve kasutatakse selleks, et vähendada värvitud pinna süttivust ja tule levikut. Teraskonstruksioonide tulekaitsevärvimine aeglustab terase kuumenemist ja samal ajal selle tugevusomaduste nõrgenemist kuumuse mõjul. Ehitise osad jaotatakse tulekindluse aja alusel klassidesse R30, R60, R90 jne sõltuvalt objektist. Tulekaitsevärvidega on võimalik saavutada tulekindluse klass kuni R90. Tulekaitsevärvid on tavaliselt vahutavad värvid, mis kuumuse mõjul paisuvad ja moodustavad kaitsva ja isoleeriva poorse kihi. Tulekahju korral paisub värv kuni 50 korda. Tulekaitsevärvid võivad olla lahustipõhised, vesialuselised ning lahustivabad. Tulekaitsevärve kasutatakse kuivades siseruumides süsteemidena, millesse kuuluvad pritspuhastus eeltötlusastmeni Sa 2½, kruntvärvimine kinnitatud kruntvärvi, tulekaitsevärvimine ning pinnavärvimine.

Tulekaitsevärvi kuiva kihi paksus (tavaliselt 0,5–3 mm) määratakse konstruktsiooni kriitilise temperatuuri, ristlõikeketguri ja nõutava tulekindlusklassi alusel.

Pulbervärvid. Pulbervärvid on pulbri vormis olevad värvid. Sideainena võib keemiliselt kuivavates pulbervärvides kasutada epoksüüd-, polüester-, akrüül- ja polüuretaanvaiku. Pulbervärve kasutatakse eelkõige metallitööstuses toodete värvimiseks. Tüüpilisteks kasutamiskohtadeks on valgustid, kodumasinad, mööbel ja jalgrattad. Pulbervärvidega värvitakse tavaliselt elektrostaatilise pulbripihusti abil. Pulber nakkub maandatud värvitava detaili pinnale. Lõplik kiht moodustub keemilise reaktsiooni tulemusena umbes 150–200°C temperatuuril juures. Pulbervärvimine annab poorideta, mehaanilisele ja keemilisele koormusele vastu pidava pinna.

5.8.9 Lahustid ja vedeldid

Lahusti ülesandeks värv on lahustada sideaine ja muuta värv hõlpsalt värvitavaks; niisutada värvitavat alust ja aidata kaasa võimalikult veatu värvikihi tekkele.

Lahustite tüübid. Lahustid võib jaotada keemiliste omaduste ja päritolu järgi erinevatesse klassidesse. Näiteks toornafta alusel valmistatud alifaatsed ja aromaatsed lahustid, hapnikku sisaldavad lahustid, nagu ketoonid, alkoholid, estrid ning vesi. Samasse alagruppi kuuluvad lahustid on lahustamisvõime poolest võrdlemisi sarnased, kuid erinevusi on näiteks lendumiskiiruse osas.

Lahustamisvõime. Lahusti sideaine ehk vaigu lahustamisvõime on tähtis omadus. Erinevat tüüpi sideained lahustuvad erinevates lahustites erineval viisil. Õlid ja õli baasil valmistatud alküüdvaigud lahustuvad hästi alifaatsetes süsivesinikes, näiteks lakibensiinis. Kiiresti kuivavates kergõlist valmistatud alküüdides kasutatakse ksüleenit, sest lakibensiini lahustamisvõime ei ole piisav.

Epoksüüdvärvides on vajalikud alkoholide, eetrite, ketoonide ja aromaatsete lahustite segud, mille kasutamisel üksikuna epoksüüdväigud lahustuvad võrdlemisi halvasti. Sobivates segudes lahustuvad need hästi. Polüuretaanvärve vedeldatakse samuti segudega, sest aromaatsed lahustid ei lahusta piisavalt. Tavaliselt kasutatakse lahustina estreid. Alkohole ei saa kasutada, sest polüuretaanvärvide kõvendid reageerivad alkoholides sisalduvate hüdroksüülrühmadega ja nõrgendavad värvikihtide omadusi ning mõjutavad värvi kasutamisaega (*pot life*).

Aurustumine. Lahusti teiseks tähtsaks omaduseks on aurustumine. Lahusti aurustumisomadused mõjutavad värvikihi värvimisomadusi: kihi moodustumist, tasandumist, valguvust ja kuivamist. Aurustumist väljendatakse suhtarvuna, milles võrdlusaine (butüülatsetaadi) võrdlusnäitaja on 1. Lahusti aurustumine on proportsionaalne keemispunktiga, ehk mida madalam on keemispunkt, seda tugevam on aurustumine. Lahusti osa värvitootes on hea lõpptulemuse saavutamiseks väga tähtis. Erinevatele värvitüüpidele sobib erinev lahustisegu. Segu põhiosa on lahus, milles vaik kõige paremini lahustub ja ülejäänud lahustid annavad näiteks head pihustamisomadused. Pihustusvärvimisel aurustub osa lahustitest värvipüstoli ja värvitava objekti vahel, kuid värvikihti jääv lahusti segu peab siiski olema selline, et ei tekiks kihi moodustumise defekte (näiteks apelsinikoore pind) ega kuivamise defekte. Juhul kui värvikihi pind kuivab liiga kiiresti ja takistab kihis sisalduvate muude lahustite aurustumist, võib juhtuda, et värvikiht kortsus. Kui lahusti segu aurustub liiga aeglaselt, hakkab värv kergesti volama. Liiga kiire lendumise tõttu ei jõua värvi pind tasanduda, vaid jääb ebatasaseks.

Vesi. Vett kasutatakse vedeldina emulsioon-, dispersioon- ja vesialuselistes värvides. Keskkonnatingimused, õhu suhteline niiskus ja temperatuur mõjutavad märgatavalt rohkem vee lendumiskiirust võrreldes muude lahustitega. Lisaks sellele on vee pindpinevus kõrge ja seetõttu niisutavad vesivedeldiga värvid halvasti värvitavat alust.

Süttivus. Lahustite tuleohtlikkus piirab nende kasutamist, ladustamist ja transporti. Põlevad vedelikud klassifitseeritakse nende süttivuse alusel erinevatesse süttivusklassidesse. Süttivusklassid on ohtlike veoste transpordiklassifikatsiooni alusel järgmised: 1) väga tuleohtlikud (süttimistemperatuur mitte üle 0 °C ja keemispunkt alla 35 °C); 2) kergesti süttivad (süttimistemperatuur <23 °C); 3) süttivad (süttimistemperatuur 23–61 °C).

Tuleohtlike lahustitega töötamisel tuleb alati hoolitseda selle eest, et värvimisseadmed ja värvianumad oleksid hoolikalt maandatud.

5.8.10 Korrosioonikaitsevärvimise kulud ja ökonoomsus

Korrosioonikaitsesüsteemide kasutamine on kulukas. Korrosioonikaitsesüsteemide mitte kasutamine on veelgi kallim. Kõige kulukam on siiski halvasti teostatud korrosioonikaitse. Sellisel juhul makstakse suuri summasid töö ja materjalide eest, kuid investeeringust ei ole kasu. Mitmetel juhtudel on konstruktsiooni uuesti värvimine paigaldamiskohal mitu korda kallim kui algupärane pinna korralik töötlemine. Mida pikem on kaitstava konstruktsiooni kasutamisaeg ja mida raskem on selle hooldusvärvimine, seda rohkem tasub investeerida uue konstruktsiooni pinnatöötlusesse.

Korrosioonikaitsevärvimise süsteemi valimisel tuleb arvestada konstruktsiooni kogu eluea jooksul tehtavate hooldusvärvimiste kulusid. Esialgu kulukamana tunduv lahendus võib lõppkokkuvõttes osutuda kõige ökonoomsemaks. Värvimise kulud suurenevad töö erinevatel etappidel. Kulud koosnevad otsestest, kaudsetest ja ettearvamatutest kuludest. Otsesteks korrosioonikaitsevärvimisega seotud kuludeks on:

- 1) pinna eeltöötlus (töö, puhastamisseadmed ja -materjalid jne);
- 2) värvid, vedeldid, töövahendid ja keskkonnakaitse vajadused töö ajal;
- 3) palgad;
- 4) tööde juhtimine;
- 5) kindlustused ja garantii;
- 6) järelevalve;
- 7) haldus;
- 8) värvimistöökoda.

Eespool loetletud kuludest raskemini arvatavad on kaudsed kulud. Nendeks on:

- 1) värvimistingimuste loomine (õhuvahetus, niiskuse eemaldamise ja kütte vajadus);
- 2) tellingute, töökaitse-, transpordi- ja teisaldamiskulud;
- 3) valmispindade järgnev remontimine ehk kohtvärvimised.

Ettearvamatuid kulusid võivad põhjustada:

- 1) värvimistöö katkestamine (halb ilm, hilinemised jne);
- 2) halvasti või valesti tehtud töö või defektidega materjal, mis põhjustab uuesti värvimise;
- 3) tootmise seisak.

Värvimiskoht ja -viis mõjutavad värvimise kulusid ja töö kvaliteeti. Värvimistöokojas on värvimine tavaliselt odavam ja kvaliteetsem kui välistingimustes. Sageli on kombeks teha eeltöötlamine ja kruntvärvimine töökojas, defektide parandamine ja lõplik värvimine aga paigaldamiskohal. Sellisel juhul moodustuvad kulud värvimistöokoja kulude ja paigaldamiskoha kulude keskmisest.

Arvutused ja valemid. Kui räägitakse liitrihinnast, siis kahekomponentsete (2K) toodete hinnad arvutatakse praktikas seosliitri hinnaga. (värvi ja kõvendi segu).

Teoreetiline katvus: ühe liitri värviga, mille kuivaine (VS) sisaldus on 100%, saab katta 1000 m² kuivkihipaksusega 1 µm.

Märja kihi arvutamine. Palju tuleb pihustada värvi, et jääks soovitud kiht kuivanud värvi:

$$\text{märja kihi paksus (WFT)} = \frac{\text{kuiva värvikihi paksus } \mu\text{m} \times 100}{\text{värvi kuivainesisaldus}}$$

Näide

Kuiva kihi paksus peab olema 100 µm

Kuivaine sisaldus on 50%

$$\frac{100 \mu\text{m} \times 100}{50} = \text{WFT } 200 \mu\text{m}$$

50

Kuiva värvikihi arvutamine (DFT) mõõtes märga kihti:

$$DFT = \frac{WFT \text{ } \mu\text{m} \times \text{värvi kuivainesisaldus}}{100}$$

Lahusti lisamine

$$\frac{\text{kuiva värvikihi paksus } \mu\text{m} \times (100 + \text{lahusti } \%)}{\text{värvi kuivainesisaldus}} = \text{märga kihi paksus (WFT)}$$

Teoreetiline värvikulu valem L/m²

$$VS \times 10 : DFT \text{ } \mu\text{m} = \text{m}^2 / 1\text{L värviga}$$

Praktiline värvi kulu valem L/m²

$$\text{teoreetiline kulu} \times \{(100 - \text{kao } \%)\} : 100\%$$

Kilogrammi hinna ja liitri hinna vahe

$$\text{Kilogrammi hind} \times \text{tihedus (erikaal)} = \text{liitrihind}$$

Korrosioonikaitse tegelik hind ei ole teada isegi veel siis, kui värvimistöö on tehtud. Tegelikke kogukulusid võib hinnata alles hooldusvärvimise etapil. Värvisüsteemi eluea jooksul on otustav tähtsus värvimise ökonoomsusel. Värvisüsteemi elukaart võivad muuhulgas mõjutada:

- 1) konstruktsiooni vorm;
- 2) värvisüsteemid;
- 3) aja- ja töö planeerimise ratsionaliseerimine;
- 4) täpsed lepingud;
- 5) oskusliku personali kasutamine;
- 6) õigesti planeeritud ja korraldatud kvaliteedikontroll.

Kordamisküsimused ja ülesanded

1. Millist keevitusprotsessi võib pidada enamlevinuks ja miks?
2. Millised kaarkeevitusprotsessid on hästi robotiseeritavad?
3. Mida mõistetakse hübriidkeevituse all?
4. Kuidas vähendada keevitamisel tekkivaid pritsmeid? Miks see on oluline?
5. Milliste meetmetega saab parandada keevitamise tootlikkust?
2. Milline tööriist määrab augustamisel ava läbimõõdu lõikestantsimisel?
3. Milline tööriist määrab kontuuri stantsimisel toote välismõõtme lõikestantsimisel?
4. Kui suur on optimaalne templi ja matriitsi vaheline lõtk tavastantsimisel?
5. Kui suur on optimaalne templi ja matriitsi vaheline lõtk silelõikestantsimisel?
6. Mis eristab silelõikestantsimist tavastantsimisest?
7. Millise ajamiga presse kasutatakse silelõikestantsimisel?
8. Mille poolest erineb vaba painutamine fikseeritud painutamisest?
9. Milliseid lõikeprotsesse kasutatakse lehtmaterjali tükeldamiseks?
10. Milline lõikemeetod tagab suurima tootlikkuse?
11. Milline lõikemeetod tagab parima täpsuse?
12. Mis on kaks konstruktsioonist sõltuvat ja koostamisprotsessi kõige enam mõjutavat tegurit?
13. Mis on järjestikkoostamise puudused ja eelised?
14. Mis on paralleelse koostamise eelised ja puudused?
15. Kas liite lahtivõetavus suurendab või vähendab toote töökindluse näitajaid?
16. Millistel juhtudel on tootesse paigutatavat detaili keeruline käsitseda (haarata, eraldada, orienteerida, liigutada)?
17. Milline on põhimõtteline erinevus kihtlisandustehnoloogiate ja CNC-freesimise vahel?
18. Milliseid materjale saab kasutada kihtlisandustehnoloogia puhul?
19. Mis piirab materjali valiku kihtlisandustehnoloogia puhul?
20. Mille poolest on CNC-freesimine parem kui kihtlisandustehnoloogiad?
21. Kuidas toimub kihtlisandustehnoloogia puhul töötlusprogrammi (NC-koodi) koostamine?
22. Mis on kihtlisandustehnoloogiate põhitüübid?
23. Millisel tööpõhimõttel toimivat protsessi kasutatakse põhiliselt metallist detailide valmistamiseks?
24. Millised on pulbriosakeste liitmisel põhinevad protsessid?
25. Millised on olulisemad kriteeriumid kihtlisandustehnoloogia valikul?

26. Mis on peamised aspektid, mida tuleks silmas pidada kihtlisandustehnoloogiaga valmistatavate toodete projekteerimisel? Mis mõjutab atmosfäärkorrosiooni kiirust?
27. Mis teguritega tuleb arvestada värvimissüsteemi valikul?
28. Metallpinna eeltöötlusastad on St2, Sa2, St3. Milline neist tagab parima puhtuse?
29. Värvimistingimused: lahustiga vedeldatavate värvide kasutamisel ei tohiks suhteline niiskus ületada a) 60%, b) 70%, c) 80%?
30. Kumb värvitüüp talub paremini kemikaale a) alküüd või b) epoksiid?
31. Lisaülesanded:
32. Leidke internetist, mis on kolm kõige enamkasutatavat kihtlisandustehnoloogiat lõpptoodete valmistamisel.
33. Millised tootmisprotsessi osad nende tehnoloogiate puhul pole seni automatiseeritud? Miks?
34. Leidke internetist vähemalt kolm näidet, kus kihtlisandust kasutatakse vormi, kokkusobimise ja funktsioneerimise kontrollimiseks.
35. Mis on põhilised takistused ALT-i laiemaks kasutuselevõtuks autotööstuses ja kodukasutuses?
36. Milline andmevahetusformaad on ALT-süsteemides hetkel kõige levinum?
37. Milliste võimalustega oleks ideaalne ALT protsess? Mis on takistused, et seda seni saavutatud pole?

Viited

- [5.1] Alting, L. Manufacturing Engineering Processes. New York, 1994.
- [5.2] Dallas, D. B. Tool and Manufacturing Engineers Handbook. SME, 1976.
- [5.3] Ostapenko, N., Kravivnitski, N. Metallide tehnoloogia. Tallinn, 1975.
- [5.4] Kutz, M. Mechanical Engineers' Handbook. 3rd Edition. 2006.
- [5.5] Zandin, K. Maynard's Industrial Engineering Handbook. 5th Edition. 2001.
- [5.6] Cotell, C., Sprague, J. ASM Handbook. Volume 5. Surface Engineering. ASM International 1994.
- [5.7] Groover, M. P. Principles of modern manufacturing. 4th Edition. 2011.
- [5.8] Goecke, S. F. Low Energy Arc Joining Process for Materials Sensitive to Heat, EWM Mündersbach, Germany, <http://www1.ewm.de/content/application/x-pdf/WM031801.pdf> (28. september 2010)
- [5.9] CMT: The new revolution in digital GMA welding, http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-522601AB-AC5C4C36/fronius_international/hs.xsl/79_1997_ENG_HTML.html (27. september 2010)
- [5.10] CP (Cold Process) welding, http://www.cloos.de/uk/welding-processes/CP_Cold_Process_welding.php (28. september 2010)
- [5.11] Miller Electric Mfg. Co, Miller's New, Software-Driven Rmd™ Process Overcomes Short Circuit Mig Limitations, http://www.millerwelds.com/about/news_releases/2004_archive/articles82.html (27. september 2010)
- [5.12] Lincoln Electric, Surface Tension Transfer, <http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/nx220.pdf> (27. september 2010)
- [5.13] Uusitalo, J., Peltola, T., Kumpulainen, J., Veikkolainen, M. Novel tailored welding arcs help welders meet quality and productivity demands, Kemppi Oy, 2009.
- [5.14] Barkhoff, J. R., Total Welding Management, American Welding Society, 2006, Vol 5.
- [5.15] Boekholt, R. 1996. Welding mechanization and automation in shipbuilding worldwide. International Consultants for Welding Engineering and Technology (ICWET). Abington Publishing. Cambridge, England. 243 p.
- [5.16] Malin, V. 1985. Designer's Guide to Effective Welding Automation, Part I: Analysis of Welding Operations as Objects for Automation. Welding Journal Volume 64, November, 1985; pp. 17-26.
- [5.17] Sugitani, Y. 1996. General Review of Automation Technology of Arc Welding. In: Ushio, M. et al: Automation Technology of Arc Welding. Technical Commission of Welding Processes. Japan Welding Society. IIW Doc. XII-1471-96. 252 p.
- [5.18] Salkinoja, H. 2010. Optimizing of intelligence level in welding. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 362, Diss. Lappeenranta University of Technology.
- [5.19] Anon. 1991. The case of automation in the fabrication shop. Welding & Metal Fabrication. June 1991. pp 231-236.
- [5.20] <http://www.cheresources.com/injector1.gif>
- [5.21] <http://www.bpf.co.uk/>

- [5.22] Harper, C. A. Handbook of Plastic Processes. Wiley-Interscience, 2006.
- [5.23] http://www.plast.ee/page.php?page_id=43
- [5.24] Berins, M. L. Plastics Engineering Handbook. Fifth Edition. 1991.
- [5.25] <http://www.plasticstech.info/equipment/blow-molding-machine/blow-molding-machine.jpg>
- [5.26] <http://www.blowmachines.com/kbase.htm>
- [5.27] http://www.petmachine.in/type_of_blow_moulding.htm
- [5.28] Strong, A. B. Plastics materials and processing. Second Edition. Prentice Hall, New Jersey 2000.
- [5.29] Hosseini, H., Berdyshev, V. B., Mehrabani-Zeinabad, A. A Solution for Warpage in Polymeric Products by Plug-Assisted Thermoforming. European Polymer Journal, Vol. 42, Issue 8, 2006.
- [5.30] Rubin, I. I. Handbook of Plastic Materials and Technology. Robinson. Plastics Corporation, New York, 1990.
- [5.31] <http://www.engineersedge.com/manufacturing/dip-molding-coating.htm>
- [5.32] http://www.engineersedge.com/technology_news/posts/14.html
- [5.33] <http://www.plasticstech.info/processes/extrusion/blown-film-extrusion/>
- [5.34] ASM Handbook. Volume 14 B. Sheet Forming. Materials Park. Ohio, 2006.
- [5.35] Smith, D. A. Die Design Handbook. Dearborn, Michigan, 1990.
- [5.36] ASM Handbook. Volume 14. Forming and Forging. Materials Park. Ohio, 1998.
- [5.37] Cold Forming and Fineblanking. A Handbook on Cold Processing, Steel Material Properties, Component Design. Feintool Technologie AG Lyss, 2007.
- [5.38] Metal Forming Handbook. Schuler. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [5.39] Ion, J. C. Laser Processing of Engineering Materials. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [5.40] Alting, L. Manufacturing Engineering Processes. New York, 1994.
- [5.41] Dallas, D. B. Tool and Manufacturing Engineers' Handbook. SME, 1976.
- [5.42] Ostapenko, N., Krapivnitski, N. Metallide tehnoloogia. Tallinn, 1975.
- [5.43] Kutz, M. Mechanical Engineers' Handbook. Third Edition. 2006.
- [5.44] Poluhhin, P. I., Grinberg, B. G. Metallide tehnoloogia. Tallinn, 1969.
- [5.45] Veilleux, F. R. Tool and Manufacturing Engineers' Handbook. Volume 3. Materials, Finishing and Coating. SME, 1985.
- [5.46] Cotell, C. Sprague, J. ASM Handbook. Volume 5. Surface Engineering. ASM International, 1994.
- [5.47] Degarmo, E. P., Black, J. T. Kohser, R. A. Materials and Processes in Manufacturing (9th ed.). 2003p.
- [5.48] Vällo, A. Eritöötlusviisid. TTÜ. Tallinn, 1994.
- [5.49] <http://www.galvanizeit.org/aga/inspection-course/galvanizing-process>
- [5.50] Delstar Metal Finishing Inc. Electropolishing. Houston, Texas, 1998.
- [5.51] Vällo, A. Eritöötlusviisid. TTÜ. 1965. 72 lk.
- [5.52] Handbook of Manufacturing Engineering. Walker, J. M. (editor). New York: Marcel Dekker, 1996.
- [5.53] Design for Assembly. Redford, A., Chal, J. London: McGraw-Hill Book Company, 1994.

- [5.54] Mechanical Assemblies. Whitney, D. E. New York, Oxford: Oxford University Press, 2004.
- [5.55] Mesila, R. (koost.). Tootmistehnoloogia. Loengute abimaterjalid. Koostamisprotsesside iseloomustus. Tallinn, 2014. lk. 41-61.
- [5.56] Manufacturing Assembly Handbook. Lotter, B. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1986.
- [5.57] <http://info.zentech.com/blog/bid/246390/The-Difference-Between-Through-Hole-And-Surface-Mounted-Technology> (12.06.2016)
- [5.58] http://users.encs.concordia.ca/~ymzhang/courses/reliability/_ICSE02Knight.pdf. Safety Critical Systems: Challenges and Directions, Knight, J. (13.06.2016)
- [5.59] Product Design for Manufacture and Assembly. Boothroyd, G. Marcel Dekker, Inc. New York, Basel, 1994.
- [5.60] Standard ASTM F2792-12a, ASTM International.
- [5.61] Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer, 2010.
- [5.62] Standard ISO/ASTM 52915:2013(E), ISO/ASTM International.
- [5.63] Bartalo, P. J. et al (ed.). Virtual and Rapid Manufacturing. Taylor & Francis, 2008.
- [5.64] Crandell, T. M. CNC Machining and Programming: An Introduction. Industrial Press Inc., 2003.
- [5.65] Fitzpatrick, M. Machining and CNC Technology. Boston: McGraw-Hill, 2005.
- [5.67] <http://carbon3d.com> (Seadmevalmistaja Carbon3D, Inc. veebisait)
- [5.68] <http://us.dmgmori.com/products/lasertec/lasertec-additivemanufacturing/lasertec-65-3d> (Seadmevalmistaja DMG MORI COMPANY LIMITED veebisait)
- [5.69] Industrial coating of metal surfaces, Tikk Tikkurila Oyj, Industry, 3rd ed., 2011.

6. TOOTMISTEHNOLLOOGIA

6.1 Põhimõisted

6.1.1 Tehnoloogilisus

Tehnoloogilisust vaadeldakse kui toote konstruktsiooni omaduste kogumit, mis iseloomustavad toote kvaliteedi üht või mitut näitajat.

Tehnoloogilisuse liigid määratakse valdkonnaga, kus toote konstruktsiooni tehnoloogilisuse omadused ilmnevad.

- 1) Tootmisega seotud tehnoloogilisus – avaldub kulutuste ja aja vähenemises:
 - tootmise konstruktiivsele ettevalmistamisele (TKE);
 - tootmise tehnoloogilisele ettevalmistusele (TTE);
 - tootmisprotsessile:
 - detailide töötlemisel;
 - toote koostamisel.
- 2) Eksploatatsiooniline tehnoloogilisus – avaldub aja ja kulutuste vähenemisel toote eksploatatsioonis, tehnilisel teenindamisel ja remondil.

Tehnoloogilisuse hindamine võib toimuda kahel erineval viisil:

- 1) kvalitatiivne – iseloomustab tehnoloogilisust üldistatult, sageli subjektiivsete hinnangutega (hea-halb, sobib-ei sobi). Kvalitatiivne konstruktsiooni variantide hindamine eelneb kvantitatiivsele ja määrab sageli ära viimase otstarbekuse;
- 2) kvantitatiivne – tehnoloogilisuse baasnäitajad, mille väärtus reglementeeritakse kohustuslikus korras ka tehnilises ülesandes või muus direktiivses dokumendis; näitajad, mis saavutatakse toote konstruktsiooni tehnoloogilisustamise protsessi käigus; toote konstruktsiooni tehnoloogilisuse taseme näitajad, mille väärtused on toodud dokumentides ja mis tingivad või mõjutavad tootmist ja valmistusprotsesse.

6.1.2 Tehnoloogilisuse põhinäitajad:

- 1) valmistamise töömahukus;
- 2) tehnoloogilisuse tase valmistamise töömahu järgi;
- 3) tehnoloogiline tase omahinna järgi;
- 4) tehnoloogiline omahind;
- 5) töömahukuse tehnilis-majanduslikud näitajad;
- 6) ettevalmistuse suhteline töömahukus;
- 7) valmistusprotsessi suhteline töömahukus;
- 8) konstruktsiooni unifitseerimise näitajad;
- 9) tüüpotsesside kasutamise näitaja;
- 10) materjalide kulu hindamine.

6.1.3 Toote kvaliteedi näitajad

Toote kvaliteedi all mõistetakse kasutamisenäitajaid komplekselt iseloomustavate omaduste kogumit, mis väljendab toote kasutamiskõlblikkust, nagu võimsus, kasutegur, tootlikkus, majanduslikkus, töö täpsus jt toote valmistamise, kasutamise ja remondiga seotud näitajaid. Detailide valmistamisel on äärmiselt olulised ja raskesti saavutatavad **täpsus ja pinnakvaliteet**.

Üldiseks hindamiseks kasutatakse ka mõisteid töökindlus, tööiga, tõrketus, vahetatavus, transporditavus, standardiseerimise ja unifitseerimise tase, kasutamise ohutus, töömahukus, remonditavus.

Töökindlus on toote omadus säilitada ajas ettenähtud töövõime (kasutusnäitajad). Töökindlus on toote kvaliteedi peamine näitaja, koosnedes reast üksiknäitajatest, nagu tööiga, tõrketus, remonditavus jt.

Tööiga – tööaeg kuni tõrkeni.

Tõrge – töövõime katkemine või rikkumine.

Töökindlust hinnatakse koefitsiendiga K_T :

$$K_T = T : (T+T_r), \text{ kus}$$

T – tööiga;

T_r – remondiaeg, s.o aeg töövõime taastamiseks.

Need näitajad sõltuvad järgmistest parameetritest:

- funktsionaalsetest ja geomeetristest parameetritest (mõõtmed, kuju, ühenduse iseloom jt), nende täpsusest ja detailide pinnakvaliteedist;
- mehaanilistest parameetritest (staatiline tugevus, väsimustugevus, kulumiskindlus jne);
- keemilistest, elektromagnetilistest jt parameetritest, mille optimaalsete suuruste (tehnilis-majanduslikust seisukohast) saavutamine samatüübilistel toodetel ongi kvaliteedi juhtimise süsteemi sisu.

Toote kvaliteeti hinnatakse kvantitatiivsete näitajatega, mis võivad olla:

- üksiknäitaja, mis iseloomustab mingit ühte omadust;
- kompleksnäitaja, mis iseloomustab mitut omadust korraga.

Toote kvaliteedi hindamisel kasutatavad näitajad jagatakse:

- baasnäitaja – parim analoog (kodu- või välismaine);
- suhteline näitaja – konkreetse näitaja suhe sama liiki baasnäitajasse;
- määrav näitaja – mille järgi otsustatakse kvaliteeti hinnata;
- grupinäitaja – näitaja grupi kohta.

Toote kvaliteedi määramiseks kasutatakse järgnevaid meetodeid:

- mõõtmise meetod (tehniliste mõõtevahendite abil);
- registreerimise meetod (baseerub info registreerimisel);
- arvutuslik meetod (teoreetiliste ja eksperimentaalsete sõltuvuste abil);
- organoleptiline meetod (inimorganite taju kaudu kogutud info abil).

Toote kvaliteedi hindamise tase on otsuste tegemise aluseks kvaliteedijuhtimise süsteemides.

6.1.3.1 Toorikute ja detailide pinnakvaliteet

Pinna kvaliteeti iseloomustavad tema geomeetrilised ja füüsikalis-mehaanilised parameetrid.

1) Geomeetrilised parameetrid.

- **Pinna lainelisus.**

Lainelisus lõiketöötlemisel tekib:

- vibratsioonidest;
- lõikeprotsessi ebaühtlusest;
- pingi ülekannete ebaühtlusest;
- mitmesugustel põhjustel tekkivast töödeldava materjali ebaühtlasest plastsest deformatsioonist.

Lainelisuse iseloomust sõltub liitepindade faktiline kontaktpinna suurus, millest omakorda sõltub kulumise intensiivsus, pressliidete tugevus ja hermeetilisus.

- **Pinnakaredus.**

ISO standard jagab need parameetrid kolme gruppi:

- **amplituudparameetrid** (pinnale vertikaalsuunas);
 - R_z – viie konaruse maksimaalse tipu ja minimaalse põhja amplituudi aritmeetiline keskmine;
 - R_a – profiili keskmine aritmeetiline kõrvalekalle keskjoonest;
- **distantsparameetrid** (pinnale horisontaalsuunas);
 - S_m – konaruste tippude keskmine samm keskjoonel;
 - t_p – suhteline tugipinna pikkus tipust sügavusel p ;
- **hübriidparameetrid** (eelnimetatute kombinatsioon).
- **Pinna kuju (makrogeomeetria)**. Kujuvead mõjutavad oluliselt kontakteeruvate pindade faktilisest kontaktpinna suurus, seega ka eksploatatsiooniomadusi.

2) Füüsikalis-mehaanilised parameetrid:

- pinna mikrokõvadus;
- mikrostruktuur;
- jääkpinged.

Saadav pinnakaredus sõltub töötlemise meetodist ja režiimist, lõikuri geomeetriast ja lõikeserva viimistlemise kvaliteedist, töödeldava materjali omadustest ja ka töötlemise tingimustest (jahutusvedeliku kasutamisest, vibratsioonist jne). Igale töötlemise meetodile on omane kindel mikrokonaruste kõrguse diapsoon ja nii- või teistsugune joonte (töötlemisjälgede) asetuse pilt töödeldud pinnal.

Treimisel ja freesimisel avaldavad lõikerežiimielementidest kõige suuremat mõju ettenihe ja lõikekiirus. Ettenihke mõju on suurem tera väikese tipuraadiuse korral.

Mehaanilisel töötlemisel tooriku pinnakiht plastiliselt deformeerub ja kalestub. Sellega on seletatav töödeldud detailide pinnakuhi omaduste erinevus põhimaterjalist.

Terased puhastöötlemisel levivad deformatsioonid kuni 300 µm ja koorival töötlemisel kuni 1000 µm sügavusele.

Sepiste muutunud omadustega pinnakiht koosneb dekarbonisatsioonist, mis kuumstantsimisel on piirides 150–300 µm, vabasepistamisega 500–1500 µm. Valtsmetallidel on sellise kihi paksus kuni 150 µm. Hallmalmist valanditel on perliitne pinnakiht kuni 300 µm, terasvalanditel kuni 200 µm.

Metalli plastiliselt deformeerimisel tekivad pinnakihis kalestumisele lisaks alati ka jääksisepinged, mida tasakaalustatakse aluskihtidega. Olenevalt töötlemisviisist ja režiimist võivad tekkida kas surve- või tõmbepinged. Et nende mõju on detaili tugevusele erinev, siis on vaja tooriku töötlemisel protsessi kavandamisel seda arvestada. Nii tekivad lihvimisel tavaliselt jääktõmbepinged, mis vähendavad võllide väsimustugevust. Sellepärast tehaksegi väsimusele töötavate võllide puhul lõpptöötlusena pindade ülerullimist, et luua pinnakihis jääksurvepingeid, mis tõstavad väsimustugevust.

6.2 Detaili valmistamise täpsus

6.2.1 Töötlemistäpsuse mõiste

Täpsuse all mõistetakse valmistatavate toodete vastavust varem kindlaksmääratud prototüübile või etteantud mõõtmetele. Mida parem on see vastavus, seda suurem on täpsus. Toodete valmistamise protsessi ühelgi etapil pole välditavad ühed või teised hälbed (vead), seetõttu pole absoluutne täpsus praktiliselt saavutatav.

Rea tehnoloogiliste tegurite mõjul tekivad toorikute valmistamisel ja nende järgneval mehaanilisel töötlemisel nii toorikute kui ka detailidel mõõtmete hälbed, pindade kuju moondumised ja pindade vastastikuse asendi vead. Need põhjustavad detailide vastastikuse asendi hälbeid koostamisel ja sellega kaasneb koostamise täpsuse halvenemine.

Tehnoloogilise protsessi erinevatel etappidel tekkivad hälbed (vead) on omavahel seotud, seepärast tuleb täpsuse küsimused lahendada mitte isoleeritult, vaid komplekselt kogu tehnoloogilise protsessi ulatuses.

Töötlemistäpsust on mugav hinnata (mõõta) täpsuse vastandmõiste – vea (ebatäpsuse) – abil.

Töötlemisvea all mõistetakse valmistatava toote mõõtmete erinevust etteantud mõõtmetest. Mõõdetakse tavaliselt lihtsate mõõtühikute abil (mm, m, kraad jne).

Eristatakse mõõtme, kuju ja pindade omavahelise asendi täpsust. Mõõtmete suurimat lubatud viga reglementeeritakse tolerantsiga.

Töötlemistäpsuse saavutamise seisukohalt võib mehaanilise töötlemise jagada kolme etappi:

- 1) tooriku paigaldamine;
- 2) tehnoloogilise süsteemi TRLD (tööpink-rakis-lõikur-detail) häälestamine;
- 3) tooriku töötlemine.

Peamised töötlemisvigu põhjustavad tegurid on järgmised:

- 1) töödeldava tooriku ebatäpne paigaldamine tööpingis, ka rakise täpsus;
- 2) tehnoloogilise süsteemi häälestamisvead (põhiliselt lõikuri mõõtu seadmise vead);
- 3) tooriku töötlemisel tekkivad vead:
- 4) tehnoloogilises süsteemis TRLD (tööpink-rakis-lõikur-detail) lõikejõudude mõjul tekkivad elastsed deformatsioonid;
- 5) lõikuri mõõduline kulumine;
- 6) tööpingi (rakise) geomeetriline täpsus (viga);
- 7) lõikuri valmistamise täpsus;
- 8) tehnoloogilise süsteemi TRLD soojuslik deformatsioon;
- 9) tooriku (detaili) materjalis esinevad sisepinged.

Kõik nendel etappidel tekkivad vead moodustavad kokku **summaarse töötlemisvea**.

Mehaanilisel töötlemisel tekkivad vead võib jagada kolme liiki:

- 1) **süsteematilised jäävad vead** – ei muutu ühe või mitme partii töötlemisel, tekib pidevalt mõjuva teguri toimel (nt pingi sõlmede geomeetriline täpsus või asendihälve);
- 2) **süsteematilised muutuvad vead** – võivad mõjutada töötlemise täpsust pidevalt (nt lõikuri mõõduline kulumine) või perioodiliselt (nt tööpingi soojuslikud deformatsioonid pingi käivitamisel kuni tasakaaluolukorra saavutamiseni);
- 3) **juhuslikud vead** – tekivad paljude üksteisest sõltumatute tegurite toimel. On mitmesuguse suurusega, tekkimise momenti ja täpset suurust iga detaili kohta pole võimalik määrata (nt tooriku asend, elastsed deformatsioonid, ebaühtlane kinnitus jne).

6.2.2 Tooriku paigaldamine

Toorikule vajaliku asendi andmist lõikuri suhtes nimetatakse tooriku paigaldamiseks.

Paigaldamine = baseerimine + kinnitus

Baseerimiseks nimetatakse toorikule või tootele vajaliku asendi andmist valitud koordinaatistikus.

Konstruktiivne baas – määrab detaili või koostu asendi tootes. Detaili pind, joon või punkt, mille suhtes määratakse joonisel teiste detailide või koostude arvutuslik asend tootes ja samuti teiste pindade või geomeetriliste elementide asend vaadeldaval detailil.

Tehnoloogiline baas – kasutatakse tooriku või toote asendi määramiseks valmistamis- või remondiprotsessis. Töötlemisel tööpingis tooriku pind, joon või punkt, mille suhtes orienteeritakse töödeldav pind antud paigaldusel.

Mõõtebaas – pind, joon või punkt, millest määratakse (möödetakse) töödeldav mõõde (töödeldava pinna asend).

Tooriku korduval paigaldamisel tööpinki või rakisesse ei ole võimalik saada alati täpselt sama asendit, s.t tekib paigaldusviga.

Paigaldusviga ε all mõistetakse tooriku mitmekordsel paigaldamisel tööpinki või rakisesse tekkivate võimalike piirasendite vahet lõikuri suhtes.

$$\varepsilon = K \times \sqrt{\varepsilon_b^2 + \varepsilon_k^2 + \varepsilon_r^2}, \text{ kus}$$

K arvestab hajumise erinevust normaaljagunemise seadusest.

ε_b – baseerimisviga, sõltub valitud paigaldusskeemist ja tekib, kui tehnoloogiline ja mõõtebaas ei lange kokku. Arvuliselt on selle vea suurus tehnoloogilist ja mõõtebaasi siduva mõõtme võimalik viga.

ε_k – kinnitusviga, tooriku kinnitamisel tekib jõu rakendamise tulemusel tooriku teatud nihkumine mõõtuseatud lõikuri suhtes. On tooriku piirasendite vahe lõikuri suhtes kinnitusjõu mitmekordsel rakendamisel.

ε_r – asendiviga, rakise ebatäpsusest ja tugede mõõtmete muutusest kulumise tagajärjel tekkinud viga.

Iga uue tehnoloogilise baasi kasutamine, s.o baseerimisskeemi muutmine detaili valmistusprotsessis põhjustab täiendava vea tekkimise üldises töötlemisveas.

Minimaalse töötlemisvea kindlustamiseks lähtuda baaside jäävuse põhimõttest – võimaluse korral **baseerimisskeemi mitte muuta!**

6.2.3 Tehnoloogilise süsteemi häälestamisviga

Kulunud lõikuri perioodiline väljavahetamine nõuab selle uuesti vajalikku asendisse panemist ehk tehnoloogilise süsteemi häälestamist. Väikeste tolerantside puhul tekib veel vajadus teha täiendavaid järelhäälestusi ka töötlemise käigus. Häälestaja ülesanne on seada lõikur sellisesse asendisse, et kõikide detailide mõõtmed töötlemisel tuleksid tolerantsi piiridesse.

Eristatakse kahte põhimõtteliselt erinevat häälestamise meetodit.

1. Lõikuri järkjärgulise lähendamisega etteantud häälestusmõõtmele proovidetailide töötlemise teel ja nende mõõtmete määramisega kas universaalse mõõtevahendiga või piirkaliibritega.

Lõikuri korduval mõõtuseadmisel ei õnnestu seda täpselt samasse asendisse seada. Võimalike piirasendite vahet nimetatakse häälestamisveaks Δ_H , mis sõltub häälestamismetodist, häälestaja kvalifikatsioonist ja kasutatava mõõteriista täpsusest.

Häälestusviga on leitav valemiga:

$$\Delta_H = K \times \sqrt{\Delta_m^2 + \Delta_r^2 + \Delta_a^2}, \text{ kus}$$

$K = 1-1,2$ – arvestab hajumise erinevust normaaljagunemisest;

Δ_m – mõõtmise viga (proovidetailidel);

Δ_r – lõikuri asendi korrigeerimise viga;

Δ_a – arvutusviga (grupi aritmeetilise keskmise määramisel).

Piirkaliibritega mõõtmine nõuab palju proovidetaile ja seepärast kasutatakse harva.

2. Lõikur asetatakse vajalikku häälestusmõõtu etalondetaili järgi.

Tööpingi häälestamist etaloni järgi kasutatakse peamiselt trei- ja freespinkide puhul, kui detailid on töömahukad ja kallid. Lõikuri mõõtuseadmisel kasutatakse seejuures pilukaliibrit.

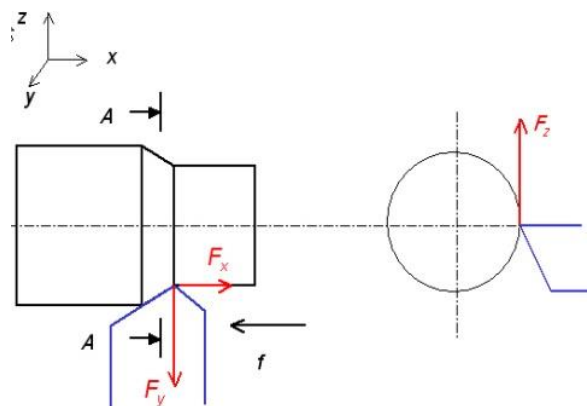
$$\Delta_H = K \times \sqrt{\Delta_{et}^2 + \Delta_{lr}^2}, \text{ kus}$$

Δ_{et} – etaloni mõõtme viga (valmistamise ebatäpsus);

Δ_{lr} – lõikuri paigaldusviga.

6.2.4 Elastsed deformatsioonid lõiketöötlemisel

Lõiketöötlemisel tuleb laastu eemaldamiseks lõiketsoonis rakendada lõikejõudu. Kuna tehnoloogilise süsteemi TRLD elemendid (seega ka süsteem tervikuna) pole absoluutselt jäigad, siis lõikejõu komponendi F_y (sele 6.1) mõjul eemalduvad töötlemisel toorik ja lõikur teineteisest. Jäikuse all mõeldakse üldiselt võimet vastu seista deformeerivale jõule ja mitte deformeeruda.



Sele 6.1 Lõikejõud töötlemisel

Lõiketöötlemisel tekkivate elastsete deformatsioonide (nihete) tõttu ei saada täpselt see mõõde, millele tööpink (TRLD) häälestati – tekib töötlemisviga Δy . Välispinna töötlemisel mõõde suureneb, sisepinna töötlemisel väheneb.

Peamise osa töötlemisveast annavad deformatsioonid töödeldava pinna normaali F_y suunas. Seepärast üldist täpsuse taset arvestades määratletakse lõiketöötlemisel jäikuse mõiste lõikejõu töödeldava pinna normaali suunalise lõikejõu komponendi F_y ja samas suunas tekkiva deformatsiooni y suhtena:

$$j = F_y : y, \text{ kus}$$

j – jäikus N/m;

y – deformatsioon m.

Lõiketsoonis tekkiv F_y -suunaline deformatsioon on süsteemi TRLD kõigi elementide sama-suunaliste deformatsioonide summa vaadeldavas kohas ehk süsteemi deformatsioon:

$$y_s = y_T + y_R + y_L + y_D, \text{ kus}$$

y_T – tööpingi deformatsioon vaadeldavas kohas F_y suunas;

y_R – rakise deformatsioon vaadeldavas kohas F_y suunas;

y_L – lõikuri deformatsioon vaadeldavas kohas F_y suunas;

y_D – detaili deformatsioon vaadeldavas kohas F_y suunas.

Eelnevast lähtudes $y_s = F_y : j_s$, kus j_s on süsteemi TRLD jäikus lõiketsoonis. Sellest järeldub, et:

$$1/j_s = 1/j_T + 1/j_R + 1/j_L + 1/j_D$$

Teades süsteemi jäikust j_s ja F_y on võimalik arvutada tekkiv deformatsioon ehk töötlemisviga Δ_y . Treimisel on TRLD elastsetest deformatsioonidest tingitud töötlemisviga $\Delta_y = 2y_s$.

Töötlemistäpsus sõltub süsteemi jäikusest, suurendades jäikust, saab sama töötlemisvea-tolerantsi juures rakendada suuremat lõikerežiimi. Järelikult on jäikus töö tootlikkust mõjutav tegur.

6.2.5 Tööriista kulumine lõiketöötlemisel

Mehaanilisel töötlemisel lõikur kulub, s.t treimisel tema mõõde muutub töödeldava pinna normaali sihis, mille tulemusena muutub ka detaili mõõde – tekib töötlemisviga u , mida nimetatakse mõõduliseks kulumiseks. Näiteks treimisel kulumine põhjustab detaili läbimõõdu muutust kahekordselt.

Töötlemise täpsuse seisukohalt kulumine tagatahult, mille järgi määratakse lõikuri püsivusaeg, omab väiksemat tähtsust. Mõõdulisest kulumisest tingitud töötlemisvea määramiseks on vaja teada kulumise intensiivsust ehk mõõdulise kulumise suurust lõiketeeekonna ühikpikkuse kohta. Nii nimetatakse mõõdulist kulumist 1000 m läbitud lõiketeeekonna kohta erikumiseks – tähistatakse tavaliselt u_0 .

Lõikuri mõõduline kulumine ajas ehk sõltuvalt lõiketeeekonna pikkusest on analoogne masinadetailide kulumise iseloomuga. Kulumise I ehk sissetöötamise etapp on iseloomustatav suhteliselt suurema ja muutuva intensiivsusega, II etapis ehk normaalkulumise tsoonis kulumise iseloom ei muutu. III kulumine järsult intensiivistub – algab lõikeserva purunemine. Töötlemine on lubatud II etapi lõpuni.

I etapi suuremat kulumise intensiivsust võib arvesse võtta ühe u_0 lisamisega, seega võib mõõdulist kulumist u arvutada järgmiselt:

$$u = u_0 \times l : 1000 + U_0, \text{ kus}$$

u – mõõduline kulumine;

u_0 – erikumine;

l – lõiketeeekond (m).

Erikulumine sõltub reast tegureist: lõikuri materjal, töödeldav materjal, lõikerežiim (peamiselt lõikekiirus).

Abrasiivsete lõikuride kulumine on intensiivsem, lõikuri kulumise kompenseerimiseks ja täpsuse saavutamiseks pindade mitmekordne töötlemine, kuni vajalik mõõde on saavutatud.

6.2.6 Soojuslikud deformatsioonid

Tehnoloogilise süsteemi soojuslikud deformatsioonid avaldavad olulist mõju töötlemise täpsusele, seda eriti viimistleva töötlemisel. Mehaanilise töötlemise protsessis toimub kogu tehnoloogilise süsteemi soojenemine (paisumine), töö vaheaegadel aga selle jahtumine (kokkutõmbumine). Soojenemise allikateks on tooriku lõiketsoonis tekkiv soojus, tööpingi sõlmedes hõõrdekadude arvel eralduv soojus ja erinevad välised allikad.

Tööpingi soojuslikud deformatsioonid tekivad pingi detailide ja sõlmede soojenemisest (hõõrdekadod mehhanismides, jahutusvedelikuga lõiketsoonist jne.). Nihke suurused sõltuvad lõikerežiimist, töö intensiivsusest ja on leitav valemiga:

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta t, \text{ kus}$$

α – joonpaisumise koefitsient;

L – detaili pikkus;

Δt – temperatuuride vahe.

Tooriku soojuslikud deformatsioonid on põhjustatud lõiketsoonis tekkivast soojusest. Treimisel läheb soojust 50–90% laastu, 10–40% terasse, 3–9% toorikusse ja umbes 1% hajub ümbritsevasse keskkonda.

Praktiliselt oluline, viimistlustöötlemisel aga otsustav mõju, on soojuslikel deformatsioonidel suuremõõtmeliste ja väikese massiga detailide töötlemisel. Tekkivaid deformatsioone saab vähendada rohke jahutusvedelikuga, lõikekiiruse tõstmisega, mille tulemusena suur osa soojusest jääb laastu.

Lõikuri soojuslikud deformatsioonid annavad peamise osa sellesisulisest töötlemisveast – neil on suhteliselt väike mass. Tavalistes tingimustes võib terik pikeneda 0,03–0,05 mm. Pikenemine kasvab ettenihke, lõikesügavuse ja lõikekiiruse suurenemisel, samuti töödeldava materjali tugevuspääri tõusmisel.

6.2.7 Tööpingi geomeetiline täpsus

Tööpingi enda geomeetiline täpsus põhjustab töötlemisvea Δ_{geom} , mis sageli avaldub töötlemisel detaili kuju või pindade asendiveana.

Tööpingi geomeetrilise täpsuse hindamiseks on terve rida näitajaid, mis määratakse kindlaks seisvas ehk koormamata olekus:

- 1) spindli radikaal- ja telgviskumine;
- 2) spindli koonilise ava viskumine;
- 3) sängi juhtpindade kõrvalekalle sirgjoonelisusest.

Põhilised andmed konkreetse tööpingi kohta on toodud pingi tehnilises passis. Kulumise tõttu tööpingi geomeetriline täpsus langeb. Samuti sõltub töötlemistäpsus oluliselt tööpingi paigaldamise (nt vundamendile) täpsusest, mis on eriti oluline suuregabariidiliste ja raskete tööpinkide juures.

6.2.8 Lõikuri valmistamise viga

Töötlemise täpsus sõltub otseselt lõikuri valmistamise täpsusest. Sellest seisukohast võib lõikurid jagada kolme rühma:

- 1) mõõdulised lõikurid (puurid, avardid, hõõritsad, kammlõikurid);
- 2) kujumoodustavad lõikurid (kujuterad, kujufreesid, keermelõikurid);
- 3) lihtlõikurid.

Lõikuri enda valmistamise täpsus mõjutab töötlemistäpsust kahe esimese rühma puhul. Nende töömõõtmete viga põhjustab töödeldud detaili mõõtme või kuju vea. Konkreetne lõikur võib ühtaegu olla nii mõõduline kui ka kujulõikur – nt keermepuur või kammlõikur.

Lihtlõikuride valmistamise täpsus ei mõjusta töötlemistäpsust.

6.2.9 Jääkpingetest põhjustatud vead

Jääkpingeteks nimetatakse pingeid, mis eksisteerivad toorikus või valmisdetailis väliskooruse puudumisel. Jääkpinged tasakaalustuvad toorikus (detailis) täielikult ja nende mõju väliselt ei avaldu. Selle tasakaalu rikkumisel kas töötlemisvaru eemaldamisega, läbilõikamisega, pinna plastilise deformeerimisega, termilise või keemilise mõjutamisega, detail deformeerub, mille käigus toimub pingete ümberjagamine kuni uue tasakaaluolukorra saavutamiseni.

Eristatakse kolme liiki jääkpingeid:

- 1) esimest liiki pinged (makropinged) tasakaalustuvad suurte materjalimahtude piires, millel on töödeldava tooriku mõõtmetega sama suurusjärg;
- 2) teist liiki pinged tekivad mikroskoopilistes mahtudes, mis on mõõtmetelt terade ja kristallidega ühes suurusjärgus;
- 3) kolmandad tekivad ultramikroskoopilistes mahtudes, tasakaalustuvad aine kristallvõre mõne sõlme piires.

Tehnoloogias on peamine tähendus esimest liiki pingetel. Tekkimise põhjuste järgi jaotatakse jääkpinged kahte rühma:

- 1) konstruktsioonilised,
- 2) tehnoloogilised.

Esimesi tekitavad detaili konstruktiivsed iseärasused, teised tekivad detailis selle valmistamisprotsessis.

Tehnoloogilised pinged tekivad mahuliste muutuste tulemusena:

- 1) ebaühtlase soojenemisel ja jahtumisel;
- 2) metalli faasilisel või struktuurilisel muutumisel;
- 3) karestumisel plastilise deformatsiooni tagajärjel.

Loetletud põhjuste koosmõjul tekivad detaili pinnakihtides sageli nii suured tõmbepinged, et detaili välispinnale võivad tekkida praod.

Tehnoloogilised sisepinged tekivad detailide toorikute saamise protsessis (valamisel, sepi-tamisel, keevitamisel jne), termilisel töötlemisel ja toorikute mehaanilisel töötlemisel.

6.2.10 Summaarse vea määramine töötlemisel

Mehaanilise töötlemise summaarne viga on varem vaadeldud tehnoloogiliste tegurite tulemus.

Töödeldava mõõtme hajumisvälja võib väljendada funktsionaalse sõltuvusega

$$\Delta = f(\Delta_y, \varepsilon, \Delta_H, \Delta_{kul}, \Delta_T, \Sigma \Delta_k).$$

Selle ülesande lahendamist võib võrrelda sulgeva lüli lahendamisega max-min meetodi järgi (liidetakse algebraliselt), kuid see annab suurendatud Δ väärtuse.

$$\Delta = t \times \sqrt{\lambda_1 \Delta_y^2 + \lambda_2 \varepsilon^2 + \lambda_3 \Delta_H^2 + \lambda_4 \Delta_{kul}^2 + \lambda_5 \Delta_T^2}, \text{ kus}$$

t – tegur, mis määrab töötlemisel praagi saamise riski protsendi;

kui $t = 1$, siis riski protsent on 32; kui $t = 2$, on see 4,5; kui $t = 3$, on see 0,27;

λ_1, λ_2 , – tegurid, mis sõltuvad jaotuskõvera kujust. Normaaljaotuse puhul $\lambda = 1/9$, võrdse tõenäosuse puhul või kui jaotus on ebaselge $\lambda = 1/3$, kolmnurkse jaotuse puhul $\lambda = 1/6$.

Arvestades tegelikke jaotusi, on summaarne töötlemisviga:

$$\Delta = t \times \sqrt{\Delta_y^2 + \varepsilon^2 + \Delta_H^2 + 3 \Delta_{kul}^2 + 3 \Delta_T^2 + \Sigma \Delta_k}.$$

6.3 Tehnoloogilise protsessi projekteerimine

6.3.1 Projekteerimise eesmärk ja lähteandmed

Tehnoloogilised protsessid töötatakse välja uute tehaste projekteerimisel, olemasolevate tehaste rekonstrueerimisel või uute toodete juurutamisel tootmisesse. Lisaks modifitseeritakse ja töötatakse välja uusi tehnoloogilisi protsesse ka juba olemasoleva toodangu valmistamiseks. Seda tingib peamiselt uute tootmiseseadmete või süsteemide kasutuselevõtt ettevõttes ning muutused toote disainis. Uute tehaste projekteerimisel määrab tehnoloogiline protsess vajalike seadmete, tootmispindade, energia, transpordivahendite, tööjõu ja materjalide vajaduse.

Tehnoloogiliste protsesside väljatöötamisel tuleb lähtuda kahest põhimõttest: **tehnilisest ja majanduslikust**. Vastavalt tehnilisele põhimõttele peab projekteeritav tehnoloogiline protsess täielikult tagama kõigi antud toote tööjoonisel toodud nõuete ja tehniliste tingimuste täitmise. Vastavalt majanduslikule põhimõttele peab toote valmistamine toimuma minimaalsete töö- ja tootmiskuludega. Sealjuures peab toote valmistamise tehnoloogiline protsess kindlustama minimaalse ajakulu ja toote omahinna juures seadmete, tööriistade ning rakiste kõikide tehniliste võimaluste õige ja täieliku ärakasutamise.

Tehnilise põhimõtte seisukohalt ühe ja sellesama toote valmistamise tehnoloogilise protsessi mitmest samaväärses võimalikust variandist valitakse kõige efektiivsem ja tootlikum. Kõrvutatavate variantide võrdse tootlikkuse korral valitakse rentaablim variant, võrdse rentaabluse korral tootlikum variant. Erijuhtudel (eriti tähtsa toodangu kiire väljalase, tootmise kitsaskohtade likvideerimine jm) võib antud tehase piires teatud ajavahemikul rakendada maksimaalse tootlikkusega varianti. Projekteeritava protsessi efektiivsus ja rentaablus määratakse kõigi koostiselementide järgi või arvutatakse ligikaudsete näitajate alusel.

Mehaanilise töötlemise tehnoloogiliste protsesside projekteerimisel on järgmised **eesmärgid**:

- 1) tootmistüübi ja esialgse tootmistakti või partii suuruse kindlaksmääramine;
- 2) tooriku saamise meetodi valik ja toorikule esitatavate nõuete täpne sõnastamine;
- 3) detaili töötlemisplaani koostamine;
- 4) tehnoloogiliste operatsioonide ja siirete järjekorra ja sisu määramine;
- 5) töötlemisvarude ja mõõtmete tolerantside kindlaksmääramine;
- 6) operatsioonide lõikerežiimide ja ajanormide kindlaksmääramine;
- 7) vajalike seadmete, rakiste, töö- ja mõõteriistade ning tööjõu vajaduse väljaselgitamine.

Projekteeritud tehnoloogilise protsessi alusel määratakse lähteandmed põhi- ja abimaterjalidega varustamise, kalendaarse planeerimise, tehnilise kontrolli ning tööriista- ja transpordimajanduse organiseerimiseks.

Tehnoloogilise protsessi projekteerimisel **lähteandmed** on järgmised:

- 1) detaili tööjoonis;
- 2) detaili valmistamise tehnilised tingimused, mis iseloomustavad täpsust ja töödeldud pinna kvaliteeti, samuti erinõudeid (kõvadus, struktuur, termiline töötlemine, tasakaalustamine, kaalu täpsustamine jms);

- 3) tootmisprogramm;
- 4) ajavahemik, mille vältel tuleb saavutada programmiga määratud väljalasketase. Kui väljalaskeprogramm ajaliselt muutub, siis antakse programmülesanne aastate või muude ajavahemike kaupa.

Tehnoloogiliste protsesside projekteerimisel peavad olema teada andmed olemasolevate seadmete, ressursside ja teiste tootmistingimuste kohta. Erijuhul võivad tehnoloogi võimalused tehnoloogilise protsessi projekteerimisel või korrigeerimisel olla veelgi enam piiratud läheteooriku parameetritega.

Projekteerimisel kasutatakse erinevaid CAD, CAM ja CAE süsteeme, töötlemisseadmete ja rakiste katalooge, erinevate tööriistatootjate katalooge ja rakendusi optimaalsete löikerežiimide määramiseks.

6.3.2 Projekteerimise meetodika ja järjekord

Tehnoloogiliste protsesside projekteerimisele on iseloomulik paljude võimalike variantide olemasolu. Isegi suhteliselt lihtsatele detailidele võib välja töötada mitu erinevat tehnoloogilist protsessi, mis rahuldavad täielikult tööjoonise nõudeid ja tehnilisi tingimusi. Nende variantide võrdlemisel valitakse efektiivsuse ja rentaabluse järgi lõplikult kas üks või mõned samaväärsed variandid.

Tehnoloogiliste protsesside projekteerimine on keerukas ja töömahukas. Nii nagu paljud teised projekteerimistööd, töötatakse ka tehnoloogiline protsess välja mitmes staadiumis. Algul tehakse protsessi esialgne kavand; edasistes staadiumides seda täpsustatakse ja konkretiseeritakse üksikasjalike tehnoloogiliste arvutuste alusel. Esialgse kavandi järkjärgulise täpsustamisega saadakse tehnoloogiline protsess lõplikult väljatöötatud kujul. Tavaliselt õnnestub jõuda õige ja vastuvõetava lahenduseni alles rea katsete järel.

Tehnoloogia väljatöötamise töömahukuse ja ajakulu vähendamiseks on otstarbekas võrrelda ja valida variante projekteerimise algstaadiumis. Tehnoloogia väljatöötamise põhjalikkus oleb tootmistüübist. Masstootmises töötatakse kõikidele toote detailidele välja üksikasjalikud tehnoloogilised protsessid. Üksiktootmises piirduakse lihtsustatud käsitlemisega, kuna üksikasjaliku tehnoloogia väljatöötamine ei õigusta ennast majanduslikult sellises olukorras. Erandi moodustavad keerukad ja kallid detailid, eriti raskemasinaehituses.

Sellistele detailidele töötatakse tehnoloogilised protsessid välja hoolikalt ja üksikasjalikult. Seeriatootmises rakendatakse valmistatavate toodete laia nomenklatuuri korral grupitehnoloogiat. Tehnoloogilisi protsesse projekteeritakse ka suhteliselt väikesele tüüpdetailide hulgale.

Tehnoloogiat projekteeritakse üksteisega seotud ja teatud järjekorras olevate etappide kaupa. Nende hulka kuuluvad:

- 1) tootmistüübi valik (kindlaksmääramine);
- 2) tooriku saamise meetodi valik ja toorikule esitatavate nõuete püstistamine;
- 3) baseerimise valik;

- 4) üksikpindade järjestikuste töötlemismeetodite (marsruudi) valik;
- 5) detaili töötlemismarsruudi määramine tervikuna, esialgne operatsioonide kavandamine;
- 6) vahetöötlemisvarude arvutus, tooriku tolerantside ja piirmõõtmete määramine tehnoloogiliste siirete kaupa;
- 7) operatsioonide sisu täpsustamine;
- 8) seadmete, tööriistade ja rakiste valik;
- 9) lõikerežiimide määramine;
- 10) häälestusmõõtmete määramine;
- 11) tooriku paigaldus- ja kinnituskeemi täpsustamine erirakiste koostamiseks;
- 12) ajanormide määramine;
- 13) tehnoloogilise dokumentatsiooni vormistamine.

Tehnoloogia projekteerimise võib strateegia järgi jaotada järgmisteks liikideks:

1. Lineaarne strateegia:

I etapi lahendamise järel projekteerija siirdub II etapi lahendamisele jne.

2. Tsüklikiline strateegia:

Selle strateegia puhul tekib vajadus tagasipöördumiseks eelmiste etappide juurde. Tagasipöördumisi võib olla mitu. Võib tekkida olukord, et tuleb tagasi pöörduda korduvalt samast kohast (tekib kinnikiilumine).

3. Harustrateegia:

Paralleelselt on võimalik lahendada mitu etappi, mis võimaldab üheaegselt töötada mitmel projekteerijal. On võimalus ka valida etappide lahendamise järjekorda (alternatiivsed etapid).

4. Adaptiivne strateegia:

Siin valitakse ainult projekteerimise algetapp. Edasine lahendamise järjekord sõltub eelmise tulemustest.

6.3.3 Tööjooniste ja tehniliste tingimuste kontroll

Enne tehnoloogilise protsessi projekteerimist uuritakse üksikasjalikult detaili tööjoonist, selle valmistamise tehnilisi tingimusi ja töötamistingimusi tootes. Kontrollitakse, kas projektsioonid on piisavad, mõõtmete asetused õiged ja uuritakse töödeldavate pindade täpsusele ning pinnakaredusele püstitatud nõudeid, samuti muid tehniliste tingimuste nõudeid.

Konstruktorid kõrgendavad sageli detaili mõõtmete täpsusklasse ja pinnasiledusklasse, mis muudab detaili valmistamise tehnoloogilise protsessi keerukaks. Sellisel juhul võib tehnoloog esitada vastavaid muudatusettepanekuid ja seejärel arutada konstruktoriga, et läbiviidud leida kõige parem lahendus. Tööjoonise kontrollimisel selgitatakse detaili konstruktsiooni tehnoloogilisemaks muutmise võimalusi.

Nendeks võimalusteks võivad olla:

- 1) töödeldavate pindade suuruse vähendamine, mis vähendab mehaanilise töötlemise töömahtu;
- 2) detaili jäikuse suurendamine, millega luuakse võimalused üheaegselt mitme lõikuriga töötlemiseks, mitmerealiste lõikuride kasutamiseks ja suure tootlikkusega lõikerežiimide rakendamiseks;
- 3) soonte, süvendite, völliakelate, avade ja teiste elementide mõõtmete unifikatsioon, mis vähendab mõõduliste ja kujulõikuride nomenklatuuri ja töötlemisaega tehnoloogiliste siirete järjestikusel sooritamisel;
- 4) kindel ja mugav tooriku baseerimine, paigaldus- ja mõõtelähetete ühitamine;
- 5) tooriku pindade üheaegne töötlemine.

Konstruksiooni tehnoloogilisemaks muutmiseks võib töötlemise töömahukust tunduvalt vähendada ja rentaablust suurendada.

6.3.4 Tootmistüübi määramine

Tootmistüüp määratakse peale antud detaili tootmistakti arvutamist. Kui tootmistakt on lähedane või väiksem esialgselt ja orienteerivalt määratud kõige iseloomulikumate töötlemisoperatsioonide keskmisest ajutisest kestusest, siis loetakse tootmine masstootmiseks. Sellisel juhul on otstarbekas kinnitada operatsioonid töökohtadele, sest seadmete koormusaste tuleb küllalt kõrge (tavaliselt mitte üle 70%). Operatsioonide kestus määratakse ligikaudsete arvutustega, lähtudes detaili iseloomulikemate pindade suurusest. Kui tootmistakt ületab tunduvalt üksikute töötlemisoperatsioonide eeldatava ajalise kestuse, tuleb detaili toota seeriaviisiliselt.

Seadmete suhteliselt väikese koormuse tõttu on sel juhul otstarbekas töödelda partiiide kaupa. Rea tehnoloogiliselt sarnaste detailide olemasolul tuleb töödelda grupi- või vooluliinidel või organiseerida selleks tehnoloogiliselt iseseisvad jaoskonnad.

Seeriatootmisel määratakse partii suurus orienteerivalt, lähtudes seadmete seadistamise ja häälestamise töömahukusest, töötlemisprotsesside kestusest, toote väljalaskmise tähtaegadest, lõpetamata toodangu maksumusest, detailide nomenklatuurist ja teistest organisatsioonilistest ja majanduslikest kaalutlustest. Suurte ja keerukate detailide partii suuruseks võib võtta kahepäevasele programmile vastava detailide hulga, keskmistele partiiidele kuni kuupäevasele, lihtsatele ja väikestele partiiidele kuni kolmepäevasele programmile vastava hulga. Eelnevalt määratud partii suurust tuleb edaspidi korrigeerida tehnoloogilise protsessi täpsustamise käigus.

6.3.5 Baaside valik

Paigaldusbaasi valiku eesmärgiks on nii baaside endi kui ka nende vahetamise korra (kui see vajalikuks osutub) kindlaksmääramine detaili mehaanilise töötlemise tehnoloogilises protsessis. Baaside valikul võetakse arvesse detaili tööjoonist ja sellel toodud mõõtmete paigutust, detaili valmistamise tehnilisi tingimusi, tooriku liiki ja protsessi soovitatavat automaatsereerimise astet.

Baaside kindlaksmääramisel arvestatakse ka detaili töötingimusi mehhanismis. Valitud baseerimisskeem määrab rakiste konstruktiivse skeemi, mõjutab mõõtmete täpsust ja detaili pindade vastastikust asendit. Töötlemistäpsuse osas saavutatakse parimaid tulemusi lähete ühitamise põhimõtte rakendamisel. Sel juhul on baseerimishälbed võrdsed nulliga. Selle põhimõtte rakendamise võimaluse puudumisel (näiteks tooriku ebaküllaldase stabiilsuse tõttu pindalalt väikeste mõõtelähete korral) võetakse paigalduslähteks teine pind, kusjuures püütakse vähendada baaside mitteühitatavuse ebasoovitavaid tagajärgi.

Baaside ühitamise põhimõtte rakendamine suurendab detaili pindade suhtelise asendi täpsust. Pöördpindade hea kontsentrisus saadakse ühe ja sellesama paigalduslähete (tsentriavade) kasutamisel. Selle põhimõtte rakendamine suurendab rakiste ja paigaldusskeemide sarnasust, mis on oluline tehnoloogilise protsessi automatiseerimisel. Lähete ühitatuse saamiseks kasutatakse sageli kunstlikke (abi-) baase: kühmud, plaadikujulised moodustised, tsentriavad, paigaldusvööd ja teised elemendid, samuti ka kogu töötlemise läbiviimist algtooriku ühekordse paigaldusega tema töötlemata pindadest.

Viimane juhus esineb detailide töötlemisel automaatpinkides (lattmaterjali kasutamine), mitmepositsioonilistes pinkides, agregaatpinkides ja automaatliinides (vaherakiste kasutamine).

Baaside valikul tuleb määrata nende töötlemise täpsus ja pinnakaredus, samuti nende korduva töötlemise vajadus tooriku materjalis esinenud sisepingetest tekkida võiva deformatsiooni mõju kõrvaldamiseks. Baaside valik on seotud detaili töötlemisplaani esialgse kavandiga, mida tehnoloogilise protsessi projekteerimise järgmistel etappidel täpsustatakse.

Baaside valikul tuleb lähtuda järgmistest asjaoludest:

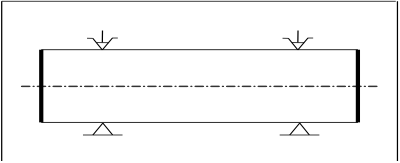
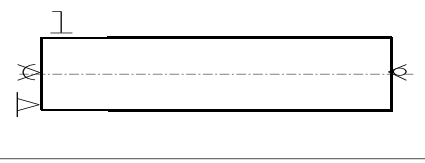
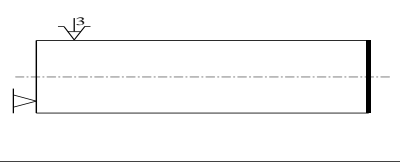
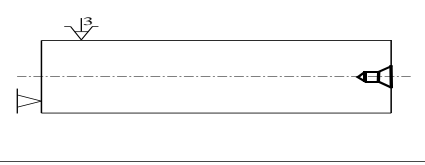
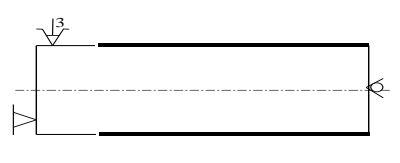
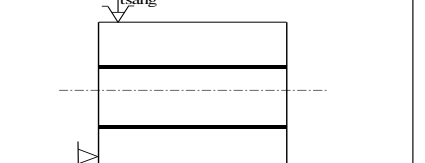
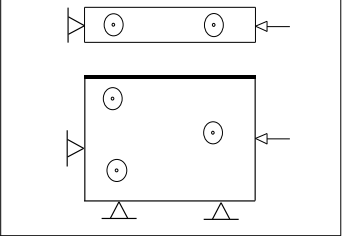
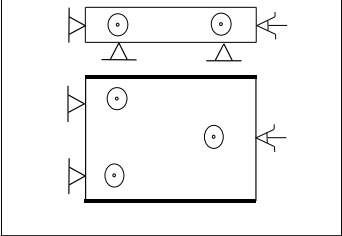
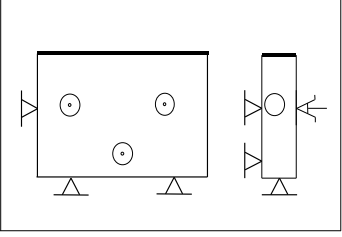
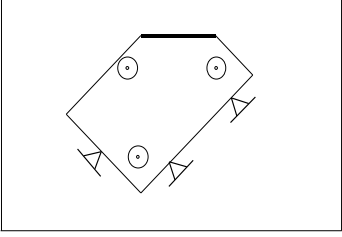
- 1) tehnoloogia-, konstruktsiooni- ja mõõtebaaside ühitamise printsibist, mis väldib baseerimisvigade tekkimise;
- 2) baaside püsivuse printsibist, mis välistab nende vahetamisest tekkivad vead;
- 3) esimeseks („mustaks”) baasiks tuleb valida kas pinnad, mis jäävad töötlemata, kuid millele on vaja tagada suhteliselt täpne asend töödeldud pindadest, või pinnad, millele on vaja tagada järgnevatel operatsioonides ühtlane töötlemisvaru. „Musta” baasi võib üldjuhul kasutada ainult üks kord.

Baseerimisskeemide (tabel 6.2) näitamine operatsioonieskiisidel on kohustuslik, kuna nendest sõltuvad edasiselt töötlemistäpsus, rakiste konstruktsioon jne. Baseerimisskeemidel kasutatavad tähised on näidatud tabelis 6.1.

Tabel 6.1 Baseerimisskeemidel kasutatavad tähised

Baseerimisskeemidel kasutatavad tähised				
		Eestvaade	Pealtvaade	Altvaade
Toed	Jäik tugi			
	Reguleeritav tugi			
	Liikuv tugi			
	Ujuv tugi			
Padrunid	Kolmepakiline padrun			
	Neljapakiline padrun			
	Tsangpadrun			
	Kaasaveopadrun			
Kinnitus	Üksik			
	Kaksik			
Tsentrid	Liikumatu tsenter			
	Pöörlev tsenter			
	Ujuv tsenter			
Tornid	Silindertorn			
	Kuultorn			
Tugipinna	kuju Tasapind	Sfäär	Silinder	Prisma
	Rihveldatud	Koonus	Romb	Kolmtahk
Kinnituseliik		Pneumaatiline: P	Hüdrauliline: H	Elektriline: E
		Ei. Mehaaniline: EM	Magnet: M	Muu: ilma tähisteta

Tabel 6.2 Baseerimiskeemide näiteid

 <p>Otspindade freesimine</p>	 <p>Välispinna treimine (kaasaveopadrün + pöörlev tsester)</p>
 <p>Otspinna treimine</p>	 <p>Tsentriava puurimine</p>
 <p>Välispinna treimine (padrun+pöörlev tsester)</p>	 <p>Puksi siseava treimine tsangis</p>
 <p>Mittepöördkeha kruustangides (rakises), ühe külje freesimine (otsfrees)</p>	 <p>Mittepöördkeha kruustangides (rakises), kahe külje freesimine korraga ketasfreesiga)</p>
 <p>Mittepöördkeha kruustangides</p>	 <p>Faasi freesimine rakises (kruustangides)</p>

6.3.6 Töötlemismarsruudi projekteerimine

Töötlemismarsruudi koostamine on keerukas ülesanne paljude erinevate võimalike lahendusvariantidega. Detaili töötlemise marsruut peab andma töötlemise üldise plaani, määrama tehnoloogiliste operatsioonide sisu ja seadmete tüübi.

Üldise töötlemisjärjekorra määramisel pannakse kõigepealt paika paigaldusbaaside töötlemine. Sellele järgnevad ülejäänud pinnad täpsusastme suurenemise järjekorras; mida täpsemalt tuleb pinda töödelda, seda hiljem seda töödeldakse. Viimaseks jääb detaili kõige täpsem ja olulisem pind. Kergesti vigastatavaid pindu töödeldakse sageli marsruudi lõpul (näiteks väliskeermed ja mõned teised detaili elemendid). Praagi õigeaegseks avastamiseks valutühikute ja teiste materjalidefektide esinemisel rakendatakse koorivtöötlemist, ja kui nõutakse, siis ka puhastöötlemist nendel pindadel, kus neid defekte ei lubata.

Täpsete ja vastutusrikaste detailide tootmisel jaotatakse marsruut kolmeks järjestikuseks töötlemiseks: **kooriv-, puhas- ja viimistlevaks töötlemiseks**. Koorivtöötlemisel eemaldatakse töötlemisvarudena ja töötlemislisadena põhiline osa materjalist, puhastöötlemisel on vahepealne tähendus, viimistlemisel saadakse detaili pindade etteantud täpsus ja pinnakaredus.

Koorivtöötlemisel esinevad suhteliselt suured töötlemishälbed, mis on tingitud tehnoloogilise süsteemi deformatsioonist löike- ja kinnitusjõudude mõjul ning tooriku intensiivsest kuumenemisest. Nendes tingimustes ei taga kooriv- ega puhastöötlemise vaheldumine etteantud täpsust. Peale koorivtöötlemist toorik deformeerub, kuna selle materjalis esinevad jääkpinged jaotuvad ümber. Töötlemise jaotamisega eespool nimetatud staadiumidesse suurendatakse kooriv- ja viimistleva töötlemise ajalist vahet, mis annab võimaluse näha deformeerumise taset enne detaili kuju lõplikku täpsustamist viimistlusstaadiumis.

Viimistlevat töötlemist tehakse marsruudi lõpus, nii vähendatakse lõplikult töödeldud pindade juhusliku vigastamise riski töötlemisel ja transportimisel.

Koorivtöötlemist võib teha selleks eraldatud kulunud või vähetäpsetel seadmetel ja rakendada seejuures madalama kvalifikatsiooniga töötajaid.

Esitatud marsruudi koostamise põhimõtte pole siiski kõikidel juhtudel kohustuslik. Selle läbikaalumata rakendamine võib mõnikord viia ebareaalsete protsesside loomiseni.

Jäiga tooriku ja töödeldavate pindade väikeste mõõtmete korral võib üksikelementide lõpptöötlemine toimuda ka marsruudi algul ilma mingite kahjulike tagajärgedeta. Nimetatud põhimõtte on teatud määral vastuolus ka töötlemise kontsentreerimisega, mille juures võivad ühe operatsiooni piires toimuda nii kooriv- kui ka puhastöötlemise siirded (detailide valmistamine lattautomaatpinkidel lattmaterjalist).

Kui detaili tuleb termiliselt töödelda, siis jaotatakse mehaanilise töötlemise tehnoloogiline protsess kahte ossa:

- 1) protsess kuni termilise töötlemiseni;
- 2) protsess peale seda.

Võimalike kõmmeldumiste kõrvaldamiseks tuleb detaili sageli õgvendada või üksikuid pindu korduvalt töödelda, et tagada etteantud täpsus ja pinnakaredus. Üksikud termilise töötlemise viisid muudavad mehaanilise töötlemise küllalt keerukaks. Näiteks nõutakse tsementiitimisel tavaliselt vaid detaili üksikute piirkondade rikastamist süsinikuga. Seda saavutatakse ülejäänud piirkondade vasetamisega või jäetakse nendele töötlemisvaru, mis eemaldatakse täiendava mehaanilise töötlemisega peale tsementiitimist, kuid enne karastamist.

Töötlemise järjekord oleneb teatud määral mõõtmete paneku süsteemist. Esimesena tuleb töödelda see pind, mille suhtes on joonisel määratud detaili paljude teiste pindade asendid. Abistavad või teisejärgulised operatsioonid (väikeste avade puurimine, faasimine, soonte töötlemine, kraatide eemaldamine jne) tehakse tavaliselt puhastöötlemise staadiumis. Marsruudi antud etapil võib nende operatsioonide järjekord tihti muutuda; tervikuna ei avalda see mõju protsessi kvaliteedinäitajatele ega majanduslikkusele.

Tehnilise kontrolli operatsioonid nähakse ette peale neid töötlemisetappe, kus võib tõenäoliselt tekkida palju praaki, enne keerukaid ja suure maksumusega operatsioone ja samuti töötlemise lõpul.

Operatsioonide esialgne sisu määratakse nende antud töötlemisstaadiumi siirete ühendamisega, mida saab teha valitud pingitüübil. Masstootmises määratakse operatsioonide sisu tingimusest, et nende kestus oleks võrdne tootmistaktiga või oleks selle kordne. Operatsiooni sisule avaldab mõju ka detaili pinki või pingist ümberpaigaldamise arvu piiramine, mis on eriti tähtis raskemasinaehituses.

Põhimõtteliselt õige lähenemine mitmesugustesse klassidesse kuuluvate detailide marsruutide koostamisele antud tootmingimustes seisneb tehnoloogiliste protsesside tüübistamises ja gruppitehnoloogias.

6.3.7 Töötlemisoperatsioonide projekteerimine

Operatsiooni projekteerimisel täpsustatakse selle varem koostatud marsruutetehnoloogiaga visandatud sisu, määratakse kindlaks siirete järjekord ja nende ajalise ühitamise võimalus, valitakse seadmed, lõikurid ja rakised (või antakse nende konstrueerimise ülesanne), määratakse lõikerežiimid ja operatsioonide sooritamise ajanormid, määratakse kindlaks häälestusmõõtmed ja koostatakse häälestusskeem.

Operatsioonide projekteerimine on paljude lahendusvariantidega ülesanne. Võimalikke variante hinnatakse tootlikkuse ja/või omahinna järgi.

Tooriku pindade töötlemine järjestikuste või paralleelsete lõikuritega ning mitme tooriku järjestikune või paralleelne asetus lõikurite suhtes annavad operatsioonide skeemid, mis erinevad siirete ajalise ühitamise tingimuste poolest. Sellest olenevalt võivad operatsioonid olla järjestikused, paralleelsed või paralleel-järjestikused.

Töötlemiseks paigaldatavate toorikute arvu järgi võib pingioperatsioonide skeemid jaotada ühe- ja mitmekohalisteks.

Kasutatavate lõikuride arvu järgi võivad operatsioonide skeemid olla ühe- või mitmeriistalised.

Tehnoloogilise operatsiooni projekteerimisel püüab tehnoloog vähendada tükiaega. Põhijaja elementide kestust vähendatakse kõrge tootlikkusega lõikurite ja lõikerežiimide rakendamisega, läbimite ja siirete arvu vähendamisega pindade töötlemisel. Abiaega vähendatakse pingi tühikäikude aja vähendamisega ja nüüdisaegsete kiiresti toimivate kinnituseadmete paigaldusrakiste kasutamisega.

Iga operatiivaja elemendi ajalise kestuse vähendamise kõrval kasutatakse ka põhi- ja abiaja elementide ühitamist; sel juhul arvestatakse tükiaja sisse kõikidest ühitatavatest elementidest vaid pikema ajalise kestusega elemendid. Sellise ühitamise võimalused olenevad pingiope- ratsiooni ülesehitusskeemist.

6.3.7.1 Töötlemisvarude määramine

Töötluslisa on toorikult eemaldatav materjali osa, mis on tingitud tooriku valmistamise tehnoloogiast (valu- ja stantsimiskalded jm). Töötluslisa ei osale tehnoloogilise protsessi mõöt- analüüsis.

Töötlusvaru on toorikult eemaldatav materjali osa, mida on vaja, et tagada detaili täpsus ja pinna kvaliteet.

Tehakse vahet töötlemisvaruga siirdele z_i ja üldise töötlemisvaruga z_o

$$z_o = \sum_{i=1}^n z_i, \text{ kus}$$

z_o – on kogu materjalikiht, mis eemaldatakse tooriku pinnalt töötlemisprotsessi käigus too rikust valmisdetailini;

z_i – töötlemisvaru siirdele;

n – siirete (operatsioonide) koguarv antud pinnale.

Täpsem viis töötlusvaru määramiseks on analüütiline, mille järgi vajalik minimaalne töötlus- varu siirdele leitakse järgmiselt:

$$z_{i\min} = R_{z_{i-1}} + H_{i-1} + p_{i-1} + \varepsilon_i, \text{ kus}$$

$z_{i\min}$ – minimaalne töötlusvaru;

$R_{z_{i-1}}$ – eelmisel siirdel tekkinud pinnakaredus;

H_{i-1} – eelmisest siirdest jäänud pinna defektse kihi sügavus;

p_{i-1} – eelmisest siirdest jäänud ruumilised hälbed;

ε_i – antud siirde paigaldusviga.

Operatsiooni mõõtanalüüsiga leitakse minimaalne töötlusvaru

$$Z_{\min} = R_{z_{i-1}} + H_{i-1}$$

Ülejäänud minimaalse töötlusvaru komponendid võetakse arvesse mõõtanalüüsi käigus.

Näiteks töötlemisvaru arvutamine treimisel:

$$2Z_{\min} = 2(R_{z_{i-1}} + H_{i-1} + \sqrt{\rho^2_{i-1} + \epsilon^2_i})$$

Masinadetailide valmistamise tehnoloogiliste protsesside väljatöötamisel on väga oluline tehnilis-majanduslik tähtsus kõikide siirete optimaalsete töötlemisvarude ja tooriku mõõtmete tehnoloogiliste tolerantside määramisel.

Liiga suured töötlemisvarud põhjustavad detailide valmistamisel materjali ülekulu – nad tingivad täiendavate tehnoloogiliste siirete rakendamist, suurendavad töötlemise töömahtu ja energia- ning tööriistakulu, mis omakorda tõstab detaili omahinda. Mõnel juhul eemaldatakse liiga suurte töötlemisvarude puhul töödeldava detaili kõige kulumiskindlamad pinnakihid.

Liiga väikesed töötlemisvarud ei taga metalli vigastatud pinnakihtide eemaldamist ja nõutud täpsuse ning pinnakareduse saavutamist ja real juhtudel kujunevad kõvas valukooriku- või tagitsoonis lõikuri tööks sobimatud tehnoloogilised tingimused. Liiga väikeste töötlemisvarude tõttu kasvab praagi hulk, mis suurendab toodangu omahinda.

Liiga suured tooriku mõõtmete tolerantsid muudavad tehnoloogilised operatsioonid häälestatud pinkides keerukaks, vähendavad töötlemistäpsust ja raskendavad rakiste kasutamist.

Optimaalsete töötlemisvarude määramine on tihedalt seotud tooriku vahe- ja algiirmõõtmete kindlaksmääramisega. Need mõõtmised on vajalikud stantside, survealuvormide, mudelite kärnikastide, rakiste, erilõikuride ja -mõõteriistade konstrueerimiseks, samuti metallilõikepinkide ja teiste tehnoloogiliste seadmete häälestamiseks. Optimaalsete töötlemisvarude rakendamisel võib põhjendatult määrata lähtetooriku kaalu, lõikerežiimid ja mehaanilise töötlemise operatsioonide ajanormid.

6.3.7.2 Operatsioonide vahemõõtude määramine

Välispindade töötlemisel:

1. määratakse detaili minimaalne piirmõõt:

$$A_{d \min} = A_{\max} - T_A, \text{ kus}$$

A_{\max} – detaili antud pinna maksimaalne piirmõõt;

T_A – antud mõõdu tolerants;

2. määratakse või arvutatakse minimaalne vajalik töötlemisvaru antud siirdele:

$$Z_{i \text{ min}};$$

3. minimaalsele detaili piirmõõdule liidetakse minimaalne töötlemisvaru, mille tulemusena saadakse tooriku minimaalne mõõde

$$A_{\text{toorik min}} = A_{d \text{ min}} + Z_{i \text{ min}};$$

4. määratakse tooriku valmistamise tolerants T_{toorik} , kui tegemist on ühesiirdelise töötlemisega. Juhul, kui tegemist on antud pinna töötlemisel kahe või enama siirdega, siis võetakse eelmise siirde tolerants:

$$T_{i-1};$$

5. tooriku maksimaalne mõõde kujuneb seejärel:

$$A_{\text{toorik max}} = A_{\text{toorik min}} + T_{i-1}.$$

Antud pinna mitmesiirdelisel (operatsioonilisel) töötlemisel arvutatakse töötlemisvarud igale siirdele eraldi ja nende summeerimisel saadakse üldine töötlemisvaru Z_0 . Sisepindade töötlemisel tooriku mõõt väheneb.

Operatsioonimõõtmelise tolerantsi määramisel peab reeglina olema täidetud tingimus

$$T_{\text{op}} \geq \omega_{\text{st}}, \text{ kus}$$

T_{op} – operatsioonimõõtmelise tolerants;

ω_{st} – operatsioonimõõtmelise valitud töötlemisviisi statistiline viga.

Töötlemistäpsus ω_{st} sõltub töötlemismeetodist, pingi jäikusest, töödeldavast ja lõikuri materjalist, lõikuri geomeetriast, lõikerežiimi parameetritest, lõikuri mõõtu häälestamisest, kulumisest, lõiketemperatuurist, rakise täpsusest, kinnitusjõududest jm.

6.3.7.3 Tehnoloogilise mõõteahela lahendamine

Tehnoloogiliste mõõtahelate lahendamisega määratakse antud operatsioonil detaili töötlemiseks vajalikud operatsioonimõõdud ja tolerantsid sellel operatsioonil kasutatavatest tehnoloogilistest baasidest.

Operatsioonimõõtahel on mõõtmete kogumi kinnine kontuur, mis määrab erinevatel tehnoloogilise protsessi etappidel kujunenud mõõtmetevahelised sidemed.

Operatsioonimõõtahela antud operatsiooniga tagatav mõõde on mõõtahela koostislüli. Sulgevaks lüliks on antud operatsioonil tagatud mõõtme kaudu saadud lüli. Seega operatsioonieskiisidel on reeglina tähistatud ahela koostislülid, mille parameetrid arvutatakse lähtudes sulgeva lüli vastavatest parameetritest (nimimõõtmed, tolerantsid, hälbed jne).

Selel 6.2 on ahela lülid kujutatud vektoritena, mis lihtsustab mõõtahela ja võrrandi koostamist. Mõõtahelate abil lahendatakse kas otsene või kaudne ülesanne. Otsese ülesande lahendamisel leitakse koostislülide nimimõõtmed, tolerantsid ja tolerantsivälja tsentri koordinaadid.

Kaudse ülesande lahendamisel leitakse sulgeva lüli parameetrid. Selle lahendamisega kontrollitakse tavaliselt, kas otsene ülesanne on õigesti lahendatud.

Tehnoloogia projekteerimisel on üheks ülesandeks selliste tehnoloogiliste mõõtmete määramine, mis tagavad detaili nõutava täpsuse ja arvestavad detaili baseerimist erinevatel operatsioonidel.

Selgitava näitena on selel 6.2 kujutatud detaili tehnoloogiliste mõõtmete määramine. Antud näites piirduakse pikkusmõõtude analüüsiga. Oletagem, et konstruktor on määranud astmete pikkused täpsusega $\pm IT14/2$.

Detaili pikkusmõõdud ja tolerantsid on järgmised:

$L = 220 \pm 0,8 \text{ mm};$

$L1 = 25 \pm 0,2 \text{ mm};$

$L2 = 70 \pm 0,3 \text{ mm};$

$L3 = 25 \pm 0,2 \text{ mm};$

$L4 = 60 \pm 0,3 \text{ mm};$

$L5 = 50 - 0,3 \text{ mm}.$

Võlli töödeldakse arvjuhtimisega treipingis kahe paigaldusega. Esimeses paigalduses on tehnoloogilisteks baasideks tsentriavad ja otspind A. Töödeldakse pindu 1, 2, 3 ja 4.

Antud paigaldusskeemi järgi töödeldes tagab pink mõõtmel T1, T2, T5, T6. Nende mõõtmete täpsus sõltub mõõtesüsteemi pingi ja häälestuse täpsusest. Konstruktori nõutud mõõtmel L1 ja L2 on eeltoodud tehnoloogiliste mõõtmeltega seotud mõõtahelate kaudu:

$$L1 = L - T1 \quad \text{ja} \quad L2 = L - T2$$

Vastavalt nendele on mõõtmete hälvete suuruseks:

$$\omega_{L1} = \omega_L + \omega_{T1}$$

$$\omega_2 = \omega_L + \omega_{T2}$$

Töödeldakse pindu 5 ja 6. Konstruktori poolt nõutud mõõtmete L3, L4, ja L5 täpsuse võib määrata mõõtahelatest lähtudes ja mõõtmete hälbed on vastavalt:

$$L3 = L - T3, \quad L4 = L - T4, \quad L5 = T5 + T4 - L$$

$$\omega_{L3} = \omega_L + \omega_{T3}$$

$$\omega_{L4} = \omega_L + \omega_{T4}$$

$$\omega_{L5} = \omega_{T5} + \omega_{T4} + \omega_L$$

Lähtudes eeltoodud mõõtahelatest, peavad esimeses paigalduses töötlemisel olema täiendatud järgmised nõuded:

$$\omega_L + \omega_{T1} \leq [\omega_{L1}]$$

$$\omega_L + \omega_{T2} \leq [\omega_{L2}]$$

Oletagem, et summaarne hälve otspindade töötlemisel on $\omega_{T1} = \omega_{T2} = 0,08$ m. Kui nüüd lähtuda konstruktori antud täpsustest ja freesida völli pikkusega

$$L = 220 + 0,8 \text{ mm},$$

selgub, et edasi pole völli võimalik ei häälestatud pingis ega ka arvprogrammipingis töödelda, sest $\omega_L + \omega_{T1} = 1,6 + 0,08 > 0,4$ mm.

Sama kehtib ka kõigi ülejäänud astmete puhul. Seetõttu tuleb töötlemisel detaili üldpikkus freesida mitte konstruktori poolt nõutud täpsusega ω_L , vaid kogu detaili otstarbekat töötlemist tagava täpsusega. Oletagem, et antud detailil $\omega_L = 0,3$ mm. Seega

$$\omega_L + \omega_{T1} = 0,3 + 0,08 < 0,4 \text{ mm}$$

$$\omega_L + \omega_{T2} = 0,3 + 0,08 < 0,6 \text{ mm},$$

mis näitab, et esimeses paigalduses on konstruktori püstitatud täpsusnõuded täidetavad.

Teises paigalduses peavad olema täidetud järgmised nõuded:

$$\begin{aligned}\omega_L + \omega_{T3} &\leq [\omega_{L3}] \\ \omega_L + \omega_{T4} &\leq [\omega_{L4}] \\ \omega_L + \omega_{T5} + \omega_{T4} &\leq [\omega_{L5}],\end{aligned}$$

kuid $0,3 + 0,08 + 0,08 = 0,46 > 0,3$ mm.

Nagu näha, on kaks esimest tingimust täidetud, kuid kolmas täitmata. Juhul, kui töötlemise täpsust pole otstarbekas või võimalik tõsta, tuleb muuta tehnoloogiat, et tagada mõõtme L5 nõutud täpsus.

Üheks võimalikuks tehnoloogia variandiks on treida esimeses paigalduses otspind T5 töötlusvaruga ning teises paigalduses otsad mõõtu T4 ja T5.

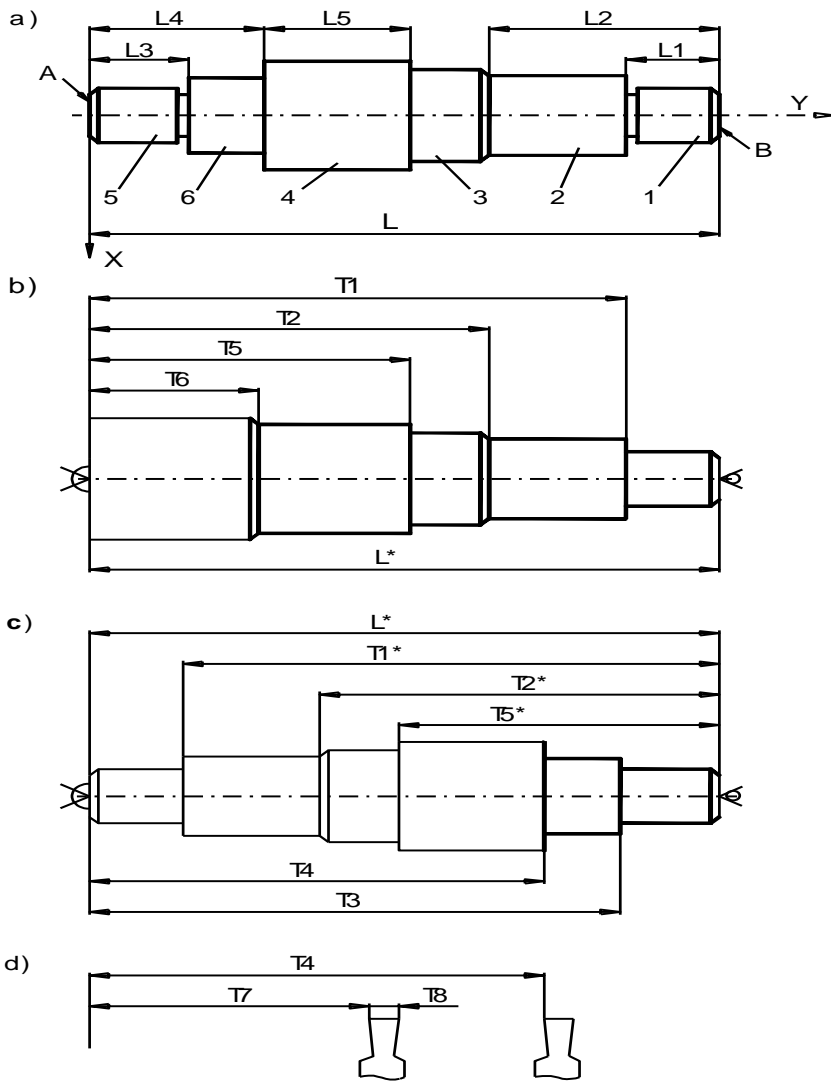
Sellega elimineeritakse mõõtahelast L5 lüli L ning täpsuse nõudeks jääb (selel 6.2 variant d)

$$\omega_L + \omega_{T7} + \omega_{T8} \leq [\omega_{L5}],$$

kus ω_{T8} on tera laiuse hälve ($\omega_{T8} = 0,01$ mm). Viimane tingimus on täidetud, sest

$$0,08 + 0,08 + 0,01 < 0,3.$$

Seega tagab valitud tehnoloogia detailide nõutava täpsuse.



Sele 6.2 Mõõtahelate skeemid tehnoloogia projekteerimisel: a – detaili mõõtmete skeem; b – tehnoloogiliste mõõtmete skeem esimeses paigalduses; c – tehnoloogiliste mõõtmete skeem teises paigalduses; d – mõõtmete skeem otspindade töötlemisel sooneteraga

6.3.7.4 Lõikerežiimide, aegade ja hinna määramine

Lõikerežiimist (lõikesügavusest t , ettenihkest s ja lõikekiirusest v) oleneb töötlemise täpsus, pinna kvaliteet, tootlikkus ja töötlemise omahind. Kõigepealt määratakse kindlaks lõikesügavus, siis ettenihe ja lõpuks lõikekiirus.

Ühe läbimiga töötlemisel võetakse lõikesügavus võrdseks vahetöötlemisvaruga, mitme läbimiga töötlemisel võetakse maksimaalselt lubatav lõikesügavus, kusjuures püütakse vähendada läbimite arvu. Viimastel läbimitel vähendatakse sageli lõikesügavust (näiteks lihvimisel) vastavalt etteantud täpsusele ja pinnakaredusele.

Koorivtöötlemisel piirab ettenihet tehnoloogilise süsteemi tugevus ja jäikus ning pingi võimsus. Puhas- ja viimistlustöötlemisel määratakse maksimaalselt lubatav tehnoloogiline ettenihe pinnasiledusklassi järgi või järgitakse tööriistatootjate soovitusi.

Lõikekiirus arvutatakse lõiketooria valemite järgi [6.1, 6.2, 6.3], valitakse tööriistatootjate kataloogidest [6.4, 6.5, 6.6, 6.7] või saadakse, kasutades erinevaid rakendusi ja programme.

Kindlaksmääratud lõikekiiruse järgi leitakse arvutuslik pöörete arv minutis (pöörlemissagedus):

$$n = \frac{v \times 1000}{\pi \times D}, \text{ kus}$$

n – pöörete arv;

v – kiirus m/min;

D – tooriku läbimõõt (mm).

Detaili valmistamiseks kuluv aeg on leitav valemiga:

$$t_{tk} = t_p + t_a + t_{org} + t_{teen}, \text{ kus}$$

t_p – põhiaeg (töötlemisaeg), mille kestel muudetakse tööpingis (seadmes) detaili kuju, mõõtmeid või omadusi. Määratakse iga operatsiooni (siirde) kohta eraldi;

t_a – abiaeg haarab töid, mis kaasnevad põhiaja täitmisega. See sisaldab tooriku paigaldamiseks, kinnitamiseks ja mahavõtmiseks kuluvat aega, lõikuri paigalduseks kuluvat aega, samuti operatsiooni ajal pingi juhtimisvõteteks ja ka detaili mõõtmiseks kuluvat aega;

t_{org} – organisatsioonilise teenindamise aeg arvestab ajakulu töökoha ettevalmistamiseks tööpäeva algul, töökoha koristamiseks vahetuse lõpul, tööpingi hooldamiseks ja teisteks analoogilisteks töödeks vahetuse kestel;

t_{teen} – tehnilise teenindamise aeg kulutatakse lõikuri vahetamiseks ja vajadusel seadme jälrhäälestamiseks.

Erinevate abiaegade leidmiseks ja töö normeerimiseks võib kasutada aja normatiive (standardaegade normatiivid) või töö analüüsi.

Töö analüüs (*time study*)

Töö analüüsiks nimetatakse töö normaalaja määramist ning see seisneb tegevuste analüüsis, mida töötaja teeb, ja töövahendite ning töötingimuste kirjeldamises.

Töö analüüsi eesmärk on:

- 1) selgitada välja tegelik tööjõuvajadus;
- 2) saada ülevaade, milleks ja kui palju aega kulub ning vastavalt sellele määratleda töökoormused ja töötasu;
- 3) lihtsustada tööde planeerimist ja juhtimist;
- 4) leida kõige otstarbekam töötamise viis.

Töö normaalaeg on aeg, mis on vajalik mingi kindla operatsiooni tegemiseks normaalsetes tingimustes keskmiste oskustega operaatori poolt, kasutades ettekirjutatud meetodikat.

Töö normaalaja uuring koosneb järgnevatest etappidest:

- 1) ülesande püstitus;
- 2) tööoperatsioonide jaotamine elementideks (siireteks, võteteks ja liigutusteks);
- 3) vaatluste arvu määramine;
- 4) vaatlus/mõõtmine;
- 5) iga elemendi ja kogu operatsiooni sooritamise arvutusliku aja määramine.

Töötaja mõõtmine võib tekitada vastakaidemotsioone ning see võib tekitada inimestes ebameeldiva tunde, et keegi neid jälgib. Selle vältimiseks on soovitatav kasutada töötaja mõõtmiseks viisi, mis ei ole koormav ega liialt ressursikulukas. Töö analüüsi tulemusena valmivad reeglina tööde normdokumendid, mis koostatakse tüüpilistele ja laialdaselt kasutatavatele operatsioonidele.

Töö analüüsi meetodid

Vaatlus (otsene ja kaudne) ehk töökoha pildistamine seisneb tööprotsessi analüütilises vaatlemises, mille raames pannakse kirja tööd kirjeldavad olulisemad tegevused, selleks kasutatavad vahendid ja kulutatud aeg. Vaatlust on võimalik läbi viia eelkõige lühiajaliste ja korduva töötsükliga ametite puhul.

Vaatlusel jälgitakse tööprotsessi vahetult kõrval seistes või kaamera vahendusel, töötajaga ei olda otseses kontaktis.

Vaatlusmeetodi eelised:

- 1) saadakse otsene informatsioon;
- 2) lihtne kasutada.

Vaatluse puudused:

- 1) ajamahukas;
- 2) võib olla töötaja tegevuse suhtes erapoolik;
- 3) vajab oskuslikku vaatlejat;
- 4) probleemiks võib olla kõlblikkus ja usaldusväärsus.

Intervjuu

Individuaalsed ja rühmaintervjuud on küsimustike ja vaatluse kõrval ühed enim kasutatud töö analüüsi meetodid. Intervjuu raames kogutakse struktureeritud küsimustiku alusel informatsiooni töö tegija(te)lt ja juhtidelt.

Küsitlus

Küsitluse puhul võib kasutada organisatsioonile spetsiaalselt koostatud või üldkasutatavaid küsimustikke.

Tööaja pildistamine

Tööaja pildistamisel jäädvustab töötaja ajakasutust etteantud päeviku vormis. Pildistamise raames tähendatakse ajalises järjekorras üles kõik tegevused, lisatakse juurde nende teostamiseks kulunud aeg ning sageli ka töö iseloom, seotud isikud jms. Enamasti on ette antud tegevuste loetelu, mille hulgast tuleb töötajal valida sobivaim. Pildistamise kasutamise põhjuseid ja põhimõtteid tuleb töötajatele selgitada, et saada tõepärane informatsioon.

Põhiaja t_p määramine

Kõikidel erinevatel tehnoloogilistel seadmetel arvestatakse t_p määramisel alati lõikuri kogunihke pikkust antud siirdel (operatsioonil), mis toimub selles pingis masinettenihkega.

Näiteks pikitreimisel:

$$t_p = L : s n = (l + l_1 + l_2) : s \times n, \text{ kus}$$

L – lõikuri kogunihke pikkus (mm);

l – töödeldava pinna pikkus (mm);

l_1 – sisselõikepikkus (mm), kuni täieliku lõikesügavuse saavutamiseni, $l_1 = t \operatorname{ctg} \varphi$,

kus t – lõikesügavus (mm), φ – peanurk plaanis kraadides;

l_2 – ülejoosu pikkus (mm), tavaliselt 1–2,5 mm;

s – ettenihe (mm/p);

n – tööspindli pöörlemissagedus (1/min).

Töötlemise maksumus C_p ühe detaili kohta on leitav valemiga [6.2]

$$C_p = C_m + C_s + C_i + C_t, \text{ kus}$$

C_m – töötlemise maksumus;

C_s – seadme, rakise ja tööriistade seadistamise maksumus;

C_i – detaili mahavõtmise ja kinnitamise maksumus;

C_t – tööriista maksumus.

Töötlemise maksumus C_m

$$C_m = t_p \times (L_p + B_p), \text{ kus}$$

t_p – töötlemise aeg;

L_p – tööjõu maksumus tunnis;

B_p – masina üldkulu.

Detaili mahavõtmise ja kinnitamise maksumus C_i

$$C_i = T_i \times (L_p + B_p), \text{ kus}$$

T_i – aeg, mis kulub detaili vahetamiseks, lõikerežiimide muutmiseks.

Tööriista maksumus C_t

$$C_t = (1/N_p) \times [T_c \times (L_p + B_p) + T_g \times (L_g + B_g)], \text{ kus}$$

N_p – töödeldud detailide arv tööriista terituse kohta;

T_c – tööriista vahetuseks kuluv aeg;

T_g – tööriista teritamiseks kuluv aeg;

L_g – tööjõu maksumus teritamisel tunnis;

B_g – terituspingi üldkulu norm.

6.4 Tüüp- ja grupitehnoloogia

Rühmtootmise tehnoloogiliseks protsessiks on selline rühmoperatsioonide järjestus, mis tagab kõigi antud rühma kuuluvate detailide töötlemise ühtses tehnoloogilises järjestuses.

Tehnoloogiliseks rühmoperatsiooniks on ühel töökohal kindla rühm- või ümberhäälestatava rakistuse abil sooritatav mitmekesiste konstruktiivsete tunnustega tootepere töötlemise operatsioon.

Rühmtootmine põhineb unifitseerimisel:

- **tüüpitehnoloogia** – objektide süstematiseerimine konstruktiivse sarnasuse järgi, kasutatakse klassifitseerimist ja kodeerimist. Sarnastel objektidel on sama tehnoloogiline marsruut;
- **grupitehnoloogia** – tehnoloogilise ühtsuse leidmine konstruktiivselt erinevate objektide juures. Iseloomustavaks on teatud operatsioonide seadmete, rakistuse ja häälestuse ühtsus.

Unifitseerimise esimeseks etapiks on detailide klassifitseerimine nende valmistamise tehnoloogia ja ülesannete järgi. Selle ülesande lahendamine kergeneb detailide klassifikaatori koostamisega, mille kasutamisel on kerge määrata vaadeldava detaili kuuluvust ühte või teise klassi. Detailide klassifitseerimisega kaasneb nende konstruktsiooni unifitseerimine ja normaliseerimine.

Tüüpitehnoloogilised protsessid töötatakse välja tehnoloogiliste lahenduste kogemuste analüüsi, süstematiseerimise ja üldistamise alusel. Tehnoloogiliste protsesside tüübistamine on vahetult seotud tehnoloogiliste tüüpikistuste konstrueerimisega. Kõik see lubab tehnoloogilisi protsesse paremini rakistada ja samal ajal lühendab tähtaegu ning muudab tootmise odavamaks.

6.4.1 Grupitehnoloogia

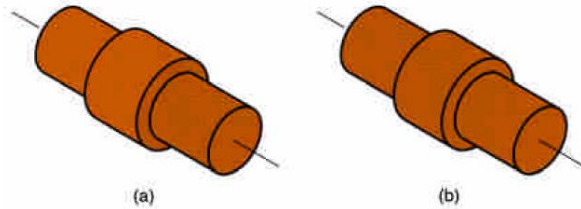
Grupitehnoloogia on tootmisfilosoofia, kus sarnaste detailide identifitseerimist ja grupeerimist kasutatakse ära projekteerimisel ja tootmisel. Sarnased detailid grupeeritakse tootepere-
desse, kus erinevatel detailidel on sarnased töötlemisoperatsioonid [6.8].

Grupitehnoloogiat rakendatakse moodultootmises, kus sarnased seadmed või protsessid on koondatud moodulitesse (rakkudesse). Iga moodul (rakk) on võimeline valmistama detaili, tooteperet või piiratud arv tooteperesid. Sageli koondatakse seadmed moodulisse nii, et oleks võimalik töödelda kõiki erinevaid detailide variante, mis tootepere-
desse kuuluvad.

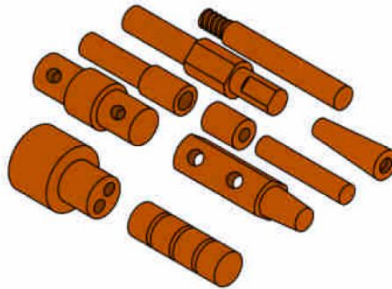
Tootepere on grupp detaile, millel on sarnane geomeetiline kuju ja suurus või sarnased tehnoloogilised operatsioonid. Tootepered on grupitehnoloogia põhiliseks tunnusjooneks. Nendes olevad detailid on alati erinevad, kuid nende sarnasus on piisav, et neid saaks grupeerida ühte tootepere-
de.

Tootepere-
desse kuuluvad detailid võivad olla identsed kuju ja suuruse poolest (sele 6.3), kuid neil võivad olla erinevad tootmiskogused, tolerantsid või materjalid.

Tooteperre võivad kuuluda erineva suuruse ja kujuga detailid (sele 6.4), kuid nende valmistamine on suhteliselt sarnane – kõikide detailide toorikuks on silindriline materjal, detailid töödeldakse treimise teel, mõne detaili töötlemiseks on vaja ka freesimist ja/või puurimist.



Sele 6.3 Sarnased detailid tooteperes [6.8]



Sele 6.4 Erinevad detailid tooteperes [6.8]

Detailid grupeeritakse peredesse järgmiste meetodite alusel:

- visuaalne inspeksioon – detailid grupeeritakse visuaalse vaatluse teel;
- detailide klassifikatsioon ja kodeerimine – sarnaste disaini ja tootmisega seotud omadustega detailid identifitseeritakse ja kodeeritakse;
- tootmisvoo analüüs – grupeeritakse detailid, millel on sarnane töötlemismarsruut.

6.4.1.1 Detailide klassifitseerimine ja kodeerimine

Enamik klassifitseerimise ja kodeerimise süsteeme baseeruvad järgmistel põhimõtetel.

- Süsteemid, mis baseeruvad detaili konstruktiivsetel omadustel:
 - põhilised mõõtmed;
 - väline kuju;
 - sisemine kuju;
 - pikkuse ja läbimõõdu suhe;
 - materjal;
 - detaili funktsionaalsus;
 - tolerantsid;

- pinnakvaliteet.
- Süsteemid, mis baseeruvad detaili tehnoloogilistel omadustel:
 - põhiline töötlemisprotsess;
 - operatsioonide järjestus;
 - partii suurus;
 - aastane toodang;
 - töötlemisseadmed;
 - lõikurid;
 - materjali tüüp.
- Süsteemid, mis baseeruvad nii detaili konstruktiivsetel kui ka tehnoloogilistel omadustel.

Klassifitseerimise ja kodeerimise süsteemides kasutatakse peamiselt kolme struktuuri.

- 1) Hierarhiline struktuur (monokood) – iga järgneva sümboli tõlgendamine sõltub eelmise sümboli väärtusest.
- 2) Kett-tüüpi struktuur (polükood) – iga jadas oleva sümboli tõlgendamine on alati ühesugune ega sõltu eelmise sümboli väärtusest.
- 3) Segatüüpi struktuur – sisaldab mõlemat kahte koodi.

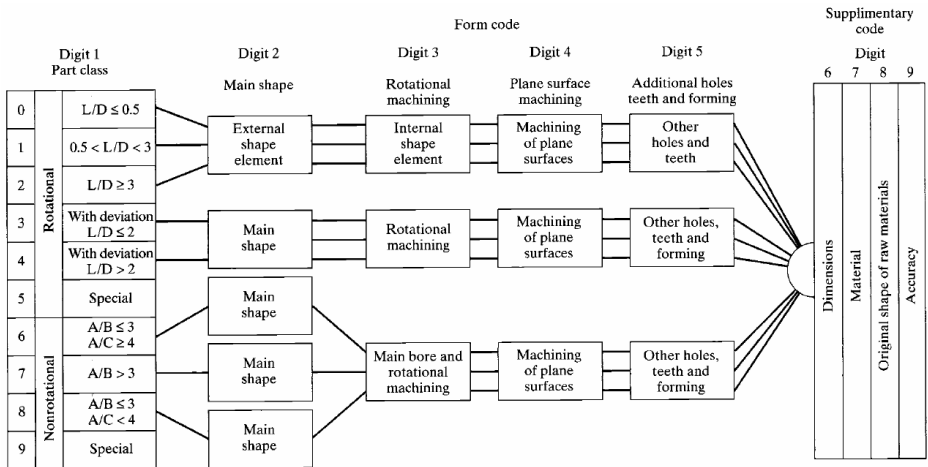
Mõned tähtsamad klassifitseerimise ja kodeerimise süsteemid:

- 1) Opitz (University of Aachen in Germany), kett-tüüpi;
- 2) Brisch System (Brisch-Birn Inc.);
- 3) CODE (Manufacturing Data System, Inc.);
- 4) CUTPLAN (Metcut Associates);
- 5) DCLASS (Brigham Young University);
- 6) MultiClass (OIR: Organization for Industrial Research);
- 7) Part Analog System (Lovelace, Lawrence & Co. Inc.).

Kõige laialdasemalt on nendest süsteemidest levinud Opitzi klassifitseerimise ja kodeerimise süsteem. Sehel 6.5 on näidatud selle süsteemi põhistruktuur ja sehel 6.6 selle süsteemi kodeerimine silindrilise detaili korral.

Detail klassifitseeritakse rea tunnuste järgi ja saadakse üheksakohaline kood, mis iseloomustab antud detaili ja selle valmistamiseks vajalikku tehnoloogiat. Kood sisaldab järgmist:

- 1) koodi esimene number iseloomustab detaili üldkuju;
- 2) teine number iseloomustab detaili välispindu ja tema elemente;
- 3) kolmas number iseloomustab sisepindu ja nende elemente;
- 4) neljas number iseloomustab tasapindade töötlemist;
- 5) viies number iseloomustab ülejäänud elemente;
- 6) kuues number kirjeldab detaili mõõte;
- 7) seitsmes number iseloomustab detaili materjali
- 8) kaheksas number kirjeldab tooriku kuju;
- 9) üheksas number kirjeldab nõudeid täpsusele.



Sele 6.5 Opitz'i süsteemi põhistruktuur

Digit 1		Digit 2		Digit 3		Digit 4		Digit 5					
Part class		External shape, external shape elements		Internal shape, internal shape elements		Plane surface machining		Auxiliary holes and gear teeth					
Rotational parts	0	$L/D \leq 0.5$		0 Smooth, no shape elements		0 No hole, no breakthrough		0 No surface machining		No gear teeth	0	No auxiliary hole	
	1	$0.5 < L/D < 3$		1 No shape elements		1 No shape elements		1 Surface plane and/or curved in one direction, external			1	Axial, not on pitch circle diameter	
	2	$L/D \geq 3$		2 Stepped to one end or smooth Thread		2 Stepped or stepped to one end Thread		2 External plane surface related by graduation around the circle			2	Axial on pitch circle diameter	
	3										3 Stepped to both ends No shape elements		3 Stepped to both ends Thread
	Nonrotational parts	4			4 Stepped to both ends Functional groove		4 Stepped to both ends No shape elements		4 External spline (polygon)		4	Axial and/or radial and/or other direction	
5				5 Stepped to both ends No shape elements		5 Stepped to both ends Thread		5 External plane surface and/or slot, external spline		5	Axial and/or radial on PCD and/or other directions		
6				6 Stepped to both ends Thread		6 Stepped to both ends Functional groove		6 Internal plane surface and/or slot		6	Spur gear teeth		
7				7 Stepped to both ends Functional groove		7 Stepped to both ends Functional cone		7 Internal spline (polygon)		7	Bevel gear teeth		
8			8 Stepped to both ends Operating thread		8 Stepped to both ends Operating thread		8 Internal and external polygon, groove and/or slot		8	Other gear teeth			
9			9 All others		9 All others		9 All others		9	All others			

Sele 6.6 Opitz'i süsteemi kood silindrilise detaili korral

Grupitehnoloogia eelised:

- 1) tööriistade, rakiste ja seadistuste standardiseerimine;
- 2) väheneb materjalikäitlemine;
- 3) detaile transportitakse tootmisrakkude sees, mitte terves tehases;
- 4) lihtsustub tootmise planeerimine;
- 5) väheneb WIP ja tootmiseks kuluv aeg;
- 6) toodete kõrgem kvaliteet.

Grupitehnoloogia puudused:

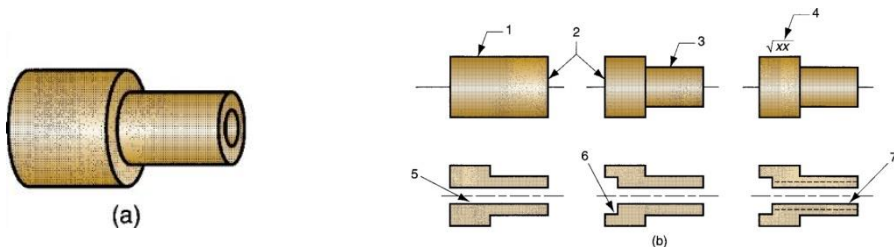
- 1) tooteperede identifitseerimine keeruline;
- 2) suure hulga erinevate detailide jooniste läbivaatamine ja grupeerimine nõuab mahukat lisatööd;
- 3) keerukas seadmete ümberpaigutamine tehases saamaks otstarbekaid tootmisrakke.

6.4.1.2 Kompleksdetail

Kompleksdetail antud tooteperele on hüpoteetiline detail, mis sisaldab kõikide sellesse tooteperesse kuuluvate detailide disaini ja valmistamisega seotud omadusi. Igal üksikul tooteperede detailil on mõned seda tooteperet iseloomustavaid omadused, kuid mitte kõik [6.8].

Tooteperede valmistamiseks projekteeritud tootmisrakud peavad sisaldama kõiki neid seadmeid, mida on vaja kompleksdetaili valmistamiseks. Selline tootmisrakk peab olema võimeline valmistama kõiki detaile nii erineva suuruse kui ka omadustega, mis antud tooteperre kuuluvad.

Selel 6.7 on toodud kompleksdetaili näide, mille tooteperede omadused on defineeritud selel 6.8.



Sele. 6.7 Kompleksdetail [6.8]

Sele 6.8 Kompleksdetaili üksikud omadused [6.8]

Kordamisküsimused

1. Mis on toote tehnoloogilisuus?
2. Nimetage tehnoloogilisuse liigid.
3. Nimetage tehnoloogilisuse hindamise viisid.
4. Nimetage vähemalt 3 tehnoloogilisuse põhinäitajat.
5. Millised omadused iseloomustavad toote kvaliteeti?
6. Milliste näitajate järgi hinnatakse toote kvaliteeti?
7. Millised geomeetriselised parameetrid iseloomustavad pinna kvaliteeti?
8. Millised füüsikalised-mehaanilised parameetrid iseloomustavad pinna kvaliteeti?
9. Mida nimetatakse detaili täpsuseks?
10. Mida nimetatakse detaili töötlemisveaks?
11. Millistest komponentidest koosneb summaarne töötlemisviga?
12. Mida nimetatakse tooriku paigaldamiseks?
13. Mida nimetatakse paigaldusveaks?
14. Millistest veakomponentidest koosneb paigaldusviga?
15. Millisel juhul on vajalik tehnoloogilise süsteemi häälestamine?
16. Kuidas arvutatakse lõiketöötlemisel jäikust? Kirjutage valem.
17. Millistest teguritest sõltub lõikuri erikumine?
18. Millist mõju avaldavad soojuslikud deformatsioonid tehnoloogilisele süsteemile?
19. Millistest põhimõtetest tuleb lähtuda tehnoloogilise protsessi projekteerimisel?
20. Nimetage tehnoloogilise protsessi projekteerimise eesmärke?
21. Mis on tehnoloogilise protsessi projekteerimise lähteandmeteks?
22. Nimetage vähemalt viis tehnoloogia projekteerimise etappi.
23. Millistest asjaoludest tuleb baaside valikul lähtuda?
24. Kirjeldage töötlemismarsruudi projekteerimise põhimõtteid.
25. Nimetage operatsioonide projekteerimisel tehtavad tegevused.
26. Mida nimetatakse töötluslisaks?
27. Mida nimetatakse töötlusvaruks?
28. Nimetage kolm lõikerežiimi parameetrit.
29. Mida nimetatakse põhiajaks ehk töötlemisajaks?
30. Millistest komponentidest koosneb töötlemise maksumus?
31. Mida nimetatakse töö analüüsiks?

32. Nimetage töö analüüsi meetodeid ja kirjeldage neid.
33. Mis on grupitehnoloogia?
34. Mis on moodulootmine?
35. Mis on tootepere?
36. Milliseid meetodeid kasutatakse detailide grupeerimiseks tooteperedesse?
37. Mida tähendab Opitzi süsteemis kood 15030?
38. Mida nimetatakse kompleksdetailiks?

Viited

- [6.1] Davim, J. (2011). Modern Machining Technology: A practical guide. Woodhead.
- [6.2] Kalpakijan, S., Schmid, S. (2006) Manufacturing engineering and technology. 5th ed. Prentice Hall.
- [6.3] Kulu, P. (toim.). Mehaanikainseneri käsiraamat. (2012). Tõlge inglise keelest Mechanical and Metal Trades Handbook. 491 lk.
- [6.4] SECO kataloogid [WWW] <https://www.secotools.com/> (2016)
- [6.5] Mitsubishi kataloogid [WWW] <http://www.mitsubishicarbide.com/en/> (2016)
- [6.6] Sandvik kataloogid [WWW] <http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/pages/default.aspx> (2016)
- [6.7] ISCAR [WWW] <http://www.iscar.com/index.aspx> (2016)
- [6.8] Groover M., P. (2013). Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems, 5th ed., John Wiley & Sons. Inc.

7. TOOTE ANDMETE HALDUS JA KASUTAMINE TOOTMISES (PLM, CAD/CAM)

7.1. Raalintegreeritud tootmine (CIM)

Isegi targimad visionäärid ei oleks suutnud 20. sajandi lõpus ja 21. sajandi alguses ette näha info- ja kommunikatsioonitehnoloogia arenguid ja rakendusi tootmises ja insenerinduses. Ettevõtetel tuleb edu saavutamiseks turul kiiremini uuendada tooteid, arendada tootmist ja optimeerida äriprotsesse. Eelpool mainitud on raske saavutada, kui ettevõttes puuduvad võimalused hallata integreeritud toodete ja tootmisprotsesside informatsiooni kogu toote elukaare ulatuses, kasutada tootmise ettevalmistuse toetamiseks ja tootmise juhtimiseks nüüdisaegseid arvutipõhiseid süsteeme, kasutada efektiivselt tootmisressursse ning suurendada töö tootlikust, s.o kasutada raalintegreeritud tootmissüsteeme (*computer integrated manufacturing, CIM*).

Traditsiooniliselt integreerib CIM erinevaid tootmisprotsesse arvuti abil, vahetades informatsiooni ja juhtides protsesse kooskõlastatult, tagades sealjuures kõrgema kvaliteediga toodete valmistamise lühema ajaga. CIM-juhtimine realiseeritakse reaalajas töötava süsteemina, kasutades juhtimiseks erinevatelt anduritel saadavat informatsiooni protsessi seisundist ja jälgides (monitoorides) protsesse.

Tootmises mõistetakse integratsiooni all üksikute allüksuste (tootmisrakkude, seadmete) niisugust sidustamist, mis võimaldab lühendada tootmistsükli kestust ning automatiseerida tootmist. Ettevõtetes kasutatakse CIM-i peamiselt järgmistes valdkondades:

- 1) turundus;
- 2) insenerindus, s.o toote ja tootmise arendus;
- 3) arendus- ja uurimistööd;
- 4) tööoperatsioonide juhtimine;
- 5) majandusarvestus, raamatupidamine.

Tootmise integratsiooni on otstarbekas vaadelda kolmest aspektist:

- 1) erinevate tootmisega seotud alamsüsteemide (valmistamine, koostamine, transport, ladustamine, kontroll) koostoime ühtse tootmissüsteemi raames;
- 2) eri tootmisallüksuste (jaoskonnad, töökohad jms) integratsioon terviklikuks tootmissüsteemiks;
- 3) tootmise ettevalmistamine ja vahetu tootmise integreerimine ühtsesse arvutivõrku.

Raalintegreeritud tootmine seab primaarseks tootmise. Integreerimist mõistetakse selles kontekstis järgmiselt:

- 1) tootmisega kaasneva info integratsioon tervikuks, mida saavad kõik tootmislülid ühiselt kasutada ning
- 2) kõikide tootmisressursside (seadmete, inimeste, materjalide, energia) integreerimine ühtse infosüsteemi abil.

Raalintegreeritud tootmissüsteemi kuulub tavaliselt viis alamsüsteemi:

- 1) valmistamissüsteem,
- 2) transpordisüsteem,
- 3) ladustamissüsteem,
- 4) mõõte- ja kontrollisüsteem,
- 5) juhtimissüsteem.

CIM-tootmise peamised koostisosad on

- 1) programmjuhtimisega metallilõikepingid vm tehnoloogilised seadmed, mis on varustatud detailide ja lõikuride automatiseeritud vahetamise seadmetega (robotid või manipulaatorid), töödeldava detaili ja tööriista mõõtmete automaatse kontrollimise ja korrigeerimise süsteemidega jms;
- 2) detailide ning töövahendite automatiseeritud transportimise süsteem;
- 3) laod ühes detailide ja töövahendite automatiseeritud vastuvõtmise, valimise ning edasitoimetamise süsteemidega;
- 4) automatiseeritud koostamissüsteem;
- 5) mitmekoordinaadiliste mõõtemasinade või mõõterobotitega varustatud automatiseeritud mõõte- ja kontrollisüsteem;
- 6) tootmise automatiseeritud juhtimise süsteem.

Integreeritud tootmissüsteemide realiseerimise peamine eesmärk on tootmiskulutuste vähendamine, seda eelkõige tootmistsükli lühendamise ja inimtöö mahu vähendamise tulemusena. Tootmine on alati seotud kulutustega. Põhiküsimus on kulutuste tõhususes, kuidas tehtud kulutused väljenduvad toote omadustes ja omahinnas.

Selle kõrgkooliõpikuga on peamiselt seotud CIM-süsteemide tootmisprotsesside arvutipõhine juhtimine (MPM), mida nimetatakse ka digitaalseks tootmiseks, kui meetodite ja tehnoloogiate kogum, mis kirjeldab, kuidas toodet toota. Erinevalt ERP/MRP-süsteemidest, mille peamine eesmärk on tootmise ajaplaanide koostamine, materjalide ja teiste ressursside tellimine, tootmise majandus-tehnoloogiliste näitajate hindamine ning äriprotsesside juhtimine, kasutatakse MPM-i põhiliselt insenerinduse toetamiseks tootmisprotsessi arvutipõhisel ettevalmistamisel ja juhtimisel. MPM realiseerib koostööd erinevate arvutipõhiste süsteemide vahel ja põhineb sellistel tootmistehnika meetoditel nagu tootmissüsteemi ja tootmisprotsesside (tehnoloogia) projekteerimine, paindtootmine (sh APJ-seadmete ja robottehniliste komplekside otstarbekas kasutamine), tootmise planeerimine, kulusäästlik tootmine, kvaliteedi juhtimine jt.

Mitmeid ERP- ja PLM-süsteemide rakendamise eesmärke on tänapäeval raske saavutada ilma MPM-tehnoloogiatega. Arvutitoetuse arendamiseks, MPM-ülesannete lahendamiseks on veel ruumi ja see vajab arendamist, sh reaajas protsesside monitooring ja juhtimine ning inseneriülesannete suurem integreerimine CAD-, CAM-, PLM- ja ERP- jt süsteemidega, nende andmete ettevalmistamiseks (*ettevalmistavad* tegevused), andmete analüüsiks ja kasutajale suupäraseks tegemiseks (*põhitegevused*).

MPM-i lähenemise peamine eesmärk on tootmissüsteemi alamsüsteemide integreerimine, alternatiivsete lahenduste hindamine, et tagada lühemat tarneaega ning odavam tootmist, käibevahendite vajaduse vähendamist, sh süsteemis töös olevate detailide arvu vähendamise teel jms. MPM-i üheks eesmärgiks on samuti võimaldada kiiret ja väikese töömahuga süsteemi muutmist, kui nõudlus muutub.

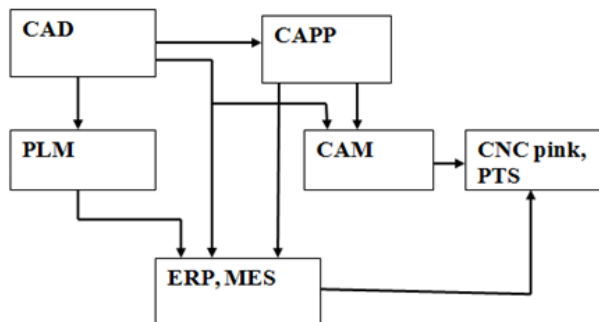
Arvutid toetavad/lahendavad MPM-süsteemis järgmisi tüüpilisi ülesandeid:

- tootearendus, CAD- ja PLM-süsteemid;
- tootmisprotsessi planeerimine:
 - tehnoloogia projekteerimine (vaata CAPP-süsteemid);
 - seadmete paigutuse planeerimine ja analüüs;
 - tootmissüsteemi (liini) töökohtade tööaja pikkuse tasakaalustamine;
 - seadmete koormuse analüüs;
 - tootmisprotsesside simuleerimine;
 - ressursside planeerimine.
- Raalvalmistamine (CAD/CAM):
 - arvjuhtimine (vaata CNC- ja CAM-süsteemid);
 - otsene numbriline juhtimine (Direct Numerical Control, DNC);
 - seadmete/tööriistade/rakiste ja teiste töövahendite arendamine;
 - robottehniliste tootmiskomplekside seadistus ja autonoomne programmeerimine.
- Tootmise dokumentatsiooni koostamine ja väljastamine.
- Töötlemisaja ja tootmiskulude hindamine.
- Kvaliteedi tagamine (Computer-aided quality assurance, CAQ):
 - tõrgete liigi ja mõju analüüs, FMEA;
 - kvaliteedi statistiline kontroll;
 - koordinaatmõõtemasinatega (CMM) seotud andmetöötlus.
- Tootmise efektiivsuse hindamine:
 - üldise seadmete kasutamise efektiivsuse analüüs, OEE.
- Side teiste süsteemidega :
 - side äriinfosüsteemidega, ERP;
 - tootmise täitur- (juhtimis-) süsteemidega, MES;
 - toote andmehaldussüsteemidega, PLM, PDM;
 - tootmise järelevalve ja andmehõive süsteemidega SCADA;
 - inimene-masin liidese toetamine;
 - side jaotatud juhtsüsteemiga (distributed control system, DCS).

Tootmise digitaalset simuleerimist rakendatakse eesmärgiga kasutada enne uue tootmise evitamist olemasolevaid teadmisi, hinnates seni kasutatud tooteid ja tootmisprotsesse, nende evitamise plusse ja miinuseid. Üheks MPM-i ja digitaalse tootmise tarkvarasüsteemi näiteks on Tecnomatix (Siemens AG Software).

Arvutipõhised CAD/CAE/CAM vahendid on muutunud ettevõtetes tänapäeval inseneritöö igapäevaseks normiks. Arvutipõhised meetodid toetavad otsustusprotsesse ja võimaldavad integreerida informatsiooni erinevatest valdkondadest, nagu toote geometria kirjeldamist, geometria muutmist tootmisprotsessis, olemasolevate ressursside otstarbekat kasutust, toote ja tootmise omahinda iseloomustava info töötlemist, tootekomponentide ja tarnijate andmete haldamist jms.

Erinevate kasutatavate tootmise ettevalmistamise ja juhtimise arvutipõhiste insenerisüsteemidevahelised seosed on esitatud seel 7.1.

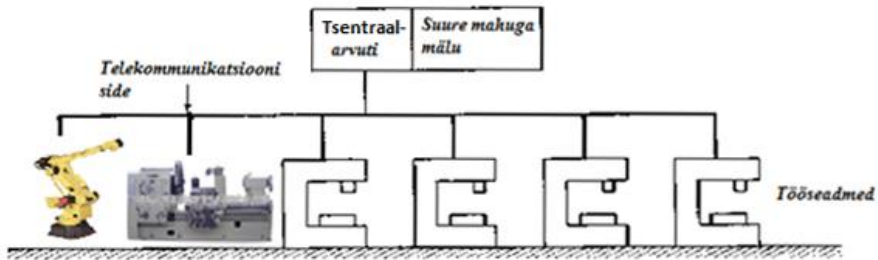


Sele 7.1 Seosed arvutipõhiste tootmise ettevalmistuse ja juhtimise süsteemide vahel

Arvutipõhiste projekteerimissüsteemide kasutamisel on võrreldes traditsioonilise projekteerimisega oluliselt keerukam probleemi formuleerimine, sh projekteeritavaid tooteid ja/või protsesse iseloomustavate muutujate, projekteerimist mõjuvate piirangute ja sihifunktsioonide kirjeldamine. Arvestada tuleb erinevaid tehnika- ja majandusvaldkondade mudeleid. Oluline on projekteerimisprotsessi juhtimine, sh erinevate lahenduste omavaheline koordineerimine. Ettevõttes on CIM-süsteem realiseeritud arvutite kohtvõrkudena (*local area networks*, LAN). CIM-süsteemi juhtimise arhitektuur koosneb arvutisüsteemide riist- ja tarkvarast ning sobivalt realiseeritud liidestest erinevate tootmis-, juhtimis- jt äriefunktsioonide integreerimiseks ettevõttes.

Arvutustehnika kasutamise seisukohast lähtudes realiseerivad CIM-süsteemid otsese arvjuhtimise süsteemide põhimõtteid.

Otsene arvjuhtimine (*direct numerical control*, DNC), tähistab üldkasutatavat terminit, mis tähistab arvutijuhitavate (*computer numerical control*, CNC) seadmete, sh metallilõikepinkide, robotite, stantsimiskeskuste jt seadmete ühendamist arvutivõrku (sele 7.2).



Sele 7.2 DNC-süsteemi koosseis

Vajadus DNC-süsteemide järele tekkis vajadusest salvestada kogu töötlemisprogramm ja võimaldada selle töötlemist (eriti keerukate kujupindade töötlemisel), kuna eraldiseisvate CNC juhtarvutite mälu jm tehnilised ressursid olid piiratud. DNC-süsteemis juhib peaarvuti mitut tööseadet, vahetades seadme juhtarvutitega blokkide kaupa juhtprogrammide osi ja toetades programmide koostamist, s.o CAD/CAM-süsteemi kasutust.

DNC-süsteemide areng on seotud üldise arvutustehnika arenguga. Käesoleval ajal kasutatakse DNC-süsteemides kommunikatsiooni realiseerimiseks laialdaselt traadita raadiosidet. Et arengutega kaasas käia, toetavad DNC-süsteemid tänapäeval integratsiooni tootmise täitursüsteemidega (MES-süsteemidega), võimaldades seadmete monitooringut reaajas, andes operaatorile võimaluse saada operatiivset informatsiooni tootmisprotsessi kulgemisest (nii tekstilisel kui ka graafilisel kujul), toetades tootmise ajaplaanide koostamist ja realiseerimist ja integreerides lisaks CAD/CAM-süsteemidele ka CAPP- ja ERP-süsteeme.

Arengud toimuvad sealjuures arvutipilve (*cloud computing*) tehnoloogia kasutamise suunas.

Arvutipilve põhine projekteerimine ja tootmine (**cloud-based design and manufacturing, CBDM**) tähistab teenusele orienteeritud arvutivõrgu kasutamist toote ja tootmise arendamiseks ja tootmise juhtimiseks. CBDM koosneb kahest peamisest osast:

- 1) arvutipilvepõhine projekteerimine, põhineb teenusele orienteeritud arvutivõrgu arhitektuuri (*service-oriented architecture, SOA*), WEB2.0, CAD/CAM- jt tehnoloogiate kasutamisel jaotatud ning koostööle orienteeritud keskkonna projekteerimises ja loomises;
- 2) arvutipilvepõhine tootmine, põhineb võrgupõhisel tootmise mudelil, mis on suunatud tootmisressursside kooskasutamisele kergelt ümberkonfigureeritava tootmissüsteemi loomiseks, luues võimaluse reageerida efektiivselt muutuvale turuolukorrale.

CBDM rakendab lisaks arvutipilve tehnoloogiale ka teenindusele orienteeritud arvutivõrgu arhitektuuri (*service-oriented architecture, SOA*), asjade interneti (*Internet of things, IoT*), CAD/CAM- jt tehnoloogiaid.

Asjade internet on alates 1997. aastast kasutusel olev mõiste ühendatud objektide (elektroonikaseadmed, andurid, tootmiseseadmed, robotid jms) võrgu tähistamiseks, mis võimaldab vahetada objektide vahel ja süsteemi operaatoriga andmeid kooskõlas rahvusvaheliste standardite soovitustega (*International Telecommunication Union's Global Standards Initiative*).

IoT laieneb tootmisvarude juhtimise, seadmete teeninduse, tootmisprotsessi täpsuse statistilise juhtimise ja süsteemi töökindluse parandamise suunas.

IoT lähenemisel põhineva võrgustatud tootmisseadmete ning tootmise planeerimise ja juhtimise tarkvara kooskasutamine on leidnud tööstuses praktilise rakenduse ja loob eeldused targa tehase (vt ka tööstus 4.0) kontseptsiooni arendamiseks.

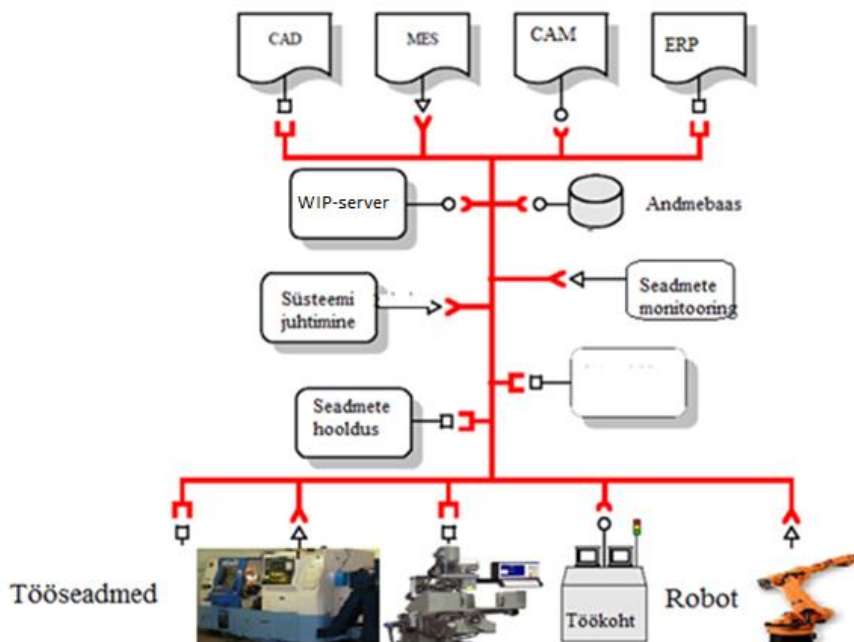
Koos arvutipilve tehnoloogia kasutamisega on CBDM üheks arengusuunaks andmete integreerimine ERP-süsteemiga ja üleminek paberivabale tootmise juhtimisele. Kui veel viis aastat tagasi oli arengu peamine suund personaalarvutite, sh sülearvutite kasutamine, siis viimasel ajal on arengu suunaks paberivabad tehnoloogiad ja mobiilsete Internetipõhiste seadmete (nutitelefonide ja tahvelarvutite) kasutamine operatiivseks andmehõiveks vahetult tootmisest. Operaator skaneerib detailide andmed tootmissüsteemi sisenemisel, sisestab tööoperatsioonid ja edastab andmed juhtsüsteemi, mis kasutab neid tootmise planeerimiseks ja juhtimiseks. Sealjuures soovib operaator (kasutades mobiiltelefone), et tal oleks pidev ülevaade tootmisprotsessi seisukorrast vahetult töökohal.

CIM-süsteemide arendamisel on probleemiks erinevate tootjate poolt tarnitud riist- ja tarkvara ühildatavus, kuna arvutisüsteemide tark- ja riistvara vajavad mistahes tootmissüsteemi muutuse korral töömahukat ümbertegemist, see aga põhjustab kulude suurenemist ja pikendab süsteemide kasutuselevõtu aega. Tootjatele aga meeldivad lihtsad vahendid keerukate ja tootmises reaalset esinevate juhtimisülesannete töökindlaks lahendamiseks. Nõutav on näiteks paindlikkus erinevate CNC-pinkide ja tööstusrobotite juhtarvutite, programmeeritavate kontrolleriite ja tootmispersonal kasutuses olevate andmete kasutamisel reaalajas tootmissüsteemi juhtimiseks ning salvestamine ühtsesse tootmise teabebaasi, aga samuti koostöö võimaldamine ettevõttes kasutusel olevate ERP-, CAD/CAM-, MES- ja teiste süsteemidega.

Tänapäeval on CIM- (sh ka DNC) süsteemide arendajad orienteeritud isehäälestuvate (*plug and play*) lahendite kasutamisele (sele 7.3), kus uute arvjuhtimisega seadmete (APJ-pinkide, tööstusrobotite jm), arvutisüsteemide riist- ja tarkvara ning andmekogude lisamine süsteemile toimub väikese seadistuse töömahuga ja uus süsteemi versioon on kohe valmis kasutamiseks. Isehäälestuv lähenemine võimaldab suhteliselt lihtsalt laiendada olemasolevat tootmissüsteemi, lisades sellele uusi seadmeid.

Isehäälestumine on arvutisüsteemi automaatset konfigureerimist võimaldav lähenemine, mille võttis esmalt kasutusele Microsoft operatsioonisüsteemis Windows 95. See andis võimaluse kasutajale lisada arvutisüsteemile uusi seadmeid, arvuti tundis seadme ära ja võimaldas kasutada.

Seadmetevahelise kommunikatsiooni tagamine CIM-süsteemis eeldab erinevate standardite kasutamist süsteemi realiseerimisel. Ajalooliselt on näiteks erinevate CAD-süsteemide lisamiseks kasutusel standardid, nagu IGES, STEP jt (vt ptk 7.1), arvjuhtimisega tööseadmete (pinkide) tarvis andmete esitamiseks aga CLData, STEP-NC jt andmeformaadid (vt ptk 7.4).



Sele 7.3 Lisa ja kasuta (*plug and play*) süsteemi skeemi lihtsustatud näide

Isehäälestusel on kasutusel laiendatud märgistuskeel (*extensible markup language*, XML) [Wikipedia XML, 07.2015], mis defineerib kogumi reegleid dokumentide (andmete) kodeerimiseks formaati, mida saab lugeda nii inimene kui ka arvuti. XML-i arendamise eesmärgid on lihtsus, üldistus ja kasutatavus internetis. Kuigi XML-i arendamise eesmärgiks oli dokumentide esitamine, kasutatakse seda ka erinevate andmestruktuuride kirjeldamiseks WEB-i keskkonnas.

XML lähenemise kasutamine CIM-süsteemides on tuntud ka kui CAMX-i kasutamine (*computer-aided manufacturing using XML* ehk CAMX [7.10]), mis toetab ettevõttes erinevate seadmete ja robotite suhtlust reaajas.

7.2. Raalprojekteerimine. CAD-süsteemid (*computer-aided design*)

Raalprojekteerimine on toote arendusprotsessist oluline osa ja kuulub üldisema toote elukaare juhtimise (PLM) süsteemi koosseisu. CAD-süsteeme kasutatakse toote arendamisel kas iseseisvalt või koos teiste süsteemidega, nagu insenerianalüüsi süsteemid (CAE), raalvalmistuse süsteemid (CAM) jt.

Raalprojekteerimine (*computer-aided design, CAD*) on arvuti abil toodete, detailide, seadmete ja tööabinõude projekteerimine. CAD-süsteem ühitab nii riist- kui tarkvara, mis on orienteeritud toetama insener-projekteerija tööd. CAD-riistvara hulka kuuluvad tavaliselt lisaks arvutile kvaliteetne graafiline monitor, geomeetrilist modelleerimist toetavad seadmed jm.

CAD-i tarkvara kasutatakse nii kahemõõtmeliste (2D) jooniste kui ka kolmemõõtmeliste (3D) objektide mudelite loomiseks ja töötlemiseks.

Lisaks geomeetrilist kuju kirjeldavale informatsioonile sisaldavad CAD-mudelid kooskõlas kehtivate standarditega täiendavaid andmeid kasutatavate materjalide, mõõtmete täpsuse, pinnakareduste jms kohta.

CAD-i arendused on oluliselt mõjutanud arvutipõhise geomeetria (arvutigraafika) arengut. Keeruka geomeetria puhul toetavad CAD-süsteemid muuhulgas kõverjoonte (2D) ja kujupindade (3D) modelleerimist.

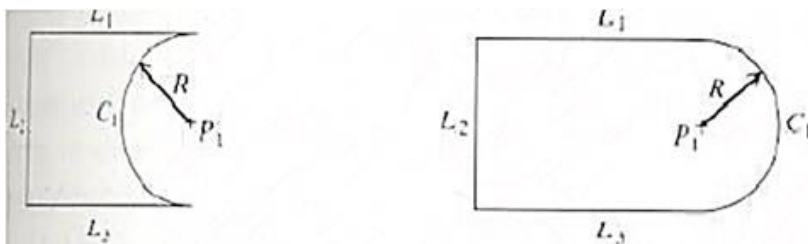
Eialgu, s.o enne 1960. aastat, tähendas lühend CAD peamiselt arvuti abil joonestamise süsteemide (*computer-aided drafting*), mitte projekteerimissüsteemide. Varasemates CAD-süsteemides loodi detailist esmalt kahemõõtmeline kujund, millele lisati kolmas mõõde seda kuju prismaatilisel või silindrilisel defineerides (kasutati n-õ 2,5D-süsteemi).

Eestis oli alguses valdavalt kasutusel süsteem AutoCAD, mille graafika andmete salvestamiseks kasutatav failiformaat DXF oli enim levinud. Joonestuslaudade tagant arvutiekraani taha liikunud konstruktoritele oli AutoCAD-i lähenemine projekteerimisprotsessis lihtsalt omandatav ning ka tollasest arvutivõimsusest piisas. Infotehnoloogia arenguga on toimunud liikumine kolmemõõtmelise projekteerimise suunas, kus konstruktor kavandab toodet juba algsest kolmemõõtmelisena ning väljastab vajadusel toote kahemõõtmelisi vaateid ja kohtlõikeid. Sealjuures oli CAD-süsteemide kasutajale oluliseks arenguks 3D-kuvari toe lisandumine.

Oluliseks funktsiooniks CAD-süsteemides on toote (detaili) geomeetria modelleerimine. Toote geomeetria mudel sisaldab kahte komponenti:

- 1) geomeetria: toote kuju ja mõõtmed;
- 2) topoloogiat: mudelite elementide vaheliste seoste kirjeldus.

Selel 7.4 on näitena [7.6] esitatud kujundid sama geomeetria, kuid erineva topoloogiaga.

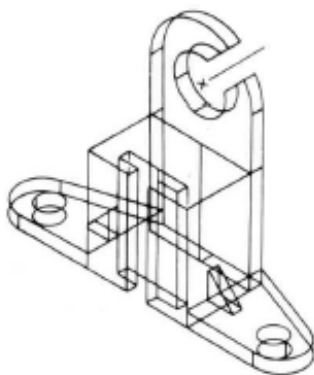


Sele 7.4 Näited kujunditest sama geomeetria, kuid erineva topoloogiaga

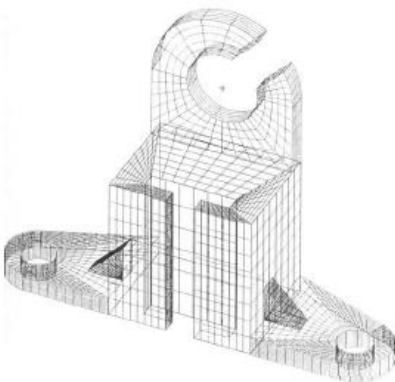
Toote kuju modelleerimiseks kasutatakse CAD-süsteemides erinevaid meetodeid:

- 1) 2D-jooniste esitamine;
- 2) traatkarkass mudelid (*wire-frame models*) (sele 7.5);
- 3) piiravate pindade modelleerimine (*boundary representation – BRP*) (sele 7.6):
 - a) analüütiliste pindade kasutamine (sele 7.7);
 - b) skulptuurpindade (*free-form, curved & sculptured surface* kasutamine (sele 7.8);
- 4) tahkekeha modelleerimine, sealhulgas:
 - a) konstruktiivne tahkekeha geomeetria modelleerimine (*constructive solid geometry, CSG* (sele 7.9));
 - b) tunnustepõhine modelleerimine (*feature based modeling, FBD*);
 - c) parameetriline modelleerimine.

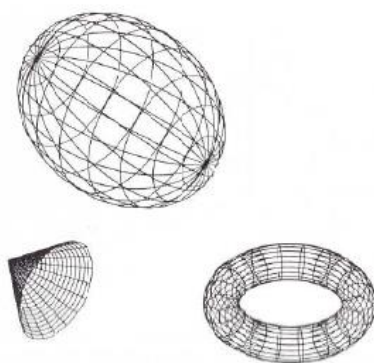
Seledel 7.5–7.9 on toodud mudelite näited [7.6] erinevaid meetodeid kasutades.



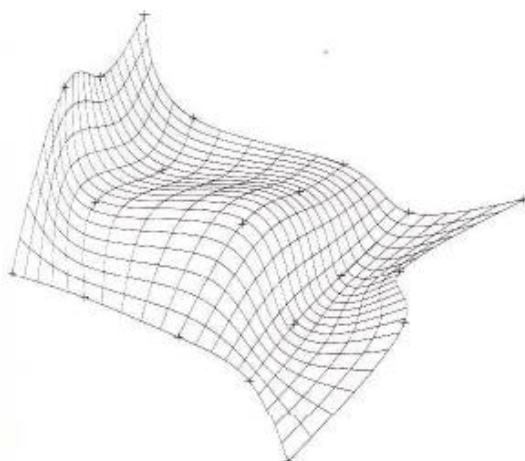
Sele 7.5 Detaili kuju esitamine traatkarkass mudeliga



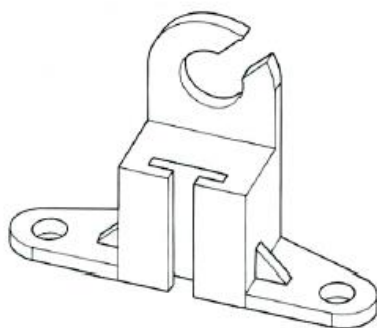
Sele 7.6 Detaili kuju esitamine piiravate pindadena



Sele 7.7 Analüütiliste pindade näited

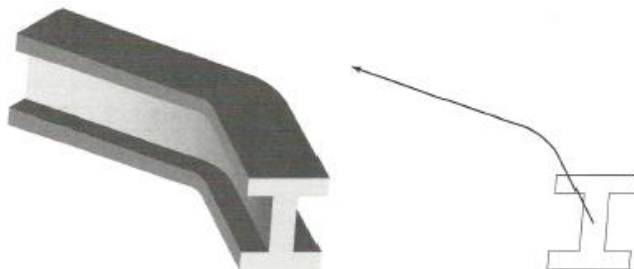


Sele 7.8 Skulptuurpinna näide

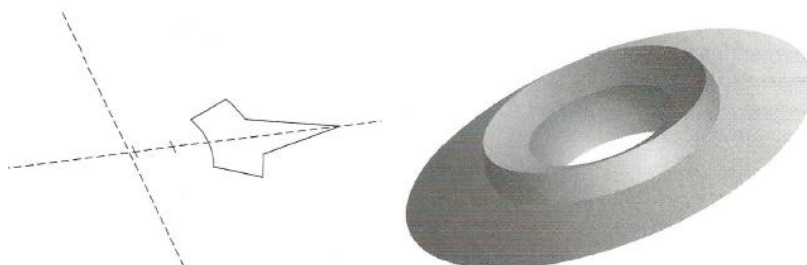


Sele 7.9 Detaili kuju esitamine tahkekeha mudelina

Nüüdisaegsed CAD-süsteemid on peamiselt 3D-süsteemid. Nendes süsteemides kasutatakse kombineeritud geomeetria modelleerimist. Esialgu konstrueeritakse kujundi ristlõige ja seda kas nihutades või pöörates (seled 7.10 ja 7.11) saadakse detaili baaskujund. Taoliselt saadud baaskujundile lisatakse detaili iseärasused, täiendavad elemendid (avad, sooned jms), sh mõõdud jm joonistele vajalikud tingtähised (sele 7.10).

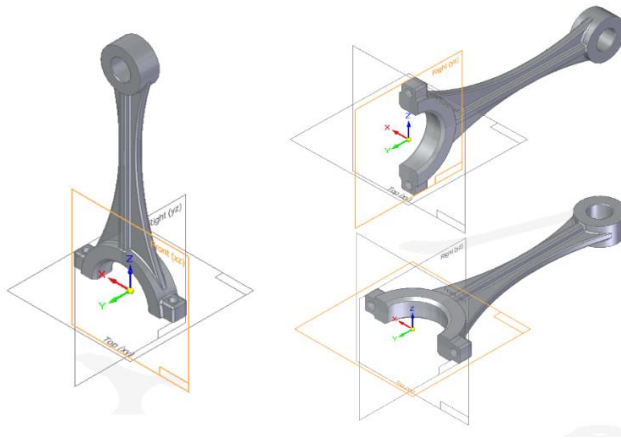


Sele 7.10 Ristlõike kaasahaaramine (nihutamine, *sweeping*)

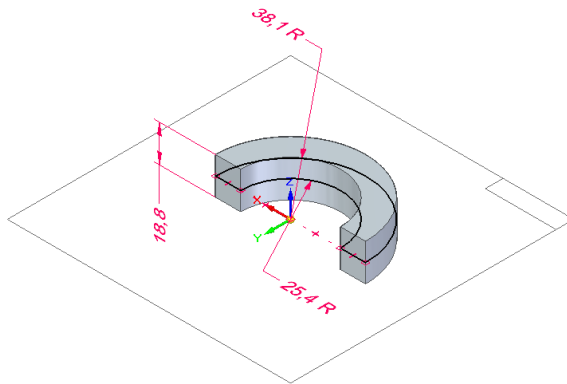


Sele 7.11 Ristlõike pööramine (*turning*)

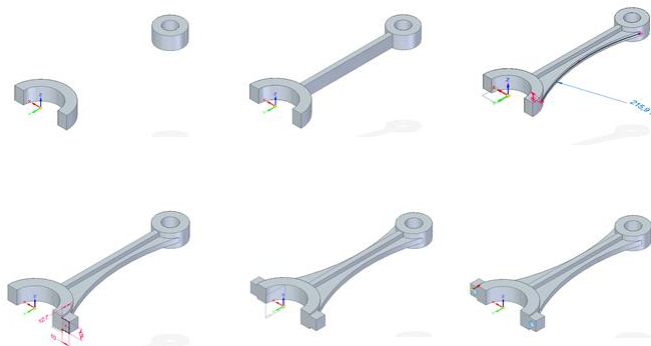
Seledel 7.12 a–e on näitena toodud detaili mudeli koostamine süsteemis Solid Edge (I. Kiolein, Pro Step OÜ).



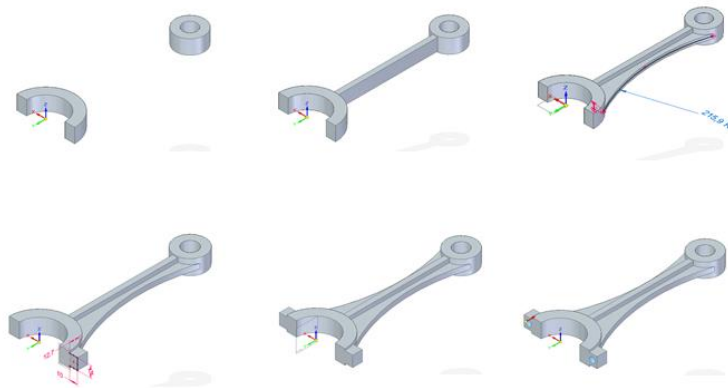
Sele 7.12 a) Modelleerimise tasapinna valik



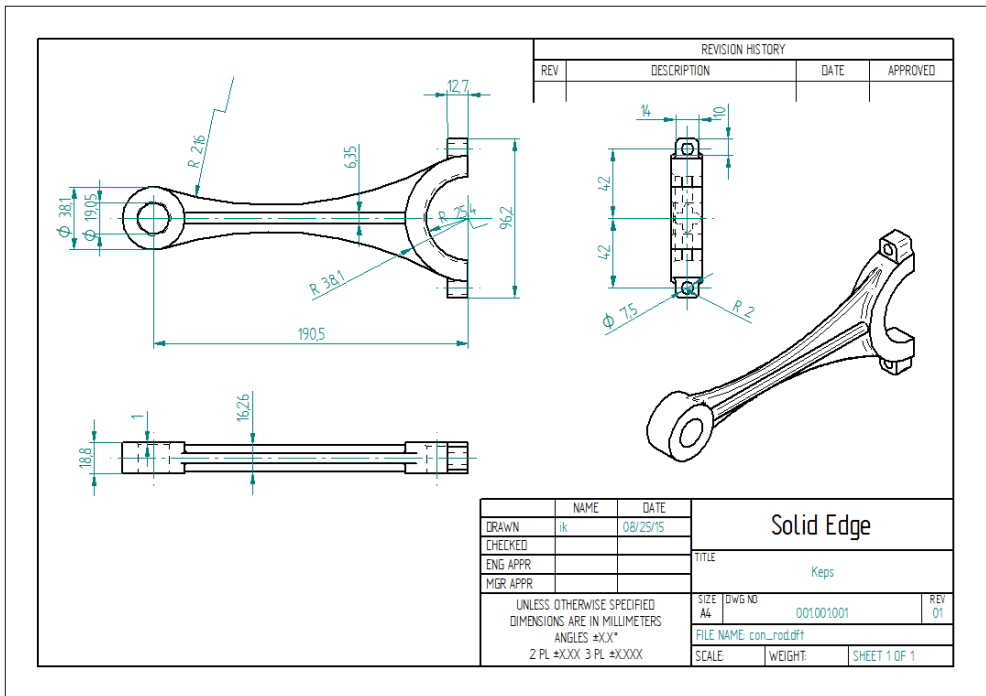
Sele 7.12 b) Baaselemendi põiklõike modelleerimine 2D-kujundina ja selle nihutamine, andes elemendile paksuse



Sele 7.12 c) Kujuseärasuste lisamine baaskujule



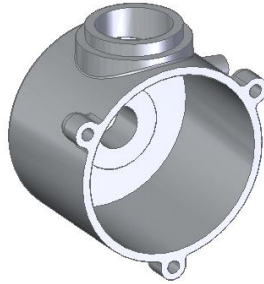
Sele 7.12 d) Faaside ja raadiuste lisamine, materjali valik ja mudeli salvestamine



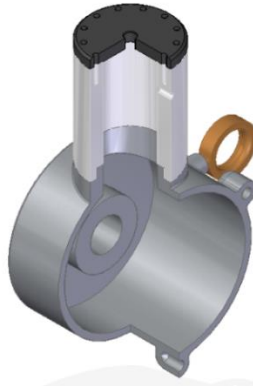
Sele 7.12 d) Joonise genereerimine, mõõtmestamine ja väljastamine

Koostu mudel moodustatakse varem koostatud detailide või koostude mudelistest, arvestades kehtivaid konstrueerimise piiranguid.

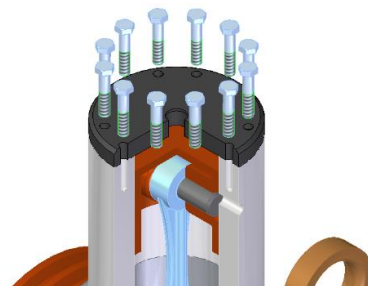
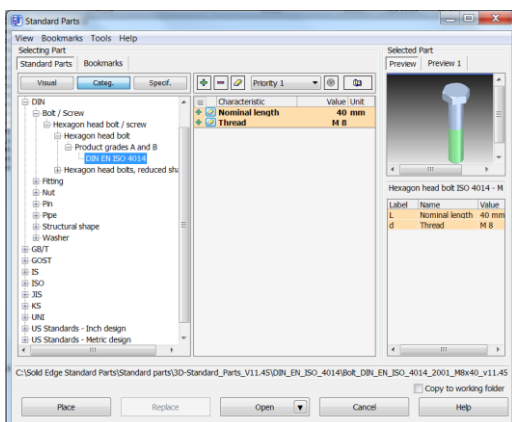
Seledel 7.13 a–f on esitatud koostu modelleerimise näited süsteemis Solid Edge (I. Kiolein, Pro Step OÜ).



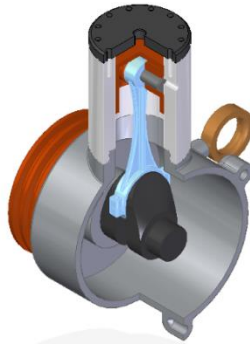
Sele 7.13 a) Koostu esimene komponendi modelleerimine ja selle fikseerimine



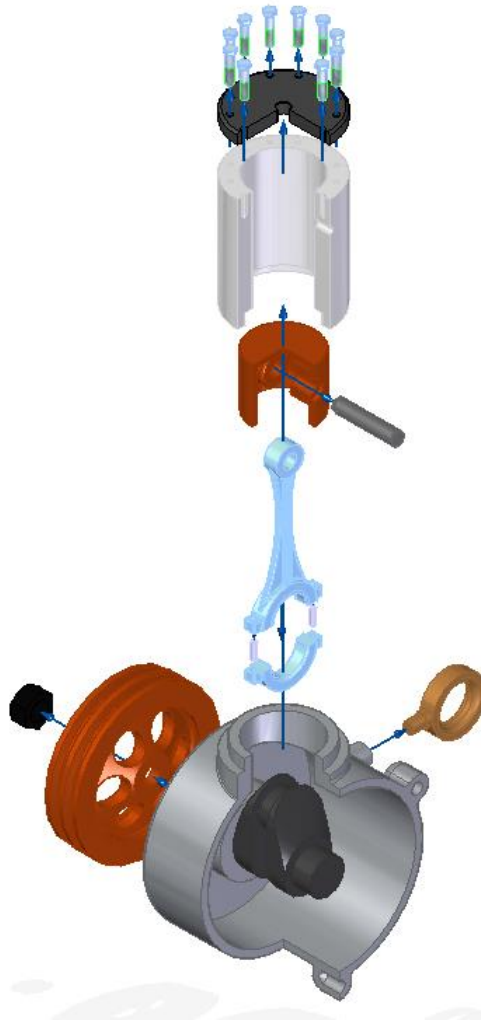
Sele 7.13 b) Täiendavate detailide koostu lisamine, kasutades komponentidevahelisi sidemeid



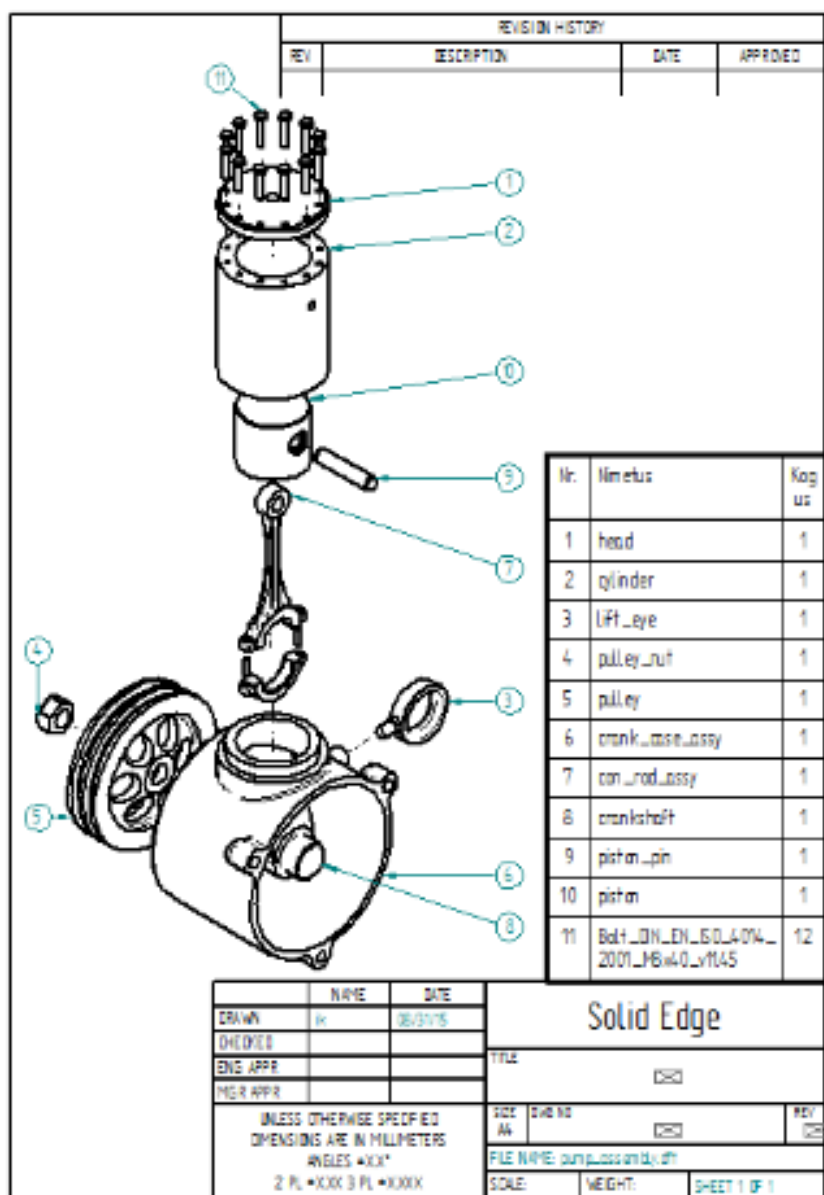
Sele 7.13 c) Standarddetailide lisamine, kasutades lokaalset või internetiraamatukogu



Sele 7.13 d) Mehhanismi detailide koostu lisamine, kasutades komponentidevahelisi sidemeid

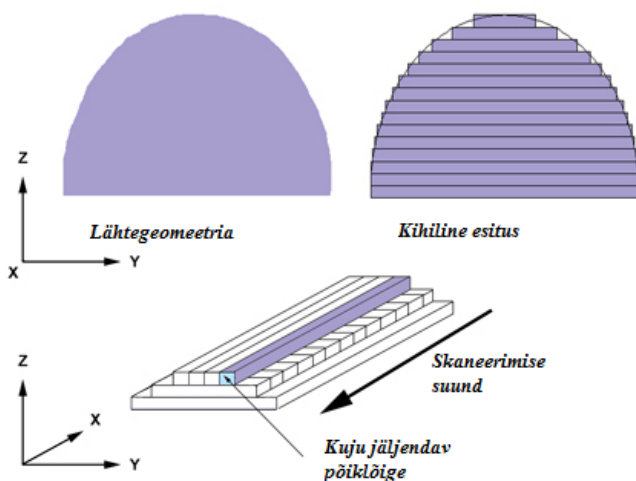


Sele 7.13 e) Koostu koosseis



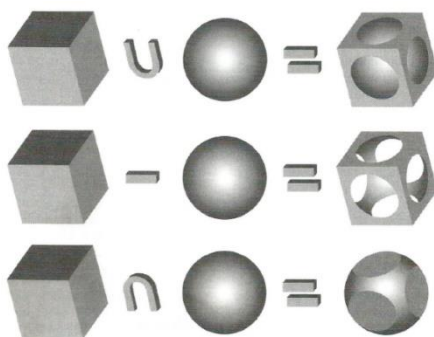
Sele 7.13 f) Koostu joonis ja toote struktuur

Nüüdisajal on CAD-süsteeme lisaks CAE-s kasutatava lõplike elementide modelleerimisega, täiendatud detaili mudeli kihi töötlemise modelleerimisega, mida kasutatakse otsese digitaalse tootmisega tehnoloogiatega töödeldavate detailide mudelite (prototüüpide) loomiseks (sele 7.14).



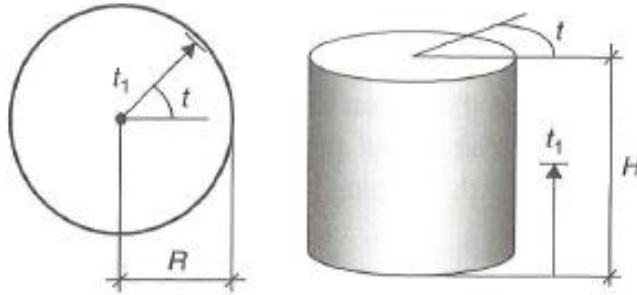
Sele 7.14 Geomeetria kihtkihiline esitus

CAD-süsteemide olulisemateks arendusteks on parameetiline ja tunnusepõhine (*feature-based design*, FBD) modelleerimine. Parameetrilisel projekteerimisel seotakse mõõtmed ja muutujad geomeetriaga, nii et kui mõnda parameetri väärtust muudetakse, kajastub see kohe ka 3D-kujundis. See on oluline toodete muutmisel ja tootepere loomisel. Tunnusepõhine tehnoloogia võimaldab lihtsalt lisada kujupindasid ning konstruktiivseid elemente (nagu liistsoon, tsentriava) või aitab neid tuvastada näiteks valmistamistehnoloogia projekteerimisel. Tunnustepõhise lähenemise puhul lähtub konstruktor kas primitiivsetest geomeetrilistest objektidest, nagu tasapinnad, silindrid, prismad, või siis antud valdkonda iseloomustavatest mõistetest, neid omavahel sobivalt Boole'i loogikaoperatsioonide abil ühendades (sele 7.15).



Sele 7.15 Boole'i operatsioonide \cap , \cup ja $-$ kasutamine kuubi ja kera ühendamise näitel [7.5]

Traditsioonilised CAD-süsteemid on tõhusad jooniste valmistamise vahendid, kuid võimalused samal ajal konstrueerida, arvestades tootele kehtivaid piiranguid ja valmistamise otstarbekust, on piiratud. Eelnevalt salvestatud lahenduste kasutamiseks ja piirangute arvestamiseks on kasutusel parameetrilise modelleerimise meetodid (nimetatakse ka variantseks projekteerimiseks). Parameetrilise modelleerimise meetodite puhul (sele 7.16) määrab konstruktor parameetrid, mida tuleb piirangutes ja uute mudelite geomeetria loomisel arvestada.

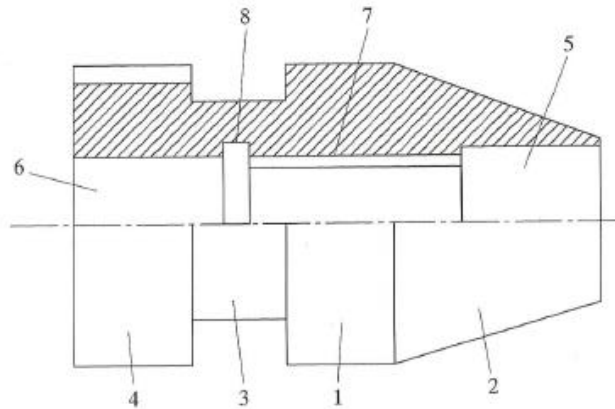


Sele 7.16 Lihtsa regulaarse kujundi (silinder) esitamine parameetrilisel kujul, kus $x = R \cos t$; $y = R \sin t$; $z = t_1$; $0 < t < 2\pi$; $0 < t_1 < H$

Tunnustepõhise modelleerimise kasutamisel võib näiteks konstruktiivsed elemendid jaotada klassidesse, mis omakorda jagunevad geomeetriliste parameetrite järgi alamklassidesse:

- 1) silinderpinnad,
- 2) liistusooned,
- 3) sooned,
- 4) tasapinnad,
- 5) avad,
- 6) hambad,
- 7) nuudid,
- 8) väliskeermed,
- 9) sisekeermed: meeterkeere, trapetskeere, ruutkeere, tugikeere, ümarkeere, kooniline tollkeere, kooniline torukeere, okulaarkeere, kellakeere.

Oluliseks arenduseks on seejuures taoliselt moodustatud kujunditest teatud tunnuste või nende mustrite automaatne äratundmine ja mudelite teisendamine, mis on seotud näiteks töötlemisega. Selleks kasutatakse detailide modelleerimiseks tehnoloogilisi mõisteid (nimetatakse ka elementaarseteks töödeldavateks pindadeks (sele 7.17)). Taoline modelleerimine on sobiv kasutamiseks tehnoloogia arvutipõhiseks projekteerimiseks (CAPP-süsteemides).



Sele 7.17 Näide detaili mudeli esitamisest elementaarsete töödeldavate pindadega (pinnad 1–8)

Olenevalt tööstusharust võivad erinevate raalprojekteerimissüsteemide fookused erineda, kuid kõik need sisaldavad tahkekeha (tahkise) geometria modelleerimise, s.o 3D-modelleerimise baasvahendeid, mis võivad olla täiendatud erinevatele rakendustele orienteeritud täiendavate funktsioonidega, näiteks keeviskonstruktsioonide, keeruliste kujupindade (skulptuurpindade), lehtmaterjalist detailide, torusüsteemide, keeruliste koostude, elektroonikatoodete jms projekteerimiseks.

Praktilises kasutuses on suhteliselt väike arv 3D CAD-tarkvarasüsteeme. Eesti tööstusettevõtetes on enamlevinud süsteemideks:

- 1) SolidEdge,
- 2) SolidWorks,
- 3) Autodesk Inventor,
- 4) AutoCAD,
- 5) PTC ProE,
- 6) CATIA jt.

Mudelite ülekandmiseks ühest süsteemist teise, sh ka CAD-süsteemidest raalvalmistuse süsteemidesse (CAM-süsteemidesse), eeldab, et ülekantavate mudelite sisu ei muutu. Sõltuvalt kasutusel olevast andmeformaadist võivad mudelite ülekandel ühest süsteemist teise mõned detailid aga kaduma minna. Viimane asjaolu määrab soovitusel kasutada mudelite andmevahetuseks süsteemineutraalseid andmeformaate ja nendele vastavaid standardeid.

Praegu on peamised süsteemineutraalsed andmeformaadid masinaehituslike toodete geometria mudelite andmete ekspordiks ja impordiks erinevate süsteemide vahel:

- 1) IGES (.igs) – Initial Graphics Exchange Specification;
- 2) STEP (.stp) – Standard for the Exchange of Product model data;
- 3) Stereolithography (.stl) – mudelite esitamiseks digitaalses otsetootmises..

Enamik kasutusel olevatest CAD-süsteemidest sisaldab vahendeid tootemudelite andmehalduse ja tooteversioonide kontrolli realiseerimiseks, et võimaldada sellega projekteerijatel efektiivselt toetada kogu tootearenduse elukaart, siduda erinevaid versioone tootearenduse ja tootmise eri etappidel, arvestada varasemaid projekteerimise ja tootmise kogemusi, tarbija erinevaid soovide jms. Keeruliste koostude projekteerimisel võimaldavad CAD-süsteemid kasutada varemprojekteeritud alamkooste ja detaile.

CAD-süsteemide andmehaldus on sageli piisavalt tark, et võimaldada automaatselt korrigeerida olemasolevaid mudeleid nende integreerimisel.

Enamikel süsteemidel on sissehitatud funktsioonid, mis lubavad hinnata ja võrrelda geomeetriat (näiteks kuju sümmeetriat) ja teisi tunnuseid (mõõtusid, toote seinapaksusi, mahtu, massi jm), aga samuti luua ja hallata toote tükilehe (*bill of material*) andmeid.

Standardsete toodete ja detailide mudeleid on võimalik saada internetist erinevatest andmebaasidest. Kasutades konstrueeritud toodete/detailide mudeleid, liidetakse nendega standardtoodete mudelid. Taoline lähenemine on seotud toodete modulariseerimisega, mis on toote- ja tootmise arenduse üks olulisemaid suundasid. Moodulite kasutamisel tuleb otsustada, kas toota antud moodulit ise või osta (tellida allhankena), sealjuures paraneb võimalus kasutada eelnevaid kogemusi, sh valida moodul standardsete moodulite (tüüp-moodulite) hulgast. Moodulite kasutamise selgitamiseks CAD-süsteemides peab vahet tegema modulaarsel ja integreeritud tootestruktuuril. Erisus põhineb järgmistel toote funktsionaalsete ja struktuursete ühikute vahelistel seostel:

- 1) modulaarne struktuur koosneb iseseisvatest standardiseeritud liidestega funktsionaalsetest ühikutest, mis on kooskõlas süsteemi definitsiooniga. Asendades ühe mooduli teisega, loome tootest uue variandi;
- 2) integraalset struktuuri iseloomustab funktsioonide jagamine. Kui igasse struktuuri ühikusse on sisse ehitatud mitu erinevat funktsiooni, siis ühe mõõtme (parameetri) muutus toob kaasa ka teiste mõõtmete muutuse.

Toote struktuuri saab harva klassifitseerida puhtalt modulaarseks või integraalseks. Modulaarsust ja integraalsust tuleb pigem näha klassifitseerimise telje alguse ja lõpuna, kus vaadeldakse struktuure modulaarsuse ja integraalsuse vaatepunktist.

Moodulite kasutamine agregeerib tükilehe struktuuri, vastavat tükilehe osa nimetatakse BOM fantoomiks (*phantom*), mis esitab moodulit, mida kasutatakse erinevates toodetes.

CAD-süsteemide areng on seotud kogu toote elukaart toetavate andmehalduse integreeritud süsteemidega (*product life-cycle management* ehk PLM-süsteemidega, vt ptk 7.6).

Mõningad CAD-i tarkvarapaketid on integreeritud raalvalmistuse (CAM) tarkvaraga (CAD/CAM-süsteemid). CAD/CAM-süsteeme iseloomustab interaktiivse geomeetria modelleerimise ning salvestatud toote informatsiooni korduv kasutamine. See lihtsustab oluliselt inseneride tööd geomeetria andmete ettevalmistamisel arvjuhtimisega tööpinkide programmide koostamisel.

7.3. Insenerianalüüsi süsteemid (CAE-süsteemid)

CAE-süsteeme kasutatakse peamiselt toodete ja tootmisprotsesside kompleksseks simuleerimiseks arvutil, et hinnata toote käitumist erinevates koormusolukordades, sh tootes tekki- vaid pingeid, deformatsioone, toodete purunemist, toodete dünaamikat, toodete/detailide töö- deldavust jms.

CAE vahendid võimaldavad simuleerida toodete ning tootmisprotsessi arendamise erinevaid etappe, luua tooteid ja protsesse, mis rahuldavad otstarbekalt omahinna jt tehnilis-majandus- like näitajate piiranguid.

CAE-süsteeme kasutades ei ole vaja valmistada toote füüsilist prototüüpi, et hinnata ja ana- lüüsida toodete ja protsesside omadusi. CAE vahendid kasutavad muuhulgas lõplike elemen- tide analüüsi (LEM) meetodit (*finite element analysis*, FEA), lõplike mahtude meetodit jt mee- toodeid ning tööriistu. LEM-meetodid moodustavad võimsad arvutipõhised vahendid erinevate insener-tehniliste probleemide numbriliseks lahendamiseks. LEM-meetodid võeti inseneriar- vutustes kasutusele möödunud sajandi 50ndatel. Turul on rida selliseid CAE-süsteeme, nagu ANSYS, Abaqus, Nastran, LS-DYNA, HyperWorks jt.

LEM-meetodeid ja tööriistu kasutatakse paljudes valdkondades. Enamik CAE-süsteeme pa- kub järgmisi tüüp võimalusi:

- 1) **lineaarne staatika – staatiliste struktuuride omaduste modelleerimine**: enamasti on eesmärgiks võimalikult kerge ja heade tugevusomadustega struktuurid/tooted (sama tugevus võimalikult vähese materjalikuluga); pingete ühtlase jaotuse tagamine jms;
- 2) **lineaarne ja mittelineaarne dünaamika**, sh sagedusanalüüs, sumbumine, omavõnke- sageduste nihutamine väljapoole mõjuvate jõudude tööspektrist (passiivne võnkumiste juhtimine), võnkesageduste ja võnkevormide aktiivne juhtimine, kokkupõrgete analüüs, materjalide vormimise protsesside modelleerimine jm;
- 3) **kehade süsteemi analüüs**, sh toote koostupõhine modelleerimine, näiteks keevisõmb- luste jt liideste projekteerimine ja analüüs;
- 4) **materjalide vormimise protsesside modelleerimine**, sh materjali purunemine ja elastse tagasivedrutuse modelleerimine vormimisel, jääkpinged detailis, voltimine jne.

Olulised rakendused on veel:

- 1) termoanalüüs;
- 2) vedelike voolamise analüüs (*computational fluid dynamics*, CFD);
- 3) elektromagnetism;
- 4) akustika jt.

CAE-süsteemide rakenduste näideteks on erinevate survega töötlemise tehnoloogiate mo- delleerimine, nii näiteks kasutatakse süsteeme:

- 1) stantsimise;
- 2) hüdrovormimise;
- 3) sepistamise;
- 4) sügavtõmbamise jt protsesside modelleerimiseks.

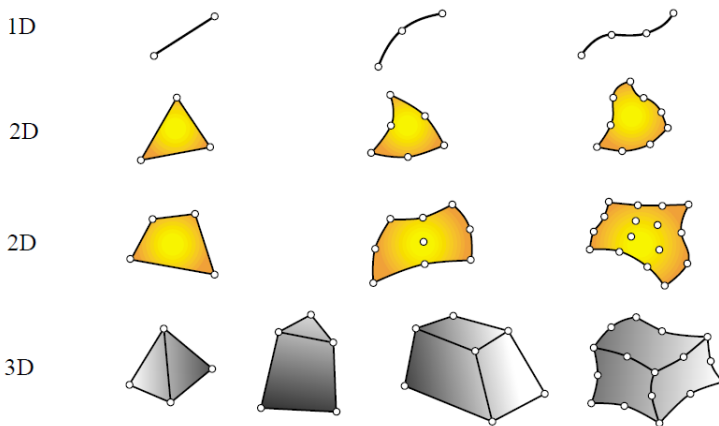
Alates 1995. aastast kasutatakse masina- ja aparaadiehituslikus projekteerimises LEM-pakette koos CAD-süsteemidega, mis kergendab oluliselt LEM-süsteemide kasutamist. Vastusrikaste toodete puhul integreeritakse struktuurianalüüs toodete katsetamisega.

LEM-süsteemide kasutamise eelised on:

- 1) täpsem analüüs;
- 2) võimalus simuleerida erinevaid toote variante ja hinnata kriitiliste parameetrite väärtusi;
- 3) toote käitumise virtuaalse simuleerimise võimaldamine;
- 4) projekteerimiskulude kokkuhoid;
- 5) toote projekteerimistsükli lühenemine jms.

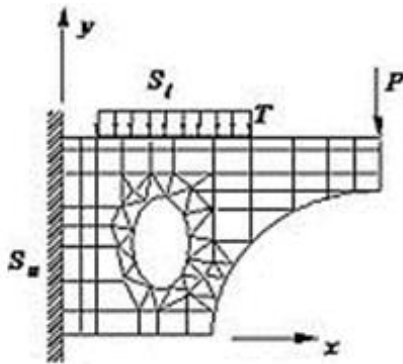
Erinevad CAE vahendid võimaldavad analüüsi, mis seni ei olnud suure arvutusmahu tõttu realiseeritav klassikaliste projekteerimismeetoditega. Uuemad süsteemid võimaldavad ka toodete struktuurset optimeerimist.

LEM-meetodi puhul aproksimeeritakse detaili kuju, kasutades etteantud geomeetrilisi elemente (sele 7.18 ja sele 7.19). Täiendavalt kirjeldatakse tootele mõjuvad jõud ja kinnitustingimused, kirjeldatakse kasutatavate materjalide omadusi.



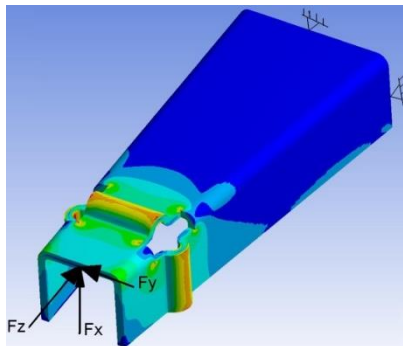
Sele 7.18 LEM-mudelites kasutatavate elementide näited (1D- kuni 3D-modelleerimine)

Tänapäevased CAE-süsteemid võimaldavad toote (detaili) geomeetria CAD-mudeli teisendada otse programmiselt LEM-geomeetria mudeliks. Lõpliku CAE-mudeli saamiseks tuleb valida täiendavalt materjali mudel, kirjeldada mõjuvad jõud ja kinnitustingimused (sele 7.3.2).

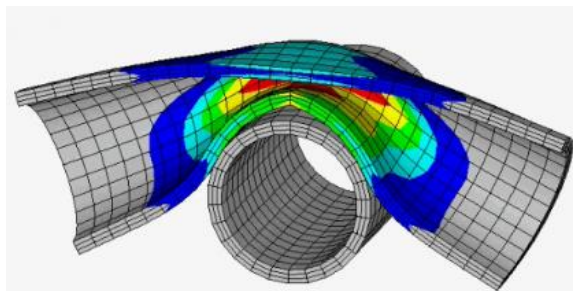


Sele 7.19 Lihtsustatud lõplike elementide meetodi kasutamise näide avaga konsoolse toe modelleerimiseks

Seledel 7.20–7.23 d on esitatud erinevad modelleerimise näited.

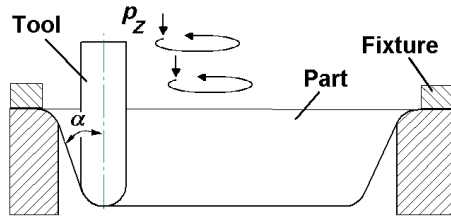


Sele 7.20 Auto rammraua kinnituselemendi deformatsioonide modelleerimine

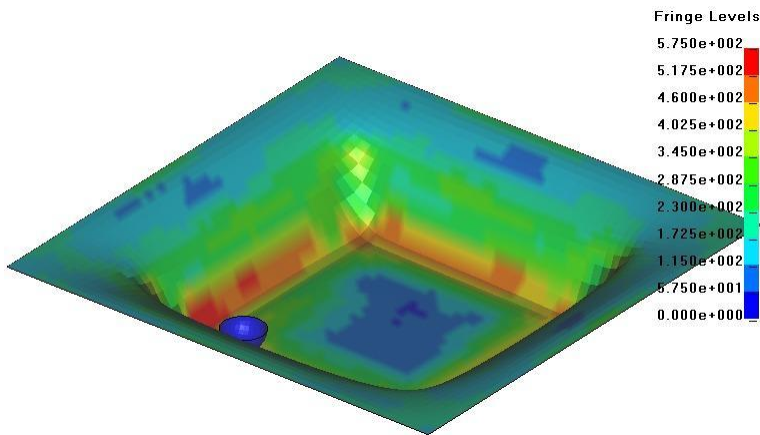


Sele 7.21 Toru painutusprotsessi pingelukorra modelleerimine [7.11]

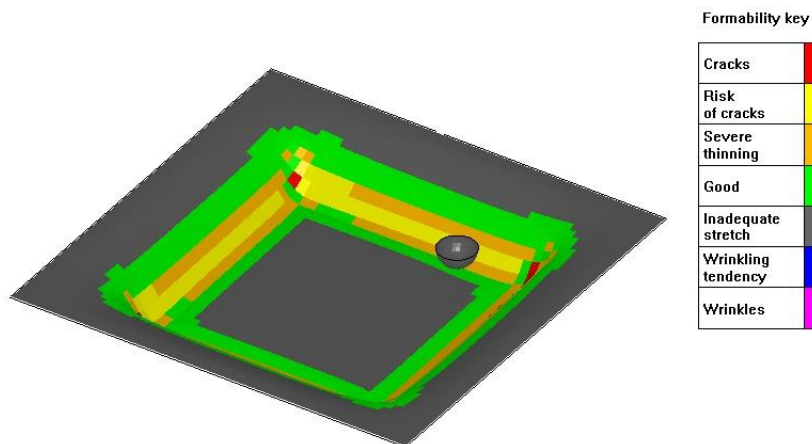
Seledel 7.22 a ja b on toodud sammvormimise protsessi skeem ja selle LEM-modelleerimise näide.



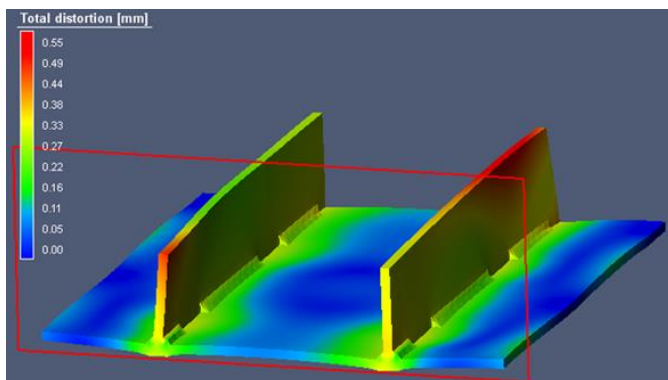
Sele 7.22 a) Sammvormimise skeem



Sele 7.22 b) Sammvormimisprotsessil mõjuvate pingete modelleerimine

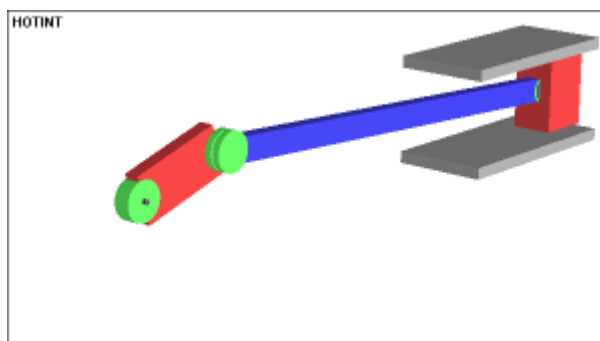


Sele 7.22 c) Sammvormimisprotsessi tulemused, kasutades piirpingediagrammi



Sele 7.23 Keevitamisel tekkivate jääkdeformatsioonide simulatsioon

Insenerianalüüsi ülesandeks on samuti multikeha simulatsiooni (*multibody simulation*) tööriistad, mis võimaldavad simuleerida mitmest kehast koosnevate mehhanismide (sele 7.24) liikumisi (kinemaatikat) ja hinnata mehhanismide dünaamikat [7.12].

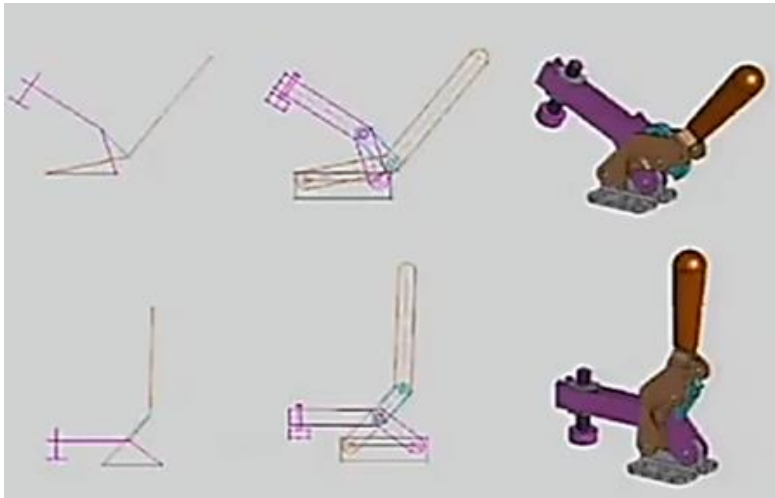


Sele 7.24 Multikeha mehhanismi näide

Multikeha simulatsiooni rakendusnäideteks on:

- 1) mehhanismide analüüs;
- 2) liikumiste hindamine;
- 3) mehhanismi kinemaatika ja dünaamika analüüs ning hindamine;
- 4) mõjuvate jõudude analüüs;
- 5) mehhanismi komponentide projekteerimine;
- 6) mehhanismide alternatiivsete variantide hindamine ja parima variandi valik enne nende testimist;
- 7) hübriidsete pneumohüdraulika mehhanismide integreeritud projekteerimine jm rakendused.

Selel 7.25 on näitena toodud pingi kinnitusrakise modelleerimine süsteemis SolidWorks.



Sele 7.25 Pingi kinnitusrakise modelleerimine süsteemis SolidWorks: rakise liikumine kahes asendis lahti ja kinni; kontseptuaalne skeem ja lõplik konstrueerimine

7.4 Arvutipõhine tehnoloogia projekteerimine (*computer-aided process planning, CAPP*)

CAPP-süsteem kasutab arvuteid, et toetada tootmistehnoloogia projekteerimist. CAPP-süsteem kujutab endast vahelüli CAD- ja CAM-süsteemide vahel.

Tehnoloogia planeerimise protsess CAPP-süsteemis sisaldab endas tehnoloogilise marsruudi (operatsioonide järjestuse), kasutatavate tööpinkide, tööriistade ja tööabinõude valimist ja kõikide operatsioonide iseloomustavate parameetrite (lõikerežiimid, töötlemisajad jm) määramist, mis võimaldavad otstarbekalt valmistada antud detaili (koostada koostu/toodet). Projekteerimise tulemused esitatakse ettevõtetes kasutusel olevates tehnoloogilistes dokumentides.

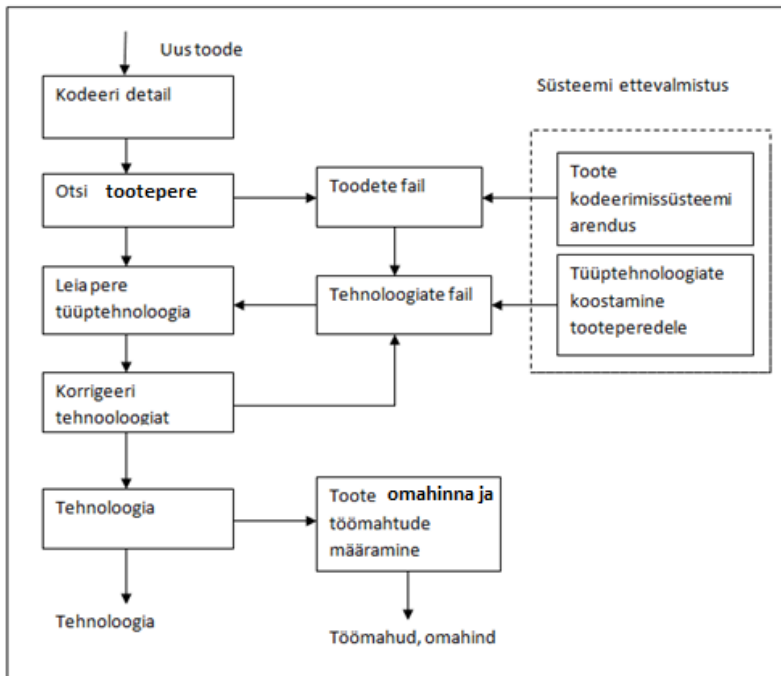
Arvutipõhise tehnoloogia projekteerimise arenguid võib iseloomustada järgmiste etappidega:

- 1) traditsiooniline (manuaalne) detailide klassifitseerimine ja tüüpiprotsesside kasutamine;
- 2) arvuti toel sarnaste protsesside leidmine andmebaasidest, korrigeerimine ning dokumentide trükkimine;
- 3) variantsed CAPP-süsteemid;
- 4) generatiivsed CAPP-süsteemid;
- 5) dünaamilised generatiivsed CAPP-süsteemid integreeritud CAD/CAM-, (PLM-) ja ERP-süsteemidega. Dünaamiliste süsteemide kasutamisel muutuvad projekteeritavad tehnoloogiad sõltuvalt kasutada olevatest ressurssidest ja seadmete koormatusest.

Oma algsel kujul kasutati CAPP-süsteeme projekteeritud protsesside salvestamiseks andmebaasidesse. Uue detaili/ toote puhul leitakse tehnoloogiline protsess analoogia põhjal andmebaasis olevate ja varem projekteeritud sarnastele detailidele/toodetele koostatud protsesside ja/või tüüpotsesside hulgast, neid vajadusel täiendades/muutes.

Varajased CAPP-süsteemid baseeruvad detailide/toodete kodeerimisel ja tüüptoodete projekteerimisel ning tüüptoodete standarditel ehk tüüptehnoloogiate kasutamise projektidel.

Taolisi CAPP-süsteeme nimetakse variantlahendusi kasutatavateks CAPP-süsteemideks (ehk lihtsalt variantseteks CAPP-süsteemideks, sele 7.26).

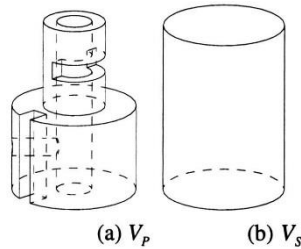


Sele 7.26 Variantsete CAPP-süsteemide kasutamise skeem

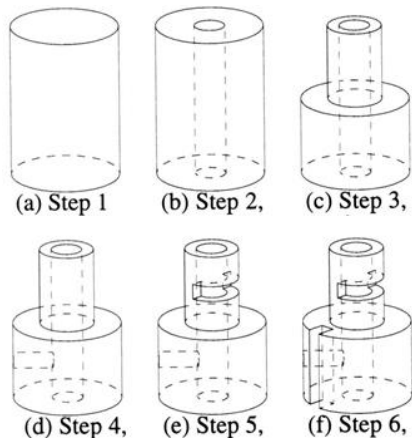
CAPP-süsteemide arengud. Traditsioonilised ehk variantsed CAPP-süsteemid ei võimalda projekteerida tehnoloogilisi protsesse uutele originaalsetele toodetele ning arvestada operatiivselt ressursside jt töötlemissüsteemi parameetrite muutusi dünaamiliselt muutavas tootmisolukorras.

Praegused ehk generatiivsed CAPP-süsteemid võimaldavad automaatselt genereerida tehnoloogiaid uutele toodetele, lähtudes toodete/detailide 3D-mudelitest, või operatiivselt korrigeerida olemasolevaid tehnoloogiaid, kui tootmissüsteem muutub. Generatiivsed CAPP-süsteemid on tavaliselt iteratiivsed süsteemid, mis võimaldavad leida sobivaid tehnoloogiaid detaili üksikutele komponentidele, neid tervikuks liita ja toetada nende korrigeerimist.

Uueaegne CAPP põhineb CAD-mudelist saadud geomeetrilistel andmetel, kuid on tootmisele orienteeritud. Tunnusepõhine detailide modelleerimine (FBD) võimaldab konstruktiivseid ning tehnoloogilisi tunnuseid (elementaarselt töödeldavaid pindu) või nende mustreid tuvastada ning siduda neid tehnoloogiliste operatsioonidega (seled 7.27 ja 7.28). Nii on võimalik avaldada erinevaid tehnoloogilisi marsruute kasutades, piiravateks tingimusteks on läbimõõt ja sügavus, aga ka nõutud pinnakaredus. Tunnuste koosmõju võib samas põhjustada raskusi nende tuvastamise ja interpreteerimisega.



Sele 7.27 Töödeldava detaili (V_p) ja tooriku mudel (V_s)



Sele 7.28 Tooriku geometria muutus, arvestades operatsioonidele elementaarseid töödeldavaid pindasid (sammud *step 1 – step 6*)

CAPP-süsteemide kasutamise peamised eelised on:

- 1) tootmiskulude vähenemine, tehnoloogiliste protsesside ratsionaliseerimine ja standardimine;
- 2) töömahu vähenemine tehnoloogilise protsessi ettevalmistamiseks;
- 3) toote tareneaegade lühenemine;
- 4) paraneb tehnoloogilise dokumentatsiooni arusaadavus (loetavus);
- 5) võimalus integreerida teiste arvutipõhiste insenerisüsteemidega.

7.5 Raalvalmistussüsteemid, CAM-süsteemid

Kaasajal kasutatakse enamasti arvutijuhtimisega (*computer numerical control, CNC*) seadmeid. CNC-pingid võimaldavad erinevaid operatsioone, nagu treimine, freesimine, puurimine, augustamine, erikujuliste detailide lõikus, graveerimine jm. Pingi kasutamist iseloomustavateks märksõnadeks on kõrgem tootlikkus, paindlikkus ja kvaliteet. CNC-pinkide näited on toodud ptk-s 4.3.2.

CNC-pinkide kasutus on võrreldes traditsioonilise töötlemisega seda otstarbekam, mida keerukamad on töödeldavad detailid. Detailide keerukust hinnatakse muuhulgas töödeldavate pindade arvu, pindade kuju keerukuse, nõutava töötlemistäpsuse ja pinna karedusega. Mida keerukam on töödeldav detail, seda otstarbekam on kasutada CNC-pinke ja nende programmide ettevalmistamiseks raalvalmistussüsteeme, sh CAD/CAM programmeerimist. Seledel 7.29 a ja b on toodud mõned tüüpilised näited CNC-pinkidel töödeldavatest keerukamatest detailidest.



Sele 7.29 a) CNC töötlemiskeskuses töödeldavate detailide näited (kasutatud on DMG Mori näiteid)



Sele 7.29 b) CNC-treipingis töödeldavate detailide näited (kasutatud on DMG Mori näiteid)

Tööseadmete arvutijuhtimise 4 põhilist arengusuunda on:

- 1) otsene arvujuhtimine (DNC-süsteemid);
- 2) arvutijuhtimine (*computer numerical control*, CNC);
- 3) adaptiivne juhtimine;
- 4) tööstusrobotid.

Siin on kohane meenutada, et endises Nõukogude Liidus lõi esimese APT-talise keele ja vastava CAM-süsteemi CAP-2 (sistema avtomatizatsii programmeerimise, 2 koordinaati) endine TTÜ rektor, akadeemik Boris Tamm.

Käesoleval ajal domineerib APJ-pinkide programmeerimisel integreeritud CAD/ CAM-süsteemide kasutamine koos interaktiivse toetava graafikaga.

Seledel 7.5.1.3 a–n on lihtsustatud näidetena toodud CAD/CAM-süsteemi kasutamise funktsionaalne skeem ja programmeerimise näited süsteemis NX CAM (I. Kiolein Pro Step OÜ, NX Manufacturing Fundamentals, Siemens).

Raalvalmistus- ehk CAM- (*computer-aided manufacturing*) süsteemides kasutati esialgu erinevaid versioone kõrgtasemelisest programmeerimiskeelest APT (*automatically programmed tool*, **APT**), mille esmaloojaks 1956. aastast loetakse Douglas T. Rossi MIT-ist.

Fragment APT-keeles programmist on toodud seel 7.30 [7.13]

```
PARTNO/APT-1
```

```
CLPRNT
```

```
UNITS/MM
```

```
NOPOST
```

```
CUTTER/10.0
```

```
$$ GEOMETRY DEFINITION
```

```
SETPT = POINT / 0.0, 0.0, 0.0
```

```
STRPT = POINT / 70,70,0
```

```
P1 = POINT / 50, 50, 0
```

```
P2 = POINT / 20, -20, 0
```

```
C1 = CIRCLE / CENTER, P2, RADIUS, 30
```

```
P3 = POINT / -50, -50, 0
```

```
P5 = POINT / -30, 30, 0
```

```
PLAN1 = PLANE / P1, P2, P3
```

```
PLAN2 = PLANE / PARLEL, PLAN1, ZSMALL, 16
```

```
.....
```

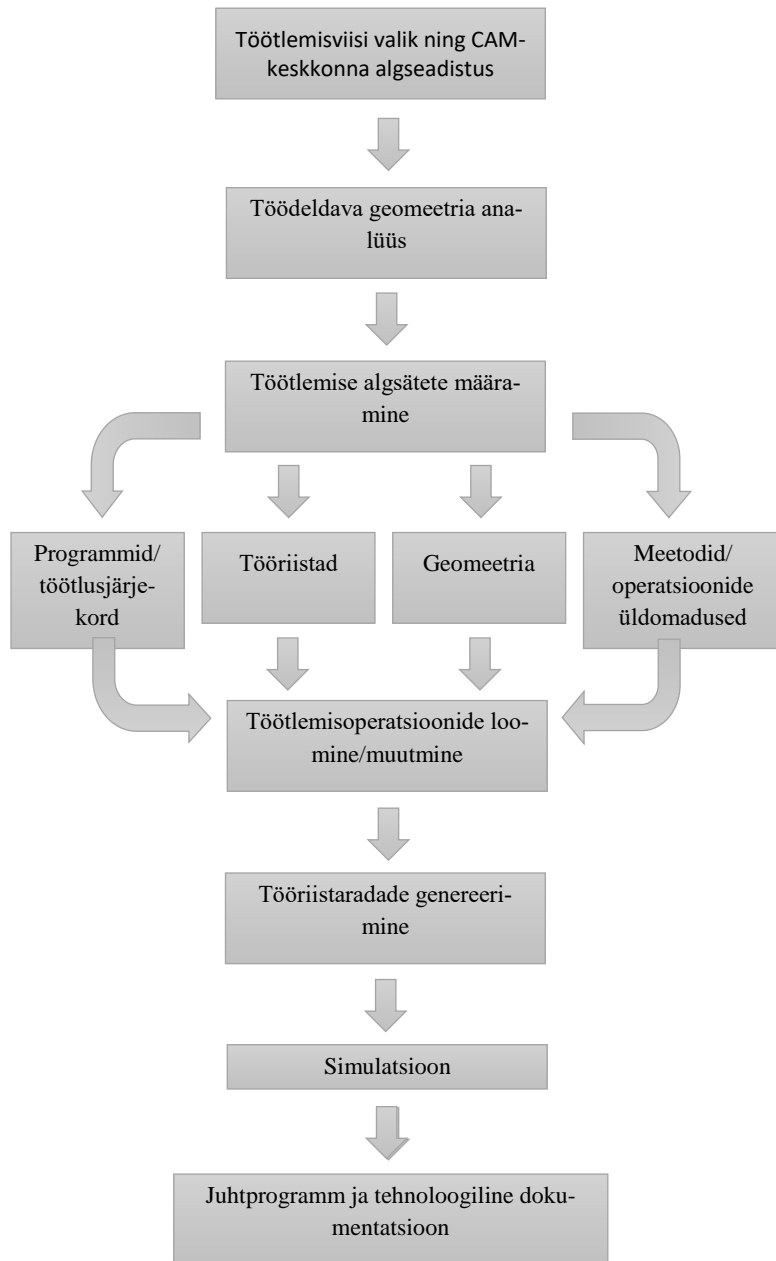
```
$$ MOTION COMMANDS
```

```
SPINDL / 3000, CW
```

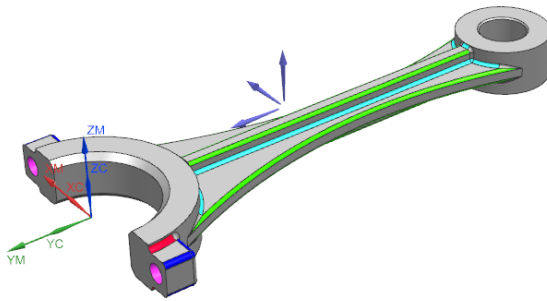
```
FEDRAT / 100, 0
```

```
.....
```

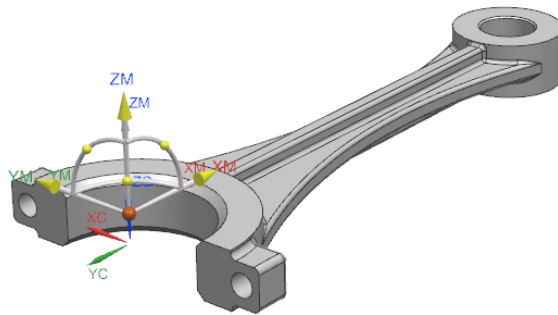
Sele 7.30 Programmi fragment APT-keeles



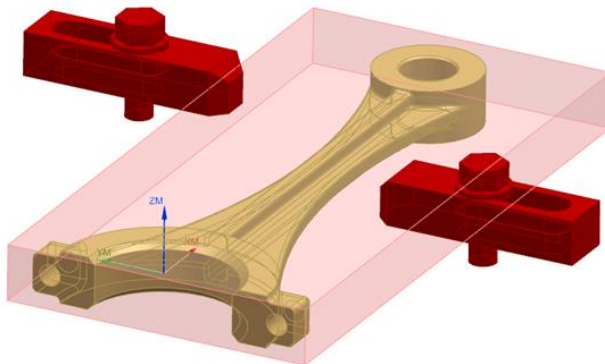
Sele 7.31 a) CAD/CAM-süsteemi funktsioonide skeem



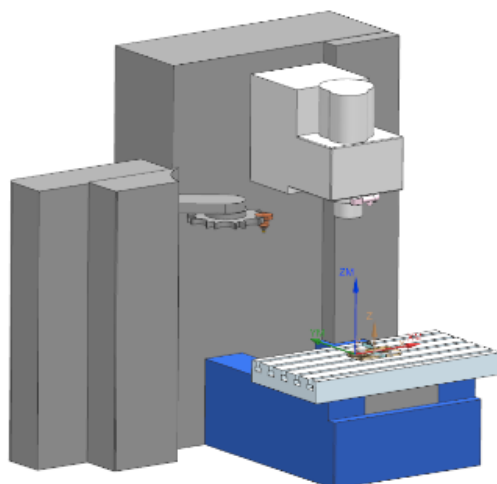
Sele 7.31 b) Detaili analüüs



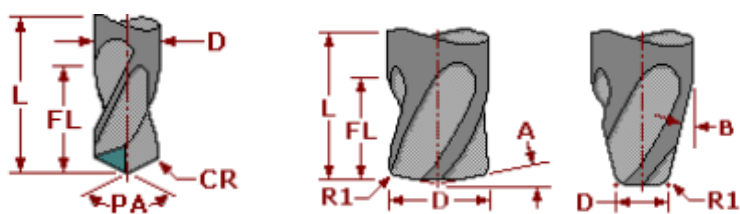
Sele 7.31 c) Töötlemise koordinaatsüsteemi määramine detaili asukohana tööpingis



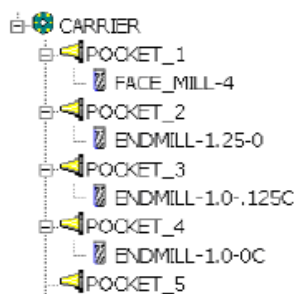
Sele 7.31 d) Detaili tooriku ja kinnitusvahendite määramine



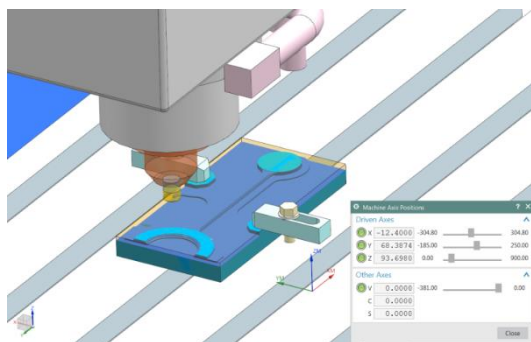
Sele 7.31 e) Tööpingi valik



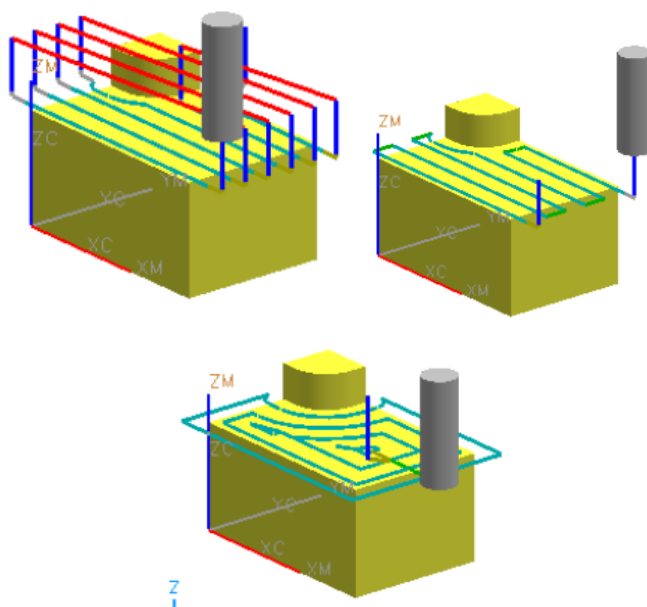
Sele 7.31 f) Tööriistade valik ja mõõtude määramine



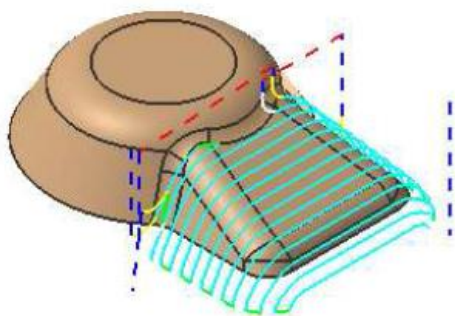
Sele 7.31 i) Tööriistade sidumine pingi magasiniga (Pocets 1, 2, 3, 4)



Sele 7.31 k) Pingi liikumiste simulatsioon



Sele 7.31 l) Erinevad 2,5-koordinaatse töötlemise mustrid



Sele 7.31 m) Kujupinna töötlemine

```
Information listing created by : agose
Date : 4.05.2011 14:11:12
Current work part : bearing_case_mfg_3.prt
Node name : psagoselptxpp
=====
%
ND010 G40 G17 G90 G70
ND020 G91 G28 Z0.0
:0030 T01 M06
ND040 T02
ND050 G0 G90 Z261.7775 Y300.0375 Z0 M03
ND060 G43 Z232.25 H01
ND070 Z209.6477
ND080 G1 Z207.1077 F254. M08
ND090 X258.5875
ND100 G2 X252.2375 Y306.3875 I0.0 J6.35
ND110 G1 Y427.0375
ND120 G3 X249.2375 Y430.0375 I-3. J0.0
ND130 G1 X198.2756
ND140 G2 X199.0375 Y420.6875 I-56.9881 J-9.35
ND150 G1 Y192.0875
ND160 G2 X198.2756 Y182.7375 I-57.75 J0.0
ND170 G1 X249.2375
ND180 G3 X252.2375 Y185.7375 I0.0 J3.
ND190 G1 Y306.3875
ND200 Y310.1975
```

Sele 7.31 n) Koodi väljastamine pingile

CAM-süsteemide kasutamise eelised

CAM-süsteem eeldab detailideni väljatöötatud tööprogrammi kasutamist, mis annab tootmises järgmiseid eeliseid:

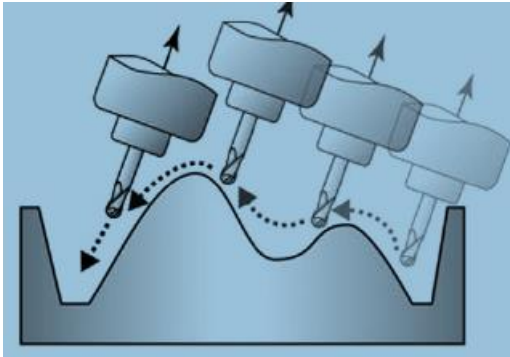
- 1) paraneb APJ-tööseadmete kasutus;
- 2) CAM-süsteem toetab juhtprogrammide ja tootmisdokumentatsiooni koostamist;
- 3) koos PLM-i ja selle alamsüsteemidega tagab CAM-süsteem operaatori ja tootmise planeerija parema varustamise korrektsete tootmisprotsessi andmetega;
- 4) CAM- ja PLM süsteemid toetavad otsese arvutipõhise juhtimise (*direct numerical control*, DNC) evitamist ettevõttes.

Tüüpilised CAM-i evitamisega seotud probleemid:

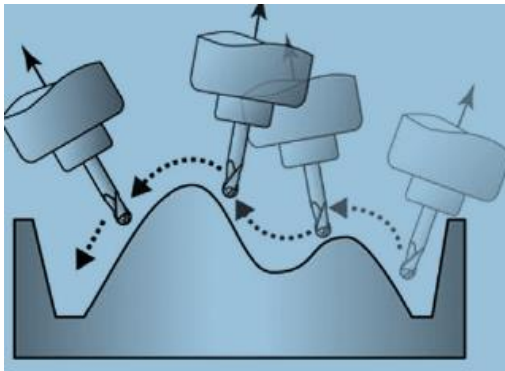
CNC-töötlemise otstarbekus (ja võimalus) on seotud **detaili keerukusega**. Mida suurem on detaili keerukus, seda otstarbekam on selle töötlemine CNC-pingis või töötlemiskeskuses. Keerukusest sõltub ka töötlemisaeg.

CNC-pinkide kasutusega seotud arenguid võib iseloomustada järgmiselt:

- 1) kiirtöötlemise ja uute nüüdisaegsete materjalide töötlemise võimaluste ja töörežiimide leidmise toetamine;
- 2) mitme erineva töötlemismeetodi integreeritud kasutamine (multifunktsionaalne töötlemine, *multi-function machining*, *multitasking*);
- 3) 4 ja enam koordinaadiga töötlemine (*multi-axis manufacturing*) (vt sele 7.32 ja 7.33).



Sele 7.32 Profiilpinna töötlemine 3-koordinaatses pingis



a.

Sele 7.33 Profiilpinna töötlemine 5-koordinaatses pingis

- 4) geomeetriliste iseärasuste (features) automaatne äratundmine detaili 3D CAD-mudelites ja nende töötlemise arvutipõhine projekteerimine;
- 5) oskusteabe kogumine ja kasutamine automatiseerimise taseme tõstmiseks;
- 6) integreerimine PLM- ja ERP-süsteemiga;
- 7) kliendisõbralik ja lihtne kasutamine.

CNC-pinkide rööplemist ehk multifunktsionaalset kasutust (*multitasking*'ut) iseloomustab:

- 1) seade võib sooritada erinevaid operatsioone ilma detaili pingist eemaldamata ja/või inimese vahelesegamiseta;
- 2) treimise, freesimise puurimise jt operatsioonide sooritamise ühe seadistusega;
- 3) detaili teeninduseta (inimese vahele segamiseta) siirdumine ühelt operatsioonilt teisele.

Multitaskinguga CNC-pinkidel on tugev eelis tavaliste CNC-pinkide ees. Täiendavateks eeliseks on tootlikkuse kasv, seadistusaegade lühenemine, töötlemisomahinna vähenemine, töös olevate detailide arvu (WIP) vähenemine, töökindluse paranemine jms.

Erinevatel CNC-pinkide valmistajatel on eri juhtsüsteemid., Et neid kohaldada CAM-süsteemidega, kasutatakse postprotsessoreid. Selleks kasutatakse traditsiooniliselt keelt CLData (*cutter location data*). CNC-pinkide probleemiks on jäänud see, et eri tootjate pingid ei sobi omavahel kokku, samuti vähene modulaarsus ja tööstusettevõtete usaldamatus pingitootjate *online*-seiresüsteemide suhtes. CAD/CAM-süsteemide arengus on oluline STEP NC standardite väljatöötamine.

STEP NC põhialused moodustati ISO 14649 baasil. Selle töötasid välja mitu institutsiooni Euroopas (Siemens, Aacheni Tehnikaülikool, Stuttgarti ülikool jt), Jaapanis (Komatsu ja Fanuc) jm projektides ESPRIT ja IMS 1997. aasta alguses. Esimesed rakendused CNC-freesija treipinkidele avaldati 2005. a.

Integreerimine juba kasutusel oleva CAD-süsteemide STEP standardiga (STEP CAD) viidi läbi USA-s, töötades välja ISO 10303-238. CAD-i ja CAM-i tarkvaraarendajate ning teiste ekspertide töö tulemusena avaldati 2007. a standard STEP-NC AP238 [vaata WIKIPEDIA STEP NC], mis on arengus oluliseks läbimurdeks.

STEP NC võimaldab kirjeldada järgmisi funktsioone:

- 1) andmeside CAD-süsteemidega;
- 2) lõiketööriista liikumise trajektoori kirjeldamine koos protsessi visualiseerimisega;
- 3) töötlemisprotsessi kirjeldamine ja simuleerimine eesmärgiga hinnata seoseid tööpingiga, vältida kokkupõrkeid, kontrollida programmi vigade puudumist jm;
- 4) töötlemistäpsuse kontrollimine ja kontrollmõõtmiste planeerimine kooskõlas etteantud tolerantsidega, sh detailide asendi täpsustamisega baseerimisel;
- 5) töötlemisrežiimide (ettenihete, lõikekiiruste) optimeerimine, kasutades andurilt saadud informatsiooni;
- 6) töötlemist iseloomustavate andmete tagasiside toetamine tootmise planeerimiseks.

Tüüpiliste töötlemisprotsessi operatsioonide kirjeldamiseks kasutatakse mõistet *töö sammud* – WS (*work steps*, analoogilised töötlemisüklitega, vt ptk 4.6). Töötlemise operatsioon esitatakse töötlemissammude kogumina. Puudub vajadus CNC-pinke eristavate G- ja M-käskude järele. STEP NC toetab samuti CAD/CAM-i andmete vahetust üle arvutivõrgu.

STEP NC arendamine jätkub ISO TC184/SC1/WG7 töögrupi juhtimisel, parandades rakendustes ilmnenuid puudusi, laiendades kirjeldatavate tehnoloogiate ringi, lisades uusi võimalusi töötlemisprotsessi monitoorimiseks, arvestades andurilt saadud informatsiooni jms.

7.6 Toote elukaare juhtimise PLM-süsteemid

Tootmise hindamisel on järjest olulisemad sellised tegurid nagu koostöö tase ettevõttes ja partneritega, intellektuaalse kapitali haldamine jms. Edu saavutamiseks turul tuleb ettevõttel kiiremini uuendada tooteid ja optimeerida äriprotsesse. Eelpoolmainitud on raske saavutada, kui ettevõttes puudub võimalus hallata kogu toote elukaare jooksul loodatavat informatsiooni. Siin tekibki vajadus kasutada toote elukaare haldamise süsteeme (*product lifecycle management*, PLM). Töötlevas tööstuses mõistetakse toote elukaare juhtimise all kogu toote elukaare haldamisega seotud tegevust, nagu turu analüüs, toote ja selle tootmise arendamine, toote müük, teenindamine ning utiliseerimine. PLM on toote ja tootmise arendusprotsessi toetav arvutipõhine süsteem IT-vahenditest ja rakendustest, et arendada ja hallata tootega seotud teavet toote elukaare jooksul, ühendada ühtseks meeskonnaks erinevates geograafilistes asukohtades asuvaid töötajaid, kes võivad kasutada erinevaid CAx rakendusi. PLM-süsteemid integreerivad personali, toodete ja tootmise tehnoloogiliste protsesside ja ärisüsteemide andmeid, moodustades ettevõttes kasutatava informatsiooni põhilise selgroo.

Otstarbeka tootearenduse toetamine PLM-süsteemide abil koos tootmise optimaalse planeerimise ja juhtimise tagamisega võimaldab vähendada kulutusi, suurendada ettevõtte ressursside kasutamise otstarbekust ja tootmise tõhusust.

PLM-süsteemide kasutamine on otstarbekam nende ettevõtete jaoks, kelle toodete ja tootmise innovatsioon on turul konkurentsivõime tagamise põhieeldus (näiteks tellimustootmisele orienteeritud ning originaalseadmeid tootvad ettevõtted (OEM)). Missuguste süsteemide evitamine ettevõttes on otstarbekas, sõltub suuresti ettevõttele iseloomulikest äriprotsessidest.

PLM-i kiire areng on tingitud toodete kasvavast keerukusest ja kiirelt kasvavast vajadusest teha koostööd üha laieneva partnerite ringiga.

Tavaliselt koosneb PLM-tarkvara mitmest komponendist, kus tervik luuakse erinevate tarkvarakomponentide koostöös.

PLM-süsteem toetab järgmist viit peamist tootmise ettevalmistuse ja analüüsi valdkonda:

- 1) tootmis- ja ärisüsteemi analüüs ja projekteerimine (*systems engineering*);
- 2) ettevõtte tooteportfelli haldamine (*product portfolio management*), PPM);
- 3) tootearendus (*product development*, sh CAx süsteemid);
- 4) tootmise (tootmisprotsessi) haldamine (*manufacturing process management*, MPM);
- 5) toote andmete haldamine (*product data management*, PDM).

PLM-i kasutamise mõju tootmisele

PLM-i kasutus ettevõttes toetab innovatsiooni, tootmise ettevalmistusaja lühendamist, parandab toote kvaliteeti ja ettevõtte tehnilis-majanduslike näitajaid ja loob soodsa pinnase käibe ning kasumi kasvule.

Kuigi PLM-iga saavutatav kulude kokkuhoid võib olla märkimisväärne, saavutatakse veelgi suuremat tulu tootearenduse protsessi efektiivsuse suurenemise ning protsessi lühenemi-

sega. PLM-i strateegia on eelkõige tootele väärtuste lisamine. PLM on lahendus, mis parandab ligipääsu äriprotsesside ja kogu toote elukaart kajastavatele andmetele laiendatud ettevõtte ulatuses (**laiendatud ettevõtte** – *extended enterprise*, iseorganiseeruv, ühisele eesmärgile orienteeritud ja lepingutega seotud ettevõtete koostöövõrk).

Kiiresti kasvav vajadus PLM-i kasutuselevõtuks on tingitud tootmisettevõtete soovist integreerida tootearendus ettevõtte teiste äriprotsessidega.

Miks vajatakse PLM-i?

Näitena võib tuua järgnevad enamlevinud põhjused PLM-rakenduste kasutuselevõtuks:

- 1) vajadus lühendada tootearenduseks ning tootmise ettevalmistuseks kuluvat aega;
- 2) hallata kasvavat toodete keerukust. Tänapäeval on paljudes toodetes integreeritud mehaanika, elektroonika ja tarkvaralahendused. Toote osakomponentide väljatootamine jääb valdkonnas pädevale allhankefirmale, kes on kaasatud läbi PLM-liidese tootearendusprotsessi;
- 3) kaasata järjest rohkem allhankijaid tootmise arendusse;
- 4) tõsta toodete kvaliteeti protsesside läbipaistvuse ja täpsema info põhjal tehtud otsuste kaudu;
- 5) taaskasutada juba loodud parimaid lahendusi ja kiirendada toote arendustööd;
- 6) tootmise ettevalmistuse maksumuse vähenemine;
- 7) kvaliteetse toote varasem turule jõudmine.

Peamisteks ettevõtetes PLM-süsteemidest loobumise põhjendusteks tavaliselt on:

- 1) kulutused PLM-süsteemi evitamiseks on kõrged;
- 2) töömaht PLM-süsteemi evitamiseks on suur;
- 3) ettevõtte kasutab juba ERP-süsteemi, mis rahuldab osaliselt PLM-süsteemi funktsionaalsust;
- 4) PLM-süsteemi funktsionaalsus kattub juba evitatud CAD-süsteemide funktsionaalsusega;
- 5) puudub vajalik ressurss (inimesed ja arvutivõimsus) PLM-süsteemi evitamiseks.

Millest koosneb PLM?

PLM-süsteemi põhilised komponendid on:

- 1) toote andmehaldus, PDM (*product data management*);
- 2) raalprojekteerimine, CAD (*computer-aided design*, vt ptk 7.2);
- 3) raalvalmistus, CAM (*computer-aided manufacturing*, vt ptk 7.5);
- 4) inseneriarvutused, CAE (*computer-aided engineering*, vt ptk 7.3);
- 5) tükkilehtede (tükkitabelite) andmehaldus, BOM (*bill of materials*, vt ptk 10.2);
- 6) kliendihaldus, CRM (*customer relationship management*) ja
- 7) tootmisprotsesside juhtimine, MPM (*manufacturing process management*).

Toote andmehaldus (PDM) on PLM-süsteemi olulisim alamsüsteem. PDM võimaldab hallata, otsida ja jagada toote informatsiooni. Tüüpilised PDM-i funktsioonid on:

- 1) andmete säilitamine ja versiooni haldus;
- 2) kaugliidestus;
- 3) CAD/CAM jt toote andmete haldamine;
- 4) töövoogude haldamine;
- 5) visualiseerimine(2D- ja 3D-visualiseerimine);
- 6) dokumendihaldus;
- 7) toodete klassifitseerimine;
- 8) toote muudatuste haldus.

PDM-i poolt loodav lisaväärtus on määratud:

- 1) ühtse infotöötlemis-ja koostöökeskkonnaga;
- 2) inseneriprotsesside automatiseerimisega;
- 3) tagasisidega.

PLM-i sidestamine teiste süsteemidega

Sidumine tootmise planeerimisega (ERP). PDM-süsteemidel on kogu informatsioon toote kohta. Osa sellest informatsioonist on vajalik ka ERP-tarkvarale. Tavaliselt edastatakse PDM-süsteemist ERP-süsteemi järgmist informatsiooni:

- 1) toote struktuur, tükileht (BOM);
- 2) toote elementide atribuudid (nt arv, materjal jm);
- 3) tootmiseks vajalikud ressursid;
- 4) tootmiseks vajalikud operatsioonid.

ERP-süsteemist edastatakse PDM-süsteemi tootearenduseks vajalikku informatsiooni, nagu:

- 1) laoseisud,
- 2) tarneajad,
- 3) hinnad.

Koostöö erinevates asukohtades olevate osakondade vahel. PLM-süsteem toetab meeskondade kaugtööd. Esiteks peab kasutajatele olema tagatud turvaline ligipääs andmetele ja teenustele nii ettevõtte sees kui ka väljaspool. See lihtsustab ressursside kasutamist väljaspool ettevõtte piire, muretsemata selle asukoha pärast. Samuti on oluline sama ettevõtte erinevate osade integreerimine ühtseks tervikuks.

Kordamisküsimused ja ülesanded

1. Kirjeldage CIM- ja MPM-lähenemiste peamisi inseneri funktsioone.
2. CAD/CAM-, CAPP- ja PLM-süsteemid eeldavad inseneridelt tegevusi, mis sisaldavad tootmise projekteerimise arendamist ning peaksid eelnema CAD/CAM-i jt süsteemide evitamisele ettevõttes, selleks, et tagada nende süsteemide sisulist ja efektiivset kasutust (*front-end activities*). Kirjeldage neid tegevusi.
3. Kirjeldage, milliseid meetodeid kasutades oleks teie poolt valitud detaili geomeetriat otstarbekas modelleerida. Milliste kriteeriumide abil te hindaksite modelleerimise sobivust ja millised meetodid on teile tuntud süsteemides kasutusel?
4. Kirjeldage, millistes tootmistingimustes on otstarbekas kasutada integreeritud CAD/CAM-süsteeme. Põhjendage, miks.
5. Kuidas iseloomustada CAPP-süsteemide arenguid? Iseloomustage erinevaid CAPP-süsteemide arenguetappe.
6. Millised võiksid olla ettepanekud CAD/CAM-, CAPP- ja PLM-süsteemide muutmiseks/täiendamiseks kasutajasõbralikumaks (*back-end activities*)?
7. Kirjeldage, millistes tootmistingimustes on otstarbekas kasutada tööstusroboteid.
8. Milliseid funktsioone peaks sisaldama PLM-süsteem, tagamaks efektiivsete tooteperede moodustamise ja grupitehnoloogia rakendamise?
9. Mida oleks soovitatav teha, et suurendada CAD/CAM-, CAE- ja PLM-süsteemide kasutamisel projekteeritavate toodete optimaalsust? Millised probleemid peaks sealjuures lahendada?
10. Milliseid näitajaid kasutada, et hinnata CAD/CAM-, CAE-, PLM- jt süsteemide kasutamise otstarbekust ettevõttes?

Viited

- [7.1.] Uuenduslik tootmine. TTÜ Kirjastus, Tallinn, 2011. 446 lk
- [7.2.] Küttner, R. Nüüdistootmise õpetus. TTÜ Kirjastus, Tallinn, 2016. 220 lk
- [7.3.] Qiu, Z. M., Wong, Y. S., Dynamic workflow change in PDM systems, Computers in Industry 58 (2007) pp. 453-463.
- [7.4.] Kimmel, A. Arvjuhtimisega metallilõikepinkide programmeerimine Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 1992 117 lk
- [7.5.] Amirouche, F. Principles of Computer-Aided Design and Manufacturing. Pearson College Div., 2004. 510 p.
- [7.6.] Kunwoo, L. Principles of CAD/CAM/CAE systems. Addison-Wesley, 1999, 582 p.
- [7.7.] Powers, J. H. Computer-automated manufacturing. New York. Mc Graw-Hill, 1987. 310 p. (CAPP)
- [7.8.] Groover, M. P. Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing. Pearson, 2014. 800 p.
- [7.9.] Kulu, P. (toim). Mehaanikainseneri käsiraamat. TTÜ kirjastus. Tallinn, 2012. 493 lk.
- [7.10.] CAMX [WWW] <https://en.wikipedia.org/wiki/CAMX> (01.07.2015)
- [7.11.] <https://www.ansys.com/> (01.07.2015)
- [7.12.] Multibody simulation [WWW] https://en.wikipedia.org/wiki/Multibody_simulation (01.07.2015)
- [7.13.] APT (software) [WWW] [https://en.wikipedia.org/wiki/APT_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/APT_(software)) (01.07.2015)

8. TOOTMISE PLANEERIMINE JA TEOSTUS (ERP/MES)

8.1. Tootmise planeerimise põhimõtted

Nüüdisajal on kiired muudatused inseneripraktikas iseloomulikud kõikidele toote ja tootmisprotsessi arendamise etappidele. Taolised muudatused on loonud dünaamilise olukorra, kus protsesside juhtimine ettevõtetes on üsna keerukas ning töömahukas ja nõuab arvutipõhiste mudelite ja matemaatiliste meetodite kasutamist.

Viimaste aastakümnete jooksul on väljakujunenud teadusharu – operatsioonianalüüs. Operatsiooniks nimetatakse sealjuures mingi inimgrupi (spetsialistide) sihikindlat ning teatud eesmärgi taotlevat juhtimistegevust: näiteks valida töötlemist iseloomustavate parameetrite väärtused. Operatsioonianalüüs uurib operatsioonide parima realiseerimise võimalusi ja selle põhiülesandeks on operatsioone kirjeldavate mudelite koostamine. Käesolevas kõrgkooliõpikus on toodud tootmise planeerimiseks kasutatavate operatsioonianalüüside ehk tootmise planeerimise tüüpmodelite koostamise põhimõtted.

Õpiku kasutajal ei pea olema erilisi matemaatilisi eelteadmisi, piisab bakalaureuseõppes omandatud teadmistest, kuna peamiselt on tegemist planeerimisülesannete püstitamise, näidete lahendamiseks on kasutatud Excel Solveri võimalusi.

Tootmise planeerimise eesmärgiks on toota kvaliteetseid tooteid nõutavas koguses, õige ajaks ja vastuvõetava hinnaga. Tootmisplaan on ajas esitatud tegevuste kava tootmise korraldamiseks. Tootmise planeerimise tulemusena moodustatakse tootmise põhiplaan (*master production plan*). Seel 8.7 on toodud lihtsustatud aasta tootmisplaani näide kvartalite kaupa.

Praktikas kasutatakse tootmise planeerimiseks arvutipõhiseid süsteeme MRP II ja ERP. Seel 8.18 on toodud MRP II süsteemidele iseloomulik arhitektuur. Järgnevatel punktidel on kirjeldatud põhiliste tootmise planeerimisülesannete lahendamise meetodikat. Meetodika tundmine võimaldab väike- ja keskmistel ettevõtetel lahendada planeerimisülesandeid, kasutades üldlevinud tarkvara (näiteks Excelit) ilma, et oleks vaja teha mahukaid investeeringuid MRPII ja ERP-süsteemidesse. Oluline on sealjuures, et sõltumata ettevõttes kasutusel olevast ERP-süsteemist, võimaldab meetodika tundmine analüüsida autonoomselt tootmise olukorda ja hinnata erinevaid alternatiivseid tootmise arendamise stsenaariume. Meetodika tundmine on samuti oluline üliõpilastele kursusetööde ja lõputööde tegemisel.

Tootmise optimaalseks planeerimiseks kasutatavad matemaatilised mudelid kirjeldavad toodete ja tootmistehnoloogiate (-protsesside) peamisi eesmärke ja piiranguid (mis takistavad soovitud lahendite parandamist). Projekteerimise eesmärgid on esitatud optimeerimiskriteeriumitega (sihifunktsioonidega). Kasutatavad matemaatilised mudelid peavad adekvaatselt kirjeldama tootmise tegelikku olukorda.

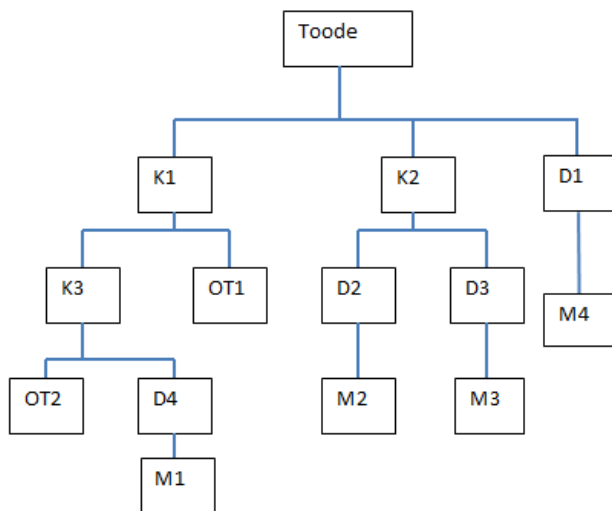
8.2. Toote tükilehe andmete haldamine planeerimiseks

Tootmisettevõttes on toote tükileht (BOM) oluline infoallikas nii projekteerijatele kui ka tootmisinseneridele. Tükilehe andmete haldamise eesmärgid on järgmised:

- 1) realiseerida ettevõttes tooteandmete ühtne andmebaas, mis võimaldab erinevaid vaateid tootestruktuurile (sh projekteeija tükileht (*BOM as designed*)), ja tootmise planeerija tükileht (*BOM as planned*), ning toetab ettevõtte erinevaid osakondi ja partnereid;
- 2) kasutada nüüdisaegseid tootestruktuuri töötlemismeetodeid ja toetada otstarbeka struktuuri esitamist tootele jm.

Toote elukaarega seotud teabehulga haldamine on töömahukas ülesanne, mis hõlmab paljusid andmebaase, mitmes kohas olevaid dokumente ning lisaks ka aeganõudvat toote elukaare analüüsi. Selle analüüsi tõhustamine on uute arvutipõhiste tehnoloogiate tulekuga muutunud esmatähtsaks. Mitmesugused arvuti kasutamisel põhinevad tööriistad (CAD-, PLM-süsteemid) hõlbustavad tootearenduse, müügi, tootmise, kvaliteedi ja juhtimisega tegelevate töötajate tööd uute toodete ja tehnoloogiate analüüsimisel ja kohandamisel lõpptoodete tõhusama valmistamise eesmärgil, aidates nii ettevõtte sees kui ka partneritel operatiivselt kasutada korrektsaid toodete andmeid.

Toote tükileht esitab andmed toote jagamisest komponentideks (detailideks – D, koostudeks – K, kasutatud materjalideks – M ja ostutoodeteks – OT). Vahet tuleb teha toote (konstruktori) spetsifikatsiooni (TS) ja tükilehe (BOM) vahel. Tegemist on kahe erineva dokumendiga. Mõeldav on käsitleda TS-ist BOM-i saamist kui protsessi, mida on arvuti abil otstarbekas toetada.



Sele 8.1 Toote tükilehe andmed esitatuna toote struktuurina, kus Ki-koost, Di-detail, OTi- ostutoode, Mi-materjal

TS esitab põhiliselt konstruktori töö tulemust ja kirjeldab toodet tema funktsioonidest (ka koostamisprotsessi nõuetest) lähtudes, s.t TS on esmajoones projekteerija dokument. BOM on aga tootmise planeerimise ja korralduse alusdokument. BOM peaks muuhulgas sisaldama ka optimeeritud tootestruktuuri, lähtudes tootmise korraldamise otstarbekusest, allhankijatest (tarnijatest) jms.

BOM on ettevõtteskesne ja ettevõtte erinevate struktuuriüksuste tegevust integreeriv. See määrab suuresti ka ettevõtte/ettevõtete koostöövõrgu konkurentsivõime.

Toote tükilehtkui dokument ei ole standarditud ja ettevõtted kasutavad erinevaid vorme. Seel 8.2 on toodud lihtsustatud tükilehe näide seel 8.1 esitatud toote struktuurile.

BOM tase	Komponendi tähis	Komponendi nimi	Koguse ühik	Kogus
0	Toode			
1	K1	Koost1	Tk	1
2	K3	Koost3	Tk	1
2	OT1	Ostutoode1	Tk	2
3	OT2	Ostutoode2	Tk	1
3	D4	Detail4	Tk	4
4	M1	Materjal1	Kg	10
1	K2	Koost4	Tk	1
2	D2	Detail 2	Tk	1
2	D3	Detail3	Tk	1
.....	

Sele 8.2 Tükilehe kui dokumendi lihtsustatud näide

Mida enam areneb ettevõtete koostöö, seda enam on vaja koostööd tootearendaja ja tootmise planeerija vahel, BOM on õige koht selle koostöö tulemuse fikseerimiseks.

Toote tükilehe struktuur mõjutab oluliselt tellimuste täitmise (tarne) aegasid (sele 8.3), mis määrab ettevõtte konkurentsivõime.

Tootmisel ja tellimuste täitmisel esinevad järgmised variandid:

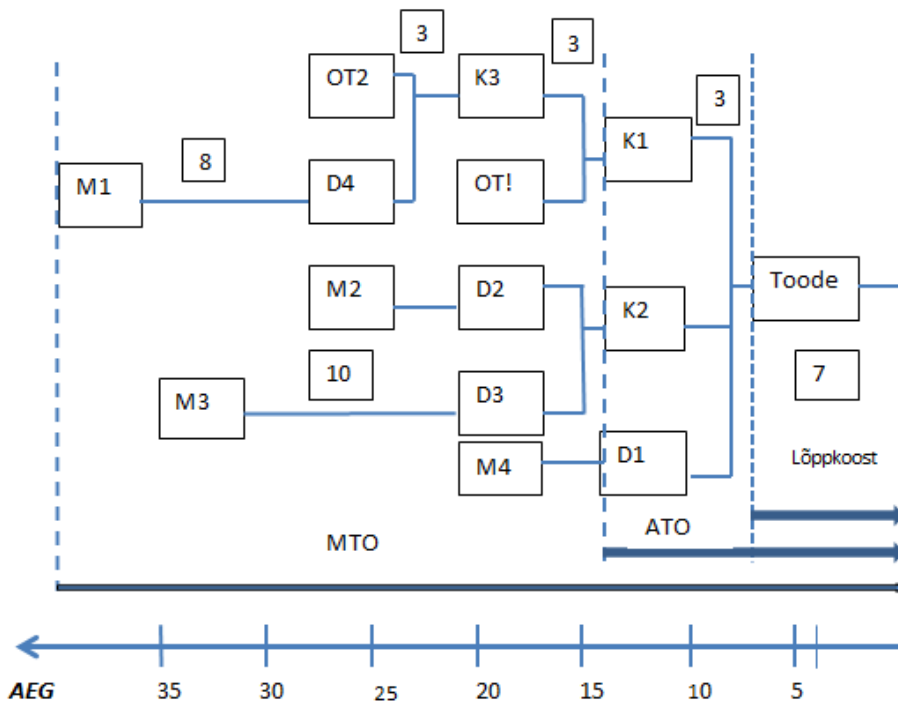
- **tootmisel lattu** (*manufacture to stock*, MTS) toodab ettevõtte lattu valmistooteid. Tarne toimub laost, tarneaeg on lühike. Tarne põhineb valmistoodete olemasolul laos. Puuduseks on suured kulud käibevahenditele;
- **tellimustootmine** (nimetakse ka **project-based manufacturing**). Tellimustootmist iseloomustab unikaalsete ja keerukate toodete valmistamine, mida arendatakse põhiliselt tellija nõuete põhjal. Tellimuse tõhusam täitmine põhineb peamiselt senitoodetud toodete kohandamisel tellija nõuetele ja standarditud moodulite kasutamisel. Tellimustootmise puhul hakatakse tootma, kui kliendilt on tulnud tellimus. Võimalikud on erinevad variandid:

alustatakse toote projekteerimisest (*engineering to order, ETO*), alustatakse toote valmistamisest (*manufacture to order, MTO*), alustatakse koostamisest (*assembly to order, ATO*) või tehakse ainult lõppviimistlus või lõppkoostamine.

Tellimustootmise määrab tootmisprogrammist lähtuv materjalide planeerimine, mis lähtub

- 1) põhitootmisprogrammist ehk tootmisülesandest, kus määratakse valmistatavate toodete liik ja kogus;
- 2) toote struktuurist (BOM), kus fikseeritakse toote komponendid, s.o mis materjalidest, koostudest ja pooltoodetest valmistooode koosneb, tuuakse koostamiseks vajalikud kogused;
- 3) planeeritud komponendi tootmistsükli ajast (sisseostetavate komponentide tarneajast), mille alusel määratakse, kui kaua kestab konkreetse toote komponendi tootmine või tarnimine (ajaline materjalivajaduse planeerimine);
- 4) olemasolevatest laovarudest;
- 5) kasutatavast tellimustootmise variandist.

Selel 8.3 on lihtsustatud näitena toodud ajagraafik selel 8.1 esitatud toote valmistamiseks.



Selel 8.3 Toote struktuuri (selel 8.1) mõju tarneajale, kus lõppkoostamine, ATO ja MTO, on tellimustootmise variandid ja tähistavad koostamis-, töötlemis- või transpordi/tarneaegu.

BOM-i arendamisel tuleb lahendada rida ülesandeid, nagu

- soovitatav BOM-i struktuur, arvestades valmistusprotsesse ja tootekomponentide tarnet. Toote struktuur määrab tarneajad erinevate tellimuste täitmise variantidele (sele 8.3). Lattu tootmisel ei sõltu tarneaeg toote struktuurist, tellimustootmisel aga oleneb (vt selel 8.3 tarneajad variantidele: lõppkoostamine, ATO ja MTO);
- toote alternatiivsete komponentide ja parametrizeeritud mudelite käsitlemine;
- tootmise seisukohalt optimaalse (väikese tasemetega arvuga) struktuuri kasutamine, toote tarneaegade lühendamine, toote modulariseerimine jms.

Tootestruktuuri optimeerimise üldised kriteeriumid on:

- saavutada minimaalne tarneaeg omahinnaga, mis tagab nõutava kasumi;
- saavutada maksimaalne kasum tingimusega, et tarneaeg oleks kliendile vastuvõetav;
- tagada mõlema skeemi juures nii kvaliteet kui ka tarnekindlus.

Ettevõtte jaoks lahendatavad ülesanded on:

- võimalikult vähese tasemetega arvuga BOM-i loomine, et tagada tootmise paindlikkus ja võimalikult lühike tarneaeg;
- otstarbekas tellimuste menetlemine, kliendi-tootja suhete süsteemi arendamine;
- allhanke otstarbekuse hindamine. Võrrelda tellimis- ja transpordiaegu ning olemasolevaid tootmisressursse. Valida tarnijad, kes suudavad tarnida tootekomponente antud tarneaegaga, nõutavas koguses ning nõutava kvaliteediga;
- analüüsida toodete nomenklatuuri eesmärgiga vähendada erisusi, hinnata alternatiivseid variante ja ühtlustada (unifitseerida) konstruktsioone jms.

8.3. Optimaalse planeerimise mudeli esitamine

Tootmise optimaalse planeerimise ülesande mudeli koostamine koosneb järgmistest sammudest:

- määrata (sisend) **parameetrid** X_i , mis kirjeldavad tootmissüsteemi/-protsessi, ja mille suurus muutudes saab modelleerida süsteemi käitumist ning mille väärtusi tuleb leida/optimeerida;
- määrata kriteeriumid (**sihifunktsioonid**) $F(X_i)$, mille järgi otsustatakse planeerimislahendite otstarbekus/optimaalsus. Sihifunktsioonid tuleb esitada sõltuvustena parameetritest, neid võib olla üks või mitu (multikriteeriaalne optimeerimine);
- Määrata **piirangud** (tõkked) $G_j(X_i)$, $j = 1, m$ süsteemi seisundit iseloomustavatele näitajatele ja parameetritele. Esitada sõltuvused piirangute kirjeldamiseks ja näitajate ning parameetrite lubatud suurused K_j ehk piirväärtused.

Optimaalse planeerimise ülesande püstitus on esitatav järgmise klassikalise matemaatilise planeerimise ülesande kujul:

leida parameetrite X_i $i = 1, n$, väärtused,

mis annavad min(või max) $F(X_i)$

ja rahuldavad tõkkeid:

$$G_j(X_i) (=, \leq \text{ või } \geq) K_j \quad j = 1, m.$$

Mudelite erinevused on määratud funktsioonide $F(X_i)$ ja $G_j(X_i)$ omadustega (lineaarsed või mittelineaarsed), aga samuti parameetrite X omadustega (pidevad või täiarvulised (diskreet- sed) jms). Käesoleval ajal käsitletakse teoreetilistes töodes nii sihifunktsioone kui ka piiranguid juhuslike funktsioonidena (stohhastiline planeerimine).

Planeerimismudeli väljatöötamisel on otstarbekas alustada tekstilisest ülesande kirjeldamisest: kirjeldades sisendparameetreid, optimeeritavaid muutujaid, sihifunktsiooni (eesmärgi) ja piiranguid. Tekstilisele mudeli kirjeldamisele järgneb sihifunktsiooni ja tõkete funktsioone kirjeldavate arvutusvalemite koostamine. Edasi tuleb mudel, s.o koostatud arvutusvalemid ja kasutatavad andmed ja muutujad esitada arvutis, kooskõlas kasutatava süsteemi nõuetega (näiteks Excelis), millele järgneb ülesande lahendamine (näiteks Excel Solveriga) ja tulemuste analüüs.

8.4. Tootmise planeerimine

Tootmise planeerimine on sageli lahendatavate ülesannete kogum, mis käsitleb piiratud ressursside tingimustes tootmise planeerimist ajas ja tagab kliendi nõudlust rahuldavate toodete majanduslikult otstarbekana ning tõhusa valmistamise etteantud tähtaegu arvestades. Oma olemuselt on enamikel juhtudel kasutusel tootmise planeerimine matemaatilise planeerimise mudeli rakendamine, arvestades olemasolevaid ressursse, eesmärgiga rahuldada nõudlust toodete järele minimaalse omahinnaga (maksimaalse kasumiga). Kasvava konkurentsi tingimustes peavad ettevõtted leidma ka kasutama üha otstarbekamaid organisatsioonilis-tehnilisi lahendusi. Sellega kaasneb ka vajadus üha enam arvestada kogu tootmise keerukusega, üksikute ettevõtete ja osakondade vaheliste seostega, s.t integreerida erinevaid planeerimisülesandeid üheks tervikuks, sh lahendada tootmise planeerimist koos tootearenduse ülesannetega.

Tootmise planeerimine koosneb hierarhiliselt seotud tootmisplaanide koostamise ülesannetest erinevatele ajavahemikele, nagu näiteks aasta, kvartal, kuu, nädal, päev, vahetus. Samuti võib plaane koostada erinevate tootmisüksuste jaoks, nagu tarneahel, ettevõtte, jaoskond, töökoht ning erinevatele toodete kogumitele (tooteperele). Nimetatud erineva tasemega ülesandeid lahendatakse reeglina eraldi, peamiselt järjestikku.

Järgnevalt käsitleme tootmise planeerimise tüüpudeleid ükitootmise tarvis. Planeerimise mudelid baseeruvad nõudluse hindamisel toodetele, mis ei ole enamikel juhtudel täpselt teada ja baseerub nõudluse prognoosidel.

Üldjuhul lähtutakse tootmise planeerimise ülesande mudeli **koostamisel** järgmistest tootmisolukorda kirjeldavatest omadustest:

- nõudlus (tavalisel min ja max nõudluse kujul) määrab kogumi tooteid, mida tuleb antud ajaperioodil toota;
- igale tootele on teada materjalide ja ostutoodete vajadus;
- igale tootele on teada, mis operatsioone, mis järjekorras on vaja sooritada, teada on ka peamised operatsioonid iseloomustavad näitajad, nagu näiteks seadmed või töökohad operatsioonide sooritamiseks, operatsioonide peamised tehnilis-majanduslikud näitajad, nagu töömahud, töötlemise maksumus jms;
- millised on ressursidest põhjustatud piirangud, nagu seadmete ajalised ressursid, personali ja materjalide ressursid jms;
- millised on tootmisplaanide otstarbekuse hindamise kriteeriumid.

Optimaalse planeerimise mudel on tootmise projekteerimise alus, see võimaldab otsustada, mida toota, mis mahus toota, (müüa, ladustada), kuidas jaotada tootmist töökohtade vahel ja ajas, hinnata töökohtade koormusi, hinnata erinevaid tehnoloogilisi lahendusi, vajaminevaid ressursse jms, sh leida tootmise kitsaskohti jms. Tootmise planeerimine võimaldab siduda mudeleid ka ERP- ja MES-süsteemidega.

Optimeerimisjärgse analüüsi käigus hinnatakse erinevate tootmisolukorra muudatuste mõju planeerimise tulemustele, kasutades muuhulgas piirangute teooriat (*theory of constraints*), aga samuti analüüsi, mida teha tootmise otstarbekuse ja konkurentsivõime parandamiseks.

8.4.1. Nõudluse prognoosimise (*demand forecasting*) meetodid

Oma olemuselt realiseeruvad tootmise planeerimise tulemused tulevikus. Sellepärast algab **tootmise planeerimine nõudluse prognoosimisega**. Prognoosimise vajadus ei ole iseloomulik ainult tootmise planeerimisele, see vajadus on märksa üldisem. Definitsiooni järgi on prognoosimine tulevikus asetleidva sündmuse hindamine, mille väärtus prognoosimise hetkel ei ole teada.

Tootmise planeerimisel ja juhtimisel kasutatakse prognoosimist näiteks toodete nõudluse hindamisel, müügimahtude prognoosimisel, toodete hindade muutuse prognoosimisel, tehnoloogiate iseloomustavate parameetrite arengu prognoosimisel jm.

Esineb kahte tüüpi nõudlust: sõltumatu ja sõltuv. Nõudlus lõpptoodetele on sõltumatu, nõudlus toote komponentidele ja materjalidele on sõltuv nõudlusest tootele. Nõudluse prognoos tuleb teha sõltumatu nõudluse tarvis, lähtudes toote tükilehest arvutatakse komponentide ja materjalide nõudlus.

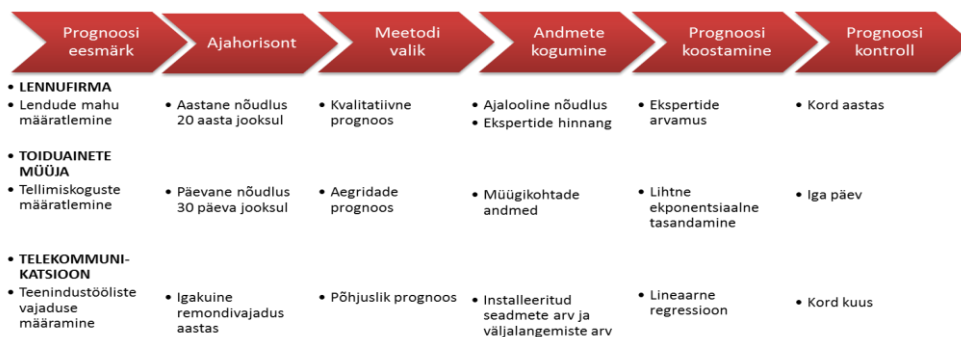
Prognoosimine aitab parandada klientide rahulolu, vähendada olukordi, kus vajalikku toodet ei ole õigel ajal saada, kavandada efektiivsemalt tootmistegevust, vähendada võimalikke riskivarusid ja materjali või toodete ülejäägiga seotud kulusid, hinnates näiteks:

- mis tooteid toodetakse kolme aasta pärast;
- milline on ettevõtte järgmise aasta/kuu käive;
- mis tooteid ja mis koguses ostetakse järgmisel nädalal/kuul jne.

Need on küsimused, millele on vaja vastuseid, kuna need mõjutavad oluliselt ettevõtte tootmise strateegiat, tootearendust, logistikat, eelarvet, tootmisprogrammi jms.

Selel 8.4 on toodud prognoosimise kuus peamist sammu erinevates valdkondades:

- 1) prognoosi eesmärk;
- 2) ajahorisont;
- 3) meetodi valik;
- 4) andmete kogumine;
- 5) prognoosi koostamine;
- 6) prognoosi kontroll.



Sele 8.4 Prognoosimise kuus sammu

Põhimõtteliselt saab prognoosimisel eristada kahte lähenemist [8.2.]:

- kvalitatiivne prognoosimine;
- kvantitatiivne prognoosimine.

Kvalitatiivne prognoosimine

Kvalitatiivne prognoosimine põhineb peamiselt ekspertide hinnangute analüüsil, mitte niivõrd rangetel matemaatilistel meetoditel. Tootmise planeerimisel on meetod kasutusel näiteks tehnoloogia arengute prognoosimisel. Üldlevinud kvalitatiivne prognoosimise meetod on Delfi meetod. Laialdaselt kasutatakse ka stsenaariumide koostamist ja hindamist.

Kvantitatiivne prognoosimine

Kvantitatiivse prognoosimise näiteks on aegridade meetod (*time series*), mis baseerub olemasolevate (ajalooliste) vaatlusandmete kasutamisel tuleviku prognoosimisel. Meetod eeldab olemasoleva ja tuleviku olukorra sarnasust, s.o eeldatakse, et tingimused prognoositava aja jooksul oluliselt ei muutu.

Hinnatakse uuritava suuruse väärtust, arengutrende, tsüklilisi muutusi (sh sesooneid muutusi) ja suuruse juhuslikku varieeruvust.

Aegridade meetodi kasutamine hõlmab:

- prognoosimise meetodika ja mudeli valikut;
- prognoosimiseks kasutatavate vaatlusväärtuste ja parameetrite hindamist;
- prognoosimist valitud meetodiga;
- prognooside tegelikkusega vastavuse hindamist ja vajadusel parameetrite täpsustamist.

Peamised kasutatavad meetodid on:

- liikuva keskmine meetod;
- lineaarne prognoosimise mudel;
- eksponentsiaalne mudel (*exponential smoothing*).

Liikuva keskmise meetod

Liikuva keskmise meetod on lihtsaim prognoosimise meetod ja see põhineb eeldusel, et ainult teatud hulk vaatlusi (vaatluste arvu m valib kasutaja) määrab prognoositava suuruse väärtuse

$$F(t) = \frac{\sum_{i=t-m+1}^t A(i)}{t}$$
$$f(t + \tau) = F(t), \tau = 1, 2, \dots$$

Kus $A(i)$ vaatluste väärtused m ajahetkel enne hetke t , τ – ajahetke tähis (alates hetkest t) ja $f(t + \tau)$ prognoositavad väärtused.

Lineaarse prognoosimise meetod

Klassikaliselt on aegridade puhul enamasti kasutusel kaks lähenemist: lineaarse prognoosimise mudel ja eksponentsiaalse prognoosimise mudel, mis baseeruvad erinevatel eeldustel.

Lineaarsel mudelil on eelnevate perioodide kõik vaatlustulemused võrdse kaaluga (näiteks Exceli funktsioon FORECAST).

Eksponentsiaalsel mudelil mõjutavad varasemad vaatlustulemused prognoositavat suurust vähem kui hilisemad (Exceli funktsioon GROWTH).

Eksponentsiaalse mudeli korral tuuakse sisse koefitsient α ($0 \leq \alpha \leq 1$), mis arvestab varasemate vaatlusandmete mõju vähenemist prognoosi tulemusele.

Eksponentsiaalse mudeli kasutamine erinevate α väärtuste korral on esitatud tabelis 8.1.

Tabel 8.1 Eksponentsiaalse ja lineaarse mudeli kasutamise näide

Vaatluse aeg (kuu)	Nõudlus tootele	Prognoos		
		Eksponentsiaalne		Lineaarne prognoos
		$\alpha = 0,2$	$\alpha = 0,6$	
1	10	-	-	-
2	12	10,0	10,0	10,0
3	12	10,4	11,2	14,0
4	11	10,7	11,7	13,3
5	15	10,8	11,3	12,0
6	14	11,6	13,5	14,7
7	18	12,1	13,8	15,1
8	22	13,3	16,3	17,6
9	18	15,0	19,7	20,9
10	28	15,6	18,7	21,1

Põhjuslikud mudelid. Põhjuslike mudelite korral kasutatakse regressioonanalüüsi meetodeid. Põhjuslikud meetodid (*causal methods*) põhinevad eeldusel, et on olemas mingid faktorid või parameetrid, mis mõjutavad prognoosimise tulemust. Täiendavateks mõjufaktoriteks võivad näiteks olla sesoonsus, turutingimuste muutus (näiteks uus konkurent turul), mitmesugused kriisid jms. Teades ja hinnates neid faktoreid ja parameetreid, saab otsitavat suurust täpsemalt prognoosida. Tavaliselt on vajalik mõjufaktorite kvantitatiivne hindamine ja see võib osutada keeruliseks. Uuemad meetodid (näiteks närvivõrkude meetod) võimaldavad hinnata ka kvalitatiiivsete (mittenumbriliselt väljendatavate) faktorite mõju [8.2].

Mudeli üheks eesmärgiks on hinnata sõltumatute sisendparameetrite mõju prognoositavale suurusele. Tavaliselt kasutatakse lineaarset regressiooni mudelit kujul:

$$E(Y/x) = \beta_0 + \beta_1 x$$

kus Y ja x on vaatlusandmete väljund- ja sisendandmed ning β_0 ja β_1 hinnatavad mudeli parameetrid.

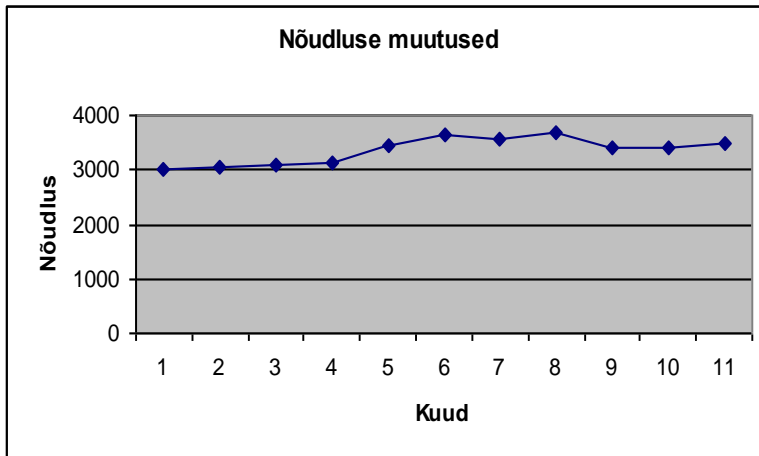
Vaatlusandmete alusel hinnatakse regressioonanalüüsi meetodeid kasutades β_0 ja β_1 väärtused, mis lähendavad parimal viisil vaatlusandmeid.

Näide: lineaarse regressiooni kasutamine

Oletame, et meil on vaatlusandmed nõudluse muutuse kohta aasta jooksul (tabel 8.2 ja sele 8.5). Eesmärgiks on leida seos prognoosimiseks, mis hindab nõudlust erinevatel kuudel ja arvestab aastaaegu.

Tabel 8.2 Lähteandmed prognoosimiseks

Kuu	Kuu, jrk nr	Suvi/talv	Nõudlus
Jaauar	1	0	3025
Veebruar	2	0	3047
Märts	3	0	3079
Aprill	4	0	3136
Mai	5	1	3454
Juuni	6	1	3661
Juuli	7	1	3554
August	8	1	3692
September	9	1	3407
Oktoober	10	0	3410
November	11	0	3499
Detsember	12	0	3598



Sele 8.5 Nõudluse muutus erinevatel kuudel

Näitena on saadud seos nõudluse prognoosimiseks kujul:

$$\text{Nõudlus} = 2969,25 + 46,73 \times k + 257,26 \times a,$$

Kus k – kuu jrk number ja a – aastaaja kood (talv = 0 ja suvi = 1).

8.4.2. Tooteportfelli optimeerimine

Toodete otstarbeka portfelli leidmist (*product mix planning*) [8.1, 8.2] võib nimetada tootmise planeerimise baasülesandeks. Tüüpiliselt on ülesande tekstiline püstitus järgmine: ettevõtte toodab mitut erinevat toodet, mis vajavad erinevas mahus seadmete ja personali ressursse

(tööaega), materjale ning ostutooteid. Lisaks piiravad valikuid tavaliselt igale tootele turunõudluse maksimaalsed ja minimaalsed väärtused. Leida tuleb erinevate toodete tootmiskogused, mis annavad ettevõttele maksimaalse kasumi.

Leitud otstarbekat toodete portfelli tuleb hinnata, arvestades reaalsel tootmisolukorda ja sageli tuleb ülesannet lahendada mitu korda, täpsustades piiranguid ja sihifunktsiooni.

Ülesannet võib lahendada järgmise skeemi järgi:

- defineeri otstarbeka toodete portfelli ülesanne (sh optimeeritavad parameetrid, sihifunktsioon ja piirangud);
- analüüsi andmeid tooteportfelli leidmiseks;
- tööta välja alternatiivsed stsenaariumid toodete nomenklatuuri arendamiseks;
- koosta arvutusmudelid portfelli peamiste parameetrite ja näitajate arvutamiseks. Realiiseeri mudel arvutil;
- leia (lineaarse) planeerimise ülesande lahendusena otstarbekas tooteportfell antud stsenaariumi jaoks. Analüüsi erinevate stsenaariumide mõju tooteportfellile;
- hinda leitud tooteportfelli otstarbekust ja evitamise võimalusi.

Üldistatud kujul sisaldab toodete portfelli leidmise mudel:

- optimeeritavate parameetritena erinevate toodete (tootegruppide) tootmismahutused antud ajaperioodil, sisendparameetritena toodete valmistamise töömahud, nõudluse piirväärtused toodetele, kasumit iseloomustavad parameetrid jm;
- sihifunktsioonina kasutatakse tavaliselt summaarset kasumit

$$S = \sum_{i=1}^n (r_i S_i - c_i X_i), kus$$

S – summaarne kasum;

r_i – müügi hind;

S_i – müüdü kogus, tooteportfelli planeerimisel võetakse $S_i = X_i$;

c_i – kulud ühe detaili valmistamiseks;

X_i – valmistatud detailide arv;

- peamiste piirangutena kasutatakse summaarseid töömahtusid erinevatele töökohtadele (töökohtade koormust), kasutatavaid materjalide ressursse ja nõudlust toodetele.

Erinevates olukordades võib tekkida vajadus kontrollida täiendavaid piiranguid, nagu piirangud personalile, transpordivahendite kasutamisele, ladude (sh vaheladude ehk puhvrite) mahule jms.

Reaalsel tootmisolukorras tuleb arvestada veel mitme täiendava piiranguga, nagu näiteks:

- tellimuse edasilükkamine, järeltellimine (*backorders*);
- allhangete tellimine (*sub-contracting*);
- ületunnitöö (*overtime*);
- kaod praagile jm tehnoloogilised kaod (*yield loss*);
- täiendava tööjõu palkamine jm.

Tooteportelli leidmise näide

Ettevõtte toodab kolme tüüpi tooteid: A; B ja C. Tootmiseks kasutatakse kahte töökohta WS1 ja WS2.

Tootmist võib iseloomustada järgmise tabeliga 8.3.

Tabel 8.3 Tootmise iseloomustus

Toode	Kasum	Vajalik töö- maht, WS1	Vajalik töö- maht, WS2	Materjali vajadus	Minimaalsed kogused	Maksimaalsed kogused
A	50	12,5	7	5	5	12
B	100	15	20	15	7	15
C	75	17	18	10	5	10

Tööaja ressurss töökohtadele on 400 tundi ja materjali saab kasutada kuni 300 ühikut.

Eesmärk on leida erinevate toodete valmistamise kogused X_A, X_B, X_C , mis annavad maksimaalse kasumi

$$\max(X_A * 50 + X_B * 100 + X_C * 75),$$

ja rahuldavad tõkkeid:

$$X_A * 12,5 + X_B * 15 + X_C * 17 \leq 400 - \text{ressurss WS1}$$

$$X_A * 7 + X_B * 20 + X_C * 18 \leq 400 - \text{ressurss WS2}$$

$$X_A * 5 + X_B * 15 + X_C * 10 \leq 300 - \text{ressurss materjalil e}$$

$$5 \leq X_A \leq 12 - \text{nõudlused tootele A}$$

$$7 \leq X_B \leq 15 - \text{nõudlused tootele B}$$

$$5 \leq X_C \leq 10 - \text{nõudlused tootele C}$$

$$X_A; X_B; X_C \geq 0$$

Lahendina leiame, et optimaalne **toodete portfell on**: $X_A = 10; X_B = 12; X_C = 5$,

Sealjuures kasutatakse ressursse järgmiselt: WS1 = 390 tundi; WS2 = 400 tundi, materjali 280 ühikut.

Mudel lahendamiseks Excel Solveriga on esitatav kujul (sele 8.6):

a) Ülesande püstitus

Ettevõtte toodab kahel töökohal WS1 ja WS2 kolme tüüpi detaile A, B ja C.

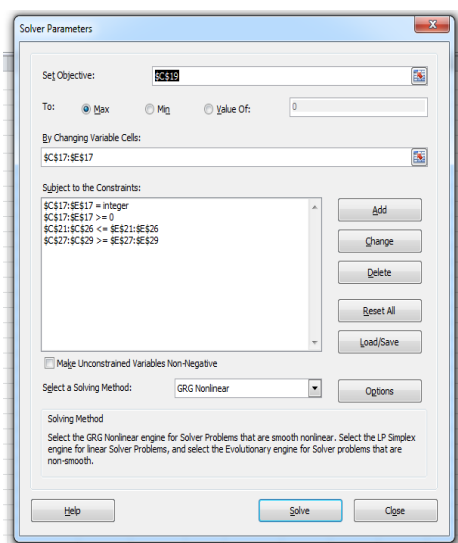
Teada on kasum ja materjalikulu detaili kohta, detailide töömahud töökohtadel ja min ning max nõudlused.

Leida otstarbekad detailide kogused, mis annavad maksimaalse kasumi ja rahuldavad ressursside ja nõudluse piiranguid.

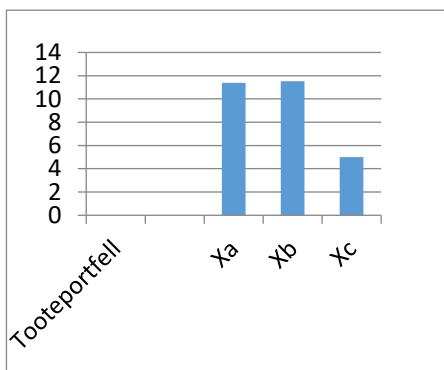
b) Mudeli kirjeldus Excelis

1	A	B	C	D	E	F	G
2	Tooteportfell planeerimise näide						
3	Ettevõtte toodab 3 erinevat toodet A, B ja C, kasutusel on töökohtad WS1 ja WS2						
4							
5	Lähteandmed planeerimiseks						
6	Algandmed		Toömahud				
7	Toode	Kasum	WS1	WS2	Materjali kulu	Min nõudlus	Max nõudlus
8	A	50	12,5	7	5	5	12
9	B	100	15	20	15	7	15
10	C	75	17	18	10	5	10
11							
12	Tööaja ressurss	<=	400 tundi				
13	Materjali ressurss	<=	300 kg				
14							
15	Optimeeritavad muutujad						
16	Tooteportfell	Xa	Xb	Xc			
17		10	12	5			
18							
19	Sihifunktsioon	2075					
20							
21	Piirangud	390	<=	400	Piirangud tööaja ressurssile		
22		400	<=	400			
23		280	<=	300	Piirang materjali kogusele		
24		10	<=	12	Piirangud max nõudlusele		
25		12	<=	15			
26		5	<=	10			
27		10	>=	5	Piirangud min nõudlusele		
28		12	>=	7			
29		5	>=	5			
30							

c) Pöördumine Excel Solveri poole



d) Optimaalne tooteportfell



Sele 8.6 Optimaalse tooteportfelli leidmise ülesande lahendamise peamised sammud

Aktiivsed tökked, mis piiravad suurema kasumi saamist on töökoha WS2 ressurss (400 tundi), varihinnaga 2,07 (NB! varihinna hindamiseks tuleb loobuda täisarvulisuse nõudest) ja piiratud minimaalne nõudlus tootele C.

8.4.3. Tootmise agregaat- (strateegiline) planeerimine

Agregaatplaneerimine on oluline lüli ressursside planeerimise ja tootmise operatiivplaneerimise vahel. Ressursside (füüsiline infrastruktuur ja personal) planeerimine arvestab pikemat perspektiivi (1–5 aastat) ja selle tulemused on agregaatplaneerimise aluseks. Operatiivplaneerimine täpsustab agregaatplaneerimisega määratud tootmisplaane lühematele ajaperioodidele ja põhineb agregaatplaneerimisel kasutatud agregeeritud näitajatel.

Agregaatplaneerimine [8.1] on tootmise planeerimise üldistatud pilt, mis püüab vältida liigset detailsust ja esitab plaani üldistatud ehk agregeeritud kujul. Tavaliselt koostatakse agregeeritud tootmisplaani 3–18 kuud ette, et anda tootmisjuhtidele informatsiooni, kui palju ja mida toota, mis kogustes tellida materjale ja ostutooteid, et tagada tellimuste täitmine ja maksimaalne kasum. Agregaatplaneerimine on aluseks nii üksiku ettevõtte kui ka tarneahela tööplaneerimisel. Planeerimine peab sealjuures olema piisavalt paindlik, et võimaldada arvestada tootmissüsteemi muutusi.

Agregaatplaneerimise sisendid on:

- informatsioon toodete nõudluse kohta erinevatel ajaperioodidel. Laia ja muutuva nomenklatuuriga tootmise juures esitatakse nõudluse andmed agregeeritult, s.o toodete gruppide kaupa;
- informatsioon olemasolevatest ressurssidest (grupeerides seadmed ja personal suurematesse üksustesse, näiteks tootmisjaoskondadesse), sh ka võimalikud allhanked ning materjalide ja ostutoodete mahud tootegruppide kaupa;
- tootestruktuuri ja tootmisprotsessi kirjeldused, mis esitatakse samuti agregeeritud kujul (näiteks tooteperele);
- majandusnäitajad, s.o kulutused tootmisele, materjalidele ja ostutoodetele, allhanke maksumused, ületunnitöö ja tellimuste täitmise edasilükkamise hinnad jms.

Agregaatplaneerimise tulemused on tootmisplaani koostamise aluseks. Selal 8.7 on esitatud lihtsustatud aasta tootmisplaani näide kvartalite kaupa. Järgnevatel planeerimise etappidel täpsustatakse tootmisplaani lühematele ajaintervallidele (kuud, nädalad, päevad).

Põhitootmisplaani näide (aastale)

	Kv1	Kv2	Kv3	Kv4
Toode A				
Algne laoseis	5			
Laoseis	9	5	5	5
Kindlustusvaru	5	5	5	5
Partii suurus	16	16	16	16
Nõudlus	25	35	35	25
Müüdavad kogused	25	35	35	29
Edasilükatud ja toodetud kogused	29	31	35	29
Toode B				
Algne laoseis	10			
Laoseis	10	10	10	10
Kindlustusvaru	10	10	10	10
Partii suurus	14	14	14	14
Nõudlus	20	20	20	20
Müüdavad kogused	30	28	23	30
Edasilükatud ja toodetud kogused	30	28	23	30

Sele 8.7 Põhitootmisplaani lihtsustatud näide

Üldistatud kujul sisaldab agregaatplaneerimise mudel optimeeritavaid parameetreid ja siht-funktsioone

- optimeeritavateks parameetriteks on erinevate toodete (tootegruppide) müüginahud, tootmismahud ja laoseisud perioodide kaupa;
- sihifunktsiooniks on summaarne kasum üle vaadeldavate perioodide (müügitulemi miinus kulud tootmisele ja ladustamisele)

$$S = \sum_{i=1}^n (r_i S_i - c_i X_i - h_i I_i), kus$$

S – summaarne kasum;
 r_i – müügi hind;
 S_i – müüdnud kogus, tooteportfelli planeerimisel võetakse $S_i = X_i$;
 c_i – ühe detaili valmistamise kulud;
 X_i – valmistatud detailide arv;
 h_i – kulud ühe detaili ladustamisele;
 l_i – ladustavate detailide arv perioodi lõpus.

Piiranguteks on

- piirangud müügiimahtudele lähtuvalt nõudlusest d_{it} kujul
 $S_{it} \leq d_{it}$;
- summaarsed töömahud erinevatele töökohtadele (töökohtade koormus) ajaperioodide kaupa kujul:

$$\sum_{i=1}^m b_{ij} * X_{it} \leq k_{jt}, \text{ kus}$$

b_{ij} – ühe toote i tootmiseks vajalik aeg seadmel (töökohal) j ;

X_{it} – toote i valmistamise kogus vaadeldaval perioodil t ;

k_{jt} – töökooha ressursi j piirväärtus antud perioodil t ,

- ja toodete bilansi piirangud kujul:

$$I_t = I_{t-1} + X_t - S_t,$$

s.t laoseisud igale tootegrupile (detailile) on i perioodi lõpus võrdsed laoseisuga perioodi alguses pluss antud perioodil valmistatud toodete arv miinus müüdnud toodete arv.

Seel 8.8 on toodud peamised etapid agregaatplaneerimise ülesande lahendamiseks Excel Solveriga.

<p>a) Ülesande püstitamine (teksti kujul)</p> <p>Ettevõtte toodab ühte toodet. Teada on toote müügihind, töömahud valmistamisel, kulud materjalile ja töökohta resursid ning kulutused ühele tootele laos. Leida tuleb kahel järgneval kuul tootmise- ja müügiimahud ning laoseisud, kui algul on laoseis 0.</p>	<p>b) Agregaatplaneerimise lähteandmed</p>
--	--

<p>a) Agregaatplaneerimise mudel Excelis</p> <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th colspan="4">Optimeeritavad muutujad</th> </tr> <tr> <th>Kuud</th> <th>Tootmine</th> <th>Müük</th> <th>Laos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>20</td> <td>15</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>20</td> <td>25</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th colspan="4">Sihtfunktsioon (kasum)</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>2995</td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th colspan="4">Piirangud</th> </tr> <tr> <td>Kuu1</td> <td>200</td> <td><=</td> <td>200 Töökohta koormus</td> </tr> <tr> <td></td> <td>15</td> <td><=</td> <td>25 Müük < max nõudlus</td> </tr> <tr> <td></td> <td>15</td> <td>>=</td> <td>15 Müük > min nõudlus</td> </tr> <tr> <td>Kuu2</td> <td>200</td> <td><=</td> <td>200 Töökohta koormus</td> </tr> <tr> <td></td> <td>25</td> <td><=</td> <td>40 Müük < max nõudlus</td> </tr> <tr> <td></td> <td>25</td> <td>>=</td> <td>25 Müük > min nõudlus</td> </tr> <tr> <td></td> <td>5</td> <td>=</td> <td>5 Toodete bilansid</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0</td> <td>=</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Optimeeritavad muutujad				Kuud	Tootmine	Müük	Laos	1	20	15	5	2	20	25	0	Sihtfunktsioon (kasum)							2995	Piirangud				Kuu1	200	<=	200 Töökohta koormus		15	<=	25 Müük < max nõudlus		15	>=	15 Müük > min nõudlus	Kuu2	200	<=	200 Töökohta koormus		25	<=	40 Müük < max nõudlus		25	>=	25 Müük > min nõudlus		5	=	5 Toodete bilansid		0	=	0	<p>b) Pöördumine Excel Solveri poole</p>
Optimeeritavad muutujad																																																													
Kuud	Tootmine	Müük	Laos																																																										
1	20	15	5																																																										
2	20	25	0																																																										
Sihtfunktsioon (kasum)																																																													
			2995																																																										
Piirangud																																																													
Kuu1	200	<=	200 Töökohta koormus																																																										
	15	<=	25 Müük < max nõudlus																																																										
	15	>=	15 Müük > min nõudlus																																																										
Kuu2	200	<=	200 Töökohta koormus																																																										
	25	<=	40 Müük < max nõudlus																																																										
	25	>=	25 Müük > min nõudlus																																																										
	5	=	5 Toodete bilansid																																																										
	0	=	0																																																										

Sele 8.8 Agregaatplaneerimise näide Excel Solveriga

Analoogiliselt toodete portfelli leidmisega võib ka agregaatplaneerimisel arvestada mitme täiendava aspektiga:

- tellimuse edasilükkamine;
- allhangete tellimine;
- ületunnitöö;
- kaod praagile jm tehnoloogilised kaod;
- täiendava tööjõu palkamine jm.

Agregaatplaneerimisega on paratamatult seotud teatud modelleerimise määramatus. Valmistamisele kuluv aeg, nõudlus ja tellimuste täitmine võivad sageli erineda planeerimisel kasutatud väärtustest. Selleks, et vähendada taolise määramatuse mõju tootmisele, võib kasutada erinevaid võtteid. Üheks laialt levinud võtteks määramatuse arvestamisel on minimaalsete garanteeritud laoseisude (kindlustusvarude) kasutamine (*safety stock*). Kindlustusvaru tagamiseks on mudelisse soovitatav lisada piirangud

$$I_{it} \geq s_{it}, i = 1, m, t = 0..t_l$$

Peamised probleemid agregaatplaneerimise evitamisel on:

- agregaatplaneerimine on osa hierarhisest, ülalt alla toimivast planeerimise protsessist. Sageli püütakse seda esitada liiga detailselt, mis vähendab AP robustsust;
- agregaatplaneerimine viiakse läbi erinevate spetsialistide gruppide poolt, arvestades planeerimise erinevaid aspekte ja erinevaid agregeerimise tasandeid;
- kasutatakse erinevaid mudeleid ja lihtsustusi, mis võivad anda ebarealistlikke lahendusi;
- modelleerimisel kasutatav andmete hulk on suur ning selle haldamine keerukas. Püütakse vältida keerukaid ja töömahukaid mudeleid.

Soovitused agregaatplaneerimise kasutamiseks

Soovitav on püstitada planeerimise ülesanne laiemalt, pikema perioodi kohta.

Kasutada mudeleid ja tööriistu, mis võimaldavad paindlikult arvestada olukorra muutusi, arvestada, et nõudluste ja hindade prognoosid võivad ajas muutuda ja on enamasti ebatäpsed.

Agregaatplaneerimist ja eriti sellega seotud tootmise alternatiivsete variantide analüüsi on otstarbekas teha sõltumatult ettevõttes kasutatavast tootmise planeerimise süsteemist (ERP-süsteemist). Agregaatplaneerimisega kaasneb tootmise alternatiivsete variantide ja tootmist iseloomustavate parameetrite väärtuste analüüs ja hindamine, millel on omaette väärtus. Reaalset tootmisolukorda kirjeldavad, eriti tarneahela agregaatplaneerimise mudelid, on mahukad ja nõuvad otstarbekat agregeerimist.

8.5. Ressursside strateegiline planeerimine

Lähtudes antud kõrgkooliõpiku eesmärkidest, käsitletakse siin peamiselt meetodikaid, mis on seotud füüsiliste (seadmed, tööriistad jm) ja inimressursside kasutuse otstarbeka planeerimisega.

Ressursi liiasus mõjutab investeeeringute tõhusust, vähene ressurss piirab aga tootmisülesannete tähtajalist täitmist. Ressursside plaan määrab tootmissisendite (materjalid, ostutooted, personal jt) tasemed, mis võimaldavad otstarbekalt rahuldada turunõudlust toodete järele.

Käsitleme peamiselt strateegilisi otsuseid, missuguseid ressursse arendada ja millises mahus, arvestades pikemat perspektiivi. Strateegilistel ressursside planeerimise otsustel on määrav mõju ettevõtte üldisele tõhususele. Arvestades, et ressursside planeerimine on tootmise planeerimise hierarhia tipus, sõltub nendest otsustest suuresti ka järgmiste otsuste tase. Olukorra teeb keerukamaks asjaolu, et otsuseid tuleb teha antud ajahetkel ja kohe, nende mõju aga avaldub üldjuhul pikema perioodi (sageli 3–5 aasta) jooksul. Variantidena tuleb käsitleda mitte ainult antud konkreetse ettevõtte ressursse, vaid ka võimalust kasutada koostööpartnerite ressursse (tellida allhanget). Koosõlastatud ressursside arendamine partnerite koostöövõrgus on üks kaasaja tootmise arendamise olulisemaid tunnuseid. Arvestada tuleb samuti asjaoluga, et ressursside arendamine on otsus, mis nõuab märkimisväärsed rahalisi

investeeringuid, s.t niigi piiratud rahaliste ressursside jaotamist eri valdkondade vahel, s.o ressursside arendamise prioritseerimist ja erinevate ressursside omavaheliste seoste arvestamist. Ressursside planeerimine eeldab ettevõttes vajalike andmete kogumist ja analüüsi selleks, et hinnata kavandatud tegevuste otstarbekust, prognooside täpsust jms.

8.5.1 Füüsiliste ressursside planeerimine

Klassikaline ressursside planeerimise ülesanne eeldab, et töökoha ajaressurss on igal ajaperioodil ette antud ja fikseeritud. Ressursi sobivuse hindamisel on aluseks ressursi tehnoloogiline sobivus antud ülesande täitmiseks (tehnoloogilised võimalused, mõõdud, täpsus jms). Üldkuju võib klassikalise lähenemise korral ressursi j piiranguid planeeritaval ajaperioodil t esitada kujul

$$\sum_{i=1}^m b_{ij} * X_{it} \leq k_{jt}, \text{ kus}$$

b_{ij} – ühe toote i tootmiseks vajalik aeg seadmel (töökohal) j ;

X_{it} – toote i valmistamise kogus vaadeldaval perioodil t ;

k_{jt} – töökoha ressursi j piirväärtus antud perioodil t .

Eeltoodud piirang ei arvesta seadmetega seotud võimalikke ajakadusid, mis on tingitud seadmete ümberseadistuse aegadest, ooteaegadest, seadme teenindusaegadest, riketest ja remondist tingitud seisakutest jms. Arvestades eeltoodut, on otstarbekas esitada ressursi piirang kujul:

$$\sum_{i=1}^m b_{ij} * X_{it} \leq q * k_{jt},$$

kus q hindab eelnevatel kogemuste alusel määratud seadme tegelikku kasutatavat keskmist suhtelist koormust (seadme töövalmidust), $q \leq 1,0$.

Reaalses tootmisolukorras tuleb arvestada ka võimalikku ületunnitööd, võimalusi täiendava tööjõu palkamiseks (näiteks täiendava vahetuse loomiseks) ja ka allhangete tellimise võimalusi, mis mõjutavad oluliselt ressursivajadust. Eeldades töökohal j ületunnitöö võimalikkust perioodil t mahus O_{jt} , saame ressursi piirangu kujul:

$$\sum_{i=1}^m b_{ij} * X_{it} \leq q * k_{jt} + O_{jt}.$$

Varieerides q ja O_{jt} väärtusi, saab modelleerida erinevaid tootmise olukordi. Analoogiliselt võib klassikalise ressursside planeerimise mudelisse lisada täiendava tööjõu palkamise (sa-

muti tööliste arvu vähendamise) ja allhanke võimalused. Arvestades inimressursside ja füüsiliste ressursside planeerimise ülesannete tihedat seotust, on otstarbekas lahendada need koos [8.1].

8.5.2 Inimressursside planeerimine

Seadmete füüsiline ressurss on tihedalt seotud personaliga (inimressurssiga). Inimressursside planeerimise ülesande eesmärk on kindlustada olukord, kus ettevõtte on vajalikul hulgal ja vajalikul hetkel vastavalt kvalifitseeritud personali; planeerida tegevusi, kuidas ettevõtet otstarbekalt juhtida tulevikus oodatavasse inimressursside olukorda. Traditsioonilisel lähenemisel, s.o suhteliselt stabiilses tootmise olukorras, käsitleti inimressursside planeerimist kui keskpika või isegi operatiivse planeerimise ülesannet ja seda seostati peamiselt konkreetse tootmissüsteemi hetkevajadustega. Seoses ärikeskkonna stabiilsuse vähenemise, rahvusvahelise konkurentsi kasvu ja tehnoloogia muutuste tõttu, on suurenenud ettevõtte inimressursside planeerimise kui strateegilise planeerimise vajadus, et ettevõtte oleks võimeline tegema muudatusi seoses turunõudluse muutumisega, muutuda paindlikumaks ja enam klientidele orienteerituks. Inimressursside planeerimisel on kasvanud vajadus arvestada integreeritult inimressursside seost ettevõtte üldise konkurentsivõime strateegilise arendamisega nii lühikeses, keskpikas kui ka strateegilises perspektiivis.

Strateegiline inimressursside planeerimine baseerub ettevõtte ressursside arenguvajaduste prognoosimisel, vajalike tegevuste planeerimisel personali koolitamiseks, sh ümberõppeks, et tagada ettevõttes nõutava kvalifikatsiooniga spetsialiste nõutaval arvil. Sugugi vähemtähtis ei ole personali otstarbekas kasutamine ja motiveerimine, et tagada konkurentsivõime kasv. Inimressursside planeerimisel on muuhulgas oluline tagada töökohtade mitmekesisus.

Mitmes tootmisolukorras on otstarbekas planeerida füüsilisi ja inimressursse eraldi. Paremat tulemust annab aga nende integreeritud planeerimine, mis suurendab oluliselt ülesande keerukust ja arvutusmahtu [8.2].

8.6 Tootmisvarude juhtimine

8.6.1 Tootmisvarude liigid

Tootmise planeerimise üks eesmärgi on tootmisvarude (*inventory*) koguse vähendamine, s.t nõue, et vajadus tootmisvarude järele kaetaks minimaalsete kulutustega. Tootmisvarude otstarbekas planeerimine ja juhtimine on üks ettevõtte ja tarneahela töö planeerimise ülesandeid. Tootmisvarude vähendamine on üks varudeta tootmise (*just in time*, vt ptk 8.8.7.1) peamisi eesmärgi.

Ettevõtete koostöövõrgus on võimalik erinevaid tootmisvarude (materjalid, varuosad jm) koguseid partnerite vahel hajutada, tagades nii varude otstarbekad mahud ja kulutuste vähenemise.

Eristatakse nelja tüüpi tootmisvarusid [8.2].

1. **Lähtematerjalid:** materjalid ja toote komponendid, mis tarnitakse ettevõttesse väljastpoolt ja mida kasutatakse toodete valmistamiseks.
2. **Tööprotsessis olevad tooted** (*work in process*, *WIP*): lõpetamata toodang tootmissüsteemis.
3. **Valmistoodete varud:** tooted ladudes enne müüki.
4. **Varuosad:** komponendid, mida kasutatakse seadmete hoolduseks ja remondiks.

Erinevate tootmisvarude hoidmise põhjused on erinevad.

Lähtematerjalide varu

Kui ettevõttes on evitatud JIT-lähenemine, siis pole põhiliste lähtematerjalide varud ettevõttes olulised. Praktikas ei ole see aga kõikide materjalide osas võimalik. On kolm põhilist tegurit, mis mõjutavad lähtematerjalide varude suurust.

1. Tootmise partiiilisus, sh varud, mis on seotud tellimuste täitmise tsüklilisusega.
2. Tootmise varieeruvus, mis tingib erinevusi planeeritud ajaplaanidest, praaktooteid jms. Tootmise varieeruvuse mõju vähendamiseks planeeritakse kindlustusvarud.
3. Vananemine, muutused nõudluses võivad luua olukorra, kus teatud materjale ja komponente enam ei vajata ja need jäävad varudena lattu seisma.

Tööprotsessis olevate toodete arv WIP

Tootmist ei saa korraldada nii, et tööprotsessis puuduvad tooted.

Reaalses tootmises võivad tooted olla järgmistest olekutes:

- 1) ootavad järjekorras töötlemist/koostamist;
- 2) tooteid töödeldakse;
- 3) ootavad kogu partii valmimist;
- 4) transporditakse;
- 5) ootavad koostamisel sobiva detaili/komponendi saabumist. Kui detail on saabunud, muutub see komponent järjekorras olevaks, s.t ootab vabanevat töökohta koostamiseks.

Ainult vähem kui 10% toodetest on vahetus tootmisprotsessis. Enamik toodetest ootab kas töötlemise või transpordi järjekorras või ootab sobivat komponenti [8.2].

Valmistoodete varud

Kui valmistooted tarnitakse tellijale kohe peale valmimist, siis valmistoodete varud pole vajalikud. On viis erinevat valmistoodete varude olemasolu põhjust:

- 1) suurema konkurentsivõime saavutamiseks ja tarneaja vähendamiseks kasutavad paljud ettevõtted vähemalt osaliselt lattu tootmist (nn kaubamaja mudel). Et vähendada valmistoodete varusid, kasutavad ettevõtted koostamist tellimuse saamisel, s.t laos on lõppkoostamiseks vajalikud komponendid ja tellimuse saamisel tehakse ainult lõppkoostamine;

- 2) seeriatootmine, mis võib põhjustada tellimuste saamise ja tootmispartii valmistamise erinevusi;
- 3) nõudluse prognoosimise vead;
- 4) tootmise varieeruvus tellimustoomisele orienteeritud ettevõtetes;
- 5) sesoonsus.

Varuosade varud

Varuosasid ei kasutata otseselt toodetes, kuid nad on vajalikud, et seadmed püsiksid töökorras.

Varuosade varude peamised põhjused on:

- 1) tagavad kiire hoolduse ja remondi;
- 2) tagavad sujuva tootmise;
- 3) tarne tingimused, s.o kui näiteks varuosade hinnad sõltuvad ostetud kogusest või ajast (sesoonsusest), siis on otstarbekas osta neid varuks.

Selleks, et otstarbekalt varusid juhtida on mitmeid soovitusi:

- 1) nõudluse prognoosimise parandamine, tsükliagade lühendamine, paremate tootmise ajaplaanide koostamine jm on mõningad näited võimalustest täpsustada laovarude vajalikku suurus;
- 2) varude ABC- ja X,Y,Z-analüüs;
- 3) *just in time* juhtimissüsteemi evitamine;
- 4) kindlustusvarude valik;
- 5) otstarbekate tellimusaegade ja partiide määramine.

Vaatavarudeta tootmine ja kulusäästliku tootmise tööriistad. (ptk 8.8.7.1 ja ptk 8.10.8).

Töös olevate toodete arvu vähendamiseks tuleb esmalt nentida, et tsükli aeg ja WIP on otseselt seotud (Little'i seadus), s.o töös olevate toodete arv WIP võrdub tootlikkus korda tsükli aeg [8.2].

Oluline on ka otstarbekate tootmise ajaplaanide koostamine, partiide suuruste vähendamine, kvaliteedi parandamine, seadistus ja transpordiaegade lühendamine jt meetmed.

Varude planeerimise esmaseks ülesandeks on vajaduse võimalikult täpne määramine, võttes arvesse turunõudluse kõikumist ja materjali ladustamisega seotud majanduslikku aspekti. Sellest lähtuvalt võib materjalid jagada suure, keskmise- ja väikese kapitalimahukusega materjalideks [8.2]. ABC-analüüsi käigus klassifitseeritakse materjalid, ostutooted, varuosad või ka valmistooted (edaspidi lihtsalt materjalid) nende poolt põhjustatud kulude järgi. Analüüs näitab, et suure osa materjalidega seotud kulude põhjustajateks on väike osa materjalidest.

- A – suure kapitalimahukusega materjalid:
 - 5–10% toodetest-komponentidest moodustavad 75–80% kuludest.
- B – keskmise kapitalimahukusega materjalid;
 - 10–15% toodetest-komponentidest moodustavad 10–15% kuludest.
- C – vähese kapitalimahukusega materjalid;
 - 80% toodetest-komponentidest moodustavad 10% kuludest.

ABC analüüsist lähtuvalt kasutatakse erinevate materjalide puhul erinevaid planeerimise põhimõtteid: A materjalide puhul on otstarbekas kasutada nõudlusest ehk tootmisprogrammist lähtuvat materjalivajaduse planeerimist.

B ja C materjalide puhul aga kulupõhist ehk tarbimisest lähtuvat materjalivajaduse planeerimist.

Teiseks tähtsaks aspektiks on materjalide kasutamise stabiilsus (pidevus), sellest lähtuvalt liigitatakse materjalid järgmiselt:

- X – konstantse nõudlusega, nõudluse kõikumised alla 20%;
- Y – trendist lähtuvad või sesoonsed nõudluse kõikumised. Kõikumised 20–50%;
- Z – nõudluse juhuslikud ebareeglipärased kõikumised, üle 50%.

Mõlema analüüsi eesmärk on vajadus materjalide erinevaks käsitlemiseks lähtuvalt nende ladustamisega seotud kuludest ja nõudluse stabiilsusest.

Tootmisprogrammist lähtuv materjalide planeerimine

Tootmisprogrammist lähtuv materjalide planeerimine on tulevikule orienteeritud meetod, mis lähtub:

- põhitootmisprogrammist ehk tootmisülesandest, kus määratakse üksikutes perioodides valmistatavate toodete liik ja kogus;
- toote struktuurist – fikseeritakse, mis materjalidest, detailidest, koostudest ja pooltoodetest valmistoodete koosneb;
- planeeritud tootmistsükli ajast (sisseostetavate toodete tarneajast), kui kaua kestab toote tootmine (materjalivajaduse ajaline planeerimine);
- olemasolevatest laovarudest.

Tootmisprogrammist lähtuva materjalivajaduse määramisel on oluline **nõudluse kindlaksmääramine**, mis jaguneb:

- **primaarnõudluseks** – turu vajaduste rahuldamiseks vajalik kaupade hulk ehk tootmisprogramm;
- **sekundaarnõudluseks** – materjalivajadus primaarnõudluse rahuldamiseks. Sekundaarnõudlus saadakse primaarnõudluse ja toote koostisosade koguste korrutamise teel ja sellele lisandub lisanõudlus. Lisanõudlus on vajadus lisadetailide järele, mis on mõeldud remondiks või ebakvaliteetse toodangu katteks;
- **netovajaduseks** – brutovajadus, millest on lahutatud olemasolevad laovarud;
- **tellimisarvestuseks** – lähtub tellimuspartii suurusel.

Materjalivajaduse planeerimise piirangud on seotud tarneaja, tootmistsükli ja tootmiskalendriga:

- **tarneaeg** on aeg, mis kulub ettevõttel materjali tellimisest (tellimiskinnitusest) kuni materjali saabumiseni (vastuvõtmiseni) lattu;

- **tootmistsükkel** (läbimise aeg) on toote valmimise tähtaja ja materjalide tarnetähtaja vahe, mis koosneb üksikutest töötlemisaegadest, transpordiaegadest, seisuaegadest, kontrolliaegadest ja kindlustusajast (puhvid);
- **tehase tootmiskalender** määrab ajalised raamid, mille vältel on tootmine tehases võimalik. Tootmiskalender võtab arvesse tööpäevad ja vahetused ning jätab arvestusest välja vabad päevad jms.

Tarbimisest lähtuv materjalivajaduse planeerimine

Kui nõudlusest lähtuva materjalivajaduse planeerimise aluseks on turu nõudlus, kas otsene (klienditellimus) või kaudne (müügivajadus), siis tarbimisest lähtuva materjalivajaduse määramisel lähtutakse eelmiste perioodide materjalikulust ja sellest lähtuvalt prognoositakse tulevaste perioodide materjalinõudlus.

Prognoosimise eelduseks on teatud reeglipärasused, nagu pikaajaline stabiilne nõudlus, nõudluses avalduvad trendid ja sesoonsed kõikumised.

Nõudluse prognoosimist kasutatakse eelkõige B- ja C-kategooria materjalide vajaduse planeerimisel või materjalide puhul, kus nõudlusest lähtuv planeerimine ei ole võimalik või majanduslikult põhjendatud.

Tarbimisest lähtuval materjalivajaduse prognoosimisel on tähtsad kolm asjaolu:

- 1) prognoosi ajalised piirangud – prognoosi aluseks võetavate andmete aegriidade pikkus (praktiliselt on see 1–3 aastat) ja tarneajad, mis on prognoosimise aja alampiiriks;
- 2) prognoosimise tihedus sõltub tellitavast kogusest ja tellimistihedusest. Sellest lähtuvalt on välja töötatud erinevad materjalivarude planeerimise strateegiad;
- 3) prognoosimise meetodid on reeglina stohhastilised, need lähtuvad tõenäosusteooriast ja kasutavad kas otseselt või kaudselt mõõdetavaid või hinnatavaid väärtusi.

Nõudluse prognoosimise erinevaid liike ja meetodeid käsitletakse ptk-s 8.4.1.

8.6.2 Laovarude juhtimine

Laovarude juhtimiseks vaatame põhiliselt lähtematerjalide varude juhtimist ladudes.

Laovarude juhtimine (*inventory management*) on ettevõtte juhtimise ja tootmise planeerimise üks olulisemaid probleeme. Laovarude haldamine on otseselt seotud ettevõtte töötõhususe näitajatega. Probleeme põhjustavad mõlemad – nii puudulikud laovarud kui ka liigsed varud. Laovarude juhtimise kulutused on üks suurim kululiik ettevõtte bilansis. Näiteks finantsiliselt võib ladustamise maksumus hõlmata 20–40% aastast teenitavast tulust. Kaupade hoiustamine vajab suuri laohooneid, väärtuslikku põrandapinda jms. See aga suurendab materjali käsitlemise raskusi.

Laoandmete all mõistetakse nii materjalide ning ostutoodete koguseid sisendladudes, pooltoodete andmeid vaheladudes kui ka valmistoodangu andmeid lõpptoodangu ladudes.

Varude juhtimisel ning laovarude haldamisel tuleb määrata mahud, mis tagavad varude hoidmise ja tootmise minimaalsed kulutused ning kindlustavad seejuures tootmise häireteta kulgemise ning tellimuste tähtaegse täitmise. Vajalik on leida materjalide ja osutoodete õigeaegsed tellimisajad, tellitavad kogused, tellimuste edasilükkamise (*back-ordering*) võimalused, tootmise alustamise optimaalne algus jms.

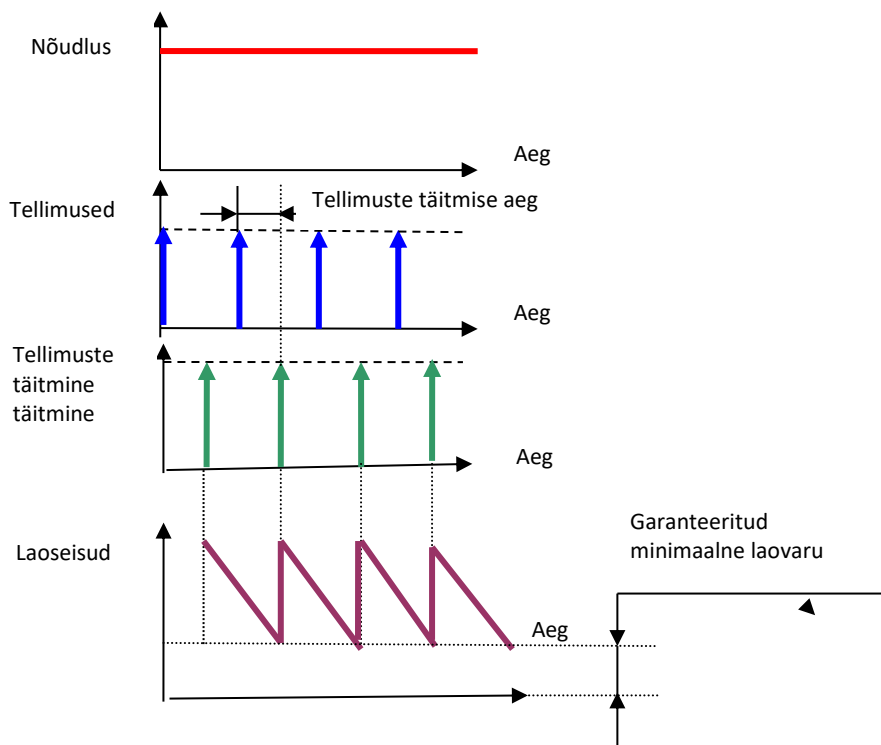
Laoseisude haldamine on vahetult seotud lõpptoodangu nõudlusega. Seejuures võib nõudlus valmistoodangule olla planeerimise hetkel teada või mitte, oma iseloomult võib nõudlus olla konstantne või dünaamiliselt muutuv, kindlaksmääratud või juhuslik.

Ladude otstarbekas haldamine baseerub matemaatilistel mudelitel, mis kirjeldavad tootmise erinevaid situatsioone ja juhtimisstrateegiaid.

Laovarude juhtimise mudelid on tootmise planeerimise ja juhtimise ning neid toetavate nüüdisaegsete arvutisüsteemide aluseks. Need on ühed vanimad tootmise juhtimise mudelid ning neid kasutatakse praeguseni.

Lihtsustatud skeem, arvestades püsinnõudlust, tellimuse täitmise aega ja minimaalseid garanteeritud laovarusid (kindlustusvarusid) on toodud seel 8.9.

Pärast materjalivajaduse määramist lähtuvalt materjali liigist, kogusest ja ajast tuleb kindlaks määrata, kui suured on vajalike materjalide varud ettevõttes.



Sele 8.9 Skeem nõudluse, tellimuste ja laoseisude vahelistest seostest

Alles pärast vajalike materjalide nõudluse võrdlemist olemasolevate laovarudega saab määrata materjalide vajalikud tellimiskogused ja tellimise tähtaja.

Varude liigid

Varude planeerimisel lähtutakse järgmistest varude liikidest:

- **laovaru** – realselt kontrollimise hetkel laos oleva kauba kogus. Laovarude juures arvestatakse keskmise materjalivaruga kui laovaru iseloomustava suurusega;
- **keskmise varu** – teoreetiline laovaru iseloomustav suurus;
- **kindlusvaru** (nimetatakse ka reserviks) – ei kasutata tavatootmise tarbeks;
- **teatevaru** – materjali tellimuse täitmiseks vajalik varu;
- **maksimumvaru** – maksimaalne varude kogus, mis saavutatakse pärast tellitud kaupade saabumist lattu ja on seotud laokuludega.

Keskmine laovaru perioodis määratakse alg- ja lõppvaru keskmisena ja eeldab stabiilset materjalikulu perioodi jooksul.

Kindlusvaru ei lähe müüki, see on mõeldud ettenägematuteks olukordadeks ja uus tellimus tuleb esitada enne laokoguse miinimumvarudeni kahanemist.

Kindlusvaru on vajalik, kui

- perioodi nõudlus ei ole kindel;
- laotellimuse tarneaeg ei ole kindel;
- saadud kogus erineb tellitud kogusest;
- informatsioon vajalike laokoguste kohta ei vasta tegelikkusele.

Kindlusvaru suurus tugineb kogemustel, seda võib määrata valemiga:

$$V_{kv} = \bar{k}_m \times t_t$$

V_{kv} – kindlusvaru;

\bar{k}_m – keskmine materjalikulu päevas;

t_t – tellimisaeg (päeva).

Teatevaru

Varude planeerimisel on tähtis, et uus tellimus varude täiendamiseks esitataks enne varude kahanemist kindlusvaruni. Seda varu nimetatakse **tellimusvaruks** ehk teatevaruks. Tellimusvaru peab olema nii suur, et jääks piisavalt aega uue tellimuse tarnimiseks, seda ajahetke nimetatakse tellimuspunktiks.

$$V_t = V_{kv} + \bar{k}_m \times t_t.$$

Maksimumvaru on maksimaalne materjali kogus laos. Materjali kogus on laos maksimaalne pärast kaupade saabumist lattu.

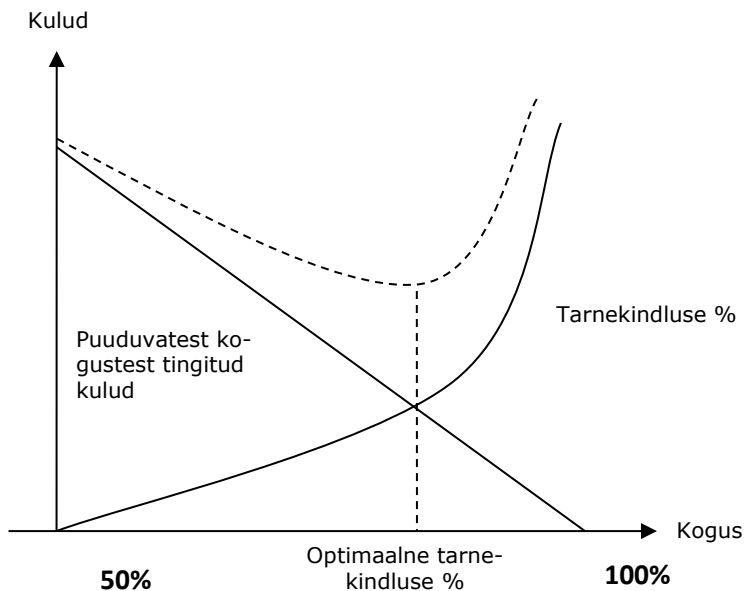
Varude moodustamise strateegiad ja varude täiendamine

Varude planeerimise seisukohalt on suur tähtsus varude täiendamise strateegial. Seda mõjutavad järgmised faktorid:

- tarnevalmiduse %;
- puuduvatest kogustest tingitud kulud.

Tarnevalmiduse %. Iga nõudlusprognosis on vale, kuna selle aluseks on võetud mineviku andmed. Ilma **kindlusvaruta** ei ole võimalik alati katta ühte osa turunõudlusest. Seetõttu määratakse tarnevalmiduse %, määratledes kui suure nõudluse peab ladu olema võimeline katma. Piisavaks loetakse 70–80%. Sobiva tarnekindluse tagamiseks kasutatakse ABC-analüüsi.

Puuduvatest kogustest tingitud kulud (sele 8.10). Kui tarnevalmiduse koefitsient on kõrge (90%), on tellimuse täitmata jätmise risk väike ja puuduvatest kogustest tingitud kulud väikesed. Kui tarnevalmisoleku koefitsient on madal (alla 60%), on tellimuse täitmata jätmise risk suur ja puuduvatest kogustest tingitud kulud suured.



Sele 8.10 Tarnevalmiduse % ja puuduvate kogustega seotud kuludevaheline seos

Varude täiendamise strateegiate liigid

Varude juhtimine peab vastama kahele laokulude seisukohalt tähtsale küsimusele: millal ja kui palju?

Millal – tellimuse ajaline määramine. **T** – tellimine teostatakse püsiva ajavahemiku **T** järgi. Pärast igat laoliikumist võrreldakse tegelikku laovaruga **b** teatevaruga **s** ja tellitakse, kui tegelik varu on saavutanud teatevaru **s**.

Kui palju – tellimuse koguseline määratlemine. Fikseeritakse püsiv kogus, mis tellitakse Q ja tellitakse kogus Q .

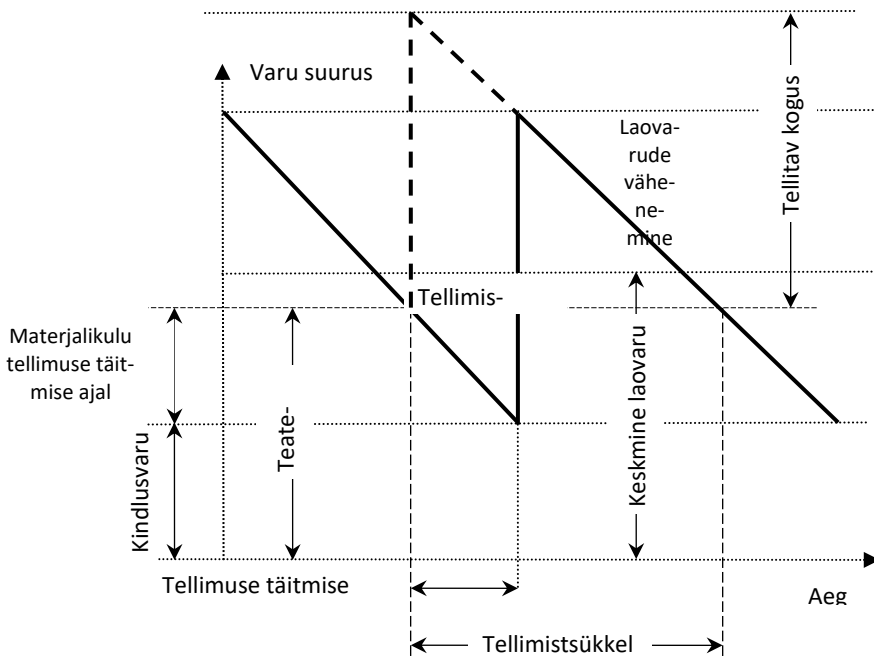
S – fikseeritakse maksimaalne kogus S ja tellitakse iga tellimusega $(S - b)$.

Tellimispunkti meetod. Tellimuspunkt on varude kogus, mille saavutamisel käivitatakse uus tellimus. Määrata tuleb tellimispunkt ja tellitav kogus. Tellimuskoguse määramisel lähtutakse majanduslikult põhjendatud tellimuse suurusest. Tellimispunkti varude kogus peab katma tootmise vajaduse tarne ajal.

Tellimusrütmi meetod. Kindla perioodilisusega käivitatakse tellimus kogusele, mis tõstaks laoseisu fikseeritud maksimumkogusele. Tellimuse kogus sõltub materjali kulust perioodi jooksul.

(s,Q) strateegia

Alati, kui laovarud on langenud alla tellimispunkti s , käivitatakse uus tellimus kogusele Q . Lähtutakse nõudest, et tellitav kogus on määratud lähtuvalt optimaalsest partii suurusest (sele 8.11).



Sele 8.11 (s,Q) strateegia

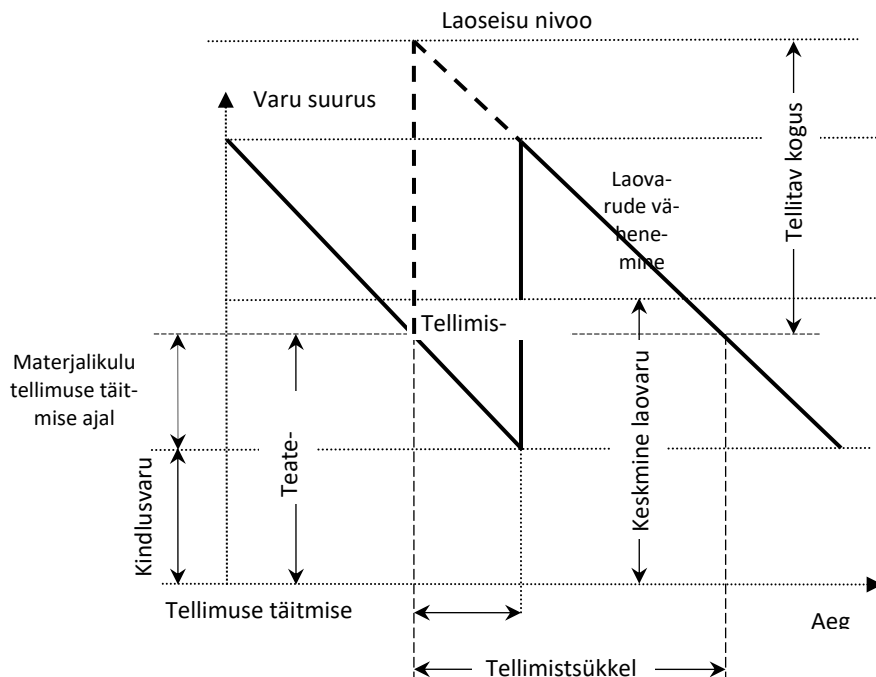
(T, S) strateegia

T – perioodilisusega käivitatakse tellimus, mis tõstaks laoseisu tasemele S, s.t tellimuskogus ajahetkel t on $Q = (S - b)$.

Eelised:

- väiksem kontrolli maht;
- transpordikulude optimeerimine tarnimisel ühet tarnijalt (tellimuste ajaline planeerimine).

Puuduseks on nõudlusest tingitud tellimiskoguste kõikumised ja koguselised allahindlused.



Sele 8.12 (T, S) strateegia

(sess) strateegia

Pärast igat laoliikumist võrreldakse laoseisu, kui see on vähenenud alla miinimumkoguse s, käivitatakse tellimus, mis tõstab laoseisu soovitud nivoole.

8.6.3. Laovarude juhtimise meetodid

Kolm põhilist tegurit laovarude juhtimise otstarbekuse hindamiseks on:

- varude hoidmiskulud ladudes;
- tellimuste haldamiskulud, sh tootmisseedmete ümberseadistamiskulud;
- laovarude puudumisel tellimustest äraütleemisega seotud kulud.

8.6.3.1 Majanduslikult otstarbeka tellimuse/valmistamise partii suuruse määramine (*economic order quantity, EOQ*)

EOQ on tellimuse või valmistamispartii suurus, mis tagab ladudes varude hoidmise ja tellimuste haldamise minimaalsed kulud. EOQ määramiseks kasutatakse erinevaid meetodeid. Klassikaliselt lähtutakse järgmistest eeldustest:

- tootmine toimub viivitusteta, tootmismahudel puuduvad piirangud ja kogu partii tellitakse-töödeldakse samal ajal;
- tellimused täidetakse kohe, ilma viivitusteta;
- nõudlus on ette teada (determineeritud);
- nõudlus on püsiv ega muutu ajas;
- tootmise ümberseadistamise aeg (või tellimuse täitmise aeg) ei sõltu partii suurusest;
- toote tellimused ei sõltu muude toodete tellimustest.

Nende eelduste täitmise korral võib majanduslikult otstarbeka partii suuruse leida seosest [8.2]:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2AD}{h}}$$

Valemis:

D – nõudlus tootele (tükkides aastas);

A – tootmise ümberseadistamise või partii tellimise kulud;

h – ladustamise kulud (käibevahendite maksumus);

Q* – partii otstarbekas suurus (tükkides).

Valem arvestab, et ladustamiskulud sõltuvad lineaarselt partii suurusest ning seadistamise-tellimuse kulud vähenevad partii suuruse kasvades.

Majanduslikult otstarbeka partii suuruse leidmine baseerub oletustel, et nõudlus on püsiv, tootmissüsteemi ressurss on piiramatu, ladude mahud ja transpordivõimalused ei ole piiratud, kuid need ei pruugi kirjeldada tegelikku olukorda.

8.6.3.2 Dünaamilised partii suuruse määramise meetodid (*dynamic lot sizing*)

Dünaamilised partii suuruse määramise meetodid toetavad tellimuste ja valmistamispartiiide leidmist, lähtudes eeldustest, et nõudlus on muutuv ajas (dünaamiline) ja kindlaks määratud (ette teada). Need on ühed kõige laialdasemalt kasutatavateks partii suuruse kindlaksmääramise meetodid tootmisvarude juhtimisel.

Dünaamilise partii suuruse kindlaksmääramise eesmärk on analoogiline EOQ määramisele, minimeerida kogukulud tootmise ümberseadistamiseks, tootmiseks ja laovarude hoidmiseks eeldustel, et on teada tuleviku nõudlused lõpliku arvu ajavahemikele. Nõudlus võib olla ühtlane või muutuv (*lumpy*), selgitav näide tabelis 8.4:

Tabel 8.4 Nõudluste võimalused

(a) Ühtlane nõudlus						
Nädal	1	2	3	4	5	6
Nõudlus	10	10	10	10	10	10
(b) Muutuv nõudlus						
Nädal	1	2	3	4	5	6
Nõudlus	10	15	11	18	8	10

Meetodid võib esitada reeglitena kolmes grupis.

Lihtsad reeglid. Kasutatakse laialdaselt MRP/MRP II-süsteemides, reeglid ei põhine kulude otsesel optimeerimisel, kuid annavad häid lahendeid.

Heuristilised reeglid. Võimaldavad vähendada kogukulu, kuid mitte tingimata optimeerida.

Wagner-Whitini reeglid. Võib kirjeldada järgmiste väljenditega: saab kasutada ühele tootmisvaru liigile, piiranguid tootmisvõimsustele ei arvestata, muutub dünaamiliselt, kuid nõudlus ja lõplik ajahorisont on teada.

Vastavate reeglite olemust on põhjalikumalt käsitletud [8.1].

Meetodite arengud inventari juhtimiseks on seotud täisarvulise-lineaarse planeerimise mudelite kasutamisega.

8.7 Tootmise operatiivne planeerimine. Tootmise ajaplaanide koostamine

Tootmise operatiivplaneerimine ja sellega seotud ajaplaanide koostamine (*scheduling*) kirjeldab, mis järjekorras, mis operatsioonid (tööd) ja millistel seadmetel (töökohtadel) teostatakse ning mis ajaks peavad tööd olema lõpetatud.

Tootmise ajaplaanide koostamiseks kasutatakse praktikas sageli kogemustel põhinevaid heuristilisi meetodeid, kuna analüütilised meetodid on väga töömahukad.

Et lihtsustada mudelit, jagatakse tootmise ajaplaanide koostamise ülesanne kaheks lihtsaks alamülesandeks.

1. Detailide töötlemisjärjekorra määramine.
2. Töötlemise ajaplaanide koostamine.

8.7.1 Detailide töötlemisjärjekorra määramine

Detailide töötlemisjärjekorra määramiseks kasutatakse praktikas sageli kogemustel põhinevaid heuristilisi meetodeid.

Mudeli lihtsustamiseks eeldame, et detailide töötlemisjärjekord erinevatel järjestikulistel seadmetel ei muutu, s.t detailide töötlemisjärjekord on erinevatel seadmetel sama. Võimalike töötlemise alustamise variantide arv on sealjuures määratud võimalike detailide järjekordade ehk permutatsioonide arvuga. Suure töödeldavate detailide arvu m juures kasvab variantide arv väga kiiresti, mis tingib väga suure arvutusmahu variantide hindamisel, näiteks 3 detailist saab 6 varianti: $D1>D2>D3$, $D3>D1>D2$, $D2>D1>D3$ või $D1>D3>D2$, $D2>D3>D1$, $D3>D2>D1$; 4 detailist saab 24 varianti; 5 detailist 120 varianti; 6 detailist 720 varianti; 7 detailist 5040 varianti; 8 detailist 40 320 varianti jne.

Suure detailide arvu puhul on otstarbekas hinnata mitte üksikute detailide töötlemise järjekordi, vaid hinnata sarnaste detailide (detailide perede) partiide töötlemist, kasutades näiteks grupitehnoloogia põhimõtteid. See eeldab, et tooteperesiseselt on seadmete ümberhäälestamisele kuluv aeg väike võrreldes töötlemisajaga.

Suurema detailide arvu puhul ei ole otstarbekas analüüsida-hinnata kõiki võimalikke töötlemise järjekordade variante. Mõistlik on kehtestada teatud prioriteedid erinevatele järjekordadele või genereerida võimalikke järjekordasid juhuslikult ja hinnates-analüüsides saadud tulemusi.

Kogemustel põhinev lähenemine on vajalik tagamaks vastuvõetav, kuid tingimata mitte optimaalne tööde järjekord. Kirjanduses on soovitatud mitmeid erinevaid tööde järjekorra valimise reegleid. Siin vaatame neist ainult mõnda.

1. reegel: **FIFO** (*first-in, first-out*) esimesena valitakse täitmiseks töö, mis saabus kõige varem, s.o töid teostatakse saabumise järjekorras.

2. reegel: **lühima ajaga töö esimesena** (*shortest process time, SPT*) Töökohal ootavate tööde seast valitakse täitmiseks esimesena töö, mille täitmise aeg on lühim. Selle tulemusena töödeldakse lühema töötlemisajaga detailid kiiremini, kuid on oht, et pikema töötlemisajaga detailid jäävad ootama.

3. Lühima ajaga töö esimesena reegli täiendus on SPT^X reegel parameetriga X , mis määrab maksimaalse lubatud ooteaja (tööülesannete arvuna X) tööle. See tähendab, et kui mingi töö on oodanud järjekorras üle X tsükli (ajaühiku), siis tuleb see täita järgmisena. SPT^X reegel on ennast tihti õigustanud.

4. **Varasema tähtaja reegel** (*earliest due date, EDD*), esimesena täidetakse järjekorrast töö, mille täitmise tähtaeg on kõige lähemal.

Tavaliselt puudub üks ja ainus reegel, mis sobib kõikidele juhtudele, neid tuleb sageli omavahel kombineerida, valides välja otstarbekama. Näiteks kasutatakse SPT-mudelit, kuni tööde arv järjekorras on väiksem kui 5, edasi kasutatakse FIFO-mudelit. Mitme kriteeriumi

kooskasutamise näiteks on samuti **kaalitud prioriteetide meetod (weight priority indexes)**. Selle meetodi puhul omistatakse erinevatele näitajatele kaalud, tööde järjestamiseks leitakse sihifunktsioon kujul $f(x) = kaal1 \times töötlemisaeg\ operatsioonile\ (x) + kaal2 \times aeg\ operatsiooni\ (x)\ täitmise\ tähtajani$.

Kaal1 ja kaal2 valitakse vahemikus 0–1 ja tingimusest, et $kaal1 + kaal2 = 1,0$. Taoliselt hinnatakse kõiki järjekorras ootavaid töid, nendest luuakse uus korrastatud (kasvav) järjekord, mis määrabki töötlemise järjekorra.

8.7.2. Ajaplaanide optimeerimise püstitus

Ajaplaanide koostamine on ülesanne, mis määrab oluliselt süsteemi tootlikkuse ja teised tootmise otstarbekuse näitajad. **Otstarbeka tootmise ajaplaani koostamist (job shop scheduling or job-shop problem)** võib käsitleda kui optimeerimisülesannet. Tootmise ajaplaanide optimeerimise mudeli koostamisel tuleks arvestada erinevaid nõudeid, nagu näiteks:

- töökohad (seadmed) ei sõltu üksteisest;
- üleminekuks ühelt operatsioonilt teisele vajatakse mõningat aega (s.o aeg transpordile ja töö ettevalmistamisele-lõpetamisele);
- seadmed vajavad operatsioonide järjekorrast sõltuvaid ümberseadistusi (aegu);
- planeerimise eesmärgiks on tagada lühim summaarne töötlemisaeg kogu detailide kogumile (edaspidi tsükli-aeg);
- erinevatel töödel on järjestuse piiranguid, näiteks kujul operatsioon i seadmel peab olema lõpetatud enne operatsiooni j algust samal seadmel;
- detaili töötlemine algab esimese operatsiooniga esimesel seadmel, järgneb teise operatsiooniga teisel seadmel jne;
- operatsioonide järjestuses võib osa operatsioonide vahele jääda, kui mõnel seadmel pole detaili vaja töödelda.

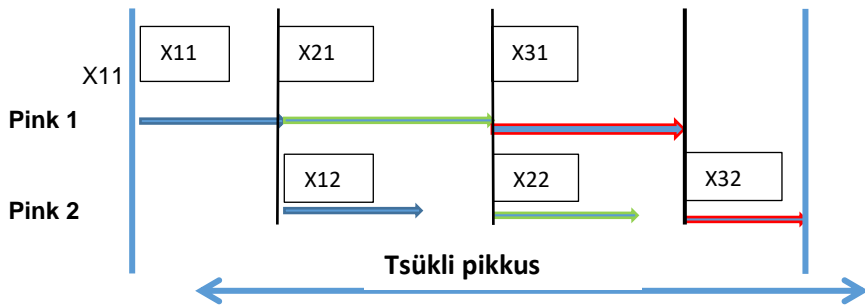
Täiendavalt tsükliajale võib sihifunktsioonina kasutada tootlikkust, töödeldavate detailide arvu (WIP), seadmete summaarseid seisuaegu vms, mis võimaldavad sisulisemalt kirjeldada ja analüüsida erinevaid tootmisolukordasid.

Tootmissüsteemi realiseerimise otstarbekuse hindamiseks on sobivad järjekordade teoorias arendatud meetodid ja simuleerimine arvutil. Järjekordade teooria ja arvutil simuleerimine võimaldab analüüsida ja hinnata tootmistellimuste saabumise erinevaid variante, tootmissüsteemi konfiguratsioone, töötlemistingimuste varieerumisi (näiteks töötlemisaja), piiranguid seadmete vahel olevatele vaheladudele (puhvritele) jms. Samuti võimaldavad simuleerimissüsteemid hinnata erinevaid tootmissüsteemi näitajaid, nagu ooteajad, tootlikkus, tootmissüsteemis töödeldavate detailide arv (WIP) jt.

Ajaplaanide koostamine matemaatilise planeerimise mudelitega

Tootmise ajaplaani mudeli loomisel eeldame, et on antud n erinevat operatsiooni O_1, O_2, \dots, O_n , mille täitmise järjekord m seadmel $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ tuleb määrata nii, et summaarne tööde täitmise aeg (*makespan*) oleks minimaalne.

Ajaplaanide leidmiseks kasutatakse matemaatilise planeerimise, sh täisarvulise planeerimise ja segamudeleid (*mixed planning models*), dünaamilise planeerimise mudeleid jt. Matemaatilise planeerimise meetodid kuuluvad ajaplaanide koostamise täpsete meetodite hulka ja on seotud ülesande keerukusega (suure töömahukusega). Töötlemise ajaplaani illustreeriv näide on esitatud seel 8.13 (kolme detaili töötlemine kahel pingil), kus $X_{1,1}$ tähistab det1 töötlemise algust pingil 1; $X_{2,1}$ det2 töötlemise algust pingil 1; $X_{3,1}$ det3 töötlemise algust pingil 1 jne. Tähistame töötlemisajad detailile i pingil j , kui $t_{i,j}$.



Sele 8.13 Töötlemisaegade esitamise skeem

n baasoptimeerimismudeli koostamiseks esitame muutujatena tööde algusajad järjekorras olevatele töödele seadmetele j ehk baasülesande optimeeritavad muutujad moodustavad töötlemise algusaegade maatriksi:

$$X = \begin{bmatrix} X_{1,1}; X_{1,2}; \dots; X_{1,m} \\ X_{2,1}; X_{2,2}; \dots; X_{2,m} \\ \dots \\ X_{n,1}; X_{n,2}; \dots; X_{n,m} \end{bmatrix},$$

kus $X_{i,j}$ tähistab i -nda detaili töötlemise algusaega seadmel j . Mudeli põhilisteks sisenditeks on analoogiliselt maatriksile X detailide töötlemise ajad $t_{i,j}$:

$$T = \begin{bmatrix} t_{1,1}; t_{1,2}; \dots; t_{1,m} \\ t_{2,1}; t_{2,2}; \dots; t_{2,2} \\ \dots \\ t_{n,1}; t_{n,2}; \dots; t_{n,m} \end{bmatrix}.$$

Optimaalse ajaplaani baasmudel peab andma lühima tsükliaja, mille võib määrata valemiga:

$$\text{Min } (x_{n,m} + t_{n,m} - x_{1,1})$$

Mudel peab rahuldama igale detailile $i = 1, n$ ja igale töökohale $j = 1, m$ töötlemise järjekorra nõudeid järgmiste piirangute kujul:

- uue detaili $i + 1$ töötlemist töökohal j ei alustada enne, kui järjekorras eelneva detaili i töötlemine on samal töökohal lõppenud

$$x_{i,j} + t_{i,j} \geq x_{i+1,j};$$

- detaili töötlemist järgmisel töökohal (pingil) j ei saa alustada enne, kui eelneval töökohal $j - 1$ on sama detaili töötlemine lõppenud

$$x_{i,j} \geq x_{i,j-1} - t_{i,j-1};$$

- kõik algusajad $x_{i,j}$ $i = 1, n$ ja $j = 1, m$ on positiivsed reaalarvud.

Töketes võidakse täiendavalt arvestada ka seadmete lubatud koormusi.

Maatriksite T ja X elementide esitamise järjekord ridade kaupa peab mudelis vastama detailide töötlemise järjekorrale detailide portfellis ja tulpade kaupa detailide töötlemise marsruudile töökohtadel.

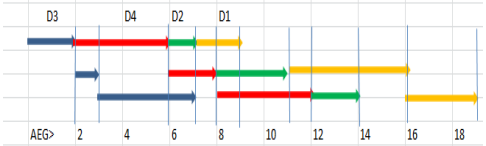
Seega on $t_{i,j}$ järjekorras esimese detaili töötlemise aeg töökohal j ja $t_{n,j}$ on viimase detaili töötlemisaeg samal töökohal. $t_{i,1}$ on detaili i esimene operatsioon ja $t_{i,2}$, sama detaili teine operatsioon jne.

Mudelis töödeldavate detailide järjekorra muutmine ridade vahetamise tulemusena võimaldab hinnata erinevate töötlemisjärjekordade mõju tsükliajale. Seadmete järjekorra muutmine tulpade vahetamise teel ning uute tulpade lisamisega võimaldab hinnata erinevate töötlemismarsruutide mõju (NB! töötlemisaeg mittekasutataval töökohal $t_{i,j} = 0$).

Koostamisprotsessi ajaplaani koostamisel tähistavad töötlemisajad koostamisoperatsioonide kestusi.

Baasmudel võimaldab koostada üksikute detailide töötlemise ajaplaani. Seega sobib toodud baasmudel üksiktootmisele ja on kooskõlas *kanban*- (vt ptk 11.2) tootmise juhtimise põhimõtetega.

Seal 8.14 on näitena toodud Excel Solverile esitatud mudeli peamised etapid ajaplaanide koostamiseks (4 detaili töötlemine 3 pingil).

c) Ülesande püstitus	d) Sisendandmed																																																																																								
<p>Teada on detailide D1, D2 ,D3 ja D4 töötlemisajad pinkidel P1, P2 ja P3. Detailid töödeldakse järjekorras D3>D4>D2>D1. Leida optimaalne ajaplaan detailide töötlemiseks, mis annab minimaalse tsükliaja ja rahuldab detailide järjestikkuse töötlemise piiranguid.</p>	<table border="1" data-bbox="659 192 1145 420"> <thead> <tr> <th colspan="4">Töötlemisjärjekord D3>D4>D2>D1</th> </tr> <tr> <th colspan="4">Töötlemisajad</th> </tr> <tr> <th></th> <th>P1</th> <th>P2</th> <th>P3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>D3</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>D4</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>D2</td> <td>1</td> <td>3</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>D1</td> <td>2</td> <td>5</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>	Töötlemisjärjekord D3>D4>D2>D1				Töötlemisajad					P1	P2	P3	D3	2	1	5	D4	4	2	4	D2	1	3	2	D1	2	5	3																																																												
Töötlemisjärjekord D3>D4>D2>D1																																																																																									
Töötlemisajad																																																																																									
	P1	P2	P3																																																																																						
D3	2	1	5																																																																																						
D4	4	2	4																																																																																						
D2	1	3	2																																																																																						
D1	2	5	3																																																																																						
c) Optimeerimismudel Excelis	d) Töötlemise ajaplaan																																																																																								
<table border="1" data-bbox="188 569 633 1188"> <thead> <tr> <th colspan="4">Optimeeritavad muutujad</th> </tr> <tr> <th></th> <th>P1</th> <th>P2</th> <th>P3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>D3</td> <td>0</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>D4</td> <td>2</td> <td>6</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>D2</td> <td>6</td> <td>8</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>D1</td> <td>7</td> <td>11</td> <td>16</td> </tr> </tbody> </table> <p>Sihifuntsioon</p> <p>19 Kogu tsükli pikkus</p> <p>Piirangud</p> <table border="1" data-bbox="316 806 633 1188"> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>>=</td> <td>2</td> <td>D4 töödeldakse P1 peale D3 +T31</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>>=</td> <td>6</td> <td>D2 töödeldakse P1 peale D4+T41</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>>=</td> <td>7</td> <td>D1 töödeldakse P1 peale D2 +T21</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>>=</td> <td>11</td> <td>D1 töödeldakse P2 peale D2 +T22</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>>=</td> <td>8</td> <td>D2 töödeldakse P2 peale D4+T42</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>>=</td> <td>3</td> <td>D4 töödeldakse P2 peale D3+T32</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>>=</td> <td>2</td> <td>D3 töödeldakse P2 peale D3-P1+T31</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>>=</td> <td>14</td> <td>D1 töödeldakse P3 peale D2+T23</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>>=</td> <td>12</td> <td>D2 töödeldakse P3 peale D4+T43</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>>=</td> <td>8</td> <td>D4 töödeldakse P3 peale D3+T33</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>>=</td> <td>3</td> <td>D3 töödeldakse P3 peale D3-P2+T32</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>>=</td> <td>6</td> <td>D4 töödeldakse pingil P2 peale D4-P1+T41</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>>=</td> <td>7</td> <td>D2 töödeldakse pingil P2 peale D2-P1 +T21</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>>=</td> <td>9</td> <td>D1 töödeldakse pingil P2 peale D1-P1+T11</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>>=</td> <td>8</td> <td>D4 töödeldakse pingil P3 peale D4-p2+T42</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>>=</td> <td>11</td> <td>D2 töödeldakse pingil P3 peale D2-P2 +T22</td> </tr> </tbody> </table>	Optimeeritavad muutujad					P1	P2	P3	D3	0	2	3	D4	2	6	8	D2	6	8	12	D1	7	11	16	2	>=	2	D4 töödeldakse P1 peale D3 +T31	6	>=	6	D2 töödeldakse P1 peale D4+T41	7	>=	7	D1 töödeldakse P1 peale D2 +T21	11	>=	11	D1 töödeldakse P2 peale D2 +T22	8	>=	8	D2 töödeldakse P2 peale D4+T42	6	>=	3	D4 töödeldakse P2 peale D3+T32	2	>=	2	D3 töödeldakse P2 peale D3-P1+T31	16	>=	14	D1 töödeldakse P3 peale D2+T23	12	>=	12	D2 töödeldakse P3 peale D4+T43	8	>=	8	D4 töödeldakse P3 peale D3+T33	3	>=	3	D3 töödeldakse P3 peale D3-P2+T32	6	>=	6	D4 töödeldakse pingil P2 peale D4-P1+T41	8	>=	7	D2 töödeldakse pingil P2 peale D2-P1 +T21	11	>=	9	D1 töödeldakse pingil P2 peale D1-P1+T11	8	>=	8	D4 töödeldakse pingil P3 peale D4-p2+T42	12	>=	11	D2 töödeldakse pingil P3 peale D2-P2 +T22	
Optimeeritavad muutujad																																																																																									
	P1	P2	P3																																																																																						
D3	0	2	3																																																																																						
D4	2	6	8																																																																																						
D2	6	8	12																																																																																						
D1	7	11	16																																																																																						
2	>=	2	D4 töödeldakse P1 peale D3 +T31																																																																																						
6	>=	6	D2 töödeldakse P1 peale D4+T41																																																																																						
7	>=	7	D1 töödeldakse P1 peale D2 +T21																																																																																						
11	>=	11	D1 töödeldakse P2 peale D2 +T22																																																																																						
8	>=	8	D2 töödeldakse P2 peale D4+T42																																																																																						
6	>=	3	D4 töödeldakse P2 peale D3+T32																																																																																						
2	>=	2	D3 töödeldakse P2 peale D3-P1+T31																																																																																						
16	>=	14	D1 töödeldakse P3 peale D2+T23																																																																																						
12	>=	12	D2 töödeldakse P3 peale D4+T43																																																																																						
8	>=	8	D4 töödeldakse P3 peale D3+T33																																																																																						
3	>=	3	D3 töödeldakse P3 peale D3-P2+T32																																																																																						
6	>=	6	D4 töödeldakse pingil P2 peale D4-P1+T41																																																																																						
8	>=	7	D2 töödeldakse pingil P2 peale D2-P1 +T21																																																																																						
11	>=	9	D1 töödeldakse pingil P2 peale D1-P1+T11																																																																																						
8	>=	8	D4 töödeldakse pingil P3 peale D4-p2+T42																																																																																						
12	>=	11	D2 töödeldakse pingil P3 peale D2-P2 +T22																																																																																						

Sele 8.14 Excel Solverile esitatud mudeli näide ajaplaanide koostamiseks (sammud a–d) koos ajaplaani näitega

Seeria- ja masstootmise tarvis tuleb töötlemisaegu $t_{i,j}$ esitada kui tootmispartii valmistamiseks kuluvat aega, s.o:

$$t_{i,j} = N_i \times t'_{i,j} + t_{j,seadistus}$$

kus $t_{i,j}$ – partii töötlemisaeg;

$t'_{i,j}$ – üksiku detaili töötlemisaeg;

N_i – tootmispartii suurus ja

$t_{j,seadistus}$ on seadistusaeg töökohale j .

Täiendavalt võidakse arvestada ka operatsioonidevahelisi transpordiaegu.

Taoline interpretatsioon võimaldab hinnata tootmispartiide suuruse mõju töötlemistsükli pikkusele ja on kooskõlas CONWIP- (ptk 11.2) tootmise juhtimise mudeliga.

$$\sum_{i=1}^N N_i \text{ hindab sealjuures tootmissüsteemis töödeldavate detailide koguarvu WIP.}$$

Taoliselt püstitatud ja lahendatud ülesanne võimaldab modelleerida tootmist, sealjuures lahendada ülesannet ka erinevate toodete valmistamise järjekordade tarvis. Lahendusena valitakse järjekord ja ajaplaan, mis annab minimaalse töötlemise tsükliaja etteantud detailide kogumi töötlemiseks. Oluline on siinjuures märkida, et taoliselt leitud ajaplaan võimaldab oluliselt reaalsemalt hinnata pinkide kasutusaegu, kuna arvestab lisaks töötlemisaegadele ka ooteaegu (sh pingi ooteaegu detaili töötlemiseks ja detailide ooteaegu töötlemise järjekorras). Integreerides mudelis nii töötlemise kui ka koostamise, saab hinnata ajaplaani kogu tootmisprotsessi tarvis. Probleemiks on sealjuures mudeli suur maht.

Tootmise järjekorra ja ajaplaanide koostamine on tootmise täitursüsteemi (MES-süsteemi vt ptk 8.10.6) üks põhiülesanne.

Peamine tegur, mis mõjutab ooteaegade pikkust ja seega ka kogu tootmitsükli pikkust, on tasakaalu (võrdsuse) puudumine erinevate toodete töötlemisaegades. Seetõttu on näiteks ka üheks oluliseks nõudeks varudeta tootmises (*just in time*) tootmissüsteemis erinevate töökohade töötlemisaegade võimalikult suur võrdsus, valides vastavalt paralleelsete töökohtade arvu N_i , s.o eesmärgiks on:

$$\frac{t_1}{N_1} = \frac{t_2}{N_2} = \dots = \frac{t_n}{N_n}, \text{ kus } t_i \text{ on töötlemisajad töökohal } i.$$

Tootmise ajaplaanide koostamine võimaldab objektiivselt hinnata töötlemisaegade tasakaalu puudumise mõju süsteemi tõhususele.

8.8 Tootmise planeerimine tarneahelas

Laiendatud ettevõtte (*extended enterprise*) esindab nõrgalt seotud ja iseorganiseeruvat ettevõtete/firmade koostöövõrku, mis teevad koostööd, et saavutada maksimaalset majanduslikku otstarbekust ja klientide nõudlust arvestavaid teenuseid turul. Laiendatud ettevõtte koosseisu kuuluvad firmad võivad tegutseda juriidiliselt sõltumatutena, arvestades ühiselt kehtivaid turumehhanisme, või teha koostööd kokkulepete ja lepingute alusel.

Laiendatud ettevõtte (LE) arhitektuur kirjeldab, mis vormis on organiseeritud LE ja milline on selle struktuur, kasutatav poliitika ja vahendid informatsiooni, toodete ja teenuste vahetamiseks ning millised on kasutatavad rahalised vahendid. Laiendatud ettevõtte mõiste olulisus on kasvanud seoses firmade spetsialiseerituse kasvuga, nendevaheliste sidemete tugevdamisega, seoses äritegevuse globaliseerumisega, äriprotsesside standardimise ja juhtimisinformatsiooni mahu ja ka kasutamisläbivõime kasvuga tulemusena. Äriprotsesside standardimine toetab erinevate ärifunktsioonide allhanget (*outsourcing*), nagu näiteks transport, ladustamine, turundus, avalikud suhted, infotehnoloogia jt. Firmadel on võimalus allhanke otstarbekal korraldamisel kontsentreeruda senisest enam oma põhitegevustele ning investeerida arengutesse, mis tagavad suurima kasumi ja LE moodustavate ettevõtete parema summaarse konkurentsivõime.

Laiendatud ettevõtte alternatiiv on **tarneahel** [8.1]. Võrreldes tarneahelaga on LE mõiste laiem ja võimaldab seda kasutada erineva sisu ja koostöövormidega ettevõtete koostöövõrkude kirjeldamiseks.

Tarneahel on koostoimiv süsteem, mis koosneb ettevõtetest (organisatsioonidest), inimestest, kasutatavatest tehnoloogiatest, informatsioonist, ressurssidest ning tegevustest, mis toetavad toote (sarnaste toodete grupi) või teenuse liikumist varustajatelt töötlemise kaudu kliendini. Tarneahela tegevused on seotud materjalide ja toote komponentide (ostutoodete) teisendamise (töötlemise, koostamisega) valmistooteteks.

Tarneahela juhtimise professionaalide nõukogu (*council of supply chain management professionals*, CSCMP) defineerib tarneahela juhtimist kui tegevust, mis on seotud tarneahela tegevuste planeerimisega ja juhtimisega ning sisaldab tootmise otstarbekat paigutamist (allhanke korraldust), protsessi logistilist juhtimist, ärandust, turundust jt tegevusi, mis on seotud koostevõrgu otstarbekuse tõstmisega. Oluline on sealjuures tarneahelas osalevate firmade, sh vahendus- ja müügiorganisatsioonide jt (kolmandate) organisatsioonide ning klientide otstarbekas koostöökorraldus ja koordineerimine. Eesmärk on integreerida tarneahela liikmete eelnevalt kokkulepitud ärifunktsioonid ühtsesse tarneahela ärimudelisse, tagades jaotatud vastutuse. Tarneahela juhtimine sisaldab logistika juhtimist, tootmise planeerimist ja juhtimist, kooskõlastatud turundust, tootearendust, finantstegevust, integreeritud infotehnoloogia vahendite kasutamist jm.

Sageli on kasutusel erinev tõlgendus terminite *tarneahela tegevused* ja *logistika* vahel. Logistikat kasutatakse esmajoones ühe ettevõtte (organisatsiooni) sisese materjalide, komponentide ja toodete liikumise kirjeldamiseks ja/või juhtimiseks, mõistet *tarneahel* kasutatakse toot-

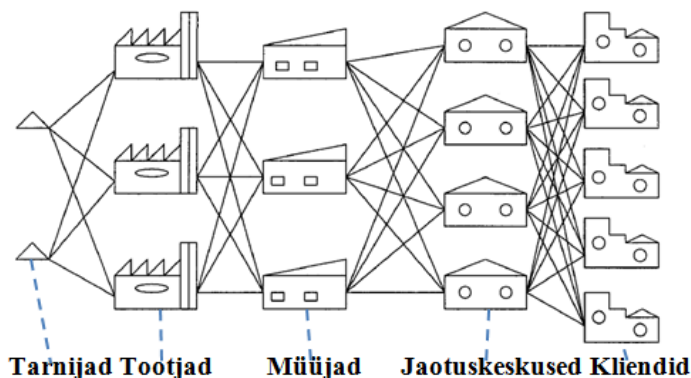
mis-, varustus- ja tarneprotsesside iseloomustamiseks erinevate ettevõtete, varustus- ja müügiorganisatsioonide vahel, kes teevad koostööd ühise eesmärgi nimel. Mõiste *tarneahel* on oma sisult laiem kui logistika.

Kasutusel on erinevad tarneahela kirjeldamise mudelid.

Üldistatud kujul koosneb tarneahel (sele 8.15):

- varustajatest (tarnijatest);
- tootjatest (tootvatest ettevõtetest);
- müüjatest (kaubandusettevõtetest, jaotuskeskustest);
- klientidest,

kes on seotud majanduslike jm sidemetega.



Sele 8.15 Tarneahela üldistatud skeem

Suurtel rahvusvahelistel ettevõtetel on tootmisvarude (materjalide, komponentide ja tagava-raosade jm) haldamine tõsine väljakutse, kuna arvestada tuleb tuhandete toodete, materjalide ja komponentidega, mis on erinevates asukohtades.

Tarneahelate (ja suurte korporatsioonide) puhul on kasutusel kahte tüüpi tootmisvarude haldamise süsteeme:

- ühekihilised süsteemid (**single-echelon**);
- mitmekihilised süsteemid (**multi-echelon**).

Ühekihiliste süsteemide puhul on jaotuskeskus varustaja ja kliendi vahel ainukene vahendaja ja ta haldab tsentraalselt väheseid nimetusi tooteid.

Mitmekihiliste süsteemide puhul varustab mitu varustajat, kasutades erinevaid jaotuskeskusi (*distribution center*, DC). Mitmekihiliste süsteemide puhul paigutatakse tooted esmalt kas kesketesse (CDC) jaotuskeskustesse ja siis jaotatakse regionaalsetesse (RDC) jaotuskeskustesse, mis suhtlevad vahetult klientidega. Mitmekihiliste süsteemide peamine eelis on

suuremad võimalused varude (kindlustusvarude) hoiumahtude optimeerimiseks, arvestades regionaalseid iseärasusi ja lähedust klientidega.

Ühe ja mitmekihiliste tarneahelate varude juhtimist vaata näiteks [8.2].

Tarneahela tootmistegevuse planeerimine

Tarneahela planeerimise eesmärk on leida erinevate toodete tootmismahud ja toodete liikumine tarneahela üksuste vahel, mis tagavad summaarselt maksimaalse kasumi kogu tarneahelale ja rahuldavad nõudlust, arvestavad maksimaalseid tarnemahtusid ja ettevõtete ressursse. Täiendava ülesandena tuleb määrata tootmise, müügi ja teenindustevõtete paigutus, tootmisvõimsuste suurendamise otstarbekus (täiendavate ressursside evitamine) – **otstarbeka tarneahela struktuuri saavutamine**.

Tarneahela juhtimise ja planeerimise peamine eesmärk on rahuldada võimalikult täielikult klientide nõudlusi, kasutades otstarbekalt olemasolevaid ressursse, tootmisvarusid ja tööjõudu, eesmärgiga saavutada parimad majandusnäitajaid tarneahela üksustele. Tagada tuleb klientide nõudluse täitmine lühima tarneaja ja minimaalsete vahenditega. Selleks kasutatakse muuhulgas JIT-i ja kulusäästliku tootmise tehnikaid ning tarneahela ettevõtete tegevuse planeerimist, et optimeerida tootmisvoogusid ja logistikat. Lisaks peab otstarbekalt kasutama ettevõtete, varustus- ja müügiorganisatsioonide kooslust ja paigutust, arvestama klientide (turgude) asendit ja iseloomu.

Praegustes majandustingimustes tähendab tarneahela tegevuse tõhusus järgmiste eesmärkide täitmist:

- minimaalseid tootmiskulusid, kasumi suurenemist, tootmisvarude ja investeeringute kokkuvõtte, investeeringute tasuvusaja lühenemist;
- tarneaegade lühendamist, turuosa kasvu, klientide nõudluse rahuldamist.

Nimetatud eesmärkide saavutamiseks tuleb planeerimisel lahendada mitmed omavahel seotud strateegilise ja keskpika planeerimise ülesanded [8.2], nagu

- firmade geograafilise paigutuse planeerimine, eesmärgiga leida otstarbekad tarneahela üksuste asukohad ja põhilised tootmisnäitajad;
- tootmise planeerimine, milliseid tooteid, kus ja millises mahus toota, olemasolevaid seadmete ja tööjõu ressursse arvestades; otstarbeka allhanke planeerimine;
- varude planeerimine, mis materjale ja komponente ning mis mahus tellida erinevatelt varustajatelt, otstarbekad materjalide, komponentide, pooltoodete ja toodete laoseisud erinevates tarneahela üksustes;
- transpordi (logistika) planeerimine, transpordivood ja nende otstarbekas jaotus ning korraldus ajas ja ruumis;
- ressursside arengu planeerimine, millistes tarneahela üksustes, mis mahus investeerida täiendavate ressursside (tootmishooned, seadmed, personal jt) soetamist.

Strateegilise planeerimise peamised ülesanded on tarneahela üksuste geograafilise paigutuse otstarbekas planeerimine, ressursside arengu planeerimine ja tootmise planeerimine agregeeritud tasemel.

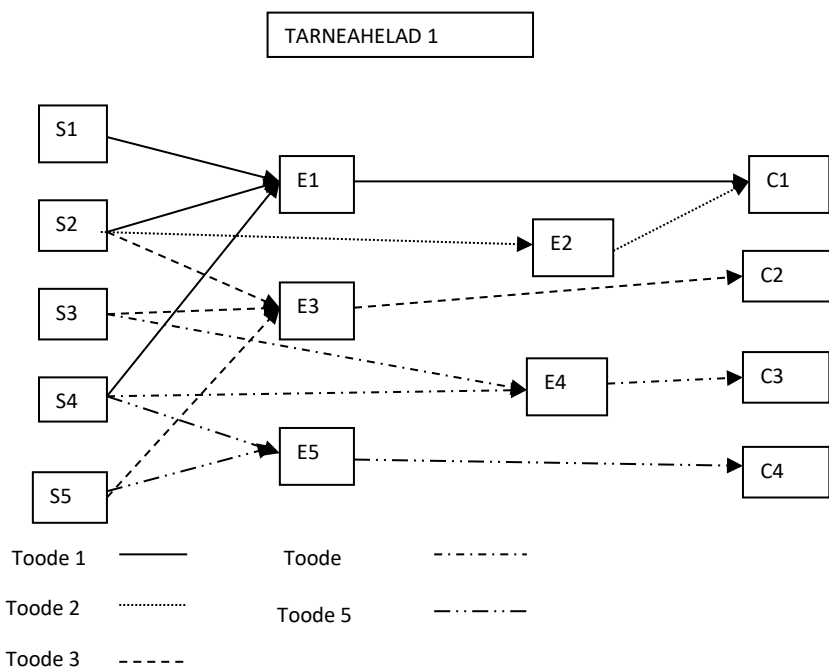
Taktikalisel planeerimisel on ülesandeks materjalide ja komponentide tellimiskoguste määramine, otstarbekad tootmismahud ja valmistoodangu tarnemahud erinevatele ajaperioodidele ja tarneahela üksustele.

Üldistatud kujul võib tarneahela tegevuse taktikalist planeerimist esitada matemaatilise planeerimise ülesandena, kus **optimeeritavad parameetrid on**: varustusmahud materjalidele ja ostutoodetele, tootmismahud toodete ja tootmisüksuste kaupa, valmistoodangu tarnemahud klientidele ja allhanked. **Sisendparameetrid**: materjalide ja komponentide hind ja varustuse piirmahud, tootvate ettevõtete ressursid, toodete valmistamise töömahud, toodete hind ja nõudlus.

Piiranguteks on materjalide ja ostutoodete varustuse mahud, piirangud tootmisvõimsustele tootvates ettevõtetes, piirangud transpordivõimsusele, ladude ja kaubandusorganisatsioonide piirangud (sh nõudluse piirangud). **Sihifunktsioonid**: kõige laialdasemalt kasutatavaks sihtfunktsiooniks on tarneahela üksuste maksimaalne summaarne kasum. Sihifunktsioonidena kasutatakse ka toodete minimaalset summaarset tarneaga, klientide tellimuste tähtaegadest vähimat kõrvalekallet (hilinemist) jm.

Näitena on seel 8.16 esitatud tarneahela skeemi mudel, mis sisaldab erinevaid tarnijaid $S_i, i = 1,5$ erinevaid tootvaid ettevõtteid $E_i, i = 1,5$ ja erinevaid tellijaid $C_i, i = 1,4$. Eesmärgiks on leida erinevate toodete tootmismahud X_i , mis tagavad summaarselt maksimaalse kasumi kogu tarneahelale ja rahuldavad nõudlust, arvestavad maksimaalseid tarnemahtusid ja ettevõtete ressursse. Täiendava ülesandena tuleb määrata tootmisvõimsuste suurendamise otstarbekus (täiendavate ressursside evitamine) ja otstarbekas tarneahela struktuur.

Erinevate optimaalse planeerimise mudelite ja vahendite kasutamine tarneahelate planeerimisel võimaldab oluliselt suurendada nii kogu tarneahela kui ka tema üksikute lülide tootmise tõhusust ja konkurentsivõimet. Arvestades planeerimisülesande keerukust, tuleb nentida, et tarneahela integreeritud optimaalset planeerimist toetavad arvutipõhised tööriistad on alles arenemisjärgus ja nõuavad veel palju tööd ning arusaamist nii arendajate kui ka kasutajate hulgas. Olulised probleemid on siin tarneahela modelleerimise meetodite arendus, tarneahela tegevust iseloomustavate näitajate operatiivne arvestamine ja hindamine (sh e-tootmise meetodid), parameetrite varieeruvuse ja planeerimise riski vähendamine.



Sele 8.16 Tarneahela skeem

8.9 Piirangute teooria

Tootmise planeerimise mudelite üheks rakenduseks on piirangute teooria (*theory of constraints*, TOC). **Piirangute teooria (PT)** sisuks on tootmise konkurentsivõime suurendamise peamiste piirangute analüüs ja tegevuste planeerimine tootmise tõhususe suurendamiseks tootmist piiravate kitsaskohtade ehk pudelikaelade kõrvaldamise kaudu. Piirangute teooria otsib vastust küsimusele, mis piirab otstarbekamat tootmist ja mida ning mis järjekorras on vaja tootmissüsteemis muuta. PT lähtub põhimõttest, et tootmissüsteemi otstarbekuse määrab süsteemi nõrgim lüli.

Piirangute teooria lõi 20. sajandi 70ndatel Iisraeli füüsik dr Eliyahu Moshe Goldrat. PT eeldab, et ettevõtte tegevust saab mõõta ja juhtida peamiselt kolme indikaatori abil: **tootlikkus, väljalase, kulutused tootmisele ja käibevahenditele**. Piirangutega seotud tootmise juhtimise paradigma käsitleb tootmissüsteemile püstitatud eesmärkide saavutamist, arvestades süsteemile mõjuvaid piiranguid (ühte või mitut). Eeldatakse, et kõrgema konkurentsivõime saavutamist ettevõttes piirab alati vähemalt üks osa tootmisprotsessist ehk tootmise pudelikael, mille mõju tuleb vähendada.

Analüüsi või modelleerimise abil tuleb määrata see pudelikaelana mõjuv piirang (või piirangud) ja kohandada kogu ülejäänud süsteem selle eesmärgiga, et piirangu mõju väheneks. PT rakendab tootmissüsteemi arendamiseks tõdemust: mistahes kett (ahel, süsteem) ei ole tugevam kui tema nõrgim lüli.

PT väidab, et ettevõtte eesmärk ei ole ainult tootmise tõhusus ja kvaliteet, eesmärgiks on toota kasumit antud ajahetkel ja tulevikus. Sellest lähtudes ongi kõik kolm peamist mõõdikut hinnatavad kulutatud rahahulgaga. Kui me soovime tõsta tootmise konkurentsivõimet, siis peame hindama, kas kavandatud tegevus tagab valitud mõõdikute paranemist.

Peamised tegevused

PT püüab selgitada välja pudelikaelad, mis piiravad paremate tulemuste saavutamist tootmises ja ülejäänud tootmise ümberkorraldamist, järgmise viie sammu tulemusena:

- 1) selgita välja tootmissüsteemi piirangud;
- 2) analüüsi leitud piirangud, leia pudelikaelad;
- 3) muuda (hinda) ülejäänud osa tootmissüsteemist, lähtudes leitud piirangutest;
- 4) kavanda tegevused pudelikaelade mõju vähendamiseks (likvideerimiseks);
- 5) kui kavandatud tegevuste tulemusena on pudelikaelad kõrvaldatud, mine tagasi 1. sammu juurde
- 6) väldi kõrvaldatud piirangute järelmõju (inerti) süsteemile.

Piiranguid hinnatakse peamiselt kolmest aspektist lähtudes:

- müük, piiratud müüginahud;
- tarded, piirangud materjalide ja ostutoodete tarnes;
- ettevõtte olemasolevad ressursid.

Piiranguna käsitleb PT kõiki tegureid, mis piiravad püstitatud eesmärgi täielikumat saavutamist.

PT vaatlleb järgnevaid piirangute tüüpe:

- 1) **füüsilised piirangud:** tüüpilised füüsilised piirangud on näiteks kasutada olevate seadmete ressursid, aga ka materjalide ja või ostutoodete ressursid, kvalifitseeritud personali või tootmispinna olemasolu;
- 2) **poliitilised piirangud:** poliitilised piirangud määravad nõuded tootmise korraldusele, nagu näiteks partii suuruste formeerimise põhimõtted, piirangud üleajatöö kasutamise, plaanide täitmise, kvaliteedi jm kohta jms;
- 3) **tootmise paradigmaga seotud piirangud:** nimetatud piiranguteks on näiteks arvamused ja usk, et parimaid majandustulemusi saavutatakse väikseimate töö minutihinnaga (maksumusega), või et töökoha (seadme) ressursse on otstarbekas kasutada piiratud mahus (näiteks 85% ulatuses). Paradigmaga seotud piirangud kattuvad osaliselt poliitiliste piirangutega.
- 4) **туру piirangud:** turu piirangud tekivad, kui tootmisvõimsused ületavad nõudlust turul. Need määravad omakorda piirangud tootmismahule ettevõtteväliste asjaolude kaudu, s.o nõudlus turul.

Juhul, kui peamised piirangud on seotud ettevõttesiseste ressurssidega, saab ettevõtte neid ka ise kõrvaldada, parendades planeerimist ja juhtimist.

Kui tootmissüsteemi kitsaskohad on välja selgitatud, tuleb planeerida tegevused nende kõrvaldamiseks, parendades protsessi, tehnoloogiat, tootmise organisatsiooni vms. Kui pudelikael on tõhusalt realiseeritud, tuleb parenda pudelikaela toetavaid protsesse ja teisi tootmissüsteemi osasid.

PT on tihedalt seotud tootmise pideva parendamise lähenemisega. Kui töökoht (tootmis-seade) moodustab tootmissüsteemis pudelikaela, siis seal on mitmeid võimalusi olukorra parandamiseks, nagu näiteks:

- 1) kvaliteedijuhtimise meetodite, nagu näiteks 6 sigma lähenemise (*six sigma*) rakendamine, mille kasutamine aitab kaasa tootmise kvaliteedi piirangute mõju vähendamisele.
- 2) seadistusaja vähendamine;
- 3) kulusäästliku tootmise meetodite rakendamine, need aitavad vähendada kadusid ja siduda erinevaid protsessi osasid;
- 4) tervikliku (täieliku) seadmete hooldussüsteemi (***total productive maintenance***) evitamine seadmete ressursside täielikumaks kasutamiseks.

PT orienteerub esmajoones tehnilis-organisatorsete meetmete rakendamisele tootmise otsustarbekuse, tootlikkuse, kasumikkuse vm näitaja tõstmiseks. PT kasutamise otstarbekus on hinnatav numbriliselt tootmise planeerimise matemaatilise mudeli abil, mida üldisel juhul võib defineerida kui lahendite leidmist, mis annavad minimaalse (või maksimaalse) väärtuse erinevatele etteantud sihifunktsioonidele ja rahuldavad etteantud piiranguid (tõkkeid). Sihifunktsioonideks on tavaliselt tootmise kasum, tootlikkus, tarneaeg, toote tasuvus ning mitmed muud tootmise ja toodete tehnilis-majanduslikke omadusi kirjeldavad suurused. Lahendeid piiravad kitsendused toote ja/või tootmisprotsessi parameetritele, tootmissüsteemist tulenevad piirangud, kasutada olevad ressursid jm. Lahendades planeerimise ülesande, määratakse, mis piirangud mudelis on siduvad ja piiravad parema lahendi leidmist ning milline on piirangute mõju püstitatud sihifunktsioonile. Optimeerimisjärgne analüüs hindab erinevate muutuste mõju püstitatud sihifunktsioonile.

8.10 Äri- ja tootmisprotsesside planeerimise ja juhtimise süsteemid

8.10.1 Äri- ja tootmisprotsesside planeerimise ja juhtimise süsteemide areng

Ettevõtte juhtimise ja planeerimise peamine strateegiline eesmärk on tootmiskeskonna majanduslikult otstarbekas arendus, mis tagab ettevõtte pikemaajaliste eesmärkide majanduslikult otstarbeka täitmise. Juhtimise ja planeerimise ülesannete lahendamise tase määrab suuresti ettevõtte konkurentsivõime.

Tootmise arendus ja planeerimine on kompleksne tegevus, mis hõlmab mitut omavahel seotud insenertehnilise ja majandusliku sisuga meetodite ning tööriistade kogumit.

Peamised tootmise arendusega seotud insener-tehnilised tegevused on:

- toote arenduse ja elukaare halduse (CAD/CAM, PLM) süsteemid, mis hõlmavad tootearendust ja tootmistehnoloogia projekteerimist ja arendust, toodete ja tootmistehnoloogia andmete muudatuste haldust jm;
- tootmise planeerimise ja juhtimise süsteemid (MRPII, ERP), mis hõlmavad tootmise planeerimist, laovarude juhtimist, toote turundust ja tellimust/varustust, kliendi haldust, finantsjuhtimist jm;
- toodete innovaatsust tagav T&A tegevus, mis sisaldab toote platvormi arendust, tootepere (tooteportfelli) arendust, uute materjalide kasutuse arendust, toote simuleerimist ja testimist jm;
- tootmissüsteemi arendus, hõlmab tootmissüsteemi otstarbeka struktuuri projekteerimist, sh ka seadmete valikut, tööabinõude, automatiseerimis- ja juhtimisvahendite valikut ja projekteerimist jms.

Üldjuhul käsitletakse ja evitatakse ERP- ja PLM-süsteeme ettevõtetes lahus ja seda vaatamata asjaoludele, et mõlema süsteemiga seotud otsused ja kasutatavad andmed on oma vahel tihedalt seotud. ERP-süsteemide olulised sisendid, nagu toote andmed, toote struktuur (BOM) ja marsruut tehnoloogia andmed on PLM-süsteemide väljunditeks. Viimane asjaolu tingib vajaduse PLM- ja ERP-süsteemide omavaheliseks integreerimiseks. Taolise integreerimise eesmärk on toetada senisest enam toodete ja tootmise innovatsiooni, arvestada toodete arendamisel üha enam klientide nõudmistega, siduda kliendihaldus, turundus ja ressursside planeerimine ühtseks tervikuks, toetada koostööd ettevõtte erinevate osakondade ja koostööpartnerite vahel eesmärgiga tagades kõrgem toodete konkurentsivõime ja paremad majandusnäitajad.

Toodete korrektsete andmete ja muudatuste mitteamestamine põhjustab vigu toote komponentide ja materjalide tellimisel, ressursside arvestamisel ja planeerimisel.

Ettevõtte, mis evitab ERP-süsteemi arvestamata PLM-süsteemi funktsioone, riskib probleemidega toodete andmete korrektsuses, toote muudatuste mitteamestamises jm, mille tulemusel tekivad ERP-süsteemis tegelikkusele mittevastavad tootmisplaanid.

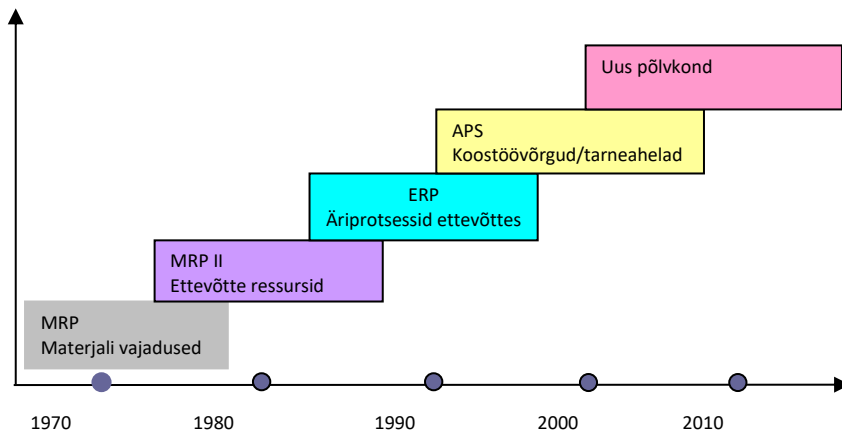
Arvestades planeerimise ülesannete lahendamise keerukust ja suurt arvutus- ning informatsiooni mahtu, on kaasajal ettevõtetes põhiliselt kasutusel arvutipõhised tootmise planeerimist ja juhtimist toetavad süsteemid.

Tootmise planeerimise ja juhtimissüsteemide areng

Nüüdisajal on kasutusel kaks põhilist tootmise planeerimise ja juhtimise lähenemist [8.1, 8.2]:

- ülevalt alla ehk *push*- (otsuseid ette andev) lähenemine;
- Alt üles ehk *pull*- (otsuseid kaasa vedav/tõmbav) lähenemine.

Tootmise planeerimise ja juhtimise süsteemide areng on kujutatud seel 8.17 ja sisaldab järgmisi etappe.



Sele 8.17 Tootmise planeerimissüsteemide areng

Materjalivajaduste planeerimine (*material requirement planning*, MRP). Põhifunktsioon seisnes tellimuste täitmisega seotud materjalivoogude planeerimises.

Tootmisressursside planeerimine (*manufacturing resource planning*, MRP II). Lisandusid tootmisvõimsuste/ressursside arvestamine ja planeerimine ning finantsjuhtimise võimalused.

Äriinfosüsteemid ehk ettevõtte ressurside planeerimine (*enterprise resource planning*, ERP). Planeerimine haarab praktiliselt kõiki ettevõtte äriprotsesse. ERP-süsteemid põhinevad ettevõtte integreeritud andmemudelitel.

Nüüdisaegsed planeerimise süsteemid, sh koostöövõrkude töö planeerimine (*advanced planning and scheduling*, APS). Peamine täiustus seisneb tarneahelate haldamise võimaluses. Suund on arenev ning ilmselt töötatakse välja uued põlvkonnad, mis võimaldavad odavamaid, tarbijasõbralikumaid ja paindlikumaid lahendusi.

Iga arenguetapiga on seotud kasvava hulga faktorite arvestamine ja sellega seotud planeerimise kvaliteedi tõus ning tootmise efektiivsuse ja tootlikkuse paranemine. Areng põhineb saavutatud kogemuste (parima praktika ja ilmnenu puuduste) arvestamises, uute meetodikate ja tehnoloogiliste võimaluste kasutamises ning lahendatavate ülesannete ringi laiendamises. Uued arenguetapid sisaldavad endas eelmisi etappe reeglina eraldi alamsüsteemidena.

8.10.2. Materjalivajaduste planeerimise (MRP) süsteemid ja nende põhilised koostisosad

MRP-süsteemi võib pidada nüüdisaegse arvutitehnika evitamise alguseks tootmise juhtimises. Juba eelmise sajandi 60ndatel kasutasid mitmed ettevõtted tootmise planeerimiseks arvuteid. Ühe esimese laiemalt tuntud rakenduse sel alal tegi IBM, kus Joseph Orlicky juhtimisel töötati välja materjalide vajaduse planeerimise ehk MRP-süsteem.

MRP-süsteem toetab materjalide ja ostutoodete vajaduse planeerimist, lähtudes põhiliselt nõudlusest tulenevast üldisest tootmisplaanist (*master production schedule*) ja toote struktuurist, mis esitatakse tükilehe andmetena (*bills of materials*, BOM). Süsteemide esmane raketudusala oli varustuse ja tootmise materjalivoogude juhtimine. Tootmise sisuline planeerimine ja juhtimine jäi MRP-süsteemides lahendamata probleemiks.

MRP-süsteemide sisendid ja väljundid:

Sisendid:

- prognoositavad müüginahud igale tootele;
- tükilehed tootele;
- toote valmistamisele ja koostamisele kuluvad ajad;
- laoseisud materjalidele ja tootekomponentidele;
- tarneajad igale tootekomponendile (varustajate kaupa);
- materjalide ja ostutoodete hinnad;
- muud tootmispoliitikat määravad dokumendid.

Väljundid:

- toodete ja tootekomponentide tootmise või tarnimise mahud igale tellimusele;
- tootekomponentide tellimuslehed, toodete/komponentide valmistamise töökäsud;
- laoseisude juhtimise dokumentatsioon.

MRP-süsteemide peamised funktsioonid (lahendatavad ülesanded) [8.2]:

- plaani tükeldamine ajas (*netting*);
- tootmise/tellimuste partii suuruse määramine (*lot-sizing*);
- tellimuste kavandamine ajas (*time phasing*);
- tellimuste laiendamine tükilehele (*BOM explosion*).

MRP-süsteemide kasutamisega seotud eelised ja probleemid

MRP-süsteemi kasutamine ettevõttes tagab nii varustuse kui ka tootmise otstarbeka materjalivoogude arvestuse ja juhtimise. Lähenemise peamised puudused on seotud lahendatavate ülesannete piiratusega, sh ettevõtte olemasolevate ressursside ja muude tootmist iseloomustavate näitajate arvestamata jätmisega.

Sellised olukorrad nagu ettenägematud tellimuste muutused, varustajate äraütlemlised, seadmete rivist väljalangemine jt, võivad oluliselt muuta MRP-süsteemi poolt loodud tootmisplaanid ja on MRP evitamise üheks peamiseks probleemiks. Siis kasutatakse arenenud MRP-süsteemides planeerimiseks plaani muutmist/täpsustamist ehk alt üles planeerimist. Plaani muutmise eeldab süsteemi võimet liikuda mööda tootestruktuuri alt üles, s.o materjalidest/komponentidest lõpptoodeteni, korrigeerides vastavalt tootmis- ja tellimusplaanidele.

8.10.3. Tootmisressursside planeerimise (MRP II) süsteemid.

MRP II süsteemide üldine kirjeldus

MRP II-süsteemidest räägitakse alates 1980. aastate algusest. Tootmisressursside planeerimise süsteeme defineeritakse kui arvutitöölusel baseeruvaid vahendeid tootmise efektiivsaks planeerimiseks ettevõttes, arvestades olemasolevaid ressursse. Ideaaljuhul hõlmab MRP II tootmise planeerimist toodete kogustena (tükkidena) ja finantsplaneerimist (rahaühikutena), võimaldades sealjuures hinnata ka erinevaid "juhul kui" olukordi. MRP II-süsteemid sisaldavad mahukaid andmebaase, mis hõlmavad ettevõtte tööd kirjeldavaid andmeid ja kogemusi. Oma olemuselt on MRP II ettevõtte juhtimist toetav süsteem, mis täidab põhilisi tootmise planeerimise ülesandeid ja võimaldab otstarbekalt kasutada ettevõtte ressursse.

1980. aastatel hakati MRP II-süsteeme suurarvutitelt üle viima personaalarvutitele.

MRP II-süsteemid lahendavad võrreldes MRP-süsteemidega rida täiendavaid ülesandeid:

- tootmisvõimsuste vajaduse (*capacity requirements planning*) analüüs/arvutus erinevatele ajahetkedele ja struktuuriüksustele;
- nõudluse prognoosimine ja strateegiline (agregeeritud) planeerimine;
- tootmise operatiivne juhtimine (*shop floor control (SFC), job dispatching*).

MRP II-süsteemide lihtsustatud arhitektuur on esitatud seel 8.18.

MRP II-süsteemide kasutamise eelised ja probleemid

MRP II-süsteemid võimaldavad:

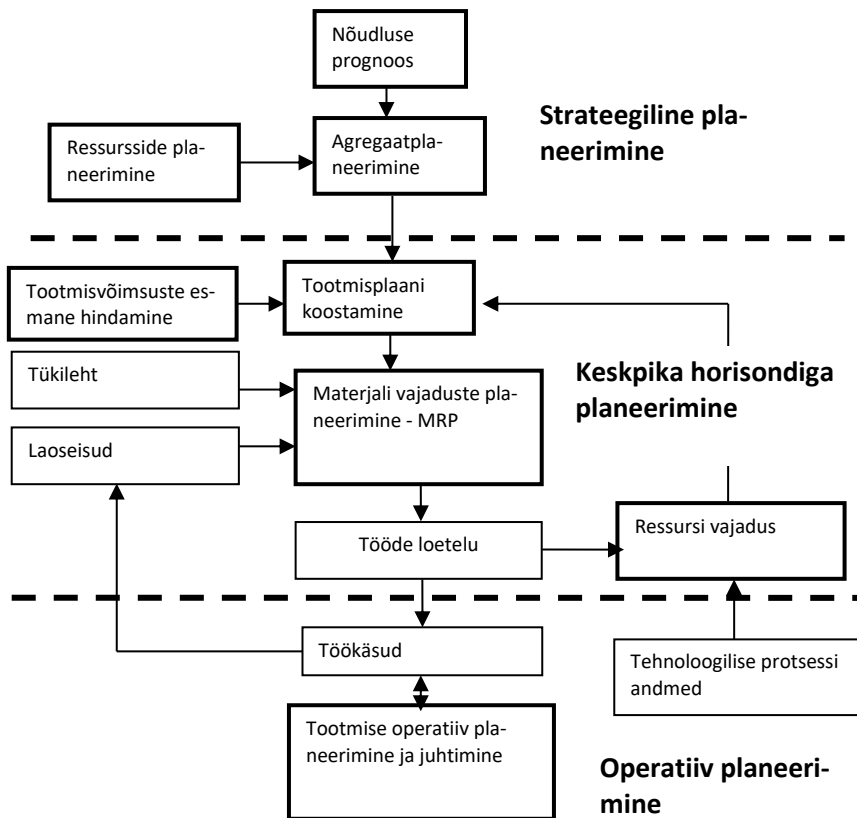
- juhtida otstarbekamalt laoseise;
- parandada tootmise ajalist planeerimist;
- tõhustada sidemeid klientidega;
- tõhustada kontrolli projekteerimise/planeerimise üle;
- tõhustada kvaliteedikontrolli, parandada kvaliteeti;
- vähendada käibe vahendite vajadust;
- parandada kassavoogusid.

MRP II-süsteemide eelised:

- integreeritud funktsionaalsus;
- kliendisõbralikud liidesed;
- integreeritud andmebaasid;
- ühtsustatud arhitektuur ja kasutatavad tööriistad;
- ühtsustatud teenindus.

MRP II-süsteemide peamised puudused:

- raske ühildada olemasolevate tootmise juhtimise süsteemide ja praktikaga;
- pikk ja kallis evitamine;
- piiratud paindlikkus keskpikal ja operatiivsel planeerimisel;
- pikk tasuvusaeg;
- tehnoloogilise innovatsiooni puudumine.



Sele 8.18 MRPII-süsteemide arhitektuur. Tootmise planeerimise põhiülesanded

8.10.4. Ettevõtte ressursside planeerimise süsteemid (äriinfosüsteemid). ERP-süsteemid

ERP süsteemi üldine kirjeldus

ERP on MRP II järjekordne edasiarendus, kui 1990. aastatel lisati MRP II-le finantsarvestus, kliendihaldus, inimressursside haldus jm ettevõtte juhtimise funktsioonid. Viimasel ajal on ERP-süsteemidele lisatud mooduleid müügitoetuseks, e-tellimuste ning tarneahela halduseks. Kõik need moodulid peavad olema integreeritud ühtsesse ERP-süsteemi. Nii MRP- kui ka MRP II-süsteemid moodustavad ERP-süsteemide olulised alamsüsteemid. ERP-tarkvara toetab põhilisi ettevõtte ärifunktsioone, nagu müük, turundus, tootmise juhtimine, tootmisvarude juhtimine, kvaliteedijuhtimine, inimressursside juhtimine jt. ERP-süsteeme kutsutakse sageli ebaõiglaselt ettevõttesisesteks (*back office*) süsteemideks, et eristada neid kliendihalduse, e-ärinduse, e-tootmise, varustuse juhtimise jt ettevõttevälistest (*front office*) süsteemidest. Viimased moodustavad aga sageli ERP-süsteemi olulise osa.

Nõuded ERP-süsteemile on laialdased, kuna tuleb rahuldada laia tarbijaskonna soove, mis on üldjuhul küll sarnased, kuid siiski väikeste erinevustega. Peamisteks nõueteks on:

- globaalne kasutus – sama tarkvara peab saama kasutada integreerituna erinevates filiaalides/maades;
- erinevate IT-platvormide tugi;
- erinevates valuetades finantsarvestuse tugi;
- mitmekeelne kasutajaliidese tugi;
- võimalus laiendada süsteemi uute funktsioonidega.

ERP-tarkvara võib oma olemuselt pidada keeruliseks infosüsteemiks, mille arendamiseks kulub märkimisväärne aeg ja raha. On üleliia kallis arendada igale ettevõttele sobiv ERP-tarkvara rätsepatööna. Kuigi enamik ettevõtteid kasutab sarnaseid juhtimisfunktsioone ja tarkvaraga on võimalik nende põhinõudeid rahuldada, leidub ettevõtteid, kes seavad tarkvarale lisanõudeid. Enamasti moodustavad need võrreldes põhinõuetega aga väikese osa ja neid saab lahendada ERP-süsteemi kohandamisega. Tavaliselt hõlmavad ERP-süsteemid arenduskeskkonda, mis võimaldab teha ettevõttes keskseid kohandusi ja arendusi.

ERP-süsteemide peamised funktsioonid on:

- finantshaldus;
- tootmine;
- müük ja turundus;
- hankeahela haldus;
- klienditeenindus;
- personalihaldus;
- projektijuhtimine;
- äri- ja kasutajaportaali;
- e-äri.

Tootmise planeerimine ERP-süsteemides on sisuliselt sama, mida kasutati MRP II-süsteemides. Üldine tootmisplaan (*master production schedule, MPS*) on peamine mõiste/objekt, millest lähtutakse tootmise planeerimisel ja tellimuste täitmisel, tasakaalustades materjalide ja ostutoodete tellimist ja toodangu väljalaset.

See on hästi välja töötatud ja dokumenteeritud ning laialdaselt kasutatav protsess, mis sai alguse juba MRP-süsteemidest. Kuna aga MRP-süsteemides lähtuti tootmissüsteemi piiramatust võimsusest, siis on nii MRP II- kui ka ERP-süsteemides võrreldes MRP-süsteemidega lisatud ressursside planeerimine (*rough cut capacity planning, RCCP; capacity requirements planning, CRP*).

ERP-süsteemide kasutamise eelised ja probleemid

Ühtse ERP-süsteemi puudumisel on ettevõtte olukorras, kus tuleb kasutada erinevaid alamsüsteeme erinevatelt tarnijatelt, kuid nendevaheline kommunikatsioon tavaliselt ei tööta

või nõuab täiendavaid investeeringuid liideste arendamiseks. Peamised ülesanded, mis vajavad taolist kommunikatsiooni võiksid näiteks olla:

- ERP-süsteemide side nõudluse ja müügitrendide prognoosimise süsteemidega, et otstarbekalt juhtida laoseise, tootmises olevate toodete arvu (WIP), tagada planeerimisega tootmise efektiivsus ja kasum;
- tootearenduse ja tehnoloogia projekteerimise side planeerimisega, s.o ERP-ide side CAD-, CAM-, CAPP- ja PLM-süsteemidega, sh tükilehtede andmete haldamine, muudatuste haldamine (*engineering change management*) jt;
- tellimuste täitmise haldamine vastuvõtust kuni toote tarnimiseni;
- tulude laekumise realiseerimine alates arvete koostamisest ja esitamisest kuni kassavoo-gude planeerimiseni. Kolme peamise protsessi koordineerimine: toodangu pakkumiste ja tellimiste vastuvõtmine, materjalide ja ostutoodete tellimine ning tootmise realiseerimine (koos kulutuste määramisega);
- raamatupidamise side ERP-süsteemidega, kulude ja kasumi arvutus eri tasanditele ja struktuuriüksustele.

ERP-süsteemide realisatsioon põhineb integreeritud andmemudelitel ja tsentraliseeritud andmetöötlusel. Integreerimise kasu võib iseloomustada järgmiselt:

- lihtsustub muudatuste sisseviimine;
- võimaldab juhtida äriprotsesse üle funktsionaalsete allüksuste piiride;
- baseerub ülalt alla lähenemisel ja aktuaalse informatsiooni kasutamisel eri tasanditel;
- väheneb võimalus eksida olulise info kasutamisel;
- võimaldab lühendada tarneaegu;
- toetab koolitust ja üldise arusaama kujunemist ettevõtte otstarbekast juhtimisest.

ERP-süsteemid hõlmavad teatud turvaelemente tööstusspionaaži ja häkkerite vastu.

Süsteemides on realiseeritud ka teatud sisemised kontrollmehhanismid, et vähendada võimalikke vigu.

Probleemid ERP-süsteemidega on seotud peamiselt evitamise, puuduliku personali ettevalmistamisega jm. Põhilised probleemid on:

- ERP-süsteemi tarkvara kohandamise võimalused ettevõtte olukorrale on piiratud;
- äriprotsesside kohandamine ERP-süsteemides kasutatud tööstusharu standardlahendustega võib kaotada ettevõtte konkurentsieelised;
- ERP-süsteemid on väga kallid;
- ERP-süsteemid on jäigad ega võimalda kohandamist ettevõtte äriprotsessidele;
- integreeritud andmebaaside kasutamine eeldab andmete korrektsust. Isegi väheses mahus vigased ja osaliselt puudulikud andmed võivad oluliselt vähendada süsteemi usaldatavust;
- juba evitatud süsteemile uute partnerite ja juhtimisvaldkondade (ülesannete) lisamine on keerukas. Ettevõtte tegevusvaldkonna laiendamine (muutmine) võib põhjustada raskusi olemasoleva süsteemi otstarbekal kasutamisel;

- äriks olulise info avalik levitamine tekitab vastuseisu;
- ettevõtte eraldiseisvad autonoomsed allüksused (eraldi ressursside ja juhtimistavadega) vähendavad integreeritud lähenemise otstarbekust.

Vaatamata nimetatud puudustele on ERP-süsteemid leidnud laialdase rakenduse.

ERP-süsteemide arenguid võib iseloomustada järgmiste märksõnadega: internetipõhised süsteemid; avatus, mis annab võimaluse nii ettevõtte personalile erinevatel tasanditel kui ka klientidele (tellijad ja varustajad) vastavalt kehtestatud reeglitele kasutada süsteemi andme- faile; muudetavuse/täiendatavuse lihtsustamine jm.

8.10.5.Tootmise planeerimise arengud, APS-süsteemid

Alates 1990. aastate algusest käsitlesid tootmisjuhid tootmise, jaotuse (müügi) ning transpordi, prognoosimist ja planeerimist kui ühtset tarneahela planeerimise protsessi. APS-süsteemid [8.2] on orienteeritud ettevõtete koostöövõrkude, sh tarneahelate töö integreeritud planeerimisele. Eesmärk on leida otstarbekad lahendid kõikidele koostöövõrkudele, parandades tarneahelate tõhusust ja tootlikkust. Kasutusele võeti uued planeerimise meetodid, nagu optimaalne planeerimine jm.

APS-süsteem arvestab võimalikke muutusi toodete nomenklatuuris, vajadust lühendada tarneaegu ja tõsta toodete kvaliteeti. APS-süsteemid peavad toetama koostööd tootjate, varustajate, allhanget tegevate ettevõtete ja klientide vahel. Arvestada tuleb üha rohkem tellimustele suunatud tootmise iseärasusi. APS-süsteem põhineb tarneahela iseärasustel teha koostööd ja koordineerida otsuseid.

APS-süsteemide areng on seotud IKT üldise arenguga, kasvava arvutusvõimsuse ja elektrooniliste sidevõimaluste arenemisega.

APS-süsteemide arengu üheks suunaks on **arvutipilvepõhiste** ERP-süsteemid (*cloud ERP systems*). Arvutipilvepõhised ERP-süsteemid ühendavad endas ERP-i ja tootmise täitursüsteemide (MES-süsteemide) funktsioone. Nad kasutavad teenusena suurte arvutikeskuste arvutiressursse, hoides nii kokku esialgseid investeeringuid arvutustehnikasse. Seetõttu sobivad Cloud ERP/MES-süsteemid ka keskmistele ja väikestele ettevõtetele.

8.10.6 Tootmise täitursüsteemid

Tootmise täitursüsteemid (*manufacturing execution systems*, MES) on arvutipõhised tootmise juhtimise ja reaajas monitoorimise süsteemid. MES-süsteemide peamiseks ülesandeks on tarnida õigel ajal ja reaajas tootmist adekvaatselt kirjeldavat informatsiooni, et võimaldada otsustada, kuidas tootmist optimaalselt juhtida. Nüüdisaegsed MES-süsteemid on erinevalt varasematest süsteemidest, mis olid peamiselt suunatud ettevõttesiseseks tootmise juhtimiseks, orienteeritud kogu tootmises loodava väärtusahela otstarbekale korraldamisele-juhtimisele ettevõtete koostöövõrgus. MES-süsteemid integreerivad tarneahelas tootmist, seadmete teenindust, toodangu tarnet, kvaliteedi- ja personalijuhtimist, sõltumata, kus need tegevused tarneahelas realselt aset leiavad.

Täitursüsteemid võivad katta laia valdkonda alates toote arenduse juhtimisest tootmise operatiivse juhtimiseni, sh töötlemisjärjekordade ja -ajaplaanide koostamise ja realiseerimiseni.

MES-süsteeme võib käsitleda kui ettevõtte ressursside planeerimise (ERP vt ptk 8.10.4) ja tootmise järelevalve ja andmehõive süsteemide ([Supervisory Control and Data Acquisition \(SCADA\)](#)) vahepealseid süsteeme. Täpsed MES-süsteemide rakendamise piirid võivad varieeruda.

MES-süsteemide peamised funktsioonid on järgmised:

- tootearenduse juhtimine kui osa PLM-süsteemist;
- ressursside juhtimine (vt ptk 7.5);
- tootmise operatiivjuhtimine;
- tootmise dispetseerimine;
- ajaplaanide täitmise juhtimine (*scheduling*, vt ptk 7.7);
- andmehõive tootmises;
- tootlikkuse pidev hindamine ja parendamine jt.

MES-funktsioonide arengud laienevad ka tootmise statistilise kontrolli ja seadmete hoolduse haldamise suunas. Funktsioonide täitmiseks ja kooskõlas ISA-95-ga kasutatakse MES-süsteemi integreeritult ERP-süsteemidega, aga samuti toote elukaare juhtimise (PLM-, CAD/CAM-), kliendihalduse jt süsteemidega.

Vahetu andmeside tootmise kohta on realiseeritud tootmiseseadmetega, kasutades programmeeritavaid kontrollereid ([programmable logic controllers](#), PLC) ja arvprogrammjuhtimisega tööpinkide ja tööstusrobotite juhtseadmeid.

MES-süsteemide kasutamise peamised eelised on järgmised:

- integreeritud andmehõive ja reaalaajas tagasiside kasutamine tootmisprotsessi tõrgeteta juhtimiseks;
- tootmiskadude vähenemine;
- täpsem tootmisolukorra hindamine;
- seadmete kasutusmäära suurenemine;
- paberivaba tootmise juhtimise realiseerimine;
- tootmisvarude kulu vähenemine.

MES-süsteemide arengu üks suundi on interneti kasutamisele orienteeritud Cloud ERP/MES-süsteemide arendamine, mis võimaldavad personalil reaalaajas nutitelefonide ja tahvelarvutite abil saada operatiivselt andmeid seadmete staatuse ja tootmisprotsessi olukorra kohta.

Kordamisküsimused ja ülesanded

1. Kirjeldage, milline peaks välja nägema teiega seotud tootmisharu ettevõttes tüüpiline tükileht.
2. Restoran on tükitootmise ettevõtte. Eeldame, et restoranijuhataja peab valima järgmiste tellimuste täitmise variantide vahel:
 - toodab ette suures koguses valmisroogasid (nn tootmine lattu, MTS);
 - tellimuste täitmisel ainult garneerib ja soojendab roogasid (tellimusele järgneb lõppviimistlus);
 - on ette valmistanud põhilised pooltooted (alustab koostamisest, ATO);
 - tellimuse saamisel alustab roogade valmistamist (alustab tootmisest, MTO);
 - tellimuse saamisel alustab restoran menüü väljatöötamist ja tellib materjalid (alustab toote väljatöötamisest, ETO).
 - a) Millised on teie arvates toodud tellimuste täitmise lähenemiste eelised ja puudused restoranis?
 - b) Millist tellimuste täitmise süsteemi teile tuttavas ettevõttes kasutatakse?
3. Kirjeldage tekstiliselt ettevõttes allhanke otstarbekust hindavat mudelit (tooteportfelli mudeli eeskujul).
4. Ettevõtte toodab ühte tüüpi toodet. Kirjeldage tekstiliselt ja valemitega agregaatplaneerimise mudelit ettevõttele.
5. Pood müüb ühte toodet (näiteks jäätist). Kirjeldage põhilisi mõjufaktoreid jäätise nõudluse hindamiseks. Millise meetodiga peaks pood hindama näiteks nõudlust jäätisele, arvestades erinevaid mõjufaktoreid?
6. Kirjeldage, millised on tootmisvarude liigid, millistest teguritest varude suurused sõltuvad ja kuidas varusid vähendada.
7. Kirjeldage tekstiliselt mudelit kolme töökohaga vooluliini ajaplaani koostamiseks.
8. Kirjeldage, millised asjaolud mõjutavad tootmise efektiivsust tarneahelas.
9. Kirjeldage, kuidas määrata tootmise pudelikaelu tootmise planeerimise mudeliga. Millised oleksid olulised piirangud tootmise konkurentsivõime suurendamiseks valitud ettevõttes?
10. Kirjeldage, kuidas on arenenud tootmise planeerimise ja juhtimise arvutipõhised süsteemid.
11. Kirjeldage, mille poolest erinevad planeerimise süsteemid ettevõtetel, mis toodavad lattu ja tellimustootmise ettevõtetel.
12. Kuidas võiksid areneda tootmise planeerimise ja juhtimise arvutipõhised süsteemid?

Viited

- [8.1] Riives, J. Uuenduslik tootmine. TTÜ Kirjastus 2011, 446 lk.
- [8.2] Hopp, W. J., Spearman, M. L. Factory Physics. Foundation of Manufacturing Management. Boston (Mass.): Irwin McGraw-Hill, c2008.
- [8.3] Küttner, R. Nüüdistootmise õpetus. TTÜ kirjastus, Tallinn 2016. 220 lk.

9. KULUSÄÄSTLIKU TOOTMISE MEETODID JA TÖÖRIISTAD

Kulusäästlik tootmine (*lean manufacturing*, eesti keeles kasutatakse ka termineid *ladus tootmine* ja *timmitud tootmine*) on tootmissüsteem alandamaks tegevuskulusid, tõstmaks kvaliteeti ja loomaks tõhusalt organisatsiooni põhiväärtusi [9.1, 9.2, 9.5].

Kulusäästliku lähenemise peamised meetodid on järgmised.

- 1) Moodulootegruppidele (tooteperele) suunatud valmistamine ja koostamine (edaspidi ka **rakktootmine**) ning tootegrupi liikumise määramine ja jälgimine tootmissüsteemis (*manufacturing system*).
- 2) **Kanban** (ja **CONWIP**) süsteemi kasutamine informatsiooni- ja materjalivoo juhtimiseks (vt ptk 9.2).
- 3) Kõikehõlmav kvaliteedijuhtimine / 6 sigma lähenemine (**total quality management**, TQM / **six sigma**).
- 4) Seadmete seadistusaegade lühendamine (**rapid setup**).
- 5) Meeskonnatöö realiseerimine, kaasates kogu ettevõtte personali probleemide lahendamiseks (**team development**).
- 6) **SMED-i** (**single-minute exchange of die**) töövahendite seadistusaegade lühendamine.
- 7) **Metrics & measurements** on mõõtmete kontrollikaartide evitamine igale töökohale võimaldamaks lisaks protsessi seadistuse kontrollile hinnata ka seadme remondi või seadistuse vajalikkust.
- 8) **Mixed model production** on erinevate toodete tootmisele orienteeritud tootmissüsteemi mudelite kasutamine.
- 9) **Value stream mapping** on tootmisvoo väärtuste kaardistamine.
- 10) **Work balancing** on tsükliageade ühtlustamine erinevatel töökohtadel tootmissüsteemis.
- 11) **5S nõuded** on nõuded töökoha organiseerituse ja korrashoiu tagamiseks.
- 12) **Poka-Yoke** on seadmete, toodete ja tööprotsesside vigade vältimise tagamine.
- 13) **Total productive maintenance (TPM)** on seadmete hooldus, mis arvestab remonti ja ennetavaid hooldusi, seadmete seisundi pidev monitooring.

Lisaks nimetatud tööriistadele kasutab kulusäästlik kontseptsioon täiendavalt erinevaid meetodeid ja tööriistu. Kõik need meetodid hõlbustavad tootmise korraldamist ja töökultuuri loomist. Mõned näited on:

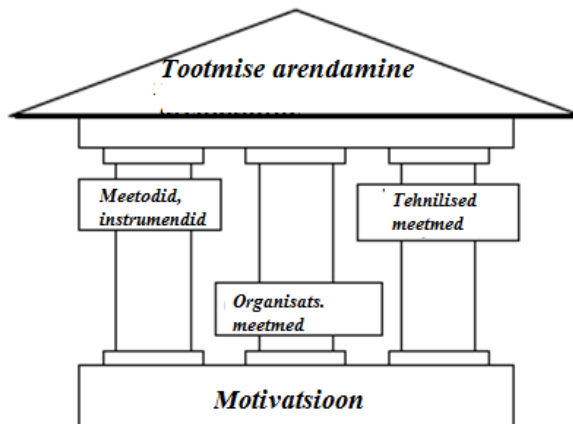
- 7 kao tundmine;
- tootmisviisi tundmine;
- toote perekondade maatriks;
- 5 miksi;
- 8 distsipliini;
- visuaalne kontroll;
- 20 võtme programm;
- Kaizen, pidev parendus.

Kulusäästliku tootmise eesmärk on elimineerida kaod igas tarneahela lülis. See puudutab nii kliendisuhteid, tootearendust, tarnijate ahelat kui ka organisatsiooni juhtimist. Eesmärgiks on seatud:

- väiksem töömaht;
- vähem tootmisvarusid;
- vähem aega toote arenduseks;
- vähem tootmispinda;
- kiirem reageerimine kliendi nõudmistele;
- parem kvaliteet;
- tõhusam ja majanduslikum tootmine.

Mida endast kujutab kulusäästliku tootmise juurutamine? Esiteks on kõige olulisem motivatsioon, s.t juhtkonna poolehoid ja nõusolek. See on võtmeküsimus ja tähendab kultuuri muutust organisatsioonis. Oma esialgsel kujul olid kulusäästliku tootmise meetodid kasutusel peamiselt masstootmise ettevõtetes, näiteks autotööstuses. Käesoleval ajal kasutatakse neid aga ka üha enam väike- ja keskmistes ettevõtetes ja teistes, tööstuslikust tootmisest erinevates valdkondades (näiteks teeninduses, sh haiglates jm).

Kulusäästliku tootmise meetodite kasutamist tootmise arendamisel võib iseloomustada järgmise selega (sele 9.1). Vaatleme järgnevalt peamiselt insener-tehnilisi, vähem organisatsioonilisi meetmeid.



Sele 9.1 Tootmise arendamine

Et aru saada kulusäästliku tootmise kontseptsioonist, tuleb mõista lähenemise põhimõtteid ja siis asuda kadude (kulude) vähendamisele. Kulusäästlik kontseptsioon defineerib kolm kadude põhiliiki, mis nimetatakse jaapani keeles:

- *muda*,
- *muri*,
- *mura*.

Ülekoormatus (*muri*) on seotud töötajale (ka seadmele, töökohale) planeeritud mittevajaliku tööga ja on seotud töö ebaotstarbeka planeerimisega.

Ebaühtlus (*mura*) on esmajoones seotud planeeritud tootmise ebaotstarbeka (planeerimisele mittevastava) realiseerimisega.

Raiskamine (*muda*) on põhiliselt seotud kadudega protsessi realiseerimisel.

Et kaod elimineerida, peab täpselt aru saama kahest küsimusest.

1. Mis on kaod?
2. Kus kaod eksisteerivad?

Olenemata tootmiste erinevustest on tootmiskeskonnas kaod sarnased. Peale pikaajalist tööd kadude elimineerimiseks leidis Jaapani autotootja Toyota järgmised seitse levinud kadude tekkimise põhjust.

- 1) **Ületootmine** on toodete suuremas koguses tootmine, kui on vaja. Visuaalselt on see nähtav laomaterjalina. See on spekulatiivse nõudluse hindamise tulemus.
- 2) **Transport** ei anna lisandväärtust tootele. Selle asemel, et parandada transporti, peaks see olema minimeeritud või elimineeritud.
- 3) **Liikumine**, nii töötajate, masinate kui ka ja transpord (nagu näiteks ka tööriistade ja detailide asukoha muutused protsessis), mis on kaod. Selle asemel, et automatiseerida raiasatud liikumist, peaks protsess ise olema parendatud.
- 4) **Ootamine** töomasina ja/või tööriista järgi peab tööprotsessis olema elimineeritud. Printsiip on maksimeerida töötaja kasutamist.
- 5) **Protsessisisesed kaod** peavad olema minimeeritud. Kõik mittevajalikud (tootele lisaväärtust mitteandvad) sammud tuleb elimineerida.
- 6) **Tootmises olevate toodete arv (*work in process, WIP*)** on materjal tootmisoperatsioonide vahel, mis on tekkinud liigse tootmise või pika tsükli tulemusena. Selle tulemuseks on lisatöö, -ruum, huvide lahknemised, vajalikud inimesed ja paberitöö.
- 7) **Defektid**. Defektsete toodete tegemine on puhas kadu. Fokuseerima peaks ennetavale defektide avastamisele, selle asemel et neid otsida ja parandada.

9.1. Varudeta tootmise (JIT) süsteem

Just in time (JIT) meetod töötati välja Toyota autotehases 1960. aastate alguses. Läänemaal sai JIT tuntuks 1980. aastatel, mil seda loeti üheks Jaapani tööstuse edu aluseks. JIT-süsteemi arendamist loetakse üheks oluliseks sammuks tootmissüsteemide arengus. JIT-süsteem on üks alt üles töötava ehk *pull*-süsteemi rakendusi. JIT-i juured on Jaapani kultuuris, geograafilises asendis ja majanduslikus olukorras. JIT-lähenumist võib iseloomustada kui tootmissüsteemi arendust, kus eesmärgiks on vähendada kadusid. Tootmiskeskonnas loetakse kadudeks kõiki kululiike, mis ei suurenda otseselt toote väärtust.

JIT-lähenumist võib iseloomustada järgmise kolme aspektiga.

- 1) Eesmärgistatus:
 - JIT filosoofia;
 - kvaliteedi tagamine.
- 2) Tootmistehnika:
 - minimaalsed ümberseadistamisajad;
 - unifitseeritud/tasakaalustatud seadmete/töökohtade koormatus;
 - grupitehnoloogia kasutamine.
- 3) Tootmise juhtimine:
 - *kanban*-süsteem.

Sealjuures on põhiline väljakutse, kuidas tagada tasakaalustatud tootmissüsteem muutuva toodete portfelli tingimustes.

JIT-süsteemide evitamise lähtepunktideks ja eesmärkideks on seitse nulli (*seven zeros*).

1. **Praagi minimeerimine** (*zero defects*) – et saavutada ühtlast ja sujuvat toodete voogu, on vaja kvaliteetseid komponente, defektsed komponendid põhjustavad toote hilinemist. Ainus aktsepteeritav praagitase on 0.

2. **Liigsete partiide minimeerimine** – JIT-süsteemi üks olulisemaid nõudeid on vähendada partii suurust, teha see nii väikseks kui võimalik, et kokku hoida protsessis olevaid käibevarudeid ja kiiremini avastada defekte.

3. **Seadistusaja vähendamine** – peamiseks põhjused suurte partiide tootmiseks on pikad ümberseadistussajad. Seetõttu on eesmärk vähendada seadistusaegu, et otstarbekalt toota erinevaid tooteid väiksemate partiidenä.

4. **Tootmisveisakute minimeerimine** – JIT-tootmiskeskond on väga tundlik seisakutele, eriti mitteplaanipärasele seisakutele. Samas on tänu lühikesele ümberseadistussajale võimalik alustada mõne teise toote tootmist ja hiljem (pärast remonti) jätkata eelmise tootmisega.

5. **Vaheladude minimeerimine** – nõutakse, et tellitud materjal saabub täpselt õigel ajal ja õiges koguses, õigesse kohta. Sellega vähenevad ladustamisega seotud kulutused ja vabaneb hõivatud laopind.

6. **Tellimuse täitmise aja lühendamine** – vähendades partiide suurust erinevatel operatsioonidel, valmib konkreetne toode ajaliselt kiiremini.

7. **Stabiilsuse tagamine** – tootmisplaanide suurem stabiilsus. JIT-keskkonnas, kus tooteid toodetakse nii palju, kui vaja, ja komponente tuuakse liinile nii palju, kui vaja, on materjali liikumine sujuv, kuna tootmisplaan on stabiilne ja puuduvad suured tootmismahude muudatused. Kui koguste või toodete tootmisjärjekorras tehakse sageli muudatusi, võivad tekkida probleemid.

Toodud eesmärkide samaaegset püstitust ja saavutamist võib iseloomustada kui holistilist ülesannet. Nimetatud eesmärkide juures väärib esiletõstmist, et lääne kultuuris tundusid püstitatud eesmärgid liiga pretensioonikad ja saavutamatud. Idamaades ei pruugi eesmärgid olla aga vahetult täidetavad, neid käsitletakse eesmärkidena, mille poole tuleb püüelda.

JIT-lähendamise evitamine tootmises baseerub tootmiskeskonna (tootmissüsteemi) otstarbekal ümberstruktureerimisel ja süsteemsel arendamisel. JIT-i evitamine eeldab tootmisega seotud kadude kõrvaldamist. Kadude all mõistetakse sealjuures tootmisvarusid, ooteaegasisid töötlemiseks ja transpordiks, seadmete seisakuid hoolduseks ja remondiks, aegu seadmete seadistamiseks, praaktoodangut jms. Täiuslikumal kujul käsitletakse kadude kõrvaldamist kulusäästliku tootmise (*lean manufacturing*) meetodite kirjeldamisel (vt ptk 9.10).

Tootmise kvaliteedi parandamisega seotud meetodeid käsitletakse kvaliteedijuhtimise peaktükis (ptk 10).

Partii suuruse vähendamise eesmärk on iseloomustatav majanduslikult otstarbeka partii suurusega, mis avaldub seosega:

Valemis:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2AD}{h}}$$

D – nõudlus tootele (tükkides aastas);

A – kulutused tootmise ümberseadistamisele või partii tellimisele;

h – kulutused ladustamisele (käibevahendite maksumus);

Q* – otstarbekas partii suurus (tükkides).

Juhtivateks suurusteks on siin kulutused tootmise ümberseadistamisele ja kulutused ladustamisele. Selle suhte väärtust on otstarbekas vähendada. See eesmärk on osaliselt seotud tootmise (ümber) seadistamisaja vähendamisega.

Tootmise (ümber) seadistamisaja lühendamine. Tööseadme seadistamised jaotatakse protsessisisesteks ja protsessivälisteks seadistusteks. Protsessisisised seadistused nõuvad protsessi (seadme töö) katkestamist ja on seotud ajakadudega. Protsessivälised seadistused toimuvad protsessi ajal ega vaja seadme töö katkestust.

Eesmärgiks on:

- suurendada protsessiväliste seadistuste osakaalu, asendades protsessisisised seadistused välistega;
- vähendada aega protsessisiseste seadistuste tegemiseks;
- kõrvaldada vajadused järelhäälestada tööriistu, kasutades näiteks mõõtude korrigeerimiseks APJ-pingis mõõtude aktiivse kontrolli võimalusi (sele 9.3);
- kasutada tööriistade häälestamiseks eelhäälestusseadmeid (*presetting devices*).

Nüüdisaegsete tööpinkide maksumus on kõrge. Et need oleksid efektiivsed, tuleb kasutada lahendusi, mis vähendavad pinkide seisuaegu, sealhulgas ka aega tööriistade seadistamiseks. Selleks kasutatakse tööriistade eelhäälestusseadmeid (seled 9.2 a ja b). Eelhäälestusseadmed võimaldavad ühe tööriista häälestamise pealt kokku hoida ligikaudu 2 minutit ja selle osatähtsus on eriti oluline suure tööriistade arvu ja sagedaste vahetuste korral.

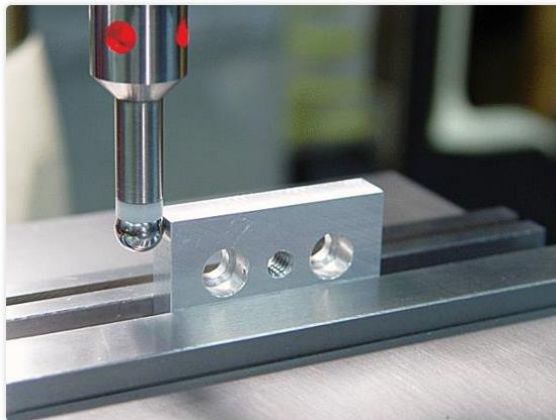


a) Lihtne seade



b) eelhäälestusseade (UNO, DMG Mori)

Selel 9.2 Erinevad tööriista eelhäälestusseadmed



Sele 9.3 Aktiivse mõõtmete kontrolli näide APJ-freespingis

Järgnevalt on näitena toodud peamised tegevused APJ-freespingi seadistamiseks uue detaili töötlemise alustamiseks (protsessisisene seadistus):

- puhastada tööpinnad;
- asetada eelhäälestatud tööriistad kooskõlas juhtprogrammiga tööriistamagasi;
- paigaldada detail rakisesse, vajadusel seadistada rakis;
- sisestada töötlemisprogramm;
- lisada tööriista mõõtmetest tingitud tööriista telje (0 punkti) nihutused (*offsets*) X, Y ja Z suunas;
- seadistada jahutusvedeliku voolusuund nii, et see eemaldaks laastud.

Programmeerimiseks ja programmide testimiseks eelistatakse kasutada autonoomseid (seadmeväliseid) CAM- või CAD/CAM-süsteeme.

Seadistusaja lühendamiseks kasutatakse tootmissüsteemi spetsialiseerumist fikseeritud tootepere tootmiseks ja grupitehnoloogia põhimõtteid.

Tootmise katkestuste (seisakute) vähendamiseks kasutatakse seadmete ennetava hoolduse ja remondi süsteemi. Seadmeid hooldatakse ja remonditakse võimalusel töövälisel ajal.

Transpordiaja ja ladustamisega seotud aja vähendamine saavutatakse tootmissüsteemi otstarbeka ruumilise planeeringuga, aga samuti uute tehnoloogiate, sh tööstusrobotite kasutuselevõtuga. Seadmete asetus tootmissüsteemis ja tootmisvood projekteeritakse, arvestades kõrgtööstuse tootepere töötlemise otstarbekust.

Tellimuse täitmise ooteaja vähendamine. Ooteaegade vähendamine nõuab tootmissüsteemis erinevate operatsioonide sünkroniseerimist, s.o töötlemisaegade ühtlustamist ja lähedast kestust planeeritud tootmise rütmiga. Olgu lihtsustatud näitena planeeritud toota 80 detaili vahetuses, siis on soovitatav rütm $80/8 = 10$ detaili tunnis ja operatsiooni aeg peaks olema lähedane 6 minutile. Kõrvalekalded 6 minutist tekitavad kas seadme või toote ooteaegasid. Ooteaegade pikkust saab hinnata tootmise ajaplaanide koostamisega.

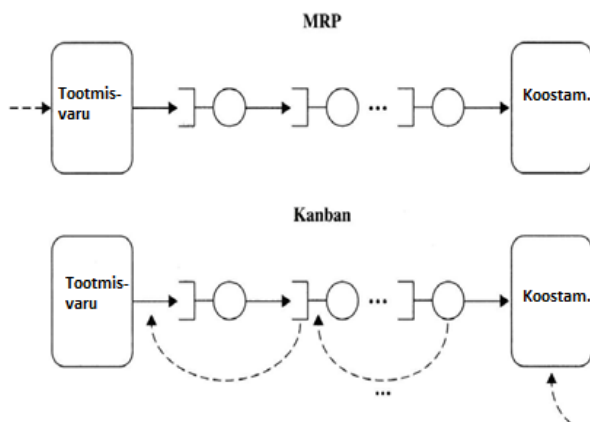
9.2. Kanban tootmise juhtimise süsteem

Kanban süsteem [9.1] töötati välja Toyota autotehases eesmärgiga saavutada võimalikult efektiivne toodete ja varude liikumise juhtimine tootmises. JIT-protsessi juhitakse kanbani kaartidega. Mõiste *kanban* tuleb jaapani keelest ja see tähendab kaarti või signaali. Kanban kaart kujutab endast kaarti, millel on kirjas toode ja kogus, mida vajatakse.

Oma olemuselt on kanban tootmise juhtimise meetod orienteeritud põhiliselt ajaliselt korduvale seeriatootmisele ja ilma modifitseerimata on seda meetodit üksiktootmises raske evitada. Kanban süsteem eeldab tootmises ranget distsipliini, selle evitamine loob eeldused tootmisvarude otstarbekaks kasutamiseks, see on lihtne ja eeldab vähest paberitööd võrreldes teiste tootmise juhtimise meetoditega.

Kanban süsteemi idee seisneb selles, et juhtida materjali ja informatsiooni liikumist tootmises nii, et komponendid oleksid alati liinil, neid ei oleks liiga palju ja oleks teada, mis toodet ja kui palju on vaja, et rahuldada kliendi nõudmisi.

MRP- ja kanban süsteemide võrdlus on esitatud seel 9.4.



Sele 9.4 MRP- (materjali vajaduse planeerimise, vt ptk 8.10.1) ja kanban süsteemide võrdlus [9.2]

Süsteemi eelisteks võrreldes ülalt alla süsteemiga võib pidada:

- lihtne ja arusaadav;
- annab informatsiooni edasi täpselt ja kiirelt;
- juhib nii materjali kui ka info liikumist;
- toetab nüüdisaegseid kulusäästliku tootmise põhimõtteid;
- reageerib kiiresti muutustele;
- väldib ületootmist;
- vähendab üldist raiskamist;
- delegeerib vastutuse töötajatele;
- on soodne kvaliteedi seisukohalt.

Elektroniline kanban (lühendatult ka e-kanban) on süsteemi realiseerimine, mis kasutab traditsiooniliste kanban kaartide asemel võõtkoode (*barcode scanners*), raadiosagedusel töötavaid sensoreid (*RFID tags, Radio-frequency identification readers*) jt elektroonilisi andmeside vahendeid. Tarneahelas kasutatakse materjalide, pooltoodete ja toodete liikumise andmete reaalsajas edastamiseks ja töötlemiseks interneti võimalusi. Kõik see muudab kanban süsteemi kasutamise tõhusamaks.

Kanban-funktsioon on ettevõtte juhtimise ja planeerimisega tihedalt integreeritud ja toetab erinevaid juhtimise funktsioone (sh reaalsajas tootmise kanban'id, reaalsajas ostmise kanban'id ja laovarude täiendamise kanban'id jt). Kanban'id käivituvad, kui toodete-materjalide jm laovarud või tellimused nõuavad täiendamist.

Teised tootmise juhtimise strateegiad

CONWIP (*constant work in process*) on alt üles töötava tootmise juhtimissüsteemi realiseerimine, kus erinevalt kanban süsteemist (kus juhitakse tootmises olevaid pooltooteid igal töö-

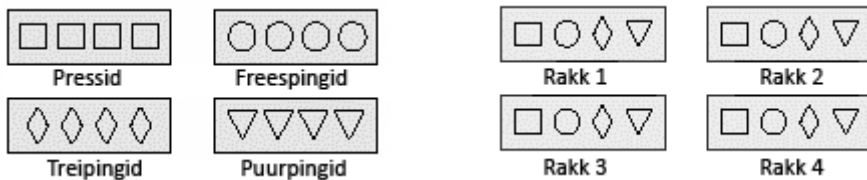
kohal) juhitakse toodete arvu kogu tootmissüsteemis, hoides selle konstantse. CONWIP-süsteemi on kergem evitada võrreldes kanban süsteemiga. CONWIP-süsteemis jaotatakse tootmistellimuse kaardid erinevate tootetüüpide vahel.

CONWIP kasutab kaarte, et juhtida kogu tootmissüsteemis olevate toodete arvu.

Vaatamata asjaolule, et CONWIP sisaldab mõlemaid alt üles ja ülevalt alla toimivaid mehhanisme, liigitatakse see enamasti alt üles toimivate süsteemide hulka.

9.3 Moodultootegruppidele (tooteperele) suunatud rakktootmine (*cellular manufacturing*)

Rakktootmine on kulusäästliku tootmise integreeritud osa. Lisaks vahetule tootmisele, võib rakktootmine sisaldada ka tootmise juhtimise/administreerimise ümberkorraldamist. Rakktootmine põhineb grupitehnoloogia kasutamisel, kus rakendatakse kujult lähedaste ja sarnase töötlemistehnoloogiaga detailide pere otstarbekat töötlemise korraldust. Tootmisraku seadmed valitakse ja nende paigutus määratakse erinevalt funktsionaalse struktuuriga tootmisjaoskonnast (sele 9.5), lähtudes toodete perele iseloomulikust üldistatud tehnoloogilisest protsessist, mis tagab sujuva toodete liikumise rakus (sele 9.6).



Sele 9.5 Funktsionaalne struktuur

Sele 9.6 Rakkstruktuur

Rakktootmise puhul koolitatakse personali ja töökohad varustatakse tööabinõudega (rakised, tööriistad jm), arvestades tootepere tootmise iseärasusi.

Lihtsaim viis tootmisviisi määramiseks on näiteks toodete müügimaatriks, kus on võrreldud tooteid ja müügisagedust.

Kriteeriumiteks tootmisraku projekteerimisel on kadude vähendamine, sh tootmisvarude kokkukohid ja tsükliaja, sh transpordiaja lühendamine.

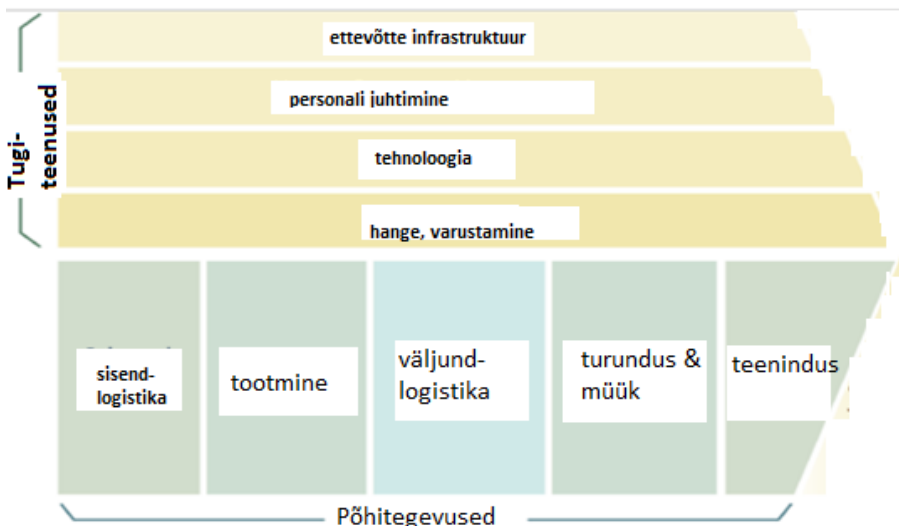
9.4. Väärtusahela (väärtusvoo) kaardistamine tootmises

Väärtusahela kaart on kommunikatsiooni-, äriplaani- ja juhtimistöööriist, kui tootmises tehakse muudatusi.

Tootmissüsteemi väärtusahela (*value chain*) mõiste võttis esimesena kasutusele M. Porter 1979. aastal [vt Wikipedia *value chain*]. Väärtusahela mõiste on seotud ettevõtte kui tootmissüsteemi protsesside kirjeldamisega, mille eesmärk on hinnata tootmist kui süsteemi. See koosneb erinevatest alamsüsteemidest, mis on seotud protsessidega, mis teisendavad tootmise sisendid väljundiks. Tootmisprotsess on määratud tootmisressursside (sh seadmete, hoonete), materjalide, tööjõu, rahaliste vahendite jm kasutamisega. Tootmise edukus on määratud tootmise planeerimise ja juhtimise tasemega (sele 9.7). Väärtusahel kirjeldab, kuidas on tootmisprotsessiga loodav valmistoodangu väärtus seotud tootmise kuludega ja loodava kasumiga. Väärtusahela kirjeldamisel käsitletakse peamiselt kahte eesmärki:

- 1) turul oma toodetele hinnaeeliste saavutamise, et vähendada kulutusi tootmises ja seoses sellega luua võimalus müüa tooteid odavamalt;
- 2) toodete konkurentsivõime suurendamine turul, arvestades konkurentidest enam klientide soovide.

Toodete müügihinna vähendamiseks on soovitatav kirjeldada nii põhitootmise kui ka tootmist teenindavate tegevustega (abitootmisega) seotud kulutusi ja leida võimalused nende vähendamiseks. Toodete konkurentsivõime suurendamiseks tuleb määrata tegurid, mis määravad kliendile toote väärtuse, võrrelda olukorda teiste konkurentidega turul ning kavandada ja realiseerida tegevused toodete väärtuse suurendamiseks klientidele.



Sele 9.7 M. Porteri väärtusahela mudel

Mõiste väärtusvoog võtsid 1980. aastal kasutusele Toyota insenerid Taiichi Ohno ja Shigeo Shingo.

Väärtusvoog ja selle kaardistamine on kulusäästliku tootmise tööriistad, väärtusvookaart koostatakse tootmise kirjeldamiseks ettevõttes või selle osakonnas. Sealjuures kirjeldatakse nii olemasolevat olukorda kui ka kavandatavaid arendusi tootmise parendamiseks tulevikus (nn tuleviku kaart).

Algselt kasutati väärtusvoo tööriista peamiselt tootmise materjalide ja informatsiooni liikumise kirjeldamiseks töötleva tööstuse ettevõtetes. Uuemad arendused kirjeldavad väärtusvoogu ettevõtete koostöövõrgus (tarneahelas). Tööriista kasutatakse samuti teenindussüsteemide (näiteks tervishoiusüsteem) toimimise kirjeldamiseks.

Väärtusvoo kaardistamise meetodika oli esialgu mõeldud väärtust mitteloovate kadude vähendamiseks tootmises. Käesoleval ajal on meetod rakendatav mistahes tootmise parendamise tegevuste kavandamiseks ja realiseerimiseks ning on kasutatav erineva mastaabiga väärtusahela (tarneahel, ettevõtte, osakond, tootmisliin jms) kirjeldamiseks ja analüüsiks ning võimaldab detailselt kirjeldada tootmissüsteemi.

Kirjanduses kasutatakse sageli mõistet väärtusahel üldises mõistes ja selle all mõistetakse sageli nii väärtusahelat kui ka väärtusvoogu.

Järgnevalt vaatleme peamiselt väärtusvoo kaardistamist töötleva tööstuse ettevõttes.

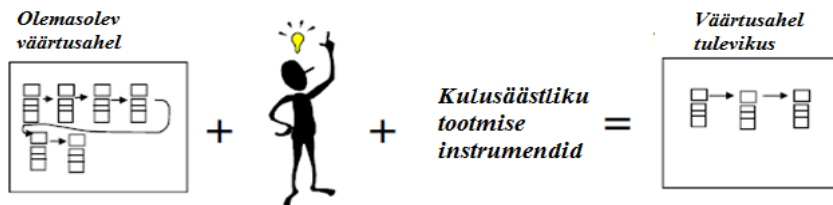
Väärtusvoo kaardistamine on meetod materjalide ja info liikumise visualiseerimiseks. Kaart võimaldab komplekselt hinnata kõiki tootmisprotsessi samme (operatsioone), aga samuti toormaterjalide, pooltoodete ja valmistoodete asukohtasid ja seoseid tarnijate ning klientidega.

Tootmises loodavat väärtust hinnatakse lähtuvalt kliendi ootustest. Tootmisprotsessi kaardistamiseks tuleks näiteks hinnata:

- tsükli- ja tarneajad;
- WIP (*work in process*) – samal ajal tootmises olevate toodete arv;
- materjali liikumine;
- informatsiooni liikumine;
- toote hind;
- toote kvaliteet;
- tarnekindlus;
- muutustele reageerimise kiirus jm näitajad.

Need kaardistatud näitajad annavad lähteinformatsiooni, mida muuta tulevikus (sele 9.8).

Väärtusvoo kaart peaks sisaldama olemasoleva väärtusvoo kaarti ja ka tulevikukaarti, mille eesmärk on määrata kindlaks ja hinnata tootmise parendamise strateegiad.



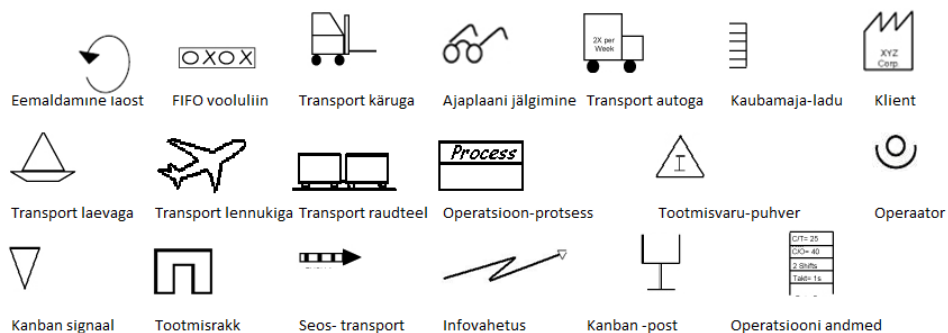
Sele 9.8 Tootmise väärtusahela kaardistamise eesmärk

Kaardistamise peamine eesmärk on arendada tootmist, identifitseerides ja elimineerides kaod protsessis, ja luua tuleviku tarvis uus tõhusam väärtusahel (väärtusvoog).

Väärtusvoo kaardistamine sisaldab järgmisi samme:

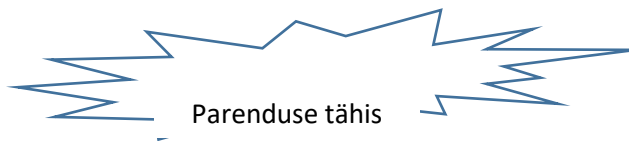
- kaardistamise planeerimine ja ettevalmistamine. Kaardistatava toote (tootepere) valik, tootmise arendamise eesmärkide püstitamine. Kaardistamise meeskonna moodustamine;
- olemasoleva väärtusahela kaardistamine;
- olemasoleva tootmisolukorra näitajate, sh kadude hindamine;
- väärtusvoo kaardi koostamine, arvestades tootmise arendamise eesmärgi (tulevikukaardi koostamine);
- tulevikukaardi realiseerimine.

Väärtusvoo kaardil kasutatavad tähised ei ole standarditud ja skeemidel võivad olla erinevad tähised. Põhilised kasutatavad tähised on toodud selel 9.9 a.



Sele 9.9 Väärtusvoo kaardil kasutatavate tähiste näited (a)

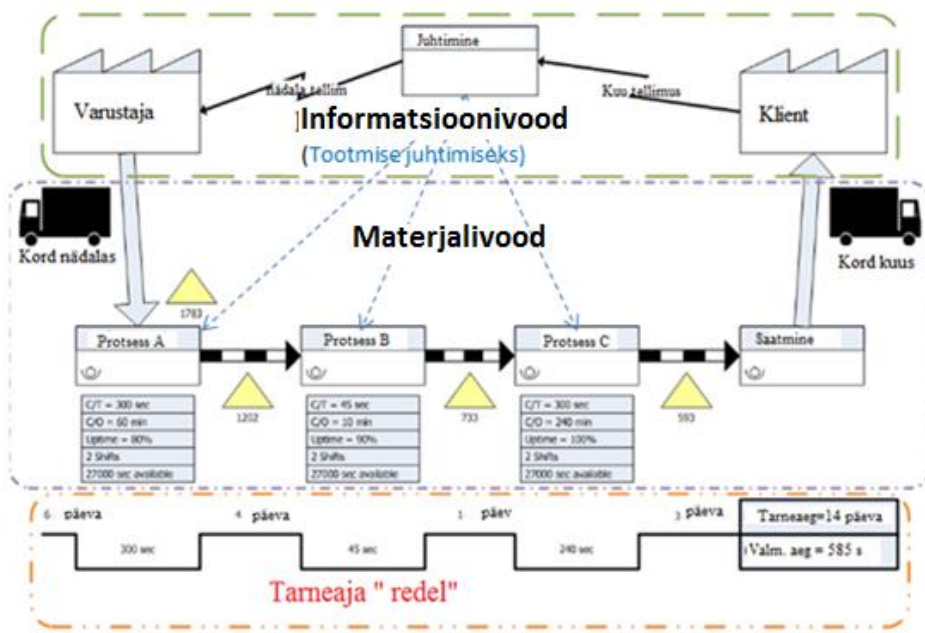
Plaanitavad parendused tähistatakse kaardil sümboliga (sele 9.9 b). Tulevikukaardi lisas põhjendatakse parenduse valikut, kirjeldatakse tema sisu ja evitamise ajakava.



Sele 9.9 Parenduse tähistamine tulevikukaardil (Kaizen-tegevus) (b)

Traditsiooniliselt koosneb väärtusvoo kaart kolmest tsoonist-skeemist (sele 9.10):

- 1) infovoo skeem;
- 2) materjalivoo skeem;
- 3) tarneaja redel.



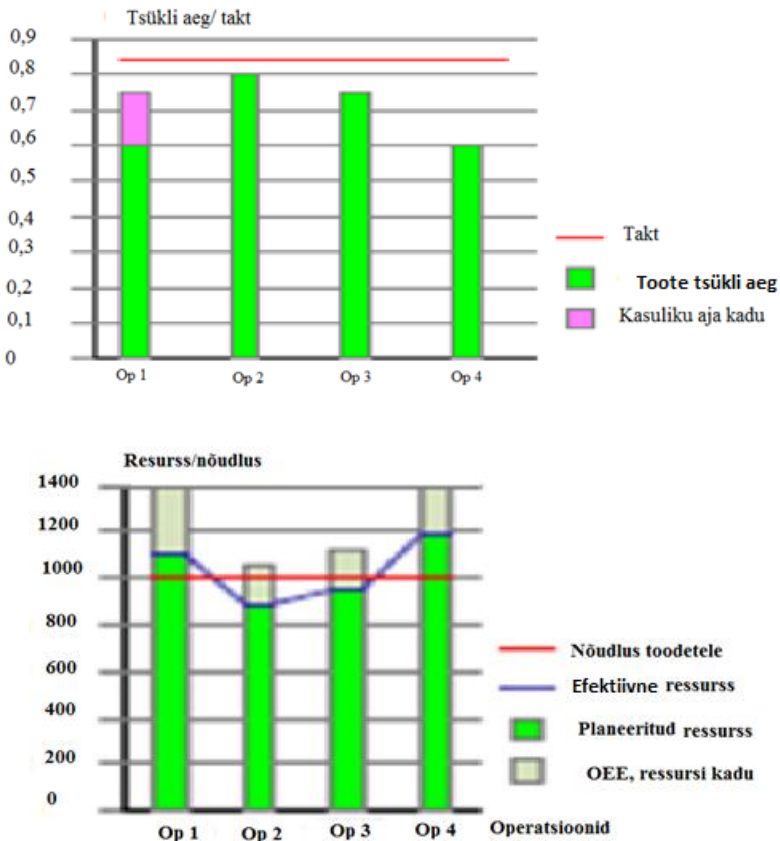
Sele 9.10 Tootmise väärtusvoo kaardi näide [Wikipedia *Value stream mapping*]

Materjalivoo skeem peab vastama tootmisprotsessile (detailiseerituna kas operatsioonideks või peamisteks protsessideks). Kuna kaart võib kirjeldada näiteks tootepere tootmist, siis on võimalikud tootmisprotsessi iseloomustava materjalivoo hargnemised.

Tüüpiliselt kogutakse ja esitatakse (sõltuvalt lahendatava probleemi iseloomust) väärtusvoo kaardil iga protsessi (operatsiooni) kohta järgmised andmed:

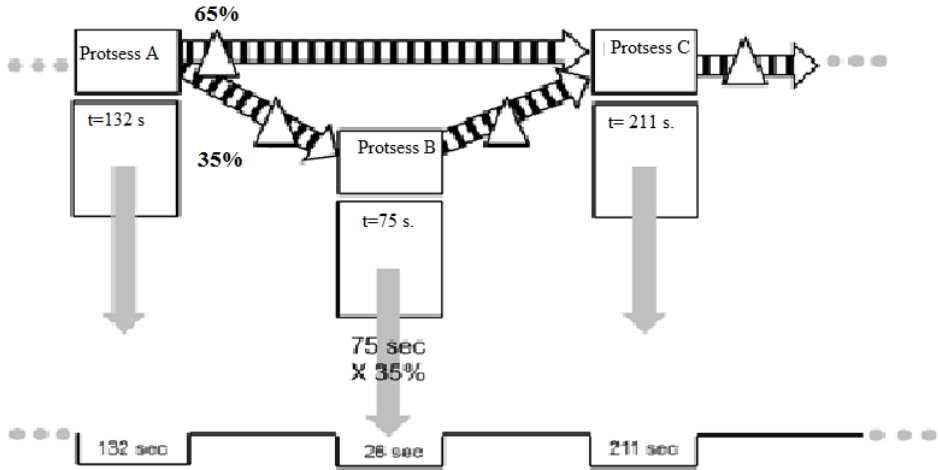
- 1) C/T tsükli aeg (*cycle time*);
- 2) C/O seadistusaeg (*changeover time*);
- 3) kasulik tööaeg (*uptime*) – %-des koguajast;
- 4) tootmispartii suurus (*production batch sizes*) – tootmispartii suurust võidakse esitada kas toodete arvuna või partii töötlemise ajana;
- 5) operaatorite arv (*number of operators*);
- 6) toote variantide arv (*number of product variations*);
- 7) tarne- ja varustuspartii suurus (*pack size – the number of items in a shipment*);
- 8) töö ajafond (*working time (minus breaks)*);
- 9) üldine seadmete tõhusa kasutamise hinnang;
- 10) planeeritud vaheladude mahud.

Täiendava informatsioonina võidakse nii olemasoleva kui ka tuleviku olukorra iseloomustamiseks kasutada erinevaid graafikuid (näide sele 9.11 a ja b), määrates näiteks tootmise pudelikaelad (vt piirangute teooria).

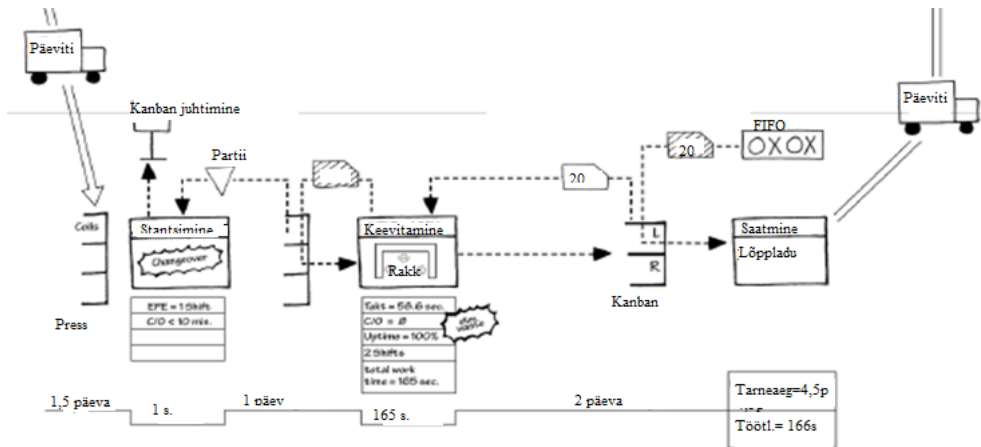


Sele 9.11 a) ja b) Täiendav informatsioon operatsioonide iseloomustamiseks

Tulevikukaardi koostamisel määratakse kasutamiseks otstarbekad kulusäästliku tootmise arendamise tööriistad ja hinnatakse nende kasutamisest tulenevaid tagajärgi (sele 9.12). Sealjuures on peamiseks probleemiks otstarbeka materjalivoo kavandamine, et tagada suurimat lisandväärtust. Seledel 9.13 ja 9.14 on toodud tulevikukaardi erinevad materjalivooegade fragmendid.

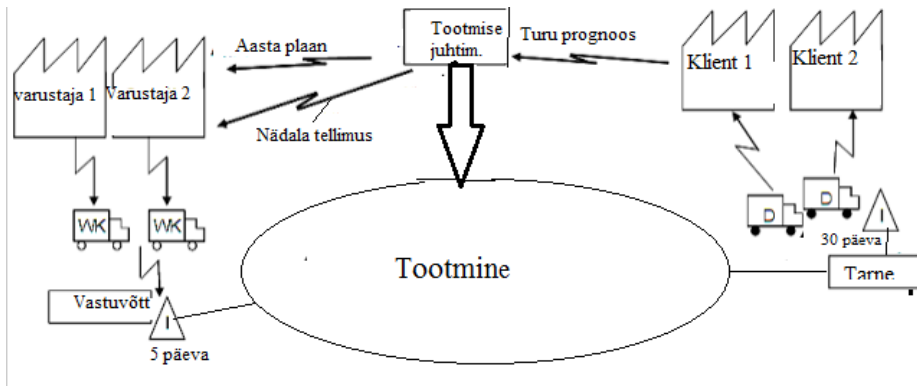


Sele 9.12 Hargnemisega materjalivoo näide koos tarneaja redeliga. Selel protsess B kujutab alternatiivset protsessi, mis toimub tõenäosusega 35%

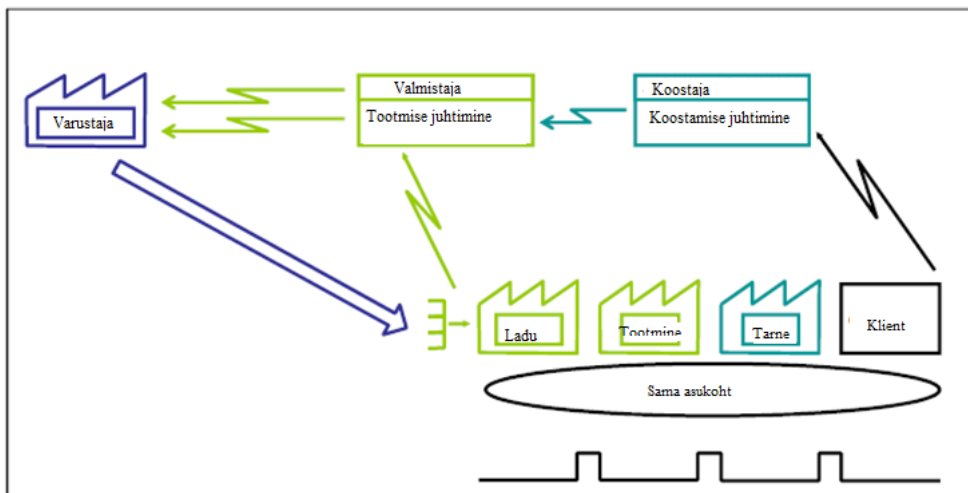


Sele 9.13 Materjalivoo skeem tulevikus. Lihtsustatud kanban juhtimisega materjalivoo skeem

Tootmisprotsessi planeerimisel tuleks arvestada, et varustab mitu tarnijat ja tarnitakse mitmele kliendile (sele 9.14), aga samuti võimalusega lahutada erinevate kaartidega varustamine, tootmine ja tarne (lihtsustatud näide sele 9.15) [9.6].



Sele 9.14 Kaardi fragmendi näide varustamisest ja tarnest mitmele kliendile



Sele 9.15 Kaardi näide, kus varustamine, tootmine ja tarne on lahutatud

9.5 Töövahendite seadistusaegade lühendamine. SMED (*single-minute exchange of die*)

Töövahendite seadistusaegade lühendamise eesmärk on vähendada tootmise ümberseadistamise kulutusi (aega) töövahendite vahetamisel. SMED eeldab, et seadistusaegad on lühemad kui 10 minutit (s.t saab esitada ühe numbriga, sellest ka termin *single-minute*). Kuna

majanduslikult otstarbekas partii suurus on proportsionaalselt seotud seadistusaja ruutjuurega, siis on seadistusaegade lühendamine otseselt seotud ka otstarbeka partii suurusega ja sellega seotult ka tootmise paindlikkuse tõstmisega ning ladustamise kulutuste vähendamisega.

Arvestades, et lehtmaterjalide töötlemisel on töömahukaim stantside vahetamine, on terminis SMED rõhutatud just stantside vahetamist. Lähenemine on rakendatav aga kõikide töövahendite, sh kogu tootmisliini (tootmissüsteemi) seadistamiseks.

SMED-i autor S. Shingo soovitas kasutada SMED-lähenemise evitamiseks järgmist kaheksat tegevust:

- 1) tootmisprotsessisisese ja protsessivälise seadistuse eristamine (protsessiväline seadistus toimub protsessi katkestamata, protsessisisesel seadistusel peab protsessi peatama ja see on seotud ajakaoga);
- 2) protsessisisese seadistuse asendamine protsessivälisega;
- 3) paigaldus- ja seadistusprotsessi elementide standardimine;
- 4) kinnituste arvu vähendamine, sh kiiresti vahetatavate kinnitusmehhanismide kasutamine;
- 5) pingivälise rakiste kasutamine;
- 6) paralleelsete operatsioonide kasutamine;
- 7) tööriistade mõõtu seadistamise aja lühendamine;
- 8) toodete (detailide, töövahendite) paigalduse mehhaniseerimine.

Lisaks SMED-ile on seadistusaegade lühendamiseks soovitatud kasutada:

- tootmistehnoloogiad, mis sisaldavad vähem seadistusi;
- grupitehnoloogia meetodeid;
- toodete standardimist ja moodulite kasutamist;
- töö (seadistuse) lihtsustamist;
- protsessi automatiseerimist.

9.6 Erinevate toodete tootmisele orienteeritud tootmissüsteemi kasutamine (*mixed model production*)

Meetodi ideed on lähedased grupitehnoloogia ideedele. Esiialgu (Toyota, 1960. aastad) oli meetodika kavandatud muutuva nomenklatuuriga koostamisliinide projekteerimiseks eesmärgiga tagada liinide sujuvam töö ja vähendada seisakuid toodete vahetamiseks. Meetod soovib valida toodete koostamisjärjekord nii, et tagada sujuvam koostamisprotsess ja vähendada töökohtade ümberseadistamise vajadusi. Sellega paraneb võimalus kasutada kanban juhtimist, vähendada tootmisvaru ja töökohtade ümberseadistamisvajadust.

Tänapäeval kasutatakse meetodit ka teiste tootmissüsteemide juures.

Koostamise projekteerimise üheks eesmärgiks nimetatud meetodi korral on:

- koostamisoperatsioonide paindlikkuse tagamine, et võimaldada nõudluse varieeruvust;
- koostamist varustavate töötlemisüksuste otstarbekas töökorraldus (otstarbekate partii suuruste kasutamine) ja
- tootepere lihtsalt ümberseadistatava koostamisprotsessi projekteerimine (kiirelt ümberseadistatavad rakised, laiema profiiliga töölisel, lühemad tootmisliinid mahukamate operatsioonidega jm) koos vastavate vaheladudega (puhvrtega) nii toodetele kui ka töövahenditele.

Meetodi alternatiiviks on koostamisliinide moodulite kasutamine (koostamisrakud), mis sageli annab ka paremaid tulemusi. Meetodi arendused on sihtsuunitlusega moodulite kasutamine ja integreeritud töötlemis-koostamismoodulite kasutamine.

9.7 Töökohtade töötlemisaegade ühtlustamine (*work balancing*)

Töötlemisaegade ühtlustamine (sünkroniseeritus) tootmissüsteemi töökohtadel on üks olulisemaid faktoreid, mis mõjutab süsteemi tõhusust.

Tsükliagade ebaühtlus tootmissüsteemi erinevatel töökohtadel põhjustab:

- vajaduse täiendava tootmisvaru järele;
- töökohtade (seadmete) seisakuid;
- töötajate seisakuid;
- laharvarumusi meeskonnas;
- individuaalse motivatsiooni vähenemist.

Tsükliagade ühtlustamine eeldab tootmissüsteemi projekteerimisel vastavate eesmärkide püstitamist ja täitmist.

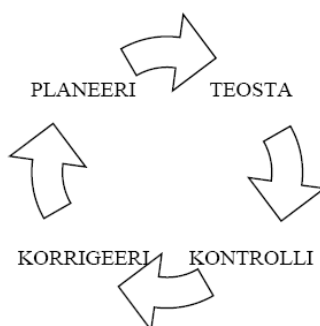
Tootmissüsteemid võivad olla keskmiselt ühtlustatud, kuid konkreetsete toodete partiide valmistamisel taoline ühtlustatus võib puududa (dünaamiline disbalanss). Dünaamilise disbalansi põhjuseid tuleks teada ja osata hinnata (võrreldes töötlemise/koostamise ajaplaane) Rakktootmise puhul on otstarbekas lahutada operaatorid töökohtadest. Seda on sageli raske realiseerida, kuid tuleks arvestada, et:

- töötajate vahetus töökohtadel võib parandada meeskonnatööd ja tõstab töötajate kvalifikatsiooni;
- operaatori hõivatus (tööaeg) töökohal võib erineda töökohale normeeritud tööajast;
- seadmete tööajafond (aastas) on suurem kui töötaja tööajafond (puhkuste, haiguspäevade jms arvelt);
- töökohtade (seadmete) tööajad ei ole täielikult ühtlustatud ja seetõttu esineb seadmete seisakuid (ooteaegu);
- inimesed on muutusteks paindlikumad kui seadmed ja inimeste töömahu ühtlustamine on lihtsam;

- operaatorite tööaja ühtlustamine on kriitilisem kui seadmete tööaja balansseerimine, kuna üldjuhul on kulutused operaatori tööajale suuremad seadmete tööaja kulutustest. Lisaks võib erinevate operaatorite tööaja ebaühtlus põhjustada rahulolematust.

9.8 Tootmise pidev parendamine. Kaizen

Kaizen (jaapani keeles parendamine) võeti kasutusele peale II maailmasõda Jaapanis. Oma sisult on Kaizen igapäevane tegevus ettevõtte olukorra (konkurentsivõime, tootlikkuse jm) parendamiseks ja on üks oluline kulusäästliku tootmise meetod. Eesmärk on kaasata kõik ettevõtte töötajad kaizen-tegevusse. Meetodi peamine sisu on pidevate paranduste tegemine (kaasa arvatud väikesed muudatused), tulemuste hindamine ja reguleerimine (sele 9.16).



Sele 9.16 Kaizen protsess

Kaizen protsess koosneb järgmistest sammudest:

- operatsioonide standardimine;
- standarditud operatsioonide hindamine (mõõtmine);
- hindamistulemuste võrdlemine soovituga;
- uuenduste kavandamine, et rahuldada nõudeid ja tõsta tootlikkust;
- uute parendatud operatsioonide standardimine;
- kogu eelneva tsükli kordamine.

Tootmise pideva parendamise protsess (**continual improvement process** või **continuous improvement process**, lühendatud CIP või CI) on pidevalt täidetav protsess tootmise parendamiseks või erinevate tootmise alternatiivide võrdlevaks hindamiseks. CIP põhineb toodete ja protsesside erinevate alternatiivide väljatöötamisel, nende efektiivsuse hindamisel ja parima variandi valikul tagamaks tootmisprotsessi efektiivsuse üldise paranemise ja suurema paindlikkuse. Kuigi tootmist iseloomustab suhteliselt lihtne ühtne eesmärk – toota kasumit, iseloomustab tootmist täiendavalt rida erinevaid osamõdikuid-kriteeriume, nagu tootlikkus, omahind, kulutused materjalidele ja ostutoodetele, personalile, käibe vahenditele, kvaliteet jm.

Kasutatav tootmise pideva parendamise mudel peab võimaldama hinnata töökohti, seadmeid, tootmisliine, tarneahelaid, ettevõtte jaoskondi jms.

Peamised raskused on põhiliselt seotud reaalsel tootmise olukorda iseloomustavate mudelite loomisega.

Tootmise pideva parendamise protsessi valiku kriteeriumitena kasutatakse seadme üldise efektiivsuse (OEE) ja seadme tegeliku tootlikkuse (*total effective equipment performance*, TEEP) mõõdikuid.

Seadme üldine efektiivsus OEE ja tegelik seadme tootlikkus TEEP on kaks omavahel seotud mõõdikute süsteemi, et hinnata seadmete kasutamise otstarbekust antud ajaperioodil.

Tegelik seadme tootlikkus (**TEEP**) hindab seadme kasutamise efektiivsust kalendriaajas, s.o seadme tööd 24 tundi päevas ja 365 päeva aastas.

Seadme üldine efektiivsus OEE hindab tegeliku olukorra vastavust projekteeritud tootmisprotsessile (tehnoalgiaale), sealjuures eeldatakse, et projekteeritud on parim võimalik protsessi variant, mis kasutab parimal võimalikul viisil ressursse

Järgnevalt toome OEE- ja TEEP-mõõdikute arvutamise lihtsustatud näited. Näited on kasutatavad ühe seadme (töökoha) või etteantud toote tarvis. Arvutused kogu toodete portfelliile ja ettevõttele on märksa keerukamad ja nõuavad edasist täpsustamist.

OEE (ja TEEP) hindavad seadme kasutust järgmiste osamõõdikutega (kriteeriumid):

- 1) seadme koormamine;
- 2) seadme töövalmidus;
- 3) seadme tootlikkus;
- 4) töö kvaliteet.

Mõõdikuid esitatakse ühises mõõtkavas, s.o suhtarvuna protsentides. Ideaalne olukord oleks OEE = 100%, mille saavutamine on aga tootmises ebareaalne. Tavaliselt püstitatakse eesmärgiks mingi madalam väärtus, näiteks OEE = 85%.

Olgu näitena kasutusel 8-tunnine seadme vahetus, s.o vahetuse pikkus on 28 800 sekundit, mille jooksul toodetakse 14 400 detaili, s.t ühele detailile kulub 2 sekundit.

Olgu reaalselt otstarbekas detaili valmistamise aeg 1,5 sekundit, siis kuluks 14 400 detaili valmistamiseks kokku 22 600 sekundit. Ülejäänud 7200 ehk 2 tundi on ajakadu. Seega võib lihtsustatult öelda, et summaarne OEE = 22 600/28 800 ehk 75%.

Seadme koormamine (*loading*)

TEEP- ja OEE-mõõdik **seadme koormamine** võrdleb seadme tööaega kalendriajaga:

koormamine = planeeritud aeg/kalendriaeg

Näide: töötlemiskeskus on planeeritud töötama 5 päeva nädalas 24 tundi päevas. Kalendriaeg on 7 päeva nädalas ja 24 tundi päevas, seega on mõõdik:

koormamine = (5 päeva x 24 tundi) / (7 päeva x 24 tundi) = 71,4%

Töövalmidus (*availability*)

Töövalmidus on OEE mõõdik, mis näitab, millise suhtelise osa moodustab tööaeg planeeritud ajast. Seadme töövalmiduse mõõdik iseloomustab seadme korrasoleku aega (*uptime*):

töö valmidus = seadme korrasoleku aeg / planeeritud aeg

Näide: pingi tööks on planeeritud 8 tundi (480 minutit), planeeritud on samuti 30 minutit vaheaega, seega on seadme tööks planeeritud 450 minutit, eeldame, et 60 minutit moodustavad ettenägematud tööseisakud. Seadme töövalmiduse mõõdik = $450 - 60 = 390$ minutit / 450 minutit = 86,6%

Tootlikkus (*performance, productivity*)

Tootlikkuse OEE mõõdik iseloomustab seadmes kasutatavate töörežiimide (tootlikkuse) suhet projekteeritud (ideaalsesse või optimaalsesse) tootlikkusse. Sageli nimetatakse seda mõõdikut ka tootlikkuse (töötlemise kiiruse) kaoks (**performance** või **speed losses**). Tootlikkuse mõõdikut on praktikas sageli raske hinnata ja sageli lisatakse sellele mõõdikule kõik määramata kaod.

Tootlikkus (performance, productivity) = (toodetud detailide arv x ideaalne (optimaalne) tsükli aeg) / tegelik tööaeg.

Näide: olgu seade planeeritud tööks 8 tundi (480 minutit), planeeritud vaheaeg on 30 minutit. Olgu ettenägematute seisakute kestus vahetuses 60 minutit.

Saame: tegelik seadme tööaeg = $480 - 30 - 60 = 390$ minutit.

Planeeritud seadme tootlikkus on 40 detaili tunnis ehk ühe detaili tootmiseks kulub $60/40 = 1,5$ minutit. Oletame, et seade valmistab 242 detaili vahetuses ehk detailide töötlemise aeg $242 \times 1,5 = 363$ minutit.

Saame tootlikkuse mõõdikuks: tootlikkus = $363/390 = 93\%$.

Kvaliteet

Kvaliteedimõõdik hindab kvaliteetsete detailide arvu suhet üldisesse detailide arvu:

kvaliteet = (üldine detailide arv – praagitud detailide arv) / (üldine detailide arv).

Näide: olgu töödeldavate detailide üldarv 242, millest 21 on praakdetailid.

Kvaliteedi mõõdikuks saame: kvaliteet = $(242 - 21) / 242 = 91,32\%$.

Arvestades osamõõdikute olemust, arvutatakse **OEE koguväärtus** valemiga:

$$OEE_{\Sigma} = (\text{seadme koormamine}) \times (\text{töö valmidus}) \times (\text{tootlikkus}) \times (\text{kvaliteet}).$$

Näide: $(\text{seadme koormamine} = 71,4\%) \times (\text{kasutatavus} = 86,6\%) \times (\text{tootlikkus} = 93\%) \times (\text{kvaliteet} = 91,3\%) = OEE_{\Sigma} = 52,5\%$.

Taoline koguväärtuse hindamismetoodika vastab geomeetrilise keskmise arvutusele (summa logaritmilises teljestikus), kus mõõdikute tähtsus on võetud võrdseks. Reaalses tootmis-

olukorras ei ole erinevate osamõõdikute tähtsus sama väärtusega. Sel juhul tuleb kehtestada osamõõdikute tähtsuse hindamiseks kaalud w_i .

Võimalikud on sealjuures teised, arvutusmahult lihtsamad variandid, nagu näiteks kriteeriumide summa kaalutud hinne (WSM). Tabeli 9.1 näide variantidele 1 ja 2 oleks järgmine:

$$p_{\Sigma}(1) = 0,1 \times 0,72 + 0,1 \times 0,9 + 0,5 \times 0,98 + 0,3 \times 0,995 = 0,9505$$

$$p_{\Sigma}(2) = 0,1 \times 0,75 + 0,1 \times 0,95 + 0,5 \times 0,95 + 0,3 \times 0,96 = 0,933.$$

Arvestades prioriteete, eelistab taoliselt kaalutud summa alternatiivi 1.

Tabel 9.1 Prioriteetide seadmine

OEE osamõõdik	Alternatiiv 1	Alternatiiv2	Prioriteetid
Seadme koormamine	72%	75%	0,1
Töö valmidus	90,0%	95,0%	0,1
Tootlikkus	98,0%	95,0%	0,5
Kvaliteet	99,5%	96,0%	0,3
OEE Σ	63,1%	64,9%	

Iga tootmine on erinev ja kahes ettevõttes ei ole reeglina võimalik tootmise olukorra hindamiseks ja arendamiseks kasutada samu meetodeid, mõõdikuid ja tööriistu ühtemoodi.

Konkreetses tootmissüsteemi hindamiseks tuleb valida või määrata sobiv mõõdikute hulk ja tagada nende hindamine etteantud perioodi jooksul. Ühes regioonis on erinevate ettevõtete võrdleva hindamisel otstarbekas kasutada sama mõõdikute süsteemi.

9.9 Vigade vältimine (*Poka-Yoke, error proofing*)

Poka-Yoke aitab töökohal võimalikke vigu vältida. Peamine eesmärk on vähendada toote defekte ja praaktoodangut operaatori vale tegutsemise tulemusena. Meetod on tihedalt seotud kõikehõlmava kvaliteedi juhtimisega.

Poka-Yoke rakendusmeetodid soovitavad eksimuste riski vähendamiseks järgmist kolme sammu:

- 1) määra eksimuste vigade kõrvaldamise vajadus;
- 2) täpsusta võimalikud eksimused;
- 3) kõrvalda eksimuste tekkimise võimalused.

Sealjuures on oluline töötada välja tehnilised lahendused, mis kõrvaldaksid võimalikud vead ja teavitaks kohe seadme operaatorit.

Lihne rakendusnäide Poka-Yoke rakendusest on toodud seel 9.17.



Sele 9.17 Poka-Yoke rakendusnäide, Etherneti kaablit saab ühendada ainult õigesti

Rakendusnäiteks on erineva läbimõõduga tankimispüstolite kasutamine tanklates, et takistada vale kütuse tankimist; pangaautomaadid, mis annavad raha välja alles peale kaardi eemaldamist, et takistada kaardi unustamist automaati; atsetüleeniballoonid, kus kasutatakse erinevat keeret, et takistada vale ballooni kasutamist; positsioonianidurid, mis lubavad pressi tööle alles peale tooriku korrektset paigaldust; press tuleb käivitada mõlema käega, et vältida vigastusi jms.

Eksimuste võimalikud näited tootmisprotsessis on:

- 1) tehnoloogilise protsessi vead, kasutatakse valesid tehnoloogiaid või jäetakse mõni operatsioon vahele;
- 2) seadistusvead;
- 3) koostamisel puudub detail või komponent;
- 4) koostamisel kasutatakse vale komponenti;
- 5) operaatori tegutsemise vead;
- 6) mõõtmisvead jms.

Poka-Yoke lähenemise kokkuvõtte kõlab: **ära süüdistada operaatorit, vaid väldi eksimuste tekitamise võimalusi.**

9.10 Seadmete hoolduse korraldamine (total productive maintenance)

Seadmete hooldus on tootmisprotsessi oluline osa. Seadmete operaatorid on ette valmistatud, et neid hooldada, sh avastada ka seadme tõrkepõhjuseid jm rikkeid. Hästi dokumenteeritud ja autonoomne hooldus tagab tootmisseadme (töökoha) tõhusa töö, kuna seade on ühe

töölise (tööliste grupi) pideva hoole all. Eesmärgiks on vähendada oluliselt ootamatuid seadmete tõrkeid, rivist väljalangemisi jms. TPM püüab ennetavalt avastada ja vältida võimalikke seadme tõrkeid, vähendades sellega vajadust täiendavate tootmisvarude ja nendega seotud vaheladude järele.

Ennetava hoolduse puhul vastutab operaator rutiinse hoolduse tegemise eest.

Eristatakse tootmise kvaliteedi juhtimist ja seadmete hoolduse juhtimist (*total quality management*, TQM ja *total productive maintenance*, TPM).

Nagu nimetusest järeldub, kasutatakse TQM-meetodeid tootmise kvaliteedi juhtimiseks ja TPM-i seadmete korrasoleku tagamiseks. TPM aitab kaasa seadmete tõrgete kõrvaldamisele ja tagab seadme tõhusama töö. Seega toetavad mõlemad lähenemised parema kvaliteedi saamist, kuid kasutavad erinevaid teid.

Ennetav hooldus on lähenemisviis, kus *operaator vastutab rutiinse hoolduse teostamise eest*.

Ennetav hooldus hõlmab:

- mõõtmist;
 - inspekteerimist;
 - puhastamist;
 - reguleerimist, seadistust;;

detailide vahetamisnnetavat hooldust tehakse perioodiliselt.

9.11 Töökohta korrasoleku parandamine (5S workplace organization)

5S on kulusäästliku tootmise meetod organiseerimaks töökohta. 5S on fokuseeritud töökohta visuaalsele korrasolekule, organiseeritusele, puhtusele ja standardimisele. Kõike seda on tootmises vaja kõrge töökultuuri saavutamiseks ja distsipliiniks, et saavutada parimaid tulemusi ja tunda rahulolu heast töö tegemise võimalusest.

5S-i meetodi kasulikkus väljendub seostes:

- korras töökoht tagab kõrge tootlikkuse;
- korras töökoht tagab kõrge kvaliteedi;
- korras töökoht aitab vähendada kulusid;
- korras töökoht tagab tarnetäpsuse;
- korras töökoht on turvaline töötamiseks;
- korras töökoht on kõrge töömoraali alus;
- korras töökoht tagab klientide usalduse.

5S lähenemine põhineb 5 töökohta korrastamise sammu realiseerimisel. (termin 5S on tuletatud jaapanikeelsetest mõistetest: *seiri*, *seiton*, *seiso*, *seiketsu* ja *shitsuke*).

5S – 1. Sorteeri

- Kas sinu töökohal on mittevajalikke asju?
- Kas mõned tööriistad või materjalid on põrandale jäänud?
- Kas kõik tööriistad ja rakised on korralikult tuvastatud ja paigutatud?
- Jaota ja liigita kõik asjad kasutussageduse järgi!
- Tuvasta kõik masinate lekked:õli, vesi, õhk, jms!
- Puhasta põrandad!

5S – 2. Korrasta

- Määra ning märgista:
 - tootmisvarude praakmaterjal;
 - rakiste ja tööriistade praakmaterjal;
- kärude praakmaterjal.
- Oma koht kõige jaoks ja iga asi omal kohal:
 - tee kõik kergesti leitavaks;
 - märgista lauad, riivilid jne.

5S – 3. Puhasta

- Kõrvalda kõik prügi ja prahi tekkimise võimalused.
- Tee koristamine endale lihtsaks.
- Kontrolli koristades.
- Tee koristamine töö loomulikuks osaks.
- Puhasta kõik, kaasa arvatud tööriistad.
- Koosta koristamise juhendid:
 - kes, kuidas, mida, millal;
 - kontrollnimekirjad. Kuidas saame koristamist lihtsamaks muuta? Kas me saame kõrvaldada prügi/prahi tekkimise põhjused?
- Jälgi ja kontrolli masinate halvemaks muutumist.
 - Kas mõni masinaosa on liikunud?
 - Töölised võivad avastada ülekuumenemist, vibratsiooni, ebanormaalseid helisid jne.
 - Puhtal masinal on lihtsam viga avastada.

5S – 4. Loo reeglid ja rutiinid

- Veendu ja ole kindel, et eelmisi samme korratakse pidevalt!
- Reeglite loomisel
 - kaasa kõik grupi liikmed;
 - määra tulevikueesmärgid;
 - määra kindel aeg koristamiseks.

- Tunne uhkust oma töökoha üle.
- Hoia saavutatud taset.
- Korduv parendamine (paremaks muutmine).

5S – 5. Standardi ja kontrolli

- Hoolitse, et eelnevalt tehtud sammud saaksid tootmisprotsessi tavapäraseks osaks.
- Igaüks peaks püüdlema tehase hea väljanägemise poole.
- Igaüks peaks töötama varem kirjeldatud juhiste kohaselt.
- Enne töölt lahkumist tuleb veenduda, et töökoht vastaks 5S-i nõuetele.
- Kasuta kontrollnimekirju, et keskenduda 5S-i korrashoidmisele.

9.12 Probleemide lahendamine – 5 MIKSi (5 *whys to explore the cause-and-effect relationship*)

5 miksi on kulusäästliku kontseptsiooni osa ja probleemide lahendamise tehnika, mis aitab probleemi põhjused kiirelt välja selgitada. 5 miksi strateegia küsib: miks või mis põhjustas selle probleemi?

5 miksi kasulikkus:

- aitab kiiresti identifitseerida probleemi põhjuse;
- determineerib erinevate probleemide põhjused;
- seda tehnikat on lihtne õppida ja ei vaja statistilist analüüsi.

Millal on kõige targem seda meetodit kasutada?

- kui probleemi on segatud inimfaktor;
- eri tüüpi äriprobleemide juures, kus lahendada tuleb erinevaid tootmisega seotud küsimusi.

Küsites pidevalt *miks?* (viis korda on hea reegel), on võimalik ära hoida sümptomid, mis peidavad endas tegelikku põhjust. Väga tihti võib esimene põhjus juhtida teise küsimuse juurde ja nii edasi.

Järgnevalt näide 5 miksi analüüsist. Näide põhineb ratta tootmisel.

- 1) Täpsusta kliendi rahulolematuse põhjused, näiteks: miks meie suurim klient on õnnetu? Sellepärast, et meie tarded on viimasel kuul hilinenud.
- 2) Identifitseeri tootmise väärtusahelas tegevused, mis põhjustavad klientide rahulolematust, näiteks: miks meie jalgrattad on hilinenud viimasel kuul? Sellepärast, et tootmine on ajakavast maas.
- 3) Identifitseeri tegevused, mis tagavad probleemi lahendamise ning tõhusama tootmise, näiteks: miks tootmine on olnud ajakavast maas? Sellepärast, et rattaid on puudu (punktid 3–5).

- 4) Miks meil on rattaid puudu? Sellepärast, et sissetuleva kauba kvaliteedi kontrollimisel selgus, et on suur kogus rattaid, mis ei ole ümmargused.
- 5) Miks on nii palju praaktooteid? Sellepärast, et ostuosakond vahetas tarnijat.

Taoline probleemide lahendamine vastab pideva parendamise eesmärkidele ettevõttes ja põhineb faktidel ja üldistel arusaamadatel, mis omakorda võimaldab probleeme tõhusalt kõrvaldada.

9.13 Meeskonnatöö korraldus, 8D (*team problem solving*, 8D)

Ford Motor Company **välja arendatud 8D** on kulusäästliku kontseptsiooni tööriist. 8D-mudelit tutvustati 1987 aastal nimetatuna TOPS (*team oriented problem solving*). See süsteem keskendub meeskonnatööle, toetades ja arendades seda esmajoonel spetsialistide, sealhulgas inseneride hulgas. 8D-süsteem töötab kõige efektiivsemalt korduvate probleemidega, keskendub probleemide avastamisele ning muudab juhtimissüsteeme, et probleeme uuesti ei tekiks.

Probleem on tegelikult lihtsalt sümptom, mis on põhjustatud juhtimise vigadest.

8D probleemide lahendamine baseerub vigade avastamisel ja nende ärahoidmisel tulevikus.

Süsteem seisneb parendustegevuste metodoloogias. Meetod kasutab probleemide leidmiseks ja nende põhjuste määramiseks statistilist analüüsi. 8D rakendab põhiliselt *PDCA* (**plan-do-check-act** või **plan-do-check-adjust**) tsükli loogikat.

Kaasaja arusaamad 8D (D-distsipliin) standard metodoloogiast on:

- 1) D – kasuta meeskonnatööd;
- 2) D – kirjelda probleemi;
- 3) D – koosta tegevused probleemi ohjamiseks;
- 4) D – määra kindlaks probleemi põhjus, hinda põhjuseid, miks probleemi pole seni lahendatud. Hindamiseks erinevate põhjuste mõju probleemi lahendamisel kasuta näiteks 5 miksi meetodika soovitusi;
- 5) D – koosta korrigeerivad tegevused, baseerudes näiteks tootmise planeerimise mudelitel, hinda kvantitatiivselt probleemide lahendamise tulemuslikkust;
- 6) D – juuruta probleemi ennetavad tegevused;
- 7) D – välista probleemi uuesti tekkimist. Muuda tootmise juhtimise süsteemi vältimaks sarnaste probleemide uuesti tekkimist;
- 8) D – õnnitle meeskonda, meeskond vajab organisatsiooni tunnustust.

Sellist lähenemist (ja ka põhjalikumalt) leiab paljudes tootmise pideva parendamise (kaizen, ptk 9.3.6) ja kvaliteedijuhtimise süsteemides. Laialdaselt on see süsteem kasutusel 6-sigma lähenemisel kvaliteedijuhtimisel.

9.14 Visuaalne kontroll (*visual control*)

Visuaalne kontroll on kulusäästliku kontseptsiooni printsiip.

Visualiseeritud tehases näeme igas töökohas ülesseatud märke, silte, värvikoode jm selleks, et igaüks, kes pole isegi tuttav protsessiga, saaks mõne minutiga aru, mis toimub, ja mõista protsessi ning näha, mis on tehtud korrektset ja mis on väljaspool kontrolli.

Tehases on märkmetahvlid kontrollinformatsiooniga. See peab aitama väärtusahelal efektiivselt funktsioneerida, aidates samas ka ohutult töötada. Sageli kasutatakse visualiseerimist koos 5S-i juurutamise ja muude parendustegevustega.

Visuaalne kontroll hõlmab:

- töökoha ohutust;
- tootmise läbilaset;
- materjali ahelat;
- kvaliteedinäitajaid;
- tagasisidet töö tulemustest;
- muud informatsiooni.

Visuaalse kontrolli kaart (tabel, graafik) võib olla käsitsi joonistatud või trükitud ning sellele kehtivad järgmised nõuded:

- kasutatakse tootmise iseloomustamiseks ja juhtimiseks;
- paigaldatakse töökoha lähedal hästi ligipääsetavasse ja märgatavasse kohta
- täiendatakse ja korrigeeritakse pidevalt kirjeldamiseks hetkeolukorda
- kujundus peab juhtima tähelepanu olulisematele probleemidele
- peab võimaldama hinnata kõrvalekallete põhjusi tegeliku ja soovitud olukorra vahel
- peab olema ka kõrvalistele isikutele hästi nähtav ja arusaadav.

Visuaalse kontrolli vahendid peavad looma eeldused tootmise parandamiseks ja toetama tootmise pideva parendamise protsessi.

9.15 20 võtme programm (*20 key program to workplace improvement*)

20 võtme programm arendati välja eesmärgiga tõsta ettevõtte konkurentsivõimet ja aidata ettevõtte juhtkonnal saavutada püstitatud eesmärgid (toota paremini, kiiremini ja odavamalt) kontsentreerudes tootmise olulisematele aspektidele. Meetod põhineb 20 praktilisel tegevusel, mis moodustavad sünergilise terviku. Meetodi rakendamine võimaldab hinnata kehtivat olukorda ettevõttes ja püstitada arendamise eesmärgid. Sealjuures on oluline, et arendusse kaastakse kogu ettevõtte personal, koordineerides tegevust eri tasanditel.

20 võtme meetodi evitamine võimaldab parendada toodangu kvaliteeti, vähendada kulutusi tootmisele, lühendada tarneaegu, parendada töökorraldust ja ohutust. Meetodi rakendamine on näidanud:

- personali oskuste paranemist;
- töömoraali paranemist;
- paremat kommunikatsiooni ja tootmise arendamise eesmärkide paremat mõistmist;
- olulist tootmiskulutuste vähendamist;
- tootlikkuse tõusu;
- praagi vähenemist;
- käibe vahendite vähenemist.

20 võtme programmi peamisteks eesmärkideks on:

- **kvaliteet** – toodangu kvaliteedi parandamine kvaliteedi juhtimise rakendamise tulemusena;
- **kiirus** – tarneaegade lühendamine kulusäästliku tootmise ja tootmisprotsesside arendamise tulemusena;
- **odavus** – omahinna vähendamine tootlikkuse kasvu ja kadude vähendamise tulemusena.

Prof Iwao Kobayashi mahuka teadustöö tulemusena töötati välja süsteem 20 võtmetegevusest (tegevusvaldkonnast) tootmise konkurentsivõime suurendamiseks.

Võti 1: korrastamine (puhastamine) ja töökoha organiseerimine. Igal töökohal ja kogu aeg.

Võti 2: süsteemi/juhtimise ratsionaliseerimine (*rationalizing the system / management of objectives*). Kõikide töötajate kaasamine süsteemi parendamisse.

Võti 3: meeskonnatöö parandamine (*improving team activities*).

Võti 4: tootmisvarude (laovarude) vähendamine, tarneaaja lühendamine (*reducing inventory, shortening lead time*).

Võti 5: tootmise kiire ümberkorralduse/seadistamise tehnikad võimaldamaks paindlikumat tootmist (*quick changeover technology*). Seadmete seadistusaegade lühendamise tulemusena suurendatakse seadmetevälise seadistuse osakaalu.

Võti 6: tootmisahela väärtusanalüüs ja tootmise pidev parandamine (*manufacturing value analysis; methods improvement*). Tootmise pideva parandamise muutmine eluviisiks.

Võti 7: tootmise pidev monitooring (*zero monitor manufacturing*). Parandamiseks seadmete kasutust, sh ka hooldust.

Võti 8: seotud tootmine (*coupled manufacturing*). Otstarbekalt seotud ja rakktootmisele orienteeritud tootmissüsteemi evitamine. Grupitehnoloogia rakendamine.

Võti 9: seadmete teenindus (*maintaining equipment*). Seadmeid hooldavad pingi operaatorid, mitte eraldi personal, mille tulemusena lühenevad seadmete mittetootlikud seisakud ja paraneb hooldus.

Võti 10: tööaja juhtimine (*time control and commitment*). Operatsioonide aegade kooskõlastamine kavandatud tootmise rütmiga, et vähendada ooteaegasid.

Võti 11: kvaliteedi kindlustamine (*quality assurance system*). Kvaliteedi juhtimissüsteemi evitamine.

Võti 12: tarnijate arendamine (*developing your supplies*). Koostöö arendamine tarnijate ja klientidega, kaasates neid toote- ja tootmise arendamisse.

Võti 13: kadude vähendamine (*eliminating waste*). Analüüsida pidevalt väärtuste loomist kliendile ja tõhustada seda, vähendada neid tegevusi, mis ei loo väärtust.

Võti 14: töötajate motiveerimine parenduste tegemiseks (*empowering workers to make improvements*). Töötajate pidev täienduskoolitus.

Võti 15: personali koolitamine (*skill versatility and cross-functional working*). Töötajate koolitamine tööks erinevatel töökohtadel.

Võti 16: tootmise operatiivne planeerimine (*production scheduling*). Tootmise ajaplaanide koostamine, mis tagavad ooteaegade lühenemise ja sujuva töö.

Võti 17: juhtimise efektiivsuse parendamine (*efficiency control*). Finantsjuhtimise kooskõlastamine teiste valdkondadega, et tagada tootmiskulude vähenemine.

Võti 18: uute tehnoloogiate ja infosüsteemide kasutamine (*using information systems*). Personali koolitamine uute tehnoloogiate otstarbekaks ja efektiivseks kasutamiseks.

Võti 19: energia ja materjalide kokkuhoid (*conserving energy and materials*).

Võti 20: tehnoloogia arendamine (*leading technology and site technology*). Samaaegse tootearenduse (*concurrent engineering*) meetodite evitamine ja toodete kasutustingimuste (sh robustsuse) parendamine.

Tegemist on tootmise arendamise tegevuste kasuliku loeteluga. Taoline loetelu ei saa aga haarata kõiki võimalikke tegevusi. Reaalses olukorras võib võtta toodud loetelu aluseks ja hinnata/analüüsida, mis tegevused on olulised ja annavad parema tulemuse.

Kordamisküsimused ja ülesanded

- 1) Kirjeldage, millised on varudeta tootmise (JIT) põhilised eelised ja probleemid. Millised on insener-tehnilised probleemid JIT-tootmise evitamise juures?
- 2) Millistes tootmisettevõtetes on JIT-l suuremad eelistused?
- 3) Kirjeldage, kuidas näeks kanban (ja CONWIP) juhtimismeetod välja teenindavas ettevõttes.
- 4) Kirjeldage, millised on enamlevinud kadude tekkimise põhjused tootmises.
- 5) Nimetage kulusäästlikku tootmist tagavad lähenemised ja tööriistad.
- 6) Kirjeldage, kuidas tagada töövahendite seadistusaegade lühendamine teie tööstusharu ettevõttes.
- 7) Kirjeldage tootmise pideva parandamise (kaizen) lähenemist. Millised on meetodi peamised eelised ja puudused?
- 8) Kirjeldage, kuidas võiks ülikoolis evitada 5S-i kui kulusäästliku tootmise meetodit organiseerimaks töökohta/laborit.
- 9) Kuidas teie käituksite tootmisjuhina, kui olete eesmärgiks võtnud suurendada tootmise efektiivsust ja parandada seadmete kasutust?

Viited

- [9.1] Uuenduslik tootmine. TTÜ Kirjastus 2011, 446 lk.
- [9.2] Hopp, W. J., Spearman, M. L. Factory Physics. Foundation of Manufacturing Management. Boston (Mass.): Irwin McGraw-Hill, 2008.
- [9.3] Asking, G., Standridge, C.R. (1993) Modelling and Analysis of Manufacturing Systems, John Wiley.
- [9.4] Küttner, R. Nüüdistootmise õpetus. Tallinna Tehnikaülikool. TTÜ Kirjastus, 2016, 220 lk.
- [9.5] Jones, D. T., Roos, D. ja Womack, J. P. Masin, mis muutis maailma. Timmitud tootmise lugu – Toyota salarelv globaalsetes autosõdades, mis on ümber kujundanud maailma tööstuse. Külim 2010.
- [9.6] Value Stream Mapping [WWW] http://courses.washington.edu/ie337/Value_Stream_Mapping.pdf (15.10.2015)

10. KVALITEEDIJUHTIMINE

Selles peatükis antakse ülevaade kvaliteedi mõistest, kvaliteedijuhtimise olemusest ja kasust ettevõttele ning kirjeldatakse peamisi meetodikaid ja tööriistu organisatsiooni tasandil kvaliteedijuhtimissüsteemi rakendamiseks. Antakse ülevaade kvaliteedijuhtimissüsteemi standarditest ning ISO 9001 kvaliteedijuhtimissüsteemi standardil põhineva juhtimissüsteemi integreerimise võimalustest ISO 14001 standardil põhineva keskkonnajuhtimissüsteemiga ja OHSAS 18001 standardil põhineva töötervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteemiga. Põgus ülevaade on antud ka eelkirjeldatud standardite olemusest ning käsitletud tervikliku kvaliteedijuhtimise ideoloogiat, 6 sigma põhimõtteid ja juhtimiskvaliteedi hindamise meetodikat. Mõningaid kvaliteedi ja ettevõtte tulemuslikkuse parendamise tehnikaid, nagu näiteks kanban, kulusäästlik tootmine (*lean manufacturing*), *kaizen*'i meeskonnad ehk kvaliteediringid, PDCA-tsükkel, *poka-yoke*, vigade vältimine, töökohta korrasoleku parandamise meetod 5S, probleemide lahendamise meetod 5 miksi, meeskonnatöö meetod 8D, visuaalne kontroll ja 20 võtit on kirjeldatud 9. peatükis.

10.1 Kvaliteedi mõiste ja roll tänapäeva ettevõttes

Aegade vältel on käibel olnud erinevaid kvaliteedi määratlusi. Neist kõige enam levinud on alljärgnevad:

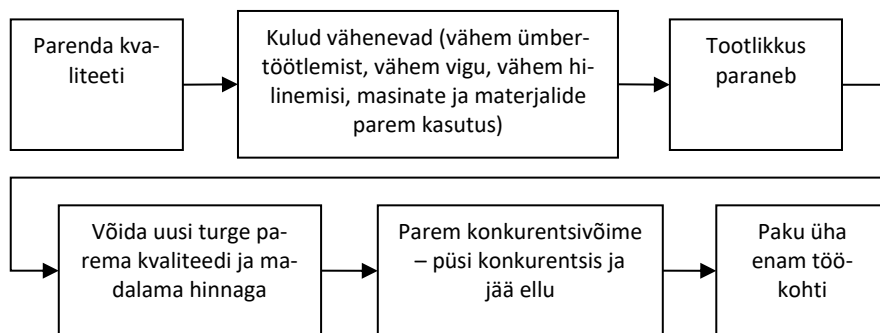
- eesmärgile vastavus, kasutuskõlblikkus (J. Juran);
- toote või teenuse karakteristikute hulk, mis võimaldab täita kindlaksmääratud või oodatavad vajadused (BS 4778:1987, ISO 8402:1986 Kvaliteediterminid);
- kvaliteet peab olema suunatud kliendi olemasolevatele ja tulevikuvajadustele (W. Deming);
- nõuetele vastavus (P. B. Crosby);
- määr, milleni objekti (nt toote, teenuse, protsessi) olemuslike karakteristikute kogum täidab nõudeid (ISO 9000:2015);
 - nõue – kindlaksmääratud, üldiselt eeldatav või kohustuslik vajadus või ootus (üldiselt eeldatav tähendab, et vajadus või ootus tuleneb organisatsiooni ja tema huvipoolte tavast või üldisest praktikast);
 - karakteristik – eristav tunnus.

Tänapäeval määratletakse kvaliteeti enamasti kliendi või laiemas mõistes huvipoolte nõuete põhjal – kvaliteet on vastavus kliendi/huvipoolte nõuetele, kusjuures huvipoolteks võivad olla nii kliendid kui ka ettevõtte omanikud, töötajad, tarnijad, investoriid jms. Kvaliteet tähendab organisatsiooni toimimapanekut huvipoolte jaoks alates toodete, teenuste, süsteemide ja protsesside parendamisest kuni selleni, et kogu organisatsioon toimiks tõhusalt. Kvaliteedijuhtimine tähendab pidevalt täiuslikkuse poole püüdlemist. See, mida kvaliteet tähendab konkreetse organisatsiooni jaoks, sõltub huvipooltest. Nendeks on aga kõik, kes on mingil

moel huvitatud organisatsiooni edust,. Seega tähendab kvaliteedi saavutamine organisatsioonis mõistmist, kes on tema huvipooled, mis on nende vajadused ning nende vajaduste täitmist või veel parem, ületamist nii täna kui ka tulevikus [10.1].

Kvaliteedijuhtimise guru W. E. Deming on sõnastanud kvaliteedijuhtimise tähtsuse organisatsiooni konkurentsivõime kaudu. **Kvaliteeti** parendades on võimalik suurendada **tootlikkust**, mis parandab organisatsiooni **konkurentsivõimet**. Demingi arvates tähendab madal kvaliteet suuri kulusid, mis toob kaasa konkurentsivõime langemise. Kvaliteedinõuetele vastavate toodete tootmisega kaob vajadus ebavajaliku tööjõu – ümbertegijate või parandajate – järele, samuti kaovad defektse toodangu utiliseerimiskulud ning seeläbi on kvaliteedinõuetele vastavate toodete tootmine seotud väiksemate kuludega. Organisatsiooni tööprotsesside kvaliteedi parendus toob kaasa varieeruvuse ja juhuslikkuse vähenemise, väiksema ümbertegemise ja inimjõu vajaduse, kulub vähem materiaalseid ressursse ja vigade arv väheneb. Tulemus saavutatakse väiksemate jõupingutustega. Paranenud kvaliteet mõjutab ettevõtte edukust mitmeti (vt sele 10.1):

- parem turupositsioon;
- lühem tarneaeg;
- väiksemad kulud seoses praagi ja ümbertöötlemisega;
- suurem tootlikkus.



Sele 10.1. Kvaliteedi roll ettevõtte edukuses

Kvaliteet aitab organisatsioonidel tänapäevase tiheda konkurentsi tingimustes ellu jääda ja olla edukas. Kvaliteet mõjutab ettevõtte konkurentsivõime saavutamist ka organisatsiooni maine kujundamise kaudu, olles organisatsiooni maine kujundamise põhikomponendiks. Hea kvaliteedijuhtimine aitab kaasa organisatsiooni maine tõusule, samuti aitab kaitsta riskide vastu, suurendada tõhusust ja tulemuslikkust. Seevastu halb ja ebatõhus juhtimine ning vastuseis muudatustele võib omada otseseid tagajärgi nii organisatsiooni edukusele kui ka üksikindiviididele, ühiskonnale jt. Üheks näiteks selles valdkonnas võib tuua aastate suurima skandaali automaailmas, kus aastal 2015 tuli avalikuks, et Volkswagen on kliente petnud heitgaaside näitudega, kasutades selleks spetsiaalset tarkvara. Leiti, et Volkswageni tarkvara

abil oli testide ajal diiselautode heitgaaside näit tegelikkusest kümneid kordi väiksem. USA keskkonnaamet algatas Volkswageni vastu juurduse ning ähvardas 18 miljardi dollarilise trahviga, millele järgnes autotootja aktsia langus. Müües aastaid autosid, mille tegelik heitkoguse piirmäär ei vastanud tõele, pettis Volkswagen tarbijaid. Skandaal mõjus negatiivselt ka *made in Germany* lausele ning sellel oli negatiivne mõju kogu autotööstuse mainele, viies langusse ka teiste autotootjate aktsiad [10.2].

Paraku kipub olema nii, et halb maine levib kiiremini kui hea ning seda on raske parandada, kuid see on siiski võimalik. Üks võimalusi mainet parandada ongi kvaliteedijuhtimise abil. Kliente ja nende rahulolu puudutava mõtteviisi edasiarenduseks on kliendi lojaalsus, mis on organisatsiooni edukuse tähtis tegur. Organisatsioonid saavutavad klientide rahulolu sellega, et täidavad järjekindlalt nende nõudeid ning saavutavad sellega klientide silmis hea maine.

Kvaliteedil on oma roll ka tootlikkuse tõstmisel. Varem arvati, et kvaliteeti saab parandada vaid tootlikkuse languse arvelt, tõhustades kontrolli. Uuem lähenemine on aga see, et kvaliteeti parendatakse protsessi ja väljatöötuse täiustamisega, samuti varieeruvuse vähendamisega. Kvaliteet ei tähenda ainult probleemide ennetamist, vaid see tähendab heade tulemuste saavutamist ja pidevalt võimaluste otsimist, et muutuda järjest paremaks. Tänapäeval on küsimus tihtipeale ellujäämises – tuleb olla võimeline stabiilselt täitma huvipoolte nõudeid ja pakkuma kõrget kvaliteeti.

Tänapäeval ei tähenda kvaliteet ainult toote või teenuse kvaliteeti. Igat toodet, teenust, protsessi, ülesannet, tegevust või otsust organisatsioonis võib hinnata kvaliteedi mõõdupuu järgi – kui hea see on, kas see on piisavalt hea, kuidas saaks seda muuta paremaks. [10.1]

10.2 Kvaliteedijuhtimine organisatsioonis

J. Oakland on öelnud, et kvaliteet ei teki iseenesest, seda tuleb juhtida. Selleks, et saavutada kvaliteeti organisatsioonis, peab esmajoones selle juhtkond olema kvaliteedile pühendunud. Edukas kvaliteedijuhtimine tugineb kolmel alusel: tõhus juhtimis- ja haldussüsteem, mis määratleb organisatsiooni eesmärgid ja tõlgendab need tegevusteks; töökindlad süsteemid tagamaks, et plaanitud kursist hoitakse kinni ja parendusele suunatud kultuur, et muutuda järjest paremaks. Haldus- ja juhtimissüsteemid väljenduvad tegevuses, poliitikas, protsessides ja plaanides ning selles, et need vastaksid huvipoolte vajadustele. Töökindlad süsteemid peavad tagama, et poliitika, protsessid ja plaanid on tõhusalt rakendatud ja et kõik väljundid vastaksid nõuetele. Parendusele suunatud kultuur ajendab otsima ja kasutama tõhusamaid ja mõjusamaid tööviise toetamaks äristrateegiat ning parendamaks mainet ja suurendamaks kasumlikkust. Eestvedamine on omakorda oluline parendusele suunatud kultuuri arendamiseks ja selle mõju maksimeerimiseks. [10.1]

Praktikas mõistetakse kvaliteedijuhtimise all tihtipeale ainult toodete kvaliteedi kontrollimist, eesmärgiga vähendada kliendini jõudvaid nõuetele mittevastavaid tooteid. Sedasi aga ei välistata nende toodete tekkimist. Tegelikult on kvaliteedijuhtimine seotud rohkem ennetata-

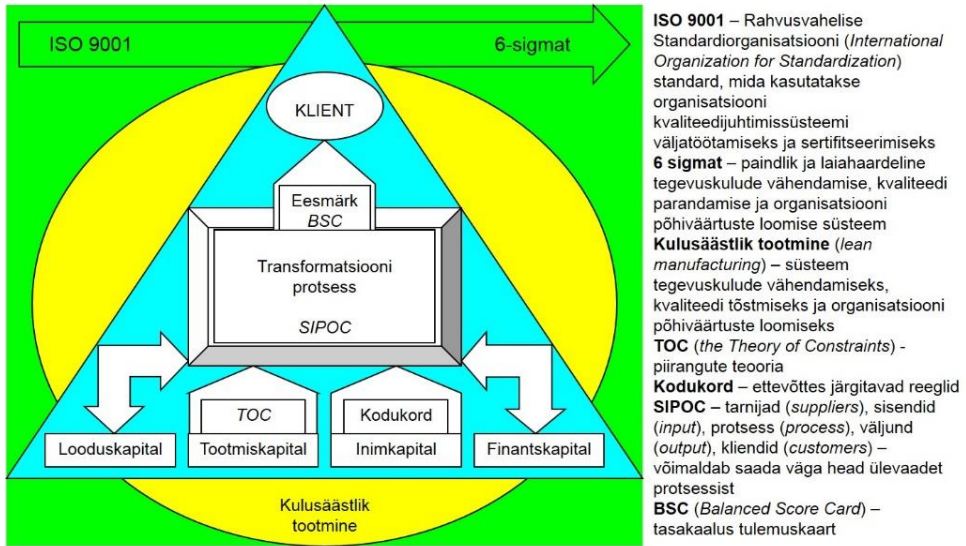
vate tegevuste ehk sellega, kuidas juhtida sisendit, et saada soovitud väljund. Kvaliteedijuhtimine on kõigi juhtimistasandite kohustus, mille eestvedaja on tippjuhtkond. Kvaliteedipoliitika osa selles on ühtse nägemuse kujundamine, millele peaks järgnema kõiki kvaliteeti mõjutavaid tegevusi hõlmava süsteemi ülesehitamine, selle pidev hindamine, ajakohastamine ja täiustamine. Kvaliteedijuhtimise näol on tegemist süsteemsete juhistega ettevõtte tulemuslikuks toimimiseks, et vältida võimalikke vigu ja juhtida ning maandada võimalikke riske.

Kvaliteedijuhtimissüsteem on see osa juhtimissüsteemist, mille abil organisatsioon suunab ja ohjab kvaliteediga seonduvaid äritegevusi. Organisatsiooni kvaliteedijuhtimise süsteem peab abistama organisatsiooni, et olla võimeline vastama huvipoolte nõuetele. Üldjoontes koosneb kvaliteedijuhtimissüsteem organisatsiooni struktuurist koos planeerimise, protsesside, ressursside ja dokumentidega, mida kasutatakse kvaliteedieesmärkide saavutamiseks, toodete ja teenuste parendamise ning klientide nõuete täitmise kindlustamiseks [10.3]. Kvaliteedijuhtimissüsteemi võib rakendada igasuguse tegevusala ja igasuguse suurusega ettevõtetes. Ettevõtte ise peab määrama kindlaks kvaliteedijuhtimissüsteemi rakendamise ulatuse.

Rahvusvahelistel standarditel nagu ISO 9001 (kvaliteedijuhtimine), ISO 14001 (keskkonnanjuhtimine) ja ISO 45001 (senine OHSAS 18001, töetervishoiu ja tööohutuse juhtimine) põhinevad juhtimissüsteemid aitavad organisatsioonidel kvaliteeti juhtida, luues ühelt poolt raamistikku, millest organisatsioonid saavad kvaliteedijuhtimissüsteemide ülesehitamisel ja rakendamisel juhendada, teisalt aga andes organisatsioonidele kindlustunde, et teatavad baas tingimused on täidetud. Tihti peale aetakse kvaliteedijuhtimissüsteemi standardid segi tootestandarditega. Nii tootestandardid, kvaliteedijuhtimise standardid kui ka muud kvaliteedi parendust toetavad meetodid ja juhtimissüsteemid (vt sele 10.2) aitavad organisatsioonil saavutada oma klientide rahulolu ning säilitada organisatsiooni konkurentsivõimet ega välista üksteist.

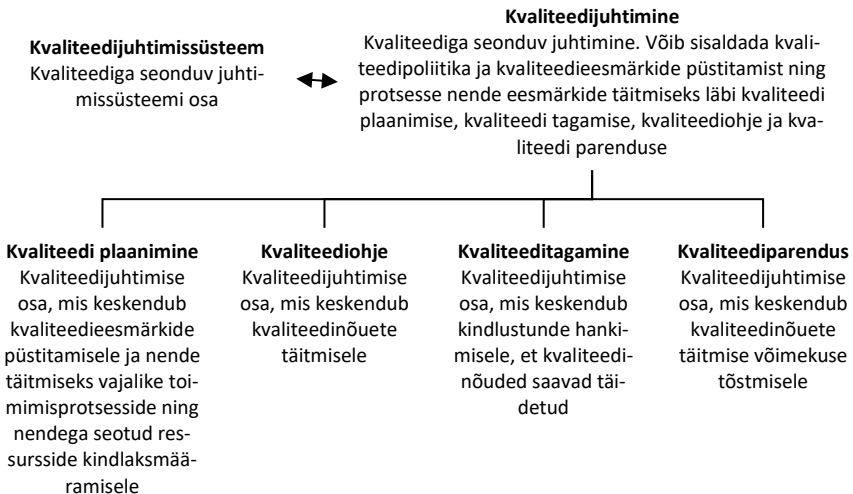
Peamised kvaliteedijuhtimisega seonduvad terminid, lähtuvalt ISO 9000 seeria standarditest [10.4, 10.5], on esitatud seel 10.3.

Kvaliteeditagamine (*quality assurance*) seisneb üldjoontes kvaliteediprobleemide ennetamises planeeritud ja süstemaatiliste tegevuste (sh dokumenteerimise) kaudu. Nende hulka kuulub ka kvaliteedijuhtimissüsteemi loomine ja selle vastavushindamine, süsteemi toimimise auditeerimine ja süsteemi ülevaatus. Kvaliteedile keskendumine peab ulatuma kaugemale tootmise funktsioonist. Kvaliteedi tagamine hõlmab kõiki tegevusi alates disainist, arendusest, tootmisest ja paigaldamisest kuni teenindamise ja dokumentideni.



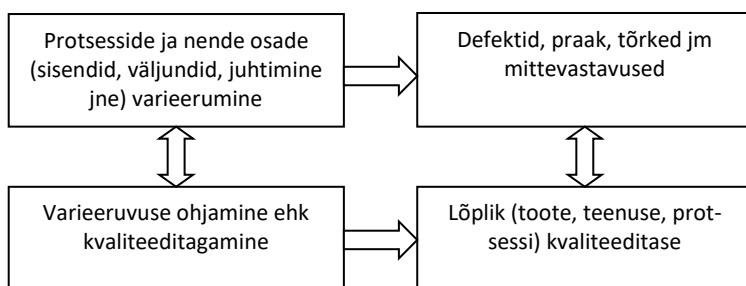
Sele 10.2. Juhtimissüsteemide kasutusmodel

Üks laialdasemalt tuntud kvaliteeditagamise vahendeid on pideva parendamise ehk PDCA-tsükkel (*plan-do-check-act*), mida tuntakse ka Demingi ratta või Demingi ringi nime all. PDCA-tsükli võib kasutada pidevate parenduste elluviimiseks. PDCA-tsükkel rõhutab ja näitab, et parendusprogrammid peavad algama hoolika planeerimisega, mille tagajärjeks peab olema tõhus tegutsemine, millest tuleb edasi liikuda jällegi hoolikasse plaanimisse pidevas tsükli (vt ka ptk 9).



Sele 10.3. Kvaliteedijuhtimise mõisted

Praagi seost kvaliteedi tagamisega kajastab sele 10.4. Defektid, praak, tõrked jm mittevastavused on igapäevased protsesside osad ning tulenevad kõigile protsessidele omasest varieeruvusest. Varieeruvad vähemal või suuremal määral kõik protsessi osad: sisendid, väljundid, ressursid, juhtimine jne. Lõplik kvaliteeditase sõltub sellest, kui hea on organisatsioon vastutöötava varieeruvuse ohjamises ehk kui hea on organisatsioon kvaliteedi tagamises. Kahjuks on organisatsioon, kus praagi ilmnemisel hakatakse otsima süüdlast ja ainukesena nähakse inimest. Tegelikult on praktiliselt kõikide vigade põhjuseks protsesside varieeruvus ehk hajuvus. Mida suurem on protsesside varieeruvus, seda rohkem on inimestel võimalusi eksida ja seda sagedamini nad seda teevad. Parim viis vigadega võidelda on protsesside suutlikkuse suurendamine, et viia miinimumini vea tekkimise võimalus. Protsessi suutlikkuse väljaselgitamine, oluliste mõjufaktorite uurimine ning kahjuliku mõju elimineerimine tagab stabiilsuse ja kõrge kvaliteedi.



Sele 10.4. Mittevastavuste seos kvaliteeditagamisega

Kvaliteediohje (*quality control*) põhiolemuseks on tegevused ja meetodid, mida rakendatakse toote, teenuse või protsessi kvaliteedi saavutamiseks ja hoidmiseks. Siia kuulub ka seire, kuid see on seotud ka kvaliteediprobleemide leidmise ja nende põhjuste kõrvaldamisega, et huvipoolte nõuded oleksid pidevalt täidetud. Kvaliteet peaks olema tootesse sisse kavandatud ja tagatud kogu toote valmistusprotsessi ja elukaare (sh hoolduse) jooksul. Kvaliteediohje alamsüsteemid tootmisettevõttes võivad olla järgmised.

- **Ostuohje:**

- õiged, kindlaksmääratud nõuetele vastavad materjalid usaldusväärsetelt tarnijatelt ning nende reeglitepärane ladustamine kvaliteedi kahjustamise vältimiseks;
- vajadusel varude lihtsad ülevaatused ja perioodilised juhuslikud kontrollimised;
- tarnijate pidev hindamine organisatsiooni poolt kehtestatud heakskiidukriteeriumide suhtes.

- **Protsessiohje:**

- arvestada kõiki olulisi toimimise lõike;
- ohje ulatus oleneb protsessi/operatsiooni iseloomust ja ulatusest;

- ennetada vigu selle asemel, et otsida lahendusi siis, kui mittevastavad tooted on juba toodetud.
- **Tootmisinformatsiooni ohje:**
 - juhised, töökäsud töötajatele (suulised, kirjalikud);
 - tootmisjoonised;
 - dokumentide muudatused ja muudatuste ohje. Vanade versioonide kasutuselt kõrvaldamine.
- **Tootmistöötajad:**
 - töötajate hoolikas valik, koolitamine, juhendamine ja motiveerimine;
 - töötajate nõutavate teadmiste taseme ja isikuomaduste kindlaksmääramine tulenevalt tööde iseloomust on töötajate valiku ja koolitamise oluline eeltingimus;
 - kvaliteediringid ja muul viisil töötajate juhtimisse kaasamine võivad olla kasulikud kvaliteedi parendamiseks ja -ohjeks.
- **Protsessi osade ja suutlikkuse (võimelisuse) kontroll:**
 - ohje protseduuride ja meetodikate kindlaksmääramine oluliste toodete, protsesside, töötajate või keskkonnanäitajate jaoks kriitilistes kohtades;
 - ennetavad ja konkreetse vajaduse korral tehtavad seadmete hooldused, samuti automaatsed ja mitteautomaatsed katsed ja kontrollid.
- **Lõpptoote kontroll:**
 - tõendamine, et toode vastab määratletud nõuetele;
 - lõppkontrolli tulemuste tagasiside.
- **Mõõtevahendite kontroll nende usaldusväärsuse tagamiseks.**
- **Korrigeerivad ja ennetavad tegevused.**

10.3 Juhtimissüsteemide standardid kvaliteedijuhtimise tööriistadena

Rahvusvaheline Standardiorganisatsioon (*International Organization for Standardization*, lühend ISO, www.iso.org) koosneb kõigi maailma regioonide rahvuslikest standardiorganisatsioonidest ja on tuntuim sõltumatu rahvusvaheline organisatsioon, mis tegeleb väga erinevates valdkondades standardite väljatöötamisega. Rahvusvahelise Standardiorganisatsiooni koostatud standardid kannavad tähist ISO. Kui rahvusvaheline standard on üle võetud Euroopa standardiks, tähistatakse seda eesliitega EN. Eesti standardit tähistatakse lühendiga EVS. Kui Eesti standardiks on üle võetud Euroopa standardina kasutuselevõetud rahvusvaheline standard, on selle tähiseks EVS-EN ISO (näiteks EVS-EN ISO 9001:2015). Standardi numbrile järgneb standardi versiooni aastaarv. Standardeid vaadatakse regulaarselt üle ja muudetakse vastavalt vajadusele.

Näiteid enamlevinud ISO standardiperekondadest [10.6]:

- ISO 9000 kvaliteedijuhtimine;
- ISO 14001 keskkonnajuhtimine;
- ISO 26000 sotsiaalne vastutus;
- ISO 50001 energijuhtimine;
- ISO 31000 riskijuhtimine;
- ISO 22000 toiduohutuse juhtimine;
- ISO 27001 infoturbe juhtimine;
- ISO 45001 töötervishoiu ja tööohutuse juhtimine;
- ISO 13485 meditsiiniseadmed.

Eestis on võimalik standardeid otsida ja osta Eesti Standardikeskuse kaudu [10.7].

Kõiki ISO standardeid vaadatakse üle ja muudetakse regulaarselt, olemaks kindel, et nad on jätkuvalt turu jaoks asjakohased ja sobivad. ISO 9001 ja ISO 14001 standardite viimased revisjonid avaldati 2015. aasta septembris. Eelmised versioonid (vastavalt ISO 9001:2008 ja ISO 14001:2004) kehtisid paralleelselt kuni 2018. a 15.septembrini. Uutes juhtimissüsteemide standardite versioonides on kasutusele võetud ühtne standardi ülesehitus (nn *high-level structure*) ehk standarditel on samad peatükid ja alampeatükid, sama sissejuhatav tekst, ühtne sõnavara ja mõisted, samad nõuete peatükid ning standardi valdkonnapõhised nõuded esitatakse alampeatükkides. See teeb standardite koos kasutamise ja juhtimissüsteemide integreerimise lihtsamaks.

Alljärgnevalt on lühiülevaade antud lisaks kvaliteedijuhtimissüsteemi standardile ka ISO 14001 standardil põhinevast keskkonnajuhtimissüsteemist ja OHSAS 18001 standardil põhinevast töötervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteemist, mis on oma ideoloogial ja ülesehituselt ISO 9001 kvaliteedijuhtimissüsteemi standardiga sarnased ja omavahel hõlpsasti integreeritavad.

10.3.1 ISO 9000 standardite seerial põhinev kvaliteedijuhtimissüsteem

Rahvusvahelise Standardiorganisatsiooni (ISO) 9000 seeria standardite sari sisaldab:

- ISO 9001:2015. Kvaliteedijuhtimissüsteemid – sätestab nõuded kvaliteedijuhtimissüsteemile;
- ISO 9000:2015. Kvaliteedijuhtimissüsteemid: alused ja sõnavara – määratleb peamise kvaliteedijuhtimissüsteemiga seonduva sõnavara ja seletab lahti terminid;
- ISO 9004:2009 – keskendub sellele, kuidas muuta kvaliteedijuhtimissüsteem tõhusamaks ja tulemuslikumaks;
- ISO 19011:2011. Juhtimissüsteemide auditeerimise juhised – annab juhised kvaliteedijuhtimissüsteemide auditeerimiseks.

Standard ISO 9001:2015 (EVS-EN ISO 9001:2015) kehtestab nõuded, mille järgi kvaliteedijuhtimissüsteemi üles ehitada. Selles standardis on kindlaks määratud nõuded, mida organi-

satsioon peab täitma nii kvaliteedijuhtimissüsteemi luues kui ka rakendades. Standard määrab kindlaks nõuded kvaliteedijuhtimissüsteemile juhiks, kui organisatsioon peab näitama oma suutlikkust pakkuda järjekindlalt tooteid, mis vastavad kliendi ja huvipoolte ning kohaldatavatele õigusaktide ja normatiivnõuetele ning püüab suurendada kliendi rahulolu süsteemi mõjusa rakendamise, sh süsteemi pideva parendamise protsesside ja nõuetele vastavuse tagamise teel. Selle standardi alusel toimub ka organisatsiooni kvaliteedijuhtimissüsteemi sertifitseerimine. Standardit võib rakendada ükskõik mis suuruse ja tegevusalaga organisatsioonides. Rahvusvahelise Standardiorganisatsiooni (ISO) väitel on maailmas ISO 9001 standardi järgi sertifitseeritud üle ühe miljoni ettevõtte ja organisatsiooni kokku enam kui 170 maal [10.6]. Võrdluseks – Eesti Kvaliteediühingu sertifitseeritud ettevõtete andmebaasi alusel oli Eestis 30. sept 2016. a seisuga ISO 9001 standardi järgi sertifitseeritud veidi üle 1100 ettevõtte. Standard põhineb standardis ISO 9000 kirjeldatud kvaliteedijuhtimise põhimõtetel.

Standard ISO 9004:2009 (EVS-EN ISO 9004:2009) annab juhised organisatsioonidele toetamiseks püsiva edu saavutamist kvaliteedijuhtimise lähenemisviisi kasutades. Standard propageerib enesehindamise kasutamist organisatsiooni küpsuse ülevaatamise olulise vahendina, hõlmates eestvedamist, strateegiat, juhtimissüsteemi, ressursse ja protsesse, et määrata kindlaks organisatsiooni tugevused ja nõrkused ning nii parendus- kui ka innovatsiooni võimalused [10.8].

Standard ISO 19011:2011 (EVS-EN ISO 19011:2011) annab juhised juhtimissüsteemi auditeerimise kohta, sh auditeerimise põhimõtete, auditi programmide juhtimise ja juhtimissüsteemi auditite läbiviimise kohta, samuti on seal juhiseid auditi protsessiga haaratud isikute pädevuse hindamise kohta, sh auditi programmi juhtiva isiku, audiitorite ja auditirühma kohta. Standard on rakendatav kõikides organisatsioonides, kus on vaja teostada juhtimissüsteemi sisemisi või väliseid auditeid või juhtida auditi programmi [10.9].

Standard ISO 9000:2015 (EVS-EN ISO 9000:2015) määrab kindlaks kvaliteedijuhtimissüsteemi kontseptsiooni, põhimõtted, alused ja sõnavara. Selles standardis on ära toodud kvaliteedijuhtimise põhimõtted, mis aitavad organisatsiooni juhtida parendatud toimivuse suunas ning millest lähtub ISO 9000 sarja standardite ideoloogia. Nimetatud põhimõtted on järgmised.

1. **Kliendikesksus.** Organisatsioonid sõltuvad oma klientidest ja seetõttu peaksid mõistma klientide hetke- ja tulevikuvajadusi. Peamine kvaliteedijuhtimise fookus on kliendi nõuete täitmisel ja püüdel ületada kliendi ootuseid.
2. **Eestvedamine.** Eestvedajad seavad sisse organisatsiooni kavatsuste ja suuna ühtsuse. Nad peaksid looma ja säilitama sellise sisekeskkonna, milles on inimestel võimalik täiel määral osaleda organisatsiooni eesmärkide saavutamisel.
3. **Inimeste kaasamine.** Kõikidel tasanditel olevad inimesed moodustavad organisatsiooni tuuma ning nende täielik kaasamine võimaldab kasutada nende võimeid väärtuse loomiseks ja organisatsiooni hüvanguks. Organisatsiooni tõhusaks ja tulemuslikuks juhtimiseks on oluline kaasata inimesi kõikidel tasanditel.
4. **Protsessikeskne lähenemine.** Soovitud tulemus saavutatakse tõhusamalt siis, kui tegevusi mõistetakse ja juhitakse omavahelistes seostes olevate protsessidena, mis toimivad

ühtse süsteemina. Mõistmine, kuidas selle süsteemi abil toimub tulemuste saavutamine, aitab optimeerida süsteemi ja selle toimivust.

5. **Parendamine.** Organisatsiooni üldise toimivuse pidev parendamine peaks olema organisatsiooni püsivaks eesmärgiks, sest aitab saavutada edu. Parendamine on oluline nii olemasoleva taseme säilitamiseks kui ka selleks, et olla võimeline reageerima sise- ja väliskeskonna muutustele ning looma ja ära kasutama uusi võimalusi.
6. **Tõenduspõhiste otsuste tegemine.** Andmete ja informatsiooni analüüsil ja hindamisel põhinevate otsuste tegemine aitab jõuda soovitud tulemusteni. Oluline on mõista põhjustagajärg seoseid ja võimalikke ootamatuid tagajärgi. Faktid, tõendusmaterjal ja andmete analüüs tagavad suurema objektiivsuse ja usaldusväärsuse otsuste tegemisel.
7. **Suhete juhtimine.** Organisatsioon ja selle tarnijad on vastastikku sõltuvad ja nendevahelised vastastikku kasulikud suhted tõstavad mõlema poole võimet luua väärtust ja saavutada edu [10.4, 10.5, 10.10].

Eeltoodud põhimõtted ei ole esitatud tähtsuse järjekorras. Iga põhimõtte suhteline tähtsus võib organisatsiooniti varieeruda ja samuti ka organisatsioonisiselt aja kestel muutuda.

Kvaliteedijuhtimissüsteemi standardid kasutavad protsessikeskset lähenemist, mis hõlmab riskipõhist mõtlemist ja PDCA-tsükli, mille kohaselt iga tegevust või tegevuste kogumit, mis kasutab ressursse selleks, et muundada sisendid väljunditeks, võib vaadata protsessina. Kvaliteedijuhtimissüsteem peaks rakenduma organisatsiooni kõigi protsesside suhtes ja nii see süsteem kui ka protsessid peaksid teineteist vastastikku mõjutama. Seel 10.5 on esitatud ISO 9000 sarja standardites kirjeldatav protsessikeskne kvaliteedijuhtimissüsteem. PDCA-tsükli olemust on kirjeldatud peatükis 9.

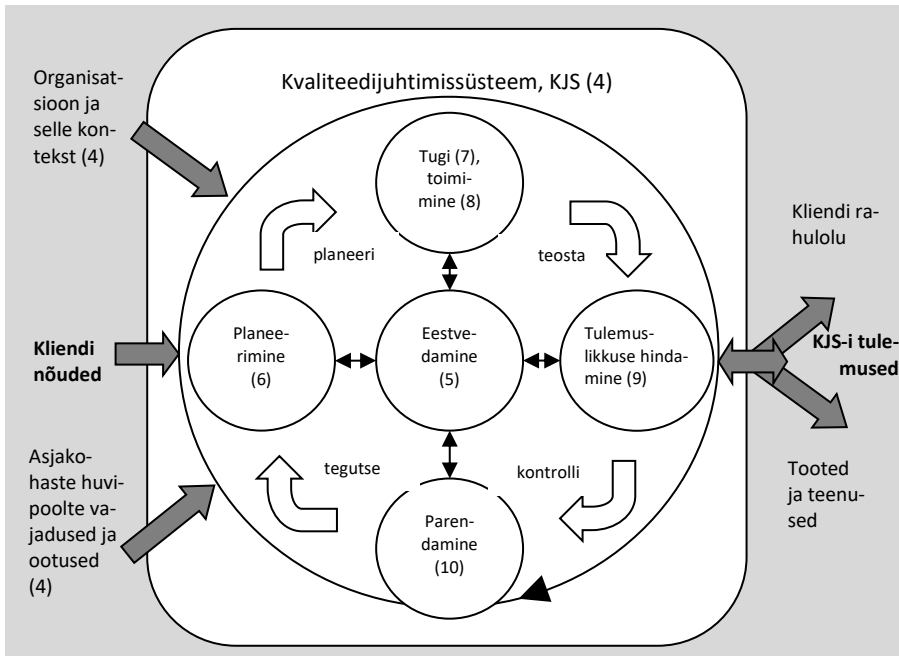
Oluline muudatus, mis viidi sisse ISO 9001:2015 versiooni võrreldes varasema, ISO 9001:2008 versiooniga, on suurem rõhk riskipõhisele mõtlemisele. Riskipõhine mõtlemine on mõjusa kvaliteedijuhtimissüsteemi saavutamiseks hädavajalik. Organisatsioon peab kavandama ja ellu viima meetmed riskide ja võimaluste käsitlemiseks. Nii riskide kui ka võimalustega tegelemine loob aluse kvaliteedijuhtimissüsteemi mõjususe tõstmisele, paremate tulemuste saavutamisele ja negatiivsete mõjude ennetamisele [10.4].

Kvaliteedijuhtimissüsteemi põhimõtete rakendamine aitab organisatsioonil oluliselt korras- tada oma toimimist, likvideerida kitsaskohti, luua ülevaatlik ja funktsioneeriv dokumendihalduse süsteem, määrata täpselt ära organisatsioonis toimivad protsessid ning nende teostuse kord, täitjad ja oodatavad tulemused.

Kvaliteedijuhtimissüsteemi väljatöötamisega seonduvad peamised sammud on järgmised:

- klientide ja huvipoolte vajaduste ning ootuste kindlaksmääramine;
- kvaliteedipoliitika (kvaliteedialaste juhtpõhimõtete) ja eesmärkide püstitamine;
- eesmärkide saavutamiseks vajalike protsesside, kohustuste ja volituste kindlaksmääramine;
- eesmärkide saavutamiseks vajalike ressursside kindlaksmääramine ja hankimine;
- protsesside mõjususe ja tõhususe mõõtmise meetodite väljatöötamine;
- nende meetodite rakendamine kõigi protsesside juures;

- mittevastavuste vältimise ja nende põhjuste kõrvaldamise meetodite kindlaksmääramine;
- süsteemi pideva parendamise protsessi loomine ja rakendamine.

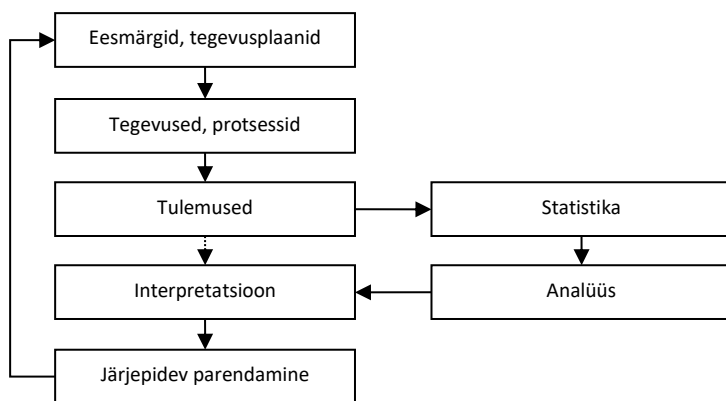


Sele 10.5. ISO 9001 kvaliteedijuhtimissüsteemi struktuuri esitus PDCA tsükliis [10.4] (sulgudes esitatud numbrid viitavad ISO 9001:2015 standardi jaotistele)

ISO 9000 seeriastandardite üheks oluliseks komponendiks on pideva parendamise põhimõtete järgimine. Pideva parendamise protsess on esitatud seel 10.6.

ISO 9001:2015 standard toob kvaliteedijuhtimissüsteemi rakendamise potentsiaalsete kasudena organisatsioonile välja järgmist:

- suutlikkus järjekindlalt pakkuda nii kliendi nõuetele kui ka kohaldatavatele seadusjärgsetele ja normatiivsetele nõuetele vastavaid tooteid ja teenuseid;
- kliendi rahulolu suurendamisvõimaluste loomise hõlbustamine;
- oma konteksti ja eesmärkidega seotud riskide ning võimaluste käsitlemine;
- võime näidata vastavust kindlaksmääratud kvaliteedijuhtimissüsteemi nõuetele [10.4].



Sele 10.6. Pideva parendamise protsess

10.3.2 ISO 14001 standardil põhinev keskkonnajuhtimissüsteem

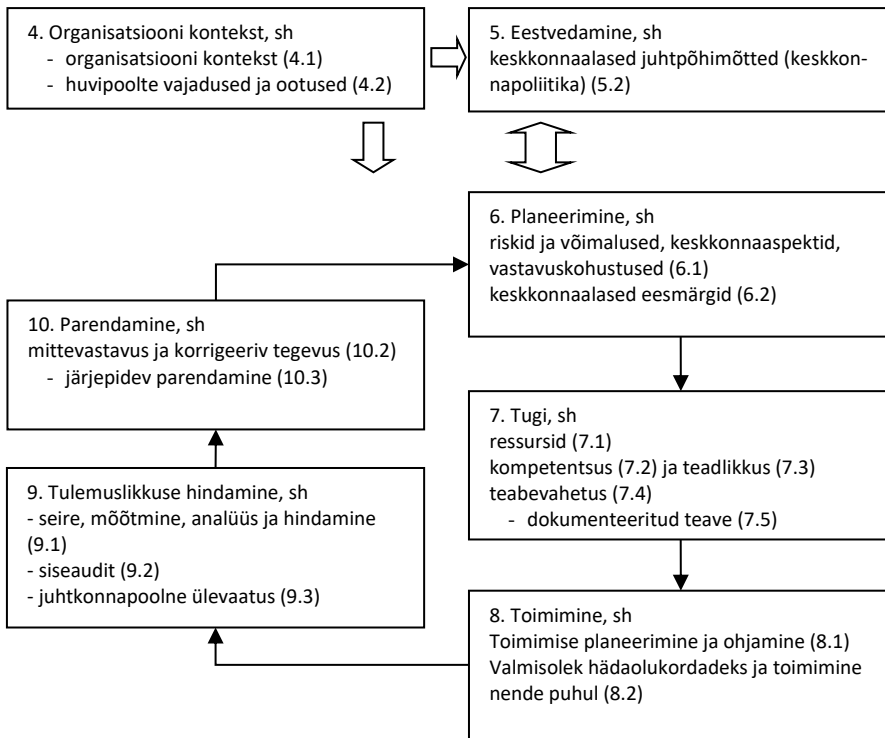
Keskkonnajuhtimine tähendab, et organisatsioon pöörab süstemaatilisel tähelepanu oma organisatsiooniga koosmõjus olevatele keskkonnaprobleemidele. Keskkonnategevuse parendamiseks saavad organisatsioonid kasutada keskkonnajuhtimisvahendeid (nt keskkonnategevuse tulemuslikkuse hindamine, keskkonnahoidlik tootearendus, keskkonnahoidlikud hanked, ökomärgised, keskkonnaaruandlus jm). Lõimides selliseid keskkonnajuhtimisvahendeid oma keskkonnajuhtimissüsteemi, saab organisatsioon peale oma tegevusest tuleneva otsese keskkonnamõju vähendamise parandada ka oma toodete ja teenuste üldisi keskkonnamõju omadusi. Keskkonnajuhtimissüsteem on organisatsiooni juhtimissüsteemi osa, mis paneb aluse süsteemsele, plaanipärasele ja dokumenteeritud keskkonnategevusele. Keskkonnajuhtimissüsteemid võivad olla:

- 1) standardiseeritud ehk formaalsed keskkonnajuhtimissüsteemid – standardi-/spetsifikaadi- või muudele kokkulepitud nõuetele vastav keskkonnajuhtimissüsteem (nt ISO 14001 standardi või Euroopa Liidu EMAS määruse kohane keskkonnajuhtimissüsteem);
- 2) mitteformaalne keskkonnajuhtimissüsteem – süsteemne keskkonnategevus organisatsioonis (nt jäätmekäitluse süstemaatiline korraldamine) [10.11].

Standardiseeritud keskkonnajuhtimissüsteemidest on enim tuntud ISO 14001 standardil põhinev keskkonnajuhtimissüsteem ning Euroopa Liidu keskkonnajuhtimise ja -auditeerimise skeemil (*Eco-Management and Audit Scheme*, EMAS) põhinev keskkonnajuhtimissüsteem. Alates 2015. a sügisest on kehtiv keskkonnajuhtimissüsteemi standardi versioon ISO 14001:2015 (EVS-EN ISO 14001:2015). Sarnaselt ISO 9001-ga kehtis eelmine keskkonnajuhtimissüsteemi standardi ISO 14001:2004 versioon kuni 15.septembrini 2018. ISO 14001:2015 standardi põhinev keskkonnajuhtimissüsteem kasutab samuti alusena PDCA-tsüklit, mis toetab süstemaatilist lähenemisviisi tegevuste ja protsesside pideval parendamisel ja meetmete rakendamisel. Samuti on ISO 14001:2015 standardi struktuur sarnane ISO

9001:2015 standardi struktuuriga, mis teeb lihtsaks antud standardi põhise keskkonnajuhtimissüsteemi integreerimise ISO 9001:2015 standardi põhise kvaliteedijuhtimissüsteemiga.

Keskkonnajuhtimissüsteem pakub ettevõttele korda ja kindlust keskkonna eest hoolitsemiseks vahendite eraldamise, kohustuste üksikasjaliku kindlaksmääramise ning tavade, protseduuride ja protsesside pideva ümberhindamise kaudu. Põhirõhk on saastamise vältimisel, ettevõtte tegevuste, toodete ja teenuste keskkonnaaspektide ja nendega kaasnevate keskkonnamõtjude hindamisel ning oluliste negatiivsete (keskkonda kahjustada võivate) keskkonnamõtjude kontrolli all hoidmisel ja võimalusel vähendamisel. Keskkonnajuhtimissüsteemi põhikomponendid on esitatud seel 10.7.



Sele 10.7 ISO 14001:2015 (EVS-EN ISO 14001:2015) põhiosad

Saastamise vältimisena mõistetakse ebasoodsate keskkonnamõtjude vähendamiseks selliste protsesside, tavade, meetodite, materjalide, toodete, teenuste ja energia kasutamist, mis väldiksid, vähendaksid või hoiaksid kindlates piirides (eraldi või kombineeritult) mis tahes liiki saasteaine või jäätme teket, emissiooni või heidet. **Keskkonnaaspektina** käsitletakse ettevõtte tegevuste, toodete ja teenuste selliseid elemente, mis on või võivad keskkonnaga koostoimimiseks olla olulised. Olulisel keskkonnaaspektil on või võib olla oluline mõju keskkonnale. **Keskkonnamõtju** on osaliselt või täielikult organisatsiooni keskkonnaaspektidest tulenev mis tahes

ebasoodne või soodne muutus keskkonnas [10.12]. Olulisel kohal on ka ettevõtte keskkon-
naaspektidele kohalduvate õigusaktide ja muude nõuete väljaselgitamine ning ettevõtte tege-
vuse õigusaktide ja muudele nõuetele vastavuse järjepidev hindamine.

10.3.3 OHSAS 18001 standardil põhinev tervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteem

Tervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteemi standardina on hetkel kasutusel standard OHSAS 18001. Praegu kehtib Eestis standard EVS 18001:2007, mis on koostatud Briti stan-
dardi BS OHSAS 18001:2007 põhjal. Väljatöötamisel on uus tervishoiu ja tööohutuse juh-
timise standardi versioon ISO 45001, mis hakkab asendama senist OHSAS 18001 standardit.
Et hõlbustada organisatsioonidel nende soovi korral kvaliteedi-, keskkonna- ning tervishoiu
ja tööohutuse juhtimissüsteemide integreerimist, on ISO 45001 välja töötatud kooskõlas
ISO kvaliteedi- ja keskkonnujuhtimissüsteemi standarditega ja omab nendega samasugust
põhistruktuuri. ISO 45001 standard ilmus 2018. a.¹

Tervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteem on see osa üldisest juhtimissüsteemist, mis hõl-
mab organisatsiooni äritegevusega seotud tööohutuse ja tervishoiu riskide juhtimist. Tõ-
tervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteem on struktureeritud lähenemine, et tagada ettevõtte
tööjõu ja teiste ettevõtte tegevustega seotud või neist mõjutatud isikute tervishoid ja ohutus.
Tervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteemi eesmärgid on:

- tagada vastavus õigusaktide ja muudele nõuetele;
- planeerida ja prioriseerida tervishoiu ja tööohutuse parendustegevusi;
- juhtida tõhusalt tervishoidu ja tööohutust [10.13].

Standard propageerib ennetavat lähenemist tervishoiu ja -ohutuse juhtimisele. Ettevõtte
peaks suunaks võtma mitte õnnetustele reageerimise, vaid võimalike ohtude ettenägemise,
hindamise ja nende ennetamise meetmete tarvituselevõtu. Samaselt tervishoiu ja tööohu-
tuse seadusega [10.14] on nõutav riskianalüüs, et määratleda ja hinnata riske ning riskitase-
mete vähendamise ja/või kontrolli all hoidmise meetmete kujundamine. Nagu keskkonnujuh-
timissüsteemi puhul, on ka tervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteemis oluline õigusaktide
nõuete täitmine ning võimalike hädaolukordade määratlemine koos hädaolukordade tege-
vuskava koostamisega ning vastava teabe pidev ajakohastamine.

10.3.4 Muud kvaliteedijuhtimise standardid

Lisaks eelmainitud enamkasutatavatele ISO 9000 seeria põhiste kvaliteedijuhtimissüsteemi
standarditele, ISO 14001 keskkonnujuhtimissüsteemi standardile ja OHSAS 18001/ISO
45001 tervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteemi standardile on veel mitmeid kvaliteedi-
juhtimise standardeid, mis keskenduvad mingile kitsamale spetsiaalvaldkonnale, nagu näi-
teks:

¹ <https://www.evs.ee/et/evs-iso-45001-2018> (08.12.2022)

- AQAP 2110. NATO kvaliteeditagamise nõuded projekteerimisele, arendamisele ja tootmisele (*NATO Quality Assurance Requirements for Design, Development and Production*). Rakendatakse eelkõige kaitseotstarbelistel hangetel osalemise eeltingimuste täitmiseks ja valdkondades, kus tegemist on NATO või riiklike struktuuride kaitseotstarbeliste/militaarvaldkonna tellimuste täitmisega. Standard kasutab baasina ISO 9001 nõudeid;
- ISO/TS 16949:2009. Kvaliteedijuhtimissüsteemid. Erinõuded ISO 9001:2008 rakendamiseks autotööstuses ja vastavate teenusorganisatsioonide juures;
- EVS-EN ISO 13485:2016. Meditsiiniseadmed. Kvaliteedijuhtimissüsteemid. Normatiivsed nõuded;
- EVS-EN ISO 22000:2006. Toiduohutuse juhtimissüsteemid. Nõuded kõikidele organisatsioonidele toidu käitlemisahelas (ISO 22000:2005);
- EVS-ISO/IEC 27001:2014/AC:2015. Infotehnoloogia. Turbemeetodid. Infoturbe halduse süsteemid. Nõuded.

Need standardid kasutavad tüüpiliselt aluspõhjuna ISO 9001 kvaliteedijuhtimissüsteemi standardit, aga sisaldavad täiendavalt konkreetsele spetsiaalvaldkonnale rakenduvaid detailsemaid nõudeid. Reeglina saab neid standardeid rakendada nii juhtimissüsteemi standarditega integreeritult kui ka iseseisvana.

10.3.5 Integreeritud juhtimissüsteemid

Kvaliteedi-, keskkonna- ning töötervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteemide standardid on oma olemuselt üles ehitatud põhimõttel, et neid oleks võimalik omavahel integreerida. Peamised sarnasused:

- sama ideoloogia (PDCA);
- juurutamine ja sertifitseerimine on vabatahtlik;
- süsteemi väljatöötamise ja juurutamise vaatekohast ei ole organisatsiooni suurus ja tegevusala olulised;
- protsessikeskne lähenemine;
- põhielemendid: struktuur, tegevusplaanid, kindlaksmääratud vastutusvaldkonnad, tegevused, protseduurid ja ressursid, mida on vaja süsteemi väljatöötamiseks, juurutamiseks ja töökorras hoidmiseks;
- suur rõhk juhtkonna vastutusel ja eestvedamisel;
- nõue pidevaks parendamiseks;
- nõue vastata õigusaktide ja muudele nõuetele;
- erinevate osakondade ja tasandite koostöö on oluline eesmärkide saavutamiseks;
- ühtne standardi struktuur ja ülesehitus standardite uutel versioonidel (ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 ja ISO 45001:2018).

Peamised erinevused:

- juhtimissüsteemide eesmärgid on erinevad;
- erinevad huvipooled on huvitatud juhtimissüsteemi juurutamisest;

- kvaliteedijuhtimissüsteem on suunatud tootmisele/teenindamisele ja tootele/teenusele, seega tulule. Keskkonnajuhtimissüsteem on suunatud keskkonna kahjustamise vältimisele ning töötervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteem töötajate tervise ja tööohutuse tagamisele. Seetõttu omistatakse enamasti kvaliteedijuhtimissüsteemile rohkem tähtsust kui keskkonnajuhtimissüsteemile või töötervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteemile, millel enamasti on kaudne mõju.

Integreeritud juhtimissüsteemi loomine tähendab seda, et luuakse ühtne juhtimissüsteem, mis vastab nii kvaliteedijuhtimise, keskkonnajuhtimise kui ka töötervishoiu ja tööohutuse juhtimise süsteemide standardite nõuetele. Seega tuleb integreeritud juhtimissüsteemi dokumentide loomisel lähtuda kõigi standardite nõuetest ja süsteemi lihtsuse huvides dokumente võimalikult suures mahus integreerida. Näiteks koostatakse ühtne dokument „Eesmärgid ja tegevusplaanid“, mis hõlmab nii kvaliteedijuhtimissüsteemi standardis nõutud kvaliteedieesmäärke, keskkonnajuhtimissüsteemi standardis nõutud keskkonnaeesmäärke ning töötervishoiu ja -ohutuse juhtimissüsteemis nõutavaid töötervishoiu ja tööohutuse eesmäärke ja vastavaid tegevusplaanide koos eesmärkide täitmiseks vajalike tegevuste, ressursside, vastutavate isikute ja tähtaegade määratlemisega.

10.3.6 Juhtimissüsteemide sertifitseerimine

Sertifitseerimist võib vaadelda kui ettevõtte kvaliteedi-, keskkonna- ja/või töötervishoiu ja -ohutuse juhtimissüsteemi ametlikku tunnustamist sõltumatute isikute poolt. Sertifitseerimine ei ole kohustuslik. Organisatsioon võib rakendada kvaliteedi-, keskkonna- ja/või töötervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteemi ka ilma seda sertifitseerimata, kuid mõningatel juhtudel (näiteks kliendi nõudel, hankes osalemise eeltingimusel vms) võib olla sertifikaadi olemasolu vajalik.

Sertifitseerimine hõlmab tavaliselt auditeid kliendi juures ning seejärel korraldada auditeid sertifikaadi kehtivusaja jooksul. Sertifitseerimisauditi eesmärgiks on hinnata, kas ettevõtte on kavandanud oma juhtimissüsteemi nii, et on arvestatud kõiki standardite nõudeid, mille alusel ettevõtte taotleb sertifitseerimist ning kas ettevõtte täidab oma kavandatud juhtimissüsteemi nõudeid nii, et oleksid täidetud ka juhtimissüsteemi väljatöötamise ja sertifitseerimisealuseks olevate standardite nõuded. Hinnatakse ettevõtte kõikide üksuste tööd. Sertifitseerimisel on vaatluse all:

- ettevõtte tegevuse ja juhtimissüsteemi käsitlusala kooskõla;
- juhtimissüsteemi dokumentide vastavus auditeeritavale standardile või standarditele ja ettevõtte põhiprotsessile. Samuti hinnatakse, kas põhiprotsess on juhtimissüsteemi kaudu küllaldaselt hallatud;
- ettevõtte võime täita juhtimissüsteemiga seotud õigusaktide ja muid tunnustatavaid nõudeid;
- juhtkonna kohustumus – poliitika, eesmärgid, juhtimiskavad;
- siseauditite tulemused ja juhtkonnapoolne ülevaatus;

- kas töötajad on teadlikud juhtimissüsteemi nõuetest ja kas on tõendid nende nõuete täitmise kohta;
- kas juhtimissüsteem on tulemuslik – lähtutakse juhtimispoliitikast, täidetakse eesmärgid, õigusaktide ja muid tunnustatavaid nõudeid;
- kas põhi- ja tugiprotsesse hallatakse nii, et protsesside eesmärkide täitmine on võimalik;
- kas juhtimissüsteem on täielik ja katab kõiki sertifitseerimise aluseks olevaid standardite nõudeid kindlaksmääratud käsitusala piires;
- kas juhtimissüsteem töötab, kas olemas tõendid, mis näitavad igapäevast toimimist vastavalt juhtimissüsteemi reeglitele.

Sertifitseerimisaudit korraldatakse tavaliselt kahes etapis. Peale sertifitseerimisauditi mõlemat etappi ja ettevõtte poolt mittevastavuste (kui neid on) kõrvaldamist ning selle kohta tõendite esitamist sulgeb sertifitseerimisasutuse auditimeeskonna juht auditiaruande ja annab oma soovitusel ettevõttele sertifikaadi väljastamiseks. Ettevõttele väljastatud sertifikaatide kehtivuse eelduseks on, et sertifitseerimisasutus teeb ka järelevalveauditeid. Tavaliselt toimuvad järelevalveauditid ettevõttes üks kord aastas [10.16].

Et sertifitseerimisasutuse väljastatud sertifikaati tunnustataks, peab sertifitseerimisasutus olema akrediteeritud. Akrediteerimine on sertifitseerimisasutuse kompetentsuse ametlik tunnustamine kindlatel tegevusaladel. Selleks, et kliendil tekiks usaldus sõltumatu organisatsiooni sertifikaadi vastu, peab viimane samuti tõestama oma pädevust. Akrediteeritud sertifitseerimisasutused on näiteks Bureau Veritas Certification, Det Norske Veritas, Lloyds Register jm. Eelnimetatutel on ka Eestis oma esindused. Kehtivate sertifikaatide andmebaas on kättesaadav Eesti Kvaliteediühingu kodulehelt [10.15]. Samast leiab ka Eesti sertifitseeritud ettevõtete andmebaasi.

10.3.7 Tootestandardid ja CE-märgistus

Tihti peale aetakse juhtimissüsteemide standardeid segi tootestandarditega. Tootestandard määrab kindlaks toote või tooterühma eesmärgivastavust tagavad nõuded. Tootestandard võib lisaks eesmärgivastavuse nõuetele sisaldada otseselt või viite abil muud tootega seotut, nagu terminoloogia, proovivõtt, katsetamine, pakendamine, märgistus ja mõnikord töötlemisnõuded. Tootestandard võib olla täielik või mitte vastavalt sellele, kas see määratleb kõik või ainult osa vajalikest nõuetest [10.7, 10.17]. Tootestandardi nõuetele vastavus on üheks CE-märgi saamise eeltingimuseks.

Tooted, mis võivad olla kasutajale ohtlikud – nagu näiteks elektrikaubad, masinad, mänguasjad ja isikukaitsevahendid –, peavad olema varustatud CE-märgiga. Kui tootel on CE-märgistus nõutav, siis ilma märgistuseeta seda müüa ei tohi. CE-märgistus on tootja või importija poolt antud garantii, et toode vastab kõikidele olulistele töötervishoiu ja tööohutuse nõuetele. Kui tootja lisab tootele CE-märgise, deklareerib ta oma ainuvastutusel, et toode vastab kõigile õigusaktide nõuetele, mis on vajalikud CE-märgise saamiseks. Seeläbi tagatakse, et toodet saab müüa kogu Euroopa Majanduspiirkonnas. See kehtib ka kolmandates riikides valmistatud toodete kohta, mida Euroopa Majanduspiirkonnas müüakse. Samas CE-märgis ei näita,

et toode on valmistatud Euroopa Majanduspiirkonnas, vaid üksnes annab teada, et toodet hinnati enne turule toomist ning see vastab müüdavatele kaupadele kehtestatud juriidilistele nõuetele (nt ühtsed ohutusstandardid). [10.18, 10.19]

CE-märk võeti kasutusele 1990. aastate alguses võimaldamaks tootjal näidata, et toode vastab direktiivide nõuetele. CE-märk võimaldab müüa toodet vabalt Euroopa Liidu (EL) piires, ilma et iga liikmesriik peaks seda täiendavalt katsetama. Teatud toodete osas, mida loetakse eriti ohtlikeks ning mis vajavad katsetamist, kohustavad direktiivid tootjat tegema koostööd ühe või mitme sõltumatu kolmanda osapoolega, keda nimetatakse teavitatud asutusteks. EL-i liikmesriigid hindavad teavitatud asutuste tegevust ning volitavad neid läbi viima katsetusi, sertifitseerimist ja kontrolli kooskõlas erinevate direktiivide nõuetega. Turujärelevalve süsteem käivitati selleks, et garanteerida toodete kontrollimise süsteemi usaldusväärsus ja tagada, et tooted vastaksid tegelikkuses töötervishoiu ja tööohutuse nõuetele ning oleks vajadusel läbinud katsetused ja muud formaalsused, mida tootja CE-märgi tootele lisamisega garanteerib. Hetkel eksisteerib ca 20 EÜ direktiivi, mis on koostatud vastavalt 1980. aastatel kasutusele võetud mudelile, mida tuntakse ka nime all *uus lähenemisviis*. Nimetatud direktiivide alla kuuluvad tooted peavad kandma CE-märki [10.18]. Eestis on ca 10 riiklikku asutust, mis vastutavad toodete turujärelevalve ja nendel CE-märgistuse kontrollimise eest. Loetelu kontaktandmete ja lisainfoga on toodud [10.19].

Tootele CE-märgise saamiseks tuleb läbi teha järgmised kuus sammu.

1. Toote kohta kehtivate direktiivide ja ühtlustatud standardite väljaselgitamine.
2. Tootespetsiifiliste nõuete kontrollimine.
3. Välja selgitamine, kas teavitatud asutus nõuab sõltumatut vastavushindamist.
4. Toote katsetamine ja vastavuse kontrollimine.
5. Tehnilise dokumentatsiooni koostamine.
6. CE-märgise kinnitamine oma tootele ja EÜ vastavusdeklaratsioon [10.19].

Lisainfot CE-märgise kohta leiab Euroopa Komisjoni kodulehelt [10.20]. Täiendavalt vt ka [10.21].

10.4 Terviklik kvaliteedijuhtimine

Terviklik kvaliteedijuhtimine (*total quality management, TQM*) on organisatsiooni juhtimise kvaliteedikeskne lähenemisviis, mis põhineb kõikide organisatsiooni liikmete osalemisel, püüdleb pikaajalisele edule kliendi rahulolu saavutamise abil ning toob kasu nii organisatsiooni liikmetele kui ka ühiskonnale. Terviklikku kvaliteeti nimetatakse terviklikuks, kuna see hõlmab 3 liiki kvaliteeti:

- **tulude kvaliteet** aktsionäride/osanike vajaduste rahuldamiseks;
- **toodete ja teenuste kvaliteet** kliendi vajaduste rahuldamiseks;
- **elukvaliteet** – töl ja väljaspool tööd – organisatsioonis töötavate inimeste vajaduste rahuldamiseks.

Terviklik kvaliteet saavutatakse kogu organisatsiooni panustamise tulemusena. Lähenedamine on laiem kui ainult kvaliteetse toote/teenuse saavutamine ja kliendi nõuete rahuldamine. Tervikliku kvaliteedijuhtimise eesmärgiks on kogu organisatsiooni konkurentsivõime, tootlikkuse ja paindlikkuse suurendamine. Tervikliku kvaliteedijuhtimise tõukejõuks on selle kasutaja, seda ei saa peale suruda väljastpoolt organisatsiooni nagu ehk saaks teha kvaliteedijuhtimise mõne standardi puhul. Parendamise ideed peavad tulema neilt, kes tunnevad vastavaid protsesse, tegevusi ja ülesandeid ning kel on kogemusi, millel omakorda on suur tähendus koolituse ja edasise jälgimise seisukohalt. Terviklik kvaliteedijuhtimine tähendab peamiselt hoia-kute ning oskuste muutmist, et organisatsiooni kultuuri põhisisuks saaks läbikukkumise ennetamine, tehes õigeid asju, tehes neid õigesti esimesel korral, tehes neid õigesti iga kord. Walter Masing, üks kvaliteedia klassikuid, on öelnud, et ISO sertifikaat on nagu autojuhiluba, mis annab õiguse autot juhtida, kuid ei näita tegelikult sõitja taset. Terviklik kvaliteedijuhtimine läheb protsessijuhtimisest ja kvaliteedijuhtimisest edasi, see hõlmab kogu organisatsiooni tegevust ehk aitab tõsta sõitja taset [10.22]. ISO 9000 sarja standardid lähtuvad samuti tervikliku kvaliteedijuhtimise põhimõtetest (vt ptk 10.3).

Tervikliku kvaliteedijuhtimise põhimõtted on järgmised.

- Terviklikkus, kõikehõlmavus (*total*):
 - kõikide töötajate osalus ja meeskonnatöö – igaüks tuleb kaasa haarata kvaliteedia- lastesse tegevustesse;
 - kõik peavad tundma, et igaüks vastutab kvaliteedi eest (omanikutunne, peremehe- tunne);
 - organisatsiooni kõikide juhtimistasandite, protsesside ja funktsioonide kaasamine;
 - süsteemne mõtlemine, terviku mõistmine.
- Kvaliteet (*quality*):
 - fookustuda kliendi nõuete rahuldamisele (nii sise- kui ka väliskliendid);
 - kvaliteedi kui kriteeriumi tähtsus – kvaliteet on prioriteet;
 - pidev parendamine – kõikide tegevuste parendamine;
 - tehniline külg: koolitus oskuste ja teadmiste arendamiseks, meetodite ja tööriistade täiustamine;
 - inimlik külg: uuenduslikkuse ja loovuse suurendamine.
- Juhtimine (*management*):
 - tippjuhtkonna pühendumus, kohustuste ja vastutuse võtmine;
 - otsustusõiguse delegerimine;
 - organisatsiooni missiooni ja eesmärkide määratlemine;
 - eestvedamine kui kriitiline edutegur, eeskuju kaudu juhtimine;
 - organisatsioonikultuuri muutmine, ühtsete väärtuste loomine;
 - organisatsiooniline õppimine, uue teadmuse loomine – enda ja teiste kogemuste võrd- lemine (*benchmarking*).

Tervikliku kvaliteedijuhtimise põhimõtete rakendamisel on ettevõtte juhtimisstiili põhiaspektid järgmised:

- juhtkonna pühendumus – edu eeltingimus;
- juhtimisstiil ja organisatsiooni struktuur – pehme (*soft*) stiil, igaüks ettevõttest on kaasa haaratud, meeskonnatöö, kvaliteediteadlikkus, motivatsioon, lamedad juhtimisstruktuurid (*lean management*);
- mõjus eestvedamine algab ettevõtte tippjuhtkonnast, ettevõtte visioonist, kasutab ära turu või teenuste võimalused, jätkub strateegia abil, mis annab organisatsioonile konkurentsivõid või muid eeliseid ning tagab äri või teeninduse edu;
- koolitus ja õppimine (õppivad organisatsioonid, andmeanalüüs, faktidel põhinev);
- vigade ennetamine.

Mõjuka eestvedamise 5 eeltingimust:

- 1) ettevõtte tõekspidamiste ja eesmärgi väljatöötamine ning täpselt sõnastatud dokumendi kujul avaldamine – visiooni ja missiooni avaldus. Tippjuhtkond peab näitama selles suhtes täielikku kohustumust;
- 2) täpsete ja tõhusate strateegiate ning tugiplaanide väljatöötamine missiooni täitmiseks;
- 3) kriitiliste edutegurite ja protsesside kindlakstegemine;
- 4) juhtimisstruktuuri ülevaatus – struktuur peab põhinema protsessijuhtimisel. Siia kuulub ka organisatsiooni juhtkonna kohustuste ja põhiprotsesside korraldamiseks kokkulepitud meetodite kindlaksmääramine;
- 5) volitamine – töötajate ergutamine ettevõtte tööst mõjusalt osa võtma. Kommunikatsioonisüsteem peab olema mõjus nii ettevõttesiseselt kui ka tarnijate ja klientidega.

Tervikliku kvaliteedijuhtimise lähenemisviis juhtimissüsteemi arendamisele:

- kliendi vajaduste ja ootuste väljaselgitamine;
- organisatsiooni kvaliteedipoliitika ja eesmärkide seadmine;
- eesmärkide saavutamiseks vajalike protsesside ja vastutuse kindlaksmääramine;
- iga protsessi mõjususe näitajate kindlaksmääramine ja fikseerimine;
- vahendite kindlaksmääramine mittevastavuste vältimiseks ja nende põhjuste kõrvaldamiseks;
- protsesside tõhususe parendamise võimaluste otsimine;
- strateegiate, protsesside ja ressursside planeerimine ja rakendamine parenduste täideviimiseks;
- reaalse tulemuste võrdlemine oodatavatega.

10.5 Kuus sigmat

Kuus sigmat (*six sigma*) on tehnikate ja tööriistade kogum protsesside parendamiseks. 6 sigmat sai tuntuks 1980. aastate teises pooles, kui seda rakendati Motorolas ja General Electricus, kuid selle juured pärinevad varasemast ajast. 6 sigma ajalugu on tihedalt seotud tervik-

liku kvaliteedijuhtimise kontseptsiooniga, olles sisuliselt selle edasiarendus. See oli algul rakendatud tööstuses, et vähendada kvaliteediprobleeme, kuid tänaseks kasutatakse seda erinevates valdkondades.

6 sigmat on defineeritud kui eesmärki rahuldada kliendivajadused perfektsuslähedaselt. Termin *kuus sigmat* tähendab iseenesest statistiliselt välja arendatud soorituseesmärki saavutada tegevuses maksimaalselt 3,4 defekti iga miljoni tegevuse ehk võimaluse kohta. Veel võib kuut sigmat defineerida kui põhjalikku muutust kultuuris ettevõtte strateegia muutmiseks, eesmärgiga suurendada kliendirahulolu, kasumlikkust ja konkurentsivõimet. Definiitsioon, mis hõlmab nii 6 sigma ulatust kui ka paindlikkust soorituse parendamise vahendina on järgmine:

- kuus sigmat: kõikehõlmav ja paindlik süsteem ärilise edu saavutamiseks, säilitamiseks ja maksimeerimiseks. Kuue sigma unikaalseks liikumapanevaks jõuks on kliendi vajaduste täpne mõistmine, faktide, andmete ja statistilise andmeanalüüsi distsiplineeritud kasutamine ning kõrgendatud tähelepanu äriprotsesside juhtimisele, parendamisele ja taasleiuutamisele [10.23].

Kuus sigmat otsib võimalusi parendada protsesside väljundite kvaliteeti määratlades ja kõrvaldades vigade põhjuseid ja minimeerides variatsiooni tootmis- ja äriprotsessides. Kuue sigma puhul kasutatakse erinevaid kvaliteedijuhtimise meetodeid. Olulisel kohal on ka organisatsiooni töötajate koolitamine omandamiseks kompetentsid nende meetodite kasutamisel. 2000. aastate algusest on kuue sigma põhimõtteid kombineeritud kulusäästliku tootmisega (*lean manufacturing*), mis on viinud terminini *Lean Six Sigma*. See kasutab samuti DMAIC-mudelit nagu kuus sigmat ning kombineerib kulusäästliku tootmise raikamise elimineerimise ja kuue sigma defektide vähendamise aspekte. 2011. a on kuue sigma kohta välja antud ka standard ISO 13053:2011 [10.24, 10.25].

Kuue sigma juurutamise kasuteguritena on välja toodud järgmist:

- kulude vähenemine;
- tootluse paranemine;
- turuosa kasv;
- klientide püsimine;
- tootmistsükli kiirenemine;
- defektide vähenemine;
- kultuuriline muutus;
- toote/teenuse areng jpm [10.23].

10.5.1 DMAIC-parendusmudel

Kuue sigma süsteemi puhul rakendatakse viiefaasilist parendamistsükli ehk DMAIC-mudelit. DMAIC-mudel baseerub PDCA-tsükliil ning koosneb järgmistest osadest või sammudest (vt ka sele 10.8):

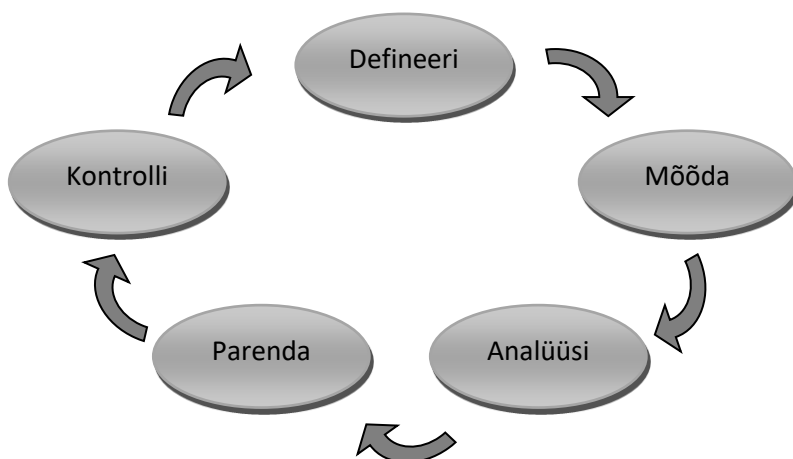
- 1) defineeri (*define*) – probleemi kirjeldamine;
- 2) mõõda (*measure*) – praeguse soorituse kirjeldamine;

- 3) analüüsi (*analyze*) – leitakse variatsiooni ja raiskamiste peamised juurpõhjused;
- 4) parenda (*improve*) – leitakse parimad viisid probleemide lahendamiseks;
- 5) kontrolli (*control*) – leitakse viisid, kuidas parendusi säilitada.

DMAIC-mudeli sammude rakendamisel kasutatakse mitmeid kvaliteedijuhtimise tööriistu, mida kasutatakse ka väljaspool kuut sigmat, nagu näiteks:

- 5 miksi;
- statistilised meetodid (nt variatsioonianalüüs ANOVA, regressioonianalüüs, korrelatsioon, variatsioon jt);
- tõrkeolude ja .mõjude analüüs FMEA (*failure mode and effect analysis*);
- poka-yoke;
- 5S;
- protsesside kaardistamine;
- põhjus-tagajärg diagramm (kalaluu / Ishikawa diagramm);
- ohjekaart;
- kulu-tulu analüüs;
- histogrammid;
- Pareto analüüs;
- juurpõhjuste analüüs;
- SIPOC (tarnijad (*suppliers*), sisendid (*inputs*), protsess (*process*), väljundid (*outputs*), kliendid (*customers*));
- Taguchi meetodid;
- väärtusahela kaardistamine;
- jpm.

Mõningaid neist on kirjeldatud eelnevas peatükis.



Sele 10.8. DMAIC-mudel

10.5.2 Rollijaotused kuue sigma rakendamisel

Kuue sigma edukaks rakendamiseks on määratletud erinevad võtmerollid.

- Juhtrühm (*executive leadership*) on tavaliselt ettevõtte juhtkond. See on vastutav kuue sigma juurutamise visiooni määratlemise, kuue sigma initsiatiivi rollide ja infrastruktuuri üle otsustamise, spetsiifiliste projektide valimise ja ressursside jaotamise, projektide edemise perioodilise ülevaatamise, edusammude hindamise ning tugevuste ja nõrkuste tuvastamise, parimate praktikate organisatsioonis jagamise jms eest.
- Sponsor ehk vedaja (*sponsor*) on tippjuht ja ühtlasi parendusprojekti järelevaataja. Tema kohustuste hulka kuuluvad näiteks tema hoole all olevate parendusprojektide laiemate eesmärkide seadmine ja hoidmine, nõustamine ja vajadusel muudatuste kinnitamine projekti suuna ja mahu osas, projektidele ressursside leidmine, meeskonna esindamine juht-rühma ees ja meeskonna toetamine, meeskondade ja/või meeskonnaväliste inimeste vaheliste tekkivate probleemide ja kattuvuste lahendamine, töö koos protsessi omanikega jms.
- Tšempion (*champion*) hoolitseb kuue sigma rakendamise eest organisatsioonis. Tšempionide roll on luua selge seos projektide ja ettevõtte strateegia vahel. Projektide alustamise järel on nende rolliks ressursside leidmine ja takistuste kõrvaldamine. Väiksemates organisatsioonides on tšempion ja sponsor tihtipeale sama inimene.
- Meister must vöö (*master black belt*) tegeleb ainult kuue sigma projektidega, muid lisaülesandeid ei ole. Ta on abiks tšempionidele ja juhendab musti ja rohelist vööd. Tema kohuseks on jälgida, et muudatused toimuvad ka siis, kui mustad vööd on projekti lõpetanud. Samuti peavad nad hindama projektide kasutatavust muudes protsessides.
- Must vöö (*black belt*) – sertifitseeritud spetsialistid, DMAIC-projektijuhid, mentorid ja muudatuste agendid. Nende rolliks on ka kõigi osapoolte kaasamine.
- Roheline vöö (*green belt*) kogub informatsiooni, teeb enamuse katseid ja täidab erinevaid ülesandeid kuue sigma rakendamisel. Ta suudab ka iseseisvalt juhtida parendusprojekte. Musta vöö projektidest eristab teda see, et projektid piirduvad pigem ühe tsehhi/protsessiga, probleemid on pigem alt üles tüüpi (strateegiline tähtsus on pigem madal, kuid aitab oluliselt parendada töötajate igapäevast tööd).
- Kollane vöö (*yellow belt*) on kõige madalam aste ametlikus kuue sigma väljaõppe süsteemis. Kollasel vööl on baasväljaõpe ja ta suudab ise väiksemaid probleeme lahendada, kuid tal puudub meeskond ja ta ei vastuta ühegi projekti läbiviimise eest. Paljudes organisatsioonides kollaseid vööd ei õpetatagi, sellisel juhul on roheline vöö n-õ esimeseks tasemeks [10.23, 10.26].

10.6 Juhtimiskvaliteedi hindamine ja kvaliteedi auhinna mudelid

Olemaks konkurentsivõimeline peab iga organisatsioon jälgima nii välis- kui ka sisekeskkonnas (organisatsioonis endas) toimuvaid protsesse. Organisatsioonilise täiuslikkuse ja kvaliteedi auhinna mudelid aitavad organisatsioonidel end hinnata, kõrvutada saavutatud tulemusi mudeli maksimumiga, võrrelda enda tulemusi teiste organisatsioonidega ning seeläbi leida teid parendusteks. Kõige tuntumad kvaliteediauhinna mudelid on Demingi kvaliteediauhinna mudel (Jaapan), Malcolm Baldrige'i kvaliteediauhinna mudel (USA) ja EFQM-i mudel (Euroopa), mis on tihti ka aluseks rahvuslikele kvaliteediauhindade mudelitele.

10.6.1 EFQM-i täiuslikkuse mudel (*EFQM excellence model*)

EFQM-i täiuslikkuse mudel näitab, kuidas tegevused ja tulemused on omavahel seotud ning milline on nende vastastikune mõju. See mudel võimaldab välja tuua organisatsiooni tugevused ja parendusvõimalused. Mudeli rakendamine võimaldab organisatsioonidel end võrrelda teiste organisatsioonidega. EFQM-i täiuslikkuse mudel (vt sele 10.9) võimaldab organisatsioonidel mõista põhjus-tagajärg seoseid tulenevalt sellest, mida organisatsioon teeb ja mis tulemusi saavutab.



© 1999 – 2003 EFQM

Sele 10.9. EFQM-i täiuslikkuse mudel [10.15]

Mudeli aluseks on PDCA-tsükkel. EFQM-i täiuslikkuse mudel põhineb 9 kriteeriumil, millest viis on võimaldajad ja neli tulemused.

- Võimaldajad:
 - eestvedamine;
 - töötajad;
 - strateegia;
 - partnerlus ja ressursid;

- protsessid, tooted ja teenused.
- Tulemused:
 - töötajatega seonduvad tulemused;
 - klientidega seonduvad tulemused;
 - ühiskonnaga seonduvad tulemused;
 - toimivuse võtmetulemused.

EFQM-i täiuslikkuse mudelit võib rakendada ükskõik millises organisatsioonis olenemata selle tegevusalast ja suuruselt. Selle mudeli alusel on välja töötatud hindamis- ja tunnustuskeem, mis võimaldab saada informatsiooni organisatsiooni juhtimiskvaliteedi seisundi kohta. Rohkem infot EFQM-i täiuslikkuse mudeli ning hindamis- ja tunnustuskeemi kohta on EFQM-i kodulehel [10.27] ja Eesti Kvaliteediühingu koduleheküljel [10.15].

10.6.2 Eesti tunnustuskeem Eesti Pärl

Eestis on alates 2015. aastast kasutusel tunnustuskeem Eesti Pärl. Eesti Kvaliteediühing pakub aasta läbi erinevate sektorite organisatsioonidele võimalust juhtimiskvaliteedi taseme hindamiseks, mille eesmärk on toetada, innustada ja tunnustada neid avaliku, erasektori ja kolmanda sektori organisatsioone, kes on orienteeritud väljapaistvate tulemuste saavutamisele oma organisatsiooni terviklikul ja süstemaatilisel arendamisel. Esmalt viib organisatsioon läbi enesehindamise EFQM-i täiuslikkuse mudeli kriteeriumide alusel nii võimaldajate kui ka tulemuste lõikes, analüüsides organisatsiooni tulemusi ja tegevusi nende tulemuste saavutamiseks. Lisaks enesehindamisele viiakse läbi organisatsiooni juhtimiskvaliteedi välishindamine organisatsiooni tegevusvaldkonnast sõltuvalt moodustatud 2–3-liikmelise ekspertide (assessorite) meeskonna poolt. Sõltuvalt välishindamise tulemustest saab organisatsioon taotleda saavutatud juhtimiskvaliteedi taseme osas tunnustust:

- Eesti Pärl III – suurepäraselt juhitud organisatsioon: 500+;
- Eesti Pärl II – eeskujulikult juhitud organisatsioon: 400+;
- Eesti Pärl I – hästi juhitud organisatsioon: 300+.

Juhtimiskvaliteedi hindamise kasu ettevõttele:

- võimalus õppida tundma ja kasutama rahvusvaheliselt tunnustatud täiuslikkuse mudelit ja hindamismetoodikat ning selle abil analüüsida süsteemselt ja terviklikult oma organisatsiooni toimivuse taset ja arengupotentsiaali;
- tõsta oma organisatsiooni jätkusuutlikkust ja konkurentsivõimet ning suurendada võtmehuvipoolte rahulolu;
- kaasata oma töötajaid organisatsiooni juhtimise analüüsi ja arengu kavandamisesse ning seeläbi tugevdada organisatsioonikultuuri;
- saada sõltumatute ekspertide poolt objektiivne välishinnang oma organisatsiooni juhtimiskvaliteedi taseme kohta;
- võimalus võrrelda oma organisatsiooni täiuslikkuse taset teiste Eesti organisatsioonidega ja õppida nende kogemustest;

- saada positiivset avalikku tunnustust ja tähelepanu oma saavutuste eest organisatsiooni jätkusuutlikul arendamisel [10.15].

10.7 Tasakaalus tulemuskaart

Tasakaalus tulemuskaart (*balanced scorecard*, BSC) on strateegiline juhtimissüsteem (mitte ainult mõõtmissüsteem), mis võimaldab organisatsioonil selgitada oma missiooni ja strateegiat ning üle kanda need ka tegevusse. See valmistab ette tausta nii sisemiste protsesside (*internal business processes*) kui ka väliste tagajärgede (*external outcomes*) järjepidevaks strateegilise tulemuslikkuse tõestamiseks. Tasakaalus tulemuskaardi väljatöötamisel pöörasid Kaplan ja Norton erilist tähelepanu strateegilise planeerimise teadvustamisele keskse protsessina organisatsioonis [10.28]. Tasakaalus tulemuskaart annab ettevõttele võimaluse monitoorida oma tegevuse võtmenäitajaid (*key performance indicators*, KPI).

Tasakaalus tulemuskaardi mudel jagab strateegilised eesmärgid nelja kategooriasse:

- 1) finantsaspekt;
- 2) kliendiaspekt;
- 3) sisemiste protsesside aspekt;
- 4) õppimis- ja arenguaspekt.

Iga aspekti juures tuuakse välja eesmärgid, nende täitmiseks kasutatavad näitajad, soovitud sihtväärtused (sihtväärtusest tuleb juttu allpool) ning konkreetsete tegevused, mis peaksid aitama eesmärki täita. Tasakaalus tulemuskaardi erinevus senistest mudelitest seisneb eeskätt keskendumises strateegilistele eesmärkidele. Teine täiendus seisneb eesmärkide ja näitajate omavahelises tasakaalustatuses. Kolmandaks tunnuseks, mis tasakaalus tulemuskaarti teistest meetodikatest eristab, on keskendumine eesmärkide ja näitajate vahelisele põhjus-tagajärg seostele. Tasakaalus tulemuskaarti võib pidada eesmärgipärase juhtimise (*management by objectives*) edasiarenduseks, mis lubab täita lüngad strateegilise ja operatiivse juhtimise vahel. Teiselt poolt võimaldab tulemuskaardi väljatöötamine kaasata töötajaid aruteludesse ettevõtte eesmärkide teemal ning viia reatöötajateni arusaam, kuidas just nende töö aitab kaasa visiooni saavutamisele [10.29].

10.8 Süstematiseeritud juhtimissüsteemide juurutamise kasu

Kvaliteedijuhtimissüsteemi väljatöötamise ja juurutamise põhjuseid võib olla mitmeid. Peamised põhjused on alljärgnevad:

- varieeruvuse vähendamine või kontrollitud piires hoidmine ja vigade tekkevõimaluste vähenemine ning seeläbi ettevõtte tulemuslikkuse ja tootlikkuse paranemine;
- suurem tähelepanu eesmärgipärasele juhtimisele;
- suurem tähelepanu klientide nõuetele ja vajadustele ning nende rahuldamise tähtsusele;
- toodete ja teenuste kvaliteedi saavutamine ja säilitamine, nii et need vastaksid klientide ootustele ja vajadustele;

- klientide rahulolu suurendamine;
- ettevõtte usaldusväärsuse suurenemine;
- ettevõtte maine paranemine;
- uute turustusvõimaluste avamine või turuosa säilitamine;
- võimalus konkureerida samadel alustel muude organisatsioonidega (näiteks hangetes osalemisel);
- ettevõtte pidev areng ja protsesside paranemine;
- ressursside kasutamise optimeerimine, raiskamise vältimine, kulude kokkuhoid.

Peale eelnevate võib keskkonnajuhtimissüsteemi juurutamisest saadava kasuna nimetada järgmist:

- teadlikkus ettevõtte tegevusest tulenevatest võimalikest keskkonnaohtudest ning teadvustatud tegevus võimalike keskkonnakahjustuste vältimiseks;
- väiksemad kulud kindlustusele, keskkonnanõuete täitmata jätmise tõttu saadud trahvidele jms.

Töötervishoiu ja -ohutuse juhtimissüsteemi kasuna võib täiendavalt eelnevale nimetada järgmisi põhipunkte:

- tähelepanu pööramine töötajate tervisele ja ohutusele, võimalike kutsehaigestumisi ja tööõnnetusi põhjustavate riskide teadvustamine ja kõrvaldamine;
- tööõnnetuste ja kutsehaigestumiste ennetamine;
- parem töökeskkond, motiveeritumad töötajad;
- väiksemad kulud töötervishoiu ja tööohutuse nõuete täitmata jätmise tõttu saadavatele trahvidele.

Samas tuleb meeles pidada, et kvaliteedi-, keskkonna-, töötervishoiu ja -ohutuse juhtimissüsteem on eelnimetatud eesmärkide saavutamise vahend, mitte aga ise lõppeesmärk. Juhtimissüsteem võimaldab süstemaatilist lähenemist, et saavutada ettevõtte eesmärgid.

Kordamisküsimused

1. Mida mõistetakse kvaliteedi all?
2. Mida kujutab endast kvaliteedijuhtimissüsteem?
3. Mis vahe on kvaliteedijuhtimissüsteemide standarditel ja tootestandarditel?
4. Millised on kvaliteedijuhtimissüsteemide standardite rakendamise peamised eelised ja puudused? Põhjendage oma arvamust.
5. Mida tähistab CE-märgistus tootel?
6. Millised on peamised sammud, mis tuleb läbi teha, et tootele saada CE-märk?
7. Millist kasu annab organisatsioonidele süstematiseeritud lähenemine kvaliteedijuhtimisele?
8. Nimetage terviklikule kvaliteedijuhtimisele iseloomulikke jooni.
9. Nimetage kuue sigma rakendamise peamised eelised ja puudused.
10. Milles seisneb juhtimiskvaliteedi hindamise ja kvaliteediauhinna mudelite olemus?

Viited

- [10.1] <https://www.quality.org/article/what-quality>
- [10.2] Saad, R. Aastate suurim skandaal automaailmas, Äripäev, 23.010.2015 (<http://www.ari-paev.ee/uudised/2015/09/23/automaailma-aastate-suurim-skandaal>)
- [10.3.] ISO 9001 väikeettevõtetele. Mida teha – nõuandeid tehniliselt komiteelt ISO/TC 176. Eesti Standardikeskus 2003
- [10.4.] ISO 9001:2015. Kvaliteedijuhtimissüsteemid: nõuded
- [10.5.] ISO 9000:2015. Kvaliteedijuhtimissüsteemid: alused ja sõnavara
- [10.6.] International Organization for Standardization – ISO kodulehekülg, www.iso.org
- [10.7.] Eesti Standardikeskuse kodulehekülg, www.evs.ee
- [10.8.] EVS-EN ISO 9004:2009 Organisatsiooni juhtimine püsiva edu saavutamiseks: Kvaliteedijuhtimise lähenemisviis
- [10.10.] Kvaliteedijuhtimise põhimõtted, <http://www.iso.org/iso/pub100080.pdf>
- [10.11.] Moora, H. Keskkonnajuhtimine avalikus sektoris. Juhendmaterjal keskkonnajuhtimissüsteemi rakendamiseks avaliku sektori organisatsioonides. Säästva Eesti Instituut, Stockholmi Keskkonnainstituudi Tallinna Keskus (SEI Tallinn), Tallinn, 2013. http://www.envir.ee/sites/default/files/keskkonnajuhtimine_avalikus_sektoris.pdf
- [10.12.] EVS-EN ISO 14001:2015 Keskkonnajuhtimissüsteemid: Nõuded koos kasutusjuhistega
- [10.13.] EVS 18001:2007 Töötervishoiu ja tööohutuse juhtimissüsteemid
- [10.14.] Töötervishoiu ja tööohutuse seadus (RT I 1999, 60, 616), <https://www.riigiteataja.ee/akt/117122015101?leiaKehtiv>
- [10.15.] Eesti Kvaliteediühingu kodulehekülg, www.eaq.ee
- [10.16.] Bureau Veritas Eesti OÜ kodulehekülg, www.bureauveritas.ee
- [10.17.] EVS-EN 45020:2008 Standardimine ja standardimisega seotud tegevused. Põhisõnavara
- [10.18.] Tehnilise Järelevalve Ameti kodulehekülg, <http://www.tja.ee/ce-margitus/>
- [10.19.] www.ohutus.ee
- [10.20.] Euroopa Komisjoni koduleht, CE-märgis http://ec.europa.eu/growth/single-market/ce-marking_en
- [10.21.] Toote nõuetele vastavuse seadus (RT I 2010, 31, 157), <https://www.riigiteataja.ee/akt/101072016014?leiaKehtiv>
- [10.22.] Oakland, J. S. Terviklik kvaliteedijuhtimine. Külüm, 2006
- [12.23.] Pande, P. S., Neuman, R. P., Cavanagh, R. R. Kuue sigma tee: Kuidas GE, Motorola jt tip-ettevõtted oma sooritusi lihvivad. Pegasus Äriraamat, 2002
- [12.24.] EVS-ISO 13053-1:2015 (ISO 13053-1:2011) Kvantitatiivsed meetodid protsessi parendamises. Kuus sigmat. Osa 1: DMAIC-metoodika
- [12.25.] EVS-ISO 13053-2:2016 (ISO 13053-2:2011) Kvantitatiivsed meetodid protsessi parendamises. Kuus sigmat. Osa 2: Vahendid ja tehnikad
- [12.26.] Mis on kuus sigmat? <http://www.slideshare.net/kvaliteedijuhtimine/kuus-sigmat>

- [12.27.] EFQM koduleht www.efqm.org
- [12.28.] Kaplan, R. S., Norton, D. P. Strategy Maps: Converting Intangible Assets into Tangible Outcomes. Harvard Business School Press, 2004
- [12.29.] Sakkeus, J. Tasakaalus tulemuskaart – 10 aastat Eestis! Director Meedia, märts 2008.
<http://www.director.ee/tasakaalus-tulemuskaart-10-aastat-eestis/>

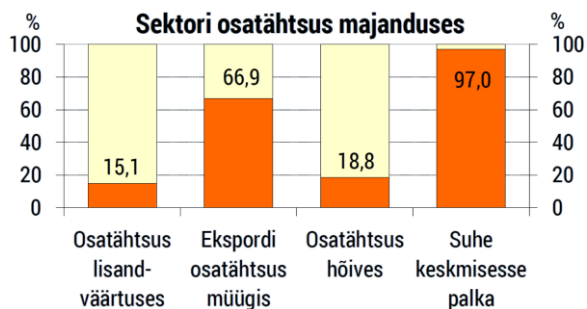
11. TOOTMISE ARENGUTRENDID

EL-i töötleva tööstuse arenguid prognoosib tehnoloogiaplatvorm Manufuture (www.manufuture.org), mis ühendab nii suurfirmade, ülikoolide ja teadusinstituutide kui ka riiklike initsiatiivgruppide esindajaid. Manufuture kavandatud tööstuse teekaart Manufuture Roadmap 2020 oli aluseks ka Euroopa Komisjoni uute rahastusmeetmete väljatöötamisele. Selle tehnoloogiaplatvormi kaudu kogub Euroopa Komisjoni teadusosakond sisendit uute programmide teemaatikate vajaduse kohta, üle aastal toimub EK rahastatav Manufuture konverents ka EL-i eesistujamaal, 2017 toimus see Eestis (2013 toimus Manufuture konverents Leedus, 2015 Luksemburgis, www.manufuture2017.eu). Konverentside kodulehtedel on arvukalt uuringuid, tippspetsialistide videoettekandeid ja esitlusmaterjale, mis on hästi segmenteeritud:

- MANUFUTURE 2005: Making it in Europe December 6-7, 2005, Rolls-Royce, Derby, UK <http://www.manufutureuk2005.org.uk/>;
- MANUFUTURE 2007: Constructing a Sustainably Competitive Europe December 2-4, 2007, Porto, Portugal <http://manufuture2007.inescporto.pt/>;
- MANUFUTURE 2009: Implementation of a Sustainable European Manufacturing Industry Nov 30-Dec 1, 2009, Göteborg, Sweden <http://www.manufuture2009.eu/>;
- MANUFUTURE 2011: West and East Europe in global High Added Value Manufacturing October 24-45, 2011, Wroclaw, Poland <http://www.manufuture2011.eu/>;
- MANUFUTURE 2013: View on Horizon 2020: sustainable re-industrialisation of Europe October 6-8, 2013, Vilnius, Lithuania <http://www.manufuture2013.eu/>;
- MANUFUTURE 2015: STRATEGIC INVESTMENTS IN EUROPEAN MANUFACTURING TO RISE TO GLOBAL CHALLENGES November 23-24, 2015, Luxembourg <http://www.manufuture2015.eu/>.

Manufuture tehnoloogiaplatvormist on välja kasvanud ka Euroopa Tuleviku Tehaste Uurimisassotsiatsioon EFFRA (European Factories of the Future Research Association), mis on oluline tööstusettevõtete ja tehnikaülikoolide ühendus <http://www.effra.eu/> ja mis kogub oma liikmetelt tagasisidet tulevate eelnõude, poliitika ja rahastusmeetmete kohta, näiteks aastal 2015 uuriti 5G arenduste mõju tööstusele. Teema on oluline, kuna tööstusuuringuteks eraldatav rahastus on aasta-aastalt läbi H2020 meetme kasvanud.

Eesti töötlevas tööstuses tegutseb umbes 6000 ettevõtet, enamik neist on väikese ja keskmise suurusega. Seel 11.1 on toodud töötleva tööstuse peamised näitajad 2015. aastal.



Sele 11.1 Töötleva tööstuse osatähtsus majanduses 2015 (allikas: Statistikaamet)

Tööstuse arengus on maailmas aktuaalsed kolm põhiteemat (vt sele 11.2), mis loovad võimaluse liikuda väärtusahelas ülespoole:

- 1) digitaalne tootmine ja tööstus 4.0;
- 2) uued tehnoloogiad ja innovatsioon;
- 3) energia- ja ressursisäästlik tootmine.

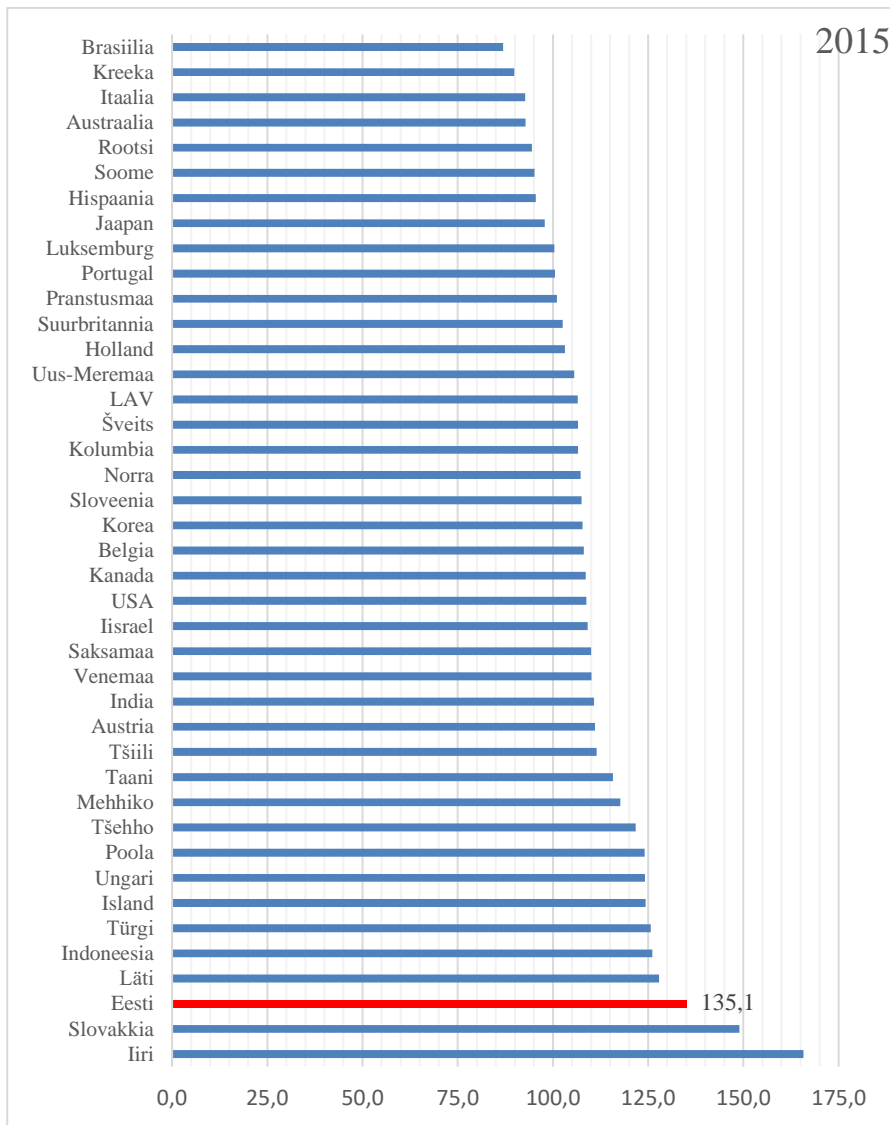
Neid teemasid läbivad horisontaalselt:

- suuremat väärtust loovad oskused;
- juurdepääs rahastusele;
- uued ärimudelid;
- parem õigusloome.



Sele 11.2 Tööstuse arengus olulised teemad

Maailma majanduses on Eesti töötlev tööstus olnud OECD statistika andmetel kiiremini kasvava toodangu esikolmikus (Iiri ja Slovakkia järel kolmandal kohal, vt sele 11.3).



Sele 11.3 OECD riikide võrdluses tootmisindeks a-l 2015, kus 2010 on referentsaasta, (allikas: OECD: Production and Sales (MEI) <http://stats.oecd.org/index.aspx?queryid=90#>)

2015. aastal loodi Majandus- ja kommunikatsiooniministeeriumi juures esmakordselt töörühm Eesti tööstuspoliitika Rohelise raamatuloomiseks. Ümarlauda kutsuti olulisemad erialaliidud (Eesti Plastitööstuse Liit, Eesti Masinatööstuse Liit, Toiduliit, ITL).

Industry 4.0 ehk tööstus 4.0 on neljas tehnikarevolutsioon, kus tootmise arvutiseerimise ja IT lahenduste horisontaalse integreerimisega saavutatakse tootlikkuse hüppeline kasv. Selle olulisteks etappideks on tehnoloogiaseadmete ühilduvuse loomine süsteemidesse, struktuuriüksustesse, tehnoloogiliste protsesside virtualiseerimine ja eelnev arvutisimulatsioon. Olulisteks märksõnadeks on detsentraliseeritus – alamsüsteemidel on oma nutikus, s.t otsustuste tegemise võimekus; reaalaajalisus – protsessid on reaalaajas juhitavad ja monitooritavad (praktikas sai see teoks 5G mobiilsidevõrkude tulekuga Eestis juba 2018); teenusepõhisus (pakutakse lisaväärtust teenustena, mis kättesaadavad interneti vahendusel); modulaarsus (tuleviku nutikad tootmised on lihtsalt ümberkonfigureeritavad, mis võimaldab vajadusel tootmist üles või alla skaleerida ning vajalike toodete väljalaset kiirelt muuta).

Eestis on TTÜ algatanud nutika tootmise (tööstus 4.0) tuumiktaristu, mis koondab tulevikus endasse valdkonna teadus- ja arendustegevusega seotud hajasstruktuurid (*distributed infrastructure*) Tallinna Tehnikaülikoolis ja Eesti Maaülikoolis mehaanika, masinaehituse, automaatika, mehhatroonika, materjaliteaduse ja -tehnoloogia ning infotehnoloogia vallas. Luuakse uus teadus- ja arenduse virtuaalne üksus Smart Industry Centre (SmartIC), et koostöö ja turunduse ning ühtselt määratletud teenuste kaudu suurendada märkimisväärselt nutika tootmise valdkonna teadustööd, infrastruktuuride riskasutamist nii Eestis (ülikoolid ja koostööpartnerid) kui ka rahvusvaheliselt (T&A koostööprojektid, rakendusuuringud rahvusvaheliste ettevõtetega nt lennunduse, autotööstuse, laevanduse jm vallas). Keskuse loomise ajendiks on Eesti majanduse ja tööstuse hetkeseis – odavama hinnaga ja madalamate oskustega allhanketöödele on vaja aina rohkem juurde luua suuremat lisandväärtust ja innovatsiooni loovat kõrgtehnoloogilist tootmist. Eestil ei ole enam odava tootmismaa eelist. Selleks peavad aga ka ülikoolid selget suunda näitama, olema tööstusele võimekamaks partneriks inseneeria valdkonna T&A ja innovatsiooni osas, oma teadus- ja õppetööks vajaminevaid seadmeid uuendama ja tööstuse jaoks tippspetsialiste ette valmistama.

Nutika tootmise tuumiktaristu – Smart Industry Centre (SmartIC) – loomisega toetatakse teadlaste oskusi kõrgtehnoloogia, nutika tootmise ja infotehnoloogia lõimimisel ning sellealast teadustööd koostöös tööstusettevõtetega Eestis ja mujal maailmas. Keskuse loomisega tagatakse ligi kümne erineva struktuuriüksuse kindlate teenuste lõikes fokuseeritud kokku viimine, koostöö, infrastruktuuride riskasutus ning uus tehnoloogiline tase (uued seadmed) ja seeläbi võimekus osaleda suuremates rahvusvahelistes T&A projektides (Horizon 2020) ning allhangetes, mis eeldavad teadustööd (peamiselt rakendusteadus ja -uuringud, testimine, katsetamine jne). Taristu loob tehnoloogilise suutlikkuse pakkuda lisaväärtust kosmose tööstusele (sh koostöö arendamine Euroopa Kosmoseagentuuriga) ning arendada koostööd Euroopa Tuumauuringute Keskusega (CERN). CERN ostab oma partneritelt kiirendi jaoks kõrgtehnoloogilisi detaile osalustasu ulatuses, nt Soome on olnud edukas, saades CERN-ilt rohkem tellimusi (sh katsetamine, kiirprototüüpimine, materjalide uurimine jne), kui on sinna sisse maksnud. Luues uue tehnoloogilise taseme ning tagades koostöö, aitab SmartIC luua eeldusi ka Eestile (ülikoolid koostöös teadusasutustega) CERN-iga koostööks. Sarnased ülikoolikesksed nutikale tootmisele keskenduvad teaduskeskused on rajatud paljudesse ülikoolidesse, nt Chalmersi Ülikoolis on Smart Industry Lab, Smart Manufacturing

Platform MIT's, Centre for Smart Manufacturing Cambridge's, Industrial Internet Campus Aalto Soomes jne, mis on koondatud juhtimisstruktuuri kaudu partneriks nii teenuste osutamisel kui Horisont 2020 projektides osalemiseks.

Tehnoloogilised protsessid on arvjuhitavad ja eelnevalt raalsimuleeritavad. Paiknemine Tallinnas/Tartus võimaldab teha teadustööd nende seadmetega võrdselt mõlemas ülikoolis/regioonis. Protsesse (kõrgtehnoloogiamaterjalide nagu supersulamid, metallmaatriks komposiidid, titaani baasil komposiidid, 3D-printimine ja saadud katsekehade/prototüüpide kompuutertomograafiline analüüs) saab eelnevalt arvutis simuleerida, kavandada eksperimente ning nende läbiviimist juhtida ja kontrollida ning dokumenteerida. Seadmed ühendatakse süsteemi teiste TTÜ ja EMÜ arvjuhitavate CNC-pinkide ja FMS-süsteemidega, mis võimaldab uurida eri tehnoloogiaseadmete hübriidsust, ümberkonfigureeritavust ja kasutada neid tehnoloogilises ahelas.

Eesti on oma eesmärgid tööstuse arendamisel kätkenud järgmistesse dokumentidesse.

- Eesti 2020 [11.2] – konkurentsivõimeline ettevõtluskeskkond (sh tootlikkuse tõstmine ühe hõivatu kohta), haritud rahvas ja sidus ühiskond, keskkonnasõbralik majandus ja energeetika.
- Eesti teadus- ja arendustegevuse ning innovatsiooni strateegia 2014–2020 „Teadmispõhine Eesti“ [11.3] märgib, et teadus- ja arendustegevuse ning innovatsiooni arendamise üldeesmärk on luua soodsad tingimused tootlikkuse ja elatustaseme kasvuks, heaks hariduseks ja kultuuriks, Eesti kestmiseks ja arenguks.
- Eesti Regionaalarengu strateegia 2014–2020 [11.4] seab eesmärgi: eesmärk 2: suuremate linnapiirkondade rahvusvahelist majanduslikku konkurentsivõimet soosiv ja keskkonnasõbralik elukeskkond; eesmärk 1: toimepiirkondade terviklikkust ja konkurentsivõimet soosiv elu- ja ettevõtluskeskkond (koostöö tööstusettevõtetega piirkondades, nagu Ida-Virumaa, Lääne-Virumaa jt).
- Eesti Ettevõtluse Kasvustrateegia 2014–2020 [11.5] märgib, et tuleb tõsta tootlikkust töötaja kohta EL-i keskmisega võrreldes 80%-ni, sh teadus- ja arenduse ning innovatsiooni kaudu, samuti viitab, et edasiarendatavad kasvualad toetavad IKT lõimimist horisontaalselt teistes sektorites (tööstuses) ja seeläbi ka ressursside efektiivsemat kasutamist.
- Infoühiskonna arengukava 2014–2020 [11.6] seab üheks alameesmärgiks rohkem kõrgema lisandväärtusega töökohti, suurem rahvusvaheline konkurentsivõime ja kõrgem elukvaliteet inimeste IKT-oskuste tõusu kaudu; toetades IKT horisontaalset lõimimist tööstuses.

Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi tööstuspoliitika roheline raamatu 2016. a eelnoo märgib tööstuspoliitika eesmärkideks:

- tööstuse lisandväärtuse tõstmine EL28 keskmisest >60%;
- tööstuse osakaal SKP-st on vähemalt 20% ja
- ekspordi osakaal tööstustoodangust on >70%.

ESFRI objektidest on Eesti tööstusel oluline projekt ESS (European Spallation Source) – Euroopa neutronkiirguse allikas, pakkudes tulevikus koostööd kõrgtehnoloogiliste detailide ja toodete arendamisel ESS-i ülesehitamisel ja arendamisel, mis võimaldab täielikult integreeritud koostööd kõikide liikmesriikide arendusasutuste ja tiipsemel T&A suutlikkusega tööstuspartneritega. ESS avati aastal 2019 ning kõik selle 22 katsejaama Euroopa Liidus panakse tööle aastaks 2025. Keerukas ESS-i ehitusprojekt toimub lepingu alusel (käesolevaks hetkeks on saavutatud 20% versta-postidest ehk saavutatud ehitustöödest) [11.7]. Selle teadusaparatuuri jaoks vajalikke seadmeid ja detaile tellitakse partnerriikidelt, eelduseks on kompetents ja tehnoloogiad kõrgtehnoloogiliste detailide ja toodete arendamiseks ja valmistamiseks. Eestil on võimalik osamaksu neutronkiirgusallika ehitusse tasuta rahaliste ja mitterahaliste (*in-kind*) panustena (kuni 50–70% ulatuses osamaksust). Eesti ettevõtetel avaneb võimalus panustada Eesti teadlaste projektidesse neutronkiirgusallika ehituseks vajalike seadmete ehitamisel. Eesti ettevõtted võivad konkureerida European Spallation Source ERIC hangetel. Mitterahalised panused eeldavad sobivaid projekte, mille tulemusi saab kasutada neutronkiirguse allika ehitusel [11.8]. Võimalik koostöö ESS-iga on loomulikult Eesti tööstusele väga suur väljakutse.

Eestile on oluline ka tehnoloogiline suutlikkus pakkuda koostöös ettevõtetega teenuseid ja innovaatilisi lahendusi Euroopa Kosmoseagentuurile. 2015. aasta sügisel avas Euroopa Kosmoseagentuur (ESA) ainult Eesti ettevõtetele ja teadlastele suunatud pakkumise, millega ostetakse kuni kolme miljoni euro eest riistvara, rakendusi, teenuseid ja teadussaavutusi, et Eesti ettevõtjad ja teadlased saaksid harjutada ESA Euroopa kosmosehangetel osalemist, ilma et nad peaks konkureerima teiste riikide ettevõtetega.

Tööstusele on avanenud võimalus ka arendada koostööd Euroopa Tuumauuringute Kesksel (CERN). CERN ostab samuti oma partneritelt kiirendi jaoks kõrgtehnoloogilisi detaile osalustasu ulatuses, nt Soome on olnud edukas, saades CERN-ilt rohkem tellimusi (sh katsetamine, kiirprototüüpimine, materjalide uurimine jne), kui on sinna sisse maksnud.

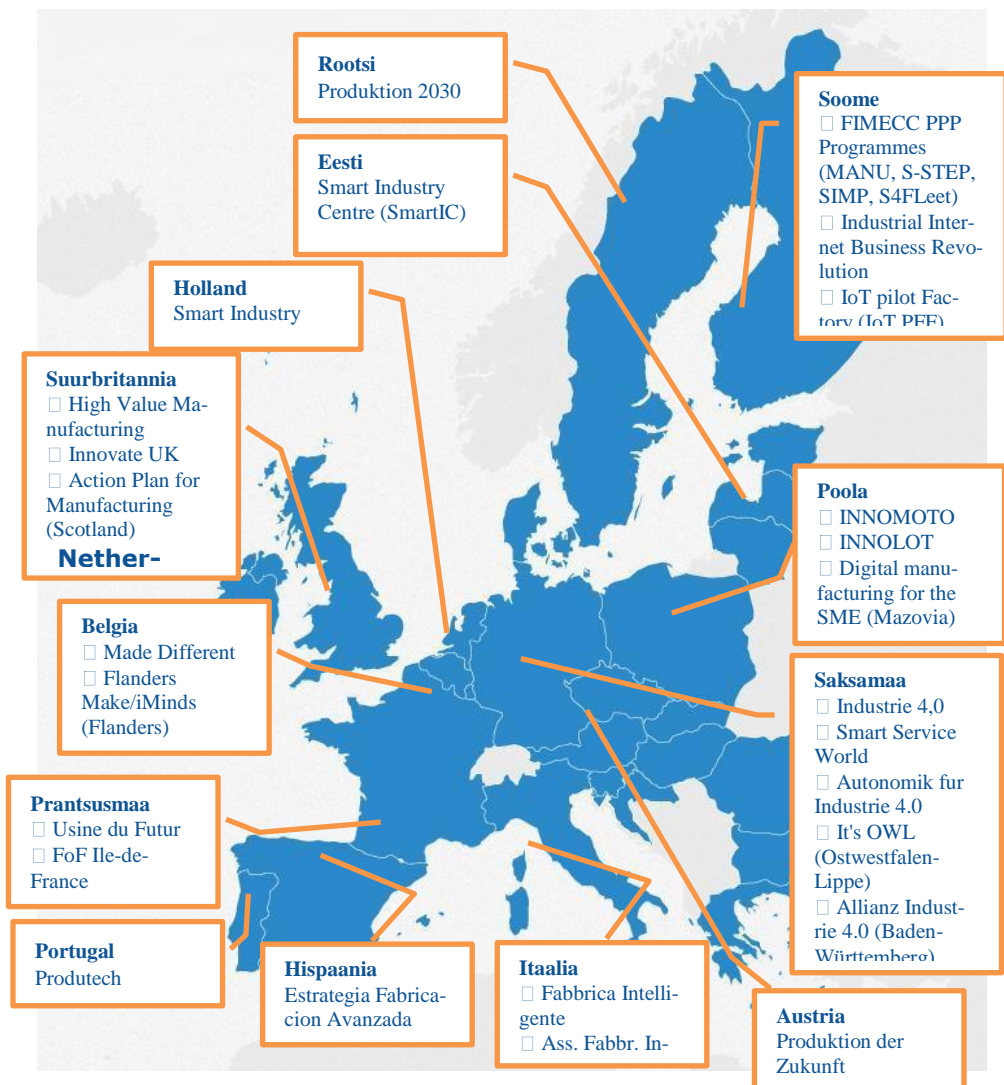
Euroopa liidus on rida üleeuroopalikke initsiatiive:

- PPP taotlusvoorud: FoF, SPIRE;
- I4MS;
- Smart Anything Everywhere;
- ICT PPP.

Regiooniüleised initsiatiivid:

- Vanguard.

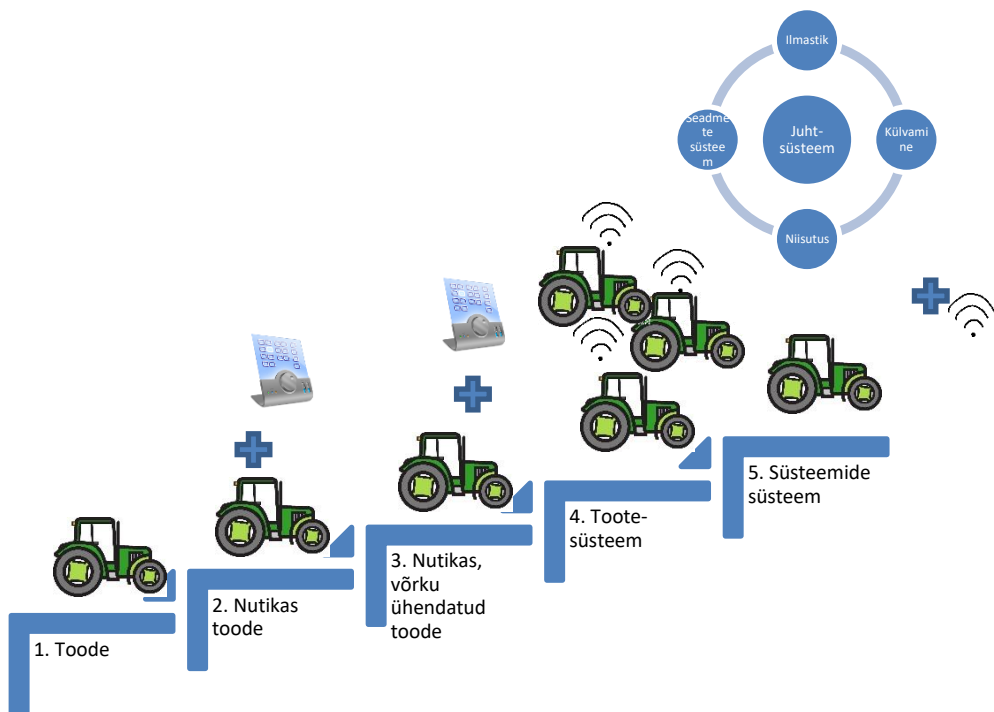
Seel 11.4 on toodud olulisemad riiklikud digitaalse tootmise algatused



Sele 11.4 Digitaalse tootmise riiklikud algatused EL-is [11.9]

Selel 11.5 on toodud tootmise/toodete arengud:

- 1) tavatoode, näiteks traktor;
- 2) nutikas toode (nt arvjuhtimisega tööseadmetega traktor);
- 3) nutikas, võrku ühendatud toode (nt veebipõhise diagnostikaga traktor);
- 4) tootesüsteem, nt farmiseadmete süsteemi ühendatud nutitraktorid ja -kombainid moodustavad farmiseadmete süsteemi;
- 5) süsteemide süsteem (nt farmijuhtimissüsteemi kuulub farmiseadmete süsteem, külvioptimeerimissüsteem, niisutussüsteem, ilmastiku andmesüsteem, mis saab andmeid temperatuuri-, niiskuse- vihmaanduritest).



Sele 11.5 Tööstuse piiride muutumine [11.10]

Viited

- [11.1] Kas Eestile on üldse tarvis odavat tööjõudu kasutavaid tööstusi // Ärileht (17.02.2016) <http://arileht.delfi.ee/news/uudised/kas-eestile-on-uldse-tarvis-odavat-toojoudu-kasutavaid-toostusi?id=73711373> (13.07.2016)
- [11.2] <https://riigikantselei.ee/et/eesti-2020-eesmargid> (13.07.2016)
- [11.3] <https://www.riigiteataja.ee/aktiis/3290/1201/4002/strateegia.pdf#> (13.07.2016)
- [11.4] https://valitsus.ee/sites/default/files/content-editors/arengukavad/eesti_regionaalarengu_strategia_2014-2020.pdf (13.07.2016)
- [11.5] https://valitsus.ee/sites/default/files/content-editors/arengukavad/eesti_ettevotluse_kasvustrategia_2020.pdf (13.07.2016)
- [11.6] https://www.mkm.ee/sites/default/files/elfinder/article_files/eesti_infouhiskonna_arengukava.pdf (13.07.2016)
- [11.7] <https://europeanspallationsource.se/article/ess-passes-20-completion-milestone-site-installations-begin-year> (13.07.2016)
- [11.8] SELETUSKIRI Vabariigi Valitsuse korralduse Taotluse esitamine Euroopa neutronkiirguse allika ERIC (European Spallation Source ERIC) asutamiseks ja riigi liikmeõiguste teostaja määramine eelnõu juurde. <https://www.riigiteataja.ee/eelnoud/menetluskaik/HTM/14-1405> (13.07.2016)
- [11.9] Overview of Digital Manufacturing, Initiatives across Europe, European Commission <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/european-co-operation-innovation-digital-manufacturing> (13.07.2016)
- [11.10] Porter, M. E. & Heppelmann, J. E. How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. Harvard Business Review, Nov 2014.

Kasutatud terminid

Vt Termeki [Tootmistehnika ja -süsteemide terminibaas](http://term.eki.ee/termbase/view/5812536/)
<http://term.eki.ee/termbase/view/5812536/>

Termin eesti keeles	Termin inglise keeles	Lühend
(kaar)keevitus	saw	
(programmeerimis)keel	<i>cutter location data</i>	CLData
(tootmistsükli kestus)/tellimuse täitmise aeg	<i>throughput time</i>	
20 võtme programm	<i>20 key program to workplace improvement</i>	
3D printimine	<i>3D printing</i>	
4 ja enama koordinaadiga töötlemine	<i>multi-axis manufacturing</i>	
5 Miksi - kulusäästlik kontseptsioon	<i>5 whys to explore the cause and effect relationship</i>	
5S kulusäästliku tootmise meetod	<i>5S workplace organization</i>	
8D kulusäästliku meeskonnatöö kontseptsioon	<i>team oriented problem solving</i>	TOPS
8D kulusäästliku meeskonnatöö kontseptsiooni tsükkel / ühtne standardi ülesehitus	<i>plan do check act</i>	PDCA
abistatud survevaluvormimine	<i>assisted injection moulding</i>	
abrasiivveejugatõtlus	<i>abrasive water jet cutting</i>	
aegread	<i>time series</i>	
ajaplaani koostamine	<i>scheduling</i>	
ajastatud tootmine/varudeta tootmine	<i>just in time</i>	JIT
alates 2000-ndate a algusest on kombineeritud kuue sigma põhimõtteid kulusäästliku tootmisega	<i>learn six sigma</i>	
allhangete tellimine	<i>sub-contracting</i>	
alt-üles töötava tootmise juhtimissüsteemi realisatsioon	<i>constant work in process</i>	CONWIP
analüüs lahenduse lõpust lahendusprotsessi algusesse	<i>bottom-up analysis</i>	
analüüs, variatsiooni ja raiskamise peamiste juurpõhjuste leidmine (DMAIC-mudel)	<i>analyse</i>	
andmete analüüs ja kasutajale suupäraseks tegemine	<i>back-end activities</i>	
andmete ettevalmistamine	<i>front-end activities</i>	

andmete kogumise ja jälgimise süsteem/tootmise järelevalve ja andmehõive süsteem	<i>supervisory control and data acquisition</i>	SCADA
APJ pingi ettevalmistava käsu esitamise kood	<i>g-code</i>	
arvuhtimisega (arvutipõhine) tööpink/arvuhtimisega seade/arvutijuhtimine	<i>computer numerical control</i>	CNC
arvuti abil joonestamise süsteem	<i>computer-aided drafting</i>	
arvutipilv	<i>cloud computing</i>	
arvutipilve põhine ERP-süsteem	<i>cloud ERP system</i>	
arvutipilve põhine projekteerimine ja tootmine	<i>cloud-based design and manufacturing</i>	CBDM
arvutite kohtvõrgud	<i>local area networks</i>	LAN
asjade internet	<i>internet of things</i>	IoT
asjade õigesti tegemine (säästlikkus)	<i>doing the thing right</i>	
automatiseeritud kvaliteedikontroll	<i>computer-aided quality control</i>	CAQ
automatiseeritud materjalide käitlus- ja laosüsteem	<i>automated material handling and storage system</i>	
avardamine	<i>core drilling</i>	
BOM fantoom, tükilehe osa	<i>BOM phantom/ phantom BOM</i>	
defineeri, probleemi kirjeldamine (DMAIC-mudel)	<i>define</i>	
Deneb Robotics Inc tarkvarasüsteem	<i>interactive graphics robot instruction program</i>	INGRIP
detalli paigaldus või nullpunkti korrigeerimine CNC pinkides	<i>zero or fixture offsets</i>	
detalli pinna nurga asendi määramine detaili nullpunkti korrigeerimiseks	<i>fixture offsets</i>	
detalli ristlõike loomine sulatatud termoplastse traadiga joonistades (3D printimine)	<i>fused deposition modelling</i>	
detalli ristlõike loomine sulatatud termoplastse traadiga joonistades (3D printimine)	<i>fused filament fabrication</i>	
detailide haaramine ja paigaldamine	<i>pick and place</i>	
digitaalne mikropeeglite seade	<i>digital micromirror device</i>	
digitaalne otsetootmine	<i>direct digital manufacturing</i>	
digitaalne tootmine	<i>digital manufacturing</i>	
digitaalsed tehased	<i>digital factories</i>	
DMAIC-mudel, viiefaasiline parendamistsükkel	<i>DMAIC-model</i>	
dublantmanipulaator	<i>master-slave manipulator</i>	
dünaamilise partii suuruse määramine	<i>dynamic lot sizing</i>	
eesliini tegevused	<i>front office operations</i>	

eesmärgipärane juhtimine	<i>management by objectives</i>	
efektiivsus	<i>efficiency</i>	
EFQM täiuslikkuse mudel	<i>EFQM excellence model</i>	
eksponentsiaalne mudel	<i>exponential smoothing</i>	
ekstrusioonpuhumisvormimine	<i>extrusion blow moulding</i>	
ekstrusioonvormimine	<i>extrusion moulding</i>	
EL Tehnoloogia platvorm	<i>Manufature European Technology Platform</i>	
elektroerosioontöötlus	<i>electrical discharge machining</i>	
elektrokeemiline töötlus	<i>electrochemical machining</i>	
elektronkiirtöötlus	<i>electron beam machining</i>	
elektropoleerimine	<i>electropolishing</i>	
energia ja materjalide kokkuhoid	<i>conserving energy and materials</i>	
erinev jaotuskeskus	<i>distribution centre</i>	DC
erinevate toodete tootmisele orienteeritud tootmissüsteemi mudelite kasutamine	<i>mixed model production</i>	
eripuur	<i>special drill</i>	
ettenihe: töötlemisrežiimi kirjeldav käsk	<i>feed</i>	F
ettevõtte planeerimine	<i>factory planning</i>	
ettevõtte ressursside planeerimine/sidumine tootmise planeerimisega/äriinfosüsteem	<i>enterprise resource planning</i>	ERP
ettevõtte sisene	<i>back office</i>	
ettevõtte tooteportfelli haldamine	<i>product portfolio management</i>	PPM
ettevõtteväline	<i>front office</i>	
fikseeritud G-tšükkel, kasutatakse programmeerimise lihtsustamiseks sagedasti esinevate töötlemisoperatsioonide programmeerimisel	<i>fixed or canned G code cycles</i>	
fotokeemiline töötlus	<i>photochemical machining</i>	
freesimine	<i>milling</i>	
galvaaniline katmine (elektrolüütiline katmine metalliga)	<i>electroplating, vt ka electrochemical plating</i>	
galvaaniline katmine (elektrolüütiline katmine metalliga)	<i>electrochemical plating, vt ka electroplating</i>	
geomeetria-põhine adaptiivne juhtimine	<i>geometrical adaptive control</i>	
geomeetriliselt vastandlike detailide töötlemise programmeerimisel kasutatav kuju peegeldamise funktsioon	<i>mirrored image</i>	
haaratsid	<i>grippers</i>	
hoonimine	<i>honing</i>	
hõõritsemine	<i>reaming</i>	

häälestusaeg /häälestus- ja seadistusaeg	<i>set up time /set-up time</i>	
hõõveldamine	<i>planing</i>	
inseneriarvutused	<i>computer aided engineering</i>	CAE
interaktiivne programmeerimine toimetamise režiimis	<i>shop floor programming</i>	
investeeringute tootlikkus	<i>return of investments</i>	ROI
ioonkiirtöötlus	<i>ion beam machining</i>	
JIT-süsteemide evitamise lähtepunktideks ja eesmärkideks on seitse nulli	<i>seven zeros</i>	
juhtimine	<i>management</i>	
juhtimise efektiivsuse parendamine	<i>efficiency control</i>	
juhtimise ratsionaliseerimine	<i>management of objectives</i>	
juhuslik FMS	<i>random FMS</i>	
järjestikune FMS	<i>sequential FMS</i>	
kaalutud prioriteetide meetod	<i>weight priority indexes</i>	
kadude vähendamine	<i>eliminating waste</i>	
kammlõikamine	<i>broaching</i>	
kaod praagile jm tehnoloogilised kaod	<i>yield loss</i>	
kasulik tööaeg	<i>uptime</i>	
kasumi tootmine antud ajahetkel ja tulevikus	<i>make more money now as well as in the future</i>	
kaughooldus	<i>remote maintenance</i>	
keemiline töötlus	<i>chemical machining</i>	
keevitusmeetod, põhinedes keevitustraadi liikumissuuna muutmisel	<i>cold metal transfer on Fronius</i>	CMT
keevitusmeetod, põhinedes voolutugevuse pideval jälgimisel ja reguleerimisel kaarleegi erinevates faasides	<i>regulated metal deposition</i>	RMD
keevitusmeetod, voolu tõstmine kahe erineva impulsiga	<i>surface tension transfer</i>	STT
keskkonnajuhtimissüsteem, põhineb EL keskkonnajuhtimise ja -auditeerimise skeemile	<i>eco-management and audit scheme</i>	EMAS
ketasrees	<i>circular mill</i>	
ketassaagimine	<i>circular sawing</i>	
kihtlisandustehnoloogia	<i>additive layer manufacturing, vt ka additive manufacturing</i>	ALT
kihtlisandustehnoloogia	<i>additive manufacturing, vt ka additive layer manufacturing</i>	ALT
kiirprototüüpimine (prototüüpide kiirvalmistus)	<i>rapid prototyping</i>	

kiirtootmine	<i>rapid manufacturing</i>	
kiirus; pöörlemisagedus: töötlemisrežiimi kirjeldav käsk	<i>speed</i>	S
kiirvalmistus	<i>automated fabrications</i>	
kiirvalmistus	<i>solid freeform fabrication</i>	
kiirvalmistus	<i>layer-based manufacturing</i>	
kile puhumine	<i>film blowing</i>	
kinnitusrakis	<i>fixture</i>	
kliendihalduse juhtimine/kliendihaldus	<i>customer relationship management</i>	CRM
kliendikeskne masstootmine/kliendile orienteeritud tootmine	<i>mass customization</i>	
klient	<i>customer</i>	
konstruktiivne tahkkeha modelleerimine	<i>constructive solid geometry</i>	CSG
kontori kesksed tegevused	<i>back office operations</i>	
kontroll, viiside leidmine kuidas parendusi säilitada (DMAIC-mudel) / vahetu ehk operatiivjuhtimise tasand	<i>control</i>	
kontrollmõõtmine töötlemise käigus	<i>in-process control</i>	
koordinaat-mõõtemasinaid	<i>coordinate measuring machines</i>	CMM
Koostamine	<i>assembly</i>	
koostamise alustamine	<i>assembly to order</i>	ATO
koostamisoperatsioon	<i>part mating</i>	
kriitilised edutegurid	<i>critical success factors</i>	CSF
kujufrees	<i>form mill</i>	
kulusäästlik	<i>lean</i>	
kulusäästlik tootmine	<i>lean manufacturing</i>	
kuus sigma rollijaotus: juhtrühm	<i>executive leadership (six sigma)</i>	
kuus sigma rollijaotus: meister mustvöö, kes tegeleb ainult kuus sigma projektidega	<i>master black belt (six sigma)</i>	
kuus sigma rollijaotus: sponsor ehk vedaja, tippjuht ja parendusprojekti järelevalvaja	<i>sponsor (six sigma)</i>	
kuus sigma rollijaotus: tšempion, hoolitseb kuus sigma rakendamise eest organisatsioonis	<i>champion (six sigma)</i>	
kuus sigma: kollane vöö, kõige madalama aste ametlikus kuus sigma väljaõppe süsteemis	<i>yellow belt (six sigma)</i>	
kuus sigma: must vöö, sertifitseeritud spetsialist	<i>black belt (six sigma)</i>	

kuus sigma: roheline vöö, kogub informatsiooni, teeb enamuse katseid ja täidab erinevaid ülesandeid kuus sigma vahendamisel	<i>green belt (six sigma)</i>	
kuus sigmat, tehnikate ja tööriistade kogum protsesside parendamiseks	<i>six sigmas</i>	
kvaliteedi kindlustamine	<i>quality assurance system</i>	
kvaliteedi tagamine	<i>computer-aided quality assurance</i>	CAQ
kvaliteedi tagamine /kindlustamine	<i>quality assurance</i>	
kvaliteedikontroll	<i>inspection</i>	
kvaliteediohje	<i>quality control</i>	
kvaliteet	<i>quality</i>	
käsitsi juhtprogrammi koostamine	<i>manual programming</i>	
küber-füüsikalised süsteemid ja asjade internet	<i>cyber-physical systems and internet of things</i>	
labori info juhtimise süsteem	<i>laboratory information management system</i>	LIMS
ladude juhtimise süsteem	<i>warehouse management system</i>	WMS
lahtine arvujuhtimissüsteem (ka impulss- või sammsüsteem)	<i>open loop</i>	
laiendatud ettevõtte	<i>extended enterprise</i>	
laiendatud märgistuskeel, kasutusel isehäälestusel	<i>extensible mark-up language</i>	XML
lame juhtimisstruktuur	<i>lean management</i>	
lamineerimine	<i>laminated object manufacturing</i>	LOM
laoseisude (kindlustusvarude) kasutamine	<i>safety stock</i>	
laovarude juhtimine	<i>inventory management</i>	
lasermõõtepea	<i>laser tool probe</i>	
lasertöötlus	<i>laser beam machining</i>	
lauprees, vt. ka otsfrees	<i>face mill</i>	
leekpuhastus	<i>flame</i>	FI
lihvimine	<i>grinding</i>	
lineaarsaagimine e. edasi-tagasi liikumisega saagimine	<i>hacksawing</i>	
lintsaagimine	<i>band sawing</i>	
lisa ja kasuta/isehäälestuv lahend	<i>plug and play</i>	
lisatud ressursside planeerimine	<i>rough cut capacity planning</i>	RCCP
lõplike elementide analüüsi meetod	<i>finite element analysis</i>	FEA
lämmastikgaasi kasutamine survevaluvormimise surumisfaasis	<i>gas injection</i>	

masstootmine	<i>mass production</i>	
materjalivajaduse planeerimine	<i>material requirement planning</i>	MRP
meeskonnatöö korraldus	<i>team problem solving</i>	
meeskonnatöö parandamine	<i>improving team activities</i>	
meeskonnatöö realiseerimine, kaasates kogu ettevõtte personali probleemide lahendamiseks	<i>team development</i>	
mitmekihilised süsteemid	<i>multi-echelon</i>	
mittemodaalne programmi käsk	<i>non-modal</i>	
modaalne programmi käsk	<i>modal</i>	
modulaarne FMS	<i>modular FMS</i>	
multifunktsionaalne töötlemine	<i>multi-function machining</i>	
multifunktsionaalne töötlemine	<i>multitasking</i>	
multi-keha simulatsioon	<i>multibody simulation</i>	
muudatuste haldamine	<i>engineering change management</i>	
muudetavad tootmissüsteemid	<i>intermittent</i>	
mõõda, praeguse soorituse kirjeldamine (DMAIC-mudel)	<i>measure</i>	
mõõtepea lülitatav punkt, milline määratakse ja salvestatakse kalibreerimisel	<i>triggering point</i>	
mõõterobot	<i>measuring robot</i>	
mõõtmete kontrollkaartide evitamine igale töökohale võimaldamaks hinnata ka seadme remondi või seadistuse vajalikkust	<i>metrics and measurements</i>	
mõõtmise ja kontrolli aeg	<i>in operation inspection</i>	
mõõtude korrektsioon	<i>offsets</i>	
nakkusvustest	<i>cross-cut test</i>	
null praak	<i>zero defects</i>	
null tootmise (üंबर) seadistamise aeg	<i>zero setups</i>	
numbriline juhtimine	<i>numerical control</i>	NC
numbriliselt juhitud tööpingid	<i>CNC machine tools</i>	
nõudluse muutuvus	<i>lumpy</i>	
nõudluse prognoosimine	<i>demand forecasting</i>	
nõue tagada kõrge kvaliteediga toodete majanduslikult otstarbekas tootmine	<i>economy of scale</i>	
nõue tagada kõrge kvaliteediga toodete majanduslikult otstarbekas tootmine	<i>economy of scope</i>	
nüüdisaegsed planeerimise süsteemid	<i>advanced planning and scheduling</i>	APS
omakapitali tootlikkus	<i>return of equity</i>	ROE
operaatorite arv	<i>number of operators</i>	

optimeerimisjärgne analüüs	<i>post-optimality analysis</i>	
organisatsiooniline õppimine, uue teadmuse loomine	<i>benchmarking</i>	
orienteeritud arvutivõrgu arhitektuur	<i>service-oriented architecture</i>	SOA
otsene numbriline juhtimine/otsene arvjuhtimine	<i>direct numerical control</i>	DNC
otsfrees, vt ka laupfrees	<i>face mill</i>	
otstarbeka tootmise ajaplaani koostamine	<i>job shop scheduling</i>	
otstarbeka tootmise ajaplaani koostamine	<i>job shop problem</i>	
paindlik tootmine	<i>flexible manufacturing</i>	
paindlikkus	<i>flexibility</i>	
paindootmisliinid	<i>flexible manufacturing lines</i>	
paindootmismoodulid	<i>flexible manufacturing cells</i>	
paindootmissüsteem	<i>flexible manufacturing system</i>	FMS
paindootmissüsteemi avatud-tüüpi struktuur	<i>open field type</i>	
paindootmissüsteemi liin-tüüpi struktuur	<i>progressive or line-type</i>	
paindootmissüsteemi redel-tüüpi struktuur	<i>ladder type</i>	
paindootmissüsteemi robotikeskne struktuur	<i>robot centred type</i>	
paindootmissüsteemi silmus-tüüpi struktuur	<i>loop type</i>	
partii suurus üks toode/komponent	<i>zero lot size</i>	
piirangute teooria	<i>theory of constraints</i>	TOC
piiravate pindade modelleerimine	<i>boundary representation</i>	BRP
pinna töötlus	<i>surface treatment</i>	
plaanitükeldamine ajas	<i>netting</i>	
plaanitud FMS	<i>engineered FMS</i>	
plankimine (soveldamine)	<i>lapping</i>	
plasmakeevitus	<i>paw</i>	
poleerimine	<i>polishing</i>	
probleemide lahendamiseks parimate viiside leidmine (DMAIC-mudel)	<i>improve</i>	
programmeerimiskeel	<i>automated programming of technology</i>	APT
programmeerimiskeel	<i>automatically programmed tool</i>	APT
programmeeritavad kontrollierid	<i>programmable logic controllers</i>	PLC
projekteerija tükileht	<i>BOM as designed</i>	
projekteerimine, kus arvestatakse koostamise tehnoloogilise võimalusi	<i>design for assembly</i>	DFA

projektipõhine valmistussüsteem	<i>project shop</i>	
protsess	<i>process</i>	
puhumissurvevormimine	<i>injection blow moulding</i>	
puhumisvormimine	<i>blow moulding</i>	
puurimine	<i>drilling</i>	
puurimiskonduktor	<i>jig</i>	
puurimistsükkel	<i>centering</i>	
puutega mõõtepea	<i>touch tool probe</i>	
põhiaja osatähtsus	<i>machining time</i>	
põhjuslik meetod	<i>causal method</i>	
püstitatus sihifunktsioon	<i>what-if analysis</i>	
raadiosagedusel töötavad sensorid	<i>radio-frequency identification readers</i>	RFID
raalintegreeritud tootmine	<i>computer integrated manufacturing</i>	CIM
raalprojekteerimine	<i>computer aided design</i>	CAD
raalootmine/raalvalmistus	<i>computer-aided manufacturing/computer automated manufacturing</i>	CAM
rahvusvaheline standardiorganisatsioon	<i>international organization for standardization</i>	ISO
rakktootmine	<i>cellular manufacturing</i>	
reegel lühima ajaga töö esimesena	<i>shortest process time</i>	SPT
reegel varasema tähtaja reegel	<i>earliest due date</i>	EDD
reegel tööde teostamine saabumise järjekorras	<i>first in first out</i>	FIFO
roboti tööseadis	<i>end effector</i>	
robotiseeritud tootmisrakk	<i>robotic manufacturing cells</i>	
robotiseeritud tootmisrakk	<i>robotic work cells</i>	
rotatsioonvormimine	<i>rotational moulding, vt. ka rotomoulding</i>	
rotatsioonvormimine	<i>rotomoulding, vt. ka rotational moulding</i>	
saagimine	<i>sawing</i>	
samaaegne tootearendus	<i>concurrent engineering</i>	
samaaegne toodangu hulk tootmises/tööprotsessis olevad tooted	<i>work in process</i>	WIP
seade	<i>equipment</i>	
seade	<i>machine</i>	
seadistusaeg	<i>changeover time</i>	
seadme üldine kasutamiseefektiivsus/üldise seadmete kasutamise efektiivsuse analüüs	<i>overall equipment effectiveness</i>	OEE

seadmete hoolduse juhtimise süsteem	<i>computerized maintenance management system</i>	CMMS
seadmete seadistusaegade lühendamine	<i>rapid setup</i>	
seadmete teenindus	<i>maintaining equipment</i>	
seeriatootmine	<i>patch production</i>	
seotud tootmine	<i>coupled manufacturing</i>	
side jaotatud juhtsüsteemiga	<i>distributed control system</i>	DCS
sidus programmeerimine	<i>online</i>	
Siemens PLM tarkvara	<i>RobotExpert</i>	
Siemens tarkvarasüsteem	<i>technomatic</i>	
silindrefrees	<i>plain mill</i>	
sisemised protsessid	<i>internal business processes</i>	
sisend	<i>input</i>	
sisetükiga survealuvormimine	<i>insert injection moulding</i>	
sissekastev vormimine	<i>dip moulding</i>	
skulptuuripindade kasutamine toote kuju modelleerimisel	<i>free form</i>	
skulptuuripindade kasutamine toote kuju modelleerimisel	<i>curved and sculptured surface</i>	
spiraalpuur ehk keerdpuur	<i>conventional twist drill</i>	
stabiilne tootmine	<i>zero surging</i>	
statistiline protsessiohje (juhtimine)	<i>statistical process control</i>	
suhtelise juurdekasvuga koordinaadistik	<i>incremental</i>	
suletud arvjuhtimissüsteem	<i>closed loop</i>	
summa kaalutud hinne	<i>weighted sum model</i>	WSM
summaarne seisakute aeg	<i>idle time</i>	Tid
superfiniš	<i>superfinishing</i>	
survealuvormimine	<i>injection moulding</i>	
suunatud FMS	<i>dedicated FMS</i>	
sõrmfrees	<i>end mill</i>	
säästlik tootmine	<i>sustainable manufacturing</i>	
süsteemi kasutamise näitaja	<i>utilization</i>	
süsteemi ratsionaliseerimine	<i>rationalizing the system</i>	
süsteemi töökindlus	<i>reliability</i>	
süsteemi töövõime	<i>availability</i>	
süsteemianalüüsis ülalt-alla analüüs	<i>top-down analysis</i>	
targad tehased	<i>smart factories</i>	
tarne- ja varustuspartii suurus	<i>pack size</i>	
tarne- ja varustuspartii suurus	<i>the number of items in a shipment</i>	
tarneahel	<i>supply chain</i>	

tarneahela juhtimine	<i>supply chain management</i>	SCM
tarneahela juhtimise professionaalide nõukogu	<i>council of supply chain management professionals</i>	CSCMP
tarneaja lühendamine	<i>shortening lead time</i>	
tarnija	<i>supplier</i>	
tarnijate arendamine	<i>developing your supplies</i>	
tasakaalustatud tulemuskaart/tasakaalus tulemuskaart	<i>balanced scorecard</i>	BSC
tegelik seadme tootlikkus	<i>total effective equipment performance</i>	TEEP
tehas	<i>plant</i>	
tehas	<i>factory</i>	
tehnoloogia arendamine	<i>leading technology and site technology</i>	
tehnoloogia-põhine adaptiivne juhtimine	<i>technological adaptive control</i>	
tehnoloogiline võimekus	<i>technological capability</i>	
tehnoloogilised võimalused	<i>technological possibilities</i>	
tellimuse edasilükkamine, järeltellimine	<i>backorders</i>	
tellimuse täitmise aeg/kestus	<i>order fulfillment time</i>	
tellimuse täitmise aeg/kestus	<i>production lead time</i>	
tellimuse täitmise aja lühendamine	<i>zero lead time</i>	
tellimuse või valmistamispartii suurus	<i>economic order quantity</i>	EOQ
tellimuste kavandamine ajas	<i>time phasing</i>	
tellimuste laiendamine tükilehele	<i>BOM explosion</i>	
tellimustele orienteeritud tootmine (tootmiskorraldus)	<i>make to order</i>	
tellimustootmine	<i>project-based manufacturing</i>	
teostuse tasand	<i>execution</i>	
terviklik (täielik) seadmete hooldussüsteem/seadmete hoolduse korraldamine	<i>total productive maintenance</i>	TPM
terviklik kvaliteedijuhtimine/kõikehõlmav kvaliteedi juhtimine	<i>total quality management</i>	TQM
terviklikkus, kõikehõlmavus	<i>total</i>	
toodete nomenklatuursus	<i>variety</i>	
tooriku lahutamine kaheks erinevaks osaks/mittevajaliku osa eemaldamine toorikust	<i>cut-off sawing</i>	
toote andmete haldus/toote andmete haldamine/toote andmehaldus	<i>product data management</i>	PDM
toote eluea juhtimine/toote elukaare juhtimine	<i>product lifecycle management</i>	PLM

toote geomeetriline elementide klassifitseerimine/geomeetrilised iseärasused	<i>features</i>	
toote ko haletoimetamise aeg	<i>manufacturing lead time</i>	
toote maatriks	<i>product matrix</i>	
toote otstarbeka portfelli leidmine	<i>product mix planning</i>	
toote pere	<i>product mix</i>	
toote portfelli	<i>product family</i>	
toote projekteerimise alustamine	<i>engineering to order</i>	ETO
toote tööpinki paigaldamise aeg	<i>workpiece handling time</i>	
toote tükileht/koostu osade loetelu leht	<i>bill of material</i>	BOM
toote valmistamise alustamine	<i>manufacture to order</i>	MTO
toote variantide arv	<i>number of product variations</i>	
tootearendus	<i>product development</i>	
tootearendusprotseduur	<i>design for additive manufacturing</i>	DFAM
tootele etteantud tehnilised tingimused	<i>key characteristics</i>	KC
tootlikkus, tulemuslikkus	<i>performance</i>	
tootlikkus, tulemuslikkus	<i>productivity</i>	
tootlikkuse kadu	<i>speed losses</i>	
tootmine	<i>production</i>	
tootmine lattu	<i>manufacture to stock</i>	MTS
tootmis- ja ärisüsteemi analüüs ja projekteerimine	<i>systems engineering</i>	
tootmisahela väärtusanalüüs	<i>manufacturing value analysis</i>	
tootmise katkestuste (seisakute) puudumine	<i>zero breakdowns</i>	
tootmise kiire ümberkorraldus	<i>quick changeover technology</i>	
tootmise läbilaskeaeg	<i>production throughput time</i>	Tth
tootmise operatiivne juhtimine	<i>shop floor control</i>	SFC
tootmise operatiivne juhtimine	<i>job dispatching</i>	
tootmise operatiivne planeerimine	<i>production scheduling</i>	
tootmise pidev monitoring	<i>zero monitor manufacturing</i>	
tootmise pidev parandamine	<i>methods improvement</i>	
tootmise pideva parendamise protsess	<i>continual improvement process</i>	CIP
tootmise pideva parendamise protsess	<i>continuous improvement process</i>	CI
tootmise planeerija tükileht	<i>BOM as planned</i>	
tootmise põhiplaan	<i>master production plan</i>	
tootmise teostuse süsteem/tootmise täitursüsteem	<i>manufacturing execution system</i>	MES
tootmise/tellimuse partii suuruse määramine	<i>lot-sizing</i>	
tootmises olevate toodete arv	<i>work in process</i>	WIP

tootmisjaoskond	<i>shop</i>	
tootmisjaoskond	<i>job-shop</i>	
tootmiskeskne projekteerimine	<i>design for manufacture and assembly quantity</i>	DFMA
tootmiskogus		
tootmisoperatsioonide juhtimise süsteem	<i>manufacturing operations management system</i>	MOMS
tootmispartii suurus	<i>production batch sizes</i>	
tootmisprotsessi planeerimine/arvutipõhine tehnoloogia projekteerimine	<i>computer aided process planning</i>	CAPP
tootmisprotsesside arvutipõhine juhtimine/tootmise (tootmisprotsessi) haldamine	<i>manufacturing process management</i>	MPM
tootmisrakk	<i>cell</i>	
tootmisrakukestes tootmine	<i>cell production</i>	
tootmisressursside planeerimine	<i>manufacturing resource planning</i>	MRP II
tootmisseadmete asetuspalaani protsessi-keskne tüüpvariant	<i>process layout</i>	
tootmisseadmete asetuspalaani tootekeskne tüüpvariant	<i>product layout</i>	
tootmisseadmete asetuspalaani tootmisraku keskne tüüpvariant	<i>cellular layout</i>	
tootmisseadmete asetuspalaani töökeskne tüüpvariant	<i>job layout</i>	
tootmissüsteem	<i>manufacturing system</i>	
tootmisvarude (laovarude) vähendamine	<i>reducing inventory</i>	
tootmisvoo väärtusvoo kaardistamine	<i>value stream mapping</i>	
tootmisvõimsus	<i>production capacity</i>	
tootmisvõimsuste vajaduse analüüs/arvutus erinevatele ajahetkedele ja struktuuriüksustele	<i>capacity requirements planning</i>	CRP
tootmisüksuse asendiplaan	<i>plant layout</i>	
tootmisvaru	<i>inventory</i>	
traatkarkass mudel	<i>wire-frame model</i>	
transpordiaja puudumine	<i>zero handling</i>	
treimine	<i>turning, vt. ka lathe cutting</i>	
treimine	<i>lathe cutting, vt ka turning</i>	
trummeldamine	<i>tumbling, vt. ka barrel finishing</i>	
trummeldamine	<i>barrel finishing, vt. ka tumbling</i>	
tsentrifugaaltöötlus	<i>centrifugal finishing</i>	
tsükkel	<i>loop</i>	

tsükliäeg	<i>cycle time</i>	
tsükliäeg	<i>workstation</i>	
tulemuse võtmenäitajad /ettevõtte tegevuse võtmenäitajad	<i>key performance indicators</i>	KPI
tulevikutehas	<i>factory of the future</i>	FoF
tunnustepõhine modelleerimine	<i>feature based modelling</i>	FBD
turuvajadustest lähtuv tootmine	<i>make to stock</i>	
tõhusus	<i>effectiveness</i>	
tõrkeolude ja -mõjude analüüs	<i>failure mode and effect analysis</i>	FMEA
tõukamine	<i>shaping</i>	
täitur	<i>actuator</i>	
töö ajafond	<i>working time</i>	
töö analüüs	<i>time study</i>	
töö sammud	<i>work steps</i>	WS
tööaja juhtimine	<i>time control and commitment</i>	
töödeldava detaili parameetrite kogum (töödeldavate kujuelementide kirjeldused)	<i>machining features</i>	
töökoht	<i>workplace</i>	
töökohtade töötlemisaegade ühtlustamine	<i>work balancing</i>	
töölaud	<i>support</i>	
tööpingi kasutuse efektiivsus	<i>remote monitoring</i>	
tööpink	<i>machine tool</i>	
tööpinkide asetusplaan	<i>layout</i>	
tööriistade kiirvalmistus	<i>rapid tooling</i>	
tööriistade vahetuse aeg	<i>tool handling time</i>	
tööriistamajandus	<i>tool management</i>	
tööstusrakukesed	<i>manufacturing cells</i>	
tööstusrevolutsioon	<i>Industry 4.0</i>	
tööstusrobot	<i>industrial robot</i>	IR
töötajate juhtimine	<i>human resource management</i>	HRM
töötajate koolitamine tööks erinevatel töökohadel/personali koolitamine	<i>skill versatility and cross-functional working</i>	
töötajate motiveerimine parenduste tegemiseks	<i>empowering workers to make improvements</i>	
töötlemisjärgne kontrollmõõtmine	<i>post-process control</i>	
töötlemiskeskused	<i>CNC machining centres</i>	
töövahendite seadistusaegade lühendamine	<i>single minute exchange of die</i>	SMED
ultrahelitöötlus	<i>ultrasonic machining</i>	

uute tehnoloogiate ja infosüsteemide kasutamine	<i>using information systems</i>	
vahetu tootmise aeg	<i>actual processing time</i>	
vallas- või autonoomne programmeerimine	<i>offline</i>	
valmistamine, tootmine	<i>manufacturing</i>	
varade tootlikkus	<i>return of assets</i>	ROA
vedelike voolamise analüüs	<i>computational fluid dynamics</i>	CFD
vee kasutamine survealuvormimise surumisfaasis	<i>water injection</i>	
veejuगतöötlus	<i>water jet cutting</i>	
venitus-puhumisvormimine	<i>stretch blow moulding</i>	
vibrotöötlus	<i>vibratory finishing</i>	
vigade vältimine	<i>error proofing</i>	
vigade vältimine/seadmete, toodete ja tööprotsesside vigade vältimise tagamine	<i>poka-yoke</i>	
virtuaaltehased	<i>virtual factories</i>	
visuaalne kontroll	<i>visual control</i>	
voolootmine	<i>flow production</i>	
väike- ja keskmise suurusega ettevõtted	<i>small medium size enterprises</i>	SME
välise tagajärgede järjepidev strateegilise tulemuslikkuse tõestamine	<i>external outcomes</i>	
väljund	<i>output</i>	
väärtusahel	<i>value chain</i>	
väärtusvoog	<i>value stream</i>	
võtkood	<i>barcode scanners</i>	
õhkõhukeste materjalide keevitamine	<i>cold process</i>	CP
õige asja tegemine (tõhusus)	<i>doing the right thing</i>	
äri	<i>business</i>	
äri	<i>enterprise</i>	
ärijuhtimise tasand	<i>business to business</i>	B2B
ühekihi süsteemid	<i>single-echelon</i>	
ühenda ning tooda	<i>plug and produce</i>	
ühtne standardi ülesehitus	<i>high level structure</i>	
üksiktootmine	<i>job production</i>	
üldine tootmisplaan	<i>master production schedule</i>	MPS
ületunnitöö	<i>overtime</i>	
ümberhäälestus	<i>set-up</i>	
ümberkonfigureeritavad tootmissüsteemid	<i>reconfigurable</i>	
ümberseadistus	<i>changeover</i>	



9 789949 839490