

Priit Kulu, Jakob Kübarsepp,  
Andres Laansoo, Renno Veinthal

# MATERJALITEHNIKA II

Konstruksioonimaterjalide tehnoloogia

Õpik kõrgkoolidele

Ilmunud riikliku programmi  
„Eestikeelsete kõrgkooliõpikute koostamine ja väljaandmine (2008–20012)“  
toetusel

Käesoleva õpiku väljaandmist toetasid  
Haridus- ja Teadusministeerium



Retsenseerinud Henn Hendre  
Paul Treier

Keeleliselt toimetanud Mari-Ann Tamme

Küljendanud Antonina Andrijevskaia

Kaane kujundanud Tiia Eikholm

ISBN 978-9949-23-742-5

Autoriõigus: Priit Kulu, Jakob Kübarsepp, Andres Laansoo, Renno Veinthal, 2015

## Eessõna

Täismahulist materjalitehnika aluskursust sisaldav raamat on kavandatud õpikuks nii kõrgkoolide bakalaureuseõppe kui rakenduskõrgharidusõppe tehnikaalade üliõpilastele, kelle õppekavas on materjalitehnika põhiõppe aineid (tehnomaterjalid, konstruktsioonimaterjalide tehnoloogia või materjalitehnika).

Õpik on TTÜ kirjastuses aastatel 1998...2001 välja antud kolmeosalise kõrgkooliõpiku Metalliopeetus ja metallide tehnoloogia (I osa – Metalliopeetus ja metallurgia, II osa – Metallide tehnoloogia, III osa – Materjali ja tehnoloogia valik), aga ka Metalliopeetuse õpiku (2005) edasiarendus. Õpiku koostamisele eelnes kõnealusel valdkonnas terminoloogia paikapane (Materjalitehnika seletav sõnaraamat, 2013).

Kõnealusel kõrgkooliõpiku koostamisel on eeskujuks võetud selles valdkonnas rahvusvaheliselt tunnustatud J. T. Blacki ja K. A. Kosheri koostatud õpik *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing* ja M. P. Grooveri õpik *Principles of Modern Manufacturing*, seda nii õpiku struktuuri, materjali esitust kui ka graafilist materjali silmas pidades.

Õpik koosneb kahest teineteisega haakuvast osast, mis üheskoos loovad alusel materjalide struktuuri ja omaduste ning nendes töötlemisel toimuvate protsesside mõistmisele.

Õpiku esimeses osas **Tehnomaterjalid** käsitletakse materjalide omadusi ja katsetamist, metallide ja sulamite struktuuri ning nendega seotud faasidiagramme, rauasüsinikusulameid (teraseid ja malme), nende saamist, materjali struktuuri ja omadusi mõjutavaid protsessitermotöötlust ja tugevdavat termotöötlust, mitte-rauasulameid (vasesulamid, alumiiniumsulamid jt), aga ka mittemetalseid materjale (plastid, keraamika ja komposiitmaterjalid) kui ka materjali ja tehnoloogia valiku küsimusi.

Õpiku teises osas **Konstruktsioonimaterjalide tehnoloogia** vaadeldakse põhilisi konstruktsioonimaterjalide töötlemise ja toodete saamisega seotud protsesse: surve-töötlus, valutehnoloogia, pulbermetallurgia, liitmisprotsessid, lõiketöötlus, mitte-traditsioonilised töötlusmeetodid, pinnatehnika, plastide, keraamika ja komposiitide tehnoloogia.

Kummalgi osal on eraldi sisukord ja aineoetelu, mis võimaldab kumbagi osa teineteisest sõltumatult kasutada. Iga peatüki ees on ka sisukord, mis võimaldab õpiku lihtsamat käsitlemist. Iga peatükk lõpeb kordamisküsimustega, mis lihtsustavad üliõpilasel õppimist, aga ka valmistumist testideks ja eksamitöödeks.

Õpiku I osa koostajaiks on metalliopeetuse professor Priit Kulu – metallidega seotud 1., 2., 3., 4., 5. ja 7. peatükid, v.a rauametallurgia (alajaotus 5.1.1) ja mitteraua-

metallurgia (alajaotus 5.1.2), mille koostajaiks on metallide tehnoloogia professor Jakob Kübarsepp ja komposiitmaterjalide tehnoloogia professor Renno Veinthal – mittemetallsete materjalide osa (6. peatükk).

Õpiku II osa koostajaiks on professor Jakob Kübarsepp – 8., 9., 10. ja osaliselt 11. ja 12. peatükid, lektor Andres Laansoo – 11. ja 12. peatükid, professor Priit Kulu – 13. peatükk ja professor Renno Veinthal – 14. peatükk.

Raamatu koostajad tänavad Sirje Roosmet ja Mariliis Treid abi eest tekstide arvutisse sisestamisel, Mart Viljust graafilise materjali vormistamisel, kirjastuse küljendajat Antonina Andrijevskajat ja keeleteoimetajat Mari-Ann Tammet.

Raamatu koostajad tänavad retsenseente Enn Hendret ja Paul Treierit kasulike soovitude, märkuste ja tähelepanekute eest.

Raamatu autorid tänavad Eesti Haridus- ja Teadusministeeriumi ja Sihtasutust Archimedes õpiku koostamise toetamise eest riikliku programmi „Eestikeelsete kõrgkooliõpikute koostamine ja väljaandmine“ kaudu.

Raamatu koostajad on tänulikud kõigi õpiku kohta käivate kommentaaride, märkuste ja soovitude eest.

Õpiku koostajad

*Priit Kulu, Jakob Kübarsepp, Andres Laansoo, Renno Veinthal*



# Sisukord

Eessõna .....	3
I TEHNOMATERJALID	
1. MATERJALIDE OMADUSED.....	8
2. METALLIDE JA SULAMITE STRUKTUUR .....	39
3. TASAKAALULISED FAASIDIAGRAMMID JA RAUD-SÜSINIK SÜSTEEM.....	62
4. TERMOTÖÖTLUS .....	89
5. METALSED MATERJALID .....	128
6. MITTEMETALSED MATERJALID .....	226
7. MATERJALI JA TEHNOLOOGIA VALIK.....	301
Soovitatav kirjandus.....	330
Aineregister.....	331
II KONSTRUKTSIOONIMATERJALIDE TEHNOLOOGIA	
8. SURVETÖÖTLUS .....	11
8.1. OLEMUS JA PROTSESSIDE LIIGITAMINE.....	11
8.2. PLASTSE DEFORMEERIMISE FÜÜSIKALISED ALUSED .....	14
8.2.1. Pinge, pingeseisund, deformatsioon, deformatsiooniseisund.....	14
8.2.2. Metallide ja sulamite reaalne struktuur .....	15
8.2.3. Metallide plastse ja deformatsioonitakistuse mõjurid .....	16
8.2.4. Survetööstluse temperatuur .....	18
8.2.5. Hõõrdumine survetöötlemisel .....	21
8.2.6. Survetööstluse mõju struktuurile ja omadustele .....	23
8.2.7. Üliplastsus .....	24
8.3. MAHTVORMIMISPROTSESSID .....	25
8.3.1. Valtsimine.....	26
8.3.2. Ekstrusioon .....	39
8.3.3. Tõmbamine .....	44
8.3.4. Sepistamine.....	48
8.3.5. Vasarstantsimine .....	55
8.3.6. Press-stantsimine .....	63
8.3.7. Horisontaalstantsimine.....	66
8.3.8. Sepavaltsimine.....	69
8.3.9. Rotatsioonstantsimine ja radiaalstantsimine .....	70
8.3.10. Orbitaalstantsimine .....	72
8.3.11. Kopeerpressimine .....	73
8.3.12. Külmvormstantsimine.....	73
8.3.13. Painutamine .....	77

8.3.14. Külmviiimistlusmeetodid.....	78
8.4. LEHTVORMIMISPROTSESSID .....	79
8.4.1. Lehtvormimise eraldusoperatsioonid .....	80
8.4.2. Lehtvormimise vormimisoperatsioonid .....	84
8.4.3. Stantsid ja lehtstantsimisseadmed.....	93
8.4.4. Lehtvormimine elastse keskkonna ja vedelikuga.....	98
8.4.5. Üliplastne lehtvormimine .....	100
8.4.6. Kõrgenergeetiline impulsslehtvormimine.....	101
8.5. KORDAMISKÜSIMUSED.....	103
9. VALUTEHNOLOOGIA.....	106
9.1. OLEMUS JA PROTSESSIDE LIIGITAMINE.....	106
9.2. VEDELMETALLI VORMITAVUS .....	107
9.2.1. Sulatus ja valamine .....	107
9.2.2. Tardumine ja kahanemine.....	109
9.2.3. Tardumis- ja kahanemisdefektid .....	112
9.2.4. Valandite projekteerimise põhimõtted .....	120
9.3. VALU KORDKASUTUSVORMIDESSE .....	121
9.3.1. Liivvormvalu .....	121
9.3.2. Koorikvalu .....	146
9.3.3. Täppisvalu .....	148
9.3.4. Kipsvormvalu ja keraamikavormvalu.....	150
9.4. VALU KORDUVKASUTUSVORMIDESSE .....	151
9.4.1. Kokillvalu .....	151
9.4.2. Madalsurvevalu, vaakumvalu, väljavalamisvalu .....	153
9.4.3. Survevalu .....	154
9.4.4. Tsentrifugaalvalu .....	156
9.4.5. Pidev- ja poolpidevvalu .....	159
9.4.6. Pressvalu ja pooltardvalu .....	160
9.4.7. Metallvormide püsvus.....	160
9.5. VALUSULAMID JA VALANDITE TOOTMINE.....	162
9.5.1. Valusulamite sulatus .....	162
9.5.2. Malmvalandid .....	165
9.5.3. Terasvalandid.....	170
9.5.4. Alumiiniumvalandid .....	171
9.5.5. Vaskvalandid .....	172
9.5.6. Titaanvalandid .....	173
9.5.7. Valandi defektoskoopia .....	174
9.6. KORDAMISKÜSIMUSED.....	176
10. PULBERMETALLURGIA .....	178

10.1. PULBERMETALLURGIA ÜLDISELOOMUSTUS .....	178
10.2. PULBRITE SAAMINE JA OMADUSED .....	181
10.2.1. Pulbrite saamine .....	181
10.2.2. Pulbrite omadused .....	185
10.3. PULBRITE ETTEVALMISTUS VORMIMISEKS .....	188
10.4. PULBERMATERJALI VORMIMINE .....	190
10.4.1. Pressimine pressvormides .....	190
10.4.2. Isostaatpressimine .....	192
10.4.3. Pulbersurvevalu ja lobrivalu .....	193
10.4.4. Pulbri ekstrusioon ja valtsimine .....	194
10.5. PAAGUTUS .....	195
10.5.1. Paagutusprotsessi üldiseloomustus .....	195
10.5.2. Paagutusmeetodid .....	197
10.6. KOMBINEERITUD KONSOLIDATSIOONIPROTSESSID .....	200
10.6.1. Kuumpressimine ja kuumisostaatpressimine .....	200
10.6.2. Survepaagutus .....	201
10.6.3. Plasmaaktiveeritud paagutus .....	201
10.6.4. Pihustusvormimine .....	202
10.7. PULBERTOORIKUTE TÄIENDAV TÖÖTLUS .....	202
10.7.1. Järeltöötlus kuju muutmiseks .....	202
10.7.2. Järeltihendamine ja mehaaniliste omaduste tõstmine .....	203
10.7.3. Spetsiifiliste omaduste andmine .....	204
10.8. PULBERMATERJALID JA -TOOTED .....	204
10.8.1. Pulbermaterjalide omadused .....	204
10.8.2. Põhiliste pulbermaterjalide ja -toodete iseloomustus .....	205
10.8.3. Pulbertoodete konstruktiivsed iseärasused ja tehnoloogia valik .....	206
10.9. KORDAMISKÜSIMUSED .....	210
11. MATERJALIDE LIITMISPROTSESSID .....	211
11.1. LIITMISPROTSESSIDE LIIGITUS .....	211
11.1.1. Keevituse olemus ja keevitusprotsesside liigitus .....	213
11.1.2. Keevisliidete ja keevisõmbluste liigitus .....	218
11.1.3. Keevisliidete tsoonid ja struktuur .....	221
11.2. KEEVITAMISE KAASNÄHTUSED .....	223
11.2.1. Keevitismetallurgia .....	223
11.2.2. Keevitusjäakpinged ja -kujumuundused .....	224
11.2.3. Keevitatavus .....	226
11.3. SULAKEEVITUS .....	229
11.3.1. Kaarkeevitus .....	229
11.3.2. Keemilistel reaktsioonidel põhinevad sulakeevituse protsessid .....	245
11.3.3. Sulakeevituse eriprotsessid .....	250

11.3.4. Kontaktkeevitus .....	253
11.4. TARDFAASKEEVITUS.....	260
11.4.1. Tardfaaskeevitusprotsesside olemus .....	260
11.4.2. Tardfaaskeevitusprotsessid .....	260
11.5. PLASTIDE KEEVITUS.....	266
11.6. JOOTMINE .....	269
11.6.1. Olemus ja iseärasused .....	269
11.6.2. Jooteliited.....	271
11.6.3. Joodised ja jooteräbustid.....	273
11.6.4. Jootmismeetodid .....	276
11.7. LIIMIMINE.....	278
11.7.1. Liimimise olemus .....	278
11.7.2. Liimliited .....	279
11.7.3. Liimid .....	280
11.7.4. Liimimise tehnoloogilised etapid.....	282
11.8. LIIDETE KATSETAMINE JA LIITMISPROTSESSI VALIK.....	282
11.8.1. Keevitus- ja jootmisdefektid .....	282
11.8.2. Keevis- ja jooteliidete kontroll.....	283
11.8.3. Liitmisprotsessi valik .....	286
11.9. TERMOLÕIKUS .....	289
11.9.1. Olemus ja liigitamine.....	289
11.9.2. Hapniklõikus.....	290
11.9.3. Kaarlõikus.....	292
11.9.4. Fokuseeritud kiirega termolõikus .....	294
11.10. KORDAMISKÜSIMUSED.....	295
12. LÕIKETÖÖTLUS .....	299
12.1. LÕIKETÖÖTLUSE ALUSED.....	300
12.1.1. Lõikeprotsessid .....	302
12.1.2. Laastutekkeprotsess .....	307
12.1.3. Lõikeprotsessi mehaanika .....	309
12.1.4. Soojusnähtused laastueraldusprotsessis .....	312
12.1.5. Lõikevedelikud .....	312
12.2. LÕIKERIISTAD .....	314
12.2.1. Üksservlõikuri geomeetria .....	315
12.2.2. Mitmikservlõikurid .....	319
12.2.3. Terikumaterjalid .....	324
12.2.4. Teriku kulumine ja püsivus.....	330
12.2.5. Lõiketöödeldavus.....	335
12.3. TREIMINE JA SISETREIMINE .....	337
12.3.1. Lõikeparameetrid treimisel .....	338

12.3.2. Treimisprotsess ja treiterad .....	339
12.3.3. Universaaltreipingid.....	341
12.3.4. Muud treipingid .....	345
12.3.5. Sisetreimine ja sisetreipingid .....	347
12.4. PUURIMINE JA TEISED AVALÕIKEPROTSESSID .....	348
12.4.1. Avalõikeprotsessid, avalõikurid.....	348
12.4.2. Lõikeparameetrid puurimisel .....	350
12.4.3. Puurpingid.....	351
12.5. FREESIMINE .....	353
12.5.1. Freesimisprotsessid ja freesid .....	354
12.5.2. Lõikeparameetrid freesimisel.....	357
12.5.3. Freespingid .....	358
12.6. HÖÖVELDUS.....	360
12.6.1. Hõõveldusprotsess ja hõõvellõikurid .....	360
12.6.2. Hõõvelpingid .....	361
12.7. KAMMLÕIKUS .....	363
12.8. KEERMESTUS.....	364
12.9. HAMBALÕIKUS.....	367
12.10. LIHVIMINE JA MUUD ABRASIIVTÖÖTLUSPROTSESSID .....	370
12.10.1. Abrasiivid ja abrasiivlõikurid .....	370
12.10.2. Lihvimisprotsess .....	376
12.10.3. Lihvimismeetodid ja lihvpingid.....	380
12.10.4. Muud abrasiivtöötlusmeetodid.....	386
12.11. MITTETRADITSIOONILISED TÖÖTLUSMEETODID.....	388
12.11.1. Mehaanilised töötlusmeetodid .....	389
12.11.2. Elektrokeemilised töötlusmeetodid.....	393
12.11.3. Termilised töötlusmeetodid .....	395
12.11.4. Keemiline töötlus.....	400
12.11.5. Töötlusviisi valik .....	402
12.12. KORDAMISKÜSIMUSED.....	403
13. PINNATEHNIKA.....	407
13.1. PIND JA PINNAOMADUSED.....	407
13.2. PINNAPUHASTUS .....	410
13.2.1. Mehaaniline puhastus .....	410
13.2.2. Keemiline puhastus.....	412
13.3. VÄRVIMINE .....	414
13.3.1. Värvpinded .....	414
13.3.2. Emailpinded.....	416
13.4. PINDAMINE.....	417
13.4.1. Keemiline pindamine.....	418

13.4.2. Elektrokeemiline pindamine .....	419
13.4.3. Kuumsukelpindamine .....	421
13.4.4. Termopindamine .....	422
13.4.5. Aursadestuspindamine .....	429
13.4.6. Mehaaniline pindamine .....	433
13.5. KORDAMISKÜSIMUSED .....	434
<b>14. PLASTIDE, KERAAMIKA JA KOMPOSIITMATERJALIDE</b>	
<b>TEHNOLOOGIA .....</b>	<b>435</b>
14.1. SISSEJUHATUS .....	435
14.2. PLASTIDE TÖÖTLEMINE .....	436
14.2.1. Plasttoodete vormimine .....	437
14.2.2. Plastide lõiketöötlemine .....	455
14.2.3. Viimistlus ja koosteoperatsioonid .....	456
14.2.4. Plasttoodete projekteerimise iseärasused .....	457
14.2.5. Kummi ja elastomeeride töötlemine .....	461
14.3. KERAAMIKA TEHNOLOOGIA .....	464
14.3.1. Klaasitoodete tehnoloogia .....	464
14.3.2. Tehnokeraamika tehnoloogia .....	468
14.4. KOMPOSIITIDE VALMISTAMINE .....	473
14.4.1. Pulberkomposiitide valmistamine .....	474
14.4.2. Kiudarmeeritud komposiitide valmistamine .....	475
14.4.3. Laminaatkomposiitide valmistamine .....	484
14.5. KORDAMISKÜSIMUSED .....	491
Soovitatav kirjandus .....	493
Aineregister .....	494

## 8. SURVETÖÖTLUS

<p>8.1. OLEMUS JA PROTSESSIDE LIIGITAMINE</p> <p>8.2. PLASTSE DEFORMEERIMISE FÜÜSIKALISED ALUSED</p> <p>8.2.1. Pinge, pingeseisund, deformatsioon, deformatsiooniseisund</p> <p>8.2.2. Metallide ja sulamite reaalne struktuur</p> <p>8.2.3. Metallide plastsuse ja deformatsioonitakistuse mõjurid</p> <p>8.2.4. Survetööstlustemperatuur</p> <p>8.2.5. Hõõrdumine survetöötlemisel</p> <p>8.2.6. Survetööstluse mõju struktuurile ja omadustele</p> <p>8.2.7. Üliplastsus</p> <p>8.3. MAHTVORMIMIS-PROTSESSID</p> <p>8.3.1. Valtsimine</p> <p>8.3.2. Ekstrusioon</p> <p>8.3.3. Tõmbamine</p> <p>8.3.4. Sepistamine</p> <p>8.3.5. Vasarstantsimine</p>	<p>8.3.6. Press-stantsimine</p> <p>8.3.7. Horisontaalstantsimine</p> <p>8.3.8. Sepavaltsimine</p> <p>8.3.9. Rotatsioonstantsimine ja radiaalstantsimine</p> <p>8.3.10. Orbitaalstantsimine</p> <p>8.3.11. Kopeerpressimine</p> <p>8.3.12. Külmvormstantsimine</p> <p>8.3.13. Painutamine</p> <p>8.3.14. Külmviimistlusmeetodid</p> <p>8.4. LEHTVORMIMISPROTSESSID</p> <p>8.4.1. Lehtvormimise eraldusoperatsioonid</p> <p>8.4.2. Lehtvormimise vormimisoperatsioonid</p> <p>8.4.3. Stantsid ja lehtstantsimisseadmed</p> <p>8.4.4. Lehtvormimine elastse keskkonna ja vedelikuga</p> <p>8.4.5. Üliplastne lehtvormimine</p> <p>8.4.6. Kõrgenergeetiline impulsslehtvormimine</p> <p>8.5. KORDAMISKÜSIMUSED</p>
---	--

### 8.1. OLEMUS JA PROTSESSIDE LIIGITAMINE

Metallitööstluse üks olulisemaid eesmärke on toota sobivast metallisulamist tooteid või toodete osi – detaile, millel oleks nii nõutav vorm kui ka optimaalne struktuur. Toote/detaili tootmisel on peale materjali valiku vaja leida sobiv tööstlusviis: valutehnoloogia (vedelvormimine), survega töötlemine (vormimine plastse deformeerimisega), pulbermetallurgia (pulbrite vormimine), liitetehnoloogia (keevitamine, jootmine, liimimine) ja lõiketöötlemine (töötlemine laastu eraldamisega lihtsakujuulisi toorikuid kasutades).

Kõnealune peatükk käsitleb **survetöötlust** (*metal forming, metal working*), mis põhineb materjalide (tavaliselt metallide) võimel deformeeruda plastselt **tardolekus** (*solid state*). Erinevalt lõiketöötlemisest survega töötlemisel jäätmeid praktiliselt ei teki. Samal ajal rakendatakse survetöötlemisel metallisulamite deformeerimiseks suuri jõude.

Survetötlusprotsesse saab liigitada deformeerimistemperatuuri, tooriku geomeetria, deformeerimisprotsessi iseloomu, samuti pingeseisundi järgi.

Deformeerimistemperatuuri järgi eristatakse **kuumsurvetöötlust** (*hot working, hot forming*), **soesurvetöötlust** (*warm working, warm forming*) ja **külmsurvetöötlust** (*cold working, cold forming*).

Deformeerimisprotsessi iseloomu järgi eristatakse **pidevtöötlust** (*processing*) ja **mittepidevtöötlust** (*fabrication*). Pidevtöötlemine on töötlemine pidevmeetoditega. Nii valtsitakse plekki, torusid, tõmmatakse traati ja teisi metallurgiatööstuse pooltooteid. Mittepidevtöötlemine on tükktoodete tootmine. Nii toodetakse stantsiseid leht- või vormstantsimist kasutades (vt p 8.3 ja 8.4).

Tooriku geomeetria järgi eristatakse **mahtvormimist** (*bulk forming, massive forming*) ja **lehtvormimist** (*sheet forming*). Mahtvormimisel kasutatakse enamasti nelinurkse või ümara ristlõikega toorikuid. Deformeerimisega kaasnevad tooriku kuju ja ristlõikepinna olulised muutused. Mahtvormimise meetodeiks on sellised survetötlusmeetodid nagu valtsimine, ekstrudeerimine, tõmbamine, sepistamine, vormstantsimine vasaratel ja pressidel jne (vt p 8.3). Lehtvormimisel kasutatakse **lehtmetalli** (*sheet metal*), kusjuures deformatsiooniprotsessis tooriku kuju küll muutub, kuid paksus enamasti mitte (vt p 8.4).

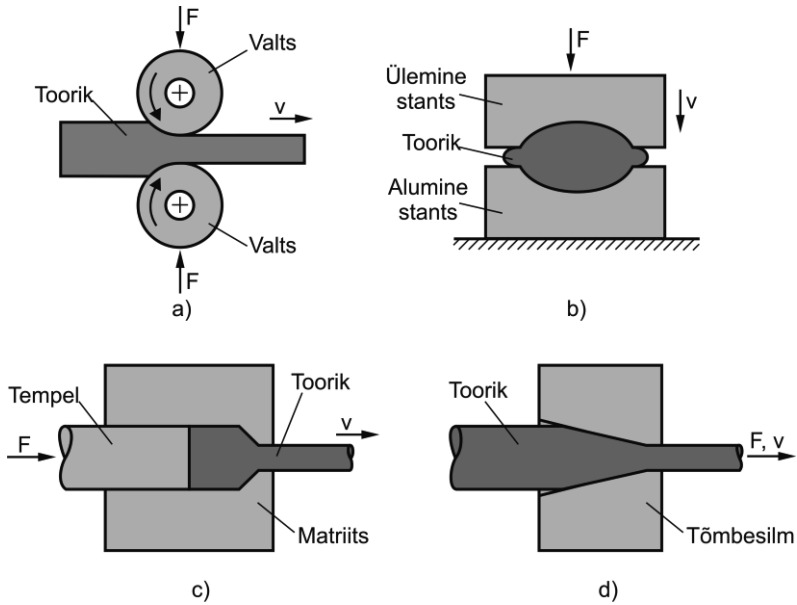
**Pingeseisundi** ehk **pinguse** (*stress state*) järgi eristatakse joon-, tasand- ja ruumpingusega deformatsiooniprotsesse (vt p 8.2.1). Survetöötlemisel prevaleerivad kaks viimati nimetatut. Tasandpingus on iseloomulik lehtvormimise paljudele protsessidele, näiteks sügavtõmbamisele (vt p 8.4.2). Ruumpingus on tüüpiline enamikule mahtvormimisprotsessidele – sepistamine, ekstrudeerimine, vormstantsimine, valtsimine, tõmbamine.

Survetötlusprotsesside liigitamisel lähtutakse edaspidi peamiselt tooriku geomeetriast eristades mahtvormimist (vt p 8.3) ja lehtvormimist (vt p 8.4). Maht- ja lehtvormimise tüüpprotsessid on esitatud joonistel 8.1 ja 8.2.

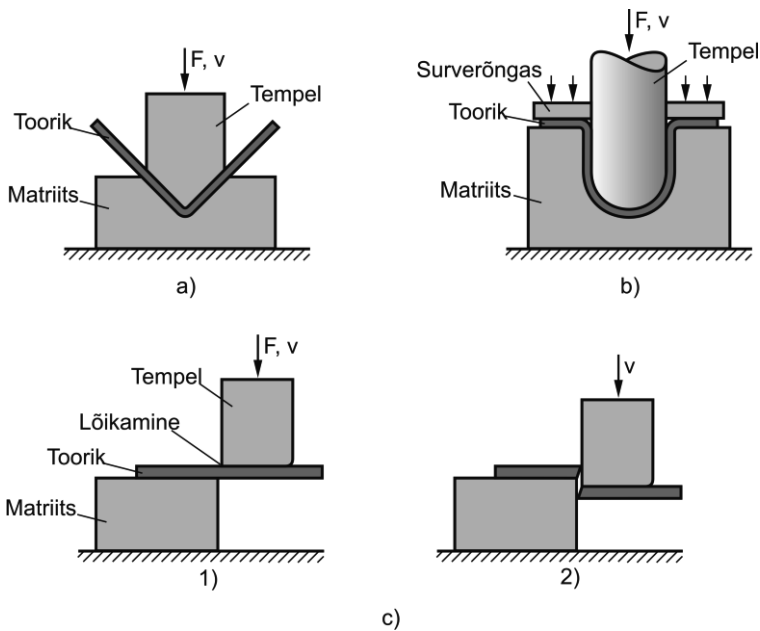
Olenemata tehnoloogiast, mida metallist toodete/detailide või pooltoodete tootmisel kasutatakse, läbib suurem osa neist survetötluse etapi – umbes 90 % toodetud terastest ja 50...60 % mitterauasulamitest töödeldakse metallurgiatööstuses **profiilmetalliks** (*sections, shapes*). Metallurgiatööstuses leiavad kasutamist survetötluse pidevmeetodid – valtsimine, ekstrudeerimine, tõmbamine. Selles peatükis leiavad



käsitlemist plastse deformeerimise füüsikalised alused (vt p 8.2), mahtvormimise (vt p 8.3) ja lehtvormimise (vt p 8.4) protsessid.



**Joonis 8.1.** Tüüpilised mahtvormimisprotsessid: a – valtsimine; b – vormstantsimine; c – ekstrusioon; d – tõmbamine



**Joonis 8.2.** Tüüpilised lehtvormimisprotsessid: a – painutamine; b – sügavtõmbamine; c – tükeldamine: 1 – templi ja matriitsi kontakt, 2 – pärast lõikamist

## 8.2. PLASTSE DEFORMEERIMISE FÜÜSIKALISED ALUSED

### 8.2.1. Pinge, pingeseisund, deformatsioon, deformatsiooniseisund

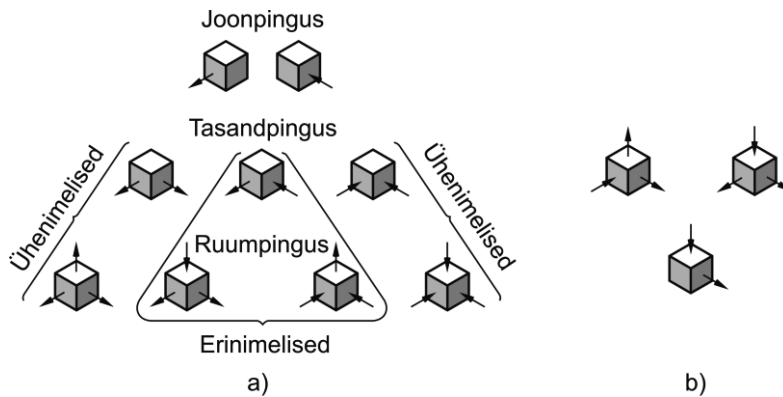
Metalli plastse vormimise (survetöötlemise) eesmärgiks on jääva ehk plastse deformatsiooni tekitamine. Plastsele deformatsioonile eelneb alati jõu eemaldamisel kaduv elastne deformatsioon. Masinadetailidele on lubatud vaid elastsed deformatsioonid, samal ajal kui survetöödeldav toorik deformeerub plastselt.

Pinnaühikule  $S$  mõjuvat jõudu  $F$  nimetatakse **pingeks** (*stress*)  $\sigma = F/S$ . Pinge dimensiooniks on N/mm<sup>2</sup> ehk MPa. Pingeühikutes mõõdetakse paljusid mehaanilisi omadusi (vt ptk 1), millest masinadetailide projekteerimisel ja survetöötlemiseks vajalike jõudude ja töö arvutamisel kasutatakse elastsuspiiri  $\sigma_{el}$  ( $R_e$ ), voolepiiri  $\sigma_y$  ( $R_p$ ) või  $\sigma_{0,2}$  ( $R_{p0,2}$ ) ja tugevuspiiri  $\sigma_u$  ( $R_m$ ), mis metallisulamite puhul on ligikaudu võrdne nii tõmbel kui ka survel  $\sigma_u^c$  ( $R_m^c$ ). Masinadetailid töötavad üldiselt voolepiirist madalamatel pingetel. Survetöötlemisel peavad pinged toorikus voolepiiri ületama.

Eristatakse **normaalpingeid**  $\sigma$  (*normal stresses*) ja **nihke-** ehk **tangentsiaalpingeid**  $\tau$  (*shear stresses, tangential stresses*). Normaalpinge võib olla kas **tõmbepinge** (*tensile stress*) või **survepinge** (*compressive stress*), mis kutsub esile kas **tõmbe-deformatsiooni** (*tensile strain*) või **survedeformatsiooni** (*compressive strain*). Nihkepinge kutsub esile **nihke-** ehk **tangentsiaaldeformatsiooni**  $\gamma$  (*shear strain, shearing strain*).

**Pingeseisund** ehk **pingus** (*stress state*) iseloomustab materjali elementaarmahule kolmes ristiasetsevas suunas mõjuvaid ekstreemseid normaalpingeid, nn peapingeid. Mõnedes suundades võivad need peapinged võrduda nulliga, mispärast eristatakse joon-, tasa- ja ruumipingust (normaalpinged mõjuvad vastavalt ühe, kahe või kolme telje suunas) (vt Joonis 8.3a). **Deformatsiooniseisundit** (*strain state*) iseloomustatakse materjali elementaarmahu võimalike ekstreemsete normaaldeformatsioonidega (kas tõmbe- või survedeformatsioonid) kolmes ristiasetsevas suunas (nn peadeformatsioonidega). Erinevalt pingusest, kus on teoreetiliselt võimalikud 9 erinevat pingeseisundit, saab seoses sellega, et materjali maht plastse deformatsiooni protsessis jääb konstantseks ( $V = \text{const}$ ), teoreetiliselt esineda vaid 3 deformatsiooniseisundit (üks tasandiline ja kaks ruumilist) (vt Joonis 8.3b).

Pingus deformatsioonitsoonis mõjub oluliselt metalli plastsusele ja deformeerumise vastupanule. Mida suurem on survepingete osatähtsus pingeseisundis, seda plastselt metall käitub. Tõmbepingete esinemisel metalli plastsus väheneb. Deformatsiooniseisund ei mõjuta metalli omadusi, vaid deformeerimisprotsessis tekkivat metalli struktuuri.



Joonis 8.3. Pingeseisundi (a) ja deformatsiooniseisundi skeemid (b)

### 8.2.2. Metallide ja sulamite struktuur

Metallide ja sulamite struktuuri on põhjalikumalt käsitletud õpiku 2. peatükis. Kristallivõre põhitüüpideks on ruumkesendatud kuupvõre ( $Fe_\alpha$ , Mo, W jt), tahkkesendatud kuupvõre ( $Fe_\gamma$ , Cu, Al, Au, Pb, Ag jt) ning kompaktne heksagonaalvõre (Mg, Zn, Co jt). Monokristalseid metalle iseloomustab omaduste **anisotroopia** (*anisotropy*), kuna aatomitevahelised kaugused on eri suundades erinevad. Polükristalseid metalle iseloomustab üldjuhul omaduste samasus erinevates suundades – **isotroopia** (*isotropy*), mis on seletatav suure hulga ruumiliselt erineva orientatsiooniga terade omaduste keskmistumisega. Märkatavate plastsete deformatsioonide tulemusena, näiteks valtsimisel või tõmbamisel, on võimalik saavutada ka polükristalse metalli omaduste märkatavat anisotroopiat (vt p 8.2.6, p 8.3.1).

**Kristallivõre defektid** (*lattice defects, lattice imperfections*) liigitatakse järgmiselt (vt ka p 2.2.2. Kristallivõred ja kristallisatsioon).

1. **Punktdefektid** (*point defects, point imperfections*): **vakants** (*vacancy, vacant lattice site*), **lisandiaatom** (*interstitial atom*), **sõlmedevaheline aatom** (*irregular atom*).
2. **Ühedimensioonilised** ehk **joondefektid** (*line defects*): **dislokatsioonid** (*dislocations*).
3. **Kahedimensioonilised** ehk **pinnadefektid** (*surface defects, surface imperfections*): **pakkedefekt** (*stacking fault*) ja **terapiir** (*grain boundary*).
4. Kolmedimensioonilised ehk **ruumdefektid** (*bulk defects, bulk imperfections*): poor, tühik, pragu.

Metallide plastse deformatsiooni teoorias on suur tähtsus joondefektidel – dislokatsioonidel. Punktdefektidel – vakantsidel – on suur liikuvus ja teiste defektidega toimides on neil plastse deformatsiooni protsessides tähtis roll. Kahe- ja

kolmedimensioonilised defektid avaldavad plastse deformatsiooni protsessidele mõju vaid niivõrd, kui võrd soodustavad punktdefektide moodustumist ja liikumist ning on tõhusateks tõketeks joondefektide – dislokatsioonide – liikumisele (terapiirid) või on nende defektide kristallivõrest väljumiskohtadeks (poorid, tühikud).

### 8.2.3. Metallide plastsuse ja deformatsioonitakistuse mõjurid

**Voolepingeks** (*yield stress, flow stress*) nimetatakse tegelikku pinget, mille juures kaob proportsionaalne seos pinge ja deformatsiooni vahel elastses piirkonnas (vt p 1.3, Joonis 1.3) ja metall läheb (joonpingusel) plastsesse olekusse. Voolepinge  $\sigma_0$  on leitav Halli-Petchi võrrandina tuntud seosest:

$$\sigma_0 = \sigma_a + K \cdot D^{-1/2}, \quad (8.1)$$

kus  $\sigma_a$  – kristalli vastupanu dislokatsioonide liikumisele (libisemisele),  
 $K$  – terapiiride tugevdavat mõju iseloomustav parameeter,  
 $D$  – tera läbimõõt.

Mida väiksem tera suurus, seda suurem on voolepinge.

**Deformatsioonitakistuseks** (*flow resistance, resistance to deformation*) nimetatakse pinget, mis mainitud tingimustes – metallisulamite koostis, deformatsioonitemperatuur, deformatsiooniaste, deformatsioonikiirus, pingeseisund (pingus) – kutsuvad esile plastse deformatsiooni. Joonpinguse korral (ühetelgses pingeseisundis) on deformatsioonitakistus ekvivalentne voolepingega:

$$\sigma_0 = f(C, T, e, \dot{e}) \quad (8.2.)$$

kus  $C$  on keemiline koostis,  
 $T$  – temperatuur,  
 $e$  – deformatsiooniaste,  
 $\dot{e}$  – deformatsioonikiirus.

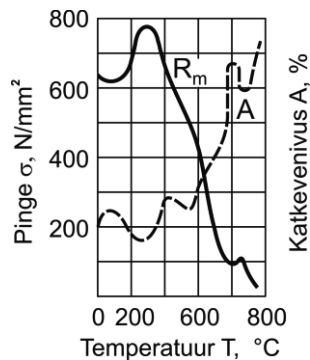
Koostise mõju on võimalik arvestada, kasutades käsiraamatutes toodud erinevate metallisulamite mehaanilisi omadusi – voolepiiri (külmsurvetöötlemisel) või tugevuspiiri (kuumsurvetöötlemisel, kus kõrgetel temperatuuridel voole- ja tugevuspiir erinevad vähesel määral). Näiteks süsinikteraste tugevusomadused (kõikidel võimalikel deformatsioonitemperatuuridel) suurenevad süsinikusalduse suurenedes. Külmsurvetöötlemiseks on piisav plastsus vaid süsinikterastel süsinikusaldusega kuni 0,4...0,5 %. Suure süsinikusaldusega teraseid saab deformeerida vaid kuumalt.

Temperatuur mõjutab vastupanu deformeerumisele enamasti eksponentsiaalselt, s.t temperatuuri  $T$  kasvades deformatsioonitakistus väheneb (plastsus suureneb)

$$\sigma_0 = \sigma_{T_0} e^{-sT} \quad (8.3)$$

kus  $\sigma_{T_0}$  – voolepinge absoluutse nulli temperatuuril (273,13 °C),  
 $s$  – konstant.

Kõikide metallisulamite puhul ei ole omaduste temperatuurisõltuvus sujuv. Joonisel 8.4 on näha, et süsinikterase kuumutamisel 300 °C-ni tõmbetugevus suureneb ja katkevenivus väheneb. Terase sellist käitumist kõnealuses temperatuuripiirkonnas nimetatakse **sinihapruseks** ehk **sinirabeduseks** (*blue brittleness*). Temperatuuri edasisel kasvamisel tugevus ja plastsus muutuvad kiirelt vastupidistes suundades. Siiski, teatud temperatuuridel, näiteks faasimuutuste piirkonnas, kui eksisteerivad üheaegselt kaks faasi (näiteks austeniit ja ferriit), võib plastsus väheneda ja tugevus suureneda (näiteks piirkond 780...800 °C Joonisel 8.4). Järsk plastsuse vähenemine toimub temperatuuridel pisut allpool solidustemperatuuri, kui teradevaheliste piiride tugevus väheneb järsult näiteks terapiiride oksüdeerumise või osalise sulamise tõttu ning toimub terade intensiivne suurenemine. Sellist nähtust nimetatakse **kuumahapruseks** (*hot brittleness*).



**Joonis 8.4.** Süsinikkonstruktsiooniterase (0,4 % C) tõmbetugevuse  $R_m$  ja katkevenivuse  $A$  (plastsuse) temperatuurisõltuvus

Deformatsiooniastme suurenemisel metall kalestusprotsessis tugevneb. Arvutustes kasutatakse näiteks seost:

$$\sigma_0 = k \cdot e^n, \quad (8.4)$$

kus  $k$  – konkreetse metallisulamini konstant,

$n$  – **tugevnemis-** ehk **kalestumistegur** (*strain hardening exponent, strain hardening coefficient*).

**Deformatsioonikiirust** ehk **moonekiirust** (*strain rate*) tuleb eristada **deformeerimiskiirusest** (*deformation velocity, deformation rate*). Esimesel juhul kasutatakse dimensiooni  $s^{-1}$ , teisel  $m/s$ . Silindrilise või prismaatilise tooriku deformatsioonikiirus

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = \frac{v}{h}, \quad (8.5)$$

kus  $h$  – tooriku kõrgus deformeerimise mingil hetkel,  
 $v$  – deformeerimiskiirus.

Deformatsioonikiirus (moonekiirus) mõjustab oluliselt survetöötlusprotsesse: 1) suureneb voolepinge  $\sigma_0$ ; 2) toimub tooriku kuumenemine; 3) väheneb hõõrdetegur tööriista ja tooriku kontaktpinnal.

Deformatsiooni- või deformeerimiskiiruse arvessevõtmise vajadus on tingitud sellest, et metallide mehaanilisi omadusi testitakse deformeerimiskiirustel  $v$  (kuni 0,01 m/s), mis on oluliselt väiksemad deformeerimiskiirustest pressidel (kuni 0,8 m/s) või mehaanilistel vasaratel (kuni 10 m/s ja enamgi). Veelgi suuremad kiirused on iseloomulikumad deformeerimisel plahvatus- või elektrohüdraulilist energiat kasutades (vt p 8.4.6).

Deformeerimis- või deformatsioonikiiruse suurenedes üldjuhul vastupanu deformeerumisele (voolepinge  $\sigma_0$ ) suureneb ja plastsus väheneb. Kiiruse mõju oleneb samuti temperatuurist. Tavaliselt on külmsurvetöötlemisel kiiruse mõju märgatavalt väiksem kui kuumsurvetöötlemisel.

Arvutustes kasutatakse sageli järgmist voolepinge  $\sigma_0$  olenevust deformatsioonikiirusest  $\dot{\epsilon}$ :

$$\sigma_0 = C_v \dot{\epsilon}^m, \quad (8.6)$$

kus  $C_v$  – metallisulami konstantse suurusega, temperatuurist olenev tugevusparameeter,

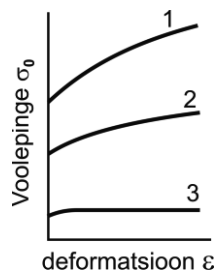
$m$  – **deformatsioonikiiruse tundlikkust** (*strain rate sensitivity*) iseloomustav tegur.

Suurte kiirustega deformeerimisel tuleb arvestada tooriku kuumenemisega **deformatsioonisoojuse** (*deformation heating*) toimel. Metallide koostisest olenevalt muundub 80...90 % deformatsioonienergiast soojusenergiaks. Ülejäänud kulub metalli siseenergia suurenemisele. Suurtel deformatsioonikiirustel, kui soojus ei jõua väliskeskkonda hajuda, võib deformatsioonisoojus tooriku temperatuuri märgatavalt suurendada. Mida kõrgem on deformatsioonitemperatuur ja järelikult, mida väiksem on vastupanu deformeerumisele, seda väiksem on soojusefekt.

#### 8.2.4. Survetöötlustemperatuur

Staatilisi taastumisprotsesse – rekrustalliseerumist ja terakasvu – on eespool käsitletud (vt p 2.2.4. Kalestumine ja rekrustallisatsioon). Survetöötlemist rekrustallisatsioonitemperatuuri ületavatel temperatuuridel iseloomustab tugevnemis- ja taastumisprotsesside samaaegsus. Kõrgetel temperatuuridel tugevnemisprotsessid praktiliselt ei muutu, samas kui plastsuse suurenemisele viivatel taastumisprotsessidel on olulised iseärasused.

Deformatsiooniprotsessis toimuvat rekristalliseerumist nimetatakse **dünaamiliseks rekristallisatsiooniks** (*dynamic recrystallization*). Dünaamilise rekristallisatsiooni iseärasusteks on 1) protsessi suurem kiirus terapiiride liikuvuse suurenemise tõttu deformatsiooniprotsessis, 2) rekristallisatsioonitemperatuuri vähenemine ja 3) protsessi perioodilisus, s.t et polükristalse metalli igas teras algab rekristallisatsioon pärast teatava kriitilise deformatsiooniastme saavutamist. Pärast rekristallisatsiooni algab iga tera uus tugevnemine kuni selle järjekordse käivitumiseni peale vajaliku deformatsiooniastme saavutamist jne. Oluline on seejuures märkida, et eelnimetatud perioodilised protsessid toimuvad erinevates terades erinevatel aegadel (rekristallisatsiooniga ühtedes terades kaasneb tugevnemine teistes), kuna terade deformatsioonid võivad polükristalses metallis oluliselt erineda. Selle tulemusena omandab metall deformatsiooniprotsessis mingi keskmise vastupanu deformatsioonile – voolepinge  $\sigma_0$  (vt kõver 3, Joonis 8.5).



**Joonis 8.5.** Deformatsioonitakistus erinevates temperatuuritingimustes: 1 – külmsurvetöötlus, 2 – soesurvetöötlus, 3 – kuumsurvetöötlus

Survetöötlusprotsesse liigitatakse deformatsioonitemperatuuride ja nendega kaasnevate taastumisprotsesside (rekristallisatsioon) alusel.

**Kuumsurvetöötlusel** (*hot working, hot forming*) toimub metalli deformeerimine rekristallisatsioonitemperatuuri ületavatel temperatuuridel tingimustes, kus metalli plastsust taastavad rekristallisatsiooniprotsessid jõuavad lõpuni minna (vt Joonis 8.5). Suhteliselt väikestel deformatsioonikiirustel piisab temperatuuridest  $T > (0,5...0,7)T_s$ , kus  $T_s$  – sulamistemperatuur. Suurtel deformatsioonikiirustel, et taastamisprotsessid jõuaks lõpuni minna, peab kasutama kõrgemaid temperatuure  $T > 0,7T_s$ .

Kuumsurvetöötlus viiakse läbi **kuumsurvetöötlusvahemikus** (*hot working temperature interval*). Temperatuurivahemiku alumiseks piiriks on madalaim temperatuur, mille juures rekristallisatsiooniprotsessid on taastumisprotsessideks piisavalt kiired:  $T = T_{rekr} + (100...150) ^\circ\text{C}$ . Kuumsurvetöötlusvahemiku ülemine piir on määratud soliidus- või intensiivse oksüdatsioonitemperatuuriga: tavaliselt  $T = T_s - (100... 150) ^\circ\text{C}$ .

Kuumsurvetöötluse eriliigiks on **isotermisurvetöötlus** (*isothermal working, isothermal forming*), kus survetöötlus viiakse läbi konstantsel temperatuuril. See on

vajalik selliste sulamite kuumsurvetöötlusel, mille voolepinge muutub temperatuuri muutudes järsult. Seega tooriku pinna ja südamikü suhteliselt väikesed temperatuurierinevused võivad põhjustada märgatavalt erinevat deformeeritavust ja pragude teket. Selle vältimiseks kuumutatakse tööriistad (stantsid) toorikuga sama temperatuurini, seejuures deformatsiooni kiirused peavad olema mõõdukad, selleks et eraldud deformatsioonisoojus jõuaks väliskeskkonda hajuda.

Kuumsurvetöötuse eeliseks on võimalus deformeerida väiksemat jõudu ja energiat kasutades. Puuduvad piirangud deformatsiooniastmele. Kõrged deformatsiooni-temperatuurid soodustavad samuti keemilise koostise ühtlustumist tänu difusiooni-protsessidele. Toimub ruumdefektide (poorid, praod) kinnikeevitumine. Puudusteks on ahjukeskonna ja tooriku vaheliste reaktsioonide (enamasti oksüdeerumine) suured kiirused ja sellest tingitud halb pinnakvaliteet ja metallikadu. Oksüdeerunud metalli deformatsiooniprotsessiga võib kaasna oksiidide plastsesse pinda sisestamine, mis veelgi pinnakvaliteeti halvendab. Külmsurvetöötusega võrreldes on väiksem toodete täpsus ning samuti struktuuri ebahütlus – lõplik tera suurus on deformatsiooniastmest viimasel operatsioonil, jahtumiskiiruste erinevustest toote pinnal ja südamikus jms. Teraste puhul on probleemiks samuti pinnakihi **dekarbonisatsioon** ehk **süsiniku väljapõlemine** (*decarburization*). Keemiliselt aktiivsed metallid, näiteks Ti, hapruvad oksüdeerumise tulemusena märgatavalt, mistõttu selliseid metalle ja metallisulameid deformeeritakse kaitsekeskkondades. Lõpuks, väikese massiga (< 0,1 kg) tooteid ei ole võimalik üldjuhul kuumsurvetöödelda nende kiire jahtumise tõttu külmema tööriistaga kokku puutudes, samuti soojuskiirguse tõttu väliskeskkonda. Väiksemate toodete korral kasutatakse seetõttu külmsurvetöötlust.

**Külmsurvetöötlus** (*cold working, cold forming*) toimub tingimustes, kus kalestumis-protsessidega taastumisprotsesse ei kaasne, mistõttu metalli vastupanu deformeerumisele kasvab pidevalt (vt Joonis 8.5). Külmsurvetöödeldakse rekristallisatsiooni-temperatuurist madalamatel temperatuuridel ( $T < 0,3T_s$ ).

Külmsurvetöödeldakse enamasti mõõdukate deformeerimiskiirustega, et plastsete deformatsioonidega kaasnev soojuse eraldumine oleks minimaalne.

Külmsurvetöötuse eelised kuumsurvetöötusega võrreldes on eelkõige saadud toodete suurem täpsus (sageli puudub vajadus täiendava mehaanilise töötlemise järele) ja pinnakvaliteet. Eelkuumutuse vajadus puudub. Külmsurvetöötusel koos järgneva lõõmutamisega saadakse toote ühtlasem struktuur kui kuumsurvetöötusel. Parem on toodete tugevus, sh väsimustugevus. Puudused on deformeerimiseks vajalikud suured deformatsioonijõud ja -energiad, mistõttu tuleb kasutada võimsamaid seadmeid. Puuduseks on samuti kalestumisest tingitud piiratud deformatsiooniaste ja jääkpinged. Tugevnemise tõttu deformeerumisel külmsurvetöödeldakse enamasti mitmeetapiliselt, kasutades vahepealseks taastumiseks **protsessilõõmutust** (*process*



*annealing, interpass annealing*). Juhul kui toode/pooltoode ei tohi olla kalestunud (tugevnenud) olekus, tehakse pärast deformeerimist lõõmutamine.

Külmsurvetöötlus on iseärasustest lähtuvalt majanduslikult põhjendatud peamiselt **seeria-** ehk **saritootmisel** (*serial production, batch production*).

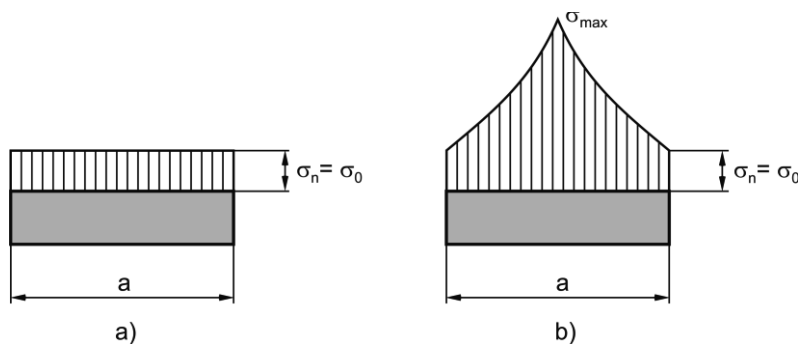
**Soesurvetöötlus** (*warm working, warm forming*) toimub tingimustes, kus tugevne misega kaasnevad taastusprotsessid ei jõua suhteliselt madalate temperatuuride tõttu ( $T = (0,3...0,5)T_S$ ) lõpuni minna. Sellistel temperatuuridel toimub rekristalliseerumine osaliselt või ei toimu üldse. Deformeerimiskiirus võib olla küllalt suur. Väga suurtel deformeerimiskiirustel võib deformatsioonisoojuse eraldumisega kaasneda tempera tuuri kasv ja edasise deformatsiooni jätkumine juba kuumsurvetöötlemise tingi mustes.

Soesurvetöötlust kasutatakse laialdaselt teraste puhul selleks, et vähendada defor meerimiseks vajalikke jõude (külmsurvetöötlusega võrreldes) ja parandada toodete täpsust ja pinnakvaliteeti (kuumsurvetöötlusega võrreldes). Soesurvetöötlemist väldi takse juhtudel, kui sellega kaasneb sellise mikrostruktuuri tekkimine, mis koosneb samaaegselt rekristalliseerunud ja mitterekristalliseerunud teradest.

### 8.2.5. Hõõrdumine survetöötlemisel

Oluliseks survetöödeldavust mõjustavaks teguriks on deformeeriva tööriista ja tooriku kontaktpindade vaheline **hõõrdumine** (*friction*). Sageli võib enam kui 50 % defor matsioonienergiast kuluda hõõrdejõudude ületamisele, mistõttu enamikul juhtudel püütakse hõõrdumist vähendada. Erandiks on valtsimine ja mõned lehtstantsimis- operatsioonid, kus kontakthõõrdejõud mängivad aktiivset rolli. Survega töötlemisel viib hõõrdumine järgmiste tagajärgedeni:

1. Pingus muutub ja deformatsioonid muutuvad ebaühtlasemaks.
2. Tööriist kulub kiiremini. Samuti tekib probleeme tooriku pinnakvaliteedi ja kujuhälvetega.
3. Deformatsioonijõud ja deformatsioonienergia suurenevad märkimisväärselt deformeerimiseks vajaliku normaalsurvepinge  $\sigma_n$  olulise suurenemise tõttu. Joonisel 8.6 on näidatud normaalpinge  $\sigma_n$  jagunemine prismaatilise tooriku ja tööriista kontaktpinnal jämendamisel hõõrdumise puudumise (a) ja hõõrdu mise olemasolu (b) tingimustes. Hõõrdumise (hõõrdeteguri) suurenedes võivad maksimaalne normaalpinge  $\sigma_{max}$  ja järelikult deformatsioonijõud kasvada mitmekordseks deformatsioonitingimustega võrreldes, kus hõõrdu mine puudub.



**Joonis 8.6.** Normaalspingete  $\sigma_n$  jaotus prismaatilise tooriku laiusel  $a$  kontaktpinnal hõõrdumise puudumisel (a) ja hõõrdumise olemasolul (b)

Kontakthõõrdumisega seotud probleemide lahendamiseks kasutatakse surve-  
töötlemisel määreid. Külmsurvetöötlemisel on määreteks rasvad, seebid, veepõhised  
emulsioonid, eripindid. Kuumsurvetöötlemisel kasutatakse grafiiti, kõrgetel tempera-  
tuuridel sulavat klaasi jms. Mõnel juhul, näiteks teraste kuumvaltsimisel ja  
Al-sulamite ekstrusioonil, määreid ei tarvitata.

Kontakthõõrdumine oleneb sellistest asjaoludest nagu tööriista pinnakvaliteet, tooriku  
materjal, deformatsioonitemperatuur ja -kiirus, koormamise iseloom. Üldjuhul, mida  
parem on tööriista pinnakvaliteet, seda väiksem on hõõrdumine (hõõrdetegur).  
Tooriku ja tööriistamaterjalide ebasobiva kombinatsiooni korral võivad hõõrdejõud  
kasvada ülemäära suureks. Külmsurvetöötlemisel on hõõrdumine väiksem hõõrdu-  
misest kuumsurvetöötlemisel. Hõõrdumise (hõõrdejõudude) vähenemisele mõjub  
positiivselt deformeerimiskiiruse suurenemine.

Oluline on rõhutada, et hõõrdumine survetöötlemisel erineb oluliselt hõõrdumisest  
masinate ja seadmete hõõrdepaarides (laagrites, hammasülekannetes jm), kuna  
plastsele deformeerimisele on iseloomulik et:

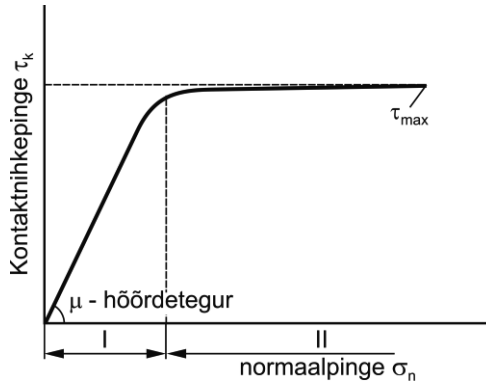
- 1) kontaktpind tööriista ja tooriku vahel on pidevas uuenemises seoses tooriku  
sisemiste metallikihtide voolamisega pinnale;
- 2) deformeeritava keha ja tööriista suhteline libisemine on väike, võrreldes  
suhteliste liikumistega masinate hõõrdepaarides;
- 3) kontaktpinged on kõrged, töödeldava materjali voolepiiri ületavad (sageli üle  
2000 N/mm<sup>2</sup>), samal ajal kui masinate hõõrdepaarides on kontaktpinged  
(<40 N/mm<sup>2</sup>) hõõrdepaari elementide elastsuspiirist väiksemad;
- 4) deformatsioonistme suurenedes tooriku ja tööriista vaheline kontaktpind  
suureneb, kuni tooriku pind omandab tööriista pinna kuju.

**Kontakthõõrdumisel** (*interface friction*) kehtib kontaktnihkepingete  $\tau_k$  ja normaal-  
pingete  $\sigma_n$  vahel kontaktpinnal hõõrdeseadus

$$\tau_k = \mu \sigma_n, \quad (8.7)$$

kus  $\mu$  on **hõõrdetegur** (*coefficient of friction*), mis on võrdne graafiku (Joonis 8.7)  $\tau_k = f(\sigma_n)$  tõusunurga tangensiga.

Oluline on rõhutada, et normaalpinge või hõõrdeteguri suurenedes ei saa kontakt-nihkepinged lõputult suureneda, kuna nad ei saa ületada deformeeritava tooriku materjali maksimaalset voolepinget nihkel. Kontaktnihkepinge  $\tau_k$  saab normaalpingete  $\sigma_n$  suurenedes suureneda vaid suuruseni  $\tau_{max}$ . Tingimustes, kus  $\tau_k = \tau_{max}$  tooriku ja tööriista vastastikuse nihkumise tingimused muutuvad – toimub tooriku „haardumine“ (kleepumine) tööriista pinnaga ja edasised libisemised ei toimu enam tooriku ja tööriista pindade vahel, vaid libisemine läheb üle kontaktpinna all asuvatesse tooriku pindmistesse kihtidesse – leiab aset nn **haardehõõrdumine** (*sticking friction*). Haardehõõrdumise tingimustes kontaktnihkepinge võrdsustub töödeldava materjali voolepingega nihkel.



**Joonis 8.7.** Kontaktnihkepingete  $\tau_k$  olenevus normaalpingest  $\sigma_n$  kontakthõõrdumisel (I) ja haardehõõrdumisel (II)

### 8.2.6. Survetöötuse mõju struktuurile ja omadustele

Survetöötusega kaasneb metalli makrostruktuuri oluline muutumine, kusjuures tekkiv struktuur oleneb deformatsioonitemperatuurist ja -astmest. Piisavalt suurte deformatsiooniastmetega (> 30 %) külmsurvetöötlemisel moodustub kiudstruktuur – **kiudtekstuur** (*fibering, fiber texture*), mida iseloomustab terade väljavenimine maksimaalsete deformatsioonide suunas. Suurte deformatsiooniastmetega deformeermisel, näiteks valtsimisel ja tõmbamisel, moodustub nn **kristallograafia-tekstuur** (*crystallographic texture, crystallographic fibering*), mida iseloomustab deformeerunud terades olevate kristallograafiatasandite orienteerumine maksimaalsete deformatsioonide suunas.

Keskmiste deformatsiooniastmetega deformeerimisel moodustuv kiudtekstuur on kõrvaldatav rekristalliseeriva lõõmutamisega, mil moodustuvad võrdtelgkristallid. Kristallograafiafiatasandite märgatava orienteeritusega struktuuride korral (kristallograafiafiattekstuur) võib **tekstuur** (*preferred orientation, texture*) rekristallisatsiooniprotsessis säilida.

Enamasti võib kuumsurvetöötlemisel, kuid ka külmsurvetöötlemisel moodustuda ribastruktuur – **ribatekstuur** (*flow structure, mechanical fibering*), mida iseloomustab mittemetallsete osakeste (metallis deformatsioonitemperatuuril mittelahustunud sulfiidid, karbiidid, nitriidid jt) paiknemine kihtidena maksimaalsete deformatsioonide suunas, näiteks valtsimisel (vt Joonis 8.12). Puhaste metallide ja deformatsioonitemperatuuril ühefaasiliste sulamite survetöötlemisel sellist struktuuri ei moodustu.

Ribatekstuur ei ole termotöötlemisega (rekristalliseeriva lõõmutusega) kõrvaldatav, kuna mittemetallsete osakesed rekristallisatsiooniprotsessis ei rekristalliseeru. Selline struktuur on muudetav täiendava survetöötlemisega (näiteks sepistamisega), mil kõrvaldatakse mittemetallsete osakeste orienteeritud asetus struktuuris (vt p 8.3.4).

Mõlemad, nii kiud- kui ka ribatekstuur põhjustavad survetöödeldud metalli omaduste **anisotroopiat** (*anisotropy*), s.o omaduste erinevust maksimaalsete deformatsioonide ja sellega ristuvates suundades. Seejuures erinevate omaduste anisotroopia on erinev. Näiteks tõmbetugevuse erinevus piki ribatekstuuri ja sellega risti praktiliselt ei erine, samal ajal kui plastsust iseloomustavate omaduste (katkevenivus, katkeahenemine), samuti dünaamilisel koormamisel määratavate omaduste (löögisitkus) erinevus on seda suurem, mida suurem oli eelnev deformatsiooniaste. Survetöödeldud ribatekstuuri omava metalli struktuuri anisotroopiat arvestades tuleb toode projekteerida selliselt, et tööprotsessis mõjuvate maksimaalsete tõmbepingete suund ühtiks ribatekstuuri maksimaalsete omaduste suunaga.

Lisaks struktuurimuutustele kaasneb survetöötlemisega ruumdefektide (poorid ja praod valatud struktuuriga metallis) kõrvaldumine. See viib metalli tiheduse suurenemisele ja mehaaniliste omaduste paranemisele. Märgatavalt suurenevad tõmbetugevus, voolepiir, samuti plastsus. Lõpptulemusena iseloomustavad survetöödeldud metalli alati paremad mehaanilised omadused sama keemilise koostisega valatud metalliga võrreldes.

### 8.2.7. Üliplastsus

**Üliplastsus** (*superplasticity*) on metalli või metallisulamite võime kõrgetel temperatuuridel ja etteantud deformatsioonikiirustel ilma purunemiseta oluliselt deformeeruda. Üliplastses olekus saavad võimalikuks deformatsiooniastmed, mis ületavad 1000 % (plastsetel metallidel tavaolekus mitte üle 50...60 %). Samuti on üliplastsele

olekule iseloomulik suurte deformatsioonide võimalus madalate pingete juures. Üliplastsus avaldub sobiva struktuuri, deformatsioonitemperatuuri ja -kiiruse korral.

Struktuur. Üliplastsus avaldub peeneteralistel (võrdtelgsed terad suurusega  $< 10 \mu\text{m}$ , tavaliselt alla  $1 \mu\text{m}$ ) metallisulamitel. Enamikul metallisulameil, millel avaldub üliplastsus, on deformatsioonitemperatuuril kahefaasiline eutekt- või eutektoidstruktuur.

Temperatuur. Üliplastsus avaldub temperatuuridel  $T > (0,4\dots 0,5)T_s$ , s.o rekristallisatsioonitemperatuuri ületavatel temperatuuridel. Peeneteralise struktuuri säilitamiseks deformatsioonitemperatuuril kasutatakse suuri kuumutuskiirusi ( $200\dots 300 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ).

Deformatsioonikiirus. Voolepinge  $\sigma_0$  olenevus deformatsioonikiirusest on väljendatav seosega (8.6). Üliplastset olekut iseloomustab  $\sigma_0$  märgatav deformatsioonikiiruse tundlikkus ( $m = 0,3\dots 0,8$ ), kusjuures metalli tugevneb vähe. Üliplastsus avaldub tavaliselt deformatsioonikiirustel  $10^{-1}\dots 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

Üliplastses olekus deformeermist iseloomustavad peale märkimisväärset deformeermist vaid väikesed muutused metallisulami struktuuris. See näitab deformatsioonimehhanismi erinevust võrreldes tavapärase deformatsioonimehhanismidega (dislokatsioonide libisemine, kristallide kahestumine). Üliplastses olekus on prevaleerivaks deformatsioonimehhanismiks **teradevaheline libisemine** (*grain boundary sliding*). Oluline on samuti **roome** (*creep*). Mida väiksem on deformeeritava metalli tera suurus, seda suuremat rolli mängib deformatsiooniprotsessis teradevaheline libisemine (50...70 %).

Üliplastsus on tehnoloogias leidnud laialdast rakendust mitmete eeliste tõttu. Esiteks on ülisuured deformatsiooniastmed saavutatavad ühe tehnoloogilise operatsiooniga. Teiseks on deformeermine võimalik suhteliselt väikeste pingete puhul. Näiteks saab üliplastses olekus võimalikuks Al- ja Ti-sulamitest õhukeste lehtede (paksus 1...2 mm) deformeermine väga väikeste pingete korral  $0,6\dots 0,8 \text{ N/mm}^2$ , kasutades suruõhku (vt p 8.4.5) nagu plasttoodete pneumovormimiselgi (vt p 14.2.1). Võimalik on kiirlõiketerastest tööriistade (matriitsid, freesid, puurid jne) üliplastses olekus deformeermine.

### 8.3. MAHTVORMIMISPROTSESSID

**Mahtvormimisel** (*bulk forming, bulk deformation*) toimub pooltoodete või toodete tootmine ümar-, nelikant- vm ristlõikega mahttoorikust. Mahtvormimise erimiteks on valtsimine, ekstrudeermine, tõmbamine, sepistamine ja vormstantsimine. Mahtvormimine võimaldab anda tootele või pooltootele **lõppkujulähedase** (*near-net shape, net shape*) vormi, mis ei vaja või vajab minimaalselt viimistletavat lõiketöötlust.

Mahtvormimisoperatsioone teostatakse kuumalt, soojalt ja külmalt – kuum-, soe- või külmvormstantsimine, kuum- või külmvaltsimine jne. Kuumsurvetöötlust kasutatakse, kui tooriku vormi on vaja toote saamiseks märkimisväärselt muuta. Külm- ja soesurvetöötlust kasutatakse, et tagada lisaks vormi muutustele samuti suurepärase pinnakvaliteeti ning kalestumisest tingitud suurem tugevus.

### 8.3.1. Valtsimine

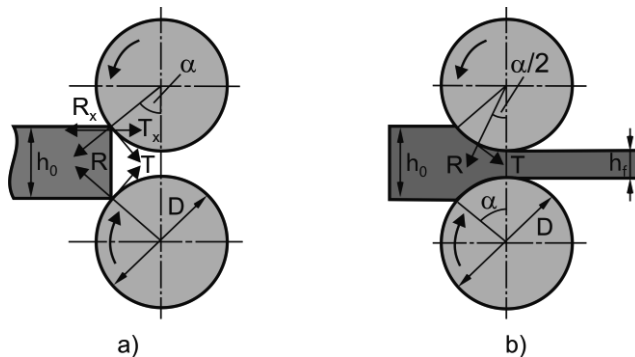
#### Protsessi mehhaanika

**Valtsimisel** (*rolling*) haaratakse metall hõõrdejõudude toimetel kahe vastassuunas pöörleva **valtsi** (*roll*) poolt kaasa ja surutakse õhemaks (Joonis 8.8). Et maht on jääv, siis tooriku pikkus ja vähesel määral ka laius suurenevad. Valtsi ja tooriku vahelise **haardekaarele** (*arc of bite*) vastavat nurka nimetatakse **haardenurgaks** (*angle of bite, entering angle*). Surudes tooriku mingi jõuga vastu valtse (Joonis 8.8a), tekivad kontaktpunktis valtsilt reaktsioonijõud  $R$  ja sellega risti hõõrdejõud  $T$ , mis püüab materjali kaasa haarata (olukord on sümmeetriline mõlemal pool tooriku pikitelge).

Kirjutades jõudude tasakaalu võrrandit horisontaalsihis ( $\alpha$  – haardenurk)

$$R \sin \alpha - T \cos \alpha = 0, \quad (8.8)$$

ja teades, et hõõrdeegur  $\mu = T/R$ , saame  $\mu = \tan \alpha$ . Selleks, et pöörlevad valtsid materjali kaasa haaraksid, peab protsessi algatamiseks kehtima haardetingimus  $\mu > \tan \alpha$ .



**Joonis 8.8.** Valtsimine: a – protsessi algus, b – protsessi stabiilne faas

Juhul kui kaasahaaramine on toimunud ja protsess stabiliseerub (Joonis 8.8b), lihtsustuvad haardetingimused. Sellisel juhul on tasakaaluvõrrand

$$R \sin \alpha/2 - T \cos \alpha/2 = 0 \quad (8.9)$$

Kaasahaaramise tingimus on stabiilses valtsimise faasis kergem:  $\mu > \tan \alpha/2$ .

Valtsimisprotsessi iseloomustavateks suurusteks on **absoluutne pigistus** (*draft*)  $\Delta h = h_0 - h_f$  (vt Joonis 8.8) ja **pigistustegur** (*reduction*)  $\varepsilon = (h_0 - h_f)/h_0$  ning **venitustegur** ehk **venitusaste** (*reduction ratio*). Venitustegur  $r$  on ühest suurem, deformatsiooni suurust iseloomustav tegur, mis leitakse deformeeritud tooriku esialgse ristlõikepindala jagamisel deformeerimata tooriku omaga või arvutatakse tooriku pikkuste kaudu enne ja pärast valtsimist:

$$r = \frac{b_0 h_0}{b_f h_f} = \frac{l_f}{l_0}, \quad (8.10)$$

kus  $h_0, b_0, l_0$  – kõrgus, laius ja pikkus enne valtsimist,  
 $h_f, b_f, l_f$  – kõrgus, laius ja pikkus pärast valtsimist.

Valtsimise praktikas ühel **läbimil** (*pass*)  $r = 1, 1 \dots 1, 6$ , harva rohkem.

Praktiliste ülesannete lahendamiseks saab geometriast ja tingimusest hõõrdetegur  $\mu > \tan \alpha$  lähtudes tuletada maksimaalse absoluutse pigistuse ühe läbimiga:

$$\Delta h \leq D \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \mu}} \right) \quad (8.11)$$

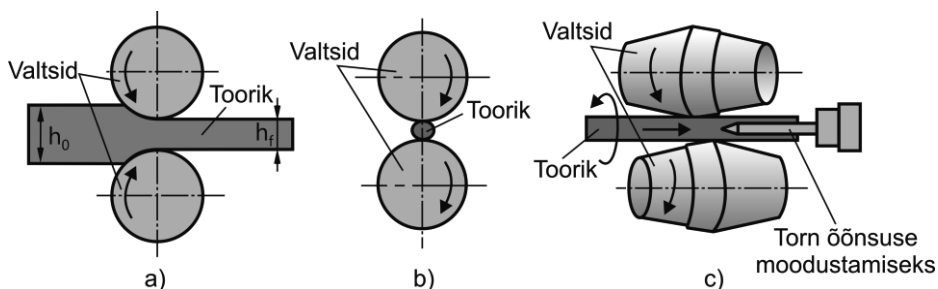
Seosest nähtub, et lisaks hõõrdeteguri suurendamisele suurendab pigistust ja seega tootlikkust valtside diameetri  $D$  suurendamine.

Metallide survetöötlemisel on hõõrdetegur üldiselt kahjulik, suurendades deformeermiseks vajalikku jõudu ja tööd ning kiirendades survetööstustööriistade kulumist. Valtsimisel on hõõrdumine valtsimisprotsessi läbiviimise eelduseks. Praktikas on mitmesuguste metallide hõõrdetegurid **kuumvaltsimisel** (*hot rolling*) tavaliselt piires 0,22...0,32 ja **külmvaltsimisel** (*cold rolling*) piires 0,04...0,18.

Olenevalt valtside ja toote suhtelisest liikumisest eristatakse kolme valtsimise skeemi (meetodit): **pikivaltsimine** (*lengthwise rolling*), **ristivaltsimine** (*cross rolling, transverse rolling*) ja **kald-** ehk **kruvivaltsimine** (*screw rolling, helical rolling*).

Eespool juba käsitletud pikivaltsimisel (Joonis 8.9a) on valtsitava metalli liikumissuund risti valtside pöörlemisteljega. Sellise skeemi järgi väheneb tooriku ristlõige ja suureneb peamiselt ta pikkus. Pikivaltsimise tüüptoodanguks on püsiva profiiliga leht- ja sordimetall.

Ristivaltsimisel (Joonis 8.9b) pöörlevad paralleelsete telgedega valtsid samas suunas, pannes pöörlema tooriku, mis pikeneb oma telje sihis. Valtside ja tooriku pöörlemisteljed on paralleelsed. Tüüptoodanguks on perioodilise profiiliga valtsmetall (Joonis 8.13b).

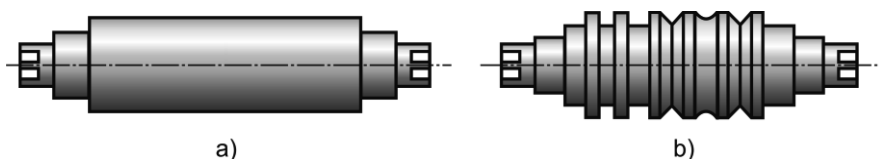


**Joonis 8.9.** Valtsimise kolm põhiskeemi: a – piki-; b – risti-; c – kaldvaltsimine

Kaldvaltsimisel (Joonis 8.9c) paiknevad valtside teljed teineteise suhtes väikese nurga ( $4...18^\circ$ ) all. Valtsid pöörlevad samas suunas, andes toorikule samaaegselt nii pöörleva kui ka sirgjoonelise liikumise (kruviliikumise). Sel viisil valtsitakse õmbluseta torusid.

### Valtsimisseadmed

Valtsimise tööriistaks on **valtsid** (*rolls*) (Joonis 8.10). Lehtmetall, plaadid ja lint valtsitakse silevaltsidega (Joonis 8.10a), keeruka profiiliga sordimetall aga **vaguvaltsidega** (*grooved rolls*) (Joonis 8.10b). Ringsisselõiget valtsi pinnal nimetatakse **valtsivaoks** (*groove*). Kahe või enama valtsivaoga moodustunud ava profiili nimetatakse **valtsikaliibris** (*pass*). Ühel valtsipaaril on tavaliselt mitu kaliibrit. Valtsimine toimub järjestikku **pigistuskaliibris** ehk **venituskaliibris** (*breakdown pass*), **eelkaliibris** (*roughing pass*, *rougher*) ja **lõppkaliibris** (*finishing pass*, *finisher*). Pigistuskaliibrid on ette nähtud tooriku (nt valuploki) ristlõikepinna oluliseks vähendamiseks. Eelkaliibrid on valtsikaliibrid, millistes lisaks tooriku ristlõikepinna vähendamisele toimub esmane lähendus soovitud profiilile. Lõppkaliibrites antakse toorikule ettenähtud profiil.



**Joonis 8.10.** Valtsid ja valtsikaliibrid: a – silevalts; b – vaguvalts

Lihtsaim **valtspink** (*rolling mill*, *mill*) koosneb ühest või mitmest **valtstoolist** ehk **valtsraamist** (*mill stand*, *stand*), ülekandemehhanismist ja elektrimootorist. Valtstoolis asuvate valtsidevahelise kauguse reguleerimiseks on eraldi ajam, mis nihutab ülemist valtsi. Pöördemoment antakse valtsidele kiirust vähendava reduktori ja hammasülekande kaudu.



Valtspinke liigitatakse valtside arvu ja asetuse järgi valtstoolis, valtstoolide arvu, valtstoolide asetuse ja kasutusotstarbe järgi.

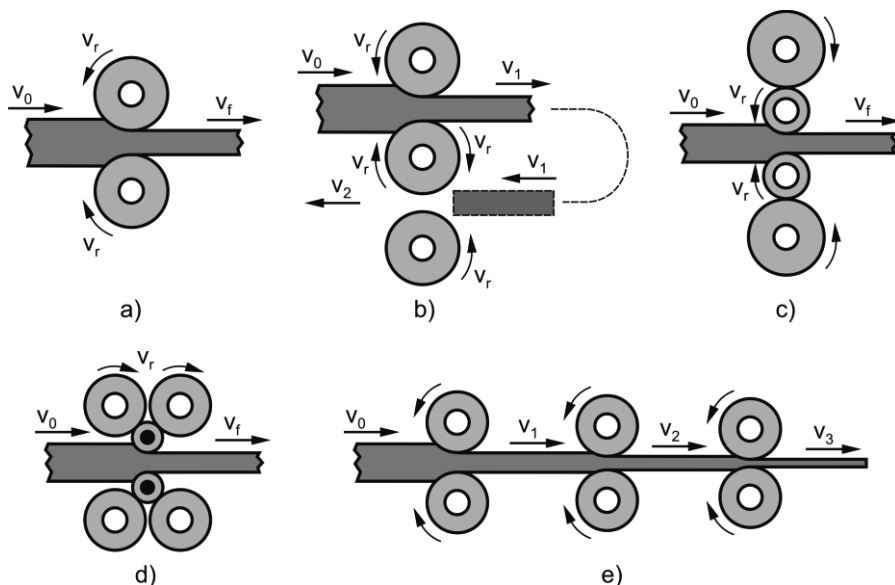
Valtside arvu ja asetuse järgi eristatakse duo-, trio-, kvarto-, palju- ja tandem-valtspinke (Joonis 8.11). **Duovaltspingis** (*duo-mill, two-high mill*) on kaks valtsi. Kui valtside pöörlemissuunda muuta ei saa, nimetatakse valtspinki (ja vastavat valtstooli) **mittereverseeritavaks valtspingiks** (*non-reversing mill*) ja valtsimine toimub ühes suunas. Kui valtspingi valtside pöörlemissuunda saab muuta, siis nimetatakse seda **reverseeritavaks valtspingiks** (*reversing mill*). Sel juhul läbib toorik valtside vahet mitu korda vastassuundades, kusjuures valtside vahet iga läbimi puhul vähendatakse. Reverseeritavaid duoraame kasutatakse põhiliselt pigistusvaltspinkides – **bluumingutes** (*bloomer, blooming mill*) ja **slääbingutes** (*slabber, slabbing mill*), mis on ette nähtud suurte toorikute valtsimiseks valuplokkidest (vt p 5.1.1. Rauametallurgia: Valuplokkide tootmine ja valuploki struktuur).

**Triovaltspingis** (*trio mill, three-high mill*) või **triovaltstoolis** (*trio stand, three-high stand*) on kolm mittereverseeritavat valtsi. Pärast tooriku valtsimist ühes suunas alumise ja keskmise valtsi vahel suunatakse ta keskmise ja ülemise valtsi vahele, kus valtsitakse vastassuunas.

**Kvartovaltspingis** (*four-high mill*) või **kvartovaltstoolis** (*double-duo stand, four-high stand*) on neli valtsi: sisemised väiksema läbimõõduga **töövaltsid** (*work roll*) ja äärmised **tugivaltsid** (*backing rolls, back-up rolls*). Väikse diameetriga valtside eelis on nende väiksem kontaktpind toorikuga ja selle tõttu väiksemad jõud ja energiakulu deformeerimiseks. Tugivaltsid annavad töövaltsidele jäikuse, tagades valtsprofiili suurema täpsuse.

**Paljuvaltspingis** (*multiroll mill, cluster mill*) ja vastavates valtstoolides on 6, 12 ja enam valtsi. Töövaltsid toetuvad ajamvaltsidele ja need omakorda tugivaltsidele. Neid pinke kasutatakse enamasti õhukeste lehtede ja lintmetalli külmalvaltsimisel, aga ka suure laiusega plaatide ja lehtede kuumvaltsimisel.

Paljuvaltspinkide eriliigiks on **planetaarvaltspink** (*planetary mill*), mille kahe tugivaltsi perimeetri ulatuses asetseb palju väikeseläbimõõdulisi töövaltse, mis pöörlevad planetaarselt – üheaegselt ümber oma telje ja samaaegselt ümber pöörlevate tugivaltside telje. Pink võimaldab ühe läbimiga suuri pigistusi (venitustegureid).



**Joonis 8.11.** Valtspinkide liigitus valtside arvu ja asetuse järgi valtstoolis: a – duo-; b – trio-; c – kvarteto-; d – paljvaltsililine; e – tandem

Valtstoolide arvu järgi liigitatakse valtspingid ühe- ja mitmetoolilisteks ja valtstoolide asetuse järgi **jada-** ehk **järjestikvaltspingid** (*straight-away mills*) tooriku töötlemisega samaaegselt ühes valtstoolis ja **tandemvaltspingid** ehk **pidevaltspingid** (*tandem mills*) tooriku töötlemisega samaaegselt mitmes või kõigis valtstoolides.

Kõige lihtsam on liigitamine otstarbe järgi: **pigistusvaltspink** (*breakdown mill, roughing mill, rougher, cogging mill*), **toorikuvvaltspink** (*billet mill*), **sordimetallivvaltspink** (*section mill, bar-rolling mill*), **toruvvaltspink** (*pipe mill, tube-rolling mill*), **plekivvaltspink** ehk **lehtmehalli valtspink** (*sheet mill*).

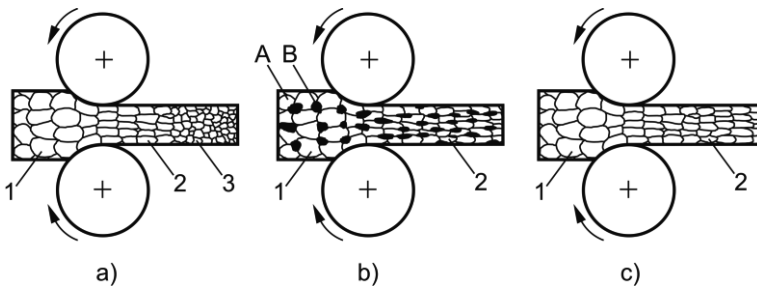
### Valtsmetalli struktuur ja omadused

Valtsimisel on lähtetoorikuks valuplokid. **Valustruktuuriga** (*cast structure*) plokkidel (vt p 5.1.1. Rauametallurgia: Valuplokkide tootmine ja valuploki struktuur) on **terastruktuur** (*grained structure*), mis valuploki kristallisatsiooni iseärasuste tõttu on ebäühtlane ja sisaldab eri suurusega ning erinevates suundades orienteeritud teri, samuti gaasipõore (keev- ja poolrahuliku terase korral) ja mittemetalseid osakesi. Valtsimisega kaasneb struktuuri oluline muutumine, kusjuures saadav struktuur on deformatsioonitemperatuurist (kül- või kuumvaltsimine), deformatsioonistmest kui ka metallisulami struktuurist deformatsioonitemperatuuril.

Kuumvaltsimisel toimub pooride kinnikeevitumine, valtsitava metalli terade deformeerumine koos sellega kaasneva karestumise ja terade väljavenimisega maksimaalse deformatsiooni suunas. Rekristallisatsioonitemperatuuri ületaval kuumsurvetööt-

misel kaasneb karestumisega terade rekristallisatsioon valtside vahelt väljunud metallis (Joonis 8.12a). Tulemuseks on ühtlase peeneteralise struktuuriga metall, mida iseloomustab omaduste isotroopsus (ühesugusus eri suundades).

Paljud metallisulamid (kõrgsüsinikterased  $C > 0,8 \%$ , legeertööriistaterased) on valtsimistemperatuuril kahefaasilised. Suurtel deformatsiooniastmetel ( $> 30 \%$ ) tekitab see nn ribatekstuuri, mida iseloomustab kuumsurvetöötlustemperatuuril mittelahustunud faaside (karbiidid, nitriidid, sulfiidid jt metalliühendid) paiknemine maksimaalse deformatsiooni suunaliste kihtidena (ribadena) (Joonis 8.12b). Sellise struktuuriga metalli iseloomustab omaduste anisotroopia (erisugusus eri suundades), mida tuleb arvestada edasisel töötlemisel ja kasutamisel.



**Joonis 8.12.** Valtsimistingimuste (kuum- ja külmaltsimine) ja valtsitava metalli struktuuri mõju valtsitud metalli struktuurile: a – homogeense struktuuriga metalli kuumvaltsimine (1 – jämeteraline algstruktuur, 2 – kiudtekstuur, 3 – peeneteraline rekristalliseerunud struktuur); b – heterogeense struktuuriga metalli kuumvaltsimine (1 – jämeteraline algstruktuur, 2 – ribatekstuur, A, B – erinevad faasid); c – homogeense struktuuriga metalli külmaltsimine (1 – algstruktuur, 2 – kiudtekstuur)

Külmaltsimisega ei kaasne deformeeritud metalli rekristallisatsiooni, mistõttu saadud metalli iseloomustab karestus ja deformatsiooniastmetel  $> 30 \%$  kiudtekstuur (vt Joonis 8.12c). Kiudtekstuuri omav metall on anisotroopsete omadustega. Vajadusel on see kõrvaldatav kuumutamise (lõõmutamisega) üle rekristallisatsioonitemperatuuri.

Eriti suurte deformatsiooniastmetega ( $> 70 \%$ ) kül- ja kuumdeformeerimise käigus tekib nn kristallograafiatekstuur (vt p 8.2.6), mida iseloomustab deformeeritavates terades olevate kristallograafiatasandite orienteerumine maksimaalse deformatsiooni suunas. Kristallograafiatekstuuri iseloomustab eriti suur omaduste anisotroopia. Selline struktuur ei ole üldiselt järgneval kuumutamisel (lõõmutamisel) muudetav. Mõnikord luuakse anisotroopsete omadustega tekstuur teatavatel kindlatel kasutus-eesmärkidel.

## Valtstooted

### Valtsmetalli sortiment

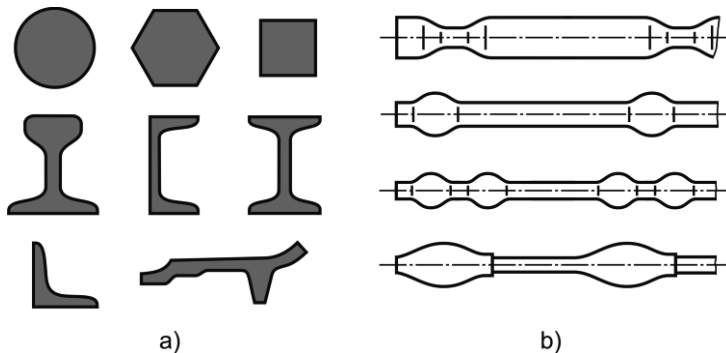
**Valtsmetalli** (*rolled selections, rolled stock, mill product*) võib liigitada viide gruppi:

- 1) **sordimetall** ehk **sordivaltsmetall** (*bar sections, bars*),
- 2) **lehtmetall** ehk **lehtvaltsmetall** ehk **plekk** (*sheets [and plates]*),
- 3) **torud** (*pipes, tubes*),
- 4) spetsiaalsed valtstooted,
- 5) **paindprofiilid** (*roll-formed shapes*).

**Sordimetall** (Joonis 8.13a) liigitatakse ristlõike kuju, mõõtmete ja valtsimis-tingimuste järgi. Ristlõike kuju järgi on liigid järgmised:

1. **Lihtprofiilid**, kuhu kuuluvad:

- **ümarmetall** (*round bars, rounds*), sealhulgas **lihvitud ümarmetall** (*high-polished rounds*),
- **nelikantmetall** (*square bars, squares*),
- **kuuskantmetall** (*hexagonal bars, hexagonales*),
- **ribametall** ehk **lattmetall** (*strip*) – õhuke ja kitsas sordimetall,
- **ribatoorik** (*skelp*) – riba keevistorude tootmiseks.



**Joonis 8.13.** Valtsmetalli sortiment: a – sordimetall; b – spetsiaalsed perioodilised profiilid

2. **Profiilmetall** ehk **profiilvaltsmetall** (*structural shapes, sections*), kuhu kuuluvad:

a) üldotstarbeline profiilmetall:

- **nurkmetall** ehk **nurgik** (*angle bars, angles*), sealhulgas **võrdkülgnurkmetall** (*equal-leg angles, equal-sided angles*), **isekülg-** ehk **erikülgnurkmetall** (*unequal-leg angles, unequal-sided angles, L-bars*),
- **T-tala** (*T-beam, T-bar*),
- **I-tala, kaksik-T-tala** (*I-beam, I-bar, double T-beam*),
- **H-tala, laia tallaga I-tala** (*H-beam, H-bar, broad-flange beam*),
- **U-tala, karptala** (*U-beam, U-bar, channel*) jne;

b) eriotstarbeline profiilmetall:

- **rööbas, relss** (*rail*),
- **sarrusteras** (*reinforcing bars, rebars*),
- eriprofiilid auto-, laeva-, põllumasinaehitusele jne.

Kogu eelnimetatud sordimetalli liigitatakse ristlõike mõõtmete järgi:

- **jämesordimetall** (*heavy sections, large sections*) – ligikaudsed ristlõikemõõtmed 80...200 mm,
- **kesksordimetall** (*medium sections*) – ligikaudsed ristlõikemõõtmed 30...80 mm,
- **peensordimetall** (*small sections, light sections, merchant-mill sections*) – ligikaudsed ristlõikemõõtmed alla 20...30 mm,
- **valtstraat** (*wire rod, green rod*) – ümmarguse ristlõikega Ø 5...10 mm toorik.

Valtsimistingimuste järgi toodetakse kuumvaltsitud ja külmmaltsitud sordimetalli (suure täpsuse ja pinnasiledusega peensordimetall).

Lehtmetaili ehk **plekki** liigitatakse ristlõike kuju, mõõtmete, valtsimistingimuste, omaduste, kasutusalaade jt näitajate järgi.

Ristlõike kuju järgi toodetakse kitsast ja laia plekki, samuti **lintmetalli** (*band, ribbon*) – õhuke lehtmetail kitsa riba kujul.

Mõõtmete (paksuse) järgi on lehtmetaili liigid:

- **paksplekk** (*plate, heavy sheet*) – paksus 4...160 mm,
- **õhukeplekk** (*sheet*) – paksus 0,2...3,9 mm,
- **foolium** (*foil, metal paper*) – paksus alla 0,2 mm, lintmetallina.

Valmistamistehnoloogias lähtudes tuntakse:

- **kuumvaltsplekk** (*hot-rolled sheet, hot-rolled plate*),
- **külmmaltsplekk** (*cold-rolled sheet*) – paksus 0,08...5 mm, tavaliselt kuni 3 mm,
- **õhuke külmmaltsplekk** (*light sheet*) – külmmaltsitud lõõmutatud õhuke lehtteras – paksusega 0,08...0,5 mm,
- **mustplekk** (*black sheet*) – pinnakatteta õhuke terasplekk,
- **valgeplekk** (*tinned sheet, tin plate*) – tinatud õhuke terasplekk.

Omadustest lähtudes toodetakse viit liiki külmmaltsitud lehtmetaili:

- **lõõmutatud plekk** (*annealed sheet*),
- **pindtugevdatud** ehk **dresseeritud plekk** (*skin-rolled sheet, temper-rolled sheet*),
- **veerandkõva plekk** ehk **veerandtugevdatud plekk** (*quarter-hard sheet*),
- **poolkõva plekk** ehk **pooltugevdatud plekk** (*half-hard sheet*),
- **täiskõva plekk** ehk **täistugevdatud plekk** (*full-hard sheet*).

**Pindtugevdamisel** ehk **dresseerimisel** (*skin rolling, temper rolling*) deformeeritakse lõõmutatud pleki pinnakihti väikeste deformatsiooniastmetega (0,5...1 %), täpse pakuse, pinnakvaliteedi ja tasapinnalisuse tagamiseks ning stantsitavuse parandamiseks (paraneb lehtstantsiste pinnakvaliteet).

Veerand-, pool- ja täiskõva plekk kujutab endast vastavalt 25-, 50- ja 100-protsendiliselt tugevdatud, s.t kalestatud valtsmetalli. Kalestatud (deformeerimise teel tugevdatud) lehtmetsalli toodetakse metallidest ja metallisulamitest, mille tugevdav termotöötlus ei ole võimalik (näiteks mittetermotöödeldavad alumiiniumi- ja vase-sulamid, madalsüsinik- ja austeniitersed). Termotöödeldavatest metallisulamitest lehtmetsalli toodetakse nii termotöötlemata kui ka termotöödeldud (karastatud, normaliseeritud jne) kujul.

**Torud** liigitatakse valmistamismeetodist, ristlõike mõõtmetest, valtsimistingimustest jne lähtuvalt.

Ristlõikemõõtmetest lähtuvalt on torude liigitus järgmine:

- suure diameetriga (üle 426 mm) torud,
- väikese diameetriga (5... 102 mm) torud,
- kapillaarsed (0,3...4,8 mm) torud, mida toodetakse külmtõmbamise teel (vt joonis 8.24).

Seinapaksusest lähtuvalt:

- **õhukeseseinalised torud** (*thin wall[ed] tubes, thin wall[ed] pipes*),
- **paksuseinalised torud** (*thick wall[ed] tubes, thick wall[ed] pipes*),
- eriti õhukeseseinaline toru,
- eriti paksuseinaline toru.

Valmistamismeetodist lähtuvalt:

- **õmbluseta torudeks** (*seamless tubes, weldless tubes*),
- **keevistorudeks** (*welded tubes, seamed tubes*), sealhulgas **pikiõmblustorud** (*longitudinal welded tubes, longitudinal welded pipes*), **keerdõmblustorud** (*helical welded tubes, spirally welded tubes*).

Valmistamistingimustest lähtuvalt toodetakse kuum- ja külmaltsitud torusid. Torude täpsust ja pinnakvaliteeti saab suurendada külmaltsitud tõmbamise teel (vt p 8.3.3). Toodetakse ka valatud torusid.

Spetsiaalsete valtstootete hulka kuuluvad:

- **perioodprofiilid** (*die-rolled sections*) – pooltooted masinaehitusele,
- valtsitud tervikrattad,
- valtsitud hammasrattad,
- kuulid,
- paindprofiilid jne.

**Paindprofiilid** on lehe- või lindikujulisest toorikust **valtsprofileerimise** (*roll forming, contour roll forming*) teel valmistatavad profiilid (vt Joonis 8.14). Paindprofiilid erinevad tavalisest valtsmetallist selle poolest, et nende tootmisel ei toimu lähtematerjali ristlõikepindala muutust. Muutub vaid profileeritava lähtematerjali kuju ristlõikepinnas. Vajaliku ristlõikekujuga paindprofiile saab toota ka masinaehitustehastes. Valtsprofileerimist kasutatakse lisaks paindprofiilide tootmisele ka keevistorude tootmisel (vt Joonis 8.17).



**Joonis 8.14.** Külmmaltsprofileerimise teel leht- või ribatoorikust toodetud paindprofiilid

### Valtstehnoloogia

Valtsmetalli tootmise põhilised tehnoloogilised etapid on lähtetoorikute ettevalmistamine, kuumutamine, valtsimine ja järeltöötlemine.

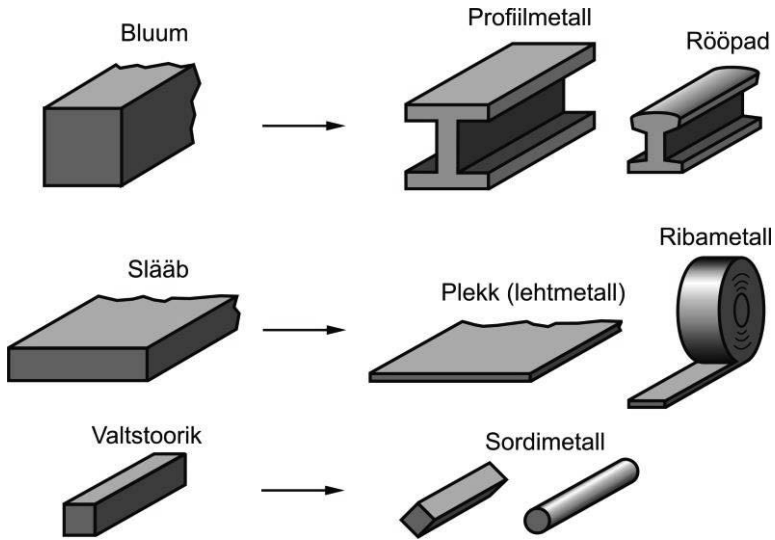
Ettevalmistamise all mõeldakse pinnadefektide (praod, tagi, pritsmed) eemaldamist (äralõikamist) valuplokkidelt. Valuploki kuumutamine toimub nn **kuumutuskaevus** ehk **kuumutusšahkis** (*soaking pit, soaker*) igale metallisulamile ettenähtud kuumurvetöötlemise algtemperatuurini.

Lähtetoorikuteks on terasest ja mitterauasulamist valuplokkid. Valuplokkid deformeeritakse kõigepealt pigistusvaltspingil – **bluumingul** (*blooming mill, bloomer*) ja **slääbingul** (*slabbing mill, slabber*) vähendatud ristlõike mõõtmetega toorikuteks, vastavalt bluumideks ja slääbideks. **Bluum** (*bloom*) kujutab endast valuplokist bluumingul valtsitud või ka otse pidevvaluseadmél (vt Joonis 5.12) valatud nelinurkse ristlõikega toorikut ristlõikemõõtmetega 150x150..450x450 mm. **Slääb** (*slab*) on slääbingul või bluumingul valuplokist valtsitud või pidevvaluseadmél valatud ristkülikulise ristlõikega toorik paksusega 40...300 mm ja laiusel > 250 mm.

Pärast pigistusvaltspinkidel töötlemist slääbide ja bluumide pinda **tagitustatakse** (*descaling*), eemaldatakse defektne pinnakiht ja seejärel lõigatakse maha valuploki defektse struktuuriga ülemine (kahanemistühikuga) osa, samuti alumine osa. Pidevvaluseadmetel toodetavate bluumide ja slääbide kasutamisel jääb see operatsioon ära.

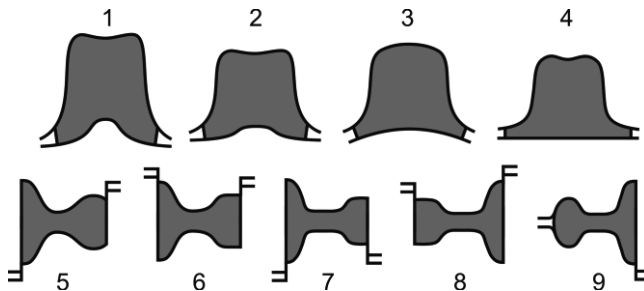
Bluumid on lähtetoorikuks profiilmetalli valtsimisel (vt Joonis 8.15). Peensordi- ja ka kesksordimetalli valtsimisel kasutatakse veelgi vähendatud ristlõikemõõtmetega nelinurkseid toorikuid, nn **valtstoorikuid** (*billets*) (vt Joonis 8.15). Nende ristlõikemõõtmed on piirides 40 x 40...150 x 150 mm ja neid toodetakse bluumingule järgnevas **toorikuvaltspingis** (*billet mill*). Slääbid on lähtetoorikuteks lehtmatali

erinevate liikide tootmisel (vt Joonis 8.15). Ka lehtmetsalli valtsimisel kasutatakse vähendatud ristlõikega slääbide varianti (paksus 4...22 mm) – ristkülikulise ristlõikega toorikuid, nn **lehttoorikuid** (*sheet billets, sheet bars, slab billets*), mis on ette nähtud õhukese lehtmetsalli tükkaaval (ilma rullikerimiseta) valtsimiseks.



**Joonis 8.15.** Valtsimisproduktid

Sordimetsall valtsitakse sordimetsallivaltspinkidel, kus metsall läbib järjestikku pigistus-, eel- ja lõppkaliibreid. Näiteks on Joonisel 8.16 esitatud kaliibrите süsteem raudteerööpa saamiseks. Selleks on vaja 9 kaliibrit. Optimaalseima kaliibrите süsteemi projekteerimist, mis kindlustaks etteantud kuju ja mõõtmetega valtstoote saamise vähima läbimite arvuga, nimetatakse **valtside kaliibrimitseks** (*roll-pass design, grooving*). Valtside kaliibrimitse on valtsimistehnoloogia keerulisemaid ülesandeid.



**Joonis 8.16.** Raudteerööpa valtsimise kaliibrите süsteem

**Lehtmetsall** moodustab toodetavast valtsmetsallist üle 50 %. **Paksplekki** (*plate, heavy sheet*) valtsitakse slääbidest kuumalt. Ettenähtud laiusega lehtmetsalli saamiseks



valtsitakse aeg-ajalt vertikaalsete valtsidega varustatud valtstoolides. Igasuguse valtsiterase (sordimetall, lehtmetsall, torud) kuumvaltsimisel on kõik valtstoolid varustatud **tagi** (*scale*) eemaldamise seadmetega selleks, et vältida metallist kõvema rauatagi metallpinda sissevaltsimist. Kasutatakse nii mehaanilist **tagipurustit** (*scalebreaker, descaler*) kui ka veejoaga tagitustamist. Valtsitud lehtmetsall õgvendatakse, keeratakse rulli või tükeldatakse, tagitustatakse ja vajadusel termotöödeldakse.

**Õhukest plekki** (*sheet*) valtsitakse kas kuumalt või külmalt. Kuumvaltsimisel on toorikuks slääb või lehttoorik. Kuumvaltsitud õhukest plekki töödeldakse analoogselt paksu plekiga.

Külmvaltsimisel kasutatakse lähtematerjalina kuumalt valtsitud lehte (plaati). Enne külmvaltsimist puhastatakse lehe pind keemilise söövitamisega. Pärast külmvaltsimist allutatakse metall järgmistele viimistlusoperatsioonidele: termotöötlemine, peamiselt kaitsegaasis lõõmutamine (välja arvatud valtsmetall, mida turustatakse tugevdatud, s.o kalestunud olekus), vajaduse korral pindtugevdamine ehk dresseerimine (pinna-kihi väikeste deformatsioonistmetega 0,5...1 % külmdeformeerimine), servade lõikamine, poleerimine, pindamine jms.

**Õmbluseta torude** (*seamless tubes, weldless tubes*) tootmisel on lähtetoorikuks valtsitud või pidevvaluseadmelt valatud toorikud. Õmbluseta toru tootmine on olenevalt soovitatavast täpsusest kahe- või kolmeetapiline:

1. **Õõnevaltsimine** (*piercing, rotary piercing*) **hülsstooriku** (*pierced shell, shell*) saamiseks **õõnevaltspingil** (*piercing mill, piercer*).
2. **Torurullimine** ehk **torn-toruvvaltsimine** (*plug rolling, plugging*), nn **torurullimispingil** (*plugging mill*).
3. **Ülerullimine** (*reeling*) **ülerullimispingil** (*reeling mill, reeler*).

Hülsstooriku saamiseks kasutatakse valtspinke tünni- (vt Joonis 8.9c), seene- või kettakujuliste valtsidega, mis on asetatud nii, et anda toorikule kruviliikumine. Õõneskeha siseläbimõõduks kujuneb paigalseisva torni välisläbimõõd. Hülsstooriku võib saada ka otse pidevvaluseadmest (vt Joonis 5.12).

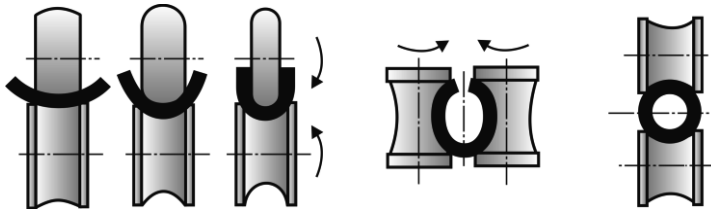
Paksuseinaline hülsstoorik valtsitakse liikuvale või mitteliikuvale tornil toruks. Torni ning valtsi kaliibri vaheline pilu määrab saadava toru seinapaksuse. Täpse seinapaksuse ja siseläbimõõduga toru saamiseks järgneb viimistlev ülerullimine tornil eri pingis – ülerullimispingis.

Toodetakse nii kuum- kui külmvaltsitud torusid. Viimaste puhul on lähtetoorikuks kuumvaltsitud või ekstrudeeritud toru.

**Keevitorud** (*welded tubes, seamed tubes*) saadakse lehtmetsallist või spetsiaalsest **ribatoorikust** (*skelp*). Toru valmib skeemi järgi: ribatooriku või lehe vormimine toruks, liite keevitamine, õgvendamine, viimistlemine. Liite keevitamiseks kasu-

tatakse ahikeevitamist või erinevaid elekterkeevitamise meetodeid (peamiselt kontakt- ja kaarkeevitamist).

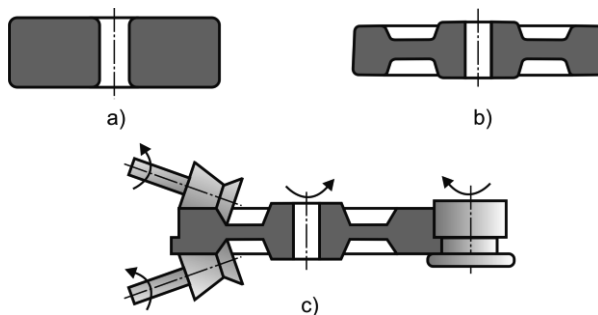
Elekterkeevitusega toodetakse süsinik- ja legerterastest kuni 2500 mm läbimõõduga torusid. Eelnevalt vormitakse ribatoorik või leht külmalt toruks (Joonis 8.17). Viimasest valtstoolist väljumisel suubub toorik keevitusagregaati. Toodetakse piki- ja keerdõmblusega (läbimõõt alates 159 mm) torusid. Keerdõmblusega torude tootmisel on eeliseks, et toru läbimõõt ei olene lähtetooriku laiusest, torud ise on jäigemad ja täpsemad (ei vaja õgvendamist). Puuduseks on väiksem tootlikkus tootmisel.



**Joonis 8.17.** Ribatooriku külmvormimine (valtsprofileerimine) toruks

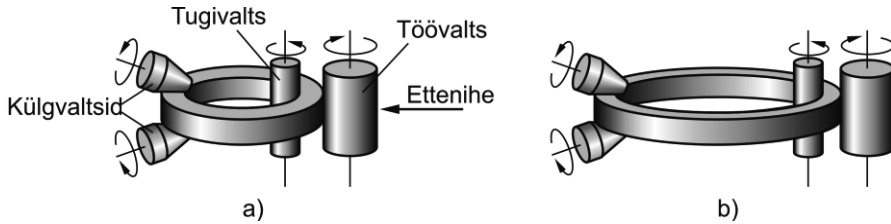
**Spetsiaalsete valtstoodete** tootmisel on olulisel kohal perioodiline valtsmetall (Joonis 8.13b), mida kasutatakse toorikutena edasiseks töötlemiseks nii vormstantsimise (näiteks vasarstantsimise, vt p 8.3.5) kui ka lõiketöötlemisega. Selliseid profiile saadakse risti- ja kaldvaltsimise skeeme kasutades. Perioodilise profiili erijuhuks on kuulide valtsimine.

Spetsiaalsete valtsprofiilide hulka kuuluvad hammasrattad, rõngad ja suur grupp rattakujulisi tooteid. Joonis 8.18 on raudteevaguni ratta tootmise näide. Lähtetoorikuks on kas valand või ümarvaltsmetall. Eelnevalt kuumutatud toorik sepistatakse (jämendatakse ja augustatakse), järgneb vormstantsimine. Ratta pöid valtsitakse pöia-valtspingil.



**Joonis 8.18.** Raudteevaguni tervikratta valmistamise erinevatest survetöötlusmeetoditest kombineeritud tehnoloogia: a – sepistamine jämendamise ja augustamisega; b – vormstantsimine; c – rattapöia valtsimine

**Rõngavaltsimist** (*ring rolling*) kasutatakse rõngakujuliste toodete tootmiseks (vt Joonis 8.19).



**Joonis 8.19.** Rõngavaltsimise algus (a) ja lõpp (b)

Rõngavaltsimisel deformeeritakse paksuseinalist toorikut (saadakse näiteks vormstantsimisega) valtside vahel, mille tulemusena rõnga seinapaksus väheneb ja diameeter suureneb. Valtsid võivad olla profileeritud, andmaks tooriku sise- või välispinnale soovitava vormi. Rõngavaltsimisel tooriku teljesuunaline pikkus suureneb vähe ja vajadusel seda piiratakse spetsiaalsete aksiaalvaltsidega (vt Joonis 8.19). Rõngavaltsimisega toodetakse näiteks veerelaagrite sise- ja välisvõrusid jt rõngakujulisi tooteid.

Enamik hammasrataste toorikuid valmivad **hambarullimisega** (*gear rolling*) silindrilisi toorikuid kasutades. Lisaks hammasratastele kasutatakse valtsimise põhimõtet samuti **keermerullimisel** (*thread rolling, roll threading*). Keere moodustatakse toorikut plastselts deformeerides (rullides) tasapindsete või silindriliste **keermerullide** (*thread rolling die*) abil keermerullimispingis. Nii hammasrataste hammaste kui ka keeme külmaltsimisel on märgatavad eelised lõiketötlusega võrreldes: materjali parem kasutus, hea pinnakvaliteet, toodete paremad mehaanilised omadused, sh väsimustugevus.

Valtsimise eesmärk ei ole vaid toote kuju moodustamine. Sama oluline on valtsmetallile sobiva struktuuri andmine. **Kontrollitav valtsimine** (*controlled rolling*) on termomehaanilise töötlemise alaliik – kuumvaltsimine kindla (kontrollitava) deformatsioonistmega etteantud temperatuurivahemikus koos järgneva etteantud režiimis jahutamisega. Selline kuumvaltsimise meetod leiab praegu üha laiemat kasutamist energiasäästu (puudub vajadus järgneva termotötluse järele) ja paremate mehaaniliste omaduste saamise eesmärgil.

### 8.3.2. Ekstrusioon

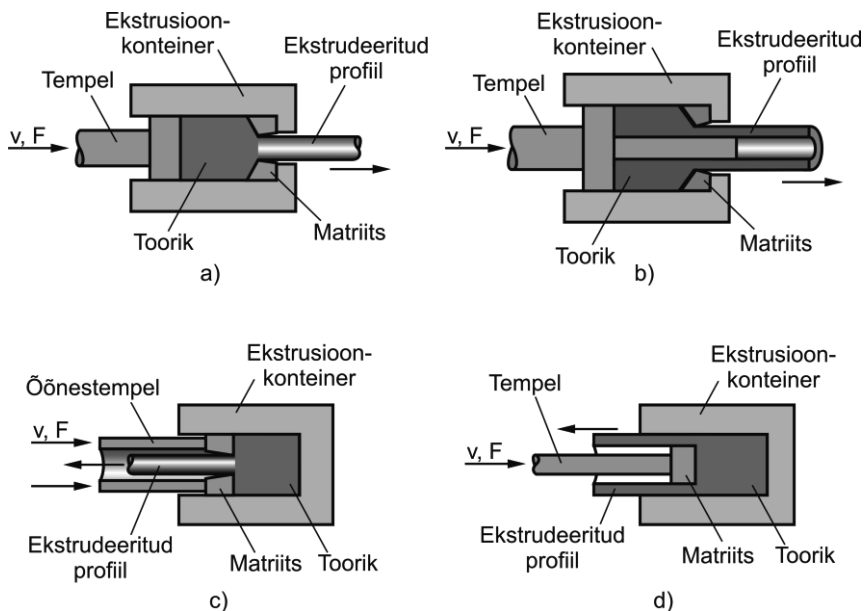
#### Protsessi mehaanika ja iseärasused

**Ekstrusioon** (*extrusion*) on survetötlusprotsess, kus **ekstrusioonkonteinerisse** (*extrusion container, billet chamber*) paigutatud toorik surutakse **ekstrudeerimistempli** (*extrusion ram*) abil läbi **matriitsi** (*die*) ava välja. Ekstrudeeritakse enamasti

kuumalt, suure plastsusega metalle ja metallisulameid (Al- ja Cu-sulamid, madal-süsinikterased jne) ka külmalt. Ekstrudeeritakse ka plaste (vt p 14.2.1). Olenevalt survejõu rakendamise ja ekstrudeeritava metalli matriitsist väljumise suunast eristatakse päri-, vastu- ja kombineeritud ekstrudeerimist. **Päriekstrudeerimisel** (*direct extrusion, forward extrusion*) (Joonis 8.20a ja b) asetatakse toorik ekstrusioon-konteinerisse ja surutakse templiga **press-seibi** (*dummy block, pressing disk*) kaudu läbi matriitsi. Kogu metalli ei ole võimalik ekstrusioonkonteinerist välja pressida (jõud kasvavad protsessi lõpus liialt suureks), mistõttu konteinerisse jääb alati nn **ekstrusioonjääk** (*extrusion discard, butt-end*), mis tuleb eemaldada. Päriekstrudeerimisel ühtivad templi liikumise ja metalli matriitsist väljumise suunad.

**Vastuekstrudeerimisel** (*indirect extrusion, backward extrusion, reverse extrusion*) (Joonis 8.20c ja d) kantakse jõud õõnsa templi kaudu matriitsile ja sealt toorikule. Metalliloolamise suund on sel juhul templi liikumissuunale vastupidine.

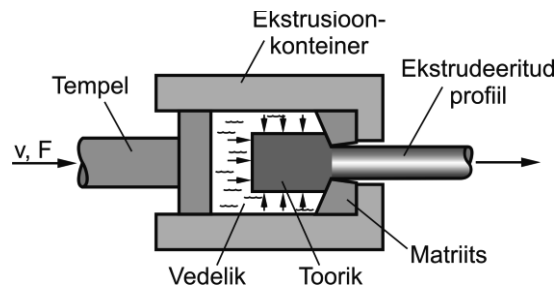
Päriekstrudeerimiseks on vaja suuremaid jõude (25...30 %) kui vastuekstrudeerimiseks suurte hõõrdejõudude tõttu tooriku ja konteineri seinte ning tooriku ja matriitsi kontaktpindade vahel. Vastuekstrudeerimisel puuduvad hõõrdejõud tooriku ja ekstrusioonkonteineri vahel, kuid puuduseks on kasutatavate tööriistade keerukus ja **ekstrudeeritud profiilmetalli** ehk **ekstrusise** (*extruded shape, extrusion*) väiksem pikkus. Esitatud põhjustel on päriekstrudeerimine enam kasutatav.



**Joonis 8.20.** Ekstrudeerimise meetodid: a – täisprofiili päriekstrudeerimine; b – õõnesprofiili päriekstrudeerimine; c – täisprofiili vastuekstrudeerimine; d – õõnesprofiili vastuekstrudeerimine

Üks võimalikke skeeme torude ja muude **õõnesprofiilide** (*hollow shape*) päriekstrudeerimiseks on joonisel 8.20b. Liikuv **ekstrudeerimistorn** ehk **ekstrudeerimismõel** (*internal mandrel*) tagab ava moodustumise. Kasutatakse kas augustamise ja ekstrudeerimise ühildatud protsessi, kus tooriku augustamine toimub ekstrusioonkonteineris enne materjali väljavoolamist nõela ja matriitsi vahelisse pilusse või augustamise ja ekstrudeerimise eraldatud protsessi, kus eelnevalt augustatakse toorik väljaspool ekstrusioonkonteinerit. Keerulise sisekujuga õõnesprofiilide tootmisel kasutatakse liikuva ekstrudeerimistorni asemel matriitsi avasse sisseehitatud lühikese ekstrudeerimistorniga matriitse, nn **ämblikmatriitse** (*spider die, torpedo die*). Nimetus tuleneb sellest, et liikumatu, õõnsust moodustav torn kinnitub õhukeste „jalgadega“, nagu ämblik matriitsi ava külge. Metall, voolates üle sellise torni, lahutub mitmeks ribaks, mis keevituvad ekstrudeerimistorni taga taas kokku nii, et valmistootel silmaga nähtavat jälge ei jää.

Päriekstrudeerimisele (erinevalt vastuekstrudeerimisest) on iseloomulik hõõrdumine tooriku ja ekstrusioonkonteineri vahel. Hõõrdumine suurendab deformeerimisjõudu ja -energiat. Hõõrdumist saab märkimisväärselt vähendada, kasutades **hüdrostaat-ekstrusiooni** (*hydrostatic extrusion*) (vt Joonis 8.21).



**Joonis 8.21.** Hüdrostaatekstrusioon

Lisaks hõõrdumise vähenemisele tagab toorikut ümbritsev vedelik plastsuse suurenemiseks soodsa hüdrostaatpinguse (pingus ehk pingeseisund, kus normaalsurvepinged on kõikides suundades võrdsed) deformeerimisprotsessis. See teeb võimalikuks suuremad deformatsiooniasemed ja tavapärasest väiksema plastsusega metallisulamite ekstrudeerimise (vt p 8.2.1).

Ekstrusiooni kasutatakse peamiselt ekstrusiste tootmiseks (vt Joonis 8.22). Ekstrusiooni põhimõtet kasutatakse ka tükktoodete tootmisel. Vastavat protsessi nimetatakse **vormpressimiseks** (*impact extrusion*) ja seda käsitletakse õpiku osas 8.3.12 „Külmvormstantsimine“.

Ekstrudeerimisprotsessi mehaanikat iseloomustab **venitustegur** ehk **venitusaste** (*extrusion ratio, reduction ratio*), mida arvutatakse nagu valtsimiseltgi tooriku

pikkuste või ristlõikepindade kaudu enne ja pärast deformeerimist (vt p 8.3.1). Ekstrudeerimisel võib venitustegur  $r$  olla märksa suurem kui valtsimisel: tavaliselt 10...50, plastsetel alumiiniumisulamitel kuni 1000, samal ajal kui valtsimisel saab venitustegur ühel läbimil ulatuda kuni 2. See on üks ekstrudeerimise eelistest.

Ekstrudeerimisel on metallprofiilide tootmisel valtsimisega võrreldes järgmised eelised:

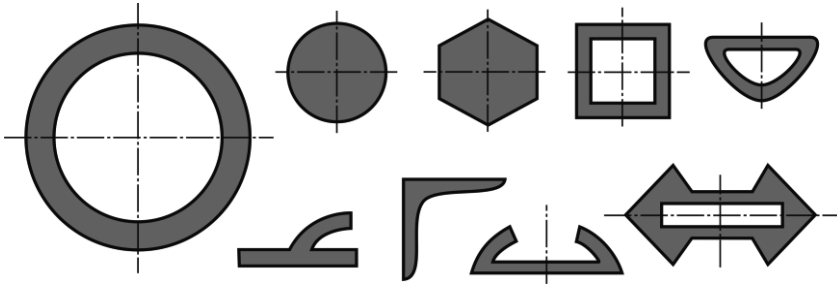
1. Soodne, metalli plastsust suurendav pingeseisund – **kolmeteljeline survepingus** (*triaxial compression*). Selline pingeseisund võimaldab deformeerimisprotsessis kasutada väga suuri venitustegureid ja ekstrudeerida muul viisil raskdeformeeruvaid metallisulameid.
2. Ekstrudeerimisseadmete (presside) kiire häälestamisvõimalus ühelt profiililt teisele – tuleb vaid asendada üks matriits teisega. See teeb otstarbekaks mittestandardsete eriprofiilide tootmise ka suhteliselt väikestes kogustes, näiteks masinaehitustehastes.
3. Ekstruusiste suurem täpsus.

Ekstrudeerimise puudused on:

1. Tootmisjätme – ekstrusioonjäägi (10...15 % tooriku massist) tekkimine.
2. Ekstruusiste struktuuri ebahütlus, mis on tingitud sellest, et metall voolab tooriku keskmistest kihtidest matriitsi avasse suurema kiirusega kui äärmistest. Tulemuseks on sageli ekstrudeeritud metalli omaduste anisotroopsus.
3. Ekstrudeerimistööriistade (eriti matriitsi) valtsidega võrreldes märksa väiksem püsivus. Samas on nende hind valtside hinnast märksa madalam.
4. Väiksem tootlikkus ja ekstruusiste kõrgem omahind.

## **Toodang**

Ekstrudeerimist kasutatakse kõige rohkem mitterauasulamitest, eriti (tänu suhteliselt madalale deformeerimistemperatuurile) Cu, Al, Mg, Zn, Pb ja nende sulamitest profiilide tootmisel. Teraste ja niklisulamite ekstrudeerimist kasutatakse vähem, sest see on raskendatud töödeldava materjali suure tugevuse, kõrge deformeerimistemperatuuri ja kalduvuse tõttu keevitada ekstrusioonkonteineri külge. Samas toodetakse ekstruusiseid metallisulamitest, mida ebapiisava plastsuse tõttu on raske teiste survetöötlusmeetoditega profiilmetalliks töödelda. Ekstrudeeritakse samuti pulbertoorikuid (vt p 10.4.4).



**Joonis 8.22.** Ekstruusiste profiilid

Ekstruusiste sortimenti kuuluvad (vt Joonis 8.22) sordimetall ristlõike mõõtmetega kuni 400 mm ja torud ning teised õõnesprofiilid välisläbimõõduga kuni 800 mm. Ekstrudeeritakse nii lihtprofiile kui ka väga keerulise kujuga täis- ja õõnesprofiile, mille valtsimine ei olegi võimalik.

### **Tehnoloogia**

Lähteteoorikuna kasutatakse valuplokke, valandeid, valtsmetalli. Ekstrudeerimisseadmeteks on enamasti horisontaal-, harvem vertikaalhüdropressid. Kuumeekstrudeerimise tehnoloogilised etapid on:

- 1) tooriku ettevalmistamine ekstrudeerimiseks;
- 2) tooriku kuumutamine ja tööriistade ettekuumutamine;
- 3) tooriku määrimine ja etteandmine ekstrusioonkonteinerisse;
- 4) ekstrudeerimine;
- 5) ekstrusioonjärgi äralõikamine ja ekstruusise viimistlemine.

Tooriku läbimõõt valitakse arvestusega, et oleks tagatud vähemalt venitustegur  $r = 8 \dots 10$ . Sellisel juhul on enamasti kindlustatud ekstruusiste optimaalne struktuur ja omadused kogu ristlõikes. Tooriku pikkus ei ületa üldjuhul kolmekordset (õõnesprofiilide korral kahekordset) läbimõõtu, sest vastasel korral jõuab toorik ekstrusiooniprotsessis liialt jahtuda ja tooriku väliskihtide deformeeritavus halveneb oluliselt sisekihtidega võrreldes.

Eemaldatakse tooriku defektne pinnakiht õhu- või hapnikujoas põletamise või pinnakihi mahalõikamisega, nn skalpeerimisega, surudes toorikut läbi teravaservalise matriitsi ava.

Tööriistad (matriits, ekstrusioonkonteiner, press-seib) kuumutatakse ette (olenevalt pressitavast metallist 200...400 °C), selleks et vähendada tooriku ja tööriistade vahelist temperatuurigradienti. Ekstrusioonijõudude, samuti jahtumiskiiruse vähendamiseks kaetakse toorik määrdekihiga. Kasutatakse grafiitmääret, kõrgleegerteraste ja teiste raskdeformeeritavate sulamite puhul klaasi, vahel metalset määret (vaske).

Ekstrudeerimisel tuleb eristada ekstrudeerimiskiirust  $v_e$  (kiirus, millega tempel liigub ekstrusioonkonteineris) ja voolekiirust  $v_v$ , millega metall matriitsi avast väljub:

$$v_v = r v_e, \quad (8.12)$$

kus  $r$  – venitustegur.

Mida plastsem on metall, seda suuremate voolekiirustega on võimalik ekstrudeerida. Näiteks vasktoru kuumekstrudeerimisel temperatuuril 800...850 °C ulatub kiirus kuni 5 m/s. Aeglase rekristallisatsioonikiirusega metallisulamite ekstrudeerimisel on lubatud voolekiirused väiksemad, sest vastasel korral ei jõua plastsust taastavad rekristallisatsiooniprotsessid kalustumisprotsessidele järele.

### 8.3.3. Tõmbamine

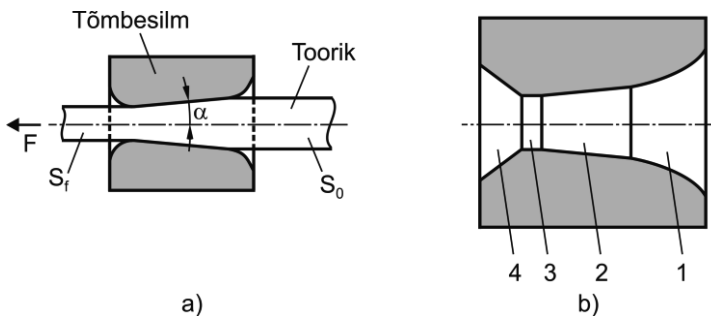
#### Protsessi mehaanika ja iseärasused

**Tõmbamiseks** (*drawing*) nimetatakse metalltooriku etteantud profiiliga avast läbitõmbamist (Joonis 8.23). Tõmbamisel on tööriistaks tõmbesilm. Tõmbamisprotsessis tooriku ristlõikepindala väheneb ja pikkus suureneb. Tõmbamine toimub reeglina külmalt, kuna kuumutamine, suurendades küll metalli plastsust, vähendab samal ajal tõmbetugevust. Tuleb aga garanteerida, et jõu  $F$  poolt põhjustatud tõmbepinge tõmbesilmast läbiulatuvas otsas  $\sigma_t$  ei ületaks materjali elastsuspiiri  $\sigma_{el}$ , s.t

$$\sigma_t = F / S_f \leq \sigma_{el}, \quad (8.13)$$

kus  $F$  – tõmbejõud,

$S_f$  – lõppristlõikepindala.



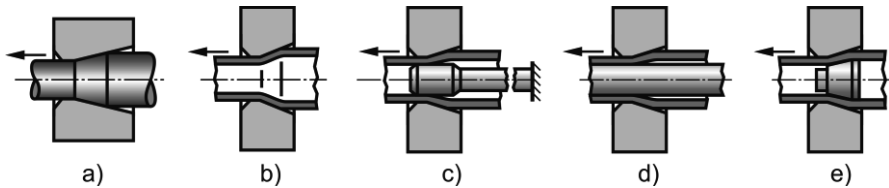
**Joonis 8.23.** Tõmbeprotsess (a):  $S_0$  ja  $S_f$  – alg- ja lõppristlõikepindala,  $F$  – tõmbejõud; tõmbesilma tsoonid (b): 1 – sisendtsoon, 2 – deformeermistsoon, 3 – kalibreermistsoon, 4 – väljundtsoon

Kuumutamise saame küll sama deformatsiooniastme korral vähendada tõmbejõudu ja tõmbepinget, kuid samas väheneb metalli elastsuspiir ja esitatud võrratus ei kehti. Sel juhul tõmmatud osa kas peeneneb (s.t kaob täpsus) või toimub isegi katkemine.



Tõmbamine kuulub külmsurvetöötlusviiside hulka, mistõttu toimub metalli kalestumine. Samas, nagu külmsurvetöötlusele omane, saavutatakse toodete suur täpsus ja pinnasiledus. Sageli ongi tõmbamise eesmärgiks mitte niivõrd tooriku kujumuutus, vaid **kalibreerimine** (*sizing*) – mõõtmete täpsuse suurendamine ning pinnakareduse vähendamine väikeste deformatsiooniastmetega plastse külmdeformeerimise teel.

Torusid ja teisi õõnesprofile tõmmatakse torukujulisest kuumvaltsitud või ekstrudeeritud toorikust mitmesuguseid töötlemisstrateegiaid kasutades (Joonis 8.24). Paksuseinaliste ja väikese läbimõõduga (< 10... 12 mm) torude tootmisel kasutatakse torude **tornita tõmbamist** (*tube sinking, sink drawing*) (Joonis 8.24b). Suurema läbimõõduga torude tootmisel kasutatakse **kinnistorntõmbamist** (*fixed plug drawing*) (Joonis 8.24c), **liikuvtorntõmbamist** (*moving mandrel drawing*) (Joonis 8.24d) või **ujutorntõmbamist** (*floating plug drawing*) (Joonis 8.24e). Tõmbamistehnoloogia võimaldab ka torude läbimõõtu suurendada.



**Joonis 8.24.** Mitmesugused tõmbamise skeemid: a – traadi tõmbamine; b – torude tornita tõmbamine; c – torude kinnistorntõmbamine; d – torude liikuvtorntõmbamine; e – torude ujutorntõmbamine

Deformatsiooniprotsessi tõmbamisel iseloomustatakse nagu valtsimisel ja ekstrudeerimiselgi **venitusastme** ehk **venitusteguriga** (*drawing ratio, reduction ratio*)  $r = S_0/S_f$  ja **pigistusteguriga** (*reduction*)  $\varepsilon = (S_0 - S_f)/S_0$ , kus  $S_0$  ja  $S_f$  on vastavalt alg- ja lõppristlõikepindalad. Ühel tõmbeastmel venitustegur on tavaliselt  $r = 1,25...1,45$ , mis vastab pigistustegurile  $\varepsilon = 20...30$  %. Vajalik pigistustegur saavutatakse tavaliselt mitme läbimiga (tõmbeastmega), mistõttu summaarne pigistustegur  $\varepsilon_{\Sigma}$  võib ulatuda plastsetel mitterauasulamitel kuni 99 %.

Mitmeastmelisel, läbi mitme järjestikuse tõmbesilma tõmbamisel suureneb tõmbamise kiirus, s.o tooriku tõmbesilmast väljumise kiirus kasvab pidevalt ja võib varbmaterjali ja torude puhul ulatuda kuni 10 m/s, peene traadi korral kuni 50 m/s.

Tõmbamisel metall kalestub, s.t läheb tugevamaks ja kõvemaks, kuid ka hapramaks. Seepärast suurte deformatsiooniastmetega mitmeastmelisel tõmbamisel teostatakse metalli **protsessilõõmutust** (*process annealing, interpass annealing*), mis seisneb kuumutamises üle rekristallisatsioonitemperatuuri, selleks et taastada töödeldava metalli plastsed omadused. Seda tehakse kas iga või mitme tõmbeastme järel, vastavalt vajadusele.

Tõmbamisel on metallprofiilide tootmisel järgmised eelised:

- 1) toodete suur täpsus ja pinnakvaliteet;
- 2) toodete head, külmdeformeerimisele iseloomulikust kalestumisest tingitud mehaanilised omadused (tugevus, kõvadus);
- 3) hulgitootmiseks sobiv suur tootlikus.

## Toodang

Tõmbamise teel saab töödelda praktiliselt kõiki teraseid ja mitterauasulameid. Toodetakse traati läbimõelduga 0,002...6 mm, täisprofiile läbimõelduga kuni 100 mm ja õõnesprofiile läbimõelduga kuni 400 mm. Saab tõmmata vardaid ja õõnesprofiile, mille tootmine valtsimisega ei ole võimalik.

Traati, nagu külmvaltsitud lehtmataliigi, toodetakse mitmesuguse kõvadusastmega olenevalt sellest, milliste tõmbesilmade vahel toimus viimane protsessilõõmutus: **pehmetraat** (*dead-soft wire*) ja **täiskõva (täistugevdatud) traat** (*hard-drawn wire*). Täistugevdatud suure süsinikusisaldusega (tavaliselt 0,6...0,8 %) terastraati kasutatakse trosside tootmisel.

Toodetakse samuti tõmbamisele järgneva või eelneva erilise termotöötuse – patenteerimise – läbinud nn **patenteeritud traati** (*patented wire*). **Patenteerimine** ehk **patentimine** (*patenting, patentizing*) seisneb suure tugevusega terastraadi kuumutamises karastustemperatuurini ja järgnevas jahutamises sulaplii- või -soolavannis 450...550 °C juures kuni sobiva struktuuri moodustumiseni. Patenteeritud terastraat on plastne, kergelt deformeeritav.

## Tööriistad ja seadmed

Tõmbamise tööriistaks on ühe või mitme avaga **tõmbesilm** ehk **tõmbematriits** (*drawing die*) (Joonis 8.23b). Ühe avaga tõmbesilma nimetatakse ka filjeeriks. Tõmbesilmal on vähemalt neli iseloomulikku tsooni:

- **sisendtsoon** ehk **sisendkoonus** (*die entrance, entry*), mis kergendab tooriku sisseviimist ( $\alpha \sim 40^\circ$ );
- **deformeerimistsoon** ehk **deformeerimiskoonus** (*approach cone, approach*), kus toimub nii deformeerimine kui ka määrimine ( $\alpha = 10...24^\circ$ );
- silindriline **kalibreerimistsoon** (*die land, die bearing*);
- **väljundtsoon** ehk **väljundkoonus** (*back relief*), mida on vaja profiili kriimustamise vältimiseks ( $\alpha = 45...60^\circ$ ).

Kuna tõmbesilmad on tavaliselt valmistatud kõvadest, hapratest ja suhteliselt väikese tõmbetugevusega materjalidest, siis tehakse nad enamasti koostatavana, s.o tõmbesilm pressitakse plastsemast ja tugevamast, hea soojusjuhtivusega (tõmbamisel eraldub palju soojust) materjalist bandaaži. Kasutatakse ka palju keerulisema ehitusega tõmbesilmu, mis peavad tagama tooriku **hüdrodünaamilise määrimise** (*hydro-*

*dynamic lubrication*). Sellisel juhul tagab tõmbesilma ehitus tooriku ja tõmbesilma vahel pideva vedel- või tahkemäärdekile, mis võimaldab mitmekordselt suurendada tõmbamiskiirust ja tõmbesilma püsivusaega, vähendada energiakulu ning tõmbejõudu.

Tõmbesilmad valmistatakse suure kulumiskindlusega materjalidest: tööriistaterastest, kõvasulameist, kermistest ja ülikõvadest materjalidest (mono- ja polükristalne teemant, korund, boornitriid jms) (vt p 10.8.2).

Tööprintsibiist lähtudes liigitatakse **tõmbepingid** (*drawing benches, drawbenches*) järgmiselt:

- 1) tõmmatava materjali (lattide) sirgjoonelise liikumisega pingid – **kett-tõmbepink** (*chain-driven drawbench*), **hammaslatt-tõmbepink** (*rack-type drawbench*) ja **hüdro-tõmbepink** (*hydraulic drawbench*);
- 2) tõmmatava materjali (traadi) trumlile kerimisega pink – **trummeltõmbepink** (*drum-type drawbench*).

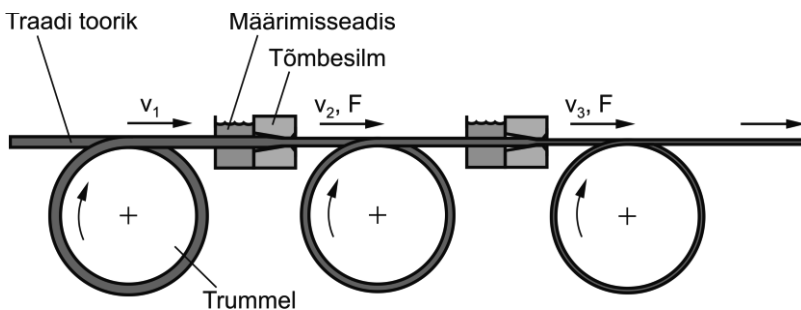
Sirgjoonelise liikumisega tõmbepinke kasutatakse lattmaterjali tootmiseks, millist ei ole võimalik trumlile kerida. Trummeltõmbepinke kasutatakse traadi ja peene varbmaterjali või toru tootmiseks.

Trummeltõmbepingid võivad olla olenevalt tõmbeastmete arvust ühe- või mitmeastmelised.

**Üheastmelisi tõmbepinke** (*bull block, single-block machines, monoblock machines*) kasutatakse jämeda traadi või peenema varbmaterjali tõmbamiseks.

**Mitmeastmelisi tõmbepinke** (*multiblock machines*) kasutatakse peene traadi või peene toru tõmbamiseks.

Üheastmelistel tõmbepinkidel tõmmatakse toorik läbi tõmbesilma vaid üks kord. Mitmeastmeliste tõmbepinkide korral tõmmatakse traat läbi mitme tõmbesilma, mis on paigutatud tõmbetrumlite vahele (vt Joonis 8.25).



**Joonis 8.25.** Traadi pidevtõmbamine mitmeastmelisel trummeltõmbepingil

Igas tõmbesilmas toimub traadi (profiili) kindla suurusega deformeerimine. Igal trumlil on ajam tagamaks vajaliku suurusega tõmbejõu ja teiste trumlitega koordineeritud pöörlemiskiiruse.

## Tehnoloogia

Lähtetoorikuks on valtsmetall või ekstruusis. Toorik tuleb enne tõmbamist ette valmistada, mis seisneb termotöötles, tagikihi eemaldamises, pinna ettevalmistamises määrdeainete pealekandmiseks.

Eelnev termotöötlus on vajalik külmtöödeldavale metallile vajaliku plastsuse andmiseks. Metallisulamist olenevalt kasutatakse lõõmutamist, normaliseerimist, patenteerimist (süsinikterasest traadi korral). Toorikut töödeldakse ka hiljem tõmbeastmete vahepeal (protsessitermotöötlus) plastsuse taastamiseks ja vajaduse korral tehakse ka lõpptoodangu lõplik termotöötlus. Pärast eelnevat termotöötlemist eemaldatakse tagi mehaaniliselt (tooriku paljukordse painutamise teel rullide vahel), keemiliselt (söövitamisega) või elektrokeemiliselt. Määrdealust kihti on vaja määrde hoidmiseks tooriku pinnal. Sellise kihi moodustamiseks kasutatakse mitmeid meetodeid nagu fosfaatimine, lupjamine (õhukese lubjakihi pealekandmine), vasetamine jms.

Tõmmatakse tavaliselt mitme tõmbeastmega (pigistustegur ühel läbimil  $\varepsilon = 20...35 \%$ ). Summaarne pigistustegur võib (vahepealset pehmelõõmutamist kasutades) teraste puhul ulatuda kuni 80...85 % ja plastsete mitterauasulamite puhul kuni 99 %. Tõmmatavate profiilide maksimaalne ristlõikepind oleneb kasutatavate seadmete võimsusest.

### 8.3.4. Sepistamine

**Sepistamine** (*open-die forging*) on tuntud survetöötlesprotsessidest vanim. **Sepistus-tooriku** (*forging billet*) deformeerimine tehakse käsitsi, sepistusvasaratel või -pressidel ja teistel sepistusseadmetel. Sepistatakse tavaliselt kuumalt. Saadud toodet või pooltoodet nimetatakse **sepiseks** (*open-die forging, forging*). Sepised ei ole üldjuhul valmistooded, vaid pooltoodet edasiseks töötlemiseks, näiteks lõiketöötlemise teel.

Sepistamist kasutatakse üksik- või väikeseeriatootmisel, kusjuures metalli deformeerimiseks kasutatakse universaaltööriistu. Deformeeritav metall saab sepistamisel takistamatult voolata, mistõttu sepistamist nimetatakse sageli ka vabasepistamiseks.

Eristatakse **käisepistamist** (*smithing, blacksmithing*) ja **masinsepistamist** (*forging*), mis omakorda jaguneb **vasarsepistamiseks** (*hammer forging*) ja **press-sepistamiseks** sepistuspressil (*press forging*). Käsitsi sepistatakse väikesi sepiseid, peamiselt remonditöödel. Suuri sepiseid, mille mass ulatub sadade tonnideni, sepistatakse sepistusvasaratel või -pressidel.

Sepistamise kasutusvaldkonnad on järgmised:

1. Sepistamine on ainus survetöötlusmeetod eriti suurte pooltoodete (massiga sadadest kilogrammidest sadade tonnideni) tootmiseks. Väiksemaid tooteid ja pooltooteid (kuni sadakond kilogrammi) saab valmistada nii sepistamise kui ka seeriatootmisel vormstantsimisega, kus kasutatakse metalli deformeermiseks spetsiaalseid tööriistu – stantse (vt näiteks p 8.3.5).
2. Kuigi stantsimisel on sepistamisega võrreldes rida eeliseid (suurem tootlikkus ja toodete suurem täpsus), on sepistamine üksik- ja väikeseeriatootmisel majanduslikult kasulikum, kuna kallite stantside asemel kasutatakse odavamaid universaalseid tööriistu (vt Joonis 8.27).
3. Sepistamist kasutatakse juhtudel, kui teised survetöötlusmeetodid ei võimalda saavutada metalli soovivat struktuuri. Metalli korraliku läbisepistamisega saadakse ühtlasema struktuuriga metall. Sepistamist kasutatakse seetõttu sageli toorikute ettevalmistamiseks toodete või pooltoodete tootmiseks teisi mahtvormimisprotsesse kasutades.

Massiivsete sepiste tootmiseks kasutatakse lähtetoorikuna **valuplokke** (*ingots*). Enamasti leiab siiski kasutamist valtsmetall: ristkülikulise või nelinurkse ristlõikega nelikanttoorikud või ümara ristlõikega ümartoorikud.

Kasutatavaim sepistusoperatsioon on **jämendamine** (*upsetting*), mida kasutades suurendatakse tooriku ristlõikepinda kõrguse vähenemise arvel (Joonis 8.26a). Hõõrdumise tõttu tooriku otspindade ja tööriista vahel muutub silindriline toorik tünnikujuliseks.

Plastsel deformeermisel kehtib nn vähima vastupanu printsiip, mille kohaselt deformeeritava keha iga materjaliosake liigub kontakthõõrdumise (vt p 8.2.5) olemasolu korral tooriku perimeetri suunas lühimat teed pidi. Vähima vastupanu printsiibist tuleneb omakorda vähima perimeetri reegel, mille kohaselt keha püüab plastse deformatsiooni protsessis omandada vähimat võimalikku perimeetrit omavat kuju. Vähim perimeeter on teatavasti ringil, mistõttu kontakthõõrdumise olemasolul püüab toorik tööriista ja tooriku kontaktpinnal omandada ringi kuju. See tähendab, et ka nelinurkse või ristkülikulise ristlõikega tooriku perimeeter läheneb suurte deformatsiooniastmetega deformeerides ringile. Kontakthõõrdumise puudumisel seda ei juhtuks.

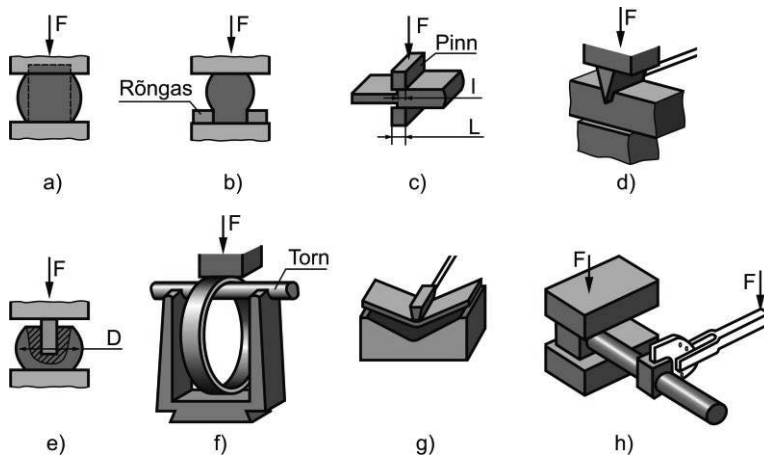
Jämendamise erijuhtum on **kohtjämendamine** (*heading, upset forging*), mis seisneb tooriku mingi osa jämendamises (Joonis 8.26b). Kohtjämendamist tehakse enamasti spetsiaalseid rõngaid kasutades. Kohtjämendada saab ka ilma rõngaid kasutamata, kohtjämendatavate osade kohtkuumutust kasutades .

**Venitamine** (*drawing out, drawing*) on sageli kasutatav sepistusoperatsioon. Eristatakse piki-, ring- ja ristivenitamist. **Pikivenitamisel** (*drawing out, drawing down*) suurendatakse tooriku või tooriku osa pikkust ristlõikepindala vähendamise arvel (Joonis 8.26c). Pikivenitamist tehakse enamasti kas tasandilisi või V-kujuliste

sisselõigetega pinne kasutades (Joonis 8.27). **Tasandpinne** (*flat dies*) kasutatakse pikivenitamisel kõige sagedamini. **Sisselõikega pinne** (*V-dies*) kasutatakse ümara ristlõikega toorikute deformeerimiseks, sealhulgas seest õõnsate toorikute **pikivenitamiseks tornil** (*drawing out on mandrel, drawing down on mandrel*). Sisselõikega **vormpinne** (*swages*) (vt Joonis 8.27) kasutatakse selleks, et anda venituskohale kindel (ümar, kuuskant jms) kuju.

**Ringvenitamist** (*saddle forging, saddling*) kasutatakse õõneskeha läbimõõdu suurendamiseks (Joonis 8.26f). **Ristivenitamine** (*spreading*) leiab kasutamist tooriku üksikute osade laiuse suurendamisel.

Eelnimetatud venitusoperatsioone kasutatakse tooriku lõppkujule lähendamiseks. Sageli on eesmärgiks ristlõikepinna vähendamine (millega kaasneb pikkuse suurendamine). Sellist operatsiooni nimetatakse **pigistamiseks** (*cogging, breakdown*). Pigistamise eesmärgid on samad mis valtsimisel pigistus- ehk venituskaliibrates (vt p. 8.3.1). Sageli kasutatakse samu toorikuid kui valtsimisel, kuid pigistusoperatsioon viiakse läbi sepistamist kasutades.



**Joonis 8.26.** Sepistusoperatsioonid: a – jämendamine; b – kohtjämendamine; c – pikivenitamine; d – soonimine; e – augustamine; f – ringvenitamise; g – painutamine; h – väänamine

**Augustamine** (*punching, piercing*) seisneb toorikusse õõne moodustamises materjali väljasurumise teel (Joonis 8.26e). Augustamisel kasutatakse erineva kujuga **sepatorne** ehk **augutorne** (*punch, hole-punching tool*) (vt Joonis 8.27). Läbivad avad saadakse kahe operatsiooniga: kõigepealt moodustatakse augutorniga (sepatorniga) mitteläbiv süvend, jättes süvendi sisemusse nn **sisekraadi** ehk **sidepinna** (*web*). Vastasel juhul võib augutorn puruneda. Järgneb õhukese sisekraadi äralõikamine.

**Soonimine** (*fullering*) (Joonis 8.26d) seisneb **soonerauaga** (*fullering bar, fuller*) (Joonis 8.27) toorikutesse mitmesuguse kujuga soonte tegemises. Soonimine on ette-

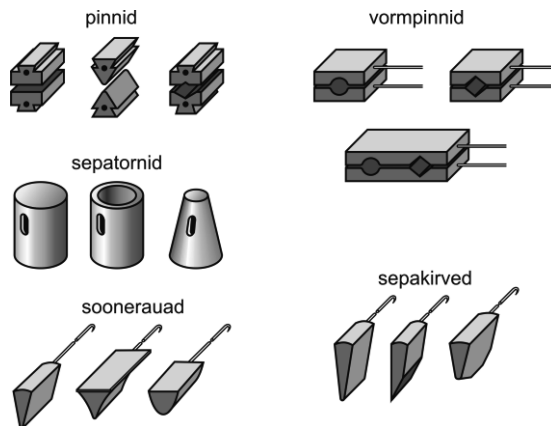
valmistav operatsioon toorikutesse astmete ja süvendite tegemisel. Näiteks soonimisel eraldatakse deformeeritav tooriku osa tooriku mittedeformeeritavast osast astmeliste võllide sepistamisel.

**Painutamisega** (*bending*) toodetakse painutatud teljega tooteid ja toorikuid. Painutatakse enamasti spetsiaalset alusstantsi kasutades (Joonis 8.26g).

**Väänamine** (*twisting*) seisneb tooriku ühe osa pöörämises teise suhtes ümber pikitelje. Kasutatakse näiteks väntvõllide, suure läbimõõduga puuride jms tootmisel (Joonis 8.26h).

**Tükeldamisel** (*cutoff*) eraldatakse toorik osadeks **sepakirveid** (*cutting bar*) (vt Joonis 8.27) kasutades.

Sepistamisel kasutatavad tööriistad saab funktsionaalse tunnuse järgi liigitada põhi- ja abitööriistadeks. Põhitööriistu (Joonis 8.27) kasutatakse otseselt metalli deformeerimiseks. Abitööriistu kasutatakse tooriku kinnihoidmiseks ja toorikuga manipuleerimiseks. Abitööriistade hulka kuuluvad **sepapihid** ehk **sepatangid** (*forge tongs*). Suurte toorikutega manipuleerimiseks kasutatakse **manipulaatoreid** (*manipulators*).



**Joonis 8.27.** Sepistamistööriistad

## Seadmed

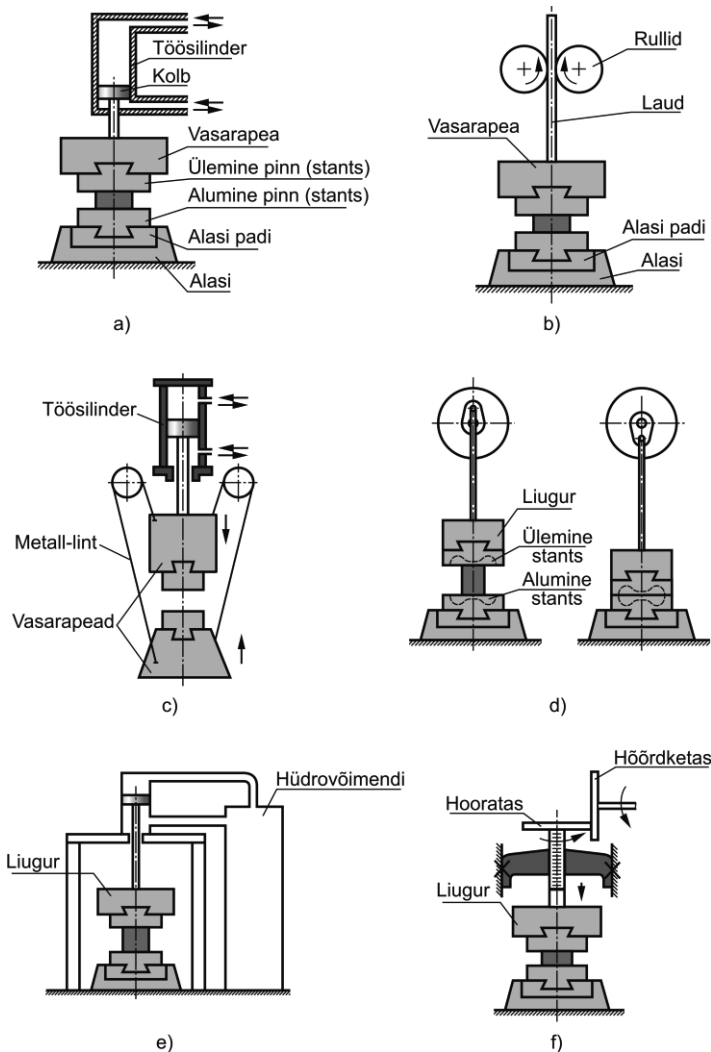
Tehnoloogilisest võimekusest (seadme kõige iseloomulikumast karakteristikust) lähtuvalt liigitatakse sepistus-, samuti vormstantsimisseadmed järgmiselt:

1. Jõupiiranguga seadmed (näiteks hüdropressid), mille põhikarakteristikuks on survejõud.
2. Energiapiiranguga seadmed (vasarad, kruvipressid), mille põhikarakteristikuks seadme valikul on maksimaalne löögienergia, samuti langevate osade mass.
3. Käigupiiranguga seadmed (mehaanilised pressid, näiteks väntpressid), mille üheks põhikarakteristikuks on survejõu kõrval käigu ulatus.

Sepistamisel kasutatakse enamasti sepistusvasaraid ja hüdropresse.

## Vasarad

**Vasarsepistamine** (*hammer forging, smith forging*) on leidnud sepiste tootmisel kõige enam kasutamist. Erinevat tüüpi **sepistusvasarate** (*open-die forging hammers, drop hammers*) (vt Joonis 8.28) põhiosadeks on **vasarapea** (*ram*), mille külge on kinnitatud ülemine pinn, massiivne **alasi** (*anvil*), alasil asuv **alasi padi** (*anvil cap, sow block*), millele kinnitatakse kiilude abil alumine pinn ja raam. Sepistusvasarate isärasuseks stantsimisvasaratega võrreldes on see, et alasi ja vasara raam asetsevad eraldi.



**Joonis 8.28.** Sepistus- ja vormstantsimisseadmed: a – auruvasar; b – hõrd- ehk friktsioonvasar; c – vastulöögivasar; d – väntpress; e – hüdropress; f – hõrdkrüvipress



Vasaraid liigitatakse vasarapea löögienergia saavutamiseviisi ja vasara käitamiseks kasutatava keskkonna (enamasti suruõhk või aur) järgi.

Löögienergia saavutamiseviisi alusel eristatakse **gravitatsioon-** ehk **liittoimevasaraid** (*gravity-drop hammers*) ja **liittoime-** ehk **kaksiktoimevasaraid** (*power-driven hammers, power-drop hammers*). Esimesel juhul saavutatakse löögienergia langevate osade kiirenemisega gravitatsiooniväljas. Löögienergia on sellisel juhul reguleeritav vasarapea massi ja langemiskõrgusega. Teisel juhul kiirendatakse langevaid osi (vasarapea, ülemine pinn) täiendavalt suruõhu või -auruga.

Vasarapea käitamiseks kasutatava vahendi alusel eristatakse hõõrd- ehk friktsioonvasaraid, pneumovasaraid ja auruvasaraid. **Hõõrd-** ehk **friktsioonvasaral** (*board-drop hammer*) tõstetakse langevaid osi hõõrdejõude kasutades. Sellistel vasaratel (vt Joonis 8.28b) on vasarapea külge kinnitatud tugevast puidust laud, mille abil rullid tõstavad hõõrdejõude kasutades vasarapea soovitud kõrguseni. Sellised vasarad kuuluvad löögienergia saavutamiseviisi järgi üldjuhul gravitatsioon- ehk liittoimevasarate hulka. Kiirused löögihetkel ulatuvad kuni 10 m/s ja mõnikord enamgi.

**Pneumovasarat** (*air hammer*) käitatakse külma või kuuma suruõhuga; auruvasaraid käitab aur. Pneumovasarad, auruvasarad ja auru-pneumovasarad on põhiliselt liit- ehk kaksiktoime tüüpi.

Sepistus- ja stantsimisvasarate põhikarakteristikuks on langevate osade mass, kuigi seadme dokumentatsioonis tuuakse alati ära ka maksimaalne **löögienergia** (*blow energy*). Hõõrd- ehk friktsioonvasarad on langevate osade massiga orienteeruvalt 50...3000 kg (maksimaalne löögienergia kuni 45 kJ). Liittoimega pneumo- või auruvasarate langevate osade mass võib ulatuda kuni 30 000 kg (maksimaalne löögienergia kuni 1100 kJ). Liittoimevasarad on võimelised sooritama kuni 60 ja liittoimevasarad kuni 100 lööki minutis. Liittoimevasarate löögienergia  $E_T$  on võrdne langevate osade kineetilise energiaga, mis koguneb vabal langemisel:

$$E_T = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \frac{G}{g}v^2 = GH, \quad (8.14)$$

kus  $m$  – langevate osade (põhiliselt vasarapea) mass;

$v$  – langevate osade kiirus löögihetkel (deformeerimise alguses);

$G$  – langevate osade raskusjõud (kaal);

$g$  – normaalraskuskiirendus;

$H$  – langemiskõrgus.

Liittoimevasarate löögienergia moodustub vaba langemise kineetilisest energiast ja tööst, mida sooritavad aur või suruõhk vasara silindris:

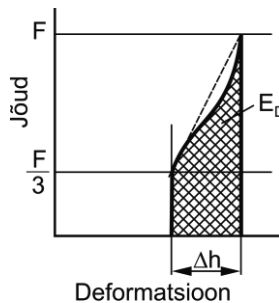
$$E_T = \frac{1}{2}mv^2 + pSH = (G + pS)H, \quad (8.15)$$

kus  $p$  – auru- või õhurõhk vasara silindris,  
 $S$  – vasara silindri kolvi pindala.

Löögienergia  $E_T$  ei kulu siiski tervikuna plastse deformatsiooni energiaks  $E_D$ . Osa energiast kulub deformeerimistöriista (pinni, stantsi) ja tooriku, alasi padja ning alasi elastseks deformeerimiseks, vibratsioonide tekitamiseks jne. **Löögikasutegur** (*blow efficiency*)  $\eta = E_D / E_T$ , mis oleneb paljudest asjaoludest, näiteks alasi ja langevate osade massi suhtest. Alasi massi  $M$  suurenedes löögikasutegur suureneb. Sepistusvasaratel  $M/m = 15...20$  ja stantsimisvasaratel  $20...30$  (vt p 8.3.5).

Plastse deformatsiooni energia  $E_D = \eta E_T$  võrdub kõvera jõud-deformatsioon ( $F = f(\Delta h)$ ) aluse pinna pindalaga. Juhul kui kalestumist ei toimu (kuumsurvetöötlus), suureneb jõud tooriku ja tööriista kontaktpinna suurenemisest tingituna. Võttes näiteks jõu deformatsiooniprotsessi algul võrdseks ühe kolmandikuga jõust deformatsiooniprotsessi lõpus (vt Joonis 8.29), on deformatsioonienergia

$$E_D = \frac{F/3 + F}{2} \Delta h = \frac{2F\Delta h}{3}. \quad (8.16)$$



**Joonis 8.29.** Tooriku kõrguse muutus  $\Delta h$  vasara löögi toimel.

Plastseid deformatsioone põhjustav energia  $E_D$  on antud kineetilise energia  $E_T$  ja löögikasuteguri  $\eta$  korral konstantne suurus. Sepistusvasara löögienergia  $E_T = 50$  kJ ning  $\eta = 0,6$  korral  $E_D = 30$  kJ.

### Pressid

Raskete sepiiste tootmisel kasutatakse **press-sepistamist** (*press forging*). Põhiliselt kasutatakse **hüdropresse** (*hydraulic presses*). Mehaanilisi presse, näiteks vântpresse, kasutatakse vormstantsimisel (vt Joonis 8.28d).

Hüdropresside (vt Joonis 8.28e) tööpõhimõtte on lihtne – **pressi liuguri** (*slide*) külge kinnitatud pinni töökäigul kasutatakse tööd, mida sooritab pressi töösilindris olev

kõrge rõhu all vedelik. Hüdropressid on jõupiiranguga seadmed, s.o nende maksimaalne survejõud on põhiline kasutamist limiteeriv karakteristik. Vasaratest erinevalt toimub tooriku deformeerimine staatilise survejõu toimel, mitte löögiga. Seetõttu hüdropressid ei vaja rasket alalist ega vundamenti. Press-sepistamisel deformeerub metall tooriku kogu mahus ühtlasemalt kui vasarsepistamisel. Negatiivseks asjaoluks on tööriista märksa pikemaajalisem kontakt toorikuga, võrreldes vasarate kasutamisega, mis põhjustab tooriku pindmise osa jahtumist ja deformeeritavuse vähenemist. Et seda vältida, kuumutatakse pressi tööriista sepistamiseks reeglina ette.

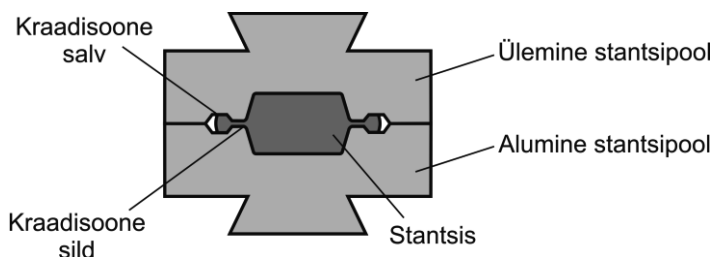
Sepistamiseks kasutatakse hüdropresse liuguri kiirusega kuni 0,8 m/s, s.o kasutatavad deformeerimiskiirused on vähemalt suurusjärgu võrra väiksemad, võrreldes deformeerimiskiirustega vasarsepistamisel (kuni 10 m/s ja rohkemgi) (vt Tabel 8.2). Sepistamisel ja vormstantsimisel kasutatakse ka **kruvipresse** (*screw presses*) (vt Joonis 8.28f).

### 8.3.5. Vasarstantsimine

**Vormstantsimisel** (*impression-die forging, closed-die forging*) kasutatakse tooriku deformeerimiseks spetsiaalseid tööriistu – stantsivagudega stantse (Joonis 8.30). Vormstantsimisel on erinevalt sepistamisest metalli voolamine stantsivao (vagude) vormiga piiratud. **Vormstantsimisel vasaratel** ehk **vasarstantsimisel** (*impression-die hammer forging*) on metallil võimalik stantsivao, soovitavalt pärast selle kõigi uurete täitumist, väljuda vaid spetsiaalsesse kitsasse kraadisoonde (Joonis 8.30).

Vormstantsimise isärasused on sepistamisega võrreldes järgmised:

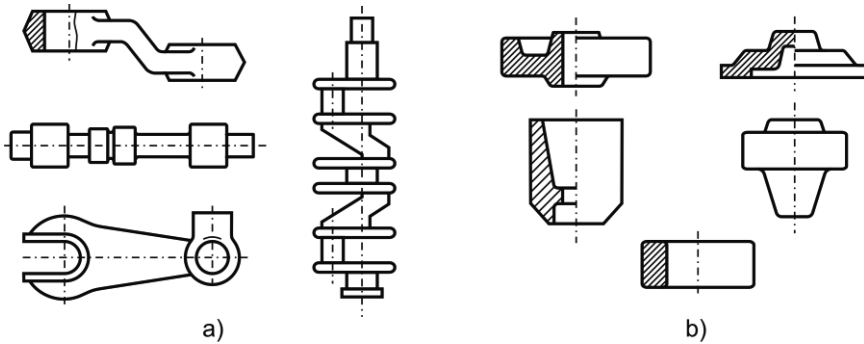
1. Vormstantsitud toodete – **stantsiste** (*impression-die forgings, closed-die forgings*) – mass on piiratud (üldjuhul kuni 500 kg), samal ajal kui sepistel võib see ulatuda sadade tonnideni.
2. Märgatavalt suurem tootlikkus, kuid kasutatava tööriista – **stantsi** (*impression die*) – kõrgest maksumusest tingituna leiab vormstantsimine kasutamist põhiliselt seeria- ja hulgi valmistamisel.
3. Stantsiste täpsus- ja pinnakvaliteet ületavad märgatavalt sepiste oma, mis vähendab täiendava mehaanilise töötlemise mahukust ning sellega kaasnevat metallikadu laastuna.



**Joonis 8.30.** Avatud vaoga (kraadisoonega) vasarastants kraadiga vormstantsimiseks

Vormstantsimisel kasutatakse üldiselt suurema võimsusega seadmeid (vasaraid, presse) kui sepistamisel. Põhjuseks on metalli voolamine kogu mahus stantsimisel, samal ajal kui sepistamisel deformeeritakse toorikut osade kaupa, s.t piiratud mahus. Siiski on olemas stantsimismeetodid, kus tooriku deformeerimine toimub järk-järgult, piiratud mahus – rotatsioonstantsimine (vt p 8.3.9), radiaalstantsimine (vt p 8.3.9), orbitaalstantsimine (vt p 8.3.10) jt.

Vormstantsimine võimaldab üldiselt valmistada keerukama kujuga tooteid kui sepistamine (Joonis 8.31).



**Joonis 8.31.** Vormstantsitud toodete ehk stantsiste liigitus kuju järgi: a – venitatud pikiteljega; b – telgsümmeetrilised

Deformatsioonitemperatuurist sõltuvalt eristatakse kuum- ja külmvormstantsimist. Rohkem kasutatakse kuumvormstantsimist.

### Vasarastantsid

Vormstantsimisel (tavaliselt kuumalt) deformeeritakse toorikut **stantsivagudes** (*die impressions, impressions*). Eristatakse lahtiseid ehk kraadisoonega vagusid ja kinniseid ehk kraadisooneeta vagusid. Vastavate vagudega stantse nimetatakse kraadisoonega stantsideks ja kraadisooneeta stantsideks ning stantsimist selliste vagudega stantsides vastavalt **kraadiga vormstantsimiseks** (*closed-die forging with flash, impression-die forging with flash*) ja **kraadita vormstantsimiseks** (*flashless forging, true closed-die forging*).

Kraadisoonega stantsides surutakse üleliigne metall pärast vao täitumist spetsiaalsesse kraadisoonde (vt Joonis 8.30), milles moodustub **kraat** (*flash*). Kraadisoon koosneb kahest osast – **kraadisoone sild** (*flash land*) ja **kraadisoone salv** (*flash gutter*). Kraadisoon projekteeritakse selliselt, et kõigepealt täituks metalliga stantsivagu ja alles seejärel algaks üleliigse metalli (tooriku maht võetakse vao mahust mõnevõrra suurem) voolamine kraadisoonde. Hiljem kraat eemaldatakse eraldi **ärälõikestantsis** ehk **kraadilõikestantsis** (*trimmer, trimming die*). Avatud vaoga stantside eelis on

võimalus kasutada suhteliselt ebatäpseid toorikuid. Puuduseks on metallikadu kraadile ja täiendava operatsiooni vajadus kraadi eemaldamiseks.

Kraadisoonteta stantsivaol või sellise vaoga stantsil – kraadisooneteta stantsil kraadisoon puudub. Toote – stantsise saamiseks kinnises stantsis ilma metalli liiata ja puudujäägita peavad tooriku ja vao mahud olema ligikaudu võrdsed. Kinniste stantside eeliseks on väiksem metallikulu, toote suurem täpsus ja paremad mehaanilised omadused ning see, et puudub vajadus kraadi äralõikeoperatsiooni järele. Pealegi on kinnistes stantsides metall ruumilises survepingeseisundis, mis võimaldab saada suuremaid deformatsiooniastmeid ning stantsida vähemplastseid metallisulameid (vt samuti p 8.2.1). Kinniste stantside puuduseks, võrreldes avatud stantsidega, on kõrge hind, väiksem püsivus ja vajadus täpse mahuga, järelikult omahinnalt kallimate toorikute järele.

Kraadiga või kraadita vormstantsimine võib toimuda ühe- või mitmevaolistes stantsides. Ühevaolisi stantse kasutatakse suhteliselt lihtsa kujuga stantsiste tootmisel, kusjuures stantsi vao kuju ja mõõtmed vastavad valmistoote kujule ja mõõtmetele.

Mitmevaolised stantsid (Joonis 8.32) on keeruka kujuga stantsiste tootmiseks. Selliste stantside vagusid saab liigitada stantsimisvagudeks ja ettevalmistusvagudeks. Stantsimisvagudeks on **eelvagu** ehk **mustvagu** (*blocking impression, roughing impression*) ja **lõppvagu** ehk **puhasvagu** (*finishing impression, final impression*). Stantsimisvagudes toimub tootele lõpliku vormi ja mõõtmete andmine. **Ettevalmistusvaod** (*preforming impressions*) on ette nähtud tooriku ettevalmistamiseks järgneva stantsimiseks stantsimisvagudes. Ettevalmistusvaod on venitusvagu, rullimisvagu, muljumisvagu, painutusvagu jt.

**Venitusvao** (*fullering impression, fuller*) ülesandeks on tooriku pikkuse suurendamine ristlõike vähendamise arvel (Joonis 8.32). Operatsioon on sarnane sepistamise venitusoperatsiooniga pinnide vahel – toorikut tuleb venitamisel pöörata ja nihutada pikisuunas. **Rullimisvao** (*edging impression, roller impression*) ülesanne on vastupidine venitusvao omale – tooriku ristlõikepinna kohalik suurendamine tooriku teiste osade arvel. Iga vasaralõõgi järel tuleb toorikut pöörata 90°. **Muljumisvaos** (*flattener impression, flattener*) toimub tooriku kõrguse kohalik vähendamine kohtades, kus on vaja laiust suurendada. **Painutusvagu** (*bender impression, bender*) on vaja painutatud teljega stantsiste tootmisel.

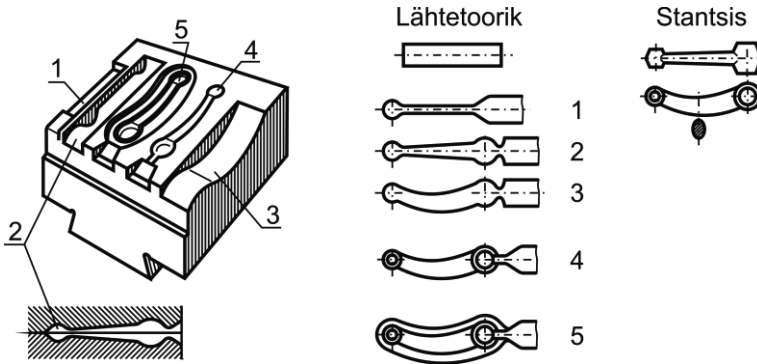
Toorikute ettevalmistamiseks stantsimiseks lõplikku vormi andvates stantsimisvagudes kasutatakse lisaks mitmevaoliste stantside ettevalmistusvagudele ka teisi alternatiivseid võimalusi. Toorikutena kasutatakse sepiseid, perioodilist valtsmetalli (vt p 8.3.1.: Valtsstoodang), valandeid ning toorikuid, mis on eeltöödeldud horisontaalstantsimismasinatel (vt p 8.3.7) või sepavaltsidel (vt p 8.3.8). Viimasel kolmel juhul toimub töötlemine sageli kombineeritud protsessina – valamine + kuumvorm-

stantsimine; stantsimine horisontaalstantsimismasinatel + kuumvormstantsimine või sepaaltsimine + kuumvormstantsimine.

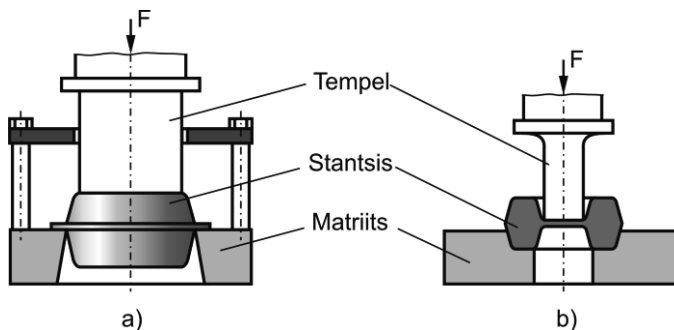
Joonisel 8.32 on näitena toodud viievaoline (3 ettevalmistusvagu ja 2 stantsimisvagu) vasarastants, s.o stantsimisvasaratel kasutatav stants. Kraadisoonega vasarastantsidel on kraadisoonega vaid lõpp- ehk puhasvaol. Ettevalmistusvaod ja eel- ehk mustvagu on reeglina kraadisoonega.

Mitmevaolistes stantsides paigutatakse lõppvagu, kus deformeerimisjõud on maksimaalsed, võimalikult stantsi keskele, mis on jäigem. Ettevalmistusvaod paigutatakse reeglina stantsi äärtesse.

Vormstantsimisel toodetud tooted viimistletakse, mis seisneb tavaliselt **kraadilõikamises** (*trimming*) **kraadilõikestantsis** (*trimmer, trimming die*) (vt Joonis 8.33a). Lähivad avad saadakse **sisekraadi** ehk **sidepinna** (*web*) ärälõikamisega **avalõikestantsis** (*punching die*) (vt Joonis 8.33b).



**Joonis 8.32.** Viievaoline vasarastants: 1 – venitusvagu; 2 – rullimisvagu; 3 – painutusvagu; 4 – eel- ehk mustvagu; 5 – lõpp- ehk puhasvagu



**Joonis 8.33.** Kraadilõikamine kraadilõikestantsis (a) ja sisekraadi ehk sidepinna eemaldamine avalõikestantsis (b)

## Tehnoloogilise protsessi ja stantsi projekteerimise põhimõtted

Tehnoloogilise protsessi väljatöötamise olulisemad ülesanded on järgmised:

- 1) stantsimisvasara valik,
- 2) stantsimissiirete valik,
- 3) tooriku liigi ja mõõtmete valik,
- 4) kuumutusrežiimi valik,
- 5) stantsi projekteerimine.

Eelnimetatud ülesandeid ei ole võimalik eraldiseisvatena lahendada. Näiteks enne esimese kolme ülesande lahendamisele asumist on vaja leida kraadi maht (vormstantsimisel avatud stantsides) ja kraadisoone mõõtmed. Teades stantsise pindala koos kraadisoone pindalaga (stantsi eraldus- ehk lahutustasandil, mis on vasara liikumissuunaga risti), arvutatakse stantsimisvasara löögienergia (või vasara langevate osade mass) nagu sepistusvasarategi valikul (vt p 8.3.4.: Vasarad).

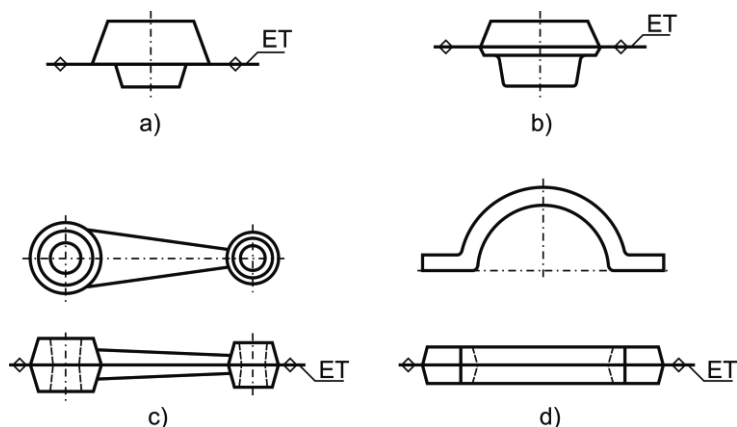
Stantsimissiirete ja vastavate stantsivagude valikul lähtutakse stantsise kujust. Selleks kasutatakse käsiraamatutes toodud soovitusi või vastavat arvutitarkvara. Stantsimissiirete valikuga on seotud tooriku valik, sest tooriku kujust oleneb, kas ja milliseid ettevalmistusvagusid kasutada. Stantsimissiirete valik lihtsustab toote lõppkujule lähedaste valandite, sepiste, perioodilise valtsmetalli (vt Joonis 8.13b) kasutamisel stantsi ettevalmistusvagude asemel.

Stantsi projekteerimist alustatakse stantsise projekteerimisest. Stantsise ja stantsi projekteerimisel tuleb silmas pidada järgnevaid aspekte.

1. Stantsi **eraldustasand** ehk **lahutustasand** (*parting plane*). Juhul kui stantsise keerukuse tõttu eraldustasand ei ole võimalik, võib stantsi ülemist ja alumist poolt eraldav pind omada ka mingit muud, stantsise kontuuri järgivat kuju.

Eraldustasandi asetuse määramisel peaks silmas pidama järgmist:

- Stantsise stantsist eemaldamise võimalikkus.
- Eraldustasand peab lõikuma stantsise vertikaalpindadega, et oleks võimalik kontrollida stantsi ülemise poole nihkumist alumise poole suhtes (vt Joonis 8.34a ja b).
- Eraldustasandi asend peaks võimaldama stantsivagude lihtsat töötlemist.
- Eraldustasandi asend peaks tagama ülemises ja alumises stantsipooles olevate stantsivagude minimaalse sügavuse soodustamiseks vagude paremat täitumist metalliga. Selle nõude täitmiseks peaks eraldustasand asuma pinnal, kus paiknevad stantsise kaks maksimaalset, teineteisega ristiasetsevat mõõdet (vt Joonis 8.34c). Nõudest loobutakse juhul, kui see võimaldab ettevalmistusvagude arvu vähendada, lihtsustab kraadilõikestantsi ehitus jms.



**Joonis 8.34.** Stantsi eraldustasandi (ET) valik: a – ET vale asend; b – ET õige asend; c, d – ET asendid tagamaks stantsivagude minimaalset sügavust

2. Töötlemisvarud ja tolerantsid. **Töötlusvaru** (*machining allowance, finishing allowance*) on metallikiht, mis jäetakse järgnevas viimistlevaks mehaaniliseks töötlemiseks laastu eraldamise teel. **Tolerantsid** (*tolerances*) on lubatud hälbed stantsise nominaalmõõtmetest. Töötlusvarud ja tolerantsid on üldjuhul standarditud ja olenevad stantsise mõõtmetest (vt Tabel 8.1).

**Tabel 8.1.** Stantsimisvasaratel stantsitud võllide töötlusvarud ja tolerantsid<sup>1</sup>

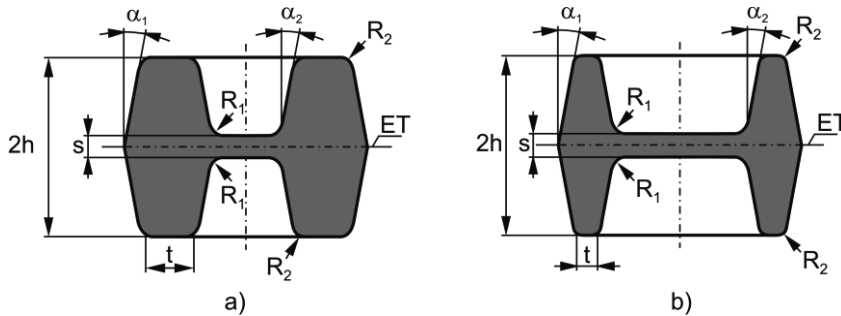
Võlli diameeter, mm	Töötlusvarud/ ± tolerantsid võlli pikkustel, mm		
	152...762	762...1520	1520...2290
25...75; 75...152; 152...229	7,7/+3,2; -0 9,5/+3,2; -1,6 11,1/+3,2;-1,6	9,5/3,2; -1,6 11,1/+3,2; -1,6 12,7/±3,2	11,1/+3,2;-1,0 12,7/±3,2 14,3/+4,8;-1,6

<sup>1</sup> ASM Handbook, vol. 14, Forming and Forging, p. 72.

3. Stantsikalded. **Stantsikalle** (*draft allowance, draft*) vertikaalpindadele on vajalik stantsise stantsivaost eemaldamise lihtsustamiseks. Stantsikalded parandavad samuti stantsivao täitumist. Stantsikaldeid vaadeldakse nagu valukaldeid (mudelikaldeid, vt p 9.2.4) töötluslisadena, s.o stantsise funktsionaalsusest mittetuleneva, kuid tehnoloogilisest seisukohast vajaliku materjali-kihina. Stantsikalded suurendavad viimistleva mehaanilise töötlemise mahtu, toote gabariiti ja massi, mistõttu nad tuleks valida minimaalselt vajaliku suurusega. Vasarastantside **stantsikaldenurk** (*draft angle*) on tavaliselt 3, 5, 7 või 10° olenevalt stantsise materjalist (teras, Al-sulam, Ti-sulam jne) ja



sellest, kas on tegemist kaldega stantsise välis- või sisepindadele (vt Joonis 8.35) ning samuti sellest, kas kasutatakse väljatõukajaid või mitte.



**Joonis 8.35.** Stantsise stantsikalded, sise- ja välisümardused ning sisekraat ehk sidepind: a – laia ribiga stantsis; b – kitsa ribiga stantsis (ET – eraldustasand)

4. Sise- ja välisümardused. Üleminekud stantsise ühelt pinnalt teisele tuleb ümardada, kuna see parandab stantsivao täitumist ning väldib stantsi teravate servade purunemist ja/või kiiret kulumist. Välisümardused (Joonis 8.35) on nagu töötlemisvarud, tolerantsid, stantsi- ehk stantsimiskalded üldjuhul standarditud. Siseümardused võetakse välisümardustest 3..4 korda suuremad.
5. Sisekraadid ehk sidepinnad. Läbiva avaga toodete stantsimisel jäetakse mehaanilise töötlemise lihtsustamiseks ja metallikulu vähendamiseks stantsisesse koonilised avasüvendid, mida eraldab **sisekraat** ehk **sidepind** (*web*) paksusega  $s$  (vt Joonis 8.35), kuna survega töötlemisel ei ole erinevalt valutehnoloogiast võimalik läbivaid avasid saada. Liiga õhuke sisekraat põhjustab stantsi väljaulatuvate osade muljumist, liiga paks raskendab järgnevat avalõikamist avalõikestantsis (vt Joonis 8.33b).
6. Ribide konstruktsioon. Stantsise konstruktsioon näeb sageli ette jäikusribisid. Stantsivagude täitumise parandamiseks ja stantsimissiirete arvu vähendamiseks peaks ribide laius  $t$  ja kõrguse  $h$  suhe olema võimalikult suur, s.t ribid peaksid olema laiad ja suhteliselt madalad (võrdle Joonis 8.35a ja 8.35b). Vasaratel stantsimisel tuleks stantsivao raskelt täituvad osad – ribid paigutada stantsi ülemisse poolele, kuna see täitub metalliga alumisest poolest paremini.

### Stantsimisvasarad

Stantsimisvasaraid kasutatakse enamasti vormstantsimisel kraadisoonega vasarantsides. Nende vasarate ehitus ja põhikarakteristikud on sarnased sepistusvasarate vastavate parameetritega (vt p 8.3.4.: Vasarad). Stantsimis- ja sepistusvasarate vahel on ka erisusi:

1. Stantsimisvasara alasi on massiivsem kui sepistusvasaratel, s.t vasara alasi massi  $M$  ja langevate osade massi  $m$  suhe on suurem (sepistusvasaratel  $M/m = 15...20$ , samal ajal kui stantsimisvasaratel  $M/m = 20...30$ ).
2. Stantsimisvasarate alasi moodustab koos vasara kerega ühtse konstruktsiooni erinevalt sepistusvasaratest, millel alasi toetub eraldi vundamendile. Stantsimisvasarate selline konstruktsioon on vajalik stantsi ülemise ja alumise poole vastastikuse asendi tagamiseks.
3. Stantsimisvasaratel puudub vajadus käiguulatuse kontrollimiseks, kuna vasara pea ja selle külge kinnitatud ülemise stantsi käik on piiratud ülemise ja alumise stantsipole kokkupuutepinnaga. Sepistusvasaratel puudub kontakt ülemise ja alumise pinni vahel, mis tingib vasara pea ja sellele kinnitatud pinni käiguulatuse reguleerimisvajaduse.
4. Vormstantsimisvasarate löökide arv (kuni 90...110 lööki minutis) on suurem kui sepistusvasaratel.

Kuumvormstantsimisel kasutatakse hõõrd- ehk friktsioonvasaraid, auruvasaraid, pneumovasaraid nagu sepistamiselgi. Selliste vasarate puuduseks on suhteliselt väike kasutegur – 15...80 % löögienergiast olenevalt sellest, kas tegemist on nõrkade või tugevate löökidega. Suur osa löögienergiast hajub vasara konstruktsioonelementides ja vundamendis. Märgatavalt suurem kasutegur on **vastulöögivasaral** (*counterblow hammer, impactor*), millel vasara pead ja nende külge kinnitatud stantsipooled liiguvad teineteisele vastu. Vastulöögivasarad on enamasti auru- või hüdroajamiga. **Vertikaalvastulöögivasara** (*vertical counterblow hammer*) põhimõtteskeem on esitatud Joonisel 8.28c. Vastulöögivasaratel kasutatakse vaid ühevaolisi stantse, kuna mõlema stantsipole samaaegne liikumine ei võimalda mitmevaoliste stantside kasutamist.

**Impulss-stantsimisel** (*high-energy-rate forging, HERF*) toodetakse stantsiseid vasara pea ja selle külge kinnitatud stantsi väga suurte kiirustel (kuni 22 m/s). Stantsimisel kasutatakse suure deformatsioonienergiaga ja -kiirusega vasaraid. Stantsitakse enamasti ühevaolistes stantsides. Suure deformatsioonienergia saavutamises on erinevalt tavalistest vormstantsimisvasaratest (vasara kiirus kontakti hetkel toorikuga) deformeerimiskiirus vasara langevate osade massist tähtsam. Selle tõttu on tähelepanuvääriv kasutatavate seadmete tunduvalt väiksemad mõõtmed ja mass (sealhulgas langevate osade mass), mis vähendab probleeme vundamentide ehitamisel seadme ülesseadmiseks. Tabelis 8.2 on võrdluseks esitatud erinevatel stantsimis-seadmetel saavutatavad deformeerimiskiirused löögi hetkel. Ligikaudselt kuni kolm korda suuremad deformeerimiskiirused leht- ja liittoimevasaratega võrreldes (vt Tabel 8.2) tagavad vasara pea sama massi puhul peaaegu üheksakordse deformatsioonienergia suurenemise, kuna deformatsioonienergia on proportsionaalne kiiruse ruuduga (vt p 8.3.4.: Vasarad).

**Tabel 8.2.** Vormstantsimiseseadmed (vasarad ja pressid) ning nendel saavutatavad deformeerimiskiirused toorikuga kontakti hetkel

Stantsimisvasara või -pressi tüüp	Deformeerimiskiirus, m/s
Lihttoime- ehk gravitatsioonvasarad	3,5...5,5
Liittoime- ehk kaksiktoimevasarad	4,5... 10,0
Vastulöögivasarad	4,5...9,0
Suure deformatsioonienergiaga vasarad	5,0...22,0
Hüdropressid	0,3...0,5
Väntpressid	0,06...1,5
Kruvipressid	0,3...1,2

### 8.3.6. Press-stantsimine

Pressidel vormstantsimisel erineb metalli deformeerimise iseloom oluliselt vasarstantsimise omast. Vasarstantsimisel (vt p 8.3.5) deformeerib vasara löök metalli põhiliselt tooriku pinnakihtides, kust deformatsioon levib nõrgalt sisemusse. **Pressstantsimisel** (*press forging, impression-die press forging*), mil deformeerimiskiirused on oluliselt väiksemad, suureneb koormus toorikule pidevalt ja deformatsioonid haaravad tooriku kogu mahu. Seetõttu kasutataksegi suurte ristlõikepindadega stantsiste tootmisel enamasti press-stantsimist. Samal ajal on probleemiks stantsi ja tooriku pikem kontakti aeg, mis põhjustab tooriku pinnakihtide kiiret jahtumist, järelikult tooriku eri osade erinevat deformeeritavust. Tooriku kiire jahtumise vältimiseks kasutatakse sageli **kuumstantsstantsimist** (*hot-die forging*).

Pressidel on võimalik toota põhimõtteliselt samasuguseid stantsiseid kui stantsimisvasaratelgi – venitatud pikiteljega ja telgsümmeetrilisi (vt Joonis 8.31). Siiski on iga pressitüübi kasutamisel omad piirangud teostatavate operatsioonide ja stantsiste vormi osas.

### Pressid ja pressitantsid

Kuum- ja külmvormstantsimisel kasutatakse mehaanilisi ja hüdropresse. Esimesed kuuluvad kas käigupiiranguga (nt väntpressid) või energiapiiranguga (kruvipressid) ning teised jõupiiranguga seadmete gruppi (vt p 8.3.4.: Seadmed). Kõige laiemat kasutamist on vormstantsimisel leidnud käigupiiranguga mehaanilised pressid.

**Mehaanilistest pressidest** (*mechanical presses*) on tuntuimad **väntpress** (*crank press, crank driven press*) (vt Joonis 8.28d) ja **ekstsentrikipress** (*eccentric press, eccentric-shaft press*). Võrreldes stantsimisvasaratega, on nimetatud mehaaniliste presside iseärasusteks:

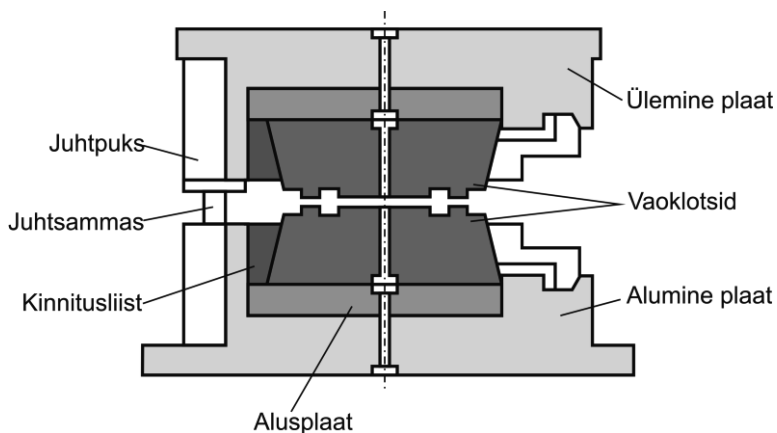
- pressi liuguri oluliselt lühem käigupikkus;
- pressi liuguri kiirus on suurim mitte käigu lõpus nagu vasaratel, vaid keskel, kuid survejõud on suurim käigu lõpus.

Vormstantsimisel kasutatavad mehaanilised pressid on tööpõhimõttelt sarnased lehtvormimisel kasutatavatega (vt p 8.4.3. Stantsid ja lehtstantsimiseadmed), kuid on ka olulisi erinevusi: maksimaalne survejõud pressi liuguri käigu lõpus, liuguri suurem kiirus (vähendamaks tooriku ja stantsi kontakti aega kuumvormstantsimisel) ning vormstantsimispresside kere suurem jäikus (suuremate deformeerimisjõudude tõttu).

**Hüdropressi** (*hydraulic press*) deformeerimiskiirused on veelgi väiksemad kui mehaanilistel pressidel. Siiski, suurema osa käigust toorikule lähenemisel läbib liugur suuremal kiirusel kui on liuguri kiirus deformeerimisprotsessi algul.

**Kruvipressil** (*screw press, screw-driven press*) edastatakse toorikule hooratta kineetiline energia, kusjuures hooratta pöörlev liikumine muundatakse pressi liuguri sirgjooneliseks liikumiseks kruviülekanne kasutades. Kruvipresside hoorattale edastatakse kineetiline energia hõõrdülekanne, hammasülekanne, hüdraulikat jms kasutades. Esimesel juhul nimetatakse kruvipressi **hõõrdkruvipressiks** (*friction screw press*) (vt Joonis 8.28f).

Pressidel vormstantsimisel on dünaamilised koormused tunduvalt väiksemad kui vasaratel stantsimisel. Seetõttu puudub massiivsete tervikstantside (kasutatakse vasaratel stantsimisel) (vt Joonis 8.30) kasutamise vajadus. Kasutatakse koostatavaid stantse, mis koosnevad juhtsamastega **stantsiplokki** (*die set*) monteeritavatest ülemisest ja alumisest vaoklotsist (Joonis 8.36). Stantsiplokk koosneb **ülemisest plaadist** (*upper shoe*) ja **alumisest plaadist** (*lower shoe*), mis on omavahel ühendatud **juhtsamaste** (*guide pins, guide posts*) ja **juhtpukside** (*guide bushings, guide pin bushings*) kaudu. Komplekt vaoklotse tehakse iga vao jaoks eraldi. Vaoklotsid toetuvad plaatide kulumist vähendavatele alusplaatidele ning kinnitatakse liistudega. Sellised stantsid on reeglina varustatud **väljatõukajaga** (*ejector, ejector pin*) mis, saades sundliikumise pressilt, eraldavad valmisstantsise vaost. Sellega seoses on ka lubatud stantsikalded väiksemad.



**Joonis 8.36.** Pressistantsi olulisemad konstruktsioonielemendid

### Isotermvormstantsimine, kuumstantsstantsimine ja üliplastne stantsimine

**Isotermvormstantsimine** (*isothermal forging*) on kuumvormstantsimine stantsidega, mille temperatuur on stantsitavate toorikute temperatuuriga võrdne. See välistab stantsi jahutava toime toorikule, s.t säilitab tooriku konstantse temperatuuri kogu töötlemise kestel. Isotermvormstantsimise peamised eelised on järgmised:

1. Stantsiste suurem täpsus vasaratel ja pressidel toodetud stantsistega võrreldes, mistõttu täiendava viimistleva mehaanilise töötlemise vajadust tavaliselt ei ole. Täpsus tuleneb stantsise deformatsioonitemperatuuri ja järelikult mõõtmete täpsusest kontrollitavusest. Sama eelis on samuti **kuumstantsstantsimisel** (*hot-die forging*). Kui tavalisel teraste vormstantsimisel pressidel kuumutatakse stantsipooled ette temperatuurideni mitte üle 400...450 °C, siis kuumstantsstantsimisel on stantsi ettekuumutustemperatuur tooriku kuumsurve-töötlustemperatuuri alumisest piirist vaid 100...200 °C madalam.
2. Võimalus defektidevabalt stantsida sulameid, mille voolepinge on äärmiselt tundlik temperatuuri ja deformatsioonikiiruse suhtes, näiteks paljud Ni- ja Ti-sulamid. Selliste sulamite voolepinge kasvab temperatuuri alanedes, samuti deformatsioonikiiruse kasvades järsult.

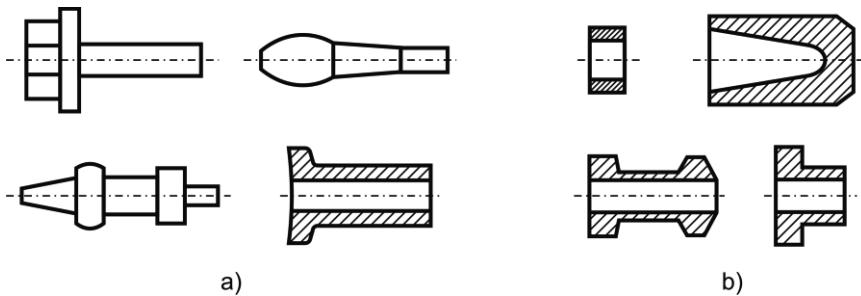
Isotermvormstantsimist kasutatakse peamiselt kuumustugevatest Ti- ja Ni-sulamitest stantsiste tootmiseks. Isotermvormstantsimist, samuti kuumstantsstantsimist kasutatakse **täppisstantsiste** (*precision forging, net-shape forging*) tootmiseks samuti teistest metallisulamitest, sh terastest.

Isotermvormstantsitakse mõnikord **üliplastseid sulameid** (*superplastic alloys*), s.t metallisulameid, mis teatud tingimustel (struktuur, temperatuur, deformatsioonikiirus) lähevad üliplastsesse olekusse (vt p 8.2.7). Üliplastsete sulamite isotermvormstantsimist nimetatakse **üliplastseks stantsimiseks** (*superplastic forging*). Üliplastne

stantsimine on laiemat kasutust leidnud lehtstantsimisel (vt p. 8.4.5. Üliplastne lehtvormimine).

### 8.3.7. Horisontaalstantsimine

**Horisontaalstantsimine** (*upset forging, upsetting*) leiab laialdast kasutamist peamiselt kohtjämendusega ja/või sisemiste õõnsustega (avadega) stantsiste stantsimisel horisontaalstantsimismasinatel seeria- ja masstootmisel (vt Joonis 8.37). Maailmas toodetavate stantsiste arvu (mitte massi) poolest on see stantsimismeetod kahtlemata levinuim.



**Joonis 8.37.** Horisontaalstantsimisega toodetud tüüpstantsised: a – varb- või torukujulisest toorikust kohaliku jämendusega; b – varbtoorikust rõngas-tüüpi või sisemise õõnsusega

Lisaks teatud tüüpi stantsiste tootmisele kasutatakse horisontaalstantsimist samuti toorikute ettevalmistaval stantsimisel edasiseks vormstantsimiseks vasaratel või pressidel. Seda stantsimismoodust kasutatakse ka pressidel või vasaratel valmistatud toodete täiendavaks vormimiseks kohtjämendamiseiga.

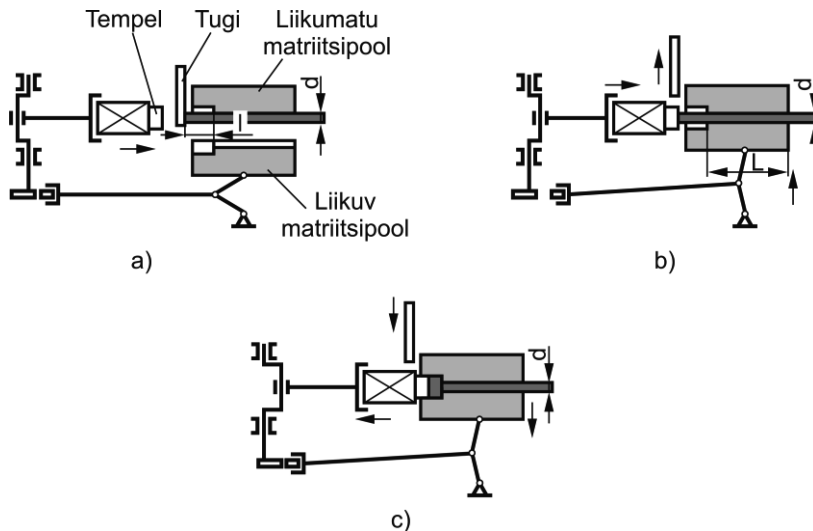
Tüüpilisteks protsessideks vormstantsimisel horisontaalstantsimismasinatel on varbmetalli, harvem torukujulise tooriku mitmevaoline vormimine kinnises, templist ja poolitatavast matriitsist koosnevas stantsis.

**Horisontaalstantsimismasina** (*upset forging machine, upsetter*) tööpõhimõte on näidatud joonisel 8.38. Erinevalt vasarstantsimisest stantsimisvasaratel või pressstantsimisest on horisontaalstantsimismasinatel kasutatavatel stantsidel kaks eraldustasandit. Üks eraldustasand on masina liugurile kinnitatud templi ja matriitsipoolte vahel ning teine eraldustasand on liikuva ja liikumatu matriitsipoolte vahel. Lähteasendis asetatakse varb diameetriga  $d$  matriitsi süvendisse ja antakse ette toeni (Joonis 8.38a). Matriitsivakku jääb seega tooriku ots pikkusega  $l$ . Järgneb tooriku kinnisurumine matriitsi liikuva poolega, toe eemaldumine ning tooriku kohtjämendamine templiga (Joonis 8.38b). **Kohtjämendatakse** (*upset forging, heading*) stantsipoolte vahele mittekinnitatud tooriku vaba osa. Järgnevalt liigub tempel tagasi, matriitsi

liikuv pool eemaldub ning toorik saab liikuda horisontaalstantsimismasina matriitsi järgmisesse vaku (Joonis 8.38c).

Horisontaalstantsimisel on võrreldes vasarstantsimise ja press-stantsimisega järgmised eelised:

1. Sellise vormiga (kohtjämedustega, sisemiste õõnsustega või läbiva avaga) stantsiste saamisvõimalus, mille tootmine teiste vormstantsimisprotsessidega on võimatu või mitteratsionaalne.
2. Märkatav metalli kokkuhoid tänu väikestele stantsikalletele (tavaliselt  $0...1,5^\circ$ ) avatava matriitsi kasutamisel. Materjali kokkuhoidu võimaldab samuti peamiselt suletud, s.t kraadisooneta stantside kasutamine, mistõttu stantsimisel kraati ei teki.
3. Võimalus stantsida otse traat- või varbtoorikust, mis võimaldab tooriku mahtu lihtsalt reguleerida ning loobuda tooriku eelnevast tükeldamisest. Suure võimsusega masinatel kasutatakse toorikuid läbimõõduga kuni 250 mm.
4. Dünaamiliste koormuste mõõdukus ning tooriku ja stantsielementide (matriits, tempel) lühike kontakteerumisaeg. Selle tulemusena on stantside püsivus kuni kahekordselt suurem kui press-stantsimisel.
5. Suhteliselt suur tootlikkus – kuni 180 stantsist minutis kuumstantsimisel ja kuni 90 stantsist minutis külmstantsimisel.



**Joonis 8.38.** Vormstantsimine horisontaalstantsimismasinal: a – tooriku toeni etteandmine; b – tooriku kinnisurumine matriitsi liikuva poolega ja otsa kohtjämedamine; c – templi eemaldumine ja tooriku vabastamine järgmisesse vaku liikumiseks

Horisontaalstantsimisel on järgmised puudused:

1. Suhteliselt väike universaalsus – piiratud arv võimalikke operatsioone (kohtjämendamine, avalõikamine, tükeldamine, painutamine) seab piirid stantsiste võimalikule vormile.
2. Vajadus kasutada välisläbimõõdu suure täpsusega, tagist hoolikalt puhastatud, sageli kalibreeritud toorikut.
3. Horisontaalstantsimismasinade väiksem võimsus stantsimisvasarate ja -pressidega võrreldes, mistõttu stantsiste mass on piiratud (terasstantsised tavaliselt mitte üle 5...6 kg).

### **Tehnoloogia ja projekteerimispõhimõtted**

Horisontaalstantsimismasinade stantsimissiirded erinevad oluliselt stantsimisvasarate ja -presside võimalustest. Näiteks venitusoperatsioonid ei ole masina tööpõhimõttest tulenevalt võimalikud. Stantsise ja stantsimisprotsessi projekteerimisel tuleb silmas pidada järgmisi reegleid (kohtjämendamise kui kasutatavaima operatsiooni näitel).

1. Kohtjämendamisel tooriku vaba (stantsipoolte vahele mittesurutud) osa pikkus, olenevalt tooriku metallist

$$l \leq (2,5...3)d, \quad (8.17)$$

kus  $d$  – tooriku läbimõõt (Joonis 8.39).

Nõue tuleneb tooriku vaba osa ristpainde vältimise vajadusest ning on sõltumatu sellest, kas toorikut jämendatakse nii matriitsi kui ka templi õõnsuses, matriitsi õõnsuses või templi õõnsuses (vt Joonis 8.39a).

2. Tooriku vaba osa suurte pikkuste korral ( $l > 2,5...3$ ) on kohtjämendamine võimalik matriitsi või templi, samuti samaaegselt matriitsi ja templi õõnes tingimisel

$$D \leq 1,5d, \quad (8.18)$$

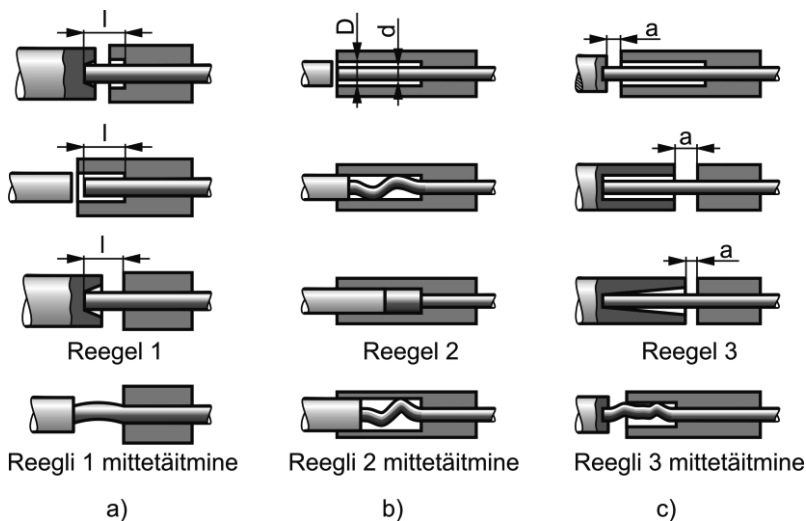
kus  $D$  – matriitsi- või templiõõne läbimõõt. Kui seda reeglit pole järgitud, (Joonis 8.39b) kaasneb tooriku ristpaine.

3. Tooriku vaba osa suurte pikkuste korral kasutatakse ristpainde vältimiseks sageli tooriku otsa läbimõõdu järkjärgulist suurendamist, teiste sõnadega materjali eelkogumist matriitsi või templi kogumisvagudes. Kogumise eesmärk on üldjoontes sama kui vormstantsimisel stantsi ettevalmistusvaos – rullimisvaos (vt p 8.3.5.: Vasarstantsid). Templi või matriitsi õõnsusest väljaulatuva, jämendatava osa pikkus (vt Joonis 8.39c)

$$a \leq 1,5...2d. \quad (8.19)$$

Mida väiksem on vahe  $D - d$ , seda suurem võib olla jämendatava osa pikkus  $a$ .

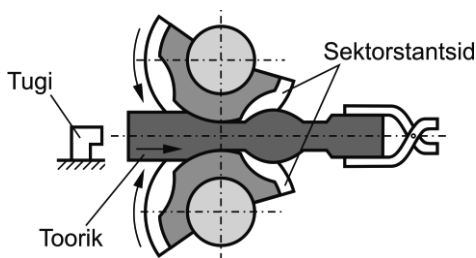




**Joonis 8.39.** Horisontaalstantsimine – kohtjämendamine horisontaalstantsimismasinal: a – reegel 1 – tooriku vaba osa pikkus  $l$  (vt seos 8.17); b – reegel 2 – tooriku läbimõõdu  $d$  ja matriisi (templi) õõne läbimõõt  $D$  (vt seos 8.18); c – reegel 3 – templi ja matriisi õõnsusest väljaulatava (jämendatava) osa pikkus  $a$  (vt seos 8.19).

### 8.3.8. Sepavaltsimine

**Sepavaltsimine** (*roll forging, forge rolling*) on pikivaltsimisega (vt p 8.3.1) sarnane kuumsurvetöötlusmeetod, mida tehakse **sepavaltsidel** (*forge rolls, roll forging machines*). Sepavaltsid on varustatud ühe- või mitmevaoliste sektorikujuliste stantsidega (Joonis 8.40). Toorik asetatakse aeglaselt pöörlevate (10...100 1/min) sektorstantsidega varustatud valtside vahele kuni toeni hetkel, kui viimased on valtsidevahemiku vabastanud. Sektorstantsid haaravad pöörlemisel tooriku ning deformeerivad seda stantsivaos.



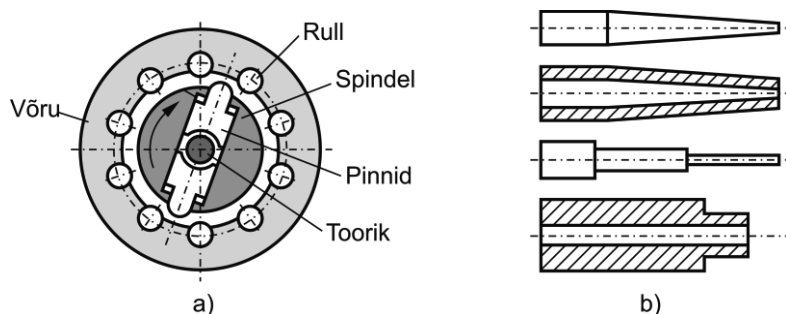
**Joonis 8.40.** Sepavaltsimine

Sepavaltsimist kasutatakse kahel eesmärgil.

1. Venitatud pikiteljega stantsiste, näiteks kooniliste võllide, telgede, lehtvedrude, labidate, kahvlite jms tootmiseks.
2. Toorikute ettevalmistamiseks vormstantsimiseks pressidel või vasaratel. Näitena võib tuua paljude autoehituses kasutatavate stantsiste – väntvõllid, nukkvõllid jms toorikute ettevalmistamise press-stantsimiseks. See võimaldab stantside ettevalmistusvaguade arvu vähendamist või nendest loobumist.

### 8.3.9. Rotatsioonstantsimine ja radiaalstantsimine

**Rotatsioonstantsimist** (*rotary swaging, swaging*) kasutatakse telgsümmeetriliste (ümar, nelikant jms) traadi-, varda- või torukujuliste toorikute ristlõikepindala kohalikuks vähendamiseks ja/või kuju muutmiseks piki telge kahe või enama pinni radiaalsuunaliste löökidega. Rotatsioonstantsimine toimub enamasti külmalt **rotatsioonstantsimismasinal** (*rotary swager, rotary swaging machine*), mille üks võimalikke töötamis põhimõtteid on esitatud Joonisel 8.41. Traadi-, varda- või torukujuline toorik asetatakse spindlis asetsevate pinnide vahelisse vahemikku. Spindli pöörlemisel võrus asetsevad rullid edastavad pinnidele radiaalsuunalise liikumise – toimub tooriku deformeerimine. Spindli edasisel pöördumisel pinnid eemalduvad tsentrifugaaljõudude toimele toorikust kuni järjekordse radiaalsuunalise liikumiseni paigalseisvate rullide toimele. Toorikule mõjuvate löökide arv minutis on 1000...5000 olenevalt rotatsioonstantsimismasina suuruselt ja tüübist. Töötlemisel antakse toorikule pidev teljesuunaline ettenihe.



Joonis 8.41. Rotatsioonstantsimine (a) ja toodete näited (b)

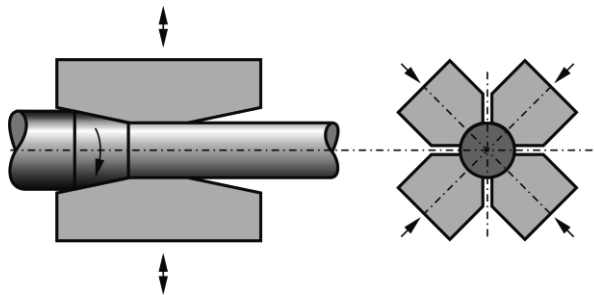
Kasutatakse samuti rotatsioonstantsimismasinaid, mille spindel koos pinnidega on statsionaarne ja pöörliikumine antakse rullidega võrule. Sellisel juhul pinnide eemaldumine toorikust enne järjekordset lööki tagatakse vedrudega. Sellised **statsionaarspindelstantsimismasinaid** (*stationary-spindle rotary swagers*) võimaldavad ümarast ristlõikest erineva ristlõikega (nelikant, ristkülik jms) stantsiste tootmist, kusjuures lähtetoorik võib olla ümara ristlõikega.

Rotatsioonstantsimist kasutatakse silindriliste ja kooniliste võllide tootmisel, torukujuliste toorikute otsa ahendamiseks, näiteks gaaskeevituspõletite otsikute tootmisel, kooniliste torude tootmisel jms. Sobiva kujuga torni asetamisel torukujulisse toorikusse on võimalik valmistada siseava suvalise ristlõikega (nelikant, kuuskant jms) torusid. Rotatsioonstantsimise eelised on:

- suur tootlikkus võrreldes analoogsete toodete lõiketöötlemisega;
- metalli kao puudumine laastuna;
- toodete tööiga on analoogsete lõiketöödeldud toodetega võrreldes märgatavalt pikem survetöödeldud metalli soodsama struktuuri tõttu.

**Radiaalstantsimine** (*radial forging*) on rotatsioonstantsimisega sarnane survetöötlusmeetod, kus tooriku ristlõikepinna kohalik vähendamine toimub kahe või enama radiaalsuunas liikuva pinni (stantsi) vahel. Radiaalstantsitakse **radiaalstantsimisemasinal** (*radial forging machine*), millel erinevalt rotatsioonstantsimisemasinatest saadakse pinnide radiaalsuunaline liikumine enamasti vänt- või nukkmehhanismi abil ning pöörlev liikumine ei anta mitte spindlile (Joonis 8.41), vaid toorikule – toorik saab pärast igat lööki telgsuunalise ettenihke koos samaaegse ümber telje pöördumisega (vt Joonis 8.42). Erinevus on samuti radiaalstantsimisemasinate suuremas võimsuses ning väiksemas löökide arvus minutis – 150...900 rotatsioonstantsimisemasinate 1000...5000 vastu.

Radiaalstantsimist kasutatakse erineva ristlõikega (ruut, ümar, ristkülik jms) lattide tootmisel valuplokkidest ja bluumidest, astmeliste või kooniliste, sh õõnesvõllide, vagunitelgede jt venitatud pikiteljega stantsiste tootmisel, samuti toorikute ettevalmistamiseks vormstantsimiseks pressidel või vasaratel.



**Joonis 8.42.** Radiaalstantsimine nelja radiaalsuunas liikuva pinniga (stantsiga)

Radiaalstantsimise eelised on:

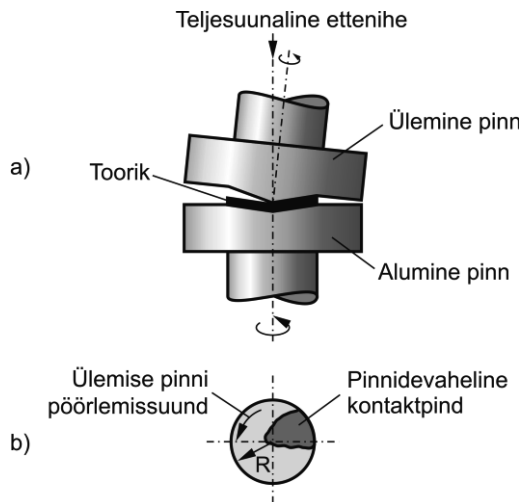
- suur tootlikkus võrreldes analoogsete võllide ja telgede sepistamise või lõiketöötlemisega;
- metallikao puudumine laastuna;
- võllide ja telgede tööiga on pikem kui analoogsetel lõiketöödeldud toodetel;
- suur täpsus (väike töötlusvaru), võrreldes analoogsete sepistatud või vasaratel vormstantsitud toodetega.

### 8.3.10. Orbitaalstantsimine

**Orbitaalstantsimine** (*orbital forging, rotary forging*) on külme- või soesurve-töötlusmeetod kahe ümber oma telje pöörduva pinni vahel, kusjuures ülemise pinni telg on alumise suhtes kergelt (tavaliselt  $1...2^\circ$ ) kaldu (vt Joonis 8.43a). On võimalikud alumise ja ülemise pinni erinevad liikumised. Joonisel 8.43a on üks võimalikke vastastikuseid liikumisi, kus ülemine pinn saab nii pöörleva liikumise kui ka tooriku sümmeetriateljesuunalise ettenihkeliikumise. Alumisele pinnile (stantsile) antakse ringettenihe. Võimalik on samuti skeem, kus alumine pinn on liikumatu ja ülemisele antakse kolm liikumist – pöördliikumine ümber pinni telje ning kaks ettenihkeliikumist: ümber tooriku telje (pöörlev, orbitaalne) ja teljesuunaline. Võimalikud on samuti teised variandid.

Orbitaalstantsimisel toimub tooriku järkjärguline, piiratud mahus deformeerimine (vt Joonis 8.43b). Võrreldes analoogsete toodete vormstantsimisega vasaratel või pressidel, võimaldab see märgatavalt deformatsioonijõude vähendada. Tootlikkus on suhteliselt suur – kuni 300 stantsist tunnis.

Orbitaalstantsimist kasutatakse samasuguste telgsümmeetriliste stantsiste tootmiseks nagu vormstantsimisel vasaratel ja pressidel. Näitena saab tuua kettad, äärikud, hammasrattad jms.



**Joonis 8.43.** Orbitaalstantsimise põhimõte (a) ja pinnidevaheline kontaktpind toorikuga ülaltvaates (b)

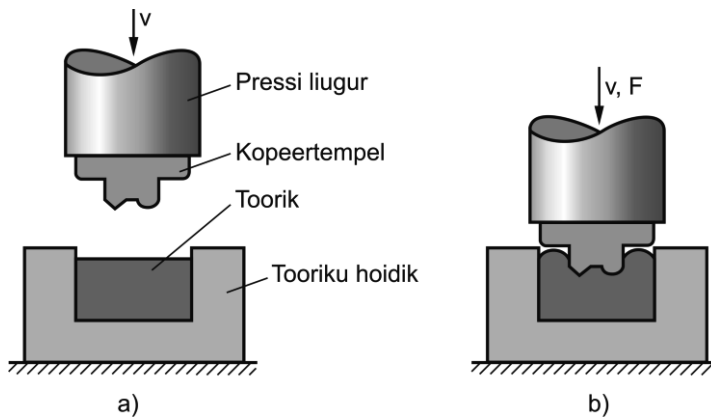
Orbitaalstantsimise eelisteks, võrreldes press-stantsimisega ja vasarstantsimisega, on:

- suhteliselt väikesed jõud järkjärgulise deformeerimise tõttu piiratud mahus, mis võimaldab suhteliselt suuri tooteid töödelda külmalt või soojalt (allpool rekristallisatsioonitemperatuuri);

- stantsiste suur täpsus;
- kraadi puudumine, mille tõttu tootmistsükkel toorikust valmistooteni on suhteliselt lühike;
- tööriistade (pinnide) madal hind vasara- või pressistantsidega võrreldes;
- dünaamiliste koormuste ja sellega kaasneva müra puudumine.

### 8.3.11. Kopeerpressimine

**Kopeerpressimine** (*hubbing*) on survetöötlusmeetod, mis seisneb **kopeertempli** (*hub*) jäljendi jätmises (surumises) toorikusse (vt Joonis 8.44). Kopeerpressimise eeliseks on asjaolu, et üldjuhul on keeruka välispinna töötlemine sisepinna (õõnsuse) töötlemisest lihtsam. Kopeerpressimist kasutatakse tööriistatootmisel, tööriistavagude vormimisel. Tööriistavagused, näiteks stantsivagused saab valmistada samuti kontuurfreesimist (vt p 12.5.1) või elektrokeemilist töötlust (vt p 12.11.2) kasutades.



Joonis 8.44. Kopeerpressimine: a – lähteasend; b – lõppasend

### 8.3.12. Külmvormstantsimine

#### Külmvormstantsimise iseärasused

Vormstantsimise liigitamine **külmvormstantsimiseks** (*cold forging*), **kuumvormstantsimiseks** (*hot forging*) ning **soevormstantsimiseks** (*warm forging*) on otstarbekas, kuna deformatsiooni iseloom ja stantside konstruktsioon on nende meetodite korral tunduvalt erinevad. Arvuliselt suurim hulk tooteid valmistatakse külmvormstantsimisega temperatuuridel allpool rekristallisatsioonitemperatuuri. Külmvormstantsimisel on vajalikud märksa suuremad deformeerimisjõud ja -energia kui kuumvormstantsimisel, mistõttu külmvormstantsimist kasutatakse peamiselt suhteliselt väikeste toodete stantsimisel, näiteks terasstantsid massiga tavaliselt kuni 10 kg, enamasti kuni 1...2 kg. Väikseid stantsiseid, mida iseloomustab suur välispindala ja ruumala suhe (vormstantsid massiga kuni 0,1 kg), ei olegi tavaliselt

võimalik kuumstantsimisega toota tooriku liialt kiire jahtumise tõttu külmemas stantsis. Külmalt on võimalik toota ka suuremaid stantsiseid juhul, kui deformeerimine ei toimu samaaegselt toote kogu mahus, vaid järkjärguliste deformatsioonide summana piiratud mahus (vt näiteks p 8.3.9. Rotatsioonstantsimine, p 8.3.10. Orbitaalstantsimine).

Külmstantsitakse toatemperatuuril piisava plastsusega (deformeeritavusega) metalle: süsinikkonstruksiooniteraseid süsinikusisaldusega kuni 0,5%, legerteraseid, Al-, Cu-, Ti-, Pb-, Zn- ja Sn-sulameid. Deformatsiooniprotsessis toimub toorikumetalli kales-tumine, mistõttu deformatsiooniaste, erinevalt kuumvormstantsimisest, on piiratud. Suurte deformatsiooniasmete vajadusel kasutatakse vahepealset protsessilõõmutust temperatuuridel üle rekristallisatsioonitemperatuuri metalli plastsuse taastamiseks, kõvaduse ja tugevuse vähendamiseks. Peamised külmvormstantsimismeetodid on külmvormpressimine ja külmjämedamine.

Külmvormstantsimise (külmvormpressimine, külmjämedamine jt) eelised on:

- toodete hea pinnakvaliteet ja täpsus;
- materjali kokkuhoid – toote soovitud vorm saadakse laastu eraldamiseta;
- toodete paremad mehaanilised omadused **kalestumise** (*work hardening, strain hardening*) tõttu, mis sageli võimaldab täiendavast tugevdavast termotötlusest loobuda.

Külmvormstantsimise puudused on:

- suured nõuded tööriistamaterjalidele eelkõige märkimisväärsete survete (kuni 2500 N/mm<sup>2</sup> ja enamgi) tõttu deformatsiooniprotsessis;
- suured nõuded tooriku kvaliteedile, mistõttu sageli tuleb toorikut täiendavalt (plastsuse suurendamiseks) termotöödelda, tagada täpsed mõõtmed ja pinnakvaliteet (näiteks tõmbamisega läbi tõmbesilma, tagi eemaldamisega, määrimisega jms).

Külmvormstantsimine on majanduslikult õigustatud reeglina stantsiste hulgitootmisel.

### **Külmvormpressimine**

**Külmvormpressimisel** ehk **väljasuruval külmstantsimisel** (*impact extrusion, cold extrusion*) asetatakse toorik matriitsi õõnde, kust metall pressitakse templiga peenemasse õõnde. Eristatakse **päri-** ehk **otsevormpressimist** (*forward extrusion, direct extrusion*), **vastuvormpressimist** (*backward extrusion, indirect extrusion*) ning **kombineeritud vormpressimist** (*combined backward and forward extrusion, indirect-direct extrusion*). Otsevormpressimisel (Joonis 8.45b) ühtib toorikumetalli voolamise suund templi liikumise suunaga. Vastuvormpressimisel (Joonis 8.45a) on liikumised vastassuunalised. Kombineeritud vormpressimisel voolab osa metalli templi liikumise suunas, osa vastu (vt Joonis 8.45c).

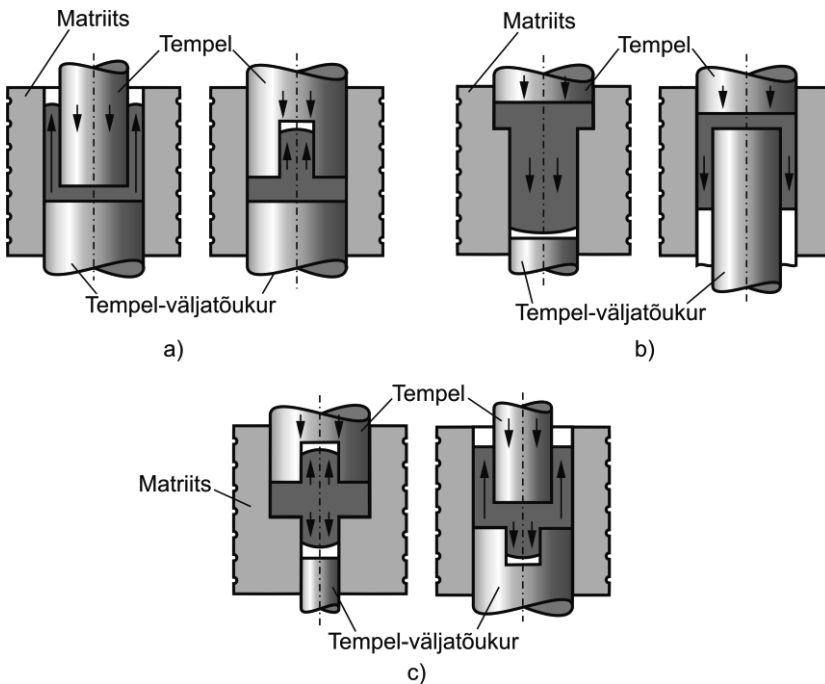
Külmvormpressimise peamine eelis teiste külmvormstantsimisprotsessidega, näiteks külmjämedamisega võrreldes on suurte deformatsiooniastmete saamise võimalus ruumilise survepingeseisundi tõttu deformatsiooniprotsessis (vt samuti p 8.3.2. Ekstrusioon).

**Venitusaste** ehk **venitustegur** (*reduction ratio, extrusion ratio*)  $r$  külmvormpressimisel:

$$r = \frac{S_0}{S_f}, \quad (8.20)$$

kus  $S_0$  ja  $S_f$  on vastavalt tooriku alg- ja lõppristlõige.

Deformeeritavatel Al-sulamitel võib venitustegur ulatuda kuni 40 ja rohkemgi, madalsüsinikterastel kuni 5.



**Joonis 8.45.** Vormpressimise skeemid: a – vastuvormpressimine; b – otse- ehk päri vormpressimine; c – kombineeritud vormpressimine

Külmvormpressimise skeemide kohaselt (Joonis 8.45) saab toota väga erineva vormiga sisemise õõnsusega ja õõnsusteta stantsiseid. Tüüpnäideteks on surugaasi-balloonid, tuubid, anumad ja teised õhukeseseinalised tooted. Sageli kasutatakse külmvormpressimist kombineeritult teiste külmvormstantsimismeetoditega, peamiselt külmjämedamisega.

Külmvormpressimise eriliigiks on **hüdrostaatvormpressimine** (*hydrostatic impact extrusion*). Hüdrostaatvormpressimisel toimub tooriku matriitsiõõnest väljasurumine vedelikusurve abil. Tavalisest vormpressimisest erinevalt ümbritseb vedelik hüdrostaatvormpressimisel toorikut igast küljest analoogselt **hüdrostaatekstrudeerimisele** (*hydrostatic extrusion*) profiilmetalli tootmisel metallurgiatööstuses (vt p. 8.3.2). Hüdrostaatvormpressimise peamised eelised tavalise vormpressimisega võrreldes on:

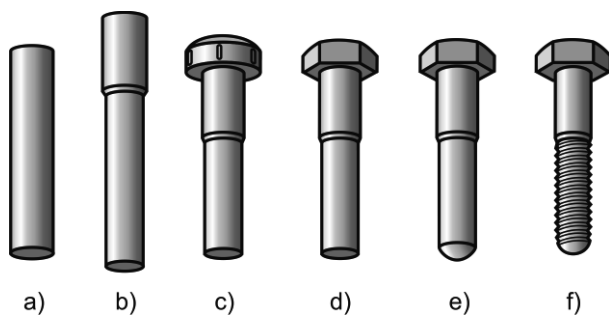
- suuremate deformatsiooniastmete (venitusastmete) ning suhteliselt habraste metallide (Mo, W, Be ja nende sulamid) deformeerimise võimalus;
- väga väike hõõrdumine tooriku ja matriitsi pindade vahel tänu headele määrimistingimustele pressimisvedelikuga, mis tagab pressimissurve ning matriitsi kulumise märgatava vähenemise.

### **Külmjämendamine**

**Külmjämendamist** (*cold heading, cold upset forging*) kasutatakse laialdaselt väikeste toodete – poldide, kruvide, neetide, naelte, mutrite jms hulgitootmisel traat- või varbtoorikust. Külmjämendatakse **külmjämendusmasinal** (*cold header, cold upset forging machine*), mille tööpõhimõte on sarnane horisontaalstantsimismasinatööpõhimõttega (vt p 8.3.7). Selliste masinate tootlikkus olenevalt stantsiste mõõtmetest on 2000...50 000 toodet tunnis. Sellistel masinatel toodetakse lisaks eelnimetatud kinnitusdetailidele ka teisi kohtjämendamise ja/või augustamise teel saadavaid tooteid nagu horisontaalstantsimismasinatelgi (vt Joonis 8.37). Sarnased on samuti tehnoloogilise protsessi projekteerimise põhimõtted, näiteks piirangud tooriku jämendamisele mineva vaba osa pikkuse  $l$  suhtes:  $l < (2...3)d$  (vt p 8.3.7.: Tehnoloogia projekteerimispõhimõtted).

Eeltoodud piirangute ületamiseks (tooriku vaba osa pikkuse suhtes) kasutatakse sageli külmjämendamist külmvormpressimisega kombineeritult. Selle asemel, et poldi pea vormida väikese läbimõõduga toorikust kohtjämendamise stantsi mitmes vaos (materjali kogumiseks), kasutatakse poldi tootmisel näiteks vahepealsete mõõtmetega toorikut (Joonis 8.46a). Esimeseks operatsiooniks on keermestatava peene osa moodustamine vormpressimisega (Joonis 8.46b). Järgneb otsa jämendamine (Joonis 8.46c), kuuskandi vormimine (Joonis 8.46d), otsa ümardamine (Joonis 8.46e) ning **keermerullimine** (*thread rolling, roll threading*) (Joonis 8.46f). Kombineeritud külmvormpressimisel-külmjämendamisel on lisaks tehnilistele eelistele ka majanduslikke eeliseid – suurema läbimõõduga lähtetoorik (traat, varb) on selle tootmiseks vajalike operatsioonide väiksema arvu tõttu odavam.





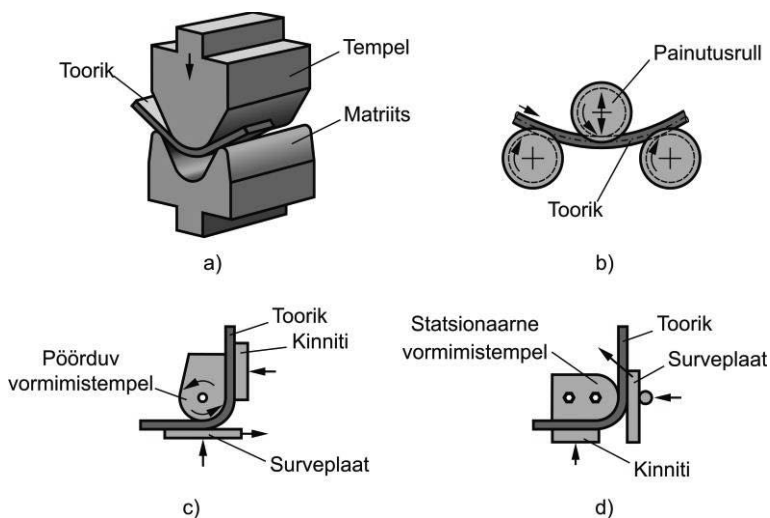
**Joonis 8.46.** Poldi kombineeritud külmvompresimine – külmjäändamine järgneva keermerullimisega: a – toorik; b – keermestatava osa vormpressimine; c – otsa jäändamine; d – kuuskandi vormimine; e – otsa ümardamine; f – keermerullimine

### 8.3.13. Painutamine

**Painutamine** (*bending*) on sageli kasutatav maht- ja samuti lehtvormimismeetod, mida tehakse peamiselt külmal, vähemplastsete metallide puhul ka kuumalt.

Painutamisel kasutatakse seadmeid, mis on sageli analoogsed lehtvormimisel kasutatavatega. Joonisel 8.47 on esitatud kasutatavaimad painutamisskeemid. Lihtsaim on painutamine templi ja matriitsi vahel spetsiaalsetel painutuspressidel või tavalistel mehaanilistel pressidel (Joonis 8.47a). **Rullpainutamist** (*roll bending*) tehakse rullpainutusmasina kolme või enama paralleelse rulliga (Joonis 8.47b). **Tõmbepainutamist** (*draw bending*), samuti **survepainutamist** (*compression bending*) teostatakse spetsiaalsetel pöördpainutusseadmetel. Esimesel juhul tõmmatakse toorik vormimistemplile viimase pöördumisel (Joonis 8.47c). Teisel juhul (survepainutamine) on vormimistempel paigal ning paine saadakse tooriku järkjärgulise surumisega selle pinnale (Joonis 8.47d).

Suure raadiusega painde saamiseks kasutatakse **venituspainutamist** (*stretch bending*). Sisuliselt toimub tooriku tõmbamine vormimistemplile (matriitsile) tooriku-metalli voolepiiri ületavate tõmbepingete tekitamisega, kusjuures jäävad deformatsioonid on väikesed – tavaliselt kuni 2 %. Plastsete deformatsioonide tekitamisega paindekohas vähenevad märgatavalt **elaste järelmõjuga** (*springback*) seotud probleemid – paindenurga suurenemine pärast deformeeriva jõu eemaldamist (vt samuti p 8.4.: Painutamine; Venitusvormimine).

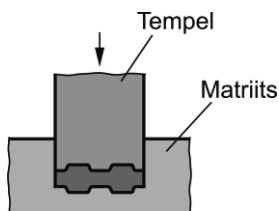


**Joonis 8.47.** Painutamise skeeme: a – templi ja matriitsi vahel painutamine painutuspressidel või tavalistel mehaanilistel pressidel; b – rullipainutusmasinal painutamine kolme rulli vahel; c – tõmbepainutamine pöördpainutusseadmel; d – survepainutamine pöördpainutusseadmel

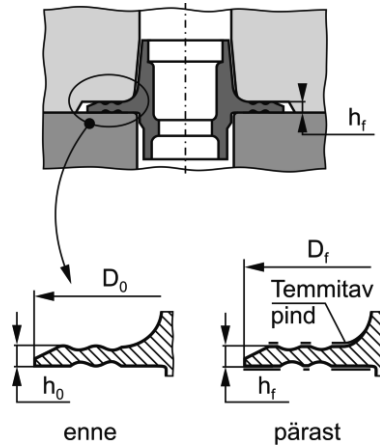
### 8.3.14. Külmmiimistlusmeetodid

Eespool esitatud külmvormimismeetodite kõrval kasutatakse külmdeformeerimist külmmiimistlemisel (temmimist, pindsilumist). **Temmimine** (*sizing*) on **vermimisele** (*coining*) sarnane külmmiimistlusprotsess stantsiste mõõtmete ja kuju täpsuse tagamiseks plastset deformeerimist kasutades. Sageli nimetatakse selliste eesmärkidega protsessi kalibreerimiseks – mõõtmete täpsuse tagamiseks plastse deformatsiooni teel.

Vermimisel kantakse templite pinnareljeef toorikule üle (Joonis 8.48). Selliselt valmistatakse münte, medaleid, ehteid. Sama põhimõtet – toorikule templi ja matriitsi täpsete mõõtmete ja vormi ülekandmist plastseid deformatsioone kaasates – kasutatakse samuti temmimisel. Näitena on Joonisel 8.49 näidatud vormstantsitud toote ääriku temmimine mõõtmete täpsuse ja tasapindsuse saavutamiseks. Paraneb samuti pinnakvaliteet. Tulemus saavutatakse majanduslikult väiksemate kulutustega kui lõiketöötlemisel (näiteks lihvimisega).



Joonis 8.48. Vermimine



**Joonis 8.49.** Äariku külmtemmimine mõõtmete täpsuse ja tasapindsuse tagamiseks

Lisaks toodete täpsuse suurendamisele kasutatakse külmdeformeerimist samuti stantsiste pinnakvaliteedi parandamiseks. Üks töötlemismeetoditest on **pindkalestamine** (*peening*). Pindkalestamise eesmärk on jääksurvepingete tekitamine vastutusrikaste toodete (võllid, kepsud, hammasrataste hambad jne) pinnakihis. Pindmised jääksurvepinged parandavad märgatavalt toodete väsimuspiiri. Pindkalestamist tehakse sagedamini **pindkalestushaaveldamisega** (*shot peening*). Kasutamist leiab samuti pindkalestamine rullide või kuulidega üle rullides.

**Pindsilumise** (*burnishing*) eesmärk on eelkõige pinnakvaliteedi tagamine pinnakonarluste silumisega plastset deformeerimist kasutades. Pindsilumisel rakendatakse enamasti rulle. Vastavat töötlemist nimetatakse **viimistlusrullimiseks** (*roller burnishing*). Viimistlusrullimist kasutatakse nii sise- kui ka välispindade silumiseks.

Viimistlusrullimisega võib kaasneda jääkpingete tekkimine toote küllalt paksus pinnakihis. Sellisel juhul on tegemist pindkalestamise ja -silumise kombinatsiooniga. Temmimise, pindkalestamise ja pindsilumise kombinatsiooniga tagatakse ühe operatsiooniga toote mõõtmete täpsus, jääksurvepinged pinnakihis ning hea pinnakvaliteet. Näitena võib tuua täpsete avade viimistlemist avast suuremate mõõtmetega torni või kuuli läbitõukamise teel.

## 8.4. LEHTVORMIMISPROTSESSID

**Lehtvormimisel** ehk **lehtstantsimisel** (*sheet forming, forming*) kasutatakse toorikuna lehtmaterjali (plekki) või lintmaterjali. Lehtstantsitakse üldjuhul külmal, kusjuures lähtetooriku paksus tavaliselt ei muutu. Kuumlehtstantsimist kasutatakse väikese plast-

susega metallisulamite (näiteks kroomterased, magneesiumisulamid jt) ning suure paksusega (>15...20 mm) pleki stantsimisel.

Tinglikult saab lehtvormimisprotsessid liigitada kahte gruppi:

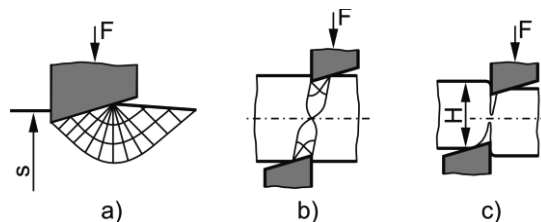
- **eraldusoperatsioonid** (*shearing-type operations*), kus toimub tooriku ühe osa teisest eraldamine etteantud kontuuri mööda;
- **vormimisoperatsioonid** ehk **kujumuuteoperatsioonid** (*forming-type operations*), kus tasapindsele toorikule antakse plastseid deformatsioone kasutades ruumiline vorm.

#### 8.4.1. Lehtvormimise eraldusoperatsioonid

##### Lõikamistingimused

Kõikide eraldusoperatsioonidega (maha-, välja-, ava-, ära- ja sisselõikamine, tükeldamine, sälkamine, puhastamine) kaasneb **lõikamine** (*shearing*), kusjuures metalli purunemine toimub nihkel (vt Joonis 8.50). Purunemisprotsessi saab jaotada kolme etappi:

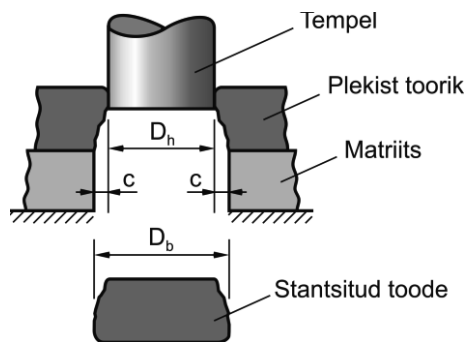
- plastsete deformatsioonide lokaliseerumine lõiketerade või templi ja matriitsi servade ümber (Joonis 8.50a);
- plastsete deformatsioonide levimine materjali paksuses ning lõikeservade tungimine metalli sügavuseni, mis on plastsest (Joonis 8.50b);
- mikropragude tekkimine lõikeservade juures ning pragude levimine, kusjuures metall puruneb lõikekohal nihke tulemusena (Joonis 8.50c); mida plastsem on lõigatav metall, seda väiksem on nihkepurunemise piirkond.



**Joonis 8.50.** Metalli purunemine lõikamisel: a – plastsed deformatsioonid lõiketerade tsoonis; b – plastsete deformatsioonide levimine materjali paksuses; c – mikropragude tekkimine

Kvaliteetse lõikepinna saavutamiseks soovitatakse **pilu** (*clearance*) lõiketerade või templi ja matriitsi vahel  $c \leq 0,1 s$ , kus  $s$  on lõigatava metalli paksus. Vajaliku pilu moodustamiseks saab muuta kas templi või matriitsi läbimõõtu (vt Joonis 8.51).

Väljalõikamisel määrab toote mõõtmed matriitsi läbimõõdu (pilu moodustamiseks vähendatakse templi läbimõõdu), avalõikamisel määrab ava läbimõõdu templi läbimõõdu (pilu moodustamiseks suurendatakse matriitsi läbimõõdu).



**Joonis 8.51.** Matriitsi mõõtmed määravad väljalõigatava toote läbimõõdu  $D_b$ , templi läbimõõdu  $D_h$  määrab stantsitava ava mõõtme

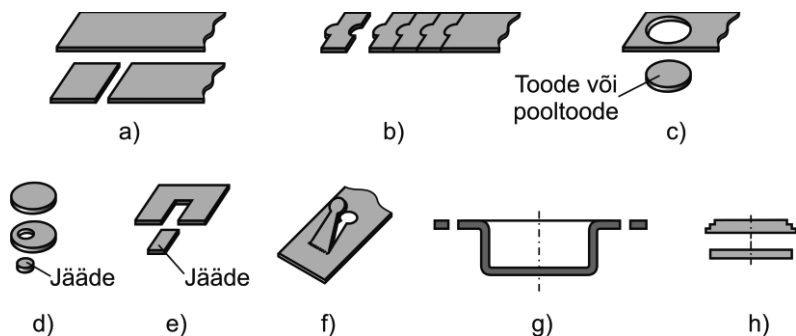
Kvaliteetse lõikepinna saamiseks eraldusoperatsioonidel kasutatakse lisaks optimaalsetele piludele näiteks eraldusoperatsioonil eraldatava osa altpoolt toetamist **stantsitugipadjaga** (*die cushion*) – kummipadi, vedrudel tempel jms. Radikaalseim meetod on lõiketsoonis survepingeseisundi loomine, mida kasutatakse silelõikestantsimisel ehk täppislõikestantsimisel (vt p. 8.4.1.: Väljalõikamine).

## Tükeldamine ja mahalõikamine

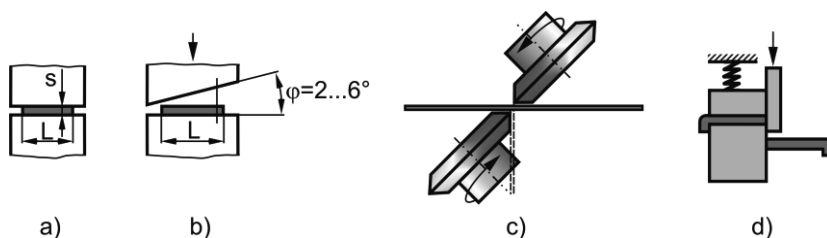
**Tükeldamine** (*shearing*) seisneb tooriku osa täielikus eraldamises lahtist kontuuri mööda sirgterade vahel (Joonis 8.52a). **Mahalõikamine** (*cutoff, parting*) on tooriku jaotamine kaheks või enamaks tooteks (pooltooteks) lahtist kontuuri mööda (Joonis 8.52b). Mahalõikamine võib toimuda **jäägi** (*scrap*) moodustumisega või ilma. Tükeldamise eriliigiks on **pikitükeldamine** (*slitting*) – pleki pikisuunas ribadeks (lintideks) lõikamine.

Tükeldamist teostatakse enamasti kääridega (Joonis 8.53a–c) või mahalõikamisega stantsis (Joonis 8.53d). Eristatakse **sirglõiketeralõikamist** (*straight knife shearing*) ning **ketaskäärlõikamist** (*rotary shearing, circle shearing*). Sirglõiketerakääridest on tuntumad paralleelterakäärid (Joonis 8.53a) ning **giljotiinkäärid** (*guillotine shears, squaring shears*) (Joonis 8.53b). Et paralleelteradega kääridel on lõikamiseks vajalik jõud võrdeline lõikejoone pikkusega, kasutatakse deformatsioonipiirkonna, järelkult samuti lõikejõu vähendamiseks giljotiinkääre, millel ülemine lõiketera moodustab alumise suhtes nurga  $\varphi = 2...6^\circ$ . Paralleelterakääride eeliseks on tooriku väiksem kõverdumine lõikamisprotsessis.

Sirglõiketerakääridega saab lõigata mööda sirgjoont. Nii sirg- kui ka kõverjoonelise lõike saamiseks kasutatakse kaldtelgseid **ketaskääre** (*rotary shears*) (Joonis 8.53c) või **stantse** (*dies*). Laia pleki pikitükeldamiseks kasutatakse pleki pinnaga paralleel- telgseid ketaskääre.



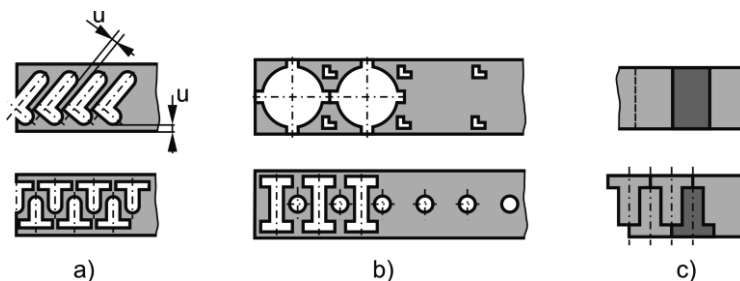
**Joonis 8.52.** Lehtvormimise (lehtstantsimise) eraldusoperatsioonid: a – tükeldamine; b – mahalõikamine; c – väljalõikamine; d – avalõikamine; e – sälkamine; f – sisselõikamine; g – ärälõikamine; h – puhastamine



**Joonis 8.53.** Tükeldamine paralleelterakääridega (a), giljotiinkääridega (b), ketaskääridega (c) ja mahalõikamine stantsis (d)

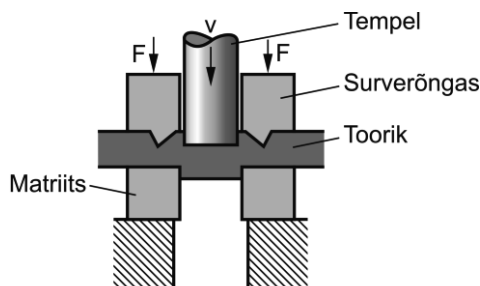
## Väljalõikamine

**Väljalõikamine** (*blanking*) on tooriku osa täielik eraldamine kinnist kontuuri mööda, kusjuures eraldatud osa on toode või pooltoode (Joonis 8.52c). Väljalõikamine toimub **väljalõikeplaani** ehk **lahtilõikeplaani** (*layout*) järgi. Õige väljalõikeplaani s.o väljalõigatavate detailide või pooltoodete asetumine toorikul peab tagama materjali optimaalse kasutamise. Eristatakse jäägita ja jäägiga väljalõikeplaan (Joonis 8.54). Väljalõigatava toote või pooltoote puhtama lõikepinna tagamiseks ja kaardumiste vähendamiseks soovitatakse väljalõikamisel jätta lõikekohtade, samuti lõikekohtade ja tooriku serva vahele vaheribad laiusuga  $u$  (Joonis 8.54a). Tavaliselt  $u = s$ , kus  $s$  on lõigatava materjali paksus. Jäägi vähendamiseks kasutatakse sageli kombineeritud väljalõikeplaani – toorikust lõigatakse välja erineva suurusega tooted (pooltooted) (Joonis 8.54b). **Jäägita väljalõikamist** (*scrapless blanking*) kasutatakse pooltoodete või väikese täpsusega toodete väljalõikamisel (Joonis 8.54c).



**Joonis 8.54.** Väljalõikeplaanide tüüpnäiteid: a – jäägiga, ühe- ja kaherealine; b – jäägiga, kombineeritud; c – jäägita

Väljalõigatud stantsiste servakvaliteet on paljudest asjaoludest, nagu näiteks pilu suurusest templi ja matriitsi vahel, lõigatava metalli omadustest jms. Ruumilise survepinguse tekitamine lõikekoha läheduses loob olukorra, kus purunemisprotsessi kolmas staadium – mikropragude tekkimine ja levimine lükkub edasi. Survepingete teatud tasemel toimub lõikamine vaid plastsete deformatsioonide kaudu ning saadakse kvaliteetne, purunemispinnale iseloomuliku kareduseta lõikepind. Väljalõikamist lõikekohas survepinguse tekitamisega nimetatakse **silelõikestantsimiseks** ehk **täppislõikestantsimiseks** (*fine blanking, fine edge blanking*). Survepinguse tekitamiseks kasutatakse spetsiaalset surveplaati, millel on ümber lõikekoha perimeetri toorikse tungiv terav serv (Joonis 8.55). Silelõikestantsimisel kasutatakse kvaliteetse lõikekoha saavutamiseks vähendatud pilu matriitsi ja templi vahel ( $\sim 0,1s$ ). Kvaliteetne lõikepind on saavutatav pleki paksuseni kuni 5...6 mm.



**Joonis 8.55.** Silelõikestantsimise skeem

## Avalõikamine

**Avalõikamine** (*punching, piercing*) on väljalõikamisele sarnane eraldusoperatsioon – ava moodustamine toorikse suletud kontuuri mööda, kusjuures eraldatud osa on jäägiks (Joonis 8.52d). Avalõikamise eriliik on **perforeerimine** (*perforating, multiple piercing, multiple punching*) – mitme ava lõikamine samasse tootesse (pooltootesse).

## Sälkamine ja sisselõikamine

**Sälkamisel** (*notching*) eraldatakse materjali tooriku servast (Joonis 8.52e). Sälkamine on tavaliselt ettevalmistav operatsioon üleliigse metalli eemaldamiseks enne maha lõikamist, väljalõikamist, sügavtõmbamist jne.

Sälkamise alaliik on **jadasälkamine** (*nibbling*) – osaliselt kattuvate sälkude lõikamine pikkade sisselõigetega saamiseks plekki.

**Sisselõikamine** (*lancing*) toimub mööda avatud kontuuri ilma materjali eraldamiseta (Joonis 8.52f). Sisselõikamist tehakse tavaliselt tooriku mingi osa painutamiseks.

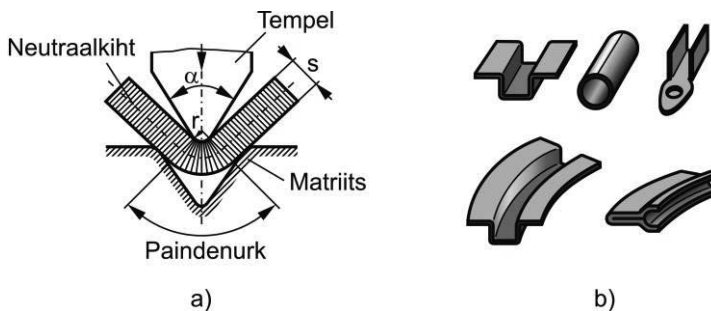
## Äralõikamine ja puhastamine

**Äralõikamine** (*trimming*) on viimistlev operatsioon näiteks töötlusvaru või kraadi eemaldamiseks stantsiselt (Joonis 8.52g). **Puhastamine** (*shaving*) on viimistlusoperatsioon stantsiste servade pinnakvaliteedi parandamiseks ning täpsuse suurendamiseks väga peene laastu eraldamise teel (Joonis 8.52h).

## 8.4.2. Lehtvormimise vormimisoperatsioonid

### Painutamine

**Painutamine** (*bending*) on tooriku osade vaheliste nurkade moodustamine või muutmine (Joonis 8.56). Painutamine paindenurga säilimisega saab võimalikuks plastsete deformatsioonide tõttu paindekohas. Painutamisel surutakse sisemised materjalikihid kokku samal ajal, kui välimised venitatakse välja. Surutud ja tõmmatud materjalikihtide vahel asub neutraalkiht, mille pikkus painutamisel ei muutu. Neutraalkihi asukoht oleneb suhtelisest painderaadiusest  $r/s$ , kus  $r$  on sisemine painderaadius,  $s$  – materjali paksus. Kuna metalli voolepiir on survel alati pisut kõrgem kui tõmbel, siis plastsed deformatsioonid algavad välimistes, tõmbepingete all olevates materjalikihtides. Seetõttu ei asu neutraalne kiht paindekoha keskel, vaid on sisemisele paindekohale seda lähemal, mida väiksem on painderaadius  $r$ .



Joonis 8.56. Painutamine (a) ja painutatud stantsised (b)



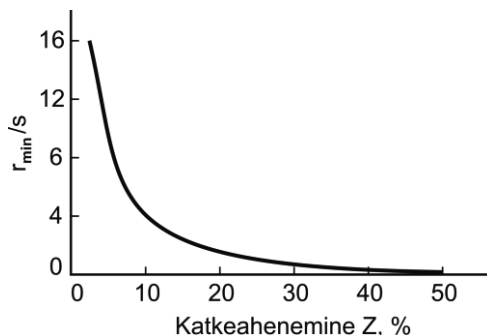
Painutamisel on äärmiselt oluline silmas pidada paindejoone (paindekoha) asetust pleki valtsimissuuna suhtes – pleki valtsimisel võib tekkida anisotroopsete omadustega struktuur (vt p 8.3.1), mistõttu paindejoon (paindekoht) peab asuma valtsimissuunaga risti. Juhul kui materjali on vaja painutada kahe teineteisega ristiasetseva nurga all, peaksid paindejooned olema valtsimissuunaga  $45^\circ$  nurga all. Eelöeldut võetakse arvesse hiljem painutatavate stantsiste väljalõikeplaani tegemisel.

**Minimaalne painderaadius** (*minimum bend radius*)  $r_{min}$  on piiratud pragude tekkevõimalusega paindekoha välimises materjalikihis. Minimaalne painderaadius oleneb materjali omadustest (eriti plastsusest, mis on hinnatav tõmbeteimil määratava katkeahenemisega) ning paindejoone asetusest pleki valtsimissuuna suhtes.

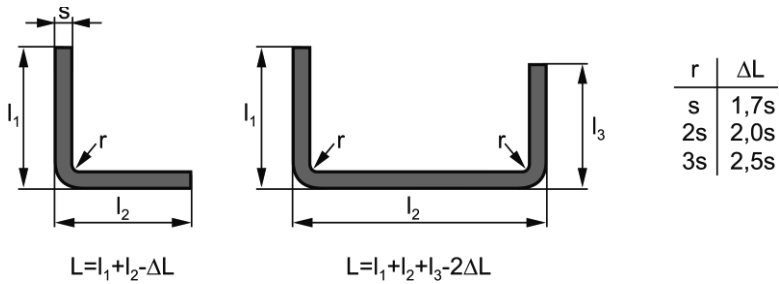
Suhtelise minimaalse painderaadiuse  $r_{min}/s$  sõltuvus katkeahenemisest on näidatud joonisel 8.57. Vaid väga plastsete metallide ja metallisulamite korral (puhas Cu, Al, madalsüsinikteras ( $< 0,1\%$  C)) on võimalikud materjali paksusest väiksemad minimaalsed painderaadiused. Üldjuhul tuleb painderaadius valida alati võimalikult suur.

Kui väljalõikamisel kuulub tehnoloogilise protsessi väljatõötamise juurde väljalõikeplaani tegemine, siis painutamisel tuleb arvutada tooriku pikkus. Tooriku pikkuse  $L$  arvutamisel tuleb arvesse võtta seda, et tingituna materjali kohalikust pikenemisest paindekohas ei asetse neutraalkiht (neutraaljoon) paindekoha keskel. Pikenemine on tooriku paksuse  $s$  ja painderaadiuse  $r$  funktsioon. Joonisel 8.58 on esitatud üks võimalikest tooriku pikkuse  $L$  arvutusmeetoditest.

Kolmas oluline painutatud stantsise konstruktsiooni puudutav tegur on ärapainutatava osa minimaalne õlg. Õla pikkus ei tohiks olla väiksem kui  $1,5s+r$ . Neljandaks tuleb painutustehnoloogia projekteerimisel arvesse võtta **elastset järelmõju** (*springback*) – paindenurga mõningast suurenemist pärast deformeerimist. Suure raadiusega jäävpainde saamiseks kasutatakse **venituspainutamist** (*stretch bending*) – painutamist tooriku metalli voolepiiri ületavate tõmbepingete kasutamisega (vt samuti p 8.3.13. Painutamine).



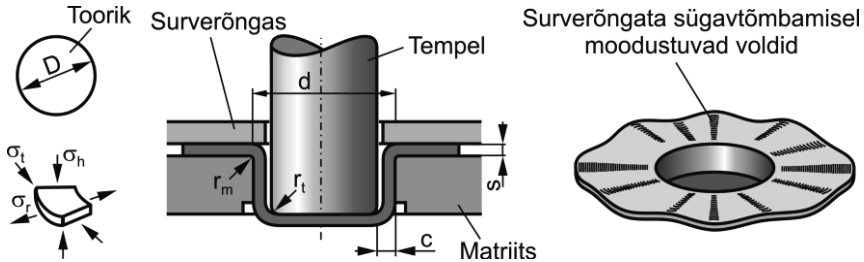
**Joonis 8.57.** Suhtelise minimaalse painderaadiuse  $r_{min}/s$  sõltuvus metalli plastsusest (katkeahenemisest  $Z$ )



Joonis 8.58. Tooriku pikkuse arvutamine painutamisel

### Sügavtõmbamine

**Sügavtõmbamine** (*deep drawing, shell drawing*) on lehtvormimise vormimisoperatsioon, kus tasapindne toorik deformeeritakse (tõmmatakse) ruumiliseks õõneskehaks (Joonis 8.59). Sügavtõmbamiseks vajalik toorik saadakse väljalõikamisega.



Joonis 8.59. Sügavtõmbamine

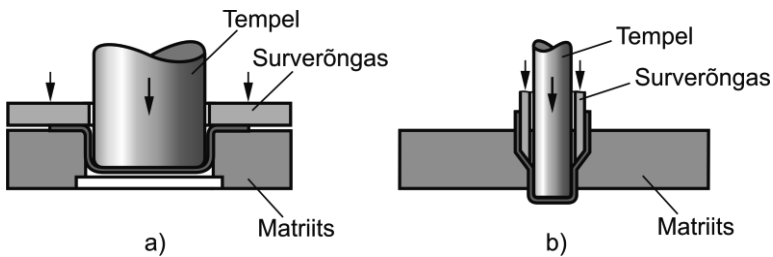
Sügavtõmbamisel toimub tooriku läbimõõduga  $D$  templi abil matriitsi avasse tõmbamine. Siit ka termini „tõmbamine“ – selle all mõistetakse metalltooriku etteantud profiiliga avast läbitõmbamist (võrdle 8.3.3. Tõmbamine) – kasutamine selle lehtstantsimisoperatsiooni nimetuses. Erisurve vähendamiseks templi ja matriitsi servadel ning seega tooriku purunemise võimaluse vähendamiseks (reegline õõneskeha põhja seinaks üleminekukohas) tehakse nad ümardusraadiustega vastavalt  $r_t$  ja  $r_m$ . Templi ja matriitsi vaheline pilu  $c = 1,1 \dots 1,2 s$ . Hõõrdetakistuse vähendamiseks kasutatakse lisaks matriitsi ja templi servade ümardamisele ka määrimist.

Sügavtõmbamisel tekib äärikus, mis ei ole veel matriitsiavasse tõmmatud, ruumiline pingeseisund (vt Joonis 8.59). Radiaalsed tõmbepinged  $\sigma_r$  tõmbavad äärikut matriitsi avasse. Radiaalpingeid ületavad tangentsiaalsed survepinged  $\sigma_t$  vähendavad tooriku perimeetrit ning sunnivad materjali ümber jaotuma. Eelnimetatud pinged saavutavad ekstreemaalsed väärtused ääriku sisenemiskohal matriitsiavasse. Selline pingeseisund sunnib materjali, kui templi ja matriitsi vaheline pilu on ligikaudselt võrdne tooriku paksusega, ümber jaotuma peamiselt toote (õõneskeha) pikkuse suunas.

Juhul kui tõmmatakse õhukeseseinalist toorikut, võivad tangentsiaalsuunalised survepinged  $\sigma_t$  viia ääriku püsivuse kaotuseni – äärikul tekivad voldid. Voltide tekkimise vältimiseks kasutatakse **surverõngast** (*pressure ring, blankholder*), mis surub äärikut kindla jõuga matriitsi pinna vastu. Tõmbamise ja samaaegselt surve tagamiseks tooriku servadele kasutatakse enamasti **kaksiktoimega** ehk **kaheliugurilisi presse** (*double action press, double slide press*) (vt p. 8.4.3. Stantsid ja lehtstantsimis-seadmed). Surverõngast kasutatakse õhukeseseinalistest toorikutest suure sügavusega õõneskehade tõmbamisel, kui  $s/D < 0,015$ .

Toorikut saab purunemiseta süvendada ainult teatud **sügavtõmbegurini** (*drawing ratio*)  $r = D/d < 1,8 \dots 2,0$ . Kui venitusaste ületab eeltoodud väärtust, ei ole võimalik õõneskeha ühe tõmbeastmega saada – tuleb kasutada mitme tõmbeastmega **õõneskeha sügavtõmbamist** (*redrawing*) (Joonis 8.60). Külmal sügavtõmbamisel metall karestub, mistõttu korduval sügavtõmbamisel võetakse  $r < 1,2 \dots 1,4$ . Tavaliselt pärast 2...3 tõmbeastet tehakse protsessilõõmutamine metalli plastuse taastamiseks.

Sügavtõmbamisel on materjali deformeeritavus oluliselt lähtematerjali (pleki) anisotroopiast. Kui plekki on valtsitud vaid ühes suunas, on valtsimissuunaline deformeeritavus suurem kui valtsimissuunaga risti olev, mistõttu sügavtõmmatud õõneskeha servad on ebahürtlased. Ebahürtlaste servade eemaldamiseks on vajalik täiendav stantsimisoperatsioon – äralõikamine (vt Joonis 8.52g). Äralõikeoperatsioonita saab läbi, kasutades silindriliste õõneskehade tõmbamisel deformeeritavuse anisotroopiat arvesse võtvat väikese ovaalsusega lähtetoorikut. Veelgi parem lähendus on spetsiaalse, sügavtõmbamiseks ettenähtud isotroopsete (igas suunas ühesuguste) omadustega pleki kasutamine.

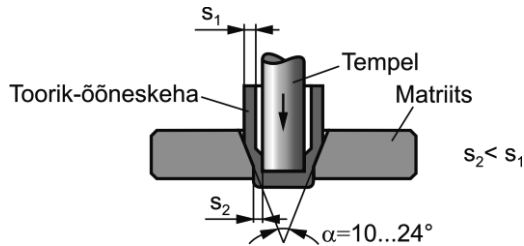


**Joonis 8.60.** Kahe tõmbeastmega sügavtõmbamine: a – esimene tõmbeaste (sügavtõmbamine); b – teine tõmbeaste (õõneskeha sügavtõmbamine)

### Õhendsügavtõmbamine

**Õhendsügavtõmbamine** (*ironing*) erineb tavalisest õhenduseta sügavtõmbamisest selle poolest, et templi ja matriitsi vaheline pilu on tooriku seinapaksusest väiksem (Joonis 8.61). Toorikuna kasutatakse tavaliselt kas sügavtõmbamisel või külmpressimisel saadud õõneskeha. Õhendsügavtõmbamisel jäävad õõneskeha

siseläbimõõt, samuti põhja paksus ligikaudselt võrdseteks lähtetooriku vastavate mõõtmetega. Vajadusel, näiteks õhukeseseinalise toru saamisel, eraldatakse pärast õhendsügavtõmbamist põhi seinast.



**Joonis 8.61.** Õhendsügavtõmbamine

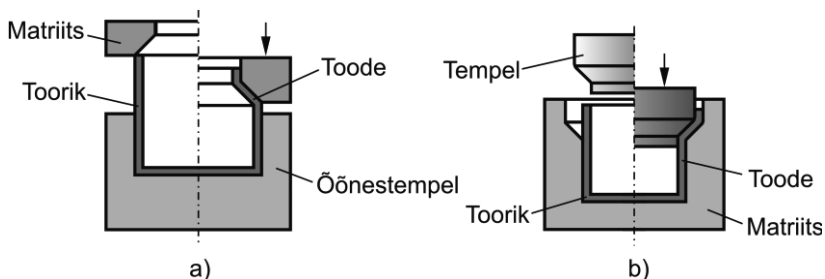
Õhendsügavtõmbamist kasutatakse suurendatud tugevusomadustega ja õhukese seinapaksusega õnестoodete saamisel. Sellise tehnoloogiaga toodetakse üldjuhul tooteid, mille pikkuse (kõrguse) ja läbimõõdu suhe on suur: õhukeseseinalised torud ja anumad, näiteks joogipurgid, tulekustutite korpused, gaasiballoonid, sisepõlemismootorite hülsid jms.

Õhendsügavtõmmatakse tavaliselt külmalt, kuid vahel ka kuumalt koos järgneva külmkalibreerimisega mõõtmete täpsuse tagamiseks.

### Ahendamine ja avardamine

**Ahendamine** (*necking, contracting*) on operatsioon õnестkeha kohalikuks ahendamiseks. Ahendatakse tavaliselt õnестkeha ots (vt Joonis 8.62a). Ühe operatsiooniga, vältimaks voltide tekkimist suurtest tangentsiaalpingetest tingituna, ahendatakse esialgsest läbimõõdust mitte üle 10...20 %.

**Avardamine** (*expanding, bulging*) on ahendamisele vastupidise eesmärgiga operatsioon õnестkeha läbimõõdu suurendamiseks kas kohalikul (näiteks otsast) või kogu pikkuses. Otsast on võimalik avardada templiga (Joonis 8.62b) või elastset keskkonda, näiteks kummit või vedelikusurvet kasutades. Avardamisel, samuti ahendamisel kasutatakse ka plahvatus-, elektrohüdraulilist ja elektromagnetilist stantsimist (vt p 8.4.6. Kõrgenergeetiline impulsslehtvormimine). Kuna avardamisel õnестkeha seinapaksus väheneb, ei ole soovitatav ka plastsetest metallisulamitest õnестkehi avardada ühe operatsiooniga enam kui 30 % õnестkeha esialgsest läbimõõdust. Suuremate deformatsiooniastmete korral tuleks kasutada protsessilõõmutamist (vahelõõmutamist) metalli plastsuse taastamiseks.



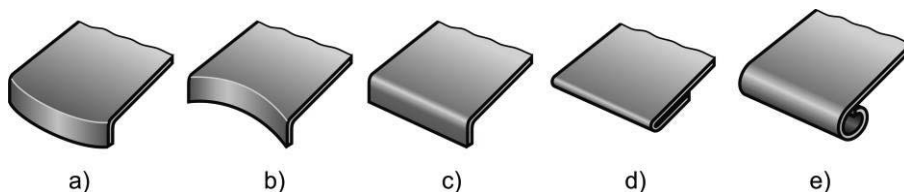
Joonis 8.62. Õonestooriku ahendamine (a) ja avardamine (b)

## Ääristamine

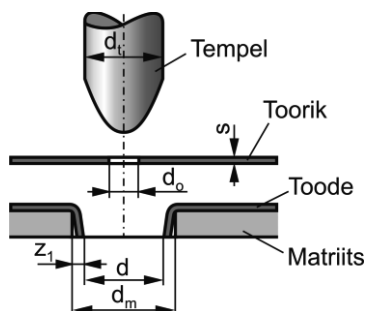
**Ääristamine** (*flanging, flange bending*) seisneb äärise moodustamises tooriku sise- või väliskontuuri mööda. Eristatakse:

- **kumerääristamist** ehk **välisääristamist** (*shrink flanging*) – kumera ääriku painutamist (Joonis 8.63a);
- **nõgusääristamist** ehk **siseääristamist** (*stretch flanging*) – nõgusa ääriku painutamist (Joonis 8.63b);
- **sirgääristamist** (*straight flanging*) – sirge serva äärikuks painutanust (Joonis 8.63c); sirgääristamise eriliikideks on **lapikääristamine** (*hemming*) –ääristamine serva kahekorra pööramisega (Joonis 8.63d) ja **ümarääristamine** (*curling*) –ääristamine serva rullikeeramisega (Joonis 8.63e);
- **avaääristamist** (*hole flanging, eyeletting*) – ava serva ääristamine, sisuliselt siseääristamise eriliik (Joonis 8.64).

Avaääristamist kasutatakse tavaliselt ava keermestamise eeloperatsiooniks pleki kohaliku paksenduse tekitamiseks, näiteks elektrijuhtmete kinnituselementides, autoehituses ja mujal. Avaääristamiseks tuleb toorikusse moodustada eelava läbimõõduga  $d_0$  (Joonis 8.64). Pragude tekkimise vältimiseks ei ole soovitatav, et ääristamisel saadud ava läbimõõt  $d$  ületaks eelava läbimõõdu enam kui 40...50 %.



Joonis 8.63. Ääristamise liigitamine: a – kumer- ehk välisääristamine; b – nõgus- ehk siseääristamine; c – sirgääristamine; d – lapikääristamine (ääristamine serva kahekorra pööramisega); e – ümarääristamine (ääristamine serva rullikeeramisega)



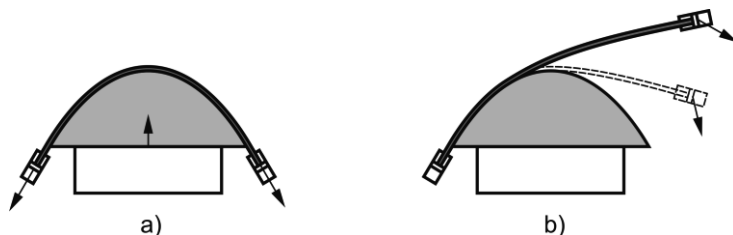
Joonis 8.64. Ava ääristamine

### Venitusvormimine

**Venitusvormimine** ehk **venitusprofileerimine** (*stretch forming*) seisneb tõmbe- pingetega koormatud tooriku vormimises (profileerimises) **vormimistemplil** ehk **vormimispakul** (*form block*). See vormimismeetod on alguse saanud lennukitööstusest, kus on vaja vormida suuri kereelemente suhteliselt väikesel arvil. Venitusvormimiseks on lihtsamal juhul vaja vaid vormimistemplit (võib olla valmistatud odavatest materjalidest – puidust, odavatest metallisulamitest, plastist) ning tõmberakist.

Venitusvormimisega tekitatakse toorikus voolepiiri ületavad tõmbe pinged, mis kutsuvad esile jäävaid tõmbedeformatsioone 1...4 %. Väike plastne deformatsioon on piisav selleks, et tooriku poolt vormimistemplil omandatud vorm oleks jääv. Toorikuna kasutatakse lisaks plekile sageli teisi valtsitud või ekstrudeeritud profile.

Venitusvormimisel kasutatakse erinevaid vormimistempli ja tõmberakise vastastikuse liikumise skeeme. Tuntuimad on **venitustõmbamine** (*stretch draw forming, stretch drawing*) ja **venitusmähkimine** (*stretch-wrap forming, stretch wrapping*). Venitustõmbamisel kasutatakse erinevaid skeeme, sealhulgas liikuva vormimistempli meetodit – templi liikumisega tõmbe all toorikusse (Joonis 8.65a). Venitustõmbamise alaliigiks on venituspainutamine (vt p 8.3.13. Painutamine).



Joonis 8.65. Venitusvormimine: a – venitustõmbamine; b – venitusmähkimine

Venitusmähkimisel on tooriku üks ots kinnitatud vormimistemplile ning teisest otsast „mähitakse“ pingestatud toorik järk-järgult (hõõrdumiseta templi pinnal) vormimistemplile (Joonis 8.65b).

Venitusvormimist kasutatakse lennunduses terastest, Ni-, Al- ja Ti-sulamitest suurte paneelide vormimiseks. Kasutatakse samuti autoehituses kerepaneelide, näiteks katuse vormimiseks. Venitusvormimise eelised teiste lehtvormimismeetoditega võrreldes on järgmised:

- kuni 70 % võrra väiksemad jõud, võrreldes lehtvormimisega pressidel;
- voltide tekkimise väike tõenäosus tõmbepingete prevaleerimise tõttu;
- väga väike elastne järelmõju ja väikesed jääkpinged;
- tehnoloogilise seadmeistiku (tõmbeseadmed) ja rakiste (vormimistempli) suhteline odavus;
- asendamatu väikese sügavusega suuregabariidiliste õõneskehade tootmisel;
- paindlikkus – lihtsalt ja kiirelt saab üle minna ühe toote vormimiselt teisele.

Meetodi puudused on:

- suhteliselt väike tootlikkus – tehnoloogia on hulgivalmistamiseks vähesobiv;
- on raskendatud metallisulamite vormimine, mille voole- ja tõmbetugevus on ligilähedased;
- võimatus saada teravaid nurki.

## Reljeefstantsimine

**Reljeefstantsimine** (*embossing*) seisneb reljeefi sissevajutamises plekki ilma tooriku paksuse olulise muutumiseta (vt Joonis 8.66). Meetod on pingeolekult sügavtõmbamisega sarnane, kuid deformatsiooniastmed on tunduvalt väiksemad. Tooriku lähtepaksuse säilimine on reljeefstantsimise põhierinevus **vermimisest** (*coining*) (vt p 8.3.14), mille eesmärgiks on samuti pinnareljeefi moodustamine. Reljeefstantsimine vajab seetõttu vermimisega võrreldes märksa väiksemaid pindsurveid. Kui reljeefstantsimise eesmärgiks on lehtstantsisessa jäikusribide moodustamine, nimetatakse protsessi **ribitamiseks** (*ribbing*).

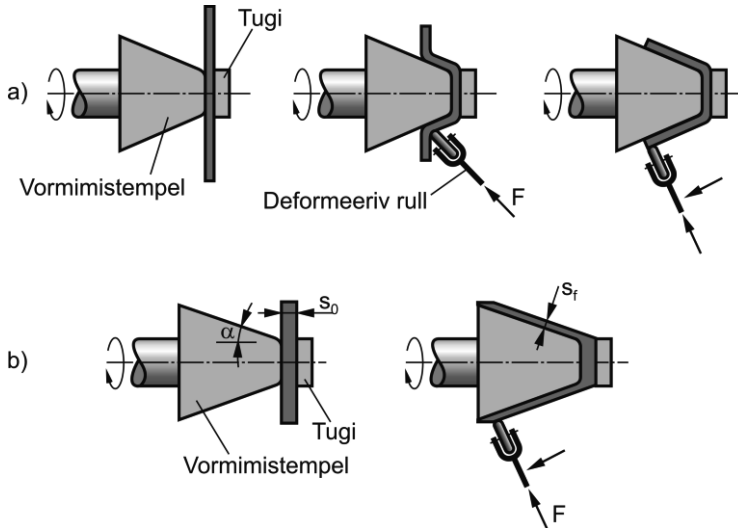


Joonis 8.66. Reljeefstantsimine

## Rotatsioonvormimine

**Rotatsioonvormimisega** ehk **rotatsioonitõmbamisega** (*spinning*) saadakse tasapindsest toorikust telgsümmeetriline õõneskeha vormimise teel pöörleva vormimis-

templi järgi (vt Joonis 8.67a). Rotatsioonvormimine võimaldab samuti õõneskehade ahendamist, avardamist, ääristamist. Rotatsioonvormida saab ka tavalistel treipinkidel.



**Joonis 8.67.** Rotatsioonvormimine: a – mitteõhendrotatsioonvormimine; b – õhendrotatsioonvormimine

Eristatakse **mitteõhendrotatsioonvormimist** (*conventional spinning*) ja õhendrotatsioonvormimist. Esimesel juhul vormitakse tingimustes, kus tooriku seinapaksus ei muutu (Joonis 8.67a). **Õhendrotatsioonvormimisel** (*shear spinning, shear forming, flow turning*) toimub tasapindsest toorikust või õõneskehast õõnsa toote saamine tooriku seinapaksuse õhenedes (Joonis 8.67b). Kooniliste õõneskehade vormimiseks on toorik tavaliselt tasapinnaline (Joonis 8.67a). Silindriliste õõneskehade õhendusvormimisel on lähtetoorikuks näiteks eelnevalt sügavtõmmatud või õhenduseta profileeritud õõneskeha.

Rotatsioonvormimise eelised lehtvormimise teiste vormimisoperatsioonidega võrreldes on:

- seadmete ja rakiste suhteline odavus – vormimistempeel võib olla valmistatud odavatest metallisulamitest, puidust, plastist;
- paindlikkus – lihtsalt ja kiirelt saab üle minna ühe toote valmistamiselt teisele;
- väga suurte õõneskehade (läbimõõduga kuni 4...5 m) vormimisvõimalus.

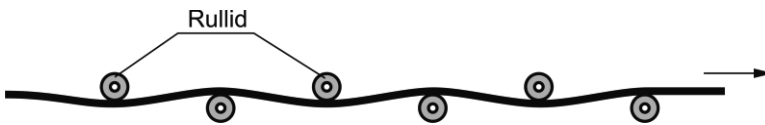
Peamiseks puuduseks on väiksem tootlikkus press-stantsimisega võrreldes.



## Sirgestamine

**Sirgestamine** ehk **õgvendamine** (*flattening; leveling; straightening*) on operatsioon lehtmetsali ettevalmistamisel stantsimiseks. Sirgestamisel kasutatakse peamiselt kahte tehnoloogiat:

- **rullsirgestamine** (*roller leveling, roll straightening*), kus sirgestamine toimub toorikut rullide vahel paljukordselt edasi-tagasi painutades, millega jäävdeformatsioonid (kõverdumised) kõrvalduvad (Joonis 8.68);
- **venitussirgestamine** (*stretcher leveling, stretcher straightening*), kus kõverdumised kõrvalduvad toorikut üle metalli voolepiiri pingestades.



Joonis 8.68. Rullsirgestamine

### 8.4.3. Stantsid ja lehtstantsimisseadmed

#### Stantsid

Lehtvormimise tähtsaim tehnoloogiline rakis on **stants** (*die, stamping die*). Stantse saab liigitada stantsimisoperatsiooni või tööpõhimõtte järgi.

Stantse eristatakse iseloomuliku stantsimisoperatsiooni järgi järgmiselt:

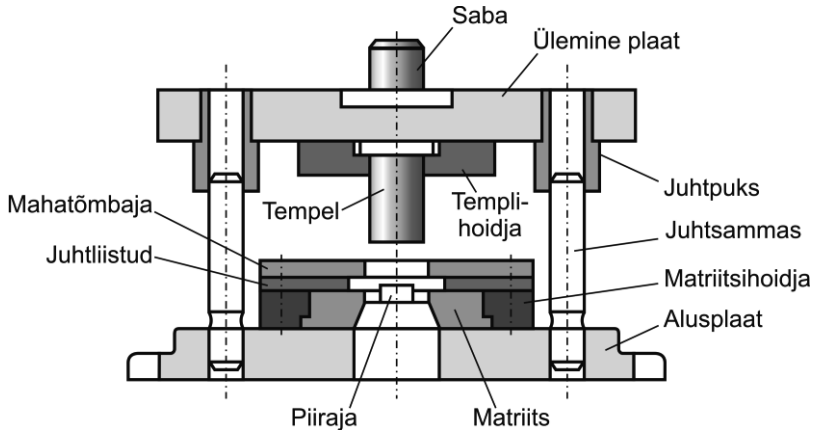
- **avalõikestants** (*piercing die, punching die*),
- **väljalõikestants** (*blanking die*),
- **paindestants** (*bending die*),
- **sügavtõmbestants** (*drawing die, deep drawing die*) jt.

Tööpõhimõtte järgi liigitatakse stantse kolme gruppi:

- **lihttoimestants** ehk **lihtstants** (*simple die, single-operation die*) on stants ühe või mitme samanimelise operatsiooni tegemiseks tooriku etteande ühe sammu piires stantsi liikuva osa ühe käigu jooksul;
- **jadatoimestants** ehk **järjestiktoimestants** (*progressive die*) on stants mitme operatsiooni tegemiseks tooriku etteande mitme sammu ja stantsi liikuva osa vastava arvu käikude jooksul;
- **koostoimestants** ehk **liittoimestants** (*compound die*) on stants erinimeliste operatsioonide tegemiseks tooriku etteande ühe sammu piires stantsi liikuva osa ühe käigu jooksul.

Joonisel 8.69 on esitatud lihttoimega väljalõikestants ketaste väljalõikamiseks. Stantsi **alusplaat** (*die shoe, lower shoe*) kinnitatakse poltidega pressi lauale. Alusplaadi külge kinnitatakse **matriitsihoidja** (*die retainer, die holder*) abil **matriits** (*die*). Stantsi **ülemine plaat** (*upper shoe*) kinnitatakse saba abil pressi liuguri külge.

Ülemise plaadi külge kinnitatakse **templihoidja** (*punch holder, punch retainer*) abil **tempel** (*punch*). Templi ja matriitsi telgede koaksiaalsus tagatakse **juhtsamaste** (*guide pins*) ja **juhtpuksidega** (*guide bushings, guide pin bushings*). Toorik – metalliriba – antakse ette mööda matriitsi pinda ja juhitakse servadelt kahe juhtliistu abil.



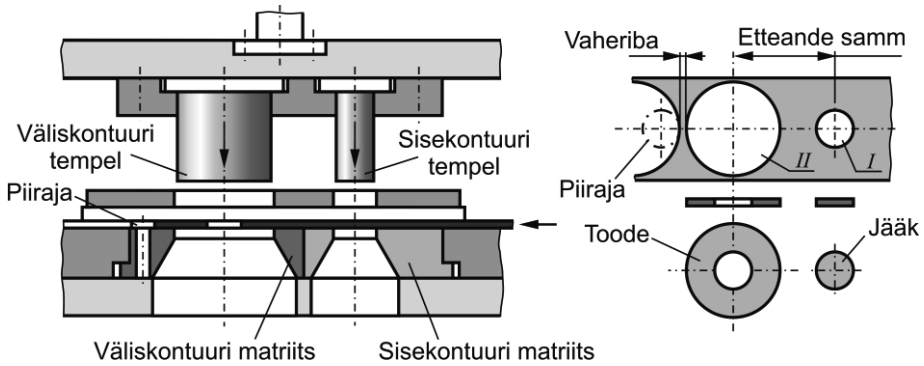
**Joonis 8.69.** Lihttoimega väljalõikestants

Pressi liuguri tagasiliikumisel tagab **mahatõmbaja** (*stopper, stripper*) mahatõmmatava riba eemaldamise templilt. Kinnijäämise põhjuseks on elastse survedeformatsiooni kadumine, s.t väljalõikamisel moodustunud augu läbimõõdu vähenemine pärast väljalõigatud ketta eraldamist. Riba nihutatakse edasi **piirajani** (*stop, stop pin*). Pärast järjekordset väljalõikamist tõstetakse riba üles ja nihutatakse niipalju edasi, et väljalõikekohtade vaheline vaheriba (vt p 8.4.1.: Väljalõikamine) ületaks piiraja. Seejärel lastakse riba alla ning lukatakse piirajani järjekordseks väljalõikamiseks.

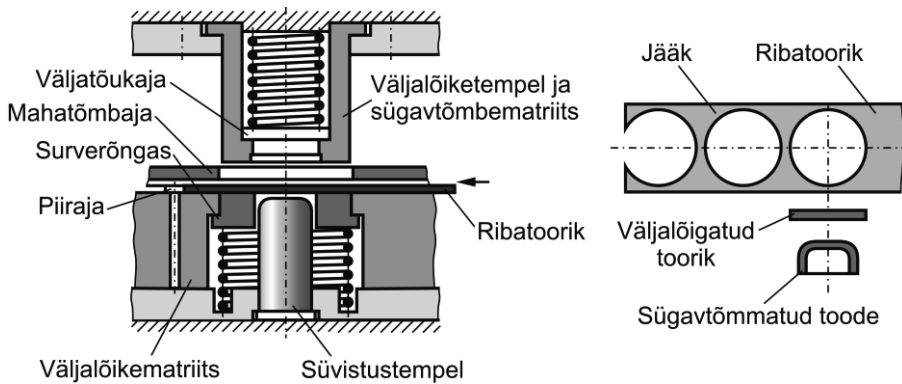
Stantsi alumine ja ülemine plaat koos juhtsamaste ja juhtpuksidega moodustavad **stantsiploki** (*die set*). Ühte ja sama stantsiplokki saab kasutada erinevate toodete stantsimiseks stantsi ülejäänud osi (matriits, tempel jt) välja vahetades.

Järjestik- ehk jadatoimestantsis sooritatakse erinevad operatsioonid eri positsioonides tooriku ettenihke suunas nii, et järgnevateks operatsioonideks nihutatakse riba sammu võrra edasi (Joonis 8.70). Esimeses positsioonis toimub sisekontuuri (ava) ning teises positsioonis väliskontuuri väljalõikamine, mille tulemusena saame tooteks seibi.

Liittoime- ehk koostoimestantsis (Joonis 8.71) sooritatakse kõik operatsioonid ühes positsioonis ilma toorikut nihutamata. Saadud stantsiste täpsus on sellisel juhul suurem, kuid operatsioonide liitmine ühes positsioonis on piiratud, võrreldes nende hulgaga järjestiktoimestantsis. Koostoimestants on jadatoimestantsist konstruktsioonilt keerukam.



Joonis 8.70. Järjestiktoimega väljalõikestants



Joonis 8.71. Koostoimestants väljalõikamiseks ja sügavtõmbamiseks

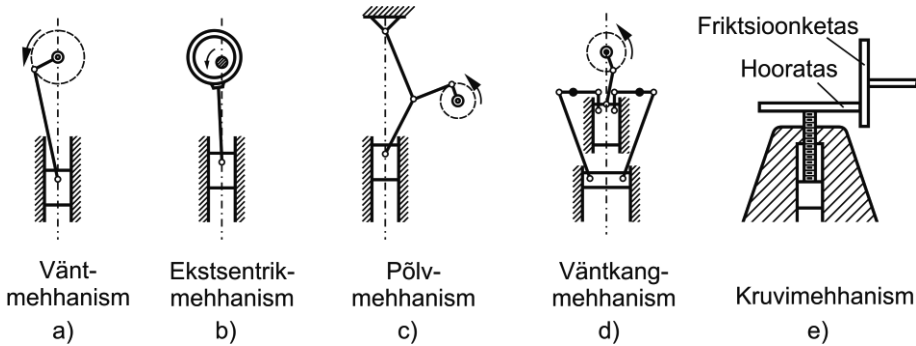
### Lehtstantsimismed

Lehtstantsimisel (lehtvormimisel) kasutatakse peamiselt **mehaanilisi presse** (*mechanical presses*). Kasutatakse samuti **hüdropresse** (*hydraulic presses*) ning **vasarlehtvormimisel** (*drop hammer forming*) stantsimisvasaraid.

Mehaaniliste presside käiguulatus on piiratud, kuid samal ajal täpselt kontrollitav (reguleeritav). Nad paistavad silma käikude suure arvu poolest – kasutatakse mehaanilisi presse jõudlusega 100...2000 käiku minutis. Hüdropressid võimaldavad saada suuremaid survejõude ja käiguulatust, kuid käikude arv minutis on neil tunduvalt väiksem.

Pressi valikul tuleks arvesse võtta pressi poolt arendatavat jõudu ning töökäigu ulatust. Mehaaniliste presside puhul oleneb käiguulatus, samuti liuguri liikumiskiirus töökäigu erinevatel etappidel liugurit kätava mehhanismi tüübist. Tabelis 8.3 on

toodud põhilised mehaaniliste ja hüdrauliliste presside liigid. Joonis 8.72 selgitab mehaaniliste presside olulisemate ajammehhanismide liike.



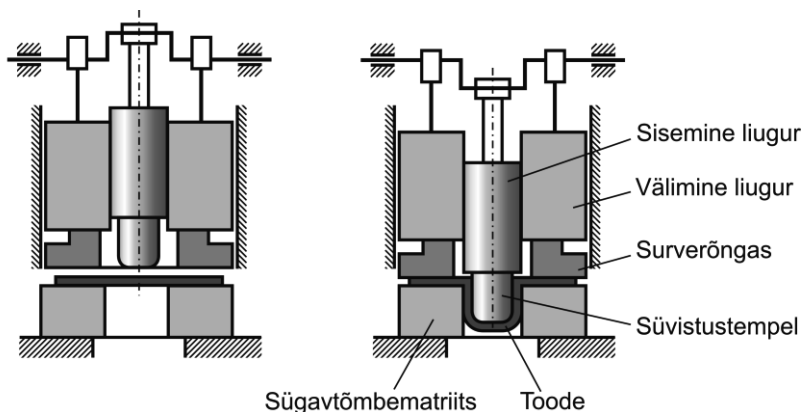
Joonis 8.72. Mehaaniliste presside ajammehhanismid

Tabel 8.3. Mehaaniliste ja hüdrauliliste presside liigitus

Mehaanilised pressid	Hüdropressid
Väntpress – lihttoimega (üheliuguriline) – kaksiktoimega (kaheliuguriline)	Ühe liuguriga hüdropress Mitme liuguriga hüdropress
Ekstsentrilpress	
Väntkangpress	
Põlvpress (põlvliigendpress)	
Kruvipress	

Lehtvormimisel kasutatavad mehaanilised pressid on tööpõhimõttelt vormstantsimispressidega sarnased (vt p 8.3.6. Press-stantsimine), kuid on ka erinevusi. Kasutatavaim on **väntpress** (*crank press, crank-driven press*) – väntmehhanismiga press. Tehnoloogilise tunnuse järgi liigitatakse sellised pressid: **üheliuguriline press** ehk **lihttoimepress** (*single-slide press, single-action press*), **kaheliuguriline press** ehk **kaksiktoimepress** (*double-slide press, double-action press*) ja **mitmeliuguriline press** (*multiple-slide press*). Üheliugurilisi presse kasutatakse peamiselt välja- ja avalõikamisel, harvem sügavtõmbamisel.

Sügavtõmmatakse üldjuhul kaheliugurilistel pressidel (Joonis 8.73). Sellise pressi sisemine liugur saab liikumise väntmehhanismilt, välimine kas vänt-, ekstsentril-, nukk- või põlvmechhanismilt (Joonis 8.72). Algul välisliugur möödub sisemisest ja surub tooriku serva vastu matriitsi. Sisemisele liugurile kinnitatud templi süvenemisel toorikuse on välimine liikumatu. Sügavtõmbamise lõpul tõusevad liugurid üles.



**Joonis 8.73.** Kaheliugurilise vântpressi tööpõhimõte

**Ekstsentrilpressi** (*eccentric press, eccentric-shaft press*) – nukk- või ekstsentrilmehhanismiga (Joonis 8.72b) pressi kasutatakse juhul, kui on vajalik pressi liuguri väike käiguulatatus. Nukk- või ekstsentrilmehhanismi kasutamine teeb võimalikuks **viivituse** (*dwell*) liuguri käigu kõige alumises asendis. Seda viivitust kasutatakse sügavtõmbamisel surverõnga allasendis hoidmiseks ajal, mil pressi pealiugur viib sügavtõmbamisoperatsiooni lõpuni (vt Joonis 8.73).

**Põlvpress** ehk **põlvliigendpress** (*toggle press, toggle-lever press*) – põlvmeehhanismiga press (joon 8.72c) – arendab suurimat jõudu ja kiirust liuguri alumises asendis. Selliseid presse kasutatakse nende kinemaatika iseärasuste tõttu peamiselt verimisel, temmimisel ja reljeefstantsimisel.

**Väntkangpress** (*knuckle press, knuckle-joint press*) – väntkangmehhanismiga press (Joonis 8.72d) leiab kasutamist peamiselt sügavtõmbamisel. Väntkangmehhanism on eriti sobiv tooriku servade kinnihoidmiseks templi süvistamisel toorikusse.

Presse liigitatakse ka pressi keretüübi järgi, kuna see määrab sageli stantsitavate toorikute võimalikud gabariidid. Keretüübi järgi eristatakse **ühesambalisi** ehk **C-kerega presse** (*gap-frame presses, C-frame presses, open-frame presses*), mis on kolmest küljest avatud. Ühesambalisi presse liigitatakse omakorda **kallutatavateks pressideks** (*inclined presses*) ja **mittekallutatavateks pressideks** (*non-inclined presses*). Raami tüübi järgi eristatakse veel **portaali-** ehk **kahesambalisi presse** (*straight-side presses*), mis on kahest küljest avatud. Enamik hüdropresse on kere tüübilt portaalpressid.

Presside eritüüpideks stantsiste hulgi valmistamisel on revolverpress, konveierpress ja mitmeliuguriline press. **Revolverpress** (*turret press*) on tööprotsessis kiirelt vahetatavate matriitside ja templitega press. Tööpõhimõttelt sarnaneb revolvertreipinkidega (vt p 12.3.4. Muud treipingid).

**Konveierpress** (*transfer press*) on ühe pikkliuguriga mitmepositsiooniline press. Konveierpress on varustatud seadmetega üksiktooriku etteandmiseks positsioonist positsiooni. Selliste presside tootlikkus on väga suur – kuni 1500 toodet tunnis. **Mitmeliugurpressil** (*multislide press, multiple-slide press*) on konveierpressist erinevalt iga operatsiooni jaoks eraldi liugur. Tooriku töötlemine toimub jada-toimestantsi põhimõttel. Mitmeliugurpressid on laialt levinud elektroonika- ja elektrotehnikatööstuses keeruliste voolujuhtide väljastantsimisel, žiletiterade tootmisel jms.

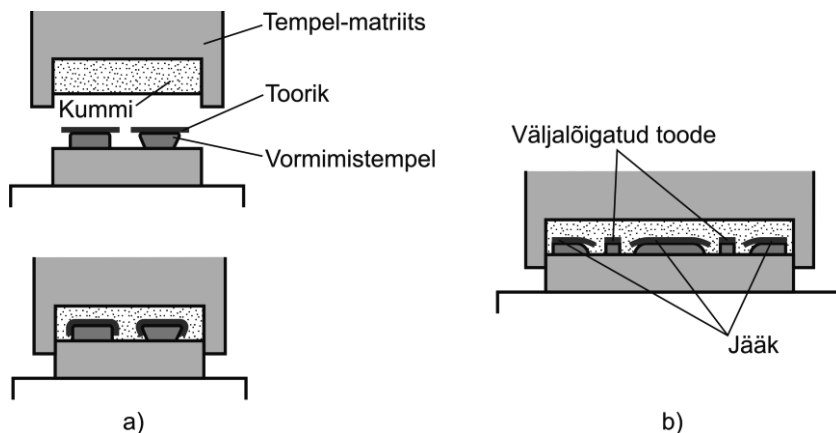
Eeltoodud universaalsetele seadmetele lisaks kasutatakse lehtvormimisel ning ka mahtvormimisel samuti eripainutusseadmeid – **painutuspressi** (*bending brake; press brake*), **horisontaalpainutuspressi** (*bulldozer, horisontal bending machine*), **rullpainutusmasinat** (*roll bending machine*) ja **pöördpainutusmasinat** (*rotary bender, rotary bending machine*) (vt p 8.3.13, Joonis 8.47).

#### 8.4.4. Lehtvormimine elastse keskkonna ja vedelikuga

Lehtvormimiseks ja eraldusoperatsioonide tegemiseks saab kasutada ka elastset keskkonda – kummi või polüuretaani ja vedelikke. Esimesel juhul nimetatakse lehtvormimist **kumplehtvormimiseks** (*rubber-pad forming, Guerin process, rubber-die forming*), teisel juhul **vedeliklehtvormimiseks** (*hydroforming, fluid forming, flexforming*).

Kumplehtvormimisel kasutatakse ära asjaolu, et surve all käitub kummi nagu vedelik, toimides toorikule kõikidest suundadest võrdse (isostaatilise) survega. Kumplehtvormimisel täidab matriitsi osa paks (200...250 mm) kummikiht. Templid on valmistatud metallist või odavamatest materjalidest (kummi, plast).

Joonisel 8.74a on näidatud kummiga painutamine. Kuid võimalik on samuti kummiga väikese sügavusega õõneskehade sügavtõmbamine ja kummiga avardamine.



**Joonis 8.74.** Kumplehtvormimine: a – painutamine; b – väljalõikamine

Kummiga väljalõikamise põhimõte on näidatud Joonisel 8.74b. Väljalõigatava toote all asub teravaservaline metalltempel. Järelejäävat tooriku osa toetab kumera servaga tempel, võimaldades jääkmaterjali löikekohalt eemale paindumist. On võimalik välja lõigata toodet terasplekist paksusega kuni 1 mm, alumiiniumplekist paksusega kuni 2 mm.

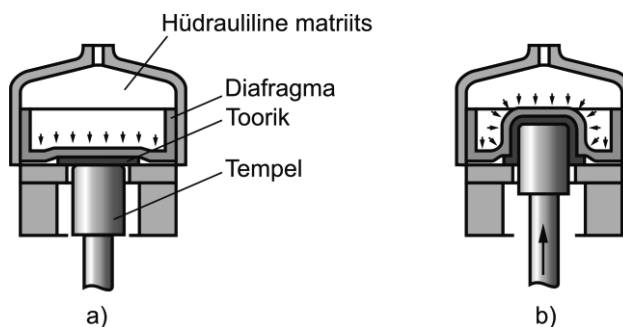
Kummelehtvormimisel on võrreldes vormimisega (stantsimisega) tavalises metallstantsis järgmised olulised eelised:

- vajadus valmistada metallist vaid stantsi üks osa – tempel;
- võimalus kasutada ühte (kummist, polüuretaanist) matriitsi erinevate toodete vormimiseks;
- puudub vajadus stantsipoolte täpseks juhtimiseks teineteise suhtes. Kõik eelnimetatud kolm eelist vähendavad märgatavalt stantsi maksumust.

Puudused on

- stantsi elastset materjalist elemendi väike püsivus;
- oht sügavtõmmatava tooriku pindadel ebapiisavast survest tingitud voltide tekkimiseks;
- suhteliselt väike tootlikkus, mistõttu leiab kasutamist vaid üksikute prototüüpide valmistamisel ja väikeseeriatootmises.

Vedeliklehtvormimisel on kummipadi asendatud kummist diafragma, mille taga on surve all (120...150 MPa) vedelik (Joonis 8.75). Templi sisenemisel hüdraulilise matriitsi õõnde deformeerub toorik diafragmataguse vedeliku survest tingituna. Vedeliklehtvormimine võimaldab suurte survete tõttu vältida volte sügavtõmbamisel. Samuti on võimalikud suuremad sügavtõmbeastmed kui tavapärasel sügavtõmbamisel (vt p 8.4.2.: Sügavtõmbamine).



**Joonis 8.75.** Vedeliklehtvormimine: a – lähteolukord (surve all vedelik diafragma taga); b – templi sisenemine matriitsiõõnde

#### 8.4.5. Üliplastne lehtvormimine

**Üliplastsus** (*superplasticity*) on peenteralise metallisulamite võime kõrgetel temperatuuridel (üle rekristallisatsioonitemperatuuri) ja etteantud deformatsioonikiirustel deformeeruda (pikeneda) ilma purunemiseta 1000...3000 % (vt p 8.2.7. Üliplastsus). Üliplastses olekus vormimise eelis on võimalus saada ühe operatsiooniga suuri deformatsiooniastmeid suhteliselt madalaid surveid rakendades. Väikse voolepinge tõttu üliplastse oleku temperatuuridel kasutatakse **üliplastset lehtvormimist** (*superplastic sheet forming, SPF-process*) plastide tehnoloogiast tuntud termovormimis-meetodeid: pneumovormimist, vaakumvormimist ja mehaanilist termovormimist (vt p 14.2.1.: Lehtmaterjalist toodete vormimine).

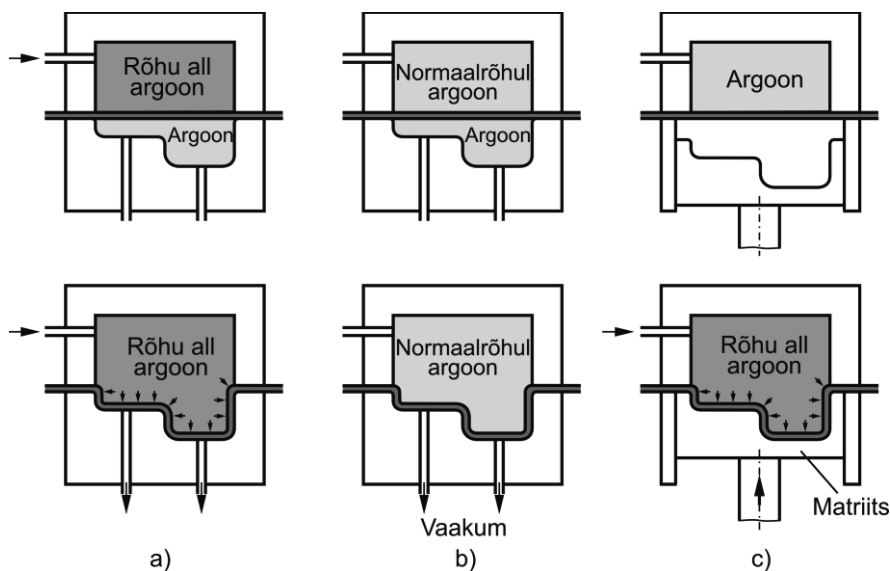
Samuti kasutatakse metallide survetöötlemisele omaseid vormimismeetodeid – sügavtõmbamist, ekstrudeerimist, vormstantsimist.

**Pneumovormimisel** (*blow forming, pressure thermoforming*) kasutatakse üliplastse oleku temperatuurideni ettekuumutatud tooriku deformeerimiseks surugaasi. Kergoksüdeerivate **üliplastsete sulamite** (*superplastic alloys*), näiteks Ti- ja Al-sulamid, deformeerimiseks kasutatakse argooni (Joonis 8.76a). **Vaakumvormimine** (*vacuum forming, vacuum thermoforming*) toimub samuti mõne kaitsegaasi keskkonnas – toorik deformeerub gaasi normaalarõhul vaakumi moodustumisega matriitsiõõnes (Joonis 8.76b). **Mehaanilisel termovormimisel** (*mechanical thermoforming*) kasutatakse tooriku deformeerimiseks matriitsi (või templi) liikumist ning samuti vajadusel täiendavat gaasirõhku (Joonis 8.76c).

Lehtstantsimist üliplastses olekus on võimalik kasutada suhteliselt piiratud hulga üliplastsete metallisulamite korral, näiteks mõned Ti- ja Al-sulamid ning samuti terased. Kasutatakse peamiselt suuregabariidiliste toodete vormimiseks.

Üliplastses olekus lehtvormimise peamine puudus on suhteliselt väike tootlikkus väikestest deformatsioonikiirustest tingituna üliplastse oleku säilitamiseks – ühe toote vormimise aeg võib ulatuda 10 minutini ja vahel enamgi. Vähest tootlikkust võimaldab sageli kompenseerida täiendavatest liitetehnoloogiatega (keevitamine, neetimine) loobumine suuregabariidiliste toodete valmistamisel. Mõnikord kasutatakse ära üliplastses olekus stantsimise iseärasus – vormimine rekristallisatsioonitemperatuuri ületavatel temperatuuridel – ning kasutatakse ühildatud protsessi **üliplastset lehtvormimist-difusioonliitmist** (*superplastic forming/diffusion bonding process, SPF/DB-process*).





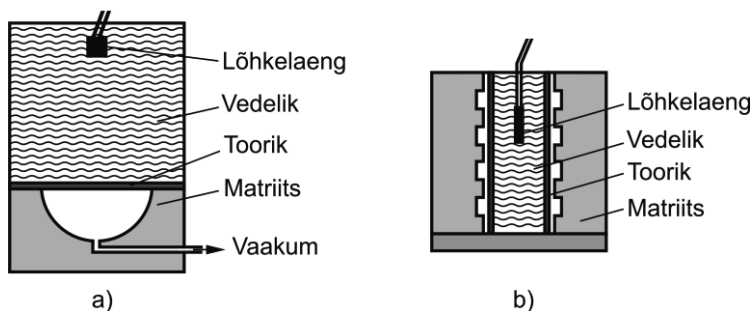
**Joonis 8.76.** Üliplastne lehtvormimine: a – pneumovormimine; b – vaakumvormimine; c – mehaaniline termovormimine

#### 8.4.6. Kõrgenergeetiline impulsslehtvormimine

Lehtvormimisprotsesse, mis toimuvad ülisuurtel kiirustel, suurt deformatsioonienergiat kasutades, nimetatakse **impulsslehtvormimiseks** (*high-energy-rate forming, HERF-processing, high-speed forming*). See tehnoloogia on eriti otstarbekas suuregabariidiliste toodete, samuti selliste sulamite stantsimisel, mille lehtstantsimine pressidel on problemaatiline. Impulsslehtvormimise eeliseks on samuti elastse järelmõju puudumine. Suured deformatsioonienergiad ja -kiirused saavutatakse kolmel põhimõttel:

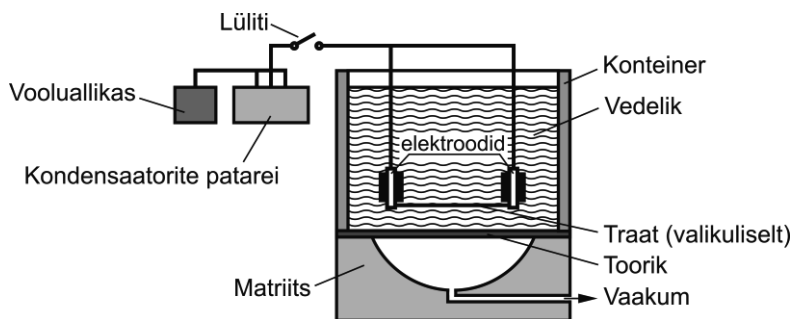
- veealuse plahvusega (plahvatuslehtvormimine);
- veealuse elektrilahendusega (elektrohüdrolehtvormimine);
- võimsa elektromagnetväljaga (elektromagnetlehtvormimine).

**Plahvatuslehtvormimisel** (*explosive forming, explosive-charge forming*) stantsitakse tavaliselt veega täidetud mahutis (basseinis). Tasapindne toorik asetatakse matriitsile (odavatest materjalidest – puidust, polümeerkomposiidist jms) basseini põhja vähemalt kahemeetrise veekihi alla. Toorikualune ruum vakumeeritakse (Joonis 8.77a). Sütikuga laeng riputatakse tooriku kohale sobivale kaugusele sellest. Plahvatus tekitab lööklaine, suure rõhu ja tooriku deformatsiooni. Analoogsel põhimõttel on võimalik vormida ka torukujulisi toorikuid (Joonis 8.77b).



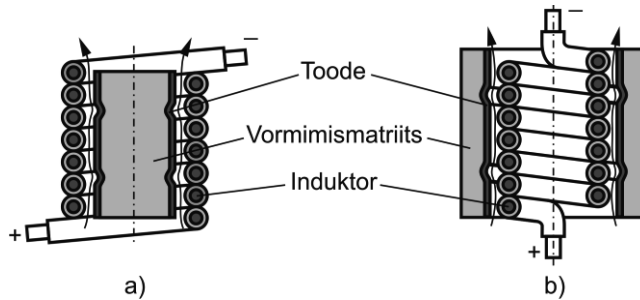
**Joonis 8.77.** Plahvatuslehtvormimine tasapindse (a) ja torukujulise (b) tooriku korral

**Elektrohüdrolehtvormimine** (*electrohydraulic forming, electric-discharge forming, spark-discharge forming*) põhimõte on plahvatuslehtvormimisega analoogne – lööklaine tekitamine vedelikus (Joonis 8.78). Lööklaine tekitajaks on lühiajaline elektrilahendus elektroodide vahel vedelikus. Võimas elektrilahendus vedelikus on oma tagajärgedelt plahvatuslega sarnane. Elektroodide vahemik on täidetud vedelikuga ja lühistatud elektrilahendusel hetkeliselt aurustuva traadiga. Lisaks tasapindse tooriku vormimisele kasutatakse elektrohüdrolehtvormimist sageli nii väikeste kui ka suurte (läbimõdduga üle meetri) torukujuliste toorikute avardamiseks plahvatuslehtvormimisele analoogse skeemi järgi (Joonis 8.77b). Elektrohüdrolehtvormimine on plahvatuslehtvormimisega võrreldes paremini juhitud, ohutum ning ei vaja nii suurt vedelikumahutit (basseini).



**Joonis 8.78.** Elektrohüdrolehtvormimine tasapindsest toorikust

**Elektromagnetlehtvormimine** (*electromagnetic forming, EMF-process, magnetic-pulse forming*) erineb eelmisest selle poolest, et elektrienergia muundub mehaaniliseks induktori abil, kust juhitakse läbi kondensaatorpatareist tulev elektrivoolu impulss (Joonis 8.79). Induktori ümber tekib hetkeline, suure võimsusega magnetväli, mis indutseerib voolu juhtivas toorikus pöörisvoolud. Pöörisvoolude poolt tekitatava magnetvälja ja induktori magnetvälja koostoime tekitab toorikut deformeeriva jõu. Meetod leiab kasutamist peamiselt torukujuliste toorikute vormimisel (Joonis 8.79a ja b).



Joonis 8.79. Elektromagnetlehtvormimine: a – ahendamine; b – avardamine

## 8.5. KORDAMISKÜSIMUSED

### Plastse deformeerimise füüsikalised alused

1. Mille poolest erinevad survetöötuse maht- ja lehtvormimine?
2. Millised on survetöötuse pidevmeetodid (pidevad survetöötusprotsessid)?
3. Millised on survetöötuse tükktoodete tootmise meetodid (perioodilised survetöötusprotsessid, mittepidevtöötus)?
4. Milline on deformatsiooniastme ja deformatsioonikiiruse (moonekiiruse) mõju voolepingele?
5. Millised on külmsurvetöötuse eelised kuumsurvetöötusega võrreldes?
6. Milline on isotermsurvetöötuse erisus tavapärase kuumsurvetöötusega võrreldes?
7. Milline on kuumsurvetöötuse ja külmsurvetöötuse erinevus (mis neid eristab)?
8. Miks on hõõrdumine survetöötusel enamasti ebasoovitav ja seda püütakse määrimisega vähendada?
9. Mille poolest erinevad tavapärase kontakthõõrdumine ja haardehõõrdumine?
10. Millistes survetöötustingimustes moodustub metalli kiudstruktuur, nn kiudtekstuur?
11. Millistes survetöötustingimustes moodustub metalli ribastruktuur, nn ribatekstuur?
12. Millistel tingimustel võib avalduda üliplastsus?

### Mahtvormimisprotsessid

1. Loetlege neli olulisemat mahtvormimisprotsessi.
2. Millist valtsimis skeemi kasutatakse sordimetalli, millist õmbluseta torude tootmisel?
3. Mille poolest eristuvad valtsimisel kasutatavad toorikud – buumid ja slääbid?
4. Millised on olulisemad valtspinkidel toodetavaid tooted (toorikud)?

5. Kuidas mõjutab hõõrdumine (hõõrdetegur) valtsimistingimusi ja maksimaalset ühe läbimiga saavutatavat pigistust (kokkusurutust)?
6. Milliseid eeliseid annab kvartovaltspinkide kasutamine duovaltspinkide ees?
7. Milline on pindtugevdamise (dresseerimise) protsess ja selle rakendus?
8. Mida kujutavad endast paindprofiilid ja kuidas neid toodetakse?
9. Mille poolest on hamba- ja keermerullimine eelistatumad hamba- ja keerme-  
lõikamisest metallilõikepinkidel?
10. Millised on ekstrudeerimise eelised ja puudused valtsimisega võrreldes?
11. Mis eristab päri- ja vastuekstrudeerimist?
12. Millist profiilmetalli (ekstruusiseid) saab toota ekstrudeerimist kasutades?
13. Millised on tõmbamise teel saadud profiilide eelised valtsitud või ekstrudeeritud  
profiilmetalliga võrreldes?
14. Mis on kalibreerimine ja miks on tõmbamine selleks sobiv tehnoloogia?
15. Tükktoodete tootmisel kasutatakse nii sepistamist kui vormstantsimist. Millised  
on sepistamise peamised kasutusvaldkonnad?
16. Loetlege sepistamise kolm olulisemat operatsiooni.
17. Milline mahtvormimismeetod on sobivaim suure massiga (üle 500 kg) tükk-  
toodete tootmiseks?
18. Millised on peamised sepistamisel ja vormstantsimisel kasutatavad seadmed?
19. Mis otstarvet täidab vasarastantside (stantsimisvasaratel kasutatavate stantside)  
kraadisoon?
20. Mis otstarbel kasutatakse äralõike- ehk kraadilõikestantse?
21. Milline on stantsi ettevalmistusvagude ülesanne?
22. Mis otstarbel jäetakse stantstoodetele ehk stantsistele stantsikalle ja teatud pinda-  
del töötlusvaru?
23. Mille poolest erinevad konstruktiivselt vasaratel kasutatavad vasarastantsid ja  
pressidel kasutatavad pressistantsid?
24. Mis on isotermvormstantsimise erisus tavapärase kuumvormstantsimisega võrrel-  
des?
25. Millised on horisontaalstantsimise eelised võrreldes vasarstantsimisega ja press-  
stantsimisega?
26. Milleks kasutatakse sepavaltse?
27. Millise vormiga tooteid toodetakse rotatsioonstantsimist kasutades?
28. Millised on külmvormstantsimise peamised iseärasused (eelised, puudused)  
kuumvormstantsimisega võrreldes?
29. Millisel otstarbel kasutatakse külmsurvetöötlusmeetodeid – temmimist ja  
pindkalestamist?

## Lehtvormimisprotsessid

1. Mille poolest eristuvad lehtvormimise eraldusoperatsioonid ja vormimis- ehk kujumuuteoperatsioonid?
2. Nimetage lehtvormimise (lehtstantsimise) neli olulisemat eraldusoperatsiooni.
3. Nimetake lehtvormimise (lehtstantsimise) neli olulisemat vormimisoperatsiooni.
4. Kvaliteetne lõikepind tagatakse templi ja matriitsi vahelise piluga. Kumb (tempel või matriits) määrab toote mõõtmed väljalõikamisel?
5. Millised on silelõikestantsimise ehk täppislõikestantsimise iseärasused tavapärase väljalõikamisega võrreldes?
6. Mille poolest erinevad avalõikamine ja sälkamine?
7. Milles avaldub elastne järelmõju lehtstantsiste painutamisel?
8. Milles seisneb venituspainutamise – suure pöörderaadiusega painutamise – põhimõte?
9. Millise vormiga tooteid saadakse sügavtõmbamisega?
10. Mille poolest eristub õhendsügavtõmbamine tavapärasest sügavtõmbamisest?
11. Mis otstarbel kasutatakse lehtvormimisoperatsioone ahendamise ja avardamise?
12. Mis otstarbel kasutatakse lehtvormimisel (näiteks sügavtõmbamisel) ja mahtvormimisel vahepealset protsessilõõmutust?
13. Milles seisneb lehtstantsimise vormimisoperatsioon – reljeefstantsimine?
14. Milles seisneb venitusvormimine ehk venitusprofileerimise põhimõte ja mis on selle otstarve?
15. Millised on rotatsioonvormimise iseärasused ja eelised lehtvormimise teiste vormimisoperatsioonidega võrreldes?
16. Lehtvormimiseks (lehtstantsimiseks) kasutatakse liht-, jada- ja koostoimestantse. Milline on jada- ja koostoimestantside tööpõhimõtte erinevus?
17. Millised on lehtvormimisel (lehtstantsimisel) laialdaselt kasutatavate mehaaniliste presside iseärasused hüdropressidega võrreldes?
18. Mis on kummilehtvormimise erisused ja rakendusvaldkonnad tavapärase lehtvormimisega võrreldes?
19. Mis on üliplastne lehtvormimine ja millistel tingimustel seda on võimalik kasutada?
20. Milliseid kõrgenergeetilisi (suuri deformatsioonenergiaid ja -kiirusi rakendavaid) lehtvormimisprotsesse tunnete?

## 9. VALUTEHNOLOOGIA

9.1. OLEMUS JA PROTSESSIDE LIIGITAMINE	9.4.2. Madalsurvevalu, vaakumvalu, väljavalamisvalu
9.2. VEDELMETALLI VORMITAVUS	9.4.3. Survevalu
9.2.1. Sulatus ja valamine	9.4.4. Tsentrifugaalvalu
9.2.2. Tardumine ja kahanemine	9.4.5. Pidev- ja poolpidevvalu
9.2.3. Tardumis- ja kahanemisdefektid	9.4.6. Pressvalu ja pooltardolekvalu
9.2.4. Valandite projekteerimise põhimõtted	9.4.7. Metallvormide püsivus
9.3. VALU KORDKASUTUSVORMIDESSE	9.5. VALUSULAMID JA VALANDITE TOOTMINE
9.3.1. Liivvormvalu	9.5.1. Valusulamite sulatus
9.3.2. Koorikvalu	9.5.2. Malmvalandid
9.3.3. Täppisvalu	9.5.3. Terasvalandid
9.3.4. Kipsvormvalu ja keraamikavormvalu	9.5.4. Alumiiniumvalandid
9.4. VALU KORDUVKASUTUSVORMIDESSE	9.5.5. Vaskvalandid
9.4.1. Kokillvalu	9.5.6. Titaanvalandid
	9.5.7. Valandi defektoskoopia
	9.6. KORDAMISKÜSIMUSED

### 9.1. OLEMUS JA PROTSESSIDE LIIGITAMINE

Vedelmetalli vormi valamisega valmistatakse keeruka kujuga tooteid **valandeid** (*castings*), mida teiste meetoditega, näiteks sepistamine, stantsimine ja keevitamine, pole võimalik või osutub keerukaks saada. Valandite maksumus, võrreldes teiste toorikutega, on keeruka kuju puhul väiksem. Valandite mass võib kõikuda mõnest grammist kuni sadade tonnideni.

Vedelmetalli vormi valamisega valmistatakse küllaltki vastutusrikkaid tooteid: sise- põlemismootorite silindriplokke, kolbe, pumpade töörrattaid, gaasiturbiinide labasid, tööpinkide sānge jm. Masinates ja tööstusseadmetes on ligikaudu pooled detailid valatud. Umbes 75 % valandeist valmistatakse liivvormides, 20 % metallvormides ja 5 % muudes tulepüsivast materjalist vormides. Olenevalt valu vormi materjalist eristatakse **kordkasutusvormvalu** (*expendable mold casting, temporary mold casting*) ja

**korduvkasutusvormvalu** ehk **püsivormvalu** (*permanent mold casting*). Esimeste hulka kuuluvad sellised valumeetodid nagu **liivvormvalu** (*sand casting, sand mold casting*), **koorikvalu** (*shell mold casting, Croning process*), **täppisvalu** (*investment casting*) jt. Teise rühma kuuluvad **kokillvalu** (*gravity die casting*), **survevalu** (*die casting*), **tseentrifugaalvalu** (*centrifugal casting*) jt. Eristatakse ka vahepealset, **poolkorduvkasutusvormvalu** ehk **poolpüsivormvalu** (*semipermanent-mold casting*) – valu korduvkasutus- ehk püsivormidesse, kasutades kordkasutusega liivkärne. Meetodi valik oleneb valandite nõutavast täpsusest ja hulgast, mil valumeetodi valiku määrab majanduslik külg.

## 9.2. VEDELMETALLI VORMITAVUS

Kvaliteetse, defektideta, keeruka kuju ja õhukese seinaga väikese või ka massiivse valandi saamine oleneb eelkõige sulami vedelvormitavusest. Selle määrab metalli-sulami vedelvoolavus ning tema tardumisega seotud nähtused: mahtkahanemine, pingete ja pragude tekkimine, gaasitühikute ja mittemetalsete moodustiste kujunemine ning likvatsiooninähud (keemilise koostise erinevus valandi osades).

### 9.2.1. Sulatus ja valamine

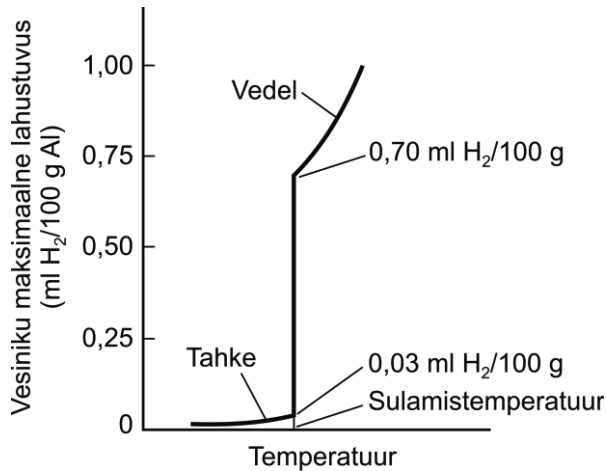
Valandi vedelvormimiseks metall sulatatakse kuumutades üle sulatustemperatuuri. **Valamise** (*pouring*) ja vormi täieliku täitmise seisukohalt on olulisteks aspektideks **valutemperatuur** (*pouring temperature*), **valukiirus** (*pouring rate*) ning vedelmetalli kiirel voolamisel tekkiv **turbulents** (*turbulence*). Valutemperatuur peab olema piisav valuvormi õõnsuse täielikuks täitmiseks sulametalliga. Valukiirus (valuvormi täitva metalli maht ajaühikus, näiteks  $\text{cm}^3/\text{s}$ ) peab olema piisav selleks, et metall ei tarduks enne vormi täielikku täitumist. Teiselt poolt ei tohiks valukiirus olla liialt suur, tekitades vedelmetallis turbulentsi. Metallis turbulentsi tuleb valamisel vältida mitmel põhjusel. Esiteks soodustab turbulents gaaside neeldumist vedelmetallis ja oksüdeerumist. Turbulents võib samuti põhjustada kordkasutusvormide (näiteks liivvormivalus) erosiooni, st vormi pindkulumist ning murenemist.

Sulametalli kvaliteet on oluline kvaliteetsete (valudefektideta) valandite tootmisel. Valandid ei tohiks sisaldada tahkeid mittemetaliseid osakesi (oksiidid, räbuosakesed), samuti gaasipoore ja -tühikuid. Valudefektide vältimiseks saab astuda samme juba valumetalli sulatusel.

Mittemetalsete tahkete osakeste moodustumise ja valuvormi sattumise vältimiseks kaetakse valukopas olev sulametall kaitsva **räbuga** (*slag*). Efektiivne meetod oksüdeerumise vähendamiseks on **vaakumsulatus** (*vacuum melting*) või sulatus kaitsegaasi keskkonnas. Mittemetalsete osakeste valuvormi sattumist saab vältida ka vormi täitmisel sulametalliga, kasutades spetsiaalse konstruktsiooniga valukoppasid

(vt Joonis 9.33), valuvormi valukanalitesse asetatavoid keraamilisi filtreid ning spetsiaalset valukanalit, nn räbupüüdliit (vt Joonis 9.19)

Gaasipoorsust ja -tühikuid põhjustab gaaside lahustuvuse erinevus vedelas ja tardunud metallis. Näiteks vesiniku lahustuvus alumiiniumis väheneb tardumisel märkimisväärselt (vt Joonis 9.1).



**Joonis 9.1.** Vesiniku lahustuvuse olenevus temperatuurist

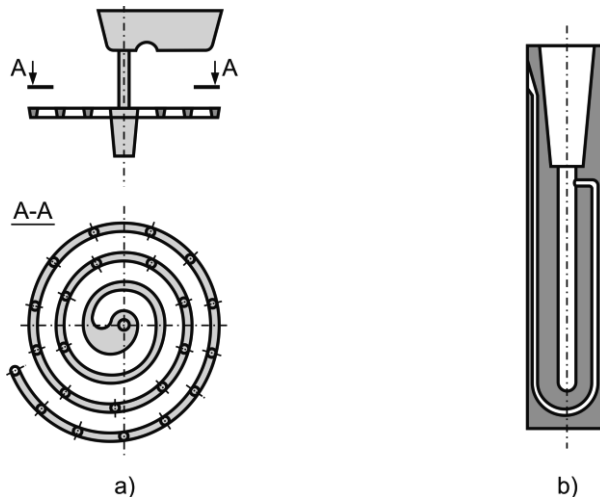
Gaasipoorsust saab vähendada, sulatades õhu eest kaitsva räbukihi all. Kuna gaaside lahustuvus sulametallis suureneb temperatuuri kasvades (vt Joonis 9.1.), kasutatakse üldjuhul väikest, metalli sulamistemperatuuri ületavat **ülekuumutusastet** (*superheat*). Gaaside lahustumise vähendamiseks kasutatakse vaakumsulatust või sulatust selliste kaitsegaaside keskkonnas, milliste lahustuvus sulametallis on väike. Lahustunud gaaside sisaldust saab täiendavalt vähendada, kasutades sulametalli **vaakumdegasatsiooni** (*vacuum degassing*). See seisneb sulametalli pihustamises vaakumis, mis tagab lahustunud gaaside efektiivse eraldumise igast metallitilgast. Kasutatakse samuti **gaasuhtmist** (*gas flushing*) – sulametalli gaasimullidega läbipuhumine. Kasutatakse sulametalli suhtes inertseid ja väikese lahustuvusega gaase. Metallis suure lahustuvusega gaasid eralduvad koos gaasuhthmisel kasutatava gaasiga. Näiteks sulaalumiiniumi töötlemisel kasutatakse gaasidena lämmastikku ja kloori.

**Vedelvoolavus** (*fluidity*) on sulami omadus täita vedelas olekus valuvorm. Halva vedelvoolavusega sulami voolamine võib katkeda enne vormi täitumist, mis on eriti tõenäoline massiivsete õhukese seinaga valandite juures. Vedelvoolavus on sulami omadustest (viskoossuse ja pindpinevuse suurenemine halvendavad voolavust) kui ka vormi omadustest (vormi soojusjuhtivuse suurenemine halvendab voolavust) ja valamistingimustest (rõhk suurendab voolavust).



Enamasti kasutatakse valamiseks hea vedelvoolavusega eutektse või eutektsele lähedase koostisega sulameid, mis tarduvad püsival, kuid madalamal temperatuuril kui nende puhtad alkomponendid. Eutektsulamil on lühike kristallide eraldumisaeg ja seega ka takistatud voolamisaeg enne täielikku tardumist valukanalites. Et eutekt-sulami tardumistemperatuur on suhteliselt madal, siis on ka viskoossuse vähendamiseks vajalik temperatuur madalam kui puhastel metallidel.

Vedelvoolavust määratakse tehnoloogiliste teimidega. Näiteks valatakse sulametall Joonisel 9.2a näidatud spiraalse kanaliga valuvormi. Vedelvoolavuse mõõduks on spiraali täidetud osa pikkus. Lisaks spiraalvormile kasutatakse U-kujulist vormi (Joonis 9.2b), millega määratakse vedelvoolavust valamisel metallvormidesse. Parim vedelvoolavus on hallmalmil, halvim Mg-sulamitel.



**Joonis 9.2.** Vedelvoolavuse tehnoloogilised teimid: a – mudel spiraalvormi vormimiseks; b – U-kujulise proovikeha saamiseks kasutatava kokilli lahutusplind

### 9.2.2. Tardumine ja kahanemine

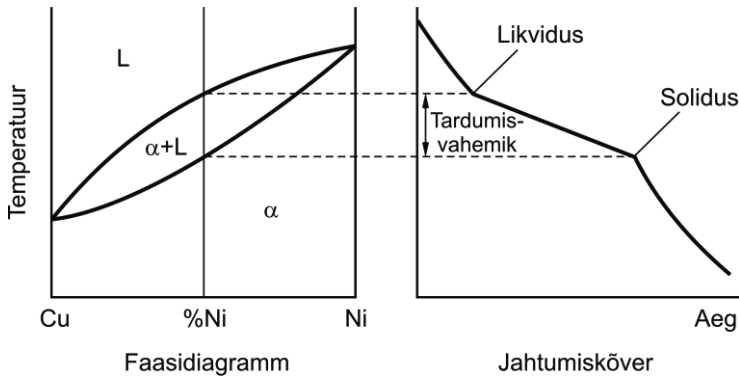
Tardumisega kaasneb sulametalli üleminek vedelast tardunud olekusse. Tardumisega ja kahanemisega võib kaasneda valudefektide (kahanemistühikud ja -poorsus, gaasitühikud ja -poorsus, likvatsioon, sisepinged ja praod) tekkimine. Tardunud metallis võivad sisalduda räbutükikesed.

#### Metalli tardumine

Tardumisel toimub samaaegselt kaks protsessi. Esiteks, **kristallisatsioonikeskmete moodustumine** (*nucleation*) – tardfaasiks kasvuvõimeliste struktuurselt stabiilsete osakeste moodustumine. Teiseks, moodustunud tardunud osakeste (terade) kasvamine

(vt samuti p 2.2.2. Kristallivõred ja kristallisatsioon). Paremate mehaaniliste omadustega peeneteralise struktuuriga metalli saamiseks on võimalik tardumisprotsessi juhtida, kasutades **modifikaatoreid** (*modifier, modifying agent*). Modifikaator on aine, mille sulametalli viidavad väikesed kogused võimaldavad parandada metalli või sulami struktuuri ning omadusi. Eristatakse kristallisatsioonikeskmete arvu suurendavaid (struktuuri peenendamiseks) või uute struktuuriosade moodustumist soodustavaid modifikaatoreid, nn **inokulaatoreid** (*inoculant, inoculation agent*) ja kristallide kasvu aeglustavaid modifikaatoreid, nn **terainhibiitoreid** ehk **terapeenendajaid** (*growth-hindering agent, grain refiner*).

Tardumisprotsessi käsitlemisel on olulised faasidiagrammid. Joonisel 9.3. on esitatud üks võimalikke metallisulami faasidiagramme ja **jahtumiskõver** ehk **jahtuskõver** (*cooling curve*).



**Joonis 9.3.** Tardumisvahemikuga (kristallisatsioonivahemikuga) metallisulami faasidiagramm ja jahtumiskõver

**Valutemperatuur** (*pouring temperature*) on valuvormi siseneva sulametalli temperatuur. **Jahtumiskiirust** (*cooling rate*) iseloomustab jahtumiskõvera kaldenurk (vt Joonis 9.3.). **Likvidustemperatuur** (*liquidus temperature*) on sulanud olekus metalli madalaim temperatuur, **solidustemperatuur** (*solidus temperature*) on tardunud metalli kõrgeim temperatuur. Solidus- ja likvidustemperatuuride vahemikku nimetatakse **kristallisatsioonivahemikuks** ehk **tardumisvahemikuks** (*freezing range*). Kristallisatsioonivahemikus on metall osaliselt kristalliseerunud (tardunud). Täielikult mittetardunud piirkonda valandis nimetatakse **osaliselt tardunud piirkonnaks** (*mushy zone*). Jahtumistingimustest olenevalt võib see piirkond valandis olla kitsas või ulatuda läbi valandi kogu mahu. Osaliselt tardunud piirkonda suurendab suur kristallisatsioonivahemik ja metalli aeglane jahtumiskiirus. Jahtumiskõverate kuju on erinevate metallisulamite puhul erinev. Need kõverad võimaldavad analüüsida struktuurimoodustumise protsesse valandites. Näiteks kiirel jahtumisel metallvormis moodustub mehaaniliste omaduste poolest soodsam, peeneteraline struktuur.

Valandi struktuuris on sarnaselt kristalliseerunud valuploki struktuuriga (vt p 5.1.1. Rauametallurgia, Joonis 5.13) eristatavad kolm piirkonda (tsooni). Esiteks, **kiirjahtumistsoon** (*chill zone*) – valuvormi (või valuplokivormi) pinnalähedane, kiirelt allajahtuv, võrdtelgsete peenkristallidega piirkond. Teiseks, **sammakristallide tsoon** (*columnar zone*) – valandi (või valuploki) pikkade, väljavenitatud kristallidega piirkond. Kristallide kasvu selles piirkonnas nimetatakse kristallide **dendriitkasvuk** (*dendritic growth*). Kolmandat tsooni valandis (ja valuplokis) nimetatakse jämeda-teraliseks **võrdtelgkristallide tsooniks** (*equiaxed zone*).

Metallisulamite tardumisega kaasneb sageli keemiliste elementide ebaühtlane jaotus, **likvatsioon** ehk **segregatsioon** (*segregation*). Eristatakse **mikrolikvatsiooni** ehk **dendriitlikvatsiooni** (*microsegregation*) ja **makrolikvatsiooni** ehk **tsonaallikvatsiooni** (*macrosegregation*). Mikrolikvatsioon on keemilise koostise ebaühtlus kristalli, tera jm struktuuriosa piires. Makrolikvatsioon on keemilise koostise ebaühtlus valandi (või valuploki) erinevate osade vahel, näiteks pinnal ja südamikus. Likvatsioon on seletatav sulamite kristalliseerumisprotsesside iseärasustega (vt p 2.3.2. Sulamite kristallisatsioon).

Soojus, mis valandist eemaldada tuleb, sõltub ülekuumusastmest (valutemperatuurist), valandi mahust, valandi pindalast ja valamistingimustest. Tardumisaega prognoosimiseks kasutatakse **Chvorinovi reeglit** (*Chvorinov's rule*):

$$T_s = B (V/A)^n, \quad (9.1)$$

kus  $T_s$  – tardumisaeg valamistemperatuurilt tardumise lõpuni,

$V$  – valandi maht,

$A$  – valandi pindala,

$B$  – **valuvormi konstant** (*mold constant*),

$n$  – astendaja ( $n = 1,5 \dots 2,0$ ).

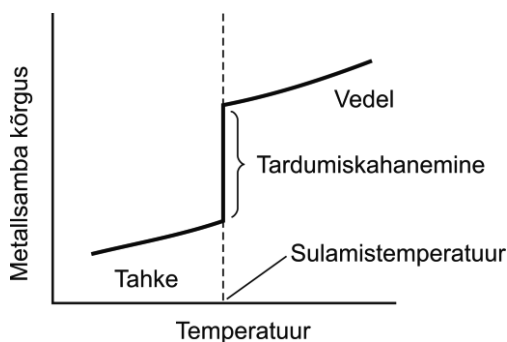
Valuvormi konstant oleneb valamistingimustest: valumetalli omadustest (sulamissoojus, soojusmahtuvus), ülekuumusastmest, valuvormi materjali omadustest (soojusjuhtivus, soojusmahtuvus), vormi seinapaksusest ning valuvormi temperatuurist. Valuvormi konstant määratakse katseliselt. *Chvorinovi* reegli kohaselt valandi suure mahu ja pindala suhtega valand jahtub ja tardub aeglasemalt kui mahu ja pindala väikese suhtega valand. Seda teades projekteeritakse valandit kristallisatsiooniprotsessis toitev ja kahanemistühikute teket vältiv **valupea** ehk **kompensaator** (*riser*) selline, mille tardumisaeg on valandi tardumisajast suurem (vt Joonis 9.8).

## Kahanemine

Metallide valutemperatuurilt jahtumisel eristatakse kahanemise kolme staadiumi:

1. **Vedelkahanemine** ehk **tardumiseelkahanemine** (*liquid shrinkage*) – kahanemine sulametalli jahtumisel likvidustemperatuurini.

2. **Tardumiskahanemine** ehk **tardumisaegne kahanemine** (*solidification shrinkage*) – kahanemine metalli tardumisel likvidus- ja solidustemperatuuride vahemikus.
3. **Tardkahanemine** ehk **tardumisjärgne kahanemine** (*solid shrinkage, contraction shrinkage*) – tardunud metalli kahanemine jahtumisel toatemperatuurini.



**Joonis 9.4.** Metallsamba kõrguse muutus valutemperatuurilt toatemperatuurini jahtumisel

Suurim kahanemine toimub tardumisel (vt Joonis 9.4.). Tardumiskahanemisel on oht kahanemisdefektide – kahanemistühikute ja -pooride – tekkimiseks (vt edaspidi p 9.2.3). Tardkahanemisega arvestatakse vormiõõnsust moodustavate valumudelite projekteerimisel (vt 9.3.1. Liivvormvalu). Tabelis 9.1 on esitatud erinevate metalli-sulamiste tardumis- ja tardkahanemine (joonmõõtmete muutumine).

**Tabel 9.1.** Valusulamite tardumis- ja tardkahanemine (joonkahanemine, %)

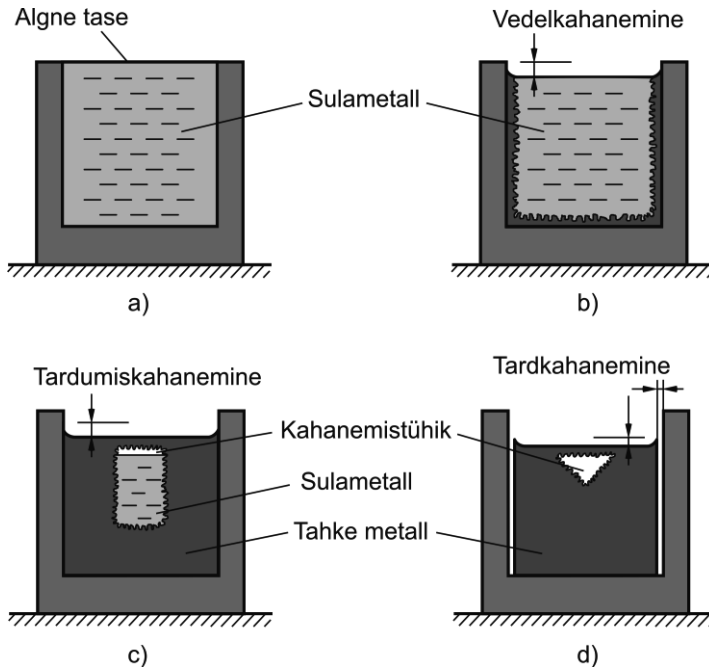
Valusulam	Tardumiskahanemine	Tardkahanemine
Madalsüsinikterased	2,5...3,0	1,6...2,1
Valgemalm	4,0...5,5	2,1
Hallmalm	-1,0...1,9	0,8...1,3
Alumiinium ja alumiiniumisulamid	6,6	1,0...1,3
Vask ja vasesulamid	4,9	1,3...1,6
Magneesium ja magneesiumisulamid	4,0	1,0...1,3
Tsink ja tsingisulamid	3,7	2,6

### 9.2.3. Tardumis- ja kahanemisdefektid

#### Kahanemistühikud ja -poorsus

Vaatleme silindrilise valandi kahanemist valutemperatuurilt toatemperatuurini jahtumisel (vt Joonis 9.5). Vedelkahanemisega (Joonis 9.5b) kaasneb vedelmetalli taseme langemine (ligikaudu 0,5 %). Tardumiskahanemisel (Joonis 9.5c) vedelmetalli nivoo

langeb veelgi. Kuna tardunud metalli maht on vedelmetalli mahust väiksem, moodustub valandi ülemises, viimasena kristalliseerivas osas **kahanemistühik** (*shrinkage cavity, pipe*). Kahanemistühikud on iseloomulikud väikese kristallisatsioonivahemikuga sulamistest (puhtad metallid, eutekkoostisega sulamid) valandites (vt Joonis 9.7). Tardkahanemisel toatemperatuurini (Joonis 9.5d) toimub tardunud valandi edasine kahanemine.

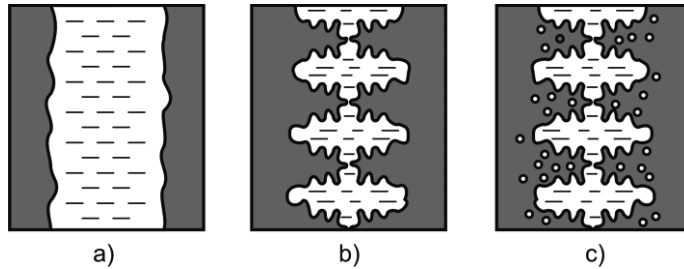


**Joonis 9.5.** Silindrilise valandi kahanemine jahtumisel: a – sulametalliga täidetud vorm; b – tardumiseelkahanemine ehk vedelkahanemine; c – tardumiskahanemine ja kahanemistühiku moodustumine; d – valandi tardkahanemine.

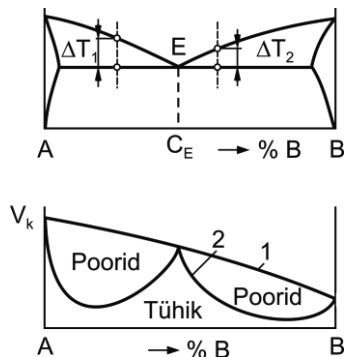
Tardumisega kaasnev kahanemine – tardumiskahanemine – esineb praktiliselt kõiki del metallidel. Erandiks on suure süsinikusisaldusega hallmalm (vt Tabel 9.1), mille tardumiskahanemist kompenseerib väikese tihedusega grafiidiosa eraldumine (grafitiseerumine) kristalliseerumisel. Tardkahanemist (kahanemist tardolekus) arvestatakse valuvormide valmistamisel kasutatavate mudelite valmistamisel – mudelite joonmõõtmed on tardkahanemist arvestades suuremad.

Peale kahanemistühiku eristatakse **kahanemispoorsust** (*shrinkage porosity*) ehk hajutatud kahanemistühikuid, mis tekivad laiemas ulatuses valandi viimasena tarduvas osades. Sel juhul kasvavad kristalliseerumise lõpul kristallid üksteisega kokku (vt Joonis 9.6) ja pärast tardumist nende vahel suletud ruumis olev vedelmetall kahaneb, mille tõttu tekivad väikesed tühikud. Suur hulk niisuguseid tühikuid tekitab

kristallidevahelises piirkonnas poorsust. Kahanemispoorsus tekib suure kristallisatsioonivahemikuga (tardumisvahemikuga) sulamisest valandites. Lisaks kahanemispoorsusele valandi keskosas võib ülaosas tekkida kahanemistühik. Kahanemisõõnsuste (tühik + poorid) summaarne maht oleneb sulami mahtkahanemisest. Mida suurem on kristallisatsioonivahemik, seda suurem on kahanemispoorsuse osa summaarsest kahanemisõõnsuste mahust (Joonis 9.7, vt samuti p 3.2.5, Joonis 3.10).



**Joonis 9.6.** Kahanemispoorsuse tekkimine: a – väikese kristallisatsioonivahemikuga hallmalmi tardumine; b, c – suure kristallisatsioonivahemikuga terase tardumine ja kahanemispoorsuse tekkimine

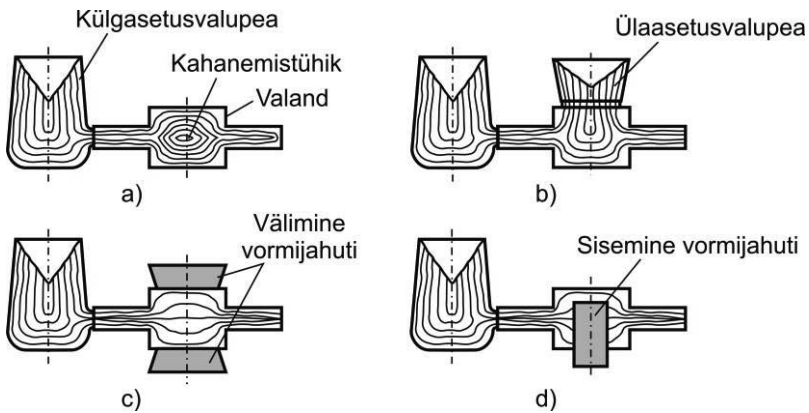


**Joonis 9.7.** Komponentide A ja B vaheliste sulamite kristallisatsioonivahemiku ( $\Delta T_1$  – suur ja  $\Delta T_2$  – väike vahemik) mõju kahanemisõõnsuste summaarse mahu  $V_k$  jagunemisele kahanemispooride ja -tühiku vahel ( $C_E$  – eutektkoostisega sulam): 1 – kahanemisõõnsuste summaarne maht; 2 – kahanemistühiku maht

Kahanemistühikuteta valandi võib saada vedelmetalli pideva doseerimisega kristallisatsioonipiirkonda, kuni valand on täielikult tardunud. Selleks kasutatakse nn **valupead** ehk **kompensaatorit** (*riser*). Kompensaatorid asetatakse valandi **kuumpunktide** (*hot spots*) juurde, mis viimasena kristalliseerudes toidavad vedelmetalliga valandi väiksema seinapaksusega osi ja vajavad seetõttu metalli pidevat juurdevoolu kompensaatorist (valupeast). Joonisel 9.8a on valupea, mis ei takista kahanemistühiku teket valandi paksemas osas, kuna valandi ja valupea (kompensaatori) vahel olev

väiksema seinapaksusega osa tardub varem ja vedelmetalli juurdevool kompensatorist lakkab. Joonisel 9.8b on näidatud valupea õige asetuse.

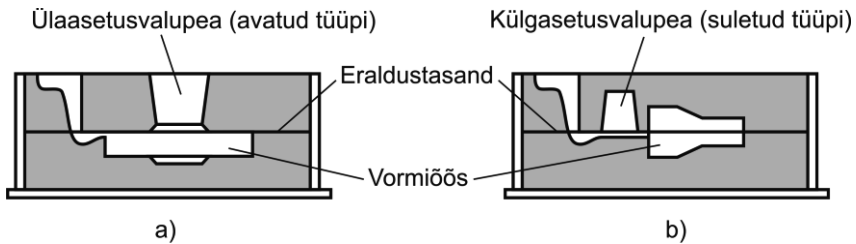
Valupeade mahu projekteerimisel kasutatakse *Chvorinovi* reeglit (vt valem (9.1)). Asetuse järgi vormis eristatakse **ülaasetusvalupäid** ehk **ülaasetuskompensaatoreid** (*top risers*), mis asuvad otse vormiõõnsuse (valandi) kohal ja **külgasetusvalupäid** ehk **külgasetuskompensaatoreid** (*side risers*), mis paiknevad vormiõõnsuse (valandi) küljel (vt Joonis 9.8 ja 9.9). Kui valupea on atmosfääriga (vormi pinnaga) ühenduses, nimetatakse seda **avatud valupeaks** ehk **avatud kompensatoriks** (*open riser*) (Joonis 9.9a). **Suletud valupea** ehk **suletud kompensator** (*blind riser*) on valuvormisise, atmosfäärist (vormi pinnast) isoleeritud (vt Joonis 9.9b).



**Joonis 9.8.** Kahanemistühikute ja -pooride vältimise vahendeid: a – valandis kahanemistühikut mittevältiv valupea; b – valandi massiivses osas (kuumpunktis) kahanemistühikut vältiv valupea; c – välimine vormijahuti; d – sisemine vormijahuti

Kahanemispoorsust valandites vältida on keerukam. Ka siin on vaja valandi kuumpunktide (massiivsemate osade) juures kasutada valupäid. Samal ajal tuleb tagada vedelmetalli võimalikult kiire jahtumine ja **suundtardumine** (*directional solidification, progressive solidification*) selleks, et vähendada kahefaasilise (vedel- ja tardfaas) piirkonna ulatust ja tagada valandi keskosa vaba toitmine kompensatorist. Valandi suure ristlõikega osade kiire ja suunatud tardumine tagatakse **vormijahutite** (*chills*) abil (Joonis 9.8c, d). Eristatakse välimisi ja sisemisi vormijahuteid. **Välimine vormijahuti** (*external chill*) on kiirendatult jahutav osa kordkasutusvormi seinas kiirendatud kohtjahutuseks (vt Joon 9.8c). Seda kasutatakse valandi nende osade kiireks allajahutamiseks, millele on vedelmetalli juurdepääs raskendatud. **Sisemine vormijahuti** (*internal chill*) on valandiga samast materjalist osa (plaat, varb) vormiõõnsuses sulametalist kiirendatud kohtjahutuseks ja suunatud tardumiseks (vt Joonis 9.8d).

Valupeade ja vormijahutite üleliigsed osad tuleb valandilt eraldada. Terasvalandilt lõigatakse valupea maha tavaliselt gaasipõletiga. Hallmalmist ja haprast sulamist valanditelt eemaldatakse valupea löögiga.



**Joonis 9.9.** Valupeade asetus liivvormis: a – ülaasetusvalupea (avatud tüüpi); b – külgasetusvalupea (suletud tüüpi).

## Gaasitühikud

Peale kahanemistühikute võivad metalli terviklikkust kristalliseerumisel rikkuda veel gaasitühikud, mis satuvad vedelasse või kristalliseeruvasse metalli.

Eristatakse kahte liiki **gaasitühikuid** (*gas pockets, gas cavities*): endogeensed, mis tekivad lahustunud gaasi eraldumisel metallist, ja eksogeensed, mis tekivad gaasi sisenemisel metalli väljastpoolt, peamiselt valuvormist.

Endogeensed gaasitühikud tekivad seepärast, et vedelas olekus metallid ja sulamid lahustavad vesinikku, hapnikku, lämmastikku jt gaase, mis pärinevad sulatusel kasutatavast oksiidide ja niiskust sisaldavast lähtemetallist, kütusest samuti väliskeskkonnast. Temperatuuri tõustes suureneb gaaside lahustuvus vedelmetallis (vt Joonis 9.1). Vedelmetallist võivad gaasid mullidena eralduda, kuid võivad jääda ka metalli ja põhjustada praaki.

Endogeensete gaasitühikute tõkestusviisid võib jaotada kolme rühma:

- 1) minimaalne gaasisalduse tagamine vedelmetallis, mis tähendab lähtematerjalide gaasist vabastamist, sulatusrežiimi optimeerimist ja keskkonna valikut (vaakum, kaitseatmosferaar, sulatamine magnetväljas ilma sulatusseadmega kokku puutumata jms);
- 2) vedelmetalli gaasist vabastamine vahetult enne vormi valamist, väljastpoolt sulatusagregaati (vaakumdegasatsioon, lahustunud gaasidega reageerivate ainete lisamine, ultraheliga töötlemine, gaasuhtmine jms (vt p 9.2.1));
- 3) gaaside eraldumise takistamine vormis metalli kristallisatsiooniprotsessi ajal, gaasuhtmine (kristalliseerumine autoklaavis 0,4.. 0,5 MPa rõhu all, kiire jahutamine, survevalu).

Eksogeensed gaasitühikud kujunevad vedelmetalli ja vormi kokkupuutel tekkiva kõrgema rõhuga gaasi sisenemisel metalli. Gaasi kõrgema rõhu peamisteks põhjusteks on vormi poorides oleva õhu kuumenemine, vaba vee aurustumine (valamisel



niiskesse vormi), seotud vee eraldumine hüdraatidest ja orgaaniliste ühendite lagunemine. Tekkinud gaasi rõhk oleneb gaasi tekkimise ja vormist eraldumise kiirusest, mida iseloomustatakse vormi gaasiläbilaskvusega.

Valuvormi **gaasiläbilaskvust** (*permeability*) iseloomustatakse gaasiläbilaskvusteguriga  $K$ :

$$K = \frac{V \cdot \delta}{p \cdot S \cdot t}, \quad (9.2)$$

kus  $V$  – gaasi (õhk) maht,

$\delta$  – proovikeha paksus,

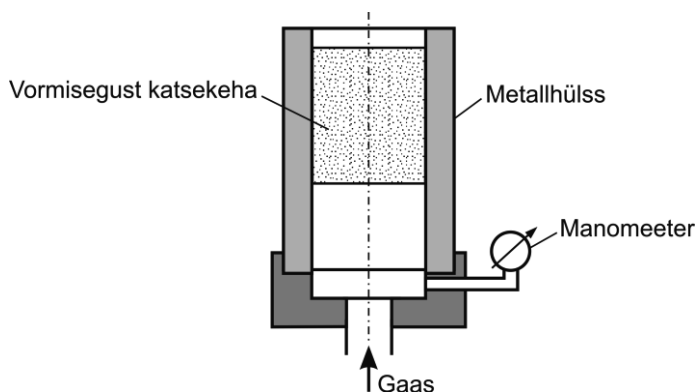
$p$  – rõhk proovikeha ees,

$S$  – proovikeha ristlõikepind,

$t$  – gaasi (õhk) proovikeha läbimise aeg.

Gaasiläbilaskvust määratakse eriseadmelt järgmiselt (Joonis 9.10). Metallhülssis tihendatakse vormisegust silindrilist katsekeha (läbimõõt 50 mm, kõrgus 50 mm). Katsekehast surutakse läbi 2000 cm<sup>3</sup> õhku, mille rõhku  $p$  katsekeha ees mõõdetakse manomeetriga. Õhu läbimise aeg on  $t$ . Ühikutena kasutatakse valemis gaasi mahtu cm<sup>3</sup> ( $V$ ), proovikeha paksust cm ( $\delta$ ), proovikeha ristlõiget cm<sup>2</sup> ( $S$ ), rõhku mm H<sub>2</sub>O ( $p$ ), aega min ( $t$ ).

Kui tekkiva gaasi rõhk vormis on piisavalt suur, tekivad eksogeensed gaasitühikud. Seda võib oluliselt tõkestada piirates gaasi eraldumist, mida soodustab vormimaterjali niiskus ja orgaaniliste sideainete sisaldus. Teisalt tekib gaasitühikuid vähem, kui suurendada vormi gaasiläbilaskvust. Selleks tehakse vormi ventilatsioonikanalid ja kasutatakse õõnsaid kärne.



**Joonis 9.10.** Gaasiläbilaskvuse määramise seadme skeem

## Räbusuletised

**Räbusuletiste** ehk **räbutühikute** (*slag inclusions*) all mõeldakse mittemetalsete tahkete osakeste konglomeraate, mis rikuvad sulami pidevust. Räbusuletised on enamasti sakilised, teravate nurkadega ja moodustavad valandis pingekontsentraatoreid. Tekkelt liigitatakse räbusuletised samuti nagu gaasitühikudki endogeenseteks, mis tekivad sulami komponentide keemilisel reageerimisel lisandite, sulatusseadme voodri või välisatmosfääriga, ja eksogeenseteks, mis tekivad, kui sulametall haarab kaasa vormimaterjali jt mittemetalseid osakesi.

Osa endogeenseid räbusuletisi kerkib sulatusseadmes ja kopas pinnale. Valamisel saab mittemetalseid osakesi suunata räbupüüdlisse, tõusukanalisse ja valupeasse (vt Joonis 9.14).

Mittemetalsed osakesed kerkivad vedelmetallis pinnale tõstejõu  $F$  tõttu:

$$F = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_m - \rho_r) \quad (9.3)$$

kus  $r$  – osakese raadius,

$\rho_m, \rho_r$  – metalli ja räbu tihedus.

Pinnalekerkimise kiirus oleneb vedelmetalli hüdraulilisest takistusest. Vedeliku laminaarsel voolamisel võib hüdraulilist takistusjõudu määrata Stokes'i valemiga

$$F_1 = 6\pi r v \mu \quad (9.4)$$

kus  $v$  – osakese pinnalekerkimise kiirus,

$\mu$  – dünaamiline viskoossus.

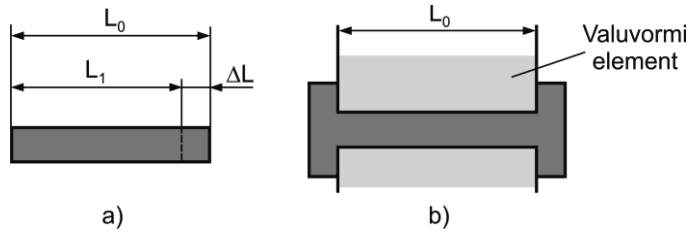
Tasakaaluvõrrandist  $F = F_1$  saab määrata osakeste pinnalekerkimise kiiruse

$$v = \frac{2r^2(\rho_m - \rho_r)}{9\mu} \quad (9.5)$$

Valemist selgub, et eelkõige suureneb mittemetalse osakese pinnalekerkimise kiirus, kui väheneb metalli viskoossus, mis saavutatakse temperatuuri tõstes. Teiseks tehnoloogiliseks võtteks on läbipuhumine. Juhul kui osakesed kleepuvad gaasimullide külge, väheneb osakeste tihedus ja suureneb tõusukiirus.

## Sisepinged ja praod

Pärast vedelmetalli vormi valamist ja tardunud kooriku tekkimist vähenevad valandi joonmõõtmed, tingituna tardkahanemisest (vt Tabel 9.1).



**Joonis 9.11.** Valandi tardkahanemine vormitakistusega (a) ja vormitakistusega (b)

Kahanemine tekitab valandis pingeid ja deformatsioone, mille põhjuseks on enamasti takistatud kahanemine. Kahanemistakistus võib olla mehaaniline või termiline. Esi- mesel juhul on takistatud kahanemise põhjuseks vormitakistus (Joonis 9.11) ja see põhjustab valandis mehaanilisi ehk kahanemispingeid  $\sigma_{ka}$ . Kahanemispingeid vähen- dab piisava järeleandvusega vormimaterjalide kasutamine. **Järeleandvus** (*collapsibility*) on vormi või kärni materjali omadus järele anda või puruneda metalli kahanemisest tingitud jõudude toimel. Kahanemispingeid saab samuti vähendada, eemaldades valuvormist kuum valand nii kiiresti kui võimalik.

Teiseks sisepingete põhjuseks on valandiosade erineva kiirusega jahtumine, mis põhjustab termopingeid  $\sigma_{te}$ . Erineva kiirusega jahtuvad valandite erineva seinapaksusega osad. Termopingete vähendamiseks projekteeritakse valandid võimalikult ühesuguse seinapaksusega (vt p 9.2.4).

Pinged tekivad ka struktuurimuutuste tagajärjel seoses algsest erinevat mahtu nõudvate uute struktuuriosade tekkimisega valandi osades. Sellise päritoluga pingeid valandites nimetatakse struktuuripingeteks  $\sigma_{st}$ . Valandi sisepinged (valupinged) on võrdsed eelnevalt nimetatud pingete summaga

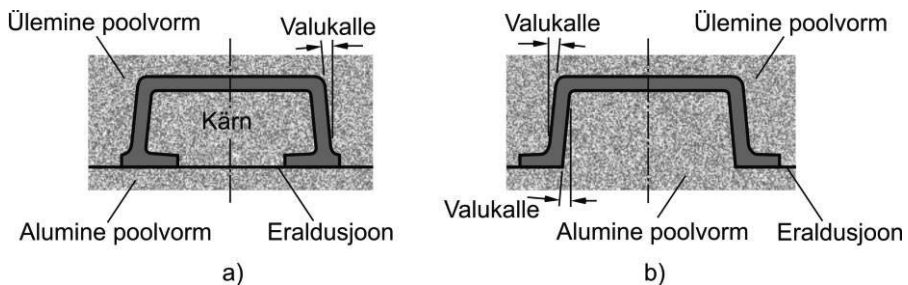
$$\sigma = \sigma_{ka} + \sigma_{te} + \sigma_{st} \quad (9.6)$$

Sisepinged tekitavad valandites nii deformatsioone (pinged ületavad kõnealusel temperatuuril voolepiiri) kui ka pragusid (pinged ületavad tugevuspiiri). Olenevalt temperatuurist, mille juures valandis praod tekivad, eristatakse kristallumispragusid (tekivad, kui valand ei ole lõplikult kristalliseerunud), kuumpragusid ja külmpragusid. **Kristallumispragu** (*hot tear*) on takistatud tardumiskahanemisest põhjustatud tugevalt oksüdeerunud pinnaga pragu valandites. **Kuumpragu** (*hot crack*) on takis- tatud tardkahanemisest põhjustatud kõrgetel temperatuuridel moodustunud pragu. **Külmpragu** (*cold crack, cold tear*) on takistatud tardkahanemisest tingitud toa- temperatuuril või sellele lähedasel temperatuuril moodustunud pragu.

## 9.2.4. Valandite projekteerimise põhimõtted

Projekteerimisel tuleb lisaks valandi funktsionaalsusele arvestada järgnevate põhimõtetega.

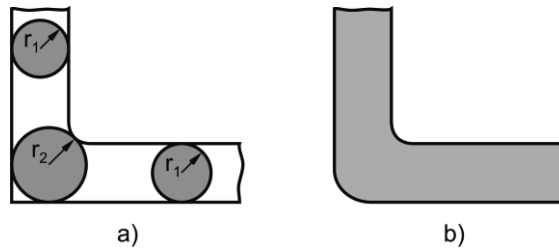
1. Geomeetiline lihtsus. Kuigi valutehnoloogia võimaldab toota keeruka vormiga tooteid, lihtne geomeetria kergendab vormi valmistamist.
2. Vormi eraldustasand. Vormi **eraldustasand** ehk **lahutustasand** (*parting plane*) peab nii nagu geomeetiline lihtsuski hõlbustama vormi valmistamist, samuti tagama mudeli eemaldamisvõimaluse valuvormist valamisel kordkasutusvormidesse (näiteks liivvormvalu korral). Eraldustasandi (vt Joonis 9.9 ja 9.12) asukohast oleneb valukanalite süsteemi asetus, mõnikord kärnide arv ning valandi mass. Valandi asetuse määramisel vormis tuleb arvestada, et vastutusrikkad pinnad on kasulik asetada kas vormi alumisse poolde või vertikaalselt, sest valandi ülaossa kontsentreeruvad gaasi- ja räbutühikud.
3. Kärnide kasutamine. Valandi sisemisi õõnsusi moodustavate kärnide kasutamisest on mõnikord võimalik loobuda minimaalsete muudatustega valandi konstruktsioonis (vt Joonis 9.12)



**Joonis 9.12.** Valandi konstruktsioon: a – nõuab kärni kasutamist; b – ei nõua kärni kasutamist

4. Valandiosade seinapaksus. Valandi erinevate osade seinapaksused peaksid ideaaljuhul olema ühesugused. See väldib suurema ristlõikega, aeglasemalt kristalliseeruvate **kuumpunktide** (*hot spots*) teket, millega võib kaasned a kahanemisdefektide (kahanemistühikud) moodustumine. Ühtlane seinapaksus vähendab samuti termopingete ja nendest tingitud pragude tekkimise ohtu valandi jahtumisel.
5. Valukalded. **Valukalle** (*draft*) on mudeli või valuvormi vertikaalpindade kalle (vt joonis 9.12). Kordkasutusvormivalus (nt liivvormvalu) jäetakse valukalle ( $\sim 1^\circ$ ) mudelile kergendamaks selle eemaldamist valuvormist. Korduvkasutusvormivalus ehk püsivormivalus vormi vertikaalpindade kalle ( $2 \dots 3^\circ$ ) hõlbustab valandi eemaldamist metallist püsivormist.
6. Ümardused. Teravaid nurki valanditel välditakse. **Siseümardused** (*interior fillet, fillet*) ja **välisümardused** (*exterior radii, radii*) lihtsustavad mudeli eemaldamist vormist kordkasutusvormides või valandi eemaldamist korduvkasutusega metallvormist. Ümardused vähendavad samuti pragunemisohtu

kahanemisel ning valandi seinapaksuste erinevust valandi osade ristumiskohal (vt Joonis 9.13).



**Joonis 9.13.** Valandi projekteerimise põhimõtted: a – suurema ristlõikega kuumpunkti moodustumine valandi osade ristumiskohas; b – sise- ja välisümardused tagavad valandi ühtlasema seinapaksuse

7. Töötlusvaru. **Töötlusvaru** ehk **töötlemisvaru** (*machining allowance*) on metallikiht, mis jäetakse järgnevas viimistlevaks mehaaniliseks töötlemiseks, tavaliselt laastu eemaldamise teel. Tehnoloogilistest iseärasustest tingituna on töötlusvaru näiteks liivvormvalus märgatavalt suurem kui koorikvalus või valamisel püsivormidesse (survevalu, kokillvalu jne).

### 9.3. VALU KORDKASUTUSVORMIDESSE

**Kordkasutusvormvalu** (*expendable mold casting, temporary mold casting*) on valu ühekordselt kasutatavatesse (liivast, kipsist, keraamikast jms) vormidesse. Käsitleme järgnevaid valumeetodeid: liivvormvalu, koorikvalu, täppisvalu, kipsvormvalu ja keraamikavormvalu. Kordkasutusvormvalus kasutatakse kahte tüüpi mudeleid: **korduvkasutusmudelid** ehk **püsimumelid** (*multiple-use patterns*) ja **kordkasutusmudelid** (*single-use patterns*). Korduvkasutusmudeleid valmistatakse puidust, metallist ja plastidest. Erinevalt püsimumelitest ei eemaldata kordkasutusmudeleid enne valamist, mistõttu peavad need olema valamisel gaasistuvatest materjalidest. Selliseid mudeleid kasutatakse gaasistuvmodelvalus (vt p 9.3.1) ja gaasistuvmodel-täppisvalus (vt p 9.3.3).

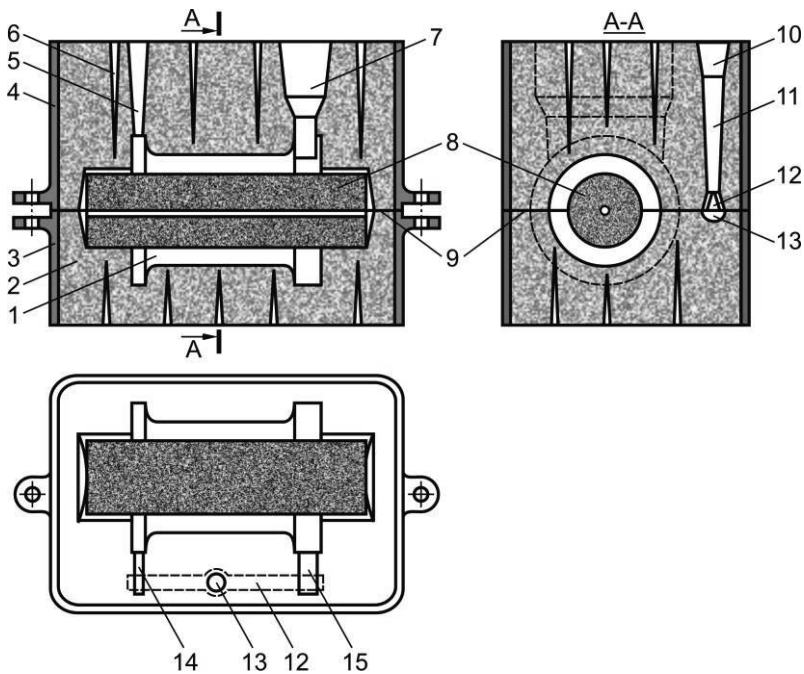
#### 9.3.1. Liivvormvalu

##### Põhimõisted

Valand vormitakse valuvormis, mille sisekuju kopeerib valandi kuju (Joonis 9.14). Üle 80 % valanditest toodetakse kordkasutusega liivvormides. **Valuvorm** (*casting mold*) koosneb ülemisest ja alumisest vormipoolest, mis valmistatakse vormisegust (liiva ja sideaine segu) tihendamise teel vormkastides ja koos samaaegse jäljendi võtmisega mudelilt. Seega peab mudelil olema valandi väliskuju geomeetria. Kuna

metalli maht üleminekul vedelast olekust tahkesse väheneb, siis on mudeli mõõtmed valandi omast tardkahanemise võrra suuremad.

Valandi sisepind kujundatakse vormi asetatud **kärni** (*core*) abil. Kärn valmistatakse samuti liiva ja sideaine (savi, polümeerid jms) segust. Mudel on varustatud **kärnmärkidega** (*core prints*), mis kujundavad vormis kärnile toetuspinna. Kärn peab olema selle võrra pikem.



**Joonis 9.14.** Valuvormi eskiis: 1 – vormiõõs; 2 – vormisegu; 3 – alumine vormkast; 4 – ülemine vormkast; 5 – tõusukanal; 6 – ventilatsioonikanal; 7 – valupea; 8 – kärn; 9 – vormi eraldustasand; 10 – valulehter; 11 – püstkanal; 12 – räbupüüdel; 13 – püstkanalikogur (metallikogur); 14 – toitekanalid

Tähtis valuvormi osa on **valukanalite süsteem** (*gating system*), mille põhiosad on (Joonis 9.14 ja Joonis 9.19) valulehter, püstkanal koos metallikoguriga, räbupüüdel, toitekanalid ja tõusukanal. Valukanalid juhivad metalli vormiõõnsusse. Kvaliteetse, ilma kahanemistühikute ja -poorsuseta valandi saamiseks läheb vaja kompensatorit (valupead), gaasipoorsuse vältimiseks ventilatsioonikanaleid.

### Tehnoloogilised rakised ja nende projekteerimise põhimõtted

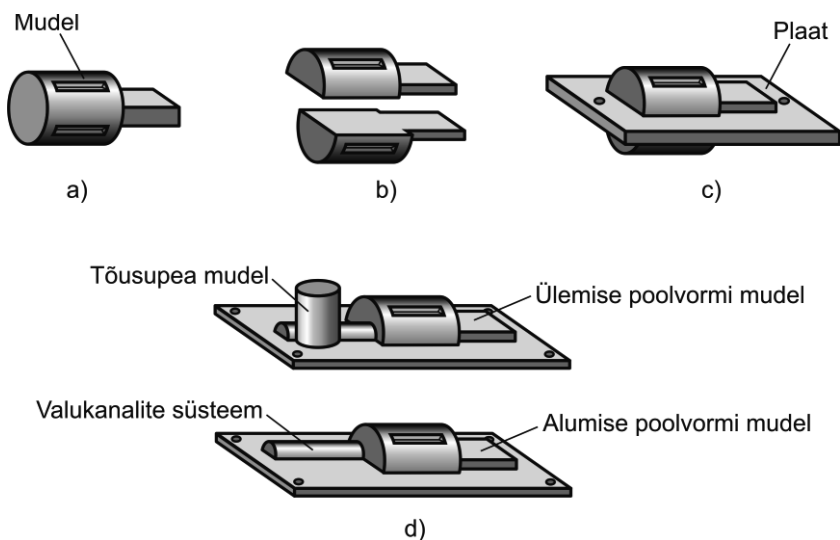
Liivvormi valmistamiseks on vaja **mudelikomplekti** (*pattern equipment*) ja teisi rakiseid (vormkastid, mudelite alusplaadid jms).

Mudelikomplekt sisaldab kõiki rakiseid, mida on vaja vormiõõnsuse valmistamiseks: mudeleid, mudelplaate, kärnkaste, valukanalite süsteemi (rübupüüdel, tõusukanal, püstkanal) mudeleid, valupea (kompensaatori) mudeleid jt rakiseid.

**Valumudel** ehk **mudel** (*pattern*) jätab vormi jäljendi. Ettenähtud mõõtmatega valandi saamiseks peavad vormiõõnsust moodustava mudeli mõõtmed olema valandi mõõtmetest suuremad. Valumudeli ja valandi tardkahanemist arvesse võtvat mõõtmete erinevust nimetatakse **kahanemisvaruks** (*shrinkage allowance, patternmaker's shrinkage*). Mudelite valmistamisel kasutatakse nn **kahanemisjoolauda** (*shrink rule, patternmaker's rule*), mille jaotiste väärtust on suurendatud metalli kahanemise võrra tardkahanemisel (vt Tabel 9.1). Mudelid valmistatakse puidust, metallist (enamasti Al-sulamitest) või plastist. Konstruksiooni järgi eristatakse **tervikmudeleid** (*single-piece patterns, solid patterns*) või koostatavaid, enamasti **poolitatavaid mudeleid** (*split patterns*) (Joonis 9.15a ja b).

Liivvormides, eriti suurseeria ja -hulgitootmises on leidnud laialdast kasutamist vahtplastist (vahtpolüstüroolist) tervikmudelid. Selliseid mudeleid ei eemaldata erinevalt puit- või metallmudelitest pärast vormimist vormist, vaid need gasifitseeruvad vormi täitmisel sulametalliga. Siit ka valumeetodi nimetus **gasifitseeruv mudelvalu** (*expanded polystyrene casting, evaporative-pattern process*) (vt samuti gaaasistuv-mudeltäppisvalu p 9.3.3).

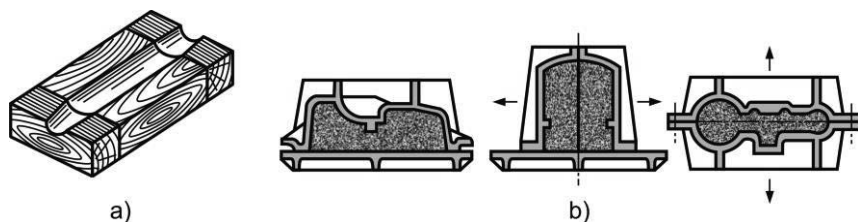
**Mudelplaat** (*match-plate pattern, cope-and-drag pattern*) on vormimisel kasutatav metallplaat, mille külge on kinnitatud valandi ja valukanalite süsteemi osiste mudelid või nende osad (Joonis 9.15c ja d). Mudelplaate kasutatakse masinvormimisel. Eristatakse **kahepoolseid mudelplaate** (*match-plate pattern*) – mudelplaate, mille ühele poolele on kinnitatud mudelid ülemise ja teisele poolele alumise vormipoole vormimiseks (vt Joonis 9.15c) ning **ühepoolseid mudelplaate** (*cope-and-drag pattern*) – mudelplaate ühe vormipoole vormimiseks (vt Joonis 9.15d).



**Joonis 9.15.** Liivvormvalus kasutatavad mudeldid: a – tervikmudel; b – poolitatav mudel; c – kahepoolne mudelplaat; d – ühepoolne mudelplaat

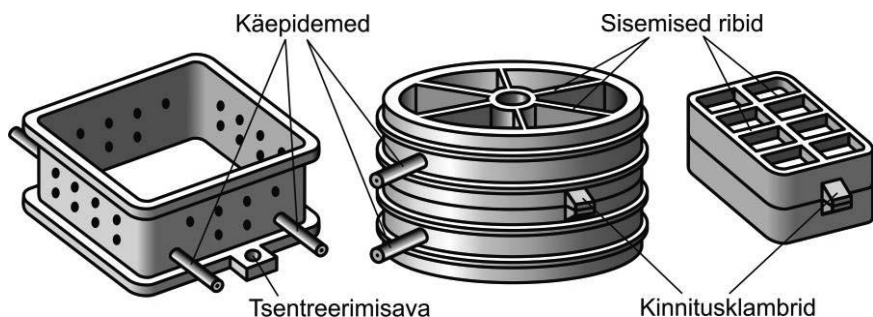
**Kärnkast** (*core box, core mold*) on puidust või metallist õõnes rakis (Joonis 9.16) kärnade vormimiseks kärnisegust. Konstruktsioonilt on ta terviklik või koostatav nagu mudelgi.

**Vormkast** (*flask*) on jäik metallist raam (Joonis 9.17), mis ümbritseb vormisegu valuvormi valmistamise, teisaldamise ja sulametalliga täitmise ajal. Tihendatud vormisegu hoidmiseks suurtes vormkastides kasutatakse sisemisi ribisid.



**Joonis 9.16.** Kärnkastid: a – puidust kärnkastipool; b – metallist kärnkastide tüüp

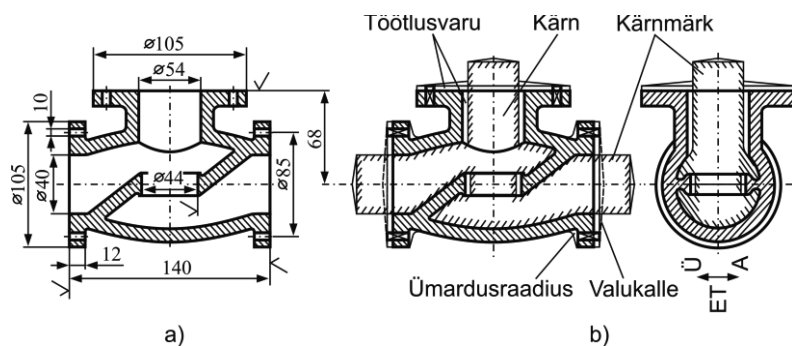




Joonis 9.17. Vormkastid

Mudelikomplekti projekteerimisel lähtutakse detailijoonisest (Joonis 9.18a), mille alusel tehakse valandijoonis. Valandijoonise tegemisel kantakse vajalikud tehnoloogilised juhised tavaliselt otse detailijoonise koopiale. Valandijoonise alusel projekteeritakse teisi valamisel vajaminevaid tehnoloogilisi rakiseid (mudeleid või mudelplaate, kärnkaste, vormkaste).

Valandijoonisele (Joonis 9.18b) kantakse järgmised tehnoloogilised juhised: mudeli ja vormi eraldus- ehk lahutusand (ET), valandi asend vormis valamisel (Ü ja A), töötlusvaru mehaaniliseks töötlemiseks, vertikaalpindade valukalded (vajalikud mudeli eemaldamiseks vormist), kärnide arv, kärnmärkide mõõtmed, siseümarusraadiused jms (vt samuti valandite projekteerimise põhimõtteid p 9.2.4).



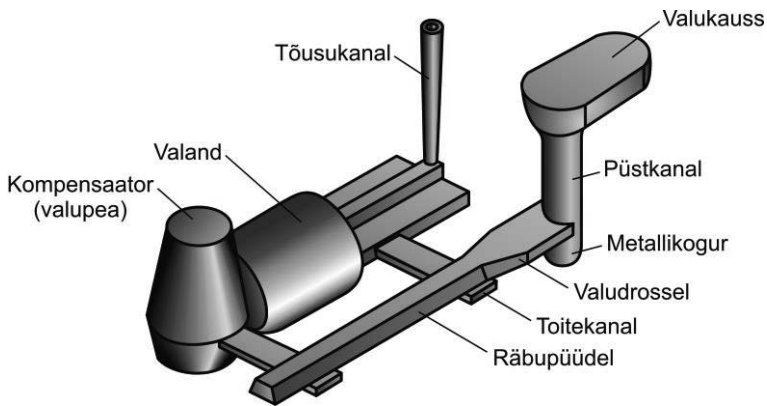
Joonis 9.18. Valandijoonise tegemine detailijoonise baasil: a – detailijoonis; b – valandijoonis

### Valukanalite süsteem ja selle projekteerimise põhimõtted

**Valukanalite süsteem** (*gating system, gating*) on valuvormi kanalite ja osade süsteem metalli juhtimiseks vormiõhnde. Valukanalite süsteemi (Joonis 9.19) osadeks loetakse tavaliselt valukaussi (väikeste mõõtmete korral nimetatakse ka valulehtriks), püstkanalit, metallikogurit, valudrosselit, toitekanalit, räbupüüdli (kollektorit) ja tõusukanalit. **Valukauss** (*pouring basin, pouring cup*) on ette nähtud sulametalli vastuvõtmiseks ja valuvormi suunamiseks. **Püstkanalit** (*sprue, downsprue*) kasutatakse

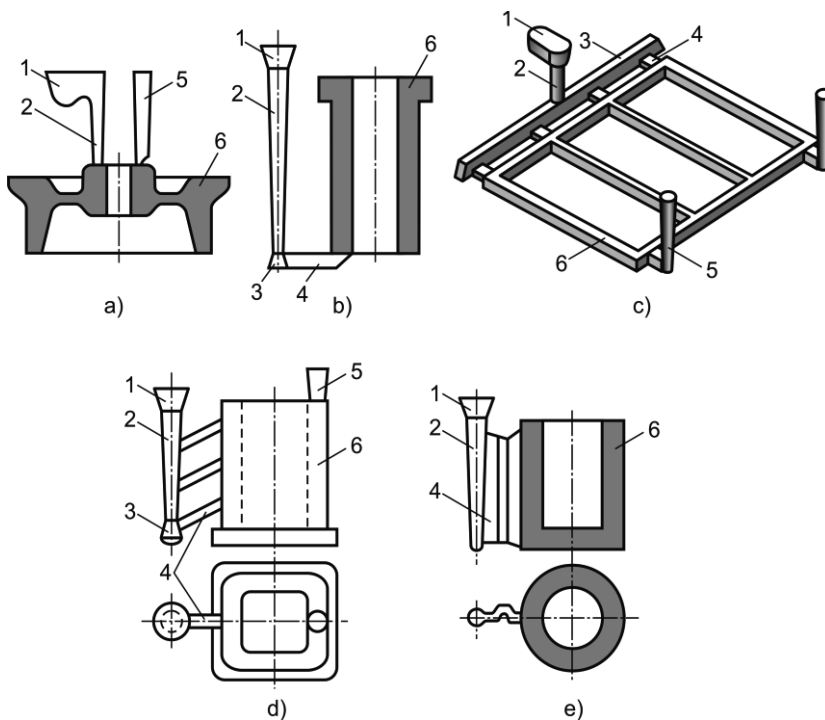
sulametalli juhtimiseks valukausist (valulehtrist) valukanalite süsteemi teiste osadeni või otse vormiõnde. **Metallikogur** ehk **püstkanalikogur** (*sprue base, sprue well*) on püstkanali alumine osa sulametalli dünaamilise löögi vastuvõtmiseks. **Valudrossel** (*choke, throttle*) on valukanalite süsteemi kitsenev osa, kus suureneb sulametalli voolukiirus. Kasutatakse ainult erijuhtudel. **Toitekanal** (*gate, ingate*) on ette nähtud sulametalli juhtimiseks vormiõnde. **Räbupüüdel** (*skim gate, skimmer gate*) on valukanalite süsteemi osa räbu ja teiste mittemetalsete osakeste kinnipüüdmiseks ning sulametalli juhtimiseks püstkanalist toitekanali(te)sse. Räbupüüdeliga sarnane valukanalite süsteemi osa, mis ei ole ette nähtud räbuosakeste püüdmiseks, vaid ainult sulametalli juhtimiseks püstkanalist toitekanali(te)sse, nimetatakse **valukollektoriks** ehk **kollektoriks** (*runner, crossgate*). **Tõusukanalit** ehk **tõusupead** (*airgate, flow-off*) kasutatakse gaasi vormist väljajuhtimiseks ja vormi täitumise kontrolliks.

Valukanalite süsteemi hulka ei loeta enamasti **valupead** ehk **kompensaatorit** (*riser, feeder, feeding head*), mis toidab valandit sulametalliga tardumise ajal, et ei tekiks kahanemistühikuid ja -poorsust. Kui võtta arvesse kõiki nimetatud valukanalite süsteemi osi ja valupead, siis võib rääkida **valukanalite ja toitesüsteemist** (*gating and risering system*).



**Joonis 9.19.** Valukanalite ja toitesüsteem

Valukanalite süsteeme liigitatakse erinevate tunnuste alusel. Sulametalli vormi voolamise mooduse järgi eristatakse järgmisi süsteeme (Joonis 9.20):



**Joonis 9.20.** Valukanalite süsteemid, lähtudes sulametalli valuvormi voolamise moodusest: a – hari- ehk ülemine süsteem, b – sifoon- ehk alumine süsteem, c – eralduspinna- ehk külgsüsteem, d – korrussüsteem, e – vertikaalpülsüsteem; 1 – valukauss, 2 – püstkanal, 3 – räbupüüdel, 4 – toitekanal, 5 – tõusukanal, 6 – valand

1. **Valukanalite ülemine süsteem** ehk **valukanalite harisüsteem** (*top gating system*). Kanalid on paigutatud valandi ülemisse ossa (Joonis 9.20a), süsteem on konstruktsioonilt lihtsaim. Ta loob kõige soodsamad tingimused valandi toitmiseks sulametalliga, s.t võimaldab alt üles suunatud kristalliseerumiseks vajaliku temperatuurijaotuse, kuna temperatuur on valandi ülaosas alati kõrgem. Puuduseks on metalli kõrge langemine, mis võib vormi purustada, samuti metalli oksüdeerumine, laiali pritsimine ja seetõttu ka mittemetalsete osakeste sattumine metalli. Ülemine süsteem ei takista metalli hulgas oleva räbu sattumist valandisse. Seda kasutatakse vaid madalate ja lihtsa kujuga valandite puhul.
2. **Valukanalite alumine süsteem** ehk **valukanalite sifoonsüsteem** (*bottom gating system*). Sulametall juhitakse valuvormi valandi alumisest osast (Joonis 9.20b). Süsteem tagab vormi õhne rahuliku täitumise ega purusta vormiseinu. Puuduseks on asjaolu, et valandis kujuneb ebasoodus temperatuurijaotus, mis tekitab kohalikke ülekuumenemisi ja sisepingeid. Sifoonsüsteem on keerukas ja suurema metallikuluga kui harisüsteem. Kasutatakse tavaliselt kõrgete, suure massi ja seinapaksusega valandite puhul peamiselt kergoksüdeerivate mitterauasulamite valus.

3. **Valukanalite külgsüsteem** ehk **valukanalite eralduspindsüsteem** (*parting gating system*) (Joonis 9.20c). Toitekanalid on paigutatud valuvormi eraldustasandisse. On levinud valandite korral, mille sümmeetriatelg ühtib vormi eraldustasandiga. Vormi purunemise oht on väike. Kristallisatsioonitingimused halvenevad ja metallikulu on suurem kui valukanalite ülemisel süsteemil. Lihtsustub aga vormimine, mis on eriti oluline masinvormimisel. Kasutatakse enamasti madalamate, keskmise massi ja suurte mõõtmetega valandite valmistamisel.
4. **Valukanalite korrussüsteem** (*step gating system*) (Joonis 9.20d). Metall juhitakse vormi mitmelt tasandilt. Süsteemi eriliigiks on vertikaalpilusüsteem (Joonis 9.20e). Korrussüsteemi kasutatakse suure massi ja õhukese seinaga valandite korral. Süsteemi puuduseks on keerukus ja suur metallikulu.

Valukanalite süsteeme liigitatakse hüdrodünaamilise tunnuse järgi laienevateks ja kitsenevateks (ahenevateks). Kui kanalisüsteemi osade ristlõikepinnad tähistada  $S_{PK}$  – püstkanal,  $S_{RP}$  – rābupūudel või kollektor,  $S_{TK}$  – toitekanal, ( $\Sigma S_{TK}$  mitu toitekanalit), siis kitseneva valukanalite süsteemi korral kehtib võrratus  $S_{PK} > S_{RP} > \Sigma S_{TK}$  ja laieneva korral  $S_{PK} < S_{RP} < \Sigma S_{TK}$ . **Kitseneva valukanalite süsteemi** (*pressurized gating system*) korral täituvad kanalid kiiresti ja rābupūudel funktsioneerib tõhusalt. Samal ajal voolab metall vormiõõnde kiiresti, pritsib laiali ja oksüdeerub ning vormi purunemise oht on suur. Kitseneva süsteemiga valmistatakse sageli malmvalandeid. **Laieneva valukanalite süsteemi** (*non-pressurized gating system*) korral väheneb metalli voolamiskiirus pidevalt ja metall voolab vormiõõnde aeglaselt. Selliseid kanaleid kasutatakse peamiselt kergoksüdeeruvate metallide (kõrglegeerterased, Al-, Mg-, Ti-sulamid) valamisel.

Valukanalite süsteem peab tagama

- 1) vormi täitumise optimaalse aja jooksul,
- 2) mittemetalsete osakeste ja rābu minimaalse sisalduse valandis,
- 3) valandi kristalliseerumise ja jahtumise optimaalse režiimi,
- 4) et valukanalid võtaksid vormis vähe ruumi,
- 5) vormitavuse mugavuse.

Esimene nõue on olulisim. Valuvormi liiga aeglase täitumisega kaasneb metalli enneaegne tardumine mõnes vormi osas. Vormi liiga kiire täitumine põhjustab jällegi gaasipõore ja sisepeingeid ning vorm võib kohati puruneda.

Teise nõude täitmise tagab valukausi ja rābupūudeli õige konstruktsioon. Rābu vormiõõnde sattumist vāldib sulametalli voolukiiruse vähendamine horisontaalsel voolamisel rābupūudlis. Selleks kasutatakse rābupūudli ristlõikepindala suurendamist või paigutatakse rābupūudlisse erifiltrid. Aeglasel voolul jõuavad metallist kergemad rābuosakesed pinnale kerkida ega satu toitekanalite kaudu vormiõõnde.

Kolmanda nõude täitmise tagab toitekanalite õige paigutus valandi suhtes. Püütakse saavutada valandi suunatud tardumine või tagada valandi osade üheaegne tardumine ja jahtumine. **Suundtardumiseks** (*directional solidification, progressive solidification*) – valandi õhukese seinaga osadelt massiivsemate osade ja edasi valupea (kompensaatori) suunas – juhitakse toitekanalid valandi massiivsematesse osadesse. Suundtardumist kasutatakse terase, Al- ja Mg-sulamite ning teiste suure mahtkahanemisega metallidest valandite puhul, mil on suur kahanemistühikute ja -poorsuse tekke oht. Üheaegse jahtumise tagamiseks ja jahtumisel tekkivate sisepingete ning pragude vähendamiseks juhitakse toitekanalid valandi õhukese seinaga osadesse. Üheaegset tardumist on otstarbekas kasutada väikese mahtkahanemise ja suhteliselt väikese tugevusega metallist valandite korral (hallmalm, tinapronks jne).

Neljanda nõude täitmiseks peab valukanalite süsteemis ökonoomsetest kaalutlustest lähtudes olema minimaalselt metalli, kuna see tuleb valandilt eemaldada ja ümber sulatada.

Valukanalite süsteemi ristlõigete absoluutsuurusi määratakse hüdraulika põhiseoste (*Bernoulli* võrrandid), empiiriliste valemite ja nomogrammidega. Arvutusega saadakse valukanalite süsteemi minimaalne ristlõikepind  $S_{min}$  ja selle alusel ka teiste elementide ristlõiked.  $S_{min}$ , arvutatakse näiteks poolempiirilise valemiga

$$S_{min} = M / \mu t \rho \sqrt{2gH_k} \quad (9.7)$$

kus  $M$  – valandi mass, kg,  
 $\mu$  – takistustegur vedelike voolamisel (0,4... 0,7),  
 $t$  – vormi täitumise optimaalne aeg, s,  
 $\rho$  – metalli tihedus, kg/m<sup>3</sup>,  
 $g$  – normaalraskuskiirendus, m/s<sup>2</sup>,  
 $H_k$  – arvutuslik hüdrostaatrõhk, m.

Vormi täitumise optimaalne aeg  $t$  määratakse empiirilise valemiga

$$t = Z\delta^m M^n \quad (9.8)$$

kus  $Z$ ,  $m$ ,  $n$  on tegurid, mille väärtused leitakse käsiraamatutest (olenevalt valatavast metallist  $Z = 0,9...4,5$ , enamasti  $n = m = 0,333$ )

$M$  – valandi mass, kg,  
 $\delta$  – valandi domineeriv seinapaksus, mm.

**Arvutuslik hüdrostaatrõhk** (*effective sprue head*) määratakse valemiga

$$H_k = H_{PK} - h_1^2 / 2h_0 \quad (9.9)$$

kus  $H_{PK}$  – püstkanali kõrgus valukausist toitekanalini, m,  
 $h_1$  – valandi kõrgus toitekanalist valandi kõrgeima punktini, m,

$h_0$  – valandi kogukõrgus, m.

Näiteks valukanalite sifoonisüsteemi korral  $h_l = h_0$  ja  $H_K = H_{PK} - h_0/2$ .

Valukanalite süsteemi minimaalse ristlõike  $S_{min}$  alusel määratakse valukanalite teiste osade ristlõikepinnad, arvestades teatmekirjanduses soovitatud suhteid  $S_{PK}:S_{RP}:\Sigma S_{TK}$ . Võttes  $S_{min} = 1$ , kasutatakse praktikas näiteks järgmisi suhteid:

õhukeseseinalised malmvalandid	1,5:1,2:1
keskmised malmvalandid	2,0:1,5:1
alumiinumvalandid	1:2:4
vaskvalandid	1:2:2.

Terasvalandite valukanalite süsteemil on mitmeid iseärasusi, mida vaadeldakse hiljem.

### Vormimaterjalid

**Vormimaterjalide** (*molding materials*) all mõistetakse kordkasutusega vormide vormi- ja kärnisegusid (vormiliiv, vormisavi, abimaterjalid).

**Vormiliivana** (*foundry sand*) kasutatakse põhiliselt kvartsliiiva ( $\text{SiO}_2$ ), millel on piisavalt suur tulekindlus (sulamistemperatuur  $T_s = 1713$  °C), harvem tsirkoonliiva  $\text{ZrSiO}_4$  ( $T_s = 2000$  °C) või kromiitliiva  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  ( $T_s = 1850$  °C). Vormiliiv on vormi- ja kärnisegude põhiosis.

Kvartsliiiva puuduseks on polümorfism, sest temperatuuril 573 °C toimub muutus  $\beta(\text{SiO}_2) \rightarrow \alpha(\text{SiO}_2)$ , millega kaasneb tiheduse suurenemine 2,4 %. Pikaajalisel kuumutamisel temperatuuril üle 870 °C võivad moodustuda uued kvartsliiiva modifikatsioonid, kuumutamisel üle 1470 °C tekib amorfne kvartsklaas. Muutused  $\beta(\text{SiO}_2) \leftrightarrow \alpha(\text{SiO}_2)$  toimuvad vormi pinnalähedases kihis igal valamistsükli, mille tulemusena liivaterades tekivad sisepinged ja terad purunevad. Seetõttu tuleb vormisegu igal korduval kasutamisel lisada segusse 3... 15 % uut liiva.

Kvartsliiiv liigitatakse mineraloogilise ja osiselise (granulomeetrilise) koostise järgi klassideks (rühmadeks).

Mineraloogilise (keemilise) koostise järgi on liigitamise aluseks kvartsliiiva savisisaldus (kuni 50 %), samuti kahjulike lisandite (näiteks rauaoksiidid) sisaldus. **Granulomeetrilise koostise** ehk **osiselise koostise** (*grain size distribution, granulometric composition*) järgi liigitatakse liiv rühmadeks, kusjuures liigitamise aluseks on terasuurus.

Vormiliiva mineraloogilise ja granulomeetrilise koostise määramine on standarditud. Enne granulomeetrilise koostise määramist leitakse liiva savisisaldus. Liiva uhutakse veega, mille juures savi ja teised tolmjad osakesed suurusega  $\leq 0,02$  mm lähevad

hõljuvasse olekusse. Seda osa liivast, mis uhtmisega eraldub, nimetatakse tinglikult saviks.

Pärast savi eemaldamist määratakse **sõelanalüüsiga** (*sieve analysis, particle size analysis*) liiva põhiosis ja **fraktsioonide** ehk **osiste** (*fractions, cuts*) hajuvus. Igal sõelal on number, mis määrab sõela ava külje pikkuse. Näiteks 063 tähendab, et sõela ava külje pikkus on 0,63 mm. Kasutatakse sõelte standardkomplekte sõela avaga 0,05...3,3 mm.

**Vormisavi** (*molding clay, foundry clay*) kasutatakse vormi- või kärnisegudes sideainena. Koos disperssusega kasvab savi sidumisvõime. Saviosakesed on väga väikesed (< 0,02 mm) ja nende ümber moodustuvad veega niisutamisel hüdraatkiled, mis teevad osakesed üksteise suhtes libisevaks ja tagavad hea sideme nende vahel. Mida suurem on saviosakeste vett siduv võime (see kasvab saviosakeste suuruse vähenedes ja oleneb savi mineraloogilisest koostisest), seda parem on savi sidumisvõime ja plastsus.

Savi avaldab vormisegudele vastandlikku mõju: suurendades segu tugevust ja plastsust, halvendab aga samal ajal selliseid omadusi nagu gaasiläbilaskvus, järeleandvus, väljalöödavus (vt vormi- ja kärnisegud).

Standardite põhjal liigitatakse vormisavi mineraloogilise koostise, tugevuse, kahjulike lisandite sisalduse, termokeemilise püsivuse jms järgi.

Mineraloogilise koostise järgi liigitatakse vormisavi järgmiselt:

- **bentoniitsavi** (*bentonite clay*) (põhimineraal  $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$ ),
- **kaoliinsavi** (*kaolinite clay*) (põhimineraal  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ),
- polümineraalsavi.

Enamikus vormi- ja kärnisegudes kasutatakse kaoliinsavi, kuigi bentoniitsavi sidumisvõime on suurem.

Kuumutamisel 100.. 200 °C suurenevad sidemed saviosakeste vahel ning vormisegu tugevus kasvab. Temperatuuril 350...650 °C eraldub savist kristallisatsioonivesi ja savi kaotab siduvad omadused.

**Abimaterjali** (*auxiliary material*) all mõeldakse vormimaterjali, mis on ette nähtud vormi- ja kärnisegude omaduste parandamiseks. Savi sisaldavatel vormi- ja kärnisegudel on puudusi. Näiteks tuleb piisava tugevuse saavutamiseks lisada palju vormisavi, mis aga vähendab gaasiläbilaskvust ja suurendab vormisegu põlemist valandi külge. Suure savisisaldusega vormisegudel on halb väljalöödavus ja järeleandvus. Mainitud põhjustel asendatakse savi sageli osaliselt või täielikult mitmesuguste orgaaniliste või anorgaaniliste sideainetega (vt vormi- ja kärnisegud).



Abimaterjalid parandavad tehnoloogilisi, mehaanilisi, soojus-füüsikalisi jt omadusi. Näiteks malmivalu puhul niiskesse vormi lisatakse vormisegusse sageli kivisöetolmu, mis kõrgel temperatuuril gaasistudes loob vormis taandava atmosfääri. Sellega väheneb metalli oksüdeerumine ja vormisegu külgepõlemine. Malmivalu puhul lisatakse kuiva vormi vormisegusse saepuru. Valamise ajal saepuru söestub, suurendades poorsust, mis parandab valuvormi gaasiläbilaskvust, järeleandvust ja väljalöödavust. Terasevalu puhul viiakse vormisegusse kvartsijahu, mis vähendab vormi poorsust ja suurendab soojaneelavust. Tulemusena kiireneb terasvalandile tahke kooriku moodustumine, mis omakorda vähendab vormisegu külgepõlemist.

## Vormi- ja kärnisegud

**Vormisegu** (*molding sand*) on vormimaterjalide segu **liivvormi** (*sand mold*) valmistamiseks. **Kärnisegu** (*core sand*) on vormimaterjalide segu kärnide valmistamiseks.

Vormi- ja kärnisegudele esitatakse nõuded mehaaniliste omaduste (tugevus, plastsus, järeleandvus), tehnoloogiliste omaduste (voolavus, termokeemiline püsivus, väljalöödavus jne), gaasiläbilaskvuse ja soojus-füüsikaliste omaduste (soojusjuhtivus, soojusmahtuvus jne) suhtes. Vormisegude mitmete omaduste määramise meetodika on standarditud. Tähtsamad omadused on järgmised:

1. **Survetugevus** (*compressive strength*) määratakse survekatsel, kasutades vormi- ja kärnisegudest pressitud standardseid proovikehi. Eristatakse **märgtugevust** (*green strength*) ja **kuivtugevust** (*dry strength*). Tugevus suureneb sideainesisalduse ja segu tiheduse suurenedes ning liivaterade suuruse vähenedes.
2. **Vormi kõvadus** (*mold hardness*) näitab vormi vastupanu kohalikule deformeerumisele. Määratakse standarditud kõvadusmeetodit kasutades.
3. **Plastsus** (*plasticity*) on segu omadus omandada mudeli (kärnkasti) kuju. Plastsus suureneb, kui suureneb savi- ja veesisaldus ning peenenevad liivaterad.
4. **Järeleandvus** (*collapsibility*) on valuvormi või kärnimaterjali (segu) võime deformeeruda või puruneda metalli kahanemisel tekkinud jõudude toimet. Kui suureneb vormisegu poorsus, suureneb ka järeleandvus.
5. **Voolavus** (*flowability*) on vormi- või kärnisegu tehnoloogiline omadus täita vormi- või kärnkasti, kui segu tihendatakse staatiliste või dünaamiliste jõudude abil. Voolavus peab tagama segu ühesuguse tihendatavuse vormi- või kärnkasti kõikides osades.
6. **Termokeemiline püsivus** (*thermochemical stability*) näitab segu võimet taluda sulamata või metalliga keemiliselt reageerimata kõrgeid temperatuure. Termokeemiline püsivus väldib segu valandile paakumist.



7. **Väljalöödavus** (*shakeout property, knock-out ability*) on vormi- või kärnimaterjali omadus, mis näitab, kui raske on jahtunud kärni ja vormiosi valandilt eemaldada. Hea väljalöödavusega on segud, mis kaotavad kuumenedes sideaine lagunemise tõttu tugevuse.
8. **Gaasiläbilaskvus** (*permeability*) on vormi- või kärnisegu omadus lasta läbi gaase. Gaasiläbilaskvus kasvab, kui suureneb vormiliiva hulk ja tera läbimõõt.

Vormi- ja kärnisegude koostis oleneb valatavast metallist, valandite mõõtmetest ja massist, vormimisviisist, tootmise iseloomust (üksik-, seeria- või hulgitootmine), liivvormi tüübist (kuivvorm või märgvorm) ja teistest teguritest.

Majanduslikult on kõige otstarbekam kasutada **märgvorme** (*green sand molds*). Sellised valuvormid sisaldavad tavaliselt 7...12 % savi ja 4...6 % vett. **Kuivvorme** (*dry sand molds*), mida on kuivatatud 200...350 °C juures tugevuse tõstmiseks ja niiskuse eemaldamiseks, kasutatakse juhul, kui märgvormid ei taga valandite kvaliteeti (suured või keerukad valandid). Kuivvormid sisaldavad kuni 16 % savi ja 5...9 % vett (enne kuivatamist).

Vormisegused liigitatakse ühtseks vormiseguks, mudeliseguks ja täiteseguks. **Mudelisegu** (*facing sand*) on vormisegu, mis moodustab vormi pindmise, sulametalliga kokkupuutuva kihi. Niisugused segud koosnevad kvaliteetliivast ja -savist. **Täiteseguga** ehk **täidisseguga** (*backing sand*) täidetakse vormkast pärast mudeli (mudelpaadi) katmist mudeliseguga. Täiteseguna kasutatakse juba pruugitud vormisegu. Liivvormide masinvalmistamisel, seeria- ja hulgitootmisel kasutatakse nii mudeli- kui täiteseguna **ühtset vormisegu** (*unit sand*). See segu sisaldab lisaks kasutatud vormisegule 5...15 % ulatuses värskeid komponente (liiva, savi).

Kärnisegudele esitatakse termokeemilise püsivuse, tugevuse, gaasiläbilaskvuse, järeleandvuse ja väljalöödavuse osas suurendatud nõudmised. Põhjuseks on kärnide rasked töötingimused valuvormis: kärnid puutuvad sulametalliga vahetult kokku ja kuumenevad intensiivselt. Kärnisegude koostis valitakse, lähtudes kärnide mõõtmetest ja kujust, asukohast vormis, valatavast metallist ja valandi seinapaksusest.

Vormi- ja kärnisegused võib liigitada sideaine järgi.

1. **Anorgaaniliste sideainetega segud** (*inorganic binder sands*). Siia kuuluvad segud, milles sideaineks on savi, vesiklaas ( $\text{Na}_2\text{OSiO}_2$ ), tsement, fosforhape jne.  
Lisaks segudele liivast ja savist on anorgaanilise sideainega vormi- ja kärnisegude valmistamisel kõige rohkem kasutatud leidnud **vesiklaas** ehk **naatrium-silikaat** (*sodium silicate, water glass, waterglass*). Selline segu kõveneb kiiresti (täielik kõvastumine 5... 15 minuti jooksul), kui valuvormi või kärnkasti süsihappegaasiga läbi puhuda. Kõvenemise reaktsioon on  $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 +$

$\text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{SiO}_2$ . Eraldub  $\text{SiO}_2$  hüüve, mis seob liivaterad. Vesiklaasi eeliseks on segu pikk kasutusaeg ja mürgiste gaaside puudumine. Puuduseks on sideainena vesiklaasi kasutava segu hügrooskoopsus, väike kasutusaeg ning suhteliselt halb väljalöödavus ja järeleandvus.

2. **Orgaaniliste sideainetega segud** (*resin-binder sands*). Kasutatakse orgaanilisi vees lahustumatuid, veega mittemärguvaid sideaineid (sünteeetilised vaigud, õlid, pigi jms) ning orgaanilisi vees lahustuvaid, veega märguvaid sideaineid (sünteeetilised vaigud, dekstriin jms). Sideaine kõvenemise viisi järgi liigitatakse neid
  - **külmkõvenevateks segudeks** (*no-bake bonded sands, air-set bonded sands*), mis kõvenevad toatemperatuuril. Vastavat protsessi nimetatakse **külmkõvenduseks** (*cold-box process, gas-hardened process*);
  - **kuumkõvenevateks segudeks** (*heat cured sands*), mis kõvenevad kuumutamisel 230... 290 °C. Vastavat protsessi nimetatakse **kuumkõvenduseks** (*hot-box process*).

### **Piirdeaine. Vormipinne ja vormivärv**

**Piirdeaine** ehk **eraldusaine** (*parting agent, parting compound*) on mudeli (mudelplaadi, kärnkasti) pinnale kantav materjalikiht, et kergendada mudeli (mudelplaadide) vormist ja kärni kärnkastist eemaldamist. Piirdeaineid, näiteks kvartsliiva, kantakse vormi poolte vahele, et neid oleks teineteisest vormimisel kergem eemaldada. Kasutatakse tahkeid ja pulbrilisi materjale (grafiit, talk, kivisöetolm) ning vedelikke (räniorgaanilised vedelikud jms).

**Vormipinne** (*mold coating*) vormi sisepinnale kantav kiht (kate), mis vähendab vormisegu valandi külge põlemist ja parandab valandi pinna kvaliteeti. Näiteks malmivalus kantakse vormi pinnale pulbrilist grafiiti või magneesiumoksiidi, puidusöe ja bentoniidi segu jms. Terasevalus on kasutamist leidnud tolmjas kvarts, magneesiumoksiidi ja savi segu jms.

**Vormivärv** (*mold wash*) kui vormipinde erim on kuiva valuvormi pinnale kantav tulise (tulekindla materjali) vedelsuspensioon, mille abil saadakse ettenähtud pinnakvaliteediga valand. Tulisena kasutatakse grafiiti, grafiidi ja bentoniidi segu (malmivalus), tsirkoonliiva, kvartsjahu (terasevalus) jne. Kärni pinda värvitakse sobiva koostisega **kärnivärviga** (*core wash*).

### **Vormi- ja kärnisegude valmistamine**

Vormi- ja kärnisegude valmistamise etapid on

- 1) värskete komponentide (liiv, savi jt) ettevalmistamine,
- 2) kasutatud vormisegu ettevalmistamine,
- 3) vormi- ja kärnisegu valmistamine.

Värsked komponendid (liiv, savi) kuivatatakse (200...250 °C). Pärast kuivatamist liiv sõelutakse, savi peenestatakse kuulveskis ja sõelutakse. Teised vormimaterjalid (kvartsjahu, grafiit, sünteetilised vaigud jms) saavad valutehasesse valmis kujul.

Väga tähtis etapp valutehnoloogias on **vormisegu regenereerimine** (*sand reclamation, reclamation*). Kasutatud vormisegu purustatakse valtside vahel, sellest eraldatakse metall (rauasulamid magnetseparaatoris), segu sõelutakse. Erinevad sideained (savi, sünteetilised vaigud, vesiklaas) nõuavad eritehnoloogiaid.

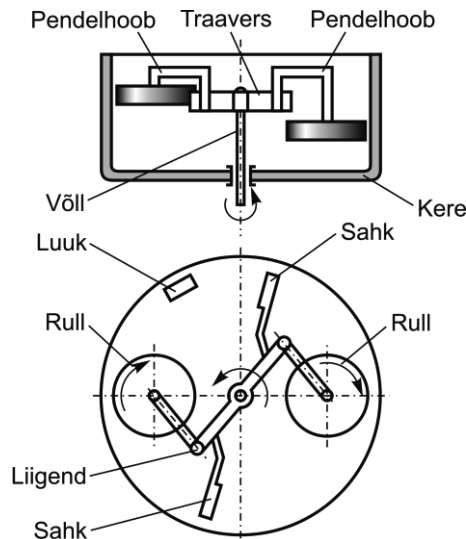
Vormi- või kärnisegu valmistamise etapid savisideaine korral on

- 1) segu komponentide doseerimine,
- 2) komponentide segamine,
- 3) laagerdamine,
- 4) kobestamine.

Segu segatakse erisegistiga – **kollersegistiga** ehk **kolleriga** (*muller, sand muller*) (Joonis 9.21). Savi lisatakse vesisuspensioonina (35...40 osa savi, 60...65 osa vett).

Segu laagerdatakse, s.o hoitakse (0,5...3 tundi) eripunkris, et tagada niiskuse ühtlane jagunemine. Segistite täiustamise tõttu on see aeg pidevalt lühenenud ja sageli laagerdamist ei kasutatagi.

**Kobestamine** (*aeration*) suurendab vormi- ja kärnisegude gaasiläbilaskvust ning ühtlustab tihendatavust. Kobestamiseks kasutatakse aeraatoreid, desintegraatoreid ja teisi kobestamisseadmeid.



**Joonis 9.21.** Horisontaalrullidega kollersegist

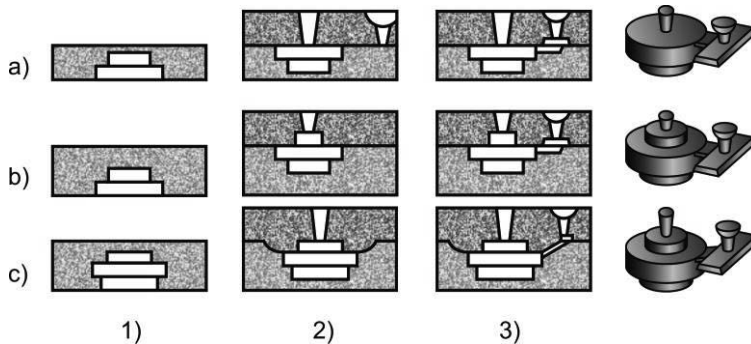
Savita vormi- või kärnisegude valmistamise tehnoloogia erineb mõnevõrra kirjeldatust. Juhul kui segu kasutamisaeg on lühike, valmistatakse see erisegistitega otse töökohal.

## Käsivormimine

**Käsivormimise** ehk **käsitsivormimise** (*hand molding, bench molding*) põhioperatsioonid on vormkasti täitmine seguga, **segu tihendamine** (*ramming*) ja mudeli eemaldamine. Üksik- ja väikeseeriatootmisel sooritatakse need operatsioonid käsitsi, suurseria- ja hulgitootmisel aga vormimasinatel.

Edaspidi käsitletakse käsivormimise olulisemaid tehnoloogilisi variante.

1. Valuvormi valmistamine tervikmudeliga kahte vormkasti (Joonis 9.22a), mis koosneb kolmest etapist: alumise vormipoolde täitmine ja tihendamine, ülemise vormipoolde täitmine ja tihendamine, vormi kanalisüsteemi sisselõikamine ja vormi koostamine.
2. Vormi valmistamine poolitatava mudeliga kahte vormkasti (Joonis 9.22b).
3. Vormi valmistamine tervikmudeliga, kasutades väljalõikeid (Joonis 9.22c).



**Joonis 9.22.** Käsivormimise tüüpnäited: a – tervikmudeliga kahte vormkasti vormimine; b – poolitatava mudeliga kahte vormkasti vormimine; c – tervikmudeliga kahte vormkasti vormimine, kasutades väljalõikeid; 1, 2, 3 – vormi valmistamise põhietaapid

Esimest varianti kasutatakse juhul, kui tervikmudelit saab vormist lihtsalt eemaldada. Kolmas variant näitab aga, et sellist mudelit on võimalik ka tervikuna eemaldada, kui kasutada vormi väljalõikeid. Üksiktootmisel tasub see end ära, kuna poolitatavat mudelit teha on keerukas ja kallis.

## Masinvormimine

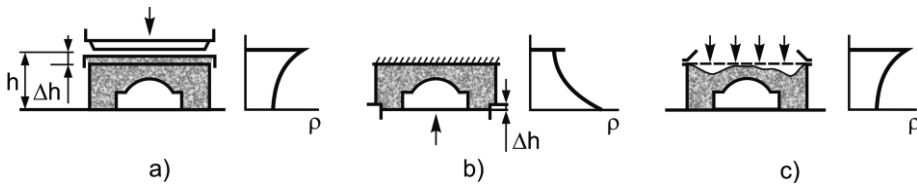
Masinvormimist kasutatakse valuvormide seria- ja masstootmisel. Vormitakse tavaliselt kahte vormkasti, kasutades mudelplaate (Joonis 9.15). Vormi masinvalmistamisel on põhioperatsioonid mehhaniseeritud, s.t seguga täitmine, tihen-

damine ja valumudeli eemaldamine vormist. Sellega on tagatud valandi suurem täpsus ja töö kõrgem tootlikkus.

Segu tihendamise viisi järgi liigitatakse **vormimasinad** (*molding machines*) press-, raputus-, puhur-, heitur-, impulss- ja kombineeritud masinateks. Kärnide valmistamiseks kasutatavaid masinaid nimetatakse **kärnimasinateks** (*core machines, core-making machines*).

1. **Pressmasin** ehk **pressvormimasin** (*squeeze molding machine, squeezer*) on hüdrauliline ajam ning segu tihendatakse vormkasti kas mudeliga alt või templiga ülalt pressides (Joonis 9.23). Vajaliku tiheduse saamiseks templiga pressimisel (Joonis 9.23a) asetatakse vormkasti ülaossa raam, mis näitab segu kõrguse vähenemist  $\Delta h$  pressimisel. Segu suhteline deformatsioon  $\Delta h/h$  määrab vormi tiheduse. Templiga ülalt pressimisel on templi vahetus läheduses vormi tihedus suurem kui mudeli läheduses. Seda põhjustab seguosakeste ning segu ja vormkasti seinte vaheline hõõrdetakistus. Segu ebahütlane tihedus ja vormi nõrkus mudeli läheduses on meetodi puudused. Mudeliga alt pressides (Joonis 9.23b) seda pole, vorm on mudeli läheduses tihedam ja tugevam kui eemal.

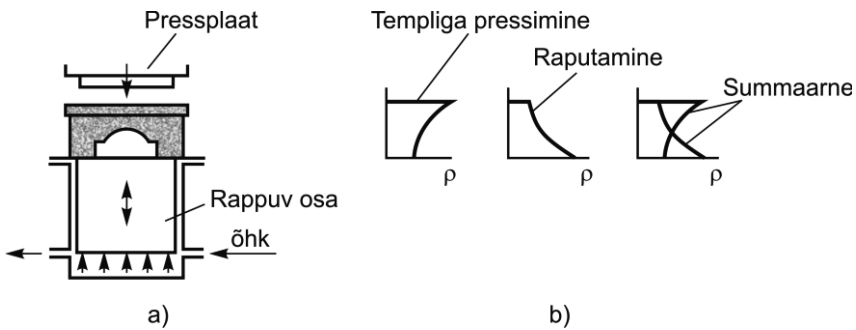
Vormisegu tihedust saab ühtlustada, kasutades **diafragmapressmasinat** (*flexible-diafragma squeezing machine, flexible-diafragma squeezer*). Vormisegu tihendatakse neis diafragmaga suruõhu jõul (Joonis 9.23c). Ka sellisel juhul on vormisegu tihedus vormi ülaosas suurem kui mudeli läheduses. Kuid vormi tiheduse jaotus nii vormi kõrguses kui ka mudeli pinnal on ühtlasem.



**Joonis 9.23.** Vormisegu pressmasinate põhimõtteskeemid ja tiheduse jaotus vormis: a – templiga ülalt pressimine; b – mudeliga alt pressimine; c – diafragmapressimine ( $\rho$  – vormi tihedus)

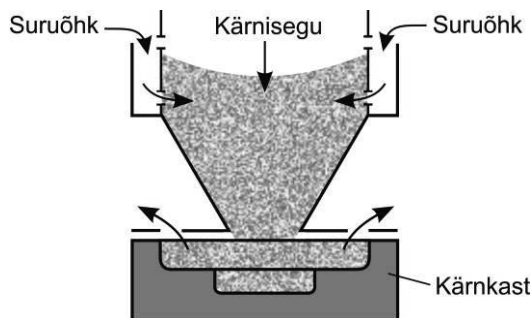
2. **Rappemasin** ehk **rappvormimasin** (*jolt-type molding machine, jolting molding machine*) toimub segu tihendamine löökide kineetilise energia (raputamise) abil. Masina töölaual vormkasti olev segu tihendatakse laua korduvate järskude langemistega ülalt alla. Tiheduse jaotus on sel juhul samsugune kui mudeliga alt pressides, kuna vormi ülaosas on vormisegu mass väiksem võrreldes alaosaga.

3. **Rappe-pressmasin** ehk **raputus-pressmasin** (*jolt-squeeze molding machine*, *jolt-squeezer*) on kombineeritud vormimasin vormisegu tihendamiseks raputamisega koos järgneva pressimisega (Joonis 9.24). Sel juhul erineb vormisegu tihendus vormi kõrguses vähe, kuna summeeruvad rappemasina ja pressimise tihedused, mis on kõrguses vastupidised. Kombineeritud rappe-pressmasina raputusosa töötab suruõhuga. Valuvorm asetseb kolvi otsal oleval töölaual, mis kerkib suruõhu toimel kuni rõhulanguni, s.t väljalaskekanali avanemiseni. Siis langeb töölaud koos vormiga tagasi alla, andes tihendamiseks vajaliku löögi. Tsüklil kordub, kuni saavutatakse vormi vajalik tihendus.



**Joonis 9.24.** Rappe-pressmasina põhimõtteskeem (a) ja tiheduse jaotus vormi kõrguses (b): 1 – tiheduse jaotus templiga pressimisel; 2 – raputamisega saadud tiheduse jaotus; 3 – summaarne tiheduse jaotus ( $\rho$  – vormi tihendus)

4. **Segupuhurit** (*blow-fill molding machine*) kasutatakse kärnide ja väikeste vormide valmistamiseks. Seda tüüpi masinat, milliseid kasutatakse kärnide valmistamisel, nimetatakse **segupuhur-kärnimasinaks** (*core-blowing machine*, *core blower*). Kärni- või vormisegu antakse ette ja tihendatakse suruõhujoaga (Joonis 9.25). Masina tootlikkus on suur ja saadakse ühtlase tihedusega segu.



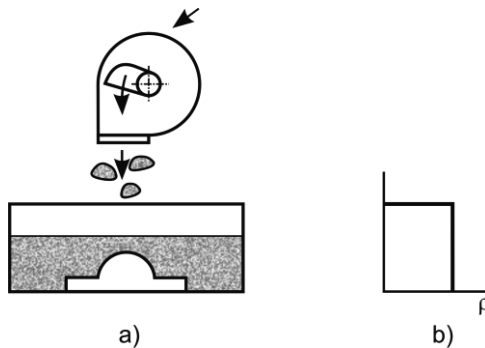
**Joonis 9.25.** Segupuhur-kärnimasina põhimõtteskeem

5. **Seguheitur** ehk **segupaiskur** (*sand slinger molding machine, sand slinger*) tihendab segu pildumise (heitmise, paiskamise) teel vormkasti (Joonis 9.26). Need masinad on kõige tootlikumad. Seguheitureid kasutatakse suurte, vähemalt  $0,5 \text{ m}^3$  vormkastide täitmiseks ja tihendamiseks. Nende tootlikkus on  $3 \dots 50 \text{ m}^3/\text{h}$ . Tsentrifugaalseguheiturite peamine tööseadis on segu paiskav kopp, mida käitab suure kiirusega pöörlev (kuni  $1400 \text{ l/min}$ ) võll. Vormisegu antakse ette linttransportööriga läbi seguheituri keres oleva ava. Sealt haarab pöörlev kopp segu, paisates selle kiirusega kuni  $30 \text{ m/s}$  vormkasti. Seguheituri (segupaiskuri) segu paiskav pea on vormkasti ulatuses nihutatav. Vormi tihedus  $\rho$  vormkasti kõrguses ei muutu.
6. **Impulssvormimasin** (*pressure-wave molding machine*) tihendab segu löök-laine toimel, mis tekib gaasi (õhu) kiirel sisenemisel vormkasti.

Vastutusrikkaks operatsiooniks on mudeli eemaldamine vormist ilma vormi purustamata. Mudeli valuvormist eemaldamisviisi järgi liigitatakse vormimasinaid järgmiselt:

- 1) mudeli väljatõmbamisega masinad,
- 2) pöörduva töölauaga masinad.

Mudeli väljatõmbamisega vormimasinates eemaldatakse mudel (mudelplaat) seisvast vormkastist väljatõmbamise teel või seisvalt mudelilt (mudelplaadilt) vormkasti ülestõstmise teel. Pöörduva töölauaga masinates eelneb mudeli väljatõmbamisele vormi pööramine  $180^\circ$  võrra. Analoogiliselt liigitatakse kärni kärnkastist eemaldamise viisi järgi kärnimasinaid.

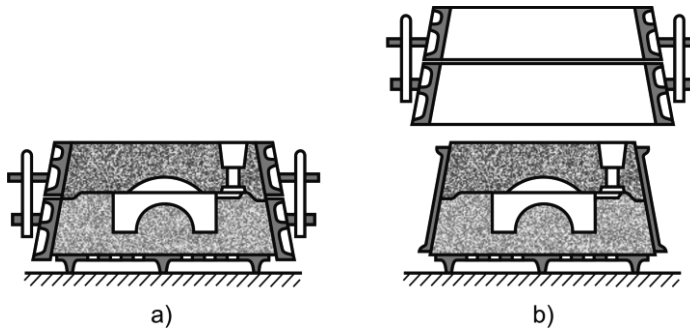


**Joonis 9.26.** Seguheituri põhimõtteskeem (a) ja tiheduse  $\rho$  jaotus vormi kõrguses (b)

### Valuvormide masinvalmistustehnoloogiad

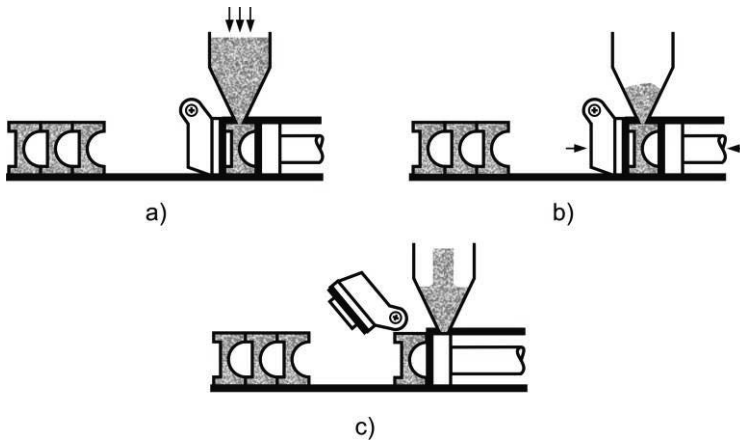
1. **Vormimine vormkasti** (*flask molding*) on levinud meetod. See vormimine on analoogiline käsitsi kahte vormkasti vormimise tehnoloogiaga.
2. **Vormimine vormkasti eemaldusega** (*removable flask molding*) – vormimine eri rakises (äratõstetavas vormkastis), mis pärast vormi valmistamist eemal-

datakse ja asendatakse õhukese **vormihoidikuga** (*slip jacket, mold jacket*) (vt Joonis 9.27). **Äratõstetav vormkast** (*slip flask, taper flask*) on vormimisjärgselt kergelt eemaldatav tänu kaldega sisepindadele. Vormimine vormkasti eemaldusega on majanduslik, sest vormkastide valmistamise kulud vähenevad oluliselt.



**Joonis 9.27.** Vormimine vormkasti eemaldusega: a – kahte vormkasti vormitud valuvorm; b – vormkasti eemaldamine ja vormihoidikuga asendamine

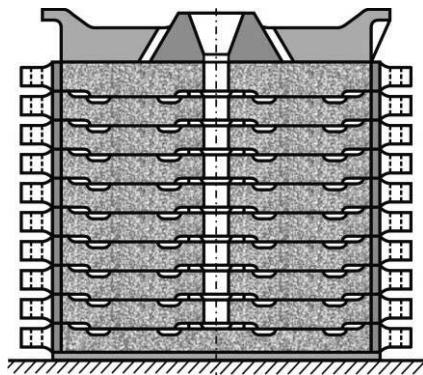
3. **Vormimine vormkastita** (*flaskless molding*) leiab kasutamist väikeste valandite hulgitootmisel. Selle meetodi puhul toimub vormimine vormimasina (vormimismasina) kambris (vt Joonis 9.28). Vertikaalse eraldustasandiga valuvormi osad valmistatakse pöörduvate mudelplaatidega vormimasinatel.



**Joonis 9.28.** Vertikaalse eraldustasandiga valuvormi osade masinvormimine: a – vormiskambri vormiseguga täitmine; b – vormi tihendamine pressimisega; c – vormi vormimiskambrist eemaldamine

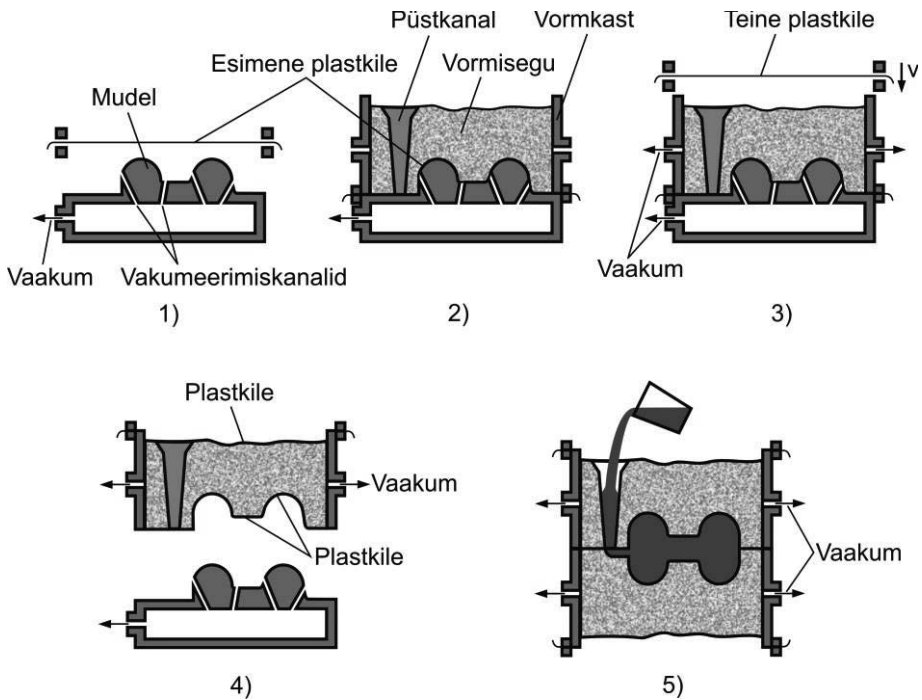


4. **Virnvormimisel** (*stack molding*) koostatakse vorm mitmest eraldi vormitud üksteise peale laotud osast, millel on ühine valukauss ja mida seob ühine püstkanal (Joonis 9.29). Virnvormimisel kasutatakse tootmispinda efektiivselt. Virnvalamisega toodetakse lihtsaid valandeid.



**Joonis 9.29.** Virnvormimine

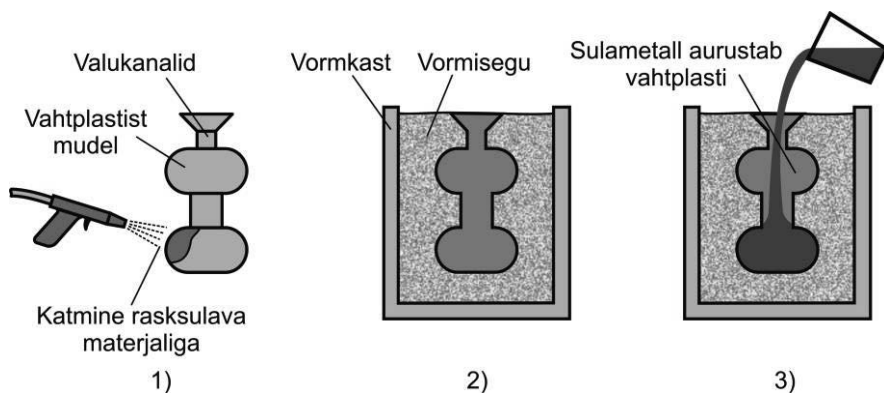
5. **Vaakumvormimine** (*vacuum molding, V-process*) toimub sideaineta, kuiva liiva kasutades, mida hoitakse ja tihendatakse vormkastis polümeerkile ja vaakumi abil. Mudelplaat (Joonis 9.30) kaetakse õhukese ( $\leq 0,1$  mm) kuumutatud polümeerkilega. Samal ajal luuakse kambris vaakum, mille toimele polümeerkile liubub tihedalt mudelplaadile (Joonisel 9.30, 1. etapp). Mudelplaadile asetatakse kuiva kvartsliiduga täidetud vormkast. Liiva tihendatakse vibraatoriga ning vormkasti pind tasandatakse (Joonisel 9.30, 2. etapp). Kuum polümeerkile liubub vaakumi tõttu tihedalt vormkasti välispinnale (Joonisel 9.30, 3. etapp). Analoogiliselt vormitakse valuvormi teine pool. Mõlemad vormipooled eraldatakse mudelplaatidelt (Joonisel 9.30, 4. etapp) ning koostatakse vorm (Joonisel 9.30, 5. etapp). Vormi kooshoidmiseks jätkatakse vormkastide vakumeerimist poolvormide valmistamise, vormi koostamise, täitmise ning valandi jahtumise kestel. Lisaks mudelplaatidele kasutatakse vaakumvormimisel samuti gasifitseeruvaid mudeleid (vt 9.3.1 Tehnoloogilised rakised ja nende projekteerimise põhimõtted).



**Joonis 9.30.** Vaakumvormimise tehnoloogilised etapid: 1 – polümeerkile (plastkile) liibumine mudelplaadile; 2 – vormkasti täitmine liivaga; 3 – polümeerkile liibumine vormkastile; 4 – vormipoole eemaldamine mudelplaadilt; 5 – vormi koostamine ja täisvalamine

6. **Gaasistuvmodelvalu** ehk **gaasistuvmodelprotsess** (*expanded polystyrene process, evaporative-pattern casting*) on valuvormide valmistamise ja valandite tootmise protsess valamisel valuvormist mitte-eemaldatavaid gaasistuvaid kordkasutusega mudeleid kasutades (vt Joonis 9.31). Kuna iga valandi tarvis on vaja valmistada valumudel, moodustab selle omahind märkimisväärse osa valandi omahinnast.

Valuvormil eralduspind puudub, mistõttu puudub vajadus kahe vormipoole vormimiseks. Vormimisel kasutatakse nii sideainega vormisegu kui ka sideaineta vormiliiva. Viimasel juhul lihtsustab märgatavalt vormimaterjali taaskasutus.



**Joonis 9.31.** Gaasistuvmudelprotsess: 1 – vahtpolüstüroolmudeli katmine rasksulava pindega; 2 – vormimine vormisegu tihendades; 3 – valamine ja mudeli gaasistumine

7. **Süsihappegaasprotsess** (*sodium silicate-CO<sub>2</sub> molding, sodium silicate/ CO<sub>2</sub> process, carbon dioxide process*) – liivvormide valmistamine, kasutades vormiliiva sideainena **vesiklaasi** ehk **naatriumsilikaati** (*sodium silicate, water glass*). Sellise sideainega valuvorm kõveneb läbipuhumisel süsihappegaasiga järgneva reaktsiooni kohaselt (vt samuti p. 9.2.4.: Vormi- ja kärnisegud):



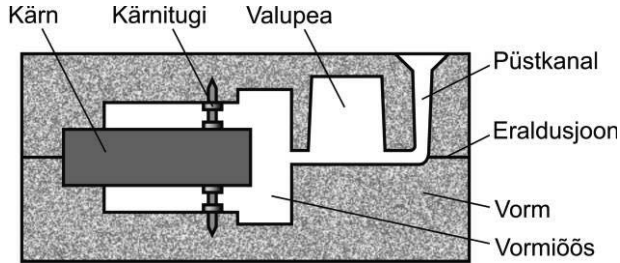
8. **Põrandvormimine** (*pit molding*). Vormitakse põrandasse kaevatud aukudesse nn valukaevenditesse ehk kessonidesse. **Valukaevend** ehk **kesson** (*permanent molding pit*) on tellistest või raudbetoonist põrandasse ehitatud kast. Põrandvormimist kasutatakse suurte valandite tootmisel, kui metallist vormkastid ei ole otstarbekad.

### Vormide kuivatamine, koostamine ja täisvalamine

Valuvormid võivad olla kuivatamata (märjad, niisked), kuivatatud või pindkuivatatud. **Märgvormi** (*green-sand mold*) enne sulametalliga täitmist niiskuse eemaldamiseks ja tugevuse tõstmiseks ei kuivatata. Selliseid vorme kasutatakse väikeste valandite tootmisel. **Kuivvormi** (*dry-sand mold*) kõik osad enne metalliga täitmist niiskuse eemaldamise ja tugevuse tõstmise eesmärgil kuivatatakse.

Kuivatamise lõpptemperatuur oleneb sideainest (savi, polümeersed vaigud jne), samuti vormi (kärni) kujust ja seinapaksusest. Liivsavivorme kuivatatakse temperatuuril 300...350 °C, liivvaikvorme 200...280 °C. Kuivatamine kestab olenevalt vormi (kärni) seinapaksusest mõnest minutist mitme tunnini. Kuivatusaja lühendamiseks kasutatakse **pindkuivatatud valuvorme** (*skin-dried molds*), millel kuivatatakse vaid 10...40 mm paksune pinnakiht. Selline vorm tuleb kohe täis valada. Keemiliselt kõvenevate vormi- ja kärnisegude puhul vajadust kuivatamise järele pole.

Valuvormi koostamistäpsusest oleneb suurel määral valandi täpsus. Vormi koostamisel vormipoolte õõnsused puhastatakse suruõhuga, asetatakse **kärnipesade** (*core seats*) järgi kohale kärnid, kontrollides vajaduse korral nende asetust šablooniga. Juhul kui kärnipesade järgi ei saa kärne kohale asetada, kasutatakse selleks metallist valmistatud **kärnitugesid** (*chaplets*) (vt Joonis 9.32)



**Joonis 9.32.** Kärni toetamine kärnitugedega

Vormi koostamisel asetatakse vajadusel kohale **vormjahutid** (*chills*) (Joonis 9.8c, d) ning filtrid vedelmetalli puhastamiseks räbust ja mittemetalsetest osakestest.

Lõpuks tsentreeritakse vormipooled terassõrmedega.

Vormi koostamisel tuleb arvestada, et lahtiselt teineteisele asetatud vormipooltest võib ülemine vormis tekkiva tõstejõu mõjul nihkuda. Tõstejõud koosneb üldjuhul kahest komponendist

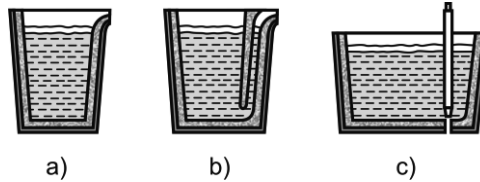
$$F_t = F_1 + F_2, \quad (9.11)$$

kus  $F_1$  – jõud, mida tekitab vedeliku rõhk vormis,  
 $F_2$  – kärni tõstejõud.

Ülemise poolvormi ülestõusmise vältimiseks kinnitatakse vormipooled klambritega, poltidega, kiiludega või asetatakse ülemisele poolvormile raskus.

Vormidesse **valamisel** (*pouring*) kasutatakse mitmesuguse konstruktsiooniga **valukoppasid** (*foundry ladles, pouring ladles*). Valukoppade põhitüüpideks on **pöörkopp** ehk **kallutatav kopp** (*tip-pour ladle, tilting ladle*), mida sulametalli väljalaskmiseks kallutatakse (Joonis 9.33a), **stopperkopp** (*bottom-pour ladle, bottom-tap ladle*), millest metall valatakse valuvormidesse põhjas asetseva sulguriga suletava ava kaudu (Joonis 9.33c). **Sifoonekopp** (*teapot ladle*) on pöörkopp, mille konstruktsioon väldib räbu valuvormi sattumist (Joonis 9.33b). Ka stopperkopp hoiab ära räbu sattumise valuvormi, aga selle puuduseks on väljavoolukiiruse muutumine ajas. Stopperkoppasid kasutatakse põhiliselt terasevalus.

Enne valuvormi valamist seisutatakse sulametalli kopas, et gaas ja mittemetalsed osakesed eemalduksid. Valuvormi täidetakse pideva joana nii, et valukauss oleks valamise kestel täis.



**Joonis 9.33.** Valukoppade põhitüübid: a – pöördkopp; b – sifoonkopp; c – stopperkopp

### Valandi jahutamine, väljalöömine, puhastamine

Tootlikkuse seisukohalt tuleks lühendada valandi jahtumisaega vormis. Teisalt tuleb aga arvestada, et valandi kiirel jahtumisel õhus tekivad sisepepinged. Valandi varajane väljalöömine (eemaldamine) vormist põhjustab suuri jääkpepingeid, deformatsioone, pragusid. Temperatuur, mille juures valand vormist eemaldatakse, oleneb sulami omadustest ja valandi konstruktsioonist (keerulisusest). Valandid jahutatakse üldjuhul järgmise temperatuurini:

– terasvalandid	500...700 °C
– malmvalandid, sh	200...900 °C
– keerulised malmvalandid	200...300 °C
– lihtsad malmvalandid	800...900 °C.

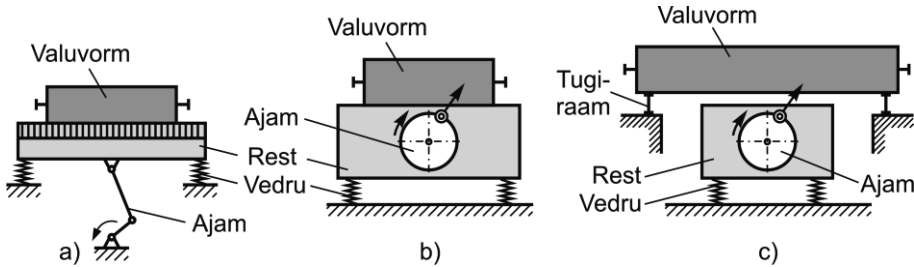
Valumetallist, valandi keerulisusest ja massist olenevalt võib jahtumine kesta mõnest minutist, päevade ja isegi nädalateni. Mõnikord kasutatakse jahtumise kiirendamiseks sundjahutust, näiteks puhutakse valuvormile õhku.

**Valandi väljalöömiseks** (*shake-out, knock-out*) kasutatakse väljalöömiseseadmeid, tavaliselt **väljalöömisresti** (*shake-out grid, knock-out grid*). Tööpõhimõtte järgi eristatakse ekstsentrisk- (Joonis 9.34a), inerts- (Joonis 9.34b) ja inertsilöökväljalöömisreste (Joonis 9.34c)). Kõigi nende seadmete kasutamisel puruneb valuvorm inertsijõudude tõttu, mis tekivad ülespaisatud vormi langemisel restile või tugiraamile.

**Kärnieemalduseks** ehk **kärni väljalöömiseks** (*core knock-out, decoring*) on eriseadmed, näiteks pneumomeislid, vibroseadmed, hüdrokambrid (veejoaga väljalöömine), elektrohüdraulilised seadmed (kärni purustamine lööklainega, mis tekib kaarlahendusel vedelikus).

Pärast vormist väljalöömist toimub **valandi järeltöötlus** (*fettling, dressing*) mis seisneb kärnide, valukanalite ja pinnadefektide eemaldamises, juga- või trummelpuhastamises. Valukanalite eemaldamiseks kasutatakse nii mehaanilisi vahendeid

(pneumomeisleid, abrasiivkettaid jms) kui ka elektrikaar- või gaaslõikamist, elektrokeemilist lõikamist. Malmvalandilt valukanalite eemaldamiseks võib osutuda piisavaks kerge lõök.



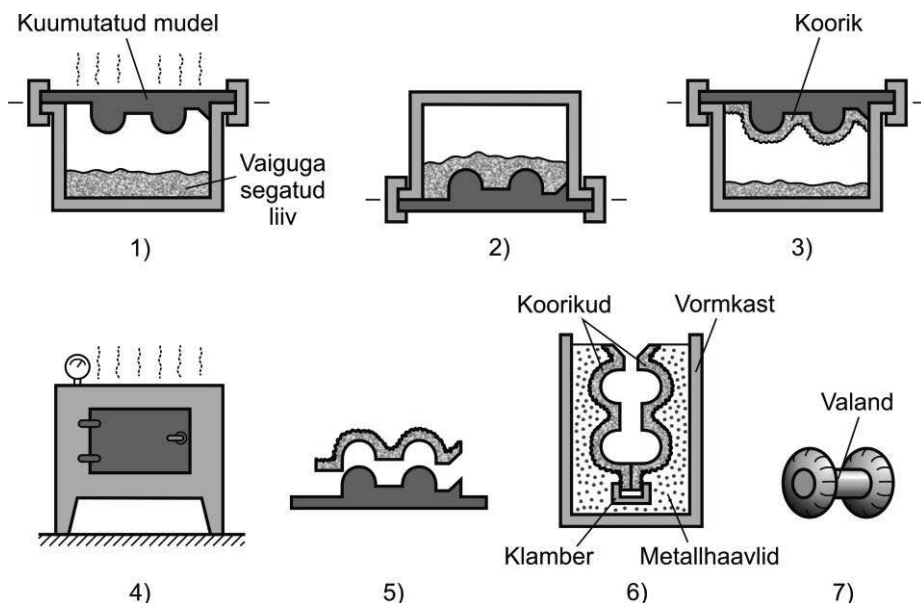
**Joonis 9.34.** Väljalöömisrestid: a – ekstsentriväljalöömisrest; b – inertsväljalöömisrest; c – inertslöökväljalöömisrest

Valandite puhastamiseks kasutatakse **trummelpuhastamist** ehk **trummeldamist** (*tumbling*), **jugapuhastamist** (*blast cleaning, blasting*) ja elektrokeemilist puhastamist. Trummelpuhastamisel puhastatakse valandi pinda abrasiivmaterjaliga või teiste kõvade puhastuskehadega täidetud pöörlevas trumlis. Trummelpuhastamisel võib puhastamine toimuda samuti valandite omavahelise hõõrdumise teel. Jugapuhastamisel suunatakse abrasiivosakesed (enamasti haavlid) gaasijoa või tsentrifugaaljõu toimele puhastatava tooriku pinnale. **Haavelpuhastamisel** (*shot blasting*) puhastatakse pinda haavlipritsiga. Valandite pinda saab puhastada **haavliheituriga** (*airless shot-blasting machine*), milles haavlid saavutavad vajaliku kiiruse tsentrifugaaljõudude toimele. Elektrokeemiline puhastamine toimub erilahustega, mis vormi- ja kärnisegu jäägid valandi pinnal lahustavad.

### 9.3.2. Koorikvalu

**Koorikvorm** (*shell mold*) on 8...12 mm paksuse seinaga vorm, mis valmistatakse kuumutatud metallmudeli abil. Vormimaterjaliks on liiv, mida seob termoreaktiivne vaik (6...7 %). Vaiguna kasutatakse põhiliselt pulberbakeliiti, mis koosneb fenoolformaldehüüdvaigust ja 10... 15 % kõvendist – urotropiinist. Selline vaik sulab 100...120 °C juures, kattes liivaosakesed õhukese vaigukilega. Kuumutamisel 200...250 °C vaik kõveneb (polümeriseerub) pöördumatult, tagades liivvaikvormi suure tugevuse.

Kasutatakse plakeeritud ja plakeerimata vormisegu. Plakeerimata segu koosneb liivast ja pulbrilisest vaigust. Levinud on plakeeritud segu, milles liivaosakesi katab õhuke vaigukiht.



**Joonis 9.35.** Koorikvormi valmistamise etapid: 1 – kuumutatud mudelplaadi asetamine punkrile; 2 – punkri pööramine 180°; 3 – punkri pööramine 180° ja poolvormi saamine; 4 – kooriku suunamine koos plaadiga täiendavale kuumutamisele; 5 – kooriku eemaldamine mudelplaadilt; 6 – vormi koostamine; 7 – valand

Koorikvorm valmistatakse järgmiselt (Joonis 9.35): 230...340 °C kuumutatud metallist mudelplaat kinnitatakse punkrile, mida pööratakse koos vormiseguga 180°. Vormisegu puistatakse mudelplaadile ja hoitakse seal 10...30 s. Vaik sulab 6...10 mm paksuses vormisegu kihis ja kleebib liivaterad kokku. Punker pööratakse endisesse asendisse tagasi koos reageerimata vormiseguga. Koorikut koos mudelplaadiga kuumutatakse ahjus 300...350 °C juures 1...1,5 min. Kõvenenud koorik eraldatakse mudelplaadilt. Analoogiliselt valmistatakse koorikvormi teine pool, samuti koorik-kärnid (õõnsad kärnid). Enne vedelmetalliga täitmist koostatakse vormid, kasutades klambreid või liimimist. Deformeerumise ja purunemise vältimiseks asetatakse valuvormid konteinerisse ja ümbritsetakse puistematerjaliga, enamasti malmhaavlitega.

Koorikvalu eelisteks liivvormvaluga võrreldes on valandi suurem täpsus ja hea pinnakvaliteet, takistamatu kahanemine (vorm kaotab kõrgel valutemperatuuril tugevuse), valandit on kerge vormist eemaldada, vormisegu kulub vähe, protsessi on kerge automatiseerida. Koorikvalu puudusteks on kalli vormimaterjali, termoaktiivse vaigu vajadus, valandi piiratud mass ning vajadus kasutada kallist metallist mudelplaati.



Koorikvalumeetodil toodetakse keerulisi, sageli õhukeseseinalisi kuni 300 kg massiga valandeid (mootorrataste silindriplokid, autode vânt- ja nukkvõllid jt).

### 9.3.3. Täppisvalu

Mõiste **täppisvalandivalu** (*precision casting*) sisaldab kõikvõimalikke täppisvalandite tootmise protsesse – **täppisvalu** (*investment casting, precision investment casting*), **keraamikavormvalu** (*ceramic mold casting*) ja **kipsvormvalu** (*plaster mold casting*). Nimetatud valumeetodite ühiseks tunnuseks on kordkasutusega valuvormid ja valandi märgatavalt suurem täpsus võrreldes liivvormvaluga.

Täppisvalu on tervikvaluvormides täppisvalandite tootmise protsesside üldnimetus, mille puhul kasutatakse kordkasutusega valumudeleid. Seega on täppisvalu kõige iseloomulikumateks tunnusteks kordkasutusega valumudelid ja tervikvormid. Olenevalt kordkasutusega mudeli materjalist liigitatakse täppisvalu:

- 1) **sulavmudeltäppisvalu** (*investment casting, lost-wax process*);
- 2) **gaasistuvmudeltäppisvalu** (*replicast CS process*)
- 3) **lahustuvmudeltäppisvalu** (*soluble pattern process*).

Meetod, kus õhukese seinaga tervikvorm saadakse kergsulava mudeli abil, on leidnud kõige laialdasemat kasutamist. Seetõttu kasutatakse mõisteid täppisvalu ja sulavmudeltäppisvalu sageli kui sünonüüme.

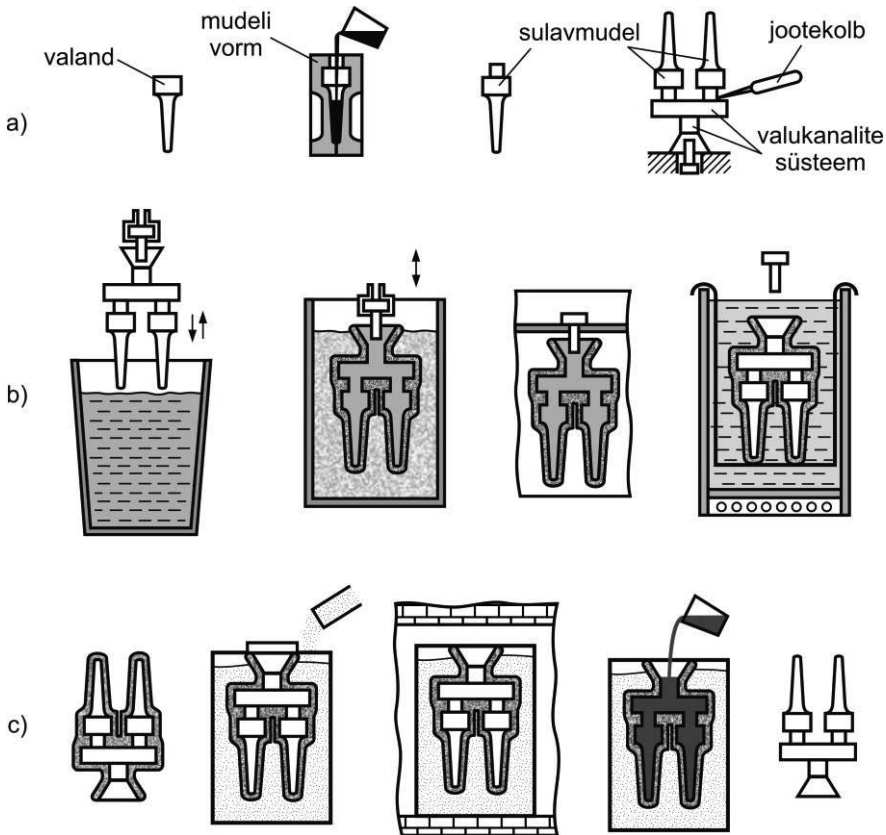
Tavaliselt valmistatakse sulavmudeleid kergsulavast segust (parafiin, steariin, jt rasvhapped) (Joonis 9.36). Edasi koostatakse mudelitest (kuni sada) ühise valukanalite süsteemiga plokid. **Mudeliplokile** (*pattern tree, tree*) tekitatakse koorik, mis moodustab valuvormi. Kooriku tekitamiseks kastetakse mudeliplokk keraamilisse suspensiooni (näiteks kvartsitolm ja etüüsilikaat), tolmutatakse kvartsliivaga ja kuivatatakse õhus või ammoniaagi aurudes (Joonis 9.36b). Sääraseid kihte kantakse mudelile kuni 8, suure valandi korral isegi kuni 12, kooriku paksuse 5...15 mm saamiseks. Vormis olev mudel sulatatakse välja kuumas vees, kuuma auru või õhuga, vahel ka kõrge keemistemperatuuriga (200...250 °C) vedelikus. Kerglahustuva mudeli korral mudel ei sula, vaid lahustub vees. Õhukese seinaga kooriku deformeerumise vältimiseks valamisel ümbritsetakse ta puistmaterjaliga (Joonis 9.36c). Vormi tugevdamiseks kuumutatakse seda elektriahjus 500...1100 °C (olenevalt valatavast metallist). Kuuma vormi valatakse sulametall. Pärast valandi jahtumist purustatakse koorik vibrosõeltel ja valand puhastatakse mehaaniliselt nii nagu liivvormvalu puhul või leostatakse leelises.

Tervikvormi tõttu on sulavmudeliga täppisvalu eelis valandi täpsus. Kuum vorm võimaldab saada keerulisi ja õhukese seinaga (0,3...0,5 mm) valandeid, mis ei sisalda kahanemis- ja gaasitühikuid. Täppisvalu on **lõppkujulähedaste** (*net shape, near-net shape*) toodete saamise protsess, kuna valandid enamasti ei vaja täiendavat mehaanilist töötlemist. Meetodi puudused on tehnoloogia keerukus, valandi kõrge omahind



(kuni 10 korda kõrgem kui liivvormvalu puhul) ja piiratud mass. Meetod on majanduslikult tõhus suurseria- ja hulgitootmises.

Sulavmudeltäppisvalu kasutatakse täpsete, keeruka kuju ja õhukese seinaga mõnest grammist kuni 150 kg massiga valandite tootmiseks. Eriti otstarbekas on niiviisi toota mehaaniliselt raskelt töödeldavatest metallidest täppisvalandeid, mis ei vaja täiendavat mehaanilist töötlemist (kuumustugevatest sulamitest turbiinilabad, korrosiooni-kindlatest sulamitest pumbadetailid jms).



**Joonis 9.36.** Sulavmudeltäppisvalu: a – mudeli valmistamine; b – kooriku valmistamine; c – vormi koostamine ja sulametalli vormi valamine

Laialdaselt kasutatakse gaasistuvmudeltäppisvalu. Selle valamise puhul valmistatakse mudel tavaliselt vahtpolüstüroolist, mis gaasistub, kui vorm täita sulametaliga. Selle meetodi puhul kasutatakse õhukeseseinalist keraamilist vormi nii nagu sulav- või lahustuvmudeliga täppisvalu korral.

### 9.3.4. Kipsvormvalu ja keraamikavormvalu

**Kipsvormvalu** (*plaster mold casting, plaster casting*) on täppisvalandite tootmise protsess, kordkasutusega kipsvormides. Vormimaterjalina kasutatakse **põletatud kipsi** (*plaster, plaster of Paris*)  $\text{CuSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ . Seda toodetakse **kipsist** (*gypsum*)  $\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  põletamise teel temperatuuridel 140...190 °C. Lisaks põletatud kipsile, lisatakse vormisegusse lisandeid, mis kiirendavad kipsvormi kõvenemist, tugevdavad, parandavad gaasiläbilaskvust ning väldivad vormi pragunemist kõvenemisel. Näiteks lisatakse pragunemise vältimiseks, samuti kõvenemise kiirendamiseks magneesium- või ränioksiidi, samuti talki. Vormi saab tugevdada vormisegule klaaskiudu lisades.

Kipsvormi valmistamisel segatakse põletatud kips ja lisandid veega ja valatakse kordvukasutusega (metallist) mudelile vormkastis. Vormi kõvastumisaeg võimaldamaks mudeli eemaldamist on umbes 20 minutit. Järgneb valuvormi täiendav, mitmetunnine kuumutamine niiskuse eemaldamiseks, vormi koostamine ja täitmine sulametalliga.

Kipsvormvalu eeliseks on valandite täpsus ja hea pinnakvaliteet. Saab toota keeruka kuju ja väikese seinapaksusega (0,5...0,6 mm) valandeid. Kipsvormvalu puuduseks on suhteliselt väike tulekindlus, mistõttu kipsvorme saab kasutada vaid valandite tootmisel suhteliselt madala sulamistemperatuuriga metallisulamitest: Al-, Mg- ja Cu-sulamid. Puuduseks on ka kipsvormide pikk valmistusaeg – pärast esialgset kõvastumist vajab vorm täiendavat pikaaegset kuumutamist. Selletõttu kipsvormvalu eriti ei sobi valandite hulgitootmisel. Puudustena saab esile tuua veel vormimaterjali taaskasutusvõimaluse puudumist ning kipsvormi väikest gaasiläbilaskvust. Selle puuduse tõttu kasutatakse kipsvormvalus nn **Antioch-protsessi** (*Antioch process*) spetsiaalse vormiseguga (50 % põletatud kipsi, 50 % liiva ning kuumutamisel gaasistuvad lisandid). Kõvendamiseks kuumutatakse selliseid kipsvorme autoklaavides. Saadakse rahuldava gaasiläbilaskvusega kipsvormid.

Kipsvormvalu kasutatakse suhteliselt väikese massiga, madala sulamistemperatuuriga mitterauasulamitest (Al-, Mg- ja Cu-sulamid) täppisvalandite tootmisel.

**Keraamikavormvalu** (*ceramic mold casting*) on täppisvalandite tootmisprotsess kordkasutusega keraamilistes mitmeosalistes vormides, mis valmistatakse kordvukasutusega metallmudeleid kasutades. Tehnoloogia on sarnane kipsvormvaluga, välja arvatud vormimaterjal, millel on parem tulekindlus kui kipsvormide kasutamisel. Vormimaterjalina kasutatakse näiteks suure tulekindlusega tsirkoonliiva ( $\text{ZrSiO}_4$ ).

Keraamikavormvalu eelised on sarnased kipsvormvaluga: valandite suur täpsus ja hea pinnakvaliteet. Puudused on vormimaterjali suur maksumus ja võimaluse puudumine kordvukasutuseks. Seda valumeetodit kasutatakse tavaliselt rauasulamitest (malm, teras) ja kõrge sulamistemperatuuriga mitterauasulamitest (Ti-sulamid) valandite

valmistamisel. Erinevalt kipsvormvalust saab keraamikavormvalu kasutada nii väikese kui suure massiga (tonnides) valandite tootmisel.

## 9.4. VALU KORDUVKASUTUSVORMIDESSE

**Korduvkasutusvormvalu** ehk **püsivormvalu** (*permanent-mold casting*) on valu korduvkasutusega (metallist, grafiidist jms materjalist) vormidesse. Käsitleme järgnevaid valumeetodeid: kokillvalu, madalsurvevalu, survevalu, vaakumvalu, väljavalamisvalu, tsentrifugaalvalu, pidevvalu, pressvalu, pooltardvalu.

Metallist (peamiselt hallmalm, teras) korduvkasutusvorme kasutatakse peamiselt suhteliselt madala sulamistemperatuuriga metallisulamitest (Al-, Mg-, Cu-, Zn-, Pb-sulamid, samuti malm) valandite suurseria- ja hulgitootmisel. Grafiitvormides toodetakse teras- ja malmvalandeid.

Lisaks korduvkasutusvormvalule eristatakse samuti **poolkorduvkasutusvormvalu** ehk **poolpüsivormvalu** (*semipermanent-mold casting*), mille puhul kasutatakse metallist kärnade asemel kordkasutusega liivkärne.

Korduvkasutusvormvalu meetodite eelised on valandite suur täpsus ja hea pinnakvaliteet (liivvormvaluga võrreldes). Saab toota **lõppkujulähedasi** (*net shape, near-net shape*) valandeid, millised kas ei vaja või vajavad vaid minimaalset mehaanilist järeltöötlemist. Eeliseks on samuti valuvormide paljukordne kasutamine. Korduvkasutusvormide suur soojusjuhtivus tagab valandite kiire jahtumise ja selle tõttu struktuuri peeneteralisuse ning paremad mehaanilised omadused kui näiteks valanditel liivvormvalus. Puudused on korduvkasutusvormide suur maksumus ja võimalus kasutada valandite tootmiseks vaid suhteliselt madala sulamistemperatuuriga metallisulamitest. Mida kõrgem on valusulami sulamistemperatuur, seda väiksem on vormi püsivus (vt 9.4.7. Metallvormide püsivus). Valu puhul metallvormidesse tekitavad probleeme samuti vormi gaasiläbilaskvus ja järeleandlikkus valandi tardkahanemisel. Valuvormi **ventilatsioon** (*venting*) tagamiseks tuleb vormi eralduspindadel ette näha spetsiaalsed, õhu väljumist võimaldavad ventilatsioonikanalid. Järeleandlikkuse puudumine raskendab metallvormides keeruka vormiga valandite valmistamist. Kahanemisest tingitud pingete vähendamiseks ja pragunemise vältimiseks eemaldatakse valand metallvormist kuumalt, kohe pärast valandi tardumist (kristalliseerumist).

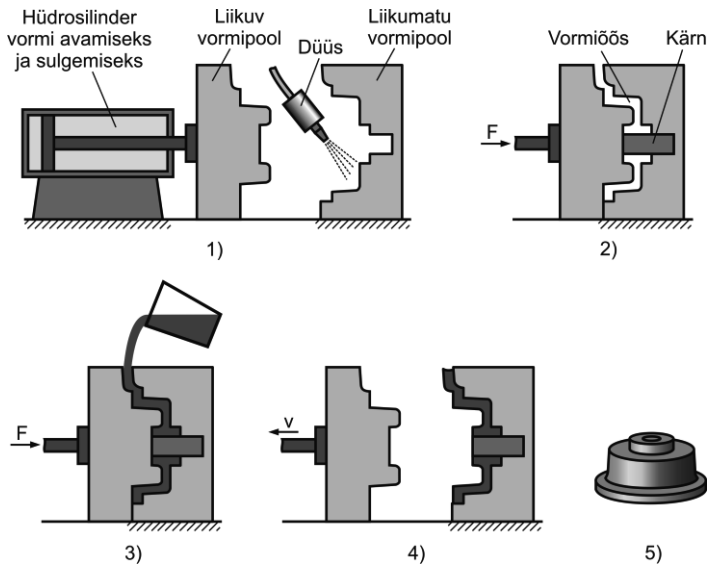
### 9.4.1. Kokillvalu

**Kokillvalu** (*gravity die casting, permanent mold casting*) puhul kasutatakse korduvkasutusega metallvorme. Meetod võimaldab toota täpseid valandeid, ära jääb keeruka mudeli tegemine ja vormimine.

**Kokill** ehk **metallvorm** (*metal mold*) on lahtivõetamatu (mitteavatav) või lahtivõetav (avatav) valuvorm, mis valmistatakse malmist, vahel ka tööriistaterasest. Mõned metallvormi osad, enamasti sisemisi õõnsusi vormivad kärnid, võivad olla valmistatud liivast või kipsist (mitteraasulamite valu). Gaaside väljumiseks tehakse avatava kokilli eraldustasandile 0,2...0,5 mm läbimõõduga **ventilatsioonikanalid** (*vents*). Keerukama kokillivalandi tootmiseks kasutatakse koostatavate kärnidega kokille. Kokillivalutehnoloogia etapid on näha Joonisel 9.37.

Liivvormvaluga võrreldes on kokillivalul järgmised iseärasused:

1. Kokilli ettekuumutamine ja tööpindade katmine vormipindega (võldib valandi kiiret jahtumist ja suurendab kokilli püsivust). Tööpindade pinded hoiavad ära valandi kleepumise vormi külge ja neelavad osa vormis olevatest gaasidest (vt Joonis 9.37).
2. Valandi intensiivne jahtumine tagab peeneteralise struktuuri, kuid ei võimalda saada õhukeseseinalisi valandeid.
3. Puudub praktiliselt kokilli järeleandvus, mis ei võimalda saada keerulise kujuga valandeid (sisepingete ja pragude tekkimise oht).



**Joonis 9.37.** Tehnoloogilised etapid kokillivalus: 1 – vormi eelkuumutus ja vormipindega katmine; 2 – kärnide (kui vajalik) kohaleasetamine ja kokilli sulgemine; 3 – valamine; 4 – kokilli avamine ja valandi eemaldamine; 5 – kokillivaland

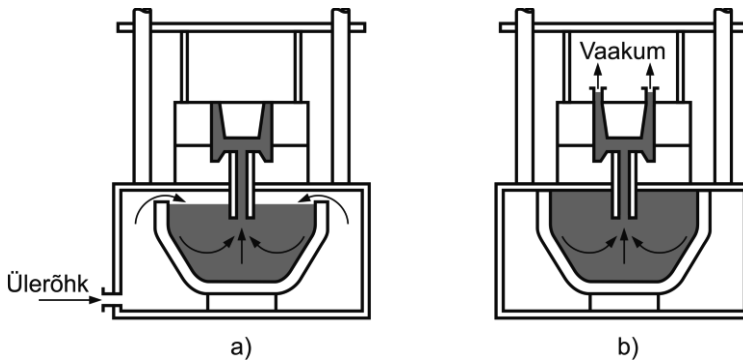
Kokillivalu eelised on korduvkasutus: ühes kokillis võib teha kuni 1000 terasvalandit, kuni 10 000 malmvalandit ja kuni 250 000 alumiiniumvalandit. Eelised on ka kokillivalandi suur täpsus, valandi peeneteraline struktuur ja protsessi kerge automati-

seeritavus. Sageli kasutatakse **kokillvalumasinaid** (*permanent-mold casting machines*). Kokillvalu puudused on kokilli suur maksumus ja suhteliselt väike püsivus kõrge sulamistemperatuuriga metallist (malm, teras) valandite tootmisel. Suurema püsivusega on kokillid, mille tööpinnad on kaetud paksu (5...15 mm) kvartsliidist ja sideaine segust valmistatud **voodriga** (*facing*).

Kokillvalu kasutatakse piiratud massiga (enamasti kuni mõnisada kg) valandite tootmiseks suhteliselt madala sulamistemperatuuriga metallidest (Al-, Mg-, Cu-sulamid, malm). Kokilli suure maksumuse tõttu on kokillvalu levinud põhiliselt suurseria- ja hulgitootmises.

#### 9.4.2. Madalsurvevalu, vaakumvalu, väljavalamisvalu

Kokillvaluga (mille puhul vorm täitub sulametalliga ilma rõhku või vaakumit kasutamata) sarnane valumeetod on **madalsurvevalu** (*low-pressure permanent-mold casting*) ja **vaakumvalu** (*vacuum permanent-mold casting*). Madalsurvevalu puhul täidetakse vorm sulametalliga altpoolt tiiglis oleva metalli pinnale mõjuva gaasirõhu (kuni 0,1 MPa) toimel (Joonis 9.38a). Vaakumvalu puhul imetakse sulametall vaku-meeritud vormiõõnsusse (Joonis 9.38b).



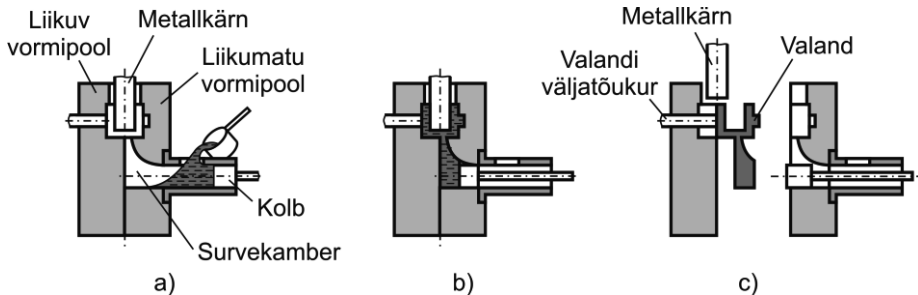
**Joonis 9.38.** Madalsurvevalu (a) ja vaakumvalu (b)

Madalsurvevalu ja vaakumvalu eelised võrreldes kokillvaluga on valuvormi täitmine puhta, metallivanni sisemusest tuleva metalliga. Valandite gaasipoorsus on väike, seetõttu mehaanilised omadused on paremad kui kokillvalul.

Kokillvalule sarnaselt täidetakse valuvorm **väljavalamisvalu** ehk **irrutusvalu** (*slush casting*) puhul. Erisuseks on see, et pärast ettenähtud paksusega kooriku moodustumist järelejäänud sulametall valatakse valuvormist välja. Kasutatakse madala sulamistemperatuuriga metallisulamitest õõnsate valandite valmistamisel, näiteks metallist skulptuurid, valgustite seest õõnsad metallkorpused jms.

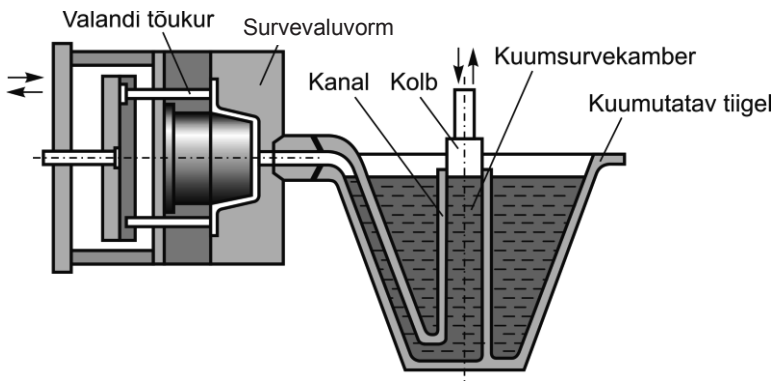
### 9.4.3. Survevalu

**Survevalu** (*die casting, pressure die casting*) on valumeetod valandite tootmiseks korduvkasutusega **survevalu vormis** (*die*), sulametalliga suure survega (kuni 150 MPa) ja kiirusega (kuni 120 m/s) täitmise teel. Survevalu põhimõtet kasutatakse samuti toodete vormimiseks plastidest (vt p 14.2.1) ja pulbermaterjalidest (vt p 10.4.3). Survevalu on lühikese töötsükliga ja toimub vaid survevalumasinatega. Olenevalt **survevalumasinate** (*die-casting machine*) survekambri töötingimustest eristatakse külm- ja kuumsurvekambriga survevalumasinaid.



**Joonis 9.39.** Horisontaalkambriga külmkambersurvevalumasin: a – sulametalli survekambri sisse doseerimine; b – survevalu vormi täitmine; c – valandi survevalu vormist eemaldamine

**Külmkambersurvevalumasina** (*cold-chamber die-casting machine*) survekamber paikneb horisontaalselt või vertikaalselt. Horisontaalkambriga masinal (Joonis. 9.39) doseeritakse sulametal eraldi sulatusseadmest survekambri sisse, kus sulametal surutakse kolviga rõhul kuni 150 MPa survevalu vormi õõnde. Survevalu vorm koosneb liikuvast ja liikumatust vormipooltest. Valandi õõnsused saadakse metallkärnidega. Pärast valandi pinnakihi tardumist kärn eemaldatakse ja kui valand on lõplikult tardunud, avaneb survevalu vorm ning valand lükatakse õõnest tõukuritega välja. Seejärel lõigatakse valandilt maha valukanalid ja vormipoolte vahele jooksnud metall. Enne uue töötsükli algust puhastatakse survevalu vormi tööpind suruõhuga ja kaetakse valandi külgekeevitumise vältimiseks kuumuskindla vormipindega. Õhk ja gaasid eemalduvad vormipoolte eraldustasandil olevate ventilatsioonikanalite või vormi vakumeerimise abil. Külmkambersurvevalumasinaid kasutatakse peamiselt Al-, Mg-, Cu-sulamitest, malmist ja terasest valandite tootmiseks.



**Joonis 9.40.** Survevalu kuumkambersurvevalumasinal

**Kuumkambersurvevalumasinal** (*hot-chamber die-casting machine*) paikneb survekamber masina kuumutatavas sulametalli tiiglis (Joonis 9.40). Kui kolb on ülemises asendis, siis täitub survekamber sulametalliga. Kolvi liikumisel alla avad sulguvad ja vorm täidetakse 10...30 MPa rõhu all oleva sulametalliga. Pärast valandi tardumist tõuseb kolb üles algasendisse, sulametalli jääk voolab survekambrisse tagasi ja tõukurid tõukavad valandi vormist välja. Niisuguseid survevalumasinaid kasutatakse väiksemate (kuni 25 kg) madala sulamistemperatuuriga metallidest (Zn-, Al- ja Mg-sulamid) valandite tootmisel. Selliste masinate tootlikkus on suur (kuni 3600 valandit tunnis) ja kuna metall teel vormiõõnde praktiliselt ei jahtu, siis on võimalik toota väga väikseid (massiga mõni gramm) valandeid.

Survevalul on järgmised iseärasused:

1. Metall täidab vormi suure kiirusega (kuni 120 m/s) ja väga lühikese aja jooksul (0,01...0,6 s). Seetõttu võib sulametall vormi ventilatsioonivad sulgeda ja vaid väike osa gaasist jõuab vormist väljuda. Saadakse defektidega (gaasipoorsusega) valand. Gaasipoorsusega valandeid ei ole võimalik termotöödelda, kuna kuumutamisel muudab gaasipoorides paisuv gaas valandi pinna ebatasaseks.
2. Metall jahtub vormis kiiresti, mistõttu valukanalid tarduvad kiirelt, katkestades valandi sulametalliga tootmise. See võib, vaatamata valandi tardumisele surve all, põhjustada gaasipoorsusele lisaks valandi kahanemispoorsust. Samas tagab metalli kiire jahtumine valandi peeneteralise struktuuri.
3. Hüdraulilise löögi survevaluvormi täitumisel põhjustab suure kiirusega liikuva metalli järsk pidurdumine. Hüdraulilise löögi tõttu on valandi õhuke pinnakiht (0,02...0,2 mm) poorideta ja saadakse suurepärase pinnasiledusega õhukese-seinalisi (alates 0,8 mm) valandeid. Hüdraulilise löögi tõttu on survevalumasinad varustatud vormipooli tugevalt kooshoidvate seadmetega.

Survevalu eelised on suur tootlikkus (üle tuhande valandit tunnis), valandite täpsus ja pinnasiledus, protsessi automatiseeritavus, valandite peeneteraline struktuur. Puudus on piiratud mass (kuni 50 kg), gaasi- ning kahanemispoorsus, survevalu vormi keerukus ja suur maksumus ning väike püsivus kõrge sulamistemperatuuriga metallist (malm, teras) valandite tootmisel.

Survevalu kasutatakse põhiliselt madala sulamistemperatuuriga metallidest (Al-, Mg-, Cu-, Zn-sulamid) valandite suurseria- ja hulgitootmisel. Sellisel meetodil valmistatakse näiteks Al-sulamitest karburaatoridetaile, mootoriplokke, Cu-sulamitest sanitaartehnilist armatuuri jt tooteid. Suurema tootlikkuse tõttu tõrjub survevalu paljudel juhtudel välja kokillivalu.

Survevalu peamise puuduse – gaasi- ja kahanemispoorsuse vältimiseks kasutatakse **hapniksurvevalu** (*pore-free process, GPF-process, O-process*) ja **vaakumsurvevalu** (*vacuum die casting*). Hapniksurvevalu puhul täidetakse pressvorm enne sulametalliga täitmist hapnikuga. Hapnik, reageerides sulametalliga, moodustab oksiide, millel on metallis väga väike maht. Kui kasutatakse vaakumsurvevalu, vakumeeritakse pressvorm enne surve all täitmist.

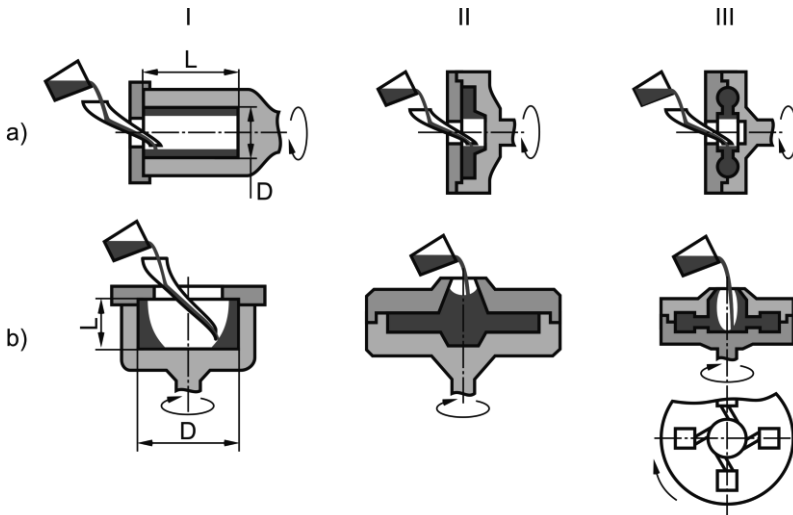
#### 9.4.4. Tsentrifugaalvalu

**Tsentrifugaalvalu** (*centrifugal casting*) on valumeetodite üldnimetus, mille puhul sulametalli vormitakse tsentrifugaaljõudude toimele. Vormina kasutatakse enamasti metall-, harvem liiv- ja koorikvormi. Olenevalt pöörleva vormi telje asendist eristatakse **horisontaaltsentrifugaalvalu** (*horizontal centrifugal casting*) (Joonis 9.41a) ja **vertikaaltsentrifugaalvalu** (*vertical centrifugal casting*) (Joonis 9.41b). Valandi sise- ja välispindade moodustumise ja vormiõõnsuse valumasina telje suhtes asetuse alusel eristatakse järgmisi tsentrifugaalvalu viise:

1. **Täistsentrifugaalvalu** (*true centrifugal casting*) on valumasina pöörlemisteljega ühtiva sümmeetriateljega valandite tootmine, nii et tsentrifugaaljõudude toimele moodustub sisemine õõnsus (Joonis 9.41, skeem I). Täistsentrifugaalvalu võib kasutada nii horisontaalse (Joonis 9.41a, skeem I) kui ka vertikaalse teljega valumasinaates (Joonis 9.41b, skeem I).
2. **Pooltsentrifugaalvalu** (*semicentrifugal casting*) on valumasina pöörlemisteljega ühtiva sümmeetriateljega valandite tootmine, ilma et tsentrifugaaljõudude väljas moodustuks sisemine õõnsus. Selleks kasutatakse tavaliselt vertikaalse pöörlemisteljega valumasinaid (Joonis 9.41b, skeem II). Pooltsentrifugaalvalu kasutamisel kujundavad valuvormi elemendid nii valandi välis- kui ka sisepinnad, näiteks kasutatakse sisepinnal kärne. Valandi tootmiseks sulametalliga kasutatakse sümmeetriateljel asuvaid valupäid (kompensaatoreid).



3. **Tsentrifuugvalu** (*centrifuge casting, centrifuge centrifugal casting*) on valandite tootmine, kui valumasina pöörlemistelje suhtes sümmeetriliselt paigutatud vormiõõnsused täidetakse tsentrifugaaljõudude toimetel. Pooltsentrifugaalvaluga analoogiliselt kasutatakse valdavalt vertikaalse pöörlemisteljega valumasinaid (Joonis 9.41b, skeem III). Meetod võimaldab täita korraga mitu vormiõõnsust. Tsentrifuugvalu skeemi kasutatakse sageli täppisvaluvormide (vt p 9.3.3) täitmiseks sulametalliga tsentrifugaaljõudude toimetel.



**Joonis 9.41.** Tsentrifugaalvalu skeemid: a – horisontaaltsentrifugaalvalu; b – vertikaaltsentrifugaalvalu; I – täistsentrifugaalvalu, II – pooltsentrifugaalvalu, III – tsentrifugaalvalu

Tähtis tehnoloogiline parameeter tsentrifugaalvalus on vormi pöörlemiskiirus. Horisontaaltsentrifugaalvalu korral mõjuvad igale vedelikuosakesele gravitatsioonijõud  $F_g = mg$  ning tsentrifugaaljõud  $F_t = m\omega^2 r$ , kus  $m$  on mass,  $g$  – normaalkiirendus,  $\omega$  – nurkkiirus ja  $r$  – osakese kaugus vormi pöörlemisteljest. Valandi õõnessilindrilise kuju tagamiseks peab teoreetiliselt olema täidetud tingimus  $F_t > F_g$ , vastasel juhul ei tõuse metall ülemisse asendisse. Siit saab vormi pöörlemise minimaalse nurkkiiruse

$\omega_{\min} = \sqrt{g/r}$ . Kuna  $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ , kus  $n$  on 1/min,  $\omega = s^{-1}$ , siis minimaalne pöörlemis-

sagedus  $n_{\min} = \frac{30}{\pi} \sqrt{g/r}$ . Selleks et saada kvaliteetseid valandeid, tuleb leida opti-

maalne pöörlemissagedus. Praktikas valitakse pöörlemissagedus tingimusest, et **gravitatsioonitegur** ( $G$ -factor), mis näitab, kui mitu korda ületab tsentrifugaaljõud gravitatsioonijõudu  $k = F_t / F_g$  oleks vahemikus 30...100. Tingimusest  $F_t = kF_g$  leiame, et optimaalne pöörlemissagedus

$$n_{opt} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{k \cdot g}{r}} \approx 30 \sqrt{\frac{k}{r}} \quad (9.12)$$

Tsentrifugaalvalul on järgmised valandite kvaliteedi seisukohast kasulikud isearasused:

1. Tsentrifugaaljõud parandavad vormi täitumist sulametalliga ja kiirendavad mittemetalsete osakeste eraldumist. Kergemad, mittemetalised osakesed, kogunevad valandi vabapinnale (täistsentrifugaalvalus) või sisemistesse osadesse (pooltsentrifugaalvalus).
2. Tsentrifugaaljõudude toimele õõnsaks pöördkehaks kujunenud metall jahtub kõige kiiremini väljast, juhtides soojust vormi seina. Tulemusena surutakse väiksema tihedusega kuumem vedelmetall valandi vabapinnale (täistsentrifugaalvalu) või sisemistesse kihtidesse (pooltsentrifugaalvalu) ja see jääb valandi tardumise lõpuni vedelaks, toites valandit. Seega on tegemist suunatud tardumisega väljast sisse.
3. Valandi hea toitmine sulametalliga, samuti gaaside eraldumise vähenemine tsentrifugaaljõudude väljas tagavad poorideta valandi.
4. Valandi kiirem kristalliseerumine paigalseisva vormiga võrreldes tagab peeneteralise struktuuri.

Erandjuhtudel võivad ka tsentrifugaaljõud kahjulikult mõjuda ja anda keemiliselt koostiselt ebahütlase valandi (valandite likvatsioon tiheduse järgi). On võimalikud järgmised variandid:

1. Sulametall on heterogeenne, s.t kahe erineva tihedusega vedelfaasi segu. Näiteks pliipronksi puhul rikastub valandi väliskiht pöörlevas valuvormis raskema pliiga, sisekihid kergema vasega.
2. Sulametallist eralduv tardfaas on vedelfaasist kergem. Näiteks üleeutektse silumiini (>12 % Si) kristalliseerumisel eraldub vedelikust algul puhas Si, mis on kergem kui Al, ja koguneb vabapinnale (sisemistesse kihtidesse).
3. Sulametallist eralduv tardfaas on vedelfaasist raskem. Näiteks teras- ja malmvalandi kristalliseerumisel sisaldavad tardfaasi osakesed kergemaid elemente (C, P, S) vähem kui vedelfaas. Selle tulemusena on nende elementide sisaldus valandi sisekihtides suurem.

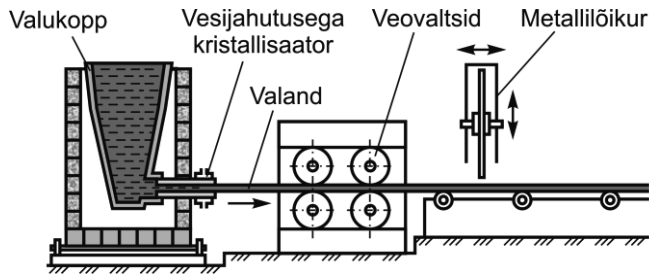
Tsentrifugaalvalu eelised on saada sisemiste õõnsustega valandeid kärne kasutamata, valandite peeneteralisus, poorsuse puudumine, täpsus. Sisemise vabapinnaga valanditel pole valukanaleid. Puudused on likvatsiooni võimalus tiheduse järgi ja piirangud valandite vormile ja massile.

Tsentrifugaalvalu meetodil toodetakse kõige rohkem õõnsaid valandeid. Horisontaalse pöörlemisteljega tsentrifugaalvalumasinate toodetakse tavaliselt suhteliselt pikki (pikkuse ja läbimõõdu suhe  $L > 3D$ ) valandeid, näiteks malmtorusid, automootori malmhülse, kuullaagrite terasvõrude toorikuid jms. Vertikaalse pöörlemisteljega masinate toodetakse lühemaid valandeid ( $L < 3D$ ).

### 9.4.5. Pidev- ja poolpidevvalu

Metallitööstuses kasutatakse pidevvalu valuplokkide tootmisel (vt p 5.1.1.: Terasetootmine). **Pidevvalu** (*continuous casting*) meetodil valmistatakse ka pikki ja ühesuguse ristlõikega valandeid. Metall valatakse vesijahutusega kristallisaatorisse, millest tõmmatakse pidevalt välja tardunud valand (Joonis 9.42). Juhul kui vedelmetalli kristallisaatorisse pideva valamise aeg on piiratud, nimetatakse meetodit **poolpidevvaluks** (*semicontinuous casting*). Olenevalt valandi kristallisaatorist väljatõmbamise suunast eristatakse vertikaal- ja horisontaalpidevvalu (Joonis 9.42).

Kristallisaatorid (valuvormid) valmistatakse olenevalt valusulamist vasest, Al-sulamitest, terasest või grafiidist. Kristallisaatori pikkus oleneb valumetalli soojusjuhtivusest, valandi ristlõikest, kalduvusest pragunemisele. Malmvalandi puhul arvestatakse valgendumise (pinnakihil valgumalmi tekkimise) võimalusega.



Joonis 9.42. Horisontaalpidevvalu

Pidev- ja poolpidevvalu iseärasused on järgmised:

1. Piiratud pikkusega kristallisaatoris (vormis) saab toota praktiliselt piiramatul pikkusega valandeid.
2. Valandi kõikide osade kristallumine toimub ühesugustes tingimustes, mistõttu saab pikkuses ühesuguse struktuuri ja omadustega valandeid.
3. Suur temperatuurigradient valandi ristlõikes ja valandi pidev sulametalliga tootmine loovad tingimused suunatud tardumiseks, mistõttu võib saada tiheda (poorideta) struktuuriga valandi.
4. Valandi kristallumine lõpeb väljaspool kristallisaatorit (vormi), mis tagab protsessi kõrge tootlikkuse.

Pidev- ja poolpidevvalu eelised on metalli hea kasutamine (puuduvad valukanalid), valandi täpsus, poorideta struktuur, valuvormi pikaajalisus ja väikesed valmistamiskulud. Meetodi puudus on erineva kujuga valandite saamiseks raskus.

Pidev- ja poolpidevvalu kasutatakse, kui soovitakse saada mitmesuguse ristlõikega pikemaid tooteid, näiteks mootorihülse, valtse, malmtooruseid, kasutatakse pikki hammasrattaid jms.

#### 9.4.6. Pressvalu ja pooltardvalu

**Pressvalu** (*squeeze casting*) on valamine metalli kristallumisega surve all. Oma olemuselt on see valutehnoloogia (survevalu) ja survetöötuse (stantsimise) hübriidmeetod. Kui survevalu valuvorm suletakse enne sulametalliga täitumist, siis pressvalu valuvormi täitmine sulametalliga toimub enne vormipoolte sulgemist. Ülemise vormipoolte sulgemisel tekkiva surve toimele vormiõõnsus täitub sulametalliga täielikult. Surved keeruka vormiga valandite saamiseks (20...170 MPa) on madalamad kui tardunud metalli vormstantsimisel. Valumeetodit kasutatakse valandite tootmiseks peamiselt madala sulamistemperatuuriga mitterauasulamitest (Al- ja Mg-sulamid), näiteks autotööstuses.

**Pooltardvalu** (*semisolid casting*) on valandite saamine valumetalli pooltardolekuks. Toote (valandi) vormimine toimub valusulami solidus- ja likvidustemperatuuride vahemikus. **Pooltardolekus** (*mushy state, semi-solid state*) on metalli viskoossus suur ja vedelvoolavus puudulik. Vedelvoolavuse parandamiseks kasutatakse kristallumisel moodustuvate dendriitide globaliseerumist (sfäändendriitide moodustamist). Seda saab saavutada pooltardolekus metalli intensiivse segamisega. Pooltardolekus (tardfaasi 30...40 %) metalliga täidetakse valuvorm surve all sarnaselt survevaluga, kusjuures lõplik kristallumine on kiire.

Pooltardvalu eelis on võimalus toota õhukeseseinalisi suure täpsusega ja valudefektideta heade mehaaniliste omadustega valandeid.

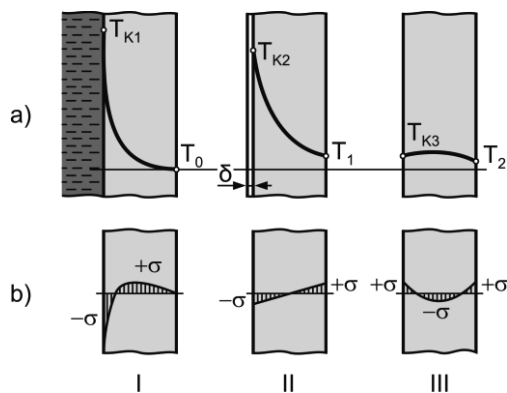
#### 9.4.7. Metallvormide püsivus

Survevaluvormide, samuti kokillide ja tsentrifugaalvaluvormide püsivus on piiratud. Metallvormide püsivus on otseses sõltuvuses valutemperatuurist. Näiteks metallvormi orienteeriv püsivus on tsingivalu puhul kuni 500 000, alumiiniumivalu puhul kuni 250 000, vasevalu puhul kuni 20 000 valandit.

Peamine vormi ressursi piirav asjaolu on termopinged, mis tekivad vormi ebaühtlase kuumenemisel sulametalliga täitmisel ja jahtumisel, kui valand eemaldatakse. Aja jooksul tekitab niisugune töötükkel vormi tööpinnale väsimuspragusid, mis viivad lõpuks purunemisele.

Termopingete ja väsimuspragude tekkemehhanism on järgmine.

Vormi iga töötükli võib jagada kolme faasi (Joonis 9.43).



**Joonis 9.43.** Termopinged metallvormis: I faas – sulametalli vormi valamisel; II faas – vormi jahtumisel valandi tardudes; III faas – pärast valandi eemaldamist vormist;  $\delta$  – õhupilu; a – vormi seina temperatuurid; b – vormi seina pingete eptüürid

**I faas** algab, kui vedelmetall puutub kokku valuvormiga, ja kestab seni, kuni vormi kontaktpind saavutab maksimaalse temperatuuri. Selle aja kestel tõuseb vormi kontaktpinna temperatuur  $T_{k1}$  valutemperatuuri  $T_v$  lähedale.  $T_{k1} = 0,6...0,7 T_v$ . Vormi välispind säilitab praktiliselt esialgse temperatuuri  $T_o$ . Kuumenenud kiht püüab pikeneda  $\Delta l = \alpha (T_{k1} - T_o) l$  võrra, kus  $\alpha$  on joonpaisumistegur ja  $l$  vormi dimensioon vaadeldavas osas. Tegelikult ei saa vorm selles osas vabalt pikeneda, kuna ta moodustab terviku vormi (madalatemperatuurse) massiivse välisosaga, mis pikenedamist takistab.

Kuumenenud kihi termiline pikenedamine piki vormi tööpinda ei realiseeru, mille tulemusena tekivad sisepinnal survepinged, väliskihil aga tõmbepinged. Mida suurem on realiseerimata deformatsioon, s.t mida kõrgem on kontaktkihi temperatuur ja suurem joonpaisumistegur, seda suuremad on survepinged kontaktkihis ja tõmbepinged väliskihis. Kui survepinged ületavad vormimaterjali voolepiiri, siis kiht deformeerub plastselt.

Ka tõmbepinged vormi väliskihis võivad ületada voolepiiri ja vormimaterjali tugevuse. Kui tegemist on hapra vormimaterjaliga, näiteks malmiga, tekivad välispraod. Plastsest materjalist, näiteks terasest vormi seinad deformeeruvad jäävalt ja kõverduduvad. See on põhjus, miks metallurgias suurte valuplokkide valamisel terasvormi praktiliselt ei kasutata. Ka valutehnoloogias kasutatakse vormimaterjalina kõige sagedamini hallmalmi.

**II faas** kulgeb vormi siseseina temperatuuri langemise algusest kuni valandi eemaldamiseni vormist. Kontaktpinna temperatuuri alanemist põhjustab metallvormi suur soojusjuhtivus ja valandi kahanemisest tingitud õhupilu. Vormi välispinna temperatuur tõuseb. Seega väheneb temperatuurilang vormi seina ulatuses, mis omakorda

vähendab realiseerimata deformatsioone, järelikult ka survepingeid kontaktpinnas ja tõmbepingeid välispinnas.

**III faas** algab valandi eemaldamisega vormist ja kestab, kuni vorm täitub uuesti sulametalliga. Sel juhul jahtub vormi sise- ja välispind kiiremini kui sein sisemus. Nüüd takistab vormi pindade termilist lühenemist sein sisemus, kus temperatuur on kõrgem. Selles faasis tekivad sise- ja välispindadel tõmbepinged, sein sees aga survepinged. Järelikult kaasneb iga töötsükliga vormi kontaktpinnas märkimuutev pinged: I faasis survepinge ja III faasis tõmbepinge.

Niisugune koormus põhjustab metalli väsimist, mis väljendub pragudena vormi tööpinnal. Kui need on arenenud läbi sein, vorm puruneb. Mida kõrgem on kontaktpinna temperatuur, seda suuremad on termopinged ja seda kiiremini vorm puruneb, s.t seda väiksem on tema püsivus.

Metallvormi materjalide keemilise koostise optimeerimisel püütakse leida sääraseid legerivaid elemente, mis tagaksid vormimaterjali minimaalse paisumisteguri ja võimalikult suure soojusjuhtivuse.

## 9.5. VALUSULAMID JA VALANDITE TOOTMINE

Olenevalt vormitavusest liigitatakse metallisulamid vedelvormitavateks ehk valusulamateks ja plastselt vormitavateks ehk deformeeritavateks sulamateks (vt 5. ptk. Metalsed materjalid). Deformeeritavad sulamid saadakse metallurgiaettevõttes algul **valuplokkidena** (*ingot*) ja neid töödeldakse pooltoodeteks valtsimise, ekstrudeerimise või sepistamise teel. Saadud pooltooteid tõmmatakse, stantsitakse, keevitatakse ja lõiketöödeldakse. Valmis valusulameid väljastatakse **metallikangidena** (*pigs*). Enne vormi valamist sulatatakse need valutsehhis uuesti üles. Sageli koostatakse ja sulatatakse valusulamid lähtekomponentidest vahetult valutsehhis. Mõlemal juhul tuleb arvestada teatud elementide kaoga oksüdeerumise ja lendumise tõttu. Näiteks Si ja Mn kadu malmi sulatamisel, mida sulatusahju **täite** (*charge, burden*) koostamisel tuleb silmas pidada. Metallide koostist korrigeeritakse puhaste metallide või ligatuuride (põhimetalli ja legeriva elemendi sulam) lisamise teel ahju täitesse.

Põhiline ja üks kõige tehnoloogilisema valusulam, mida muul viisil pole üldse võimalik vormida, on malm (~75 % valanditest massi järgi), järgnevad teras (~20 %) ja mitterauasulamid (~5 %).

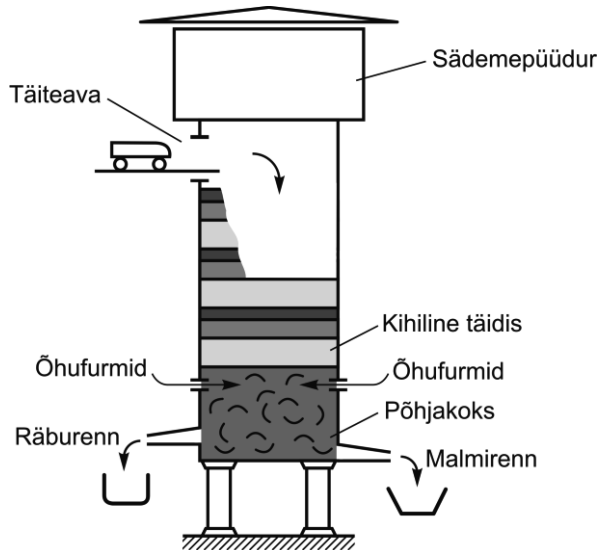
### 9.5.1. Valusulamite sulatus

Valutehnoloogia eeldab metalli sulatamist ja valutemperatuurini kuumutamist. Sulatusahjud peavad võimaldama samuti sulanud metalli seisutamist ilma metalli kvaliteedi halvenemiseta. Valutööstuses kasutatakse järgnevaid sulatusseadmeid:

vagrangad (vaid malmisulatusel), kiirgusahjud ehk otsetoimeleekahjud, tiigelahjud, elektriaraahjud, induktsioonahjud.

### Vagrangad

Kuni 90 % malmi (hallmalm, tempermalm) sulatatakse **vagrangas** (*cupola*) (Joonis 9.44). Vagranka on metallkestaga ja šamottvoodriga šahtahi, mida ülemise täiteava kaudu täidetakse algul **põhjakoksiga** (*coke bed*). Edasi viiakse vagrankasse metallist (valu- ja toormalmikangid, malmijäätmed, vanametall jne), **koksist** (*coke*) ja **räbus-tist** (*flux*) koosneva **täidise** (*charge*) doosid. Räbus-tiks on enamasti **lubjakivi** (*limestone*). Täidisekihtide massi metall:koks:räbus-ti ligikaudne suhe on 1,0:0,1:0,03.



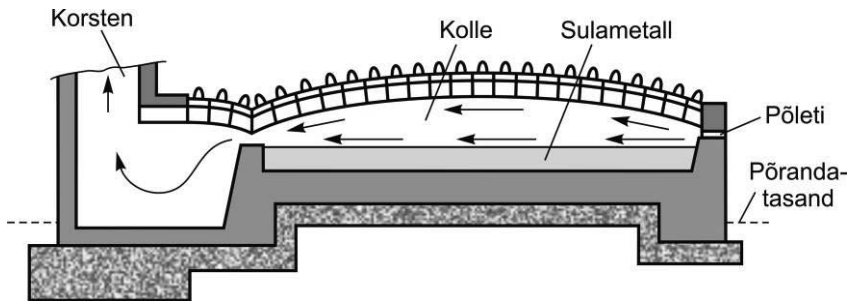
**Joonis 9.44.** Malmisulatamisel kasutatav vagranka

Kütuse (koks, looduslik gaas) põlemiseks juhitakse ahju ettekuumutatud (450...550 °C) õhku. Põlemisel eralduv soojus sulatab metalli, mis valgub koldesse. Vedel malm juhitakse perioodiliselt malmirenni kaudu koppa, millega täidetakse valuvormid. Suurtes ahjudes lastakse malm algul kogurisse ja sealt koppa. Malmist kergem räbukiht (räbu, kütusetuhk, oksüdeerunud elemendid) lastakse enne räbuavast räburenni kaudu välja. Vagranka tootlikkus ulatub kuni 120 t/h.

Et saada sobiva koostisega malm, tehakse eelnevalt täidise arvutus. Arvesse võetakse elementide väljapõlemist sulatamise kestel oksüdeerumise tõttu. Vagrangas sulatamisel muutuvad malmi süsiniku- ja fosforisisaldus vähe, väävlisisaldus aga suureneb kuni 50 % koksist lisandunud väävli tõttu. Malmi ränisisaldus väheneb kuni 15 % ja mangaanisisaldus kuni 20 %. Sellepärast tehakse vagranka metallikihi arvutus Mn ja Si kohta. Teiste elementide sisaldus ei ole vagrankas praktiliselt korrigeeritav.

## Kiirgusahjud

**Kiirgusahi** ehk **otsetoimeleekahi** (*reverberatory furnace, direct fuel-fired furnace*) on leekahi, milles metalli sulatus toimub põlemisleegi ja ahju seintelt lähtuva soojuskiirguse toimel (vt Joonis 9.45). Sageli kasutatakse nimetust otsetoimeleekahi, iseloomustamaks sulatusprotsessi, milles sulametall on kuumade gaasidega otseses kokkupuutes. Kiirgusahje kasutatakse valdavalt mitterauasulamite (Al- ja Cu-sulamid) sulatamiseks.

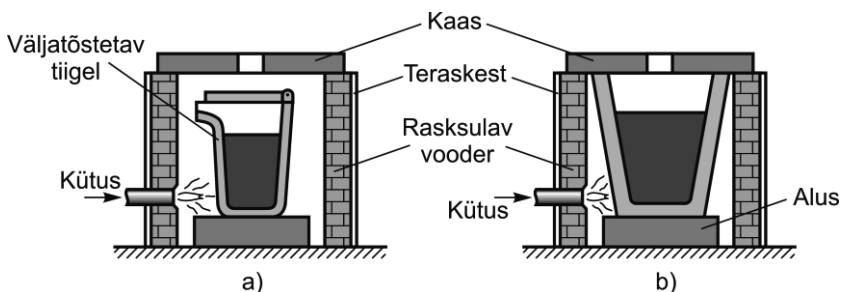


Joonis 9.45. Kiirgusahi

## Tiigelahjud

**Tiigelahi** (*crucible furnace*) on ahi sulatamiseks tiiglikujulises ruumis (tiiglis). Kui tiigelahju kuumutatakse kütuse põlemisleegi toimel, nimetatakse ahju **kaudtoimeleekahjuks** (*indirect fuel-fired furnace*), kuna sulatav metall ei ole kuumade gaasidega otseses kokkupuutes (vt Joonis 9.46). Paindlikuma võimaluse kontrollida temperatuuri ja sulametalli koostist annavad elektrilise kuumutusega tiigelahjud.

Tiigelahje kasutatakse nii nagu kiirgusahjegi mitterauasulamite (Cu-, Al-, Zn-sulamid) sulatamiseks.



Joonis 9.46. Tiigelahi (kaudtoimeleekahi): a – väljatõstetava tiigliga; b – statsionaarse tiigliga



## Kaarahjud

**Kaarahi** ehk **elektrikaarahi** (*electric arc furnace, arc furnace*) on ahi, milles sulatamiseks kasutatakse elektrikaare soojust. Eristatakse **otsetoimekaarahje** (*direct-arc furnace*) (vt Joonis 5.7, p 5.1.1. Rauametallurgia) ja **kaudtoimekaarahje** (*indirect-arc furnace*). Esimesel juhul elektrikaar põleb elektrodide ja ahjutäite vahel, teisel juhul on ahjutäide elektriliselt neutraalne ja metalli sulatav kaar põleb elektrodide vahel.

Kaarahje kasutatakse metallurgias ja valutööstuses eelkõige sulatuse kiiruse, sulametalli pikemaajalise seisutamise võimaluse ning ahjukeskonna kontrollimise võimaluse tõttu. Valutööstus kasutab kaarahje mahutavusega tavaliselt kuni 25 tonni, maksimaalselt 200 tonni. Selliseid ahje kasutatakse valdavalt rauasulamite, eriti teraste sulatamiseks.

## Induktsioonahjud

**Induktsioonahi** (*induction furnace*) on metalli induktsioonkuumutusega ahi (vt Joonis 5.8, p 5.1.1. Rauametallurgia). Sellised ahjud võimaldavad nagu kaarahjudki metalli kiiret sulatamist ja ahjukeskonda kontrollida. Induktsioonahjudes saab sulatada korraga kuni 250 tonni metalli. Kasutatakse nii rauasulamite (teras, malm) kui ka mitterauasulamite (Al-sulamid jt.) sulatamiseks.

### 9.5.2. Malmvalandid

#### Liigitus, kasutamine ja tootmine

Malmid liigitatakse süsiniku oleku järgi valgemalmideks ehk seotud süsinikuga malmideks ja grafiitmalmideks ehk vaba grafiidiga malmideks (vt ka p 5.1.3. Malmid). Viimased sisaldavad vaba grafiiti (lible-, kera-, pesa- või kompaktagrafiit). Grafiidiosakesed ühelt poolt halvendavad malmi mehaanilisi omadusi, teiselt poolt on grafiitmalmidel terasega võrreldes järgmised eelised:

- a) hea lõiketöödeldavus (lõikamisel tekib murdelaast),
- b) head antifriktsioonomadused (grafiidiosakesed vähendavad hõõrdetegurit),
- c) head vibratsioonisummutavad omadused,
- d) väike tundlikkus pindpragudele,
- e) head valuomadused (hea vedelvoolavus, väike kahanemine, suhteliselt madal sulamistemperatuur).

Vaba grafiiti sisaldavaid malme liigitatakse metalse põhimassi struktuurist olenevalt ferriitseteks, ferriitperliitseteks ja perliitseteks (vt samuti Joonis 5.22, p 5.1.3. Malmid). Joonisel 9.47 on grafiitmalmide liigitus, lähtudes grafiidiosakeste kujust ja metalse põhimassi struktuurist (ferriit-, ferriitperliit- ja perliitmalm).

Metalse põhimassi struktuur	Grafiidiosakeste kuju			
	Libeline grafiit	Kompakt- grafiit	Pesa- grafiit	Kera- grafiit
Ferriit				
Ferriit + perliit				
Perliit				

**Joonis 9.47.** Malmi liigitus lähtuvalt grafiidiosakeste kujust ja metalse põhimassi struktuurist

**Liblegrafiitmalmi** (*flake graphite cast iron*) tuntakse eelkõige **hallmalmina** (*gray cast iron, gray iron*). Liblegrafiitmalmi kasutatakse grafiitmalmidest kõige enam. Terasega võrreldes on tal märgatavalt väiksem tõmbetugevus (kuni 5 korda), plastsus, sitkus, samuti elastsusmoodul, samal ajal piisavalt hea survetugevus ja kõvadus.

Liblegrafiitmalmi kasutatakse valandite tootmiseks, millel puuduvad märkimisväärsed dünaamilised koormused: mitmesugused keredetailid masinaehituses (mootoriplokid, kollektorid, hoorattad, tööpinkide sängid), kanalisatsioonitorud, metallist valuvormid (kokillid) jne.

Liblegrafiitmalmi struktuuri on võimalik märgatavalt parandada, vähendades grafiidiosakeste suurust. Selleks viiakse sulamalmi **modifikaatoreid** (*modifiers, modifying agents*). Modifikaatorite all mõistetakse aineid, mille väikesed kogused parandavad metalli sulamite struktuuri ja omadusi. Liblegrafiitmalmi modifitseerimiseks kasutatakse põhiliselt räni sisaldavaid **inokulaatoreid** (*inoculants*), näiteks ferrosiliitsiumi või silikokaaltsiumi (0,3...0,6 % valukoppa või valuvormi valukanalitesse). Modifitseeritud hallmalmis on grafiidiosakesed märgatavalt peenenenud ja ühtlasemalt jaotunud.

**Keragrafiitmalmi** (*spheroidal graphite cast iron, nodular graphite cast iron*) tuntakse ka **kõrgtugeva malmina** (*ductile cast iron, high-duty cast iron*).

Keragrafiitmalmis avaldab grafiit (vt Joonis 5.20 ja Joonis 9.47) malmi omadustele märksa väiksemat mõju kui liblegrafiitmalmis. Sellise malmi nagu terasegi omadused

on põhiliselt määratud metalse põhimassi struktuuri ja omadustega. Samuti on keragrafiitmalmi termotöötuse efektiivsus märgatavalt suurem kui liblegrafiitmalmidel.

Keragrafiitmalmi saamiseks modifitseeritakse teda magneesiumiga Mg (põhilisand) või tseeriumiga Ce. Mõlemaid viiakse malmi 0,03...0,05 %. Kasutatakse ka teisi modifikaatoreid.

Mg sulamistemperatuur on 651 °C, keemistemperatuur 1107 °C. Aurustunud kujul süttib Mg õhus kergesti. Mg viiakse malmi atmosfäärirõhul või kõrgendatud rõhul. Esimesel juhul manustatakse Mg-ligatuuri Fe-Si-Mg, Ni-Mg-Ce jt graanulitena kopa põhja ning valatakse vedel malm peale. Mg-ligatuure pannakse sageli ka otse valuvormi kanalitesse või valatava metalli jukka. Tekib tugev püroefekt, mis ilmneb roheline suitsuna, sest suur osa Mg põleb ära või eraldub auruna läbi sulametalli. Osa magneesiumist seob väävel (tekib sulfiid MgS). Selle tõttu peab malmi väävlisisaldus olema minimaalne (alla 0,02%). Sulamisse jäänud Mg on tekkivale grafiidile kristallisatsioonikeskmeiks.

Kõrgendatud rõhul modifitseerimisel asetatakse valukopp autoklaavi, kus Mg puutub kokku sulamalmiga. Ülerõhul (0,6 MPa) suurem osa Mg lahustub – malm omandab rohkem magneesiumi.

Magneesium on nii modifitseeriv kui ka karbidiseeriv element, soodustades valgemalmi teket. Pärast magneesiumiga modifitseerimist järgneb teistkordne modifitseerimine ferrosiliitsiumiga, kuna Si soodustab grafiidi teket.

Keragrafiitmalmi kasutatakse keerulise kujuga, dünaamilistel koormustel töötavate masinadetailide (autode nukk- ja väntvõllid, põllumajandusmasinate detailid jne) valmistamiseks. Heade mehaaniliste omaduste tõttu kasutatakse sellist malmi sageli terase asemel.

Kuna grafiit ei avalda keragrafiitmalmi omadustele nii suurt mõju kui liblegrafiitmalmi (hallmalmi) omadustele, siis võib kasutada suurema süsinikusaldusega (3,2...3,8 % C) malme, mis parandab vedelvoolavust ja vähendab valgemalmi tekkimise võimalust. Sellise malmi vedelvoolavus on samasugune kui hallmalmil, kuid joonkahanemine tardumisel on märksa suurem (1,25...1,7 %). Seetõttu on kahanemistühikuteta valandeid raskem saada ja osutub vajalikuks kasutada kompensatoareid (valupäid).

**Kompaktgrafiitmalmi** (*compacted graphite cast iron*) tuntakse ka inglise keelest tuletatud nimetuse **vermikulaargrafiitmalm** (*vermicular graphite cast iron*) järgi. Kompaktgrafiitmalmis on grafiit lühikeste, ümmarguste otstega plaatjate osakestena (Joonis 9.47). Suhteliselt lühikesed ja ümarad grafiidiosakesed võrreldes liblegrafiitmalmiga tagavad omadused, mis on lible- ja keragrafiitmalmi vahepealsed. Sellisel

malmil on head valuomadused (paremad kui keragrafiitmalmidel) ja suhteliselt suur tugevus, plastsus ja soojusjuhtivus.

Kompaktgrafiitmalmi saamiseks töödeldakse sulamalmi samade modifikaatoritega (ligatuuridena) kui keragrafiitmalmi, kasutatakse ainult väiksemaid koguseid. Mida rohkem sisaldab malm väävlit (seob modifikaatoreid), seda enam modifitseerivaid lisandeid on vaja malmi viia.

Kompaktgrafiitmalme kasutatakse suurte ja keeruka kujuga valandite tootmisel. Näiteks mootoriehituses valmistatakse sellisest malmist dünaamilistel ja termotsüklilistel koormustel töötavaid tooteid: silindriplokke, pidurikettaid jms.

Grafiitmalvide struktuur tekib üldjuhul kristallisatsiooniprotsessis. Grafiitmalvidest eraldi rühma moodustavad malmid, mille struktuur tekib valgemalmi termotöötlemise, grafitiseeriva lõõmutamise tulemusena. Selliseid malme ei nimetata tavaliselt grafiidiosakeste kuju, vaid nende omaduste saavutamise viisi järgi **tempermalmideks** (*malleable cast irons*), mis tuleneb sõnast **temperdama** (*malleabilizing*), s.o sitkemaks muutma.

Tempermalmis on grafiit kerakujulisele ideaaljuhtumile lähedase pesaja (mügara) kujuga (Joonis 5.21 ja Joonis 9.47). Seoses grafiidi sfäärilisele lähedase kujuga on niisugusel malmil suhteliselt suur plastsus ja tugevus. Tempermalmi omadused on liblegrafiitmalmi ja terase vahepealsed.

Kuna pesagrafiit tekib, kui valgemalmi pikka aega kuumutada, koosneb tempermalmi tehnoloogiline protsess kahest etapist (vt samuti p 5.1.3. Malmid):

- 1) valgemalmist valandi saamine,
- 2) valandi grafitiseeriv lõõmutamine, et lagundada raudkarbiid (tsementiit).

Tempermalmil (süsinikuisaldus 2,2...3,2 %) on hallmalmiga võrreldes järgmised iseärasused:

1. Võimalus valmistada vaid väikese seinapaksuse (kuni 50 mm) ja piiratud massiga valandeid (kuni mõnikümmend kg). See iseärasus on tingitud valandi kiire jahtumise nõudest, et tekiks valgemalmi struktuur.
2. Suhteliselt halb vedelvoolavus (põhjuseks väiksem süsinikuisaldus). See nõuab kõrgemaid valutemperatuure (1500...1550 °C) ning seetõttu parema tulekindluse ja gaasiläbilaskvusega valuvorme. Kõrge ülekuumutus tagab parema vedelvoolavuse ja parema räbuerastuse ning lühendab lõõmutusprotsessi.
3. Suur tardumiskahanemine (1,5...2 % liblegrafiitmalmi tavaliselt kuni 1 % vastu), mistõttu on suurem ka kahanemistühikute ja -poorsuse oht. Tempermalmi valus kasutatakse alati kompensaatoreid (valupäid).

Liiv- või metall- ja koorikvormidest eraldatud valgemalmvalandid paigutatakse konteinerisse ja lõõmutatakse, et saada ferriit- või perliittemperalmi. Lõõmutamisel toimub **grafitisatsioon** (*graphitization*), mis seisneb grafiidipesade moodustumises, kui tsementiit laguneb.

Temperalmi kasutatakse peamiselt põllutöömashinade ja autode väikeste, õhukese-seinaliste detailide valmistamisel, torustiku armatuurielementide valmistamisel ja mujal.

**Valgemalmis** (*white cast iron*) on kogu süsinik raudkarbiidi  $Fe_3C$  (tsementiidi) kujul, s.o seotud olekus. Valgemalm on küll habras, aga suure kõvaduse ja kulumiskindlusega, mistõttu seda kasutatakse laialdaselt jahvatusseadmete detailide (näiteks kuulveskite vooderdus), haaveldusseadmete labade jt detailide valmistamiseks. Läbinisti valgemalmist valandeid kasutatakse juhul, kui ei esine löökkoormusi.

Detailid, mis töötavad suure mehaanilise koormusega (valtspinkide valtsid, konveierite rattad jms), valmistatakse **valgendatud malmist** (*chilled cast iron*). Sellise valandi pinnakihil on valgemalmi, südamikul hallmalmi struktuur. Pinnakiht valgendatakse valandi kiirendatud jahutamise, valades sulamit metallvormidesse (kokillidesse). Jahtumistingimusi ja malmi koostist muutes võib reguleerida valgemalmikihi paksust ja kõvadust.

Malmi eri rühma moodustavad **legeermalmid** (*alloy cast irons*). Toodetakse eriomadustega libe- ja keragrafiidiga legeermalme. Selliste malmide metalse põhimassi struktuur võib legeerimisest olenevalt olla austeniitne, ferriitne, ferriitperliitne ja perliitne. Eriomaduste alusel liigitatakse legeermalmid kulumiskindlateks, antifriktsioonseteks, korrosioonikindlateks, kuumustugevateks, kuumuspüsivateks ja mittemagnetilisteks.

### **Malmivalu iseärasused**

Malmi (hall- ja valgemalmi) sulatatakse peamiselt vagrankas. Vagrankade kõrval sulatatakse hallmalmi ja temperalmi ka elektriühjus, põhiliselt induktsioonühjus. Keragrafiitmalmi sulatatakse valdavalt elektriühjades. Elektriühjude (induktsioon- ja kaarahjud) eelised on järgmised:

- 1) on võimalik saada täpse keemilise koostisega malmi,
- 2) elementide väljapõlemine on väike,
- 3) malmi saab täiendavalt kuumutada näiteks temperalmi tootmisel kuni  $1550\text{ }^{\circ}\text{C}$  (malmi temperatuur vagrankas on  $1350\text{...}1480\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),
- 4) ahjutäiteks võib kasutada suures koguses terasmurdu ja teraslaastu,
- 5) ahju saab vakumeerida.

Sageli toodetakse induktsioonühjades nn **sünteesmalmi** (*synthetic cast iron*), mis on terasmurrust, süsinikku sisaldavatest materjalidest (granuleeritud grafiit) ja ferrosüüsiümist sünteesitud malm.

Malmi sulatamise kõige täiuslikum meetod on **dupleksprotsess** (*duplex process*), kus malm valmib kahes järjestikuses sulatusagregaadis: esimeses sulatatakse täidist, teises antakse malmile soovitud keemiline koostis ja temperatuur. Esimeseks agregaadiks on tavaliselt vagranka, teiseks induksioon- või kaarahi. Duplekssulatust kasutatakse näiteks temperalmi valmistamisel, kus malmi sulatatakse algul vagrankas. Seejärel tõstetakse temperatuur nõutavale tasemele induksioon- või kaarahjus.

Malm valatakse tavaliselt liivvormidesse, kuid ka koorik- ja metallvormidesse. Vormimaterjali valikul arvestatakse malmi valutemperatuuri. Lible- ja keragrafiitmalmil on see suhteliselt madal (1200... 1400 °C). Temperalmi valatakse tavaliselt ülekuumendatult (1450...1550 °C), mis esitab kõrgendatud nõudmisi vormi- ja kärnimaterjalile ning vormipindele.

Valukanalite süsteemi projekteerimisel on soovitatav, et tagatud oleks valandi üheaegne tardumine. Selle saavutamiseks juhitakse toitekanal enamasti valandi õhukese seinapaksusega osadesse. Hallmalmi väikese kahanemise tõttu kasutatakse valupäid vaid suurte valandite korral. Kera-, pesa- ja kompaktgrafiitmalmist valandite projekteerimisel tuleb kahanemisdefektide vältimiseks alati ette näha valupead (kompensaatorid).

### 9.5.3. Terasvalandid

Teras on halb valusulam, mistõttu terastooteid püütakse vormida plastselt. Terasvalandeid kasutatakse vaid juhul, kui toode on keeruka kujuga. Valatakse nii süsinikterasest kui ka madal- ja kõrglegeerterastest valandeid.

Terasevalul on võrreldes malmivaluga järgmised iseärasused:

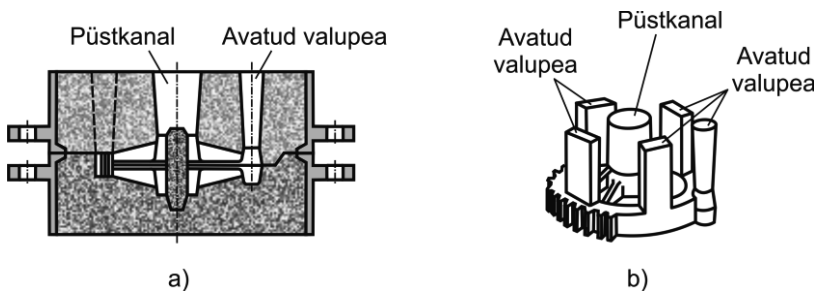
1. Halvem vedelvoolavus. Kui terase süsinikusisaldus kasvab, siis vedelvoolavus paraneb. Seda iseärasust tuleb arvestada valukanalite projekteerimisel: valukanalid peavad olema võimalikult lühikesed ja kanalite ristlõikepinnad suhteliselt suured (1,5...2 korda suuremad kui malmivalus). Räbupüüdurit ei kasutata, mistõttu valukopad peavad olema sulguriga (vt Joonis 9.33).
2. Suurem kahanemine (joonkahanemine tardumisel kuni 3,0 %). Kahanemisühikute ja -poorsuse vältimiseks kasutatakse suuri kompensaatoreid, mille mass võib ulatuda 50...60 % valandi massist (Joonis 9.48). Valukanalite projekteerimisel püütakse saavutada suunatud tardumist. Selleks juhitakse toitekanalid tavaliselt valandi massiivsematesse osadesse (vrd malmivalu iseärasusi).
3. Suur tardumisjärgne joonkahanemine tekitab ka suuri sisepingeid, kõverdumisi, pragusid. Seetõttu peab terasevalu vormi- ja kärnisegu olema järeleandlik. Suure ja väikese ristlõikega valandi osade jahtumiskiiruse ühtlustamiseks kasutatakse vormi massiivsemate osade juures jahuteid.

4. Kõrgem valutemperatuur (1550...1650 °C) seab suuremad nõuded vormi- ja kärnisegude tulekindlusele ja tugevusele. Terasevalu puhul liivvormid üldjuhul kuivatatakse.

Sageli tuleb kasutada tulekindlaid vormimaterjale (kromiit- ja tsirkoonliiva). Lisaraskused tekivad kõrgleegerterase, näiteks korrosioonikindla terase valus.

Valuterast sulatatakse nii aluselise kui ka happelise voodriga ahjudes, põhiliselt elektriäärhjudes. Kasutatakse ka induktsioonahje, sh plasmainduktsioonahje, hapnikkonverteereid (vaid metallurgiatehastes). Terase sulatamisel on lähtematerjaliks teraskangid, terasejätmed, toormalm, maak, räbustid.

Terast valatakse enamasti liiv- ja koorikvormidesse, harvem metallvormidesse.



Joonis 9.48. Terasvalandi liivvorm (a) ja valand (b)

#### 9.5.4. Alumiiniumvalandid

Alumiiniumi valusulamite põhilisteks esindajateks on:

- 1) Al-Si-(Cu)-sulamid (silumiinid),
- 2) Al-Cu-sulamid,
- 3) Al-Mg-sulamid (magnaaliumid),
- 4) Al-sulamid muude lisanditega (näiteks kuumustugevad Al-Cu-Ti-sulamid).

Alumiiniumi valusulamitest parim vedelvoolavus on silumiinidel, mistõttu silumiine kasutatakse suurte ja keeruliste valandite (mootoriplokid, pumbakered jms) tootmisel. Teised valusulamid on küll silumiinidest paremate mehaaniliste omadustega, samas aga halvemate valuomadustega (halvem vedelvoolavus, suurem kahanemine ja gaaside neelduvus) (vt ka p 5.2.3. Alumiiniumi valusulamid).

Alumiiniumivalu iseärasused:

1. Kerge oksüdeerumine. Sulametalli oksüdeerumise vältimiseks kiirel sisenemisel vormiõõnde kasutatakse laienevaid valukanaleid, milles sulametalli



voolukiirus pidevalt väheneb. Sageli lisatakse valukanalitesse pidurdus-elemente, näiteks filtreid.

## 2. Gaaside neelduvus, mis võib põhjustada gaasitühikuid.

Gaasitühikute ja oksüdeerumise vältimiseks sulatatakse alumiiniumsulameid kaitsva räbustikihi all (Na-, K- ja Ca-soolad, näiteks NaCl, KCl, CaF<sub>2</sub> jt). Lisaks sellele kasutatakse sulametalli **rafineerimisel** (*refining*) järgmisi meetodeid:

- läbipuhumist kloori, lämmastiku või argooniga. Gaasimullidel on floteeriva toime, mistõttu nende külge kleepuvad mittemetalsed osakesed ja nendes difundeerub gaasitühikuid tekitav vesinik;
- töötlemist gaasiliste kloriididega (MnCl<sub>2</sub>, TiCl<sub>4</sub>, ZnCl<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub>). Kloriididega töötlemisel tekib sulaalumiiniumis gaasiline alumiiniumkloriid AlCl<sub>3</sub>, mille mullid on samasuguse floteeriva toimega kui kloori või inertgaasi mullid;
- räbustitega töötlemist;
- vakumeerimist;
- filtreerimist. Filtreerimiseks paigutatakse valukanalitesse mitmesugusest materjalist (klaasriidest, alumiiniumoksiidist, grafiidist jne) filtreid.

Peeneteralise struktuuri saamiseks modifitseeritakse alumiiniumi valusulameid naatriumühenditega. Näiteks lisatakse sulametalli 0,05...0,1% NaCl + NaF segu. Sageli ühildatakse modifitseerimine rafineerimisega, kasutades universaalset räbustit.

Suhteliselt madala sulamistemperatuuri tõttu kasutatakse alumiiniumi valusulamite sulatamiseks peamiselt tiigelahje, samuti induktsioon- ja leekahje. Lähtematerjaliks on rafineerimata Al ja legerimiseks ligatuurid, valualumiiniumist kangid ning räbustid. Alumiiniumisulamist valandite tootmisel kasutatakse kõiki tuntud valumeetodeid.

### 9.5.5. Vaskvalandid

Keemilise koostise järgi liigitatakse vasesulamid, sh vase valusulamid messingiteks (valgevased) ja pronksideks (vt p 5.2.2. Vask ja vasesulamid).

Vasesulamitest on parimad valuomadused tinapronksil, millel on hea vedelvoolavus ja keskmise suurusega kahanemine. Mittetinapronkside kahanemine on hea vedelvoolavuse korral tavaliselt suurem. Messingi vedelvoolavus on pronksi omast üldjuhul halvem, ka kahanemine on tinapronksist suurem, mistõttu kasutatakse kompensatooreid, sageli ka jahuteid. Valupingete ja deformatsioonide vältimiseks kasutatakse vase valusulamite valus suure järeleandlikkusega vormisegusid.

Vase valusulamite valul on järgmised iseärasused:

- Kerge oksüdeerumine. Oksüdeerumist vähendavad laienevad valukanalid. Vase valusulameid desoksüdeeritakse fosforiga (saadakse nn fosforpronks).
- Vesiniku neelduvus (põhiliselt pronksi sulatamisel).



Oksüdeerumise ja gaasitühikute (gaasipoorsuse) vältimiseks sulatatakse vase valusulameid kas puidusöe või räbustikihi (booraks  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , sooda jms) all. Metallide paremate omaduste tagamiseks kasutatakse samasugust rafineerimist kui alumiiniumi valusulamite korral: läbipuhumist inertgaasidega, vakumeerimist, räbustitega töötlemist, filtreerimist. Kahjulikud lisandid vasesulamites (Bi, Pb, Sb) neutraliseeritakse Ca, Ce, Zr jt elementidega legerides.

Tera peenendamiseks modifitseeritakse vasesulamite tavaliselt rasksulavate metallidega (Ti, V, Zr, W, Mo). Vase valusulamite sulatatakse enamasti induktsioon- või elektrikaarahjus. Sulatatakse nii õhus kui ka kaitsegaasides või vaakumis. Vasesulamitest valandeid toodetakse kõigi tuntud valametodidega.

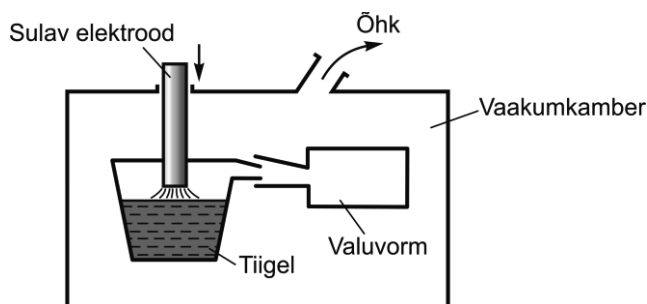
### 9.5.6. Titaanvalandid

Titaani sulamite, sh titaanivalusulamite (vt p 5.2.4. Titaan ja titaanisulamid) isearasuseks on eriline aktiivsus, s.o võime reageerida hapniku, lämmastiku, vesiniku, süsiniku jt elementidega. Titaan reageerib kõikide tuntud tulistega (tulekindlate materjalidega).

Titaan on aktiivne element, seetõttu toimub sulatamine vaakumahjus, tavaliselt vaakumelektrikaarahjus veega jahutatavas tiiglis (Joonis 9.49). Pärast Ti-sulamite sulava elektroodi sulatamist pööratakse vaakumkambrit ja sulametall valatakse vormi.

Titaani aktiivsuse tõttu tavalised tulekindlad vormimaterjalid valamvormiks ei sobi. Kasutatakse tavaliselt massiivseid veega jahutatavaid vases vorme ja keraamilisi vorme. Keraamilised koorikvormid valmistatakse suure tulekindlusega oksiididest (põhiliselt  $\text{MgO}$ ) ja fenoolformaldehüüdvaikudest. Väikesed titaanvalandid valmistatakse täppisvalu meetodil, kasutades vormimaterjalina tuliseid ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$  jt) ning sideainena etüüsilikaati, tsirkooniumnitraati jt.

Titaani aktiivsuse tõttu sisaldab valandi pinnakiht (paksuses kuni 1... 1,5 mm) vormi seinena reageerimiseprodukte.



**Joonis 9.49.** Titaanisulamite sulatamine ja vormi valamine

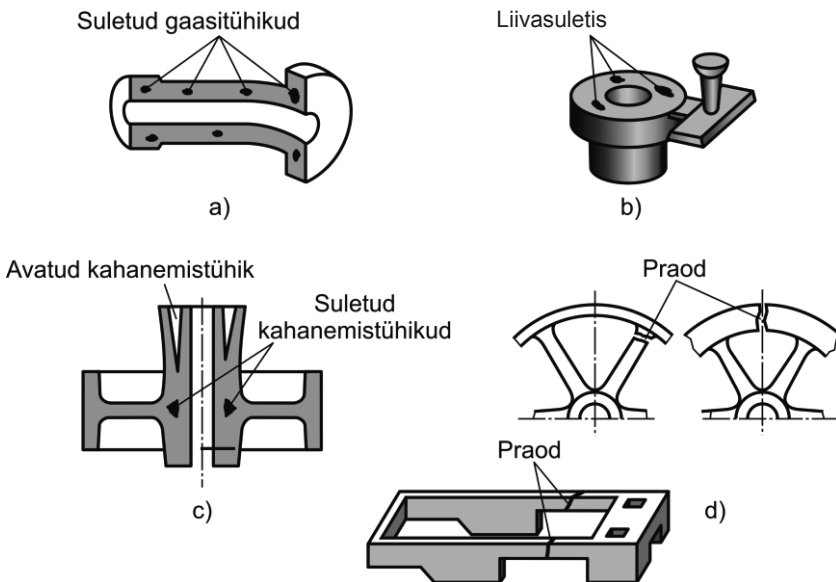
### 9.5.7. Valandi defektoskoopia

Valudefektid (*casting defects*) jaotatakse alljärgnevasse kategooriatesse:

1. Väljaulatuv valumetall (*metallic projections*).
2. Tühikud (*cavities*).
3. Pidevusdefektid (*discontinuities*) – rebendid, praod.
4. Pinnadefektid (*defective surface*).
5. Vajakvalu (*incomplete casting, misruns*).
6. Mõõtme- ja kujuhälbed (*incorrect dimensions or shape*).
7. Suletised (*inclusions and structural anomalies*).

Iga defektide kategooria hõlmab mitu valudefekt. Praktika näitab, et liivvormide puhul on levinud ja samas kõrvaldamatuks defektide kategooriaks tühikud, suletised ja pidevusdefektid (Joonis 9.50).

Suletud gaasitühikud ehk sisemised gaasitühikud (*blowholes*) ja avatud gaasitühikud ehk pindmised gaasitühikud (*surface blowholes*) on puhta ja sileda pinnaga. Tekke põhjuseks on vormi puudulik gaasiläbilaskvus, vormi liigne niiskus ja sulametallis lahustunud gaasid. Gaaside eraldumine vormist paraneb, kui kasutada ventilatsioonikanaleid.



**Joonis 9.50.** Valandis levinud defektid: a – suletud gaasitühikud; b – liivasuletised (liivatühikud); c – suletud ja avatud kahanemistühikud; d – praod

**Kahanemistühikud** (*shrinkage cavities*) võivad samuti olla avatud või suletud. Erinevalt gaasitühikutest on nende pind kare, jämekristalne. Nad tekivad valandi

massiivsete osade puudulikul tootmisel sulametalliga. Nende vältimiseks kasutatakse kompensatoreid.

**Liivasuletis** (*sand inclusion*) on vormimaterjaliga osaliselt või täielikult täidetud õõs (suletis) valandis. Ka liivasuletised võivad olla avatud või suletud. Nad tekivad nõrga vormi tõttu. Tuleb kasutada tugevamat vormisegu ja vorm kuivatada.

**Räbusuletis** (*slag inclusion, slag blowhole*) on räbuga osaliselt või täielikult täidetud õõnsus valandis. Nende vältimiseks tuleb kasutada räbupüüdüreid või valukanalites filtreid.

**Kuumpraod** (*hot cracks, hot tearing*) on tardumistemperatuuril tekkinud metalli kahanemisest põhjustatud rebendid valandis. **Külmpraod** (*cold cracks*) tekivad tardunud valandi õhematesse osadesse ebahühtlasel jahtumisel sisepingete tagajärjel. Pragude teket saab vältida valandi konstruktsiooni muutes ja vormi jäikust vähendades.

Välimised valudefektid paistavad silma kohe pärast valandi vormist eemaldamist ja puhastamist. Sisemisi valudefekte avastatakse radiograafiameetodil ja ultrahelikontrolli kasutades.

Radiograafiakontrolli puhul kiiritatakse valandit kas röntgen- või gammakiirtega. Kiired läbivad valandit erinevalt. Defekt fikseeritakse detektori poolt.

Ultrahelikontrolli puhul suunatakse valandisse ultraheli. Kui on tühik, siis peegeldub heli osaliselt tagasi, mis fikseeritakse detektoril. Peegelduse intensiivsuse järgi määratakse defekti suurus.

Praod leitakse magnetpulberkontrolli kasutades. Magnetvälja asetatud valandi defekti kohal esineb magnetpuiste, mis muudab magnetpea indutseeritud elektromotoorset jõudu. Need muutused fikseerib optiline või helisignaalliga indikaator.

## 9.6. KORDAMISKÜSIMUSED

### Vedelmetalli vormitavus

1. Millised on valutehnoloogia iseärasused ja kasutusvaldkonnad?
2. Mis eristab korduvkasutusvormvalu (püsivormvalu) kordkasutusvormvalust?
3. Milline on valandite tootmisel kasutatavaim valumeetod?
4. Mida tähendab ülekuumutusaste?
5. Miks peab valuvormi täitmisel vältima sulametalli turbulentsi?
6. Vedeloolavus on oluline vedelmetalli vormitavust iseloomustav mõiste. Millest vedeloolavus oleneb?
7. Milliste valudefektide moodustumise oht on seotud vedelmetalli tardumisega?
8. Mis on *Chvorinovi* reegel ja milleks seda rakendatakse?
9. Millised on valutemperatuurilt jahtumisel kahanemise kolm staadiumi?
10. Mille poolest erinevad puhaste metallide ja metallisulamite tardumise (kristallisatsiooniseerumise) protsessid?
11. Millisest, kas suure või väikese tardumisvahemikuga (kristallisatsioonivahe-  
mikuga) sulamist valandites on oht kahanemistühiku tekkeks?
12. Millisest, kas väikese või suure tardumisvahemikuga (kristallisatsioonivahe-  
mikuga) sulamist valandites on oht kahanemispoorsuse tekkeks?
13. Mis otstarbel kasutatakse valutehnoloogias valupead ehk kompensatorit? Milliste  
valudefektide moodustumise ohtu nad vähendavad?
14. Mis otstarvet täidab valuvormis vormijahuti?
15. Millised jahtumistingimused võimaldavad saada peeneteralise struktuuriga  
valandeid?
16. Milliseid valudefekte võib põhjustada gaaside suur lahustuvus vedelmetallis  
ja/või valuvormi ebapiisav gaasiläbilaskvus?
17. Miks on valuvormi järeleandvus oluline kvaliteetsete valandite saamiseks ja  
millised valudefektid võivad tekkida ebapiisavast järeleandvusest tingituna?
18. Mis on mõiste „kuumpunkt“ tähendus valutehnoloogias?

### Valu vormidesse

1. Millised on enim kasutatavad kordkasutusvormvalumeetodid?
2. Milline on mudeli ja kärni ülesanne valandite tootmisel?
3. Milline on valukanalite süsteemi otstarve?
4. Mille poolest eristuvad mudel ja mudelplaat?
5. Milline on valukanalite süsteemi osa – rābupūūdeli ūlesanne ja tōōpōhimōte?
6. Mis eristab kitsenevat ja laienevat valukanalite süsteemi?
7. Millised põhinōdud on valukanalite süsteemile?
8. Millised on vormi- ja kärnisegude tähtsaimad tehnoloogilised omadused?
9. Mis eristab liivvormvalu kasutatavaid mārēgvorme ja kuivvorme?

10. Millised on kaks enim kasutatavat vormisegude anorgaanilist sideainet?
11. Millised on vormkastiemaldusega vormimise eelised tavapärase vormkastis vormimisega võrreldes?
12. Millised on gaasistumudelprotsessi eelised võrreldes tavapärase, püsivmudeleid kasutava valuga?
13. Mis otstarbel kasutatakse vormimisel kärnitugesid?
14. Miks tuleb enne valandite kättesaamiseks vajalikku liivvormi purustamist valuvormi jahutada?
15. Millised on koorikvalu peamised eelised liivvormivaluga võrreldes?
16. Millised tehnoloogilised iseärasused tagavad täppisvalu teel toodetud valandite suure täpsuse (liivvormivaluga ja koorikvaluga võrreldes)?
17. Milline valumeetod on sobivaim suurte malmvalandite massiga üle ühe tonni tootmiseks?
18. Millised on enim kasutatavad korduvkasutusvormvalu (püsivormvalu) meetodid?
19. Mis otstarbel kokillvalus kokilli tööpinnad kaetakse vormipindega ja kokill kuumutatakse ette?
20. Millised on survevalu iseärasused (eelised, puudused) kokillivaluga võrreldes?
21. Mis põhjusel leiab valu metallist püsivormidesse (survevalu, kokillvalu jt) enim kasutust madala sulamistemperatuuriga metallidest (Al, Cu, Mg, Zu) valandite tootmisel?
22. Milline valumeetod on otstarbekaim pöördkehade – malmtorude, sisepõlemis-mootorite hülsside jms tootmiseks?
23. Milline on suurima tootlikkusega valumeetod korduvkasutusvormidesse?
24. Mis eristab täistsentrifugaalvalu pooltsentrifugaalvalust?
25. Millised on tsentrifugaalvalu iseärasused (eelised, puudused) võrreldes teiste valumeetoditega korduvkasutusvormidesse?

### **Valusulamid ja valandite tootmine**

1. Mis on vagranka ja milliste metallide sulatamiseks seda kasutatakse?
2. Millised on grafiitmalmide (vaba grafiidiga malmide) peamised eelised terastega võrreldes?
3. Mis otstarbel lisatakse valutehnoloogias sulamalmi modifikaatoreid?
4. Milline võib olla grafiidiosakeste kuju grafiitmalmides (vaba grafiidiga malmides)?
5. Milline on grafiidiosakeste kuju keragrafiitmalmis ja tempermalmis?
6. Millised on malmivalu peamised iseärasused terasevaluga võrreldes?
7. Mis põhjustel loetakse teraseid malmidega võrreldes märgatavalt halvemateks valusulamiteks?
8. Millised on alumiiniumvalu iseärasused, mida tuleb valandite tootmisel silmas pidada?

## 10. PULBERMETALLURGIA

10.1. PULBERMETALLURGIA ÜLDISELOOMUSTUS	10.6.2. Survepaagutus
10.2. PULBRITE SAAMINE JA OMADUSED	10.6.3. Plasmaaktiveeritud paagutus
10.2.1. Pulbrite saamine	10.6.4. Pihustusvormimine
10.2.2. Pulbrite omadused	10.7. PULBERTOORIKUTE TÄIENDAV TÖÖTLUS
10.3. PULBRITE ETTEVALMISTUS VORMIMISEKS	10.7.1. Järeltöötlus kuju muutmiseks
10.4. PULBERMATERJALI VORMIMINE	10.7.2. Järeltihendus ja mehaaniliste omaduste parandamine
10.4.1. Pressimine pressvormides	10.7.3. Spetsiifiliste omaduste andmine
10.4.2. Isostaatpressimine	10.8. PULBERMATERJALID JA -TOOTED
10.4.3. Pulbersurvevalu ja lobrivalu	10.8.1. Pulbermaterjalide omadused
10.4.4. Pulbri ekstrusioon ja valtsimine	10.8.2. Põhiliste pulbermaterjalide ja -toodete iseloomustus
10.5. PAAGUTUS	10.8.3. Pulbertoodete konstruktiivsed iseärasused ja tehnoloogia valik
10.5.1. Paagutusprotsessi üldiseloomustus	10.9. KORDAMISKÜSIMUSED
10.5.2. Paagutusmeetodid	
10.6. KOMBINEERITUD KONSOLIDATSIOONIPROTSESSID	
10.6.1. Kuumpressimine ja kuumisostaatpressimine	

### 10.1. PULBERMETALLURGIA ÜLDISELOOMUSTUS

**Pulbermetallurgia** (*powder metallurgy, PM*) on toodete tootmise protsess pulbrilistest lähtematerjalidest. **Pulberdetailide** ehk **pulbertoodete** (*powder metallurgy parts, PM parts*) valmistamiseks kasutatakse tänapäeval metalseid pulbrite kõrval üha rohkem mittemetalseid, näiteks keraamilisi (oksiidid, karbiidid, boriidid jne) pulbrilisi lähtematerjale. Kuna metallurgia harule viitav termin „pulbermetallurgia“ ei hõlma kõikvõimalikke metalseid ja mittemetalseid **pulbermaterjale** (*powder metallurgy*

*materials, PM materials*), nimetatakse sageli pulbrilistest lähtematerjalidest toodete tootmise protsessi **pulbertehnoloogiaks** (*powder technology*). Pulbermetallurgia oluliseks iseärasuseks klassikaliste tehnoloogiatega (valutehnoloogia, survetöötlus) võrreldes on see, et pulbermaterjal ja sellest materjalist toode valmivad üldjuhul samaaegselt.

Esimesed jäljed pulbermetallurgia kasutamise kohta on umbes viie tuhande aasta vanused, kui Lähis-Idas valmistati sepistamise teel tööriistu, relvi ja ornamente puusõega taandatud rauapulbrist (käsnaust). Lähis-Idast levis pulbermetallurgia edasi Vahemeremaadesse ning Kesk- ja Põhja-Euroopasse. Kullapulbrist valmistatud ehteid on leitud vaarao Tutanhamoni hauakambrist. Ka inkad kasutasid kauges minevikus ehte valmistamiseks hõbeda- ja kullapulbrit. Pulbermetallurgia kasutamine oli tollal hädavajalik, kuna inimkond ei osanud saada kõrgeid temperatuure, et sulatada rauda või vaske.

Pulbermetallurgia tänapäeva mõistes tootmisharuna sai alguse 19. sajandi esimesel poolel, mil Inglismaal ja Venemaal hakati valmistama keemiatööstuse tarvis plaatinast tiigleid, samuti münte. Platinapulber valmistati lahustest keemilise sadestamise teel, mis seejärel pressiti ja hiljem kuumalt sepistati. 1910. a hakati valmistama volframtraati hõõglampide tarvis. 1920. a hakati esmakordselt valmistama isemääri- vaid laagreid ja 1925. a kõvasulameid. Viimaseid kasutati esialgu traadi tõmbesilmade, hiljem lõiketerade valmistamiseks, mis tõi kaasa revolutsiooni metallide lõiketöötlemises (lõikekiirused treimisel kasvasid mitmeid kordi).

Pulbermetallurgiat rakendatakse tänapäeval kahel eesmärgil:

1. Konstruktioonidetailide valmistamiseks asendamaks traditsioonilisi valmistamisviise (valamine, stantsimine jne). Reeglina saadakse märgatav materjalide, energia ja tööjõu kokkuhoid ning alaneb toote omahind.
2. Eriomadustega materjalide saamiseks, mida pole enamasti võimalik valmistada traditsiooniliste valmistamisviisidega (poorsed materjalid, pseudosulamid, kermised jne).

Pulbermetallurgial on nii eeliseid kui ka puudusi pulberkonstruktioonmaterjalidest toodete tootmisel.

Eelised:

1. Jäätmete vähesus. Materjalide kasutamiskoeffitsient on 95...97 % (täppisvalul 90 %, külmstantsimisel 85 %, kuumstantsimisel 75...80 %, lõiketöötlemisel 40...50 %).
2. Lõppkujulähedus. Väikese tehnoloogiliste operatsioonide arvuga (4...6) on võimalik toota hulgitootmisel **lõppkujulähedasi** (*net shape, near-net shape*) tooteid.

3. Energia kokkuhoid (50...80 %). Tehnoloogiline protsess toimub madalamal temperatuuril ja operatsioonide väiksema arvuga (toodangu valmistamise energiakulu on pulbermetallurgia meetodil 29...30 MJ/kg, täppisvalul 30...38 MJ/kg, kuumstantsimisel 41...49 MJ/kg ja lõiketöötlemisel 66...82 MJ/kg).
4. Tehnoloogilise protsessi kõrge automatiseeritavuse tase. Tehnoloogilised seadmed (pressid, paagutusahjud jne) töötavad automaatrežiimil.
5. Pulbertoodete täpsus. Valutehnoloogiaga võrreldes võimaldab pulbermetallurgia toota suurema täpsusega tooteid – tolerantsiga  $\pm 0,1 \dots 0,15$  mm.

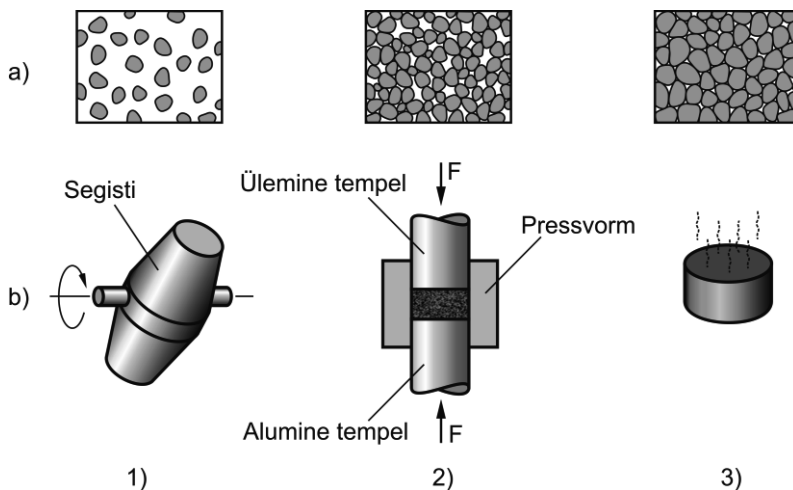
Puudused:

1. Saab valmistada vaid suhteliselt väikseid (harva välismõõtmetega üle 50...60 mm) tooteid pressimiseseadmete pressimisjõu piirangute tõttu.
2. Üldjuhul pulbermaterjalide madalamad mehaanilised omadused. Pulberkonstruktsioonimaterjalide poorsuse tõttu on tugevus ja sitkus ligi 2...3 korda väiksemad kui poorideta valatud, sepistatud või stantsitud kompaktsel materjalidel. Uued tehnoloogiad (näiteks pulbertooriku kuumstantsimine) võimaldavad saada peaaegu poorsuseta tooteid, mille mehaanilised omadused ületavad valatud või survetöödeldud toodete omadusi.
3. Pulbrite suhteliselt kõrge hind (pulbertoorikud on seetõttu tavaliselt valutoorikutest 30...70 % kallimad).
4. Piirangud toodete kujule. Pressimisega (põhiline pulbreist toodete vormimismeetod) pole võimalik valmistada mõningaid konstruktsioonelemente (keermed, pressimissuunaga ristasetusega avad, tagurpidi koonused jne).
5. Pressvormide kõrge maksumus. Pulbermetallurgia kasutamine õigustab ennast vaid siis, kui toodangu seeria suurus ületab 25 000...100 000 detaili. See on ühe pressvormi keskmine tööiga. Mida keerukama kujuga on detail, seda töömahukam on seda lõiketöötlemisega valmistada, seda rohkem on jäätmeid ja seega on majanduslikult põhjendatum tootmisel kasutada pulbermetallurgia tehnoloogiat.

Pulbermetallurgiaga konkureerivad majanduslikust seisukohast valamine (täppis-, surve-, kokill- ja tsentrifugaalvalu) ja külm- või kuumstantsimine. Pulbertoodete suurim tarbija on autotööstus – iga moodne auto sisaldab vähemalt 15...20 kg pulberdetaili.

Pulbritest toodete valmistamise tehnoloogilise protsessi lihtsustatud skeem on esitatud Joonisel 10.1.





**Joonis 10.1.** Pulbertoodete valmistamise kolm peamist operatsiooni: a – pulbriosakesed tehnoloogilistes operatsioonides; b – pulbertehnoloogilised operatsioonid: 1 – segamine; 2 – vormimine (pressimine); 3 – paagutamine

## 10.2. PULBRITE SAAMINE JA OMADUSED

### 10.2.1. Pulbrite saamine

Metallpulbrite valmistamismeetodeid saab liigitada kahte gruppi: mehaanilised ja füüsikalise-keemilised meetodid (keraamiliste pulbrite saamist vt p 14.3.2. Tehno-keraamika tehnoloogia).

Mehaaniliste meetodite korral pulbrite keemiline koostis valmistamise käigus ei muutu, keemiline koostis on samasugune kui lähtematerjalil. Füüsikalise-keemiliste meetodite korral pulbrite keemiline koostis erineb lähtematerjalide keemilisest koostisest.

Mehaanilise saamisviisi hulka kuuluvad:

1. Lähtematerjali **jahvatus** ehk **mehaaniline peenestus** (*pulverization, milling, grinding*). Hapraid materjale jahvatatakse mitmesugustes jahvatusseadmetes (juga-, kuul-, vibro- ja planetaarveskid, atriitorid, desintegraatorid jne).
2. Sulametalli **pihustus** (*atomization*). Sulatatud metall või metallisulam pihustatakse tsentrifugaaljõudude abil, vedeliku- või gaasijoa toimel. Ligikaudu 80 % metallipulbriest toodetakse seda tehnoloogiat kasutades.

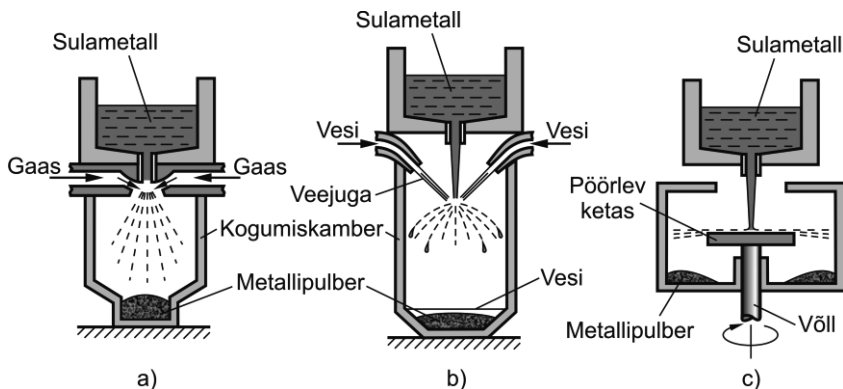
Füüsikalis-keemiliste saamisviiside hulka kuuluvad:

1. **Keemiline taandamine** (*chemical reduction*). Metalloksiidid (maak, maagikontsentraat, rauatagi jne) kuumutatakse taandavas keskkonnas (vesinik, disotsieeritud ammoniaak, endo- või eksogaas, konverteeritud looduslik gaas jt) või segatakse tahke taandajaga (näiteks grafiit, kaltsium, kaltsiumkloriid jt) ja kuumutatakse seejärel kaitsekeskkonnas. Meetodit kasutatakse laialdaselt protsessi suure tootlikkuse ja odavuse tõttu.
2. **Elektrolüütsadestus** (*electrolytic deposition, electrolytic precipitation*). Alalisvoolu läbilaskmisel elektrolüüdist sadestuvad katoodil metalli osakesed, mis aeg-ajalt mehaaniliselt eemaldatakse. Meetod võimaldab saada puhtaid pulbreid, kuid on väikese tootlikkusega ja kallis.
3. **Karbonüülide lagundamine** (*carbonyl decomposition*). Protsessi esimeses järgus sünteesitakse metallitükikestest karbonüül (metalli keemiline ühend CO-ga), mis seejärel lagundatakse. Meetod on kallis ja leiab kasutamist vaid peenete kõrgkvaliteetsete pulbrite saamisel.

Vaatleme metallipulbrite tootmise kasutatavamaid meetodeid.

### Sulametalli pihustus

Sulametalli pihustus on üks levinumaid metallipulbri valmistamise viise. Sel viisil toodetakse üle poole raua ja vase ning nende sulamite baasil pulbritest. Meetod seisneb metallide sulatamises ja sellele järgnevas pihustamises tsentrifugaaljõudude toimel või sulametallijoa purustamises gaasi- või veejoa abil (Joonis 10.2). Selle meetodi eelis on suur tootlikkus, osakeste suur homogeenus, protsessi odavus ja võimalus reguleerida pulbriosakeste suurust. Protsessi puudus on oksiidikile teke pulbriosakeste pinnale õhkipihustamisel ja pulbri halb pressitavus. Gaaspihustusega saadud, sfääriliselähedase kujuga pulbrid on halvasti pressitavad.



**Joonis 10.2.** Metallipulbrite saamine sulametalli pihustamise teel: a – gaaspihustus; b – vesipihustus; c – tsentrifugaalpihustus

**Gaaspihustus** (*gas atomization*) (vt Joonis 10.2a) on odavam pulbri saamise viis. Sulametall pihustatakse õhu või inertsgaasi joaga. Õhkpihustamisel piiskade pealispind oksüdeerub ja seepärast võib rauapulber sisaldada kuni 6 % hapnikku, mistõttu sel meetodil saadud pulber taandatakse järgnevalt vesiniku või dissotsieeritud ammoniaagi (75 % H<sub>2</sub> ja 25 % N<sub>2</sub>) keskkonnas. Gaaspihustatud pulbrite osakesed on üldjuhul sfäärilise kujuga (vt Joonis 10.3).

Inertgaasi (N<sub>2</sub>, Ar) joaga pihustamist kasutatakse kõrgleegeritud rauasulamite pulbrite saamiseks, vältimaks raskesti taandavate metallioksiidide (Cr, Mn, Ti, Zr jne.) teket pulbriosakeste pinnale. Argooni kõrge hinna tõttu on argoonpihustatud pulber ligi kaks korda kallim lämmastikpihustatud pulbrist. Oksüdeerumise vältimiseks kasutatakse vahel ka vaakumpihustust.

**Vesipihustust** (*water atomization, liquid atomization*) kasutatakse laialdaselt rauapulbri saamiseks, kuna sel meetodil võib saada väga puhast rauapulbrit ja see on gaaspihustatud pulbrist odavam. Sulametalliga kokkupuutumisel veejuga aurustub, mistõttu disperseerimine toimub praktiliselt ülekuumutatud auru abil. Veejoad (tavaliselt 2 kuni 4 juga) juhitakse sulametalli joasse 60...70° nurga all (Joonis 10.2b). Veejoa survet muutes on võimalik muuta pulbriosakeste suurust väga laias vahemikus. Mida suurem on veesurve, seda peenem pulber saadakse. Erinevalt gaaspihustusega toodetust ei ole vesipihustuse teel toodetud pulber sfääriline, vaid on ebakorrapärase vormiga osakekestest koosnev (vt Joonis 10.3). Sel meetodil toodetakse enamik madal- ja kõrgleegeritud rauasulamite pulbriest.

**Tsentrifugaalpihustus** (*centrifugal atomization*) on sulametalli pihustamine tsentrifugaalpihusti abil (Joonis 10.2c). Selleks tekitatakse inertse gaasi või suruõhuga sulametalli vannis rõhk, surumaks metalli läbi pihusti. Gaasi survega ja ketta pöörlemiskiirusega reguleeritakse sulametalli piiskade suurust. Piisad jahtuvad kiirelt ja moodustuvad eri suurusega pulbriosakesed.

Olenemata kasutatud pihustusmeetodist on sulametalli pihustus parim tehnoloogia **täislegeerpulbrite** (*prealloyed powder*) tootmiseks, mille iga osakese koostis on ligilähedane pulbermaterjali koostisele.

### **Keemiline taandamine**

Keemiline taandamine on praktikas laialt kasutatav meetod metallipulbrite saamiseks. Enim kasutatakse metallioksiidide (nii looduslike kui ka kunstlike) taandamist vesinikuga, süsinikuga jne.

Taandamisprotsessi saab kirjeldada reaktsiooniga



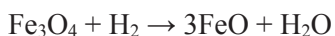
kus Me – metall, mille pulbrit soovitakse saada;

- A – mittemetalne komponent (hapnik, kloor, fluor jne);
- X – taandaja (vesinik, dissotsieeritud ammoniaak, fluoriidid jne);
- Q – reaktsiooni soojusefekt.

Taandamismeetodil saadakse raua-, vase-, molübdeeni-, volframi- jt pulbreid. Näiteks volframipulbri saamine volframanhüdriidist toimub järgmise reaktsiooni järgi:



Rauapulbri saamise protsess taandamisel vesinikuga läbib 3 järku:



Peenestatud rauamaagist või rauatagist vesinikuga taandatud rauapulber on suhteliselt kallis vesiniku kõrge hinna tõttu ja kasutatakse vaid väikese süsinikusisaldusega rauapulbri saamiseks. Seepärast kasutatakse praktikas enam odavat süsinikoksiidi või süsinikku (tahma, grafiiti), mis on samuti tugevad taandajad.

Mõningate metallide oksiidid (Ti, Mg, Al, Zr, Th, Ta, V, Be) taanduvad raskesti isegi vesiniku ja süsinikoksiidiga. Seepärast kasutatakse veelgi aktiivsemaid taandajaid, milleks on Ca, Na, Mg või nende ühendid. Näiteks  $\text{TiO}_2$  taandamine kaltsiumhüdriidiga toimub järgmise reaktsiooni järgi:



Seda meetodit kasutatakse ka tantaali- ja tsirkooniumipulbri saamiseks.

### **Elektrolüütsadestus**

Elektrolüütsadestus on üks keerulisemaid pulbrite saamise protsesse. Protsess seisneb metallide või nende soolade (kloriidid, fluoriidid jne) vesilahuste lagundamises alalisvoolu mõjul, mistõttu metalli aatomid sadestuvad katoodile.

Elektrolüüsiga kaasneb ka metalli rafineerimine lisanditest, kuna antud pinge juures sadestuvad ainult teatud metallioonid. Selle meetodiga saadakse puhtaid Cu-, Ti-, Ni-, Co-, Ta- jt pulbreid, mille osakesed on dendriitse kujuga (vt Joonis 10.3).

Elektrolüütsadestuse eelis on pulbrite suur puhtus (lisandite puudumine). Meetodi puudused on protsessi väike tootlikkus, suur energiamahukus ja pulbri kõrge hind. Elektrolüütpulbrid on hästi pressitavad ja paagutatavad.

### **Karbonüülide lagundamine**

**Karbonüül** (*carbonyl*) nimetatakse metalli (Fe, Ni, Mo jt) keemilist ühendit süsinikoksiidiga (CO). Karbonüülprotsessi esimeses järgus moodustub etteantud

temperatuuril ja rõhul metalli karbonüül (näiteks  $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ). Seda protsessi osa nimeatakse karbonüüli sünteesiks.

Protsessi teises järgus toimub karbonüüli termolagundamine, mis seisneb kristallisatsioonikeskmete tekkes karbonüülis ja metalliosakeste kasvus nende ümber. Kristallisatsioonikeskmete ja osakeste tekke kiirus oleneb eelkõige dissotsiatsiooniprotsessi temperatuurist ja rõhust, aga ka metallaatomite kontsentratsioonist karbonüülis. Näiteks  $\text{Ni}(\text{CO})_4$  lagundamiseks kuumutatakse sünteesikoloni normaalrõhul temperatuuril 250...400 °C.

Tööstuslikult toodetakse karbonüülide lagundamise teel nikli- ja koobaltipulbrit ning mõningal määral eriotstarbelist raua-, kroomi-, molübdeeni-, volframi- ja plaatina-pulbrit. Karbonüülpulbrid on peened (<20 µm) ja puhtad, kuid kallid.

### 10.2.2. Pulbrite omadused

Metallide või nende sulamite, samuti metalliühendite ja mittemetalsete materjalide pulbreid iseloomustavad keemilised, füüsikalised ja tehnoloogilised omadused.

#### Keemilised ja füüsikalised omadused

Pulbrite keemiliste omaduste all mõistetakse keemilist koostist (põhikomponendi ja lisandite kogus), toksilisust ja plahvatusohtlikkust. Keemilisest koostisest olenevad materjali füüsikalise-mehaanilised omadused. Enamikul metallipulbritel on põhimetalli sisaldus 97...99 %, mis on üldjuhul piisav kvaliteetsete pulberdetailide valmistamiseks. Pulbrite hapnikusisaldus peab olema võimalikult väike.

Peened pulbrid on väga aktiivsed ja kokkupuutumisel õhuga võivad isesüttida või isegi plahvatada. Süttimisohtlikud on selliste metallide nagu Zr, Al, Mg, Fe ja Co jt **alamikroonne pulber** (*submicron powder*) pulbriosakeste suurusega alla 1 µm, eriti **ülilpeenpulber** (*ultrafine powder, ultrafines*) osakeste suurusega 0,1...1 µm ja **nanopulber** (*nanopowder*) osakeste suurusega alla 0,1 µm.

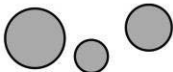





Kõik pulbrid on vähemal või suuremal määral toksilised. Seepärast on metallipulbritele kehtestatud lubatavad piirkogused nende sisaldusele õhus.

Pulbrite füüsikaliste omaduste hulka kuuluvad osakeste kuju, suurus ja pulbri eripind.

**Osakeste kuju** (*particle shape*) oleneb eelkõige pulbri saamisviisist (Joonis 10.3). Pihustatud pulbri ja karbonüülpulbri osakesed on valdavalt ümara kujuga, taandatud pulbri osakesed käsnja kujuga, elektrolüütsadestatud pulbri osakesed dendriitse kujuga jne. Osakeste kuju iseloomustamiseks kasutatakse mitmesuguseid **kuju-tegureid** (*shape factor, shape parameter*). Üks osakeste kujuteguritest on **piklikkus** (*aspect ratio*) – maksimum – ja miinimummõõtmete suhe. Sfääriliste pulbriosakeste piklikkus on 1,0, neljatel võib see olla 2,0...4,0 ja kiududel > 5.

**Osakeste suurus** (*particle size*) on tööstuses kasutatavatel metalsetel pulbritel tavaliselt vahemikus 25...300 µm. Osakeste suurus mõjutab oluliselt pulbri tehnoloogilisi ja pulbermaterjalide mehaanilisi omadusi. Üldiselt on väiksemate osakestega pulbrit saadud peenema struktuuriga materjalidel, paremad mehaanilised omadused.

Pulbri osakeste suurus ja nende jaotus **fraktsioonideks** ehk **osisteks** (*fractions*) määratakse **granulomeetriaanalüüsiga** (*granulometry, particle size analysis*). Enimkasutatav on **sõelanalüüs** (*sieve analysis*), kus puistematerjalide (pulbrite) fraktsiooniline (osiseline) koostis määratakse sõelte standarditud komplektide abil. Sõelanalüüsi alusel eristatakse pulbri **jäme fraktsiooni** (*coarse fraction*) osakeste suurusega +0,16...-1,0 mm, **keskfraktsiooni** (*medium fraction*) osakeste suurusega +0,04...-0,16 mm ja **peenfraktsiooni** (*fine fraction, fines*) osakeste suurusega alla 0,04 mm. Peenfraktsioon on sõelanalüüsi sõeltekomplekti kõige väiksema sõelaava sõela (tavaliselt 0,04 mm ehk 40 µm) läbiv pulbri fraktsioon. Kasutatakse ka tava-pärasest väiksema sõelaava **mikrosõelu** (*micromesh sieve*) sõelaava suuruse alampiiiriga 5 µm. Osakeste veelgi väiksema suurusega pulbrite granulomeetriaanalüüsiks tuleb sõelanalüüsi asemel kasutada muid meetodeid, näiteks optilist- ja elektronmikroskoopilist analüüsi.

Saamisviis		Osakeste kuju
Pihustatud Karbonüül		Sfääriline
Pihustatud		Hulknurkne
Jahvatatud (habras materjal)		Teravnurkne
Jahvatatud (plastne materjal)		Libeline
Elektrolüüs		Dendriitne
Taandatud		Käsnjas

**Joonis 10.3.** Pulbriosakeste kuju olenevalt saamisviisist

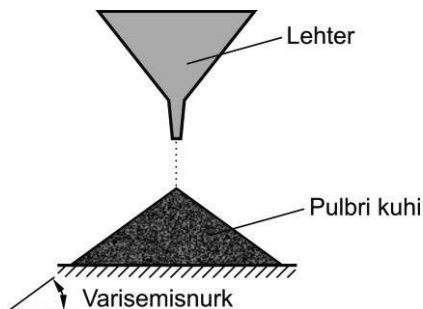
Pulbri **eripind** (*surface area*) on puistematerjali (pulbrite, kiudude) olulisemaid näitajaid. Eripind on pulbriosakeste pindala ja massi (või mahu) suhe. Eripind oleneb nii pulbriosakeste suurusest kui ka kujust, samuti osakeste sisemisest struktuurist (poorsusest). Metalsete mikropulbrite eripind on tavaliselt vahemikus  $0,01 \dots 1 \text{ m}^2/\text{g}$ , nanopulbritel kuni  $200 \text{ m}^2/\text{g}$ . Eripinna suurenedes suureneb metallipulbrite hapnikusisaldus. Tehnoloogilisi probleeme tekitab samuti **aglomeratsioon** (*agglomeration*) osakeste vahel ja sellest tingitud pulbri halb voolavus pressvormide täitmisel.

### Tehnoloogilised omadused

Pulbrite tehnoloogilised omadused on olulised pulbrite pressimisparameetrite määramisel ja pressvormide konstrueerimisel. Nad muutuvad laiades piirides olenevalt pulbriosakeste suurusest, kujust, pulbri eripinnast ja niiskussisaldusest jne.

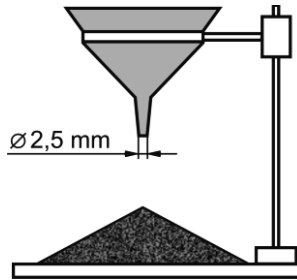
Pulbrite olulisimad tehnoloogilised omadused on pulbri varisemisnurk ja voolavus, näivtihedus, pressitavus ning tihendatavus. Pulbri varisemisnurk ja voolavus on omadused, mis olenevad hõõrdumisest pulbriosakeste vahel. Tehnoloogilisest aspektist on need omadused olulised pressvormi automaatseks täitmiseks kuluva aja hindamiseks.

**Pulbri varisemisnurk** (*angle of repose*) on vabal puistel moodustuv pulbri kaldenurk horisontaaltasandi suhtes (vt Joonis 10.4). Enamikul pulbritel on see vahemikus  $25 \dots 70^\circ$ . Kaldenurk (varisemisnurk) on seda väiksem, mida väiksem on osakestevaheline hõõrdumine.



**Joonis 10.4.** Pulbri varisemisnurk

**Pulbri voolavus** (*flow rate*) on pulbri võime täita vormiõõs gravitatsioonijõudude toimel. Voolavus oleneb pulbri fraktsioonilisest koostisest (jämedama pulbri voolavus on parem), kujust (sfääriline pulber voolab kergemini), materjali tihedusest (tiheduse suurenedes voolavus paraneb) jne. Voolavust hinnatakse kasutades **voolavusmõõturit** (*flow meter*) (vt Joonis 10.5). Mõõdetakse aega, mis kulub kindla koguse pulbri voolamiseks läbi kalibreeritud ava. Mida kiiremini pulber ava läbib, seda parem on voolavus.



**Joonis 10.5.** Pulbri voolavusmõõtur

Pulbri tihedus on oluline tehnoloogiline omadus. Eristatakse näiv-, puiste- ja rappe- tihedust.

**Näivtihedus** (*apparent density, bulk density*) on puistematerjali või poorse materjali tihedus. See on poorsust arvesse võttes kompaktsel (poorideta) materjali tihedusest väiksem. Puistematerjali (pulbri) puhul kasutatakse sünonüümina terminit **puiste- tihedus**. Tehnoloogilisest aspektist võimaldab näivtihedus hinnata vabas puistes pulbri poolt hõlmatavat mahtu pressvormi õõnsuses. Seda on vaja teada pressvormi projekteerimisel. Ebakorrapäraste osakestega pulbrite korral on oluline ka **rappe- tihedus** (*tap density*) – puistepulbri tihedus pärast raputamist.

**Pressitavus** (*compactability*) on pulbri omadus surve all moodustada **pressis** (*green compact*). **Tihendatavus** (*compressibility*) on pulbri võime pressimissurve toimel tihedust muuta. Nii pressitavus kui ka tihendatavus sõltub pulbri fraktsioonilisest koostisest, osakeste kujust, eripinnast ja mehaanilistest omadustest (plastsusest). Tihendatavust hinnatakse **tihendatavuskatsel** (*compressibility test*), määrates pressimissurve ja pressise tiheduse vahelise seose.

### 10.3. PULBRITE ETTEVALMISTUS VORMIMISEKS

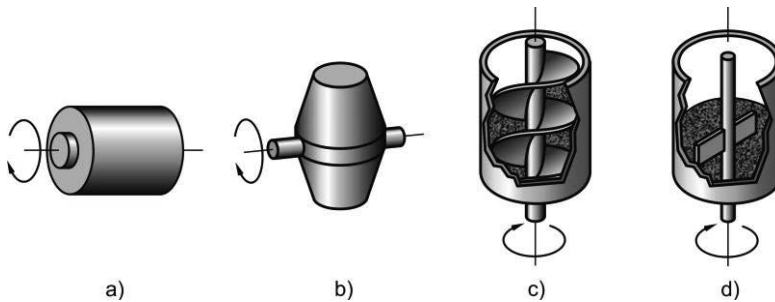
Pulbritest või kiududest pressise vormimisele eelneb pulbrite fraktsioonimine, segamine, vajadusel pulbri tehnoloogilisi omadusi parandavate lisandite (pulbrimääre, sideaine jne) lisamine. Sageli kasutatakse voolavuse parandamiseks pulbri granuleerimist.

**Fraktsioonimine** (*sizing, classifying*) on pulbri jaotamine gruppideks (fraktsioonideks, osisteks) osakeste suuruse järgi. Tavaliselt fraktsioonitakse pulbreid neid tootvates, harvem pulbertooted valmistavates ettevõtetes.

Pulbrite **segamine** (*mixing, blending*) on homogeenise mehaanilise segu valmistamine erineva keemilise ja/või osiselise koostisega pulbritest. Segamiseks kasutatakse erineva konstruktsiooniga mehaanilisi **segisteid** (*mixers, blenders*) (vt Joonis 10.6). Pulbrite paremaks segunemiseks täidetakse segisti mahust tavaliselt 20...40 %.



Segamine toimub enamasti kuivalt õhus või inertsgaasi keskkonnas. Mõnikord kasutatakse ka segamist vedeliku (piiritus, vesi jms) keskkonnas. Vedelikus toimub segunemine kiiremini, kuna pulbriosakeste vahelisest hõõrdumisest tingituna ei teki osakeste aglomeratsiooni soodustavaid elektrostaatilisi jõude. Kuivsegamist eelistatakse majanduslikel kaalutlustel, kuna sellisel juhul puudub aeganõudev jahvatusvedeliku väljaaurustamise vajadus. Segamine kestab alates ühest kuni mitme tunnini. Segamiskestus sõltub segatavate pulbrite tiheduse erinevusest (mida suurem erinevus, seda kauem segamine kestab), pulbriosakeste suurusest ja kujust, komponentide vahekorradest, segisti konstruktsioonist jne.



**Joonis 10.6.** Segistite tüübid: a – trummelsegisti; b – kaksikkoonussegisti; c – tigusegisti; d – labasegisti

Lisaks mehaanilisele segamisele kasutatakse mõnikord **keemilist segamist** (*chemical mixing*), mis tagab komponentide parema segunemise (segu homogeensuse). Keemilisel segamisel kasutatakse näiteks metallide soolalahuseid. Soolade sadestumisele järgneb kuumutamine vedeliku aurustamiseks, mille tulemusena sool laguneb metalliks. Teine meetod on pulbri põhikomponendi töötlemine soolalahusega. Pulbriosakeste pinnale sadestuvad lisatava metallisoola kristallid. Järgneb vedeliku aurustamine ja kuumutamine metalli saamiseni.

Pulbrisegule lisatakse vajadusel **pulbrimääret** (*powder lubricant*) tihendatavuse parandamiseks, vähendades pulbriosakeste vahelist hõõrdumist. Pulbrimääre vähendab samuti pulbri hõõrdumist pressivormi sisepindadel, võimaldades sama pressimisurve juures saada suurema tihedusega pressised. Pulbrimäärdena kasutatakse näiteks tsink- või alumiiniumstearaati. Pulbrite pressitavuse parandamiseks ja pressiste tugevuse tõstmiseks kasutatakse vajadusel polümeerset **sideainet** (*binder*).

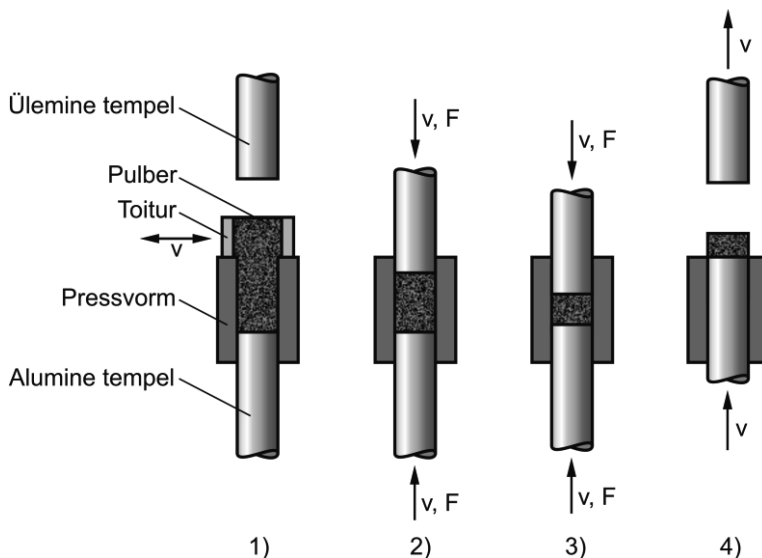
**Granuleerimise** (*granulation*) eesmärk on algselt peentest pulbriosakestest suuremate graanulite moodustamine. Granuleerimise eesmärgiks on pulbri voolavuse parandamine. Selleks lisatakse pulbrisegusse spetsiaalseid lisandeid, näiteks parafiini, millele järgneb granuleerimisprotsess. Graanulite suurus on tavaliselt vahemikus 0,3...0,6 mm.

## 10.4. PULBERMATERJALI VORMIMINE

**Pulbermaterjali vormimine** (*compacting, powder forming*) on tehnoloogiline protsess, mille käigus antakse vormitule pulbrimassile toote lõppkujulähedane vorm. Pulbermaterjali vormimiseks kasutatakse tehnoloogiaid, mis on sarnased metallide survetötluseks kasutatavate tehnoloogiatega – külmvormpressimine, ekstrudeerimine, valtsimine kui ka pulbertehnoloogiale omaseid tehnoloogiaid, nagu isostaatpressimine, pulbersurvevalu, lobrivalu. Õpiku selles osas käsitleme valdavalt külmvormimise protsesse, mille tulemusena saadakse edasist töötlemist (paagutamist) vajav **pressis** (*green compact*). Kombineeritud pulbertoodete valmistusprotsesse (vormimine on ühildatud paagutamisega) käsitletakse tagapool (p 10.6. Kombineeritud konsolidatsiooniprotsessid).

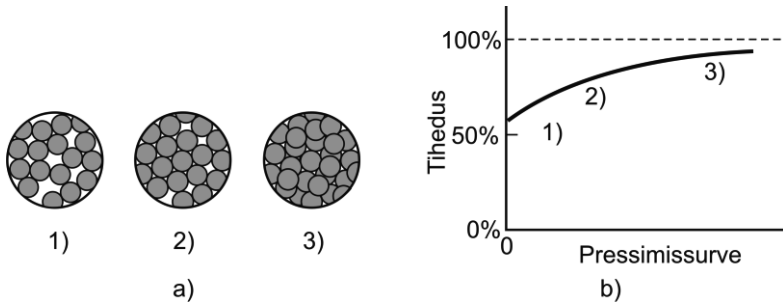
### 10.4.1. Pressimine pressvormides

**Pressimine** (*pressing*) pressvormis on pulbortoorkute (pressiste) vormimise kasutatavaim meetod. Pressimisoperatsioonide järjestus on esitatud Joonisel 10.7. Pressvormi matriitsi õõnsus täidetakse pulbriga, kasutades edasi-tagasi liikuvat pulbriga täidetud toiturit (Joonis 10.7, 1. etapp). Järgneb pressimine (Joonis 10.7, 2. ja 3. etapid) ning pressise eemaldamine (väljapressimine) alumist templit kasutades (Joonis 10.7, 4. järk). Saadud **pressise tugevus** (*green strenght*) on kasutamiseks veel ebapiisav, mistõttu järgneb tugevuse tõstmiseks **paagutamine** (*sintering*).



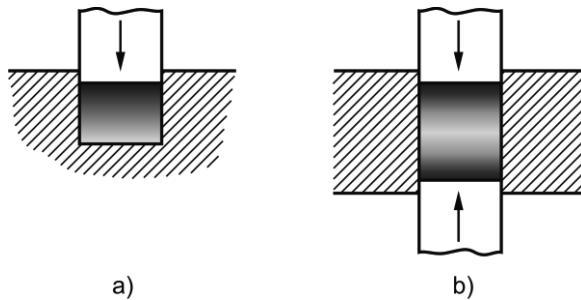
**Joonis 10.7.** Pressimine pressvormides: 1 – pressvormi matriitsi täitmine pulbriga; 2 – pressimise algetapp; 3 – pressimise lõppetapp; 4 – pressise väljapressimine (väljatõukamine)

Pressimise algetapil (vt Joonis 10.8a, 1. etapp) toimub tiheduse suurenemine pulbri osakeste ümberpaiknemise ja osakestest moodustunud „võlvide“ purunemise tõttu. Kontaktide arv pulbriosakeste vahel kasvab märgatavalt (Joonis 10.8a, 2. etapp). Järgmises etapis algab pulbriosakeste plastne deformeerumine, mille tulemusena osakestevaheline kontaktpind suureneb ning jätkub poorsuse vähenemine (Joonis 10.8a, 3. etapp). Pressimissurve kasvades pressise tihedus suureneb, lähenedes kompaktse materjali tihedusele.



**Joonis 10.8.** Pulbriosakeste asetus (a) ja pressise tihedus (b) pressimise erinevatel etappidel (1., 2., 3. etapid – vt Joonis 10.7)

**Ühesuunapressimisel** ehk **ühepoolsel pressimisel** (*unidirectional pressing*) on pressise tihedus ebäühtlane – see on väiksem pressise osades, mis on templi otspinnast kaugemal (Joonis 10.9a). Ebäühtlast tihedust põhjustab hõõrdumine pulbri ja pressvormi seina vahel. Ühtlasema tiheduse saamiseks pressise kõrguses kasutatakse **kahe-suunapressimist** ehk **kahepoolset pressimist** (*doubledirectional pressing*) (Joonis 10.9b). Ka sellisel juhul ei tohiks tiheduse homogeensemaks jaotuseks tooriku kõrguse ja läbimõõdu suhe ületada 2...2,5.



**Joonis 10.9.** Pressise tihedus: a – ühesuunapressimisel; b – kahe-suunapressimisel

Saavutamaks samal pressimissurvel pressise suuremat ja ühtlasemat tihedust, kasutatakse mõnikord **vibropressimist** (*vibratory pressing, vibratory compaction*) –

pressimist vibratsioonide kaastoimel. Vibratsioon parandab pulbri voolavust ning vähendab osakeste ja pressvormi seina vahelist hõõrdumist.

Kasutatav pressimissurve oleneb vormitavast pulbrist ja on üldjuhul vahemikus 100 N/mm<sup>2</sup> (alumiiniumtoorikud) kuni 1500 N/mm<sup>2</sup> (terastoorikud). Pressimisjõud oleneb pressise ristlõikepindalast pressimissuunaga ristival tasandil

$$F = pS_{pr}, \quad (10.5)$$

kus  $F$  – pressimisjõud, N,

$p$  – pressimissurve, N/mm<sup>2</sup>,

$S_{pr}$  – pressise ristlõikepindala, mm<sup>2</sup>.

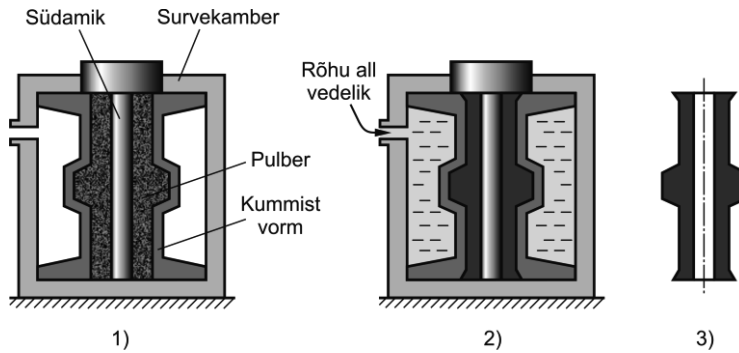
Pressimisel kasutatakse mehaanilisi- ja hüdropresse, millised võivad olla nagu surve-  
töötlemiselgi **kaheliugurilised pressid** ehk **kaksiktoimepressid** (*double-slide presses, double-action presses*), **üheliugurilised pressid** ehk **lihttoimepressid** (*single-slide presses, single-action presses*) (vt p 8.4.3. Stantsid ja lehtstantsimis-  
seadmed). Pulbermetallurgias kasutatakse tavaliselt presse survejõuga 100...100 000 kN (10...1000 tonni). Pressi valik (maksimaalne jõud) oleneb pressise ristlõikepindalast. Pressimisega pressvormides vormitakse üldjuhul pressised ristlõikepindalaga kuni 10 000 mm<sup>2</sup> (100 cm<sup>2</sup>).

#### 10.4.2. Isostaatpressimine

**Isostaatpressimine** (*isostatic pressing, isostatic compaction*) on vormimine hermeetilises kestas isostaatilist (igakülget) survet rakendades. Eristatakse külm- ja kuumisostaatpressimist.

**Külmisostaatpressimine** (*cold isostatic pressing, CIP*) on pulbrite või kiudude isostaatpressimine toatemperatuuril. Elastsest materjalist (kumm või mõni teine elastomeer) vorm valmistatakse pressimisega kaasnevat kahanemist arvestades suurem. Pressimiskeskonnana kasutatakse valdavalt vedelikku (vesi, õli) (vt Joonis 10.10), mistõttu külmisostaatpressimist nimetatakse ka **hüdrostaatpressimiseks** (*hydrostatic pressing*).

Külmisostaatpressimise eelis pressvormis pressimisega (vt p 10.4.1) võrreldes on pressiste ühtlasem tihedus, odavamad seadmed ning sobivus väiksemate tooteseeriade vormimiseks. Puudus on elastse vormi kasutamisest tingitud pressiste väike täpsus.

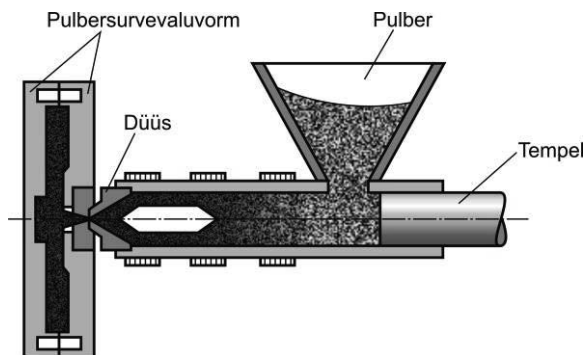


**Joonis 10.10.** Külmisostaatpressimine: 1 – pulbriga täidetud elastne vorm; 2 – hüdrostaatilise surve rakendamine; 3 – saadud pressis

**Kuumisostaatpressimine** (*hot isostatic pressing, HIP*) on kõrgtemperatuurne isostaatpressimine allpool põhikomponendi sulamistemperatuuri. Kuumisostaatpressimine toimub erinevalt külmisostaatpressimisest gaasilises (argoon, lämmastik jne) keskkonnas. Kuumisostaatpressimist vaatleme lähemalt osas 10.6.1.

### 10.4.3. Pulbersurvevalu ja lobrivalu

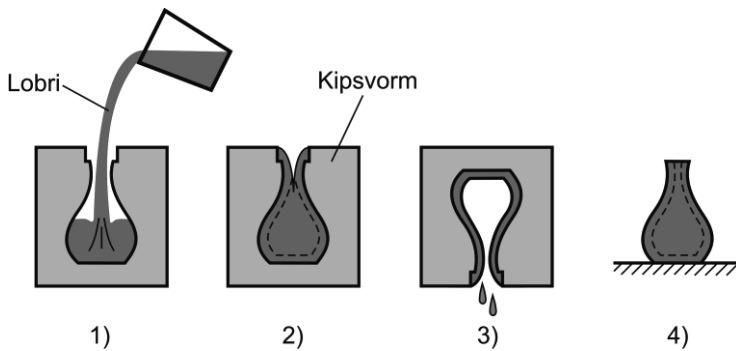
**Pulbersurvevalu** ehk **injektsioonvormimine** (*powder injection molding, PIM*) on keeruka vormiga toorikute plastifitseeritud pulbrisegust survevormimine. Tehnoloogia on sarnane termoplastidest toodete vormimise tehnoloogiaga (vt p 14.2. Plasttoodete vormimine). Pulbersurvevalu tehnoloogilised etapid on pulbri segamine sobiva sideainega (pulbrisaldus 50...85 mahu%), granuleerimine, graanulite kuumutamine vormimistemperatuurini, vormi täitmine ja pressise vormist eemaldamine (vt Joonis 10.11). Sideaine eemaldamiseks kuumutatakse pressis tavaliselt kaitsvas keskkonnas. Saadud pressis paagutatakse.



**Joonis 10.11.** Pulbersurvevalu

Pulbersurvealus kasutatakse **sideainena** (*binder*) termoplastseid või termoaktiivseid polümeere, parafiini, vett jms. Pulbersurvevalu on majanduslikult otsustarbekas suhteliselt väikeste, aga keerulise vormiga pulbertoodete hulgitootmiseks. Saadud toodete täpsus oleneb kahanemisest vormimisele järgneval paagutamisel.

**Lobrivalu** (*slip casting*) on valdavalt keraamilistest pulbritest pulbertoorikute vormimine lobri valamise teel poorsesse kips- või keraamilisse vormi (vt samuti p 14.3.2. Tehnokeraamika tehnoloogia). **Lobri** (*slip, slurry*) on hea voolavusega kontsentreeritud pulbersuspensioon (tavaliselt vees, piirituses). Lobris olev vedelik imub poorse vormi seina, mille tulemusena moodustub tahke ja poorne pulbertoorik. Meetod on sobiv näiteks õhukeseseinaliste toorikute vormimiseks (vt Joonis 10.12).



**Joonis 10.12.** Lobrivalu: 1 – vormi täitmine; 2 – lobri vedeliku imbumine poorsesse vormi; 3 – üleliigse lobri väljavalamine; 4 – vormist eemaldatud toorik

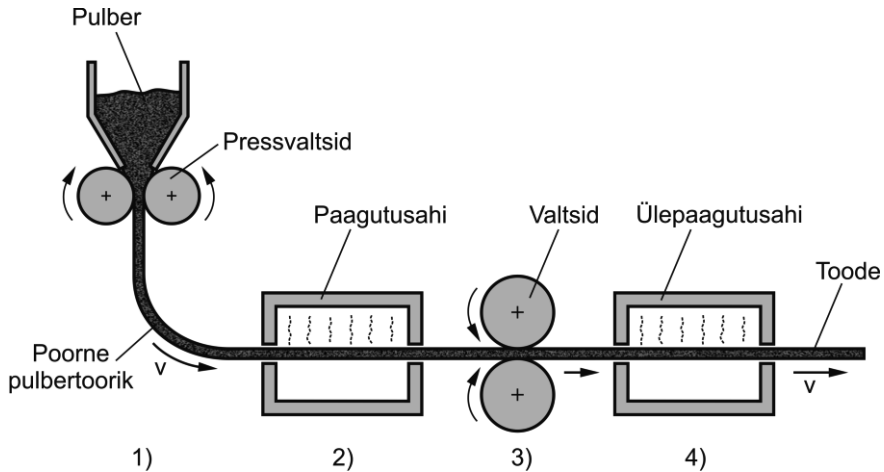
#### 10.4.4. Pulbri ekstrusioon ja valtsimine

**Pulbri ekstrusioon** (*powder extrusion*) on pulbri või eelnevalt vormitud pulbertooriku pressimine läbi matriitsi ava. Külmekstrusiooni kasutatakse edasist paagutamist vajavate, suure pikkusega toorikute (või toodete) saamiseks sideainet sisaldavast pulbrisegust. Pulbri või pulbertooriku kuumeekstrusioon võimaldab saada suure tihedusega (väikese poorsusega) pulbertooteid (vardad, torud jms).

Kuumekstrudeerimisel täidetakse plastsest metallist ekstrusioonikonteiner pulbriga, vakumeeritakse ning suletakse õhutihedalt. Pärast kuumutamist pulbriga täidetud konteiner ekstrudeeritakse samal põhimõttel kui metallide survetöötuses (vt p 8.3.2. Ekstrusioon). Alternatiivse skeemi järgi valmistatakse ekstrudeerimistoorik tavapäraselt pulbertehnoloogiat kasutades (pressimine + paagutamine), millele järgneb pulbertooriku kuumeekstrusioon.

**Pulbri valtsimine** (*powder rolling*) on õhukeste pulbertoodete või toorikute pidev-vormimine valtside vahel metallide survetöötuses tuntud tehnoloogilist põhimõtet

rakendades (vt. Joonis 10.13). Kui valtse pulbriga toitvas punkris on vaheseinad, on võimalik valmistada mitmekihilist linti.

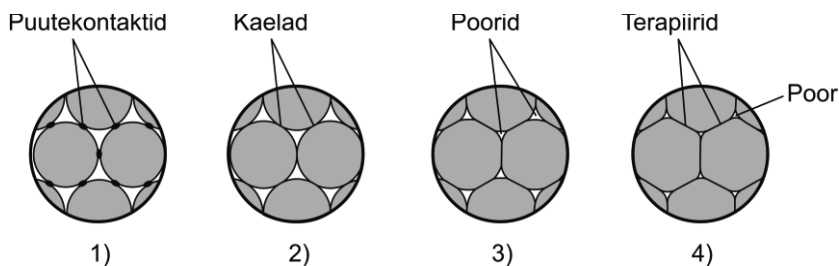


**Joonis 10.13.** Pulbri valtamine: 1 – poorse pulbertooriku saamine; 2 – paagutamine; 3 – külmaltsimine; 4 – ülepaagutamine (täiendav paagutamine)

## 10.5. PAAGUTUS

### 10.5.1. Paagutusprotsessi üldise loomustus

**Paagutus** (*sintering*) on pulbrite vormimisele (pressimisele) järgnev konsolideerimise (tihendamise) ja tugevuse tõstmise eesmärgil teostatav termiline töötus. Paagutatakse allpool pulbersulami põhikomponendi sulamistemperatuuri  $T_s$ , näiteks pulberkonstruktsioonmaterjale temperatuuridel ( $0,7 \dots 0,9 T_s$ , K). Peamiseks liikumapanevaks jõuks paagutamisel on **pinnaenergia** (*surface energy*) vähenemine pulbriosakeste vaheliste kontaktpindade kasvades. Pressis koosneb algselt suurest arvust osakestest, milliste summaarne pind on veel väga suur. Kuumutamisel kontaktid pulbriosakeste vahel hakkavad suurenema (vt Joonis 10.14), mistõttu osakeste summaarne pinnaenergia väheneb. Mida väiksem on pulbriosakeste suurus pressises, seda suurem on summaarne pinnaenergia ning paakumist esilekutsuv liikumapanev jõud.



**Joonis 10.14.** Mikroprotsessid sfääriliste osakestega pulbri paakumisel: 1 – osakestevahelised puutekontaktid; 2 – osakestevaheliste kontaktpindade suuremine; 3 – pooride suuruse vähenemine; 4 – teradevaheliste piiride moodustumine

Paagutamise kaasnab massiülekanne, mis viib teradevaheliste piiride moodustumisele. Massiülekanne üheks mehhanismiks on **difusioon** (*diffusion*). Eristatakse pind-, maht- ja teradevahelist difusiooni. Paakumise teiseks oluliseks mehhanismiks on samuti plastne voolamine. Mõlema protsessi tulemuseks on poorsuse vähenemisega kaasnev kahanemine. Paagutatud toote tihedus ja poorsus olenevad vormimisel kasutatud survest ning paagutustingimustest (temperatuur, kestus, temperatuuri tõstmise kiirus). Tabelis 10.1 on esitatud mõnede pulbermaterjalide paagutustemperatuurid ja -kestused.

**Tabel 10.1.** Mõnede pulbermaterjalide paagutustemperatuurid ja -kestused

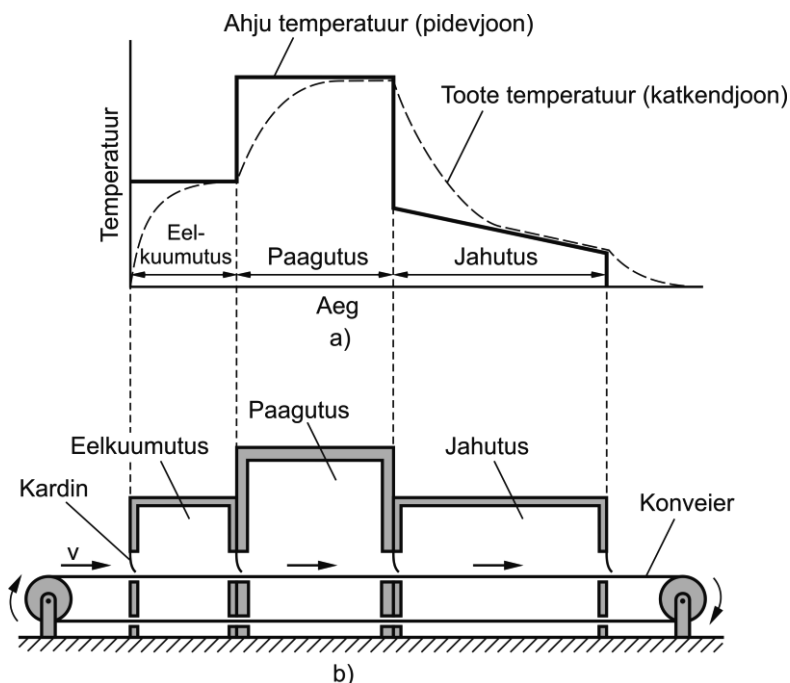
Metall	Paagutustemperatuur, °C	Paagutuskestus, min
Messing (valgevask)	850	25
Pronks	820	15
Vask	850	25
Raud/teras	1100	30
Roostevaba teras	1200	45
Volfram	2300	480

Paagutamisel saab eristada kolme etappi (vt Joonis 10.15):

- 1) **eelkuumutus** (*preheating*) – paagutuse madalatemperatuurne etapp, mille ülesandeks on pulbrimäärde ja/või sideaine **väljapõletus** (*burn-off*);
- 2) **paagutus** (*sintering*) – paagutusprotsessi kõrgtemperatuurne etapp;
- 3) **jahutus** (*cooling*).

Eelkuumutamisel gasifitseeruvad pulbrimäärde ja pressise tugevust suurendav sideaine, mille tulemusena pooride maht mõnevõrra suureneb. Suurema koguse spetsiaalsete gasifitseeruvate ainete lisamine pressisesse võimaldab vajadusel valmistada suure poorsusega pulberdetaili, näiteks filtreid. Paagutuse kõrgtemperatuurises järgus toimub pulbermaterjali struktuuri ja sellest olenev omaduste formeerumine.





**Joonis 10.15.** Paagutusprotsessi kolm järku: a – temperatuurirežiim; b – pidevtoimepaagutusahju skeem

Paagutamine toimub reeglina **kaitsekeskkonnas** (*protective atmosphere*), tavaliselt kaitsegaasides. Kaitsekeskkonna ülesanneteks on kaitse oksüdeerumise vastu, oksiidide taandamine (kui paagutatakse taandavas keskkonnas) või süsinikuga rikastamine (kui paagutatakse süsinikurikas keskkonnas).

Tavapäraste kaitsekeskkondadena kasutatakse inertgaase (Ar, N<sub>2</sub>), taandavate gaasidena vesinikku, dissotsieeritud ammoniaaki (75 % H<sub>2</sub> ja 25 % N<sub>2</sub>), maagaasi. Mõnede pulbermaterjalide (titaan, roostevaba teras, rasksulavad metallid) puhul kasutatakse kaitsekeskkonnaks vaakumi.

### 10.5.2. Paagutusmeetodid

Üldjuhul eristatakse **tardfaaspaagutust** (*solid-phase sintering*) pulbermaterjali vedelfaasi moodustumiseta ja **vedelfaaspaagutust** (*liquid-phase sintering*) ajutise või püsiva vedelfaasi moodustumisega.

#### Tardfaaspaagutus

Tardfaaspaagutamisel toimuvad järjestikku või samaaegselt järgmised protsessid:

- 1) kaldestusnähtude kadumine (vormimisega võib kaasneda kaldestumist põhjustav pulbriosakeste plastne deformatsioon);

- 2) rekristallisatsioon ja terade suurenemine;
- 3) oksiidide taandamine;
- 4) pind-, maht- ja teradevaheline difusioon, millega kaasneb osakestevahelise kontaktpinna suurenemine;
- 5) pooride kuju muutus, suuruse ja arvu vähenemine.

Protsessid paagutamisel olenevad osalevate komponentide arvust (ühe-, kahe- või mitmekomponentsed pulbersulamid). Ühekomponentse sulami paagutamise mikro- taseme protsesse on käsitletud Joonisel 10.14.

Pulbermaterjalid on enamasti kahe- või mitmekomponentsed. See tähendab, et paagu- tamisel toimub sulami moodustumine. Mitmekomponentse süsteemi paagutuse iseärasused on:

1. Samaaegselt **omadifusiooniga** (*self diffusion*) (difusiooniga sama metalli kristallivõres) toimub komponentidevaheline **heterodifusioon** (*heterodiffu- sion*) (erisuguste aatomite difusioon), mis viib konsentratsioonide ühtlus- tumiseni, faasidevaheliste piiride moodustumiseni jne.
2. Erinevalt ühekomponentse süsteemi paagutamisest, kus difusiooniprotsessid viivad kahanemiseni, võib heterodifusioon mitmekomponentses süsteemis esile kutsuda pressise mahu kasvu paagutamisel. Mõnede Fe-Cu sulamite puhul (näiteks Fe + 6...8 % Cu) on võimalik saavutada pressiste mahu muutumatus paagutamisel, mis on praktikas ka laialdast kasutust leidnud.

Tardfaaspaagutust kasutades toodetakse enamik pulberkonstruktsioonimaterjale, näiteks Fe-C-, Fe-Cu-C-, Cu-Ni- jt sulamitest.

### **Vedelfaaspaagutus**

Vedelfaaspaagutamisel kahe- või mitmekomponentse süsteemi kergsulav komponent on paagutuse mingis järgus sulaolekus. Vedelfaaspaagutamisega kaasneva pressise kahanemise tingimuseks on, et paagutuse käigus moodustuv vedelfaas märgab tardfaasi. Vedelfaas aktiveerib ja kiirendab märgatavalt paagutusprotsesse, kuna:

- kergeneb osakeste ümberpaigutumine vedelfaasi pindpinevusjõudude toimel;
- suureneb kontaktpind komponentide vahel (mille tulemuseks on kiiremad massiülekanne protsessid).

Vedelfaaspaagutuse esimeses järgus moodustuv vedelfaas täidab tahkete pulbri- osakeste vahelised tühikud. Hea märgumise korral tungib sulametall osakestevaheliste kontaktpindade vahele. Paagutuse teises järgus toimub väikeste osakeste lahustumine vedelfaasis ja suurematele osakestele sadestumine. Paagutuse kolmandas järgus toi- mub tahkete osakeste kokkukasvamine eespool kirjeldatud tardfaaspaagutuse meh- hanismi järgi.

Pulbermaterjalidest toodetakse vedelfaaspaagutust kasutades W-Cu-sulameid, WC-Co kõvasulameid jt.

### **Aktiivpaagutus**

**Aktiivpaagutus** (*activated sintering*) on intensiivistatud paagutamine erinevaid füüsikalisi, keemilisi või mehaanilisi (nt ultraheli) protsesse rakendades. Aktiivpaagutus võimaldab tõsta paagutusahjude tootlikkust ja vähendada energiakulu.

Aktiveerimine on alati seotud materjali ebastabiilsuse suurendamisega. Paagutusprotsessi kiirendamiseks kasutatakse füüsikalisi ja keemilisi meetodeid. Füüsikaliste meetodite hulka kuuluvad näiteks paagutustemperatuuri tsükliline muutmine, ultraheliga töötlemine, aktiveeritud pulbrite (suurem eripind, kristallivõre defektid) kasutamine, surve alla paagutamine (vt p 10.6. Kombineeritud konsolidatsiooniprotsessid).

Keemilised meetodid põhinevad oksüdeerimis-taandamisreaktsioonil, aktivaatorite kasutamisel, keemiliste ühendite moodustumise protsessi ärakasutamisel. Viimasel juhul nimetatakse paagutust **reaktsioonpaagutuseks** (*reactive sintering*). Keemiliste aktivaatoritena kasutatakse näiteks lisandeid, mis moodustavad väikeses koguses vedelfaasi. Näiteks 0,5 % Ni lisamine volframile või molübdeenile võimaldab nende rasksulavate metallide paagutustemperatuuri oluliselt alandada. Reaktsioonpaagutuse näiteks on räni paagutamine süsinikoksiidi keskkonnas, mille tulemusena moodustub SiC. Ka tardlahuse või intermetalliidide teke aktiveerib paagutust.

### **Mikrolainepaagutus**

Paagutamisel kasutatakse tavaliselt gaasilise kaitsekeskkonnaga elektri- või vaakum-ahje. Uudse arendusena on kasutusele võetud mikrolaineahjud. **Mikrolainepaagutusel** (*microwave sintering*) kasutatakse mikrolainekuumutust, kusjuures toimub elektromagnetilise energia kiire konversioon soojusenergiaks. Mikrolaineid sagedusega 1...2,5 GHz kasutatakse tööstuslikult peamiselt keraamikamaatrikskomposiitide (vt p 10.6.1), viimasel ajal ka metalsete pulbersulamite paagutamisel. Mikrolainekuumutust kasutatakse lisaks paagutamisele ka eelkuumutamisel pulbrimäärde või sideaine eemaldamiseks.

### **Paagutuskarastus ja paagutusjootmine**

Mõnikord paagutamine ühildatakse teiste tehnoloogiatega, näiteks karastamisega või jootmisega. **Paagutuskarastus** (*sinter hardening*) on karastamine paagutus-temperatuurilt. Seda võimaldavad spetsiaalse konstruktsiooniga ahjud. **Paagutusjootmine** (*sinter brazing*) on pulbertoorikute paagutamise ja jootmise ühitatud protsess. Erineva koostisega pulbertoorikud vormitakse (pressitakse) eraldi ja liidetakse paagutuse jooksul sobivat joodist kasutades.

## 10.6. KOMBINEERITUD KONSOLIDATSIOONI- PROTSESSID

**Konsolidatsioon** (*consolidation*) on toorikute või toodete saamise protsess lähtematerjalide (pulber, kiud, graanulid) tihendamise teel. Konsolidatsiooniprotsessid on pulbermaterjali vormimine (pressimine, isostaatpressimine jne, vt p 10.4) ja paagutamine (vt p 10.5. Paagutus), aga samuti pulbri vormimise ja paagutamise kombineeritud protsessid – kuumpressimine, kuumisostaatpressimine, survepaagutus, plasmaaktiveeritud paagutus ning pihustusvormimine. Tänu kõrgetele konsolidatsioonitemperatuuridele võimaldavad need meetodid toota **täistihematerjalist** ehk **kompaktmaterjalist** (*full density material*) pulbertooteid.

### 10.6.1. Kuumpressimine ja kuumisostaatpressimine

**Kuumpressimisel** (*hot pressing*) on ühildatud pressimine ja paagutamine – pulbri või kiudude kaitsekeskkonnas pressimine temperatuuridel üle põhikomponendi kristallisatsioonitemperatuuri. Kuumpressimise põhimõte on sarnane tavapärasele pressimisele pressvormis (vt p 10.4.1) erisusega, et pressimine toimub kõrgel temperatuuril kuni 2500 °C ja survel kuni 50 MPa. Surve ja kõrge temperatuuri ühildamise tõttu on võimalik toota peaaegu poorsuseta materjale ka kõige raskemini pressitavatest pulbritest (näiteks keraamilised pulbrid). Pressimise kestus on tavaliselt 1...3 tundi, kasutades kõrge temperatuuritaluvusega grafiidist, keraamilistest materjalidest või rasksulavast metallist pressvorme.

Kuumpressimist kasutatakse näiteks suurte WC-Co kõvasulamist toodete, kiud-armeeritud **keraamikamaatrikskomposiitide** (*ceramic matrix composites, CMC*), **kermiste** (*cermets*), mitmekihiliste pulbertoodete jt tootmisel. Kuumpressimise kasutamist piiravateks asjaoludeks on toodete pikk tootmistsükkel (mistõttu meetod on hulgitootmiseks sobimatu) ning probleemid sobiva pressvormimaterjali valikul.

**Kuumisostaatpressimine** (*hot isostatic pressing, HIP*) on kõrgtemperatuurne isostaatpressimine igakülge survega allpool põhikomponendi sulamistemperatuuri. Põhimõte on sarnane külmisostaatpressimisega (vt p 10.4.2) erisusega, et pressimine toimub kõrgel temperatuuril ja gaasilises keskkonnas (inertgaasid). Kuumisostaatpressimisega saab toota peaaegu poorsuseta peeneteralise struktuuriga pulbermaterjale (pulbertooteid). Kuumisostaatpressimiseks täidetakse õhukeseinaline kuumuskindlast terasest või rasksulavast metallist **kapsel** (*can, capsule*) pulbriga, tihendatakse, vakumeeritakse ja suletakse hermeetiliselt. Järgneb pressimine isostaatiliselt (igakülget) survet rakendades. Kuumisostaatpressimisel kasutatakse survet kuni 300 MPa, temperatuure kuni 2500 °C, pressimiskestus 2...6 tundi. Pulbri kapseldamist on võimalik vältida, kui isostaatpressida eelnevalt pressitud ja paagutatud avatud poorsuseta (poorsus < 8 mahu %) toorikuid.

Kuumisostaatpressimist kasutatakse pulbertööriistaterastest (peamiselt pulberkiirlõiketeras), keraamikamaatrikskomposiitidest, **metallmaatrikskomposiitidest** (*metal matrix composites, MMC*), **kõvasulamitest** (*hardmetals, cemented carbides*) jt pulbermaterjalidest toodete tootmisel. Kuumisostaatpressimise eeliseks on võimalus toota kompaktsid (poorsuseta) tooteid nii metalsetest kui ka keraamilistest pulbritest. Puuduseks on tehnoloogia kallidus, mis on ennekõike tingitud tooriku ettevalmistuse keerukusest – tihendatava pulbri **kapseldamise** (*canning, encapsulation*) ning järgnev sellest vabanemise – **kapslitustamise** (*decanning, decapsulation*) vajadus. Kulukas on samuti teine võimalus – avatud poorsuseta tooriku eelnev valmistamine tavapärasest pressimist ja paagutust kasutades.

### 10.6.2. Survepaagutus

**Survepaagutus** (*sinter-HIP*) on paagutus järgneva kuumisostaatpressimisega ühe kuumutustsükli jooksul. Erinevalt kuumisostaatpressimisest pulbri eelnevat kapseldamist ei kasutata. Pressis paagutatakse survepaagutuse esimeses järgus või kaitsegaasis, millele järgneb teises järgus isostaatpressimine gaasilises keskkonnas ( $N_2$ , Ar). Survepaagutuse eeliseks kuumisostaatpressimisega võrreldes on suurusjärgu võrra väiksemate isostaatiliste survete (5...15 MPa) kasutamine, mistõttu ohutusnõuded survepaagutusseadmetele on märkimisväärselt madalamad kui kuumisostaatpressidele. Eeliseks on samuti see, et survepaagutusega saab toota **lõppkujulähedasi** (*near-net shape, net shape*) kompaktsid pulbertooteid. Kasutatakse toodete tootmiseks kõvasulamitest, kermistest, pulberkiirlõiketerastest jne.

### 10.6.3. Plasmaaktiveeritud paagutus

**Plasmaaktiveeritud paagutus** (*spark-plasma sintering, plasma activated sintering*) on surve all suure kuumutuskiiirusega (kuni 1000 °C/min) aktiivpaagutus. See paagutusmeetod on vaba kuumpressimise ja kuumisostaatpressimise puudusest – pikk konsolidatsiooni kestus. Plasmaaktiveeritud paagutamisel rakendatakse sarnaselt kuumpressimisele surve kõigepealt pressvormis olevale pulbrile või pressisele. Seejärel läbib toorikut kõrgsagedusvool, mille toime moodustub pulbriosakeste vahel impulssplasma, mis aktiveerib osakeste pinda. Järgneb tooriku tavapärase takistuskuumus läbiva elektrivoolu toime. Pressimissurved on sarnased kuumpressimisel kasutatavatega – kuni 60 MPa. Konsolidatsioon toimub paarsada kraadi tavapärasest paagutustemperatuuridest madalamal. Plasmaaktiveeritud paagutuse eelis on väga lühike paagutusaeg – kompaktna materjal moodustub 10...20 sekundi jooksul. Paagutustsükli summaarne aeg on kuni kümnekond minutit. Lühike paagutusaeg ja tavapärasest madalamad paagutustemperatuurid teevad võimalikuks nano- ja ülipeenstruktuuriga pulbermaterjalide saamise. Kasutatakse kõikvõimalikest

pulbermaterjalidest (metallid, keraamika, intermetalliidid, kermised jne) toodete tootmiseks.

#### 10.6.4. Pihustusvormimine

**Pihustusvormimine** (*spray forming, in-situ compaction*) on toodete või toorikute saamine, kasutades termiliselt (elektri- või plasmakaarega) sulatatud osakeste pihustamist vormi (matriitsi) pinnale. Toote vormimiseks kasutatakse seadmeid, mille tööpõhimõte on sarnane sulametalli pihustamisel kasutatavaga (vt Joonis 10.2). Sulametalli pihustusprotsessi parameetreid muutes on võimalik saada pihustatud metallipulbrit, sulametalli tilku või pooltardolekus osakesi. Pihustusvormimisel kasutatakse pooltardolekus metalliosakesi, mis vormi pinnaga põrkudes kiirelt jahtuvad. Kiire jahtumine võimaldab kiht-kihilt moodustada ühtlase keemilise koostise, peeneteralise struktuuri ja suure tihedusega (tihedus > 98 % teoreetilisest) pulberdetailide või -toorikuid edasiseks töötlemiseks, näiteks sepistamise teel.

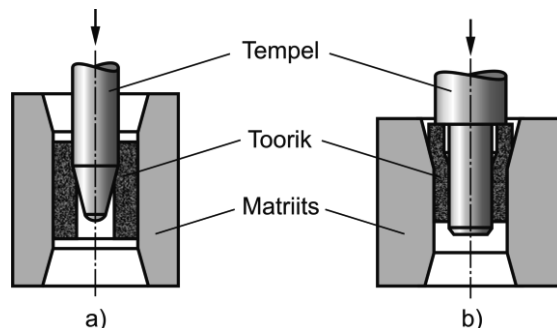
### 10.7. PULBERTOORIKUTE TÄIENDAV TÖÖTLUS

Pulbermetallurgia eeliseks on võimalus toota tooteid, mis enamasti täiendavat töödlust ei vaja. Täiendav töötlus võib olla vajalik järgnevatel eesmärkidel:

- kalibreerimine ja kuju muutmine;
- tihendamine ja mehaaniliste omaduste parandamine;
- spetsiifiliste omaduste andmine.

#### 10.7.1. Järeltöötlus kuju muutmiseks

**Kalibreerimist** (*sizing, coining*) kasutatakse pulberdetaili mõõtmete ja kuju täpsuse suurendamiseks ning pinnasileduse parandamiseks külma plastse deformeerimisega väikseid (kuni 3 %) deformatsiooniastmeid rakendades. Kalibreeritakse nii sise- ja välisläbimõõdu või paksuse järgi (vt Joonis 10.16).



**Joonis 10.16.** Siseläbimõõdu (a) ja sise- ning välisläbimõõdu samaaegne (b) kalibreerimine

## Järeltöötlus kuju muutmiseks

Keeruka kujuga toodete puhul on mõnikord vaja pulbertoorikute järeltöötlust lõiketöötlust kasutades. See on vajalik, kui tavapärasest pressimist (vt p 10.4.1. Pressimine pressvormides) kasutades ei ole võimalik mõningaid pindu, avasid jm moodustada. Näiteks pressides ei ole võimalik valmistada keeret, tagurpidi koonust, pressimis-suunaga ristuvaid avasid ja ringsooni jne. Pulbertooded projekteeritakse (vt p 10.8.3. Pulbertoodete konstruktiivsed iseärasused ja tehnoloogia valik) üldjuhul viisil, mis välistab täiendava mehaanilise töötlemise või viib vajaduse selle järele miinimumini.

Juhul kui täiendav lõiketöötlus on vajalik, tuleb arvestada, et pulbertoorikute lõiketöötlusel on tavapäraste poorsuseta materjalide lõiketöötlusega (vt p 12.1. Lõiketöötluse alused) võrreldes mõningad iseärasused – poorsusel on lõikeprotsessi raskendav mõju. Poorsed materjalid on kompaksete materjalidega võrreldes halvema soojusjuhtivusega, mistõttu tõuseb teriku tipu temperatuur lõiketsoonis tavapärasest kõrgemale. Poorid muudavad lõikeprotsessi katkendlikuks, millega kaasneb vibratsioon jne.

### 10.7.2. Järeltihendus ja mehaaniliste omaduste parandamine

Pulbermaterjali omadused olenevad olulisel määral poorsusest. Poorsust vähendades (tihedust suurendades) paranevad mehaanilised omadused. Selleks kasutatakse pulbertooriku ülepressimist, kuumstantsimist ja infiltratsiooni.

**Ülepressimine** (*repressing, restriking*) on eelnevalt pressitud ja paagutatud toorikute täiendav pressimine väikeseid deformatsiooniastmeid kasutades, parandamaks mehaanilisi omadusi ja suurendamaks täpsust. Külvalt ülepressimisega kaasneva poorsuse vähenemise ja kalestumise tulemusena võib tugevus suureneda 25...50 %, mille kõrval paraneb samuti pulbertoodete täpsus ja pinnakvaliteet.

**Pulbertooriku kuumstantsimine** (*PM forging*) on poorse tooriku konsolidatsioon kuumstantsimisega tiheduse suurendamise (poorsuse vähendamise) eesmärgil. Toorik kuumstantsimiseks valmistatakse tavapäraselt pulbertehnoloogiat (pressimine ja paagutamine) kasutades. Küllalt suure jääkpoorsusega (20...25 %) toorik kuumutatakse lühiajaliselt gaasilise kaitsekeskkonnaga ahjus ja kuumstantsitakse.

Pulbertooriku kuumstantsimisel saadakse lõppkujulähedane, suure tiheduse (kuni 99 % teoreetilisest tihedusest) ja kõrge pinnakvaliteediga pulbertoode. Eeliseks tavapärase kompaktmaterjalidest toorikute kuumstantsimisega võrreldes (vt p 8.3.5. Vasarstantsimine) on materjali parem kasutus (peaaegu jäätmevaba tehnoloogia) ja enamasti pulberdetailide paremad mehaanilised omadused, mis on tingitud struktuuri-iseärasustest – peenteralisus, likvatsiooni (legeerivate elementide või faaside jaotuse ebahühtlus) puudumine. Pulbertoorikute kuumstantsimist kasutatakse raskkoormatud toodete (kepsud, hammasrattad, kettirattad jms) suurseeria- ja hulgitootmisel.

**Infiltratsioon** (*infiltration*) on paagutatud või paagutamise käigus poorse materjali pooride täitmine põhimaterjalist madalama sulamistemperatuuriga metalliga või muu materjaliga (näiteks klaas). Infiltratsiooni kasutatakse poorsuseta, parandatud mehaaniliste omadustega (tugevus, voolepiir, plastsus) pulbertoodete tootmiseks. **Infiltratsioonimaterjalina** ehk **infiltrandina** (*infiltrant*) kasutatakse vaske, hõbedat jt põhimaterjalist madalama sulamistemperatuuriga metalle ja metallisulameid. Infiltratsioon eeldab märgumist süsteemis põhimaterjal-infiltrant. Halva märgumise korral sisestatakse infiltratsioonimaterjal poorsesse karkassi surve all, kasutades **surveinfiltratsiooni** (*external pressure infiltration*).

### 10.7.3. Spetsiifiliste omaduste andmine

Pulbertoorikute poorsus üldjuhul kahjustab mehaanilisi omadusi. **Avapoorsus** (*open porosity, interconnected porosity*) annab siiski võimaluse unikaalsete pulbertoodete tootmiseks, kasutades **immutus** (*impregnation*) mittemetalsete materjalidega (nt vedelad ja tahked ained) spetsiifiliste rakenduslike ja tehnoloogiliste omaduste saavutamiseks.

**Antifriktioonpulbermaterjalid** ehk **pulberlaagrimaterjalid** (*antifriction PM material*) on enim kasutust leidnud materjalid, mille tootmisel kasutatakse immutus vedelate (õlid) või tahkete (fluorplast, väävel, metallide sulfiidid jms) määretega. Määre täidab 10...40 % toote mahust tagades pika aja jooksul isemäärivuse.

Poorsete pulbertoorikute immutus mittemetalsete materjalidega kasutatakse mitte ainult hõõrdeteguri vähendamiseks, vaid samuti avatud poorsusega pulbertoodete muutmiseks mitteläbitavaks gaasidele või vedelikele. Pooride täitmise eesmärgiks võib samuti olla lõiketöödeldavuse parandamine (vt p 10.7.1. Järeltöötlus kuju muutmiseks) või toote korrosioonikindluse suurendamine. Viimasel juhul suletud poorid ei võimalda korrodeerivatel vedelikel poorse pulbertoote sisemusse pääseda.

## 10.8. PULBERMATERJALID JA -TOOTED

### 10.8.1. Pulbermaterjalide omadused

**Pulbermaterjal** (*powder metallurgy material, PM material*) on pulbertehnoloogiliselt valmistatud materjal pulbrite baasil. Pulbermaterjalide struktuur ja omadused olenevad nagu kompaktmaterjalidegi puhul koostisest, aga samuti ka kasutatud pulbrite osiselisest koostisest, pressimissurve, paagutustemperatuurist ja -kestusest jne. Mehaanilised omadused olenevad suuresti pulbermaterjalide ja -toodete poorsusest ja sellega seotud tihedusest.

**Poorsus** (*porosity*) on pooride kogumist tingitud materjali struktuuri iseloomustav näitaja. Pulbermaterjalid tihedusega alla 75 %, 75...90 % ja üle 90 % kompak-



materjali omast on vastavalt väikese, keskmise ja suure tihedusega pulbermaterjalid. Poorid on käsitletavad pingekontsentratoritena, millest saab alguse pragude moodustumine ja purunemine. Pulbermaterjalide purunemisele eelnevad üldjuhul väiksemad plastsed deformatsioonid võrreldes sarnase koostisega kompaksete (poorsuseta) materjalidega. Suhteliselt väikese tugevusega materjalide korral (näiteks alumiinium ja vask) on erinevused mehaanilistes omadustes kompakse ja poorsusega pulbermaterjalide vahel suhteliselt väiksemad kui suure tugevusega materjalide (teras) puhul.

Tugevuse ja plastsuse poolest on näiteks poorsed pulberterased omadustelt lähedased hallmalmile, mille omadused olenevad suuresti grafiidiosakestest metallmaatriksis (vt p 5.1.3. Malmid). Poorid avaldavad pulberterase omadustele samasugust mõju kui grafiidiosakesed hallmalmi omadustele. Teiselt poolt, poorsuseta või väikese poorsusega pulberteraste (ka teiste metallide sulamite) omadused võivad olla samaväärsed või isegi ületada tavapärase teraste mehaanilisi omadusi peeneteralisema struktuuri ja likvatsiooni (elementide või faaside jaotuse ebaühtlus) puudumise tõttu.

### 10.8.2. Põhiliste pulbermaterjalide ja -toodete iseloomustus

Vaatleme kokkuvõtlikult pulbermetallurgiale iseloomulikke pulbermaterjalidest tooteid.

1. Keeruka kuju, suure tihedusega täpsed tooted. Sellisteks on keti- ja hammasrattad, keeruka profiiliga nukid ja puksid jms. Neid on võimalik toota ka tavapäraseid tehnoloogilisi meetodeid (valu, survetöötus, lõiketöötus) kasutades. Pulbertehnoloogiat võib eelistada võimaluse tõttu tehnoloogiliste operatsioonide suhteliselt väikest arvu (4...6) kasutades toota lõppkujulähedasi, suure täpsusega ja enamasti täiendavat mehaanilist töötlust vähe- või mittevajavaid tooteid.
2. Poorsed tooted. Nende hulka kuuluvad isemäärivad laagrid, filtrid gaaside ja vedelike puhastamiseks, vedelike ja gaaside rõhu ning voolukiiruse regulaatorid jms. Õlidega immutatud raua või vase baasil isemäärivaid laagreid toodetakse märkimisväärsel hulgal näiteks kodumajapidamisseadmete ja autode liugelaagrite valmistamiseks. Toodetakse samuti erineva poorsuse ja pooride suurusega filtreid. Pulbermetallurgia meetodil toodetud filtritele on iseloomulik kõrge temperatuuritaluvus, korrosioonikindlus, suhteliselt suur mehaaniliste koormuste taluvus, regenereeritavus.
3. Tooted rasktööeldavatest materjalidest. Sellesse gruppi kuuluvad tooted **rasksulavatest metallidest** (*refractory metals*), näiteks W, Mo ning keraamilis-metallsetest komposiitidest – **kõvasulamid** (*hardmetals, cemented carbides*) ja **kermised** (*cermets*). Pulbermetallurgia on sobiv rasksulavatest metallidest toodete saamisel, kuna puudub vajadus kõrge sulamistemperatuuriga metalle üles sulatada. Pulbertehnoloogia võimaldab samuti saada peeneteralisemat

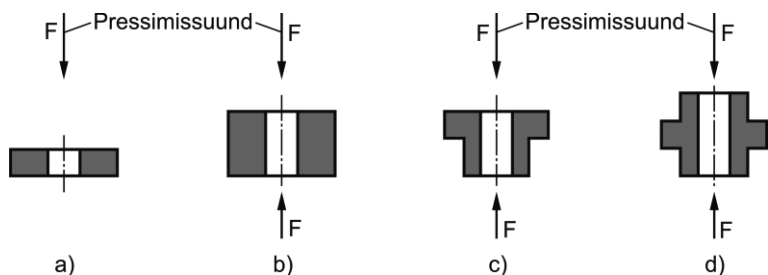
struktuuri. Kõvasulamid (WC-baasil, näiteks WC-Co komposiidid), samuti kermised (karbiidide, oksiidide, nitriidide, boriidide jt suure kõvadusega rasksulavate ühendite ja metalse materjali baasil komposiitmaterjalid) on väga kõvad ja kulumiskindlad, mistõttu on neid raske mehaaniliselt töödelda. Sellistest materjalidest toodete valmistamise täpsus peab olema piisav selleks, et lõiketöötlemisel saaks piirduda vaid lihvimisega.

4. Tooted komponentide omaduste kombineerimisega. Selliste toodete omadused formeeruvad koostisosade (metall-metall või metall-mittemetall) baasil. Pulbertehnoloogia annab unikaalse võimaluse valmistada tooteid materjalidest, millest valmistamine tavapärasel tehnoloogial kasutades ei ole võimalik. Näiteks **elektrikontaktpulbermaterjalid** (*electrical contact PM materials*), mida kasutatakse mitmesuguste kontaktide tootmiseks, näiteks kontaktmaterjalid avatavateks kontaktideks (Cu-W, Ag-W, Ag-Mo jt) või liugkontaktideks (Cu-grafiit jt). Selliste materjalide koostises olev hõbe ja vask tagavad hea elektri- ja soojusjuhtivuse, samal ajal kui rasksulavad metallid (W, Mo) tagavad kontaktide elektroerosioonikindluse, tugevuse ja kõvaduse.
5. Pulbermaterjalide eelisomadustega tooted. Need on tooted pulbermaterjalidest, mille puhul pulbertehnoloogia annab saavutatavate omaduste seisukohast eelise konkureerivate tehnoloogiatega (valu, survetöötlus) võrreldes. Näiteks täistihedusega (poorsuseta) eelisstruktuuriga pulbertööriistaterasest tööriistad ja pulbertoorikutest kuumstantsimisega toodetud konstruktsioonidetailid (kepsud, hammasrattad jne). Pulbertehnoloogial on sageli selge eelis pulbermagnetite tootmisel.
6. Tooted pulbertehnoloogia majanduslike eelistega. Pulbertehnoloogia majanduslikud eelised tulenevad sobivusest suurseria- ja hulgitootmiseks, tehnoloogiliste operatsioonide väiksest arvust keeruka kujuga lõppkujulähedaste toodete tootmisel, energia kokkuhoidust, jäätmete puudumisest või vähesusest.

### 10.8.3. Pulbertoodete konstruktiivsed iseärasused ja tehnoloogia valik

Pulbertoodete konstrueerimisel tuleb silmas pidada pulbermetallurgia tehnoloogilisi iseärasusi. Pulbertooteid saab lihtsustatult liigitada kuju järgi gruppidesse, tuginedes piirangutele pulbrite tavapärasel **ühetelgsel pressimisel** (*uniaxial pressing, uniaxial compacting*) pressvormides (vt Joonis 10.17).

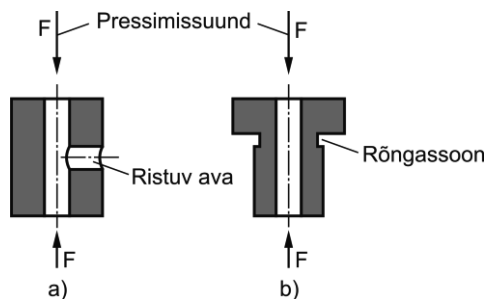
Ühetelgse pressimise alaliikideks on **ühesuunapressimine** (*unidirectional pressing*) pressimissurve rakendamisega ühelt poolt ning **kahesuunapressimine** (*double directional pressing*) pressimissurve rakendamisega kahelt poolt (vt 10.4.1. Pressimine pressvormides).



**Joonis 10.17.** Pulberdetailide kuju järgi grupeerimine ja pressimistehnoloogia: a – lihtsa kujuga õhukesed tooted, kasutatakse ühesuunapressimist; b – lihtsa kujuga paksud tooted, kasutatakse kahesuunapressimist; c – kaheastmelised (kahe erineva paksusega) tooted, kasutatakse kahesuunapressimist; d – mitmeastmelised (mitme erineva paksusega) tooted, kasutatakse templitte kontrollitava liikumisega kahesuunapressimist

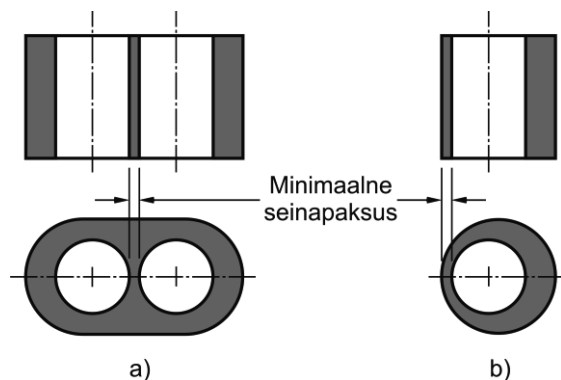
Pulberdetailide projekteerimisel lähtutakse järgmistest reeglitest:

1. Geomeetria (kuju) peab võimaldama pressvormist **väljapressimist** (*ejection*). Seda saab saavutada, kui toote külgpinnad (sh astmelisel pulberdetailil) on pressimissuunaga paralleelselt. Avade läbimõõt (ka umbavade) peab kogu pikkuses olema ühesugune. Vältida tuleb pressimissuunaga ristuvaid avasid ja rõngassooni (vt Joonis 10.18).



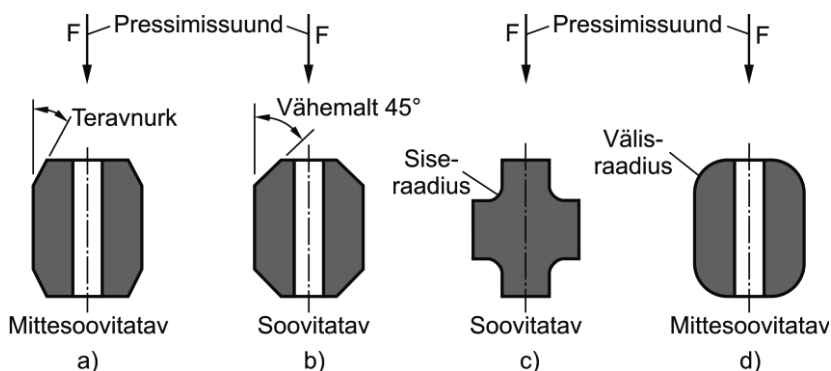
**Joonis 10.18.** Toodete geomeetria, mida tuleb pulbertehnoloogias vältida: pressimissuunaga ristuv ava (a) ja rõngassoon (b)

2. Seinapaksus peab olema piisav, vältimaks probleeme kitsaste pilude pulbriga täitmisel pressvormis. Seinapaksus peab olema suurem kui 1,5 mm (vt Joonis 10.19).



**Joonis 10.19.** Minimaalne seinapaksus kahe ava vahel (a) ja ava ning välispinna vahel (b)

3. Detaili geometria peab võimaldama valmistada piisava jäikuse ja tugevusega tehnoloogilist rakistust pulbri vormimiseks – pressvormide matriits ja templid. Vältida tuleks faaside teravaid nurki ja välisraadiust (vt. Joonis 10.20).



**Joonis 10.20.** Pulberdetailide faasid ja ümardusraadiused: a – vältida faaside teravnurki; b – eelistatud faaside nürinurgad ( $> 45^\circ$ ); c – soovitatavad sisemised raadiused; d – vältida välismi raadiusi, mis vähendavad templi serva jäikust ja tugevust pressimisel

4. Pressitava pulbertoote paksus ei tohiks ületada läbimõõtu enam kui 2,5...3kordselt ka kahesuunapressimisel.
5. Võimalusel vältida tehnoloogilisi probleeme põhjustavat detaili mitmeastmelisust (vt. Joonis 10.17d).
6. Pulbertehnoloogia ei võimalda keermestamist. Selleks tuleb ette näha täiendav lõiketöötus.
7. Toote mõõtmed ja konstruktsioon peavad olema kooskõlas olemasoleva tehnoloogilise seadmestikuga – pressimisjõud, liugurite arv teostamiseks kahesuunapressimist ja/või mitme templiga kontrollitavat pressimist.

8. Arvestada tuleb pulberdetailide suurema täpsusega radiaalsuunal (mida tagavad matriitsi ja templite mõõtmed) teljesuunalise täpsusega võrreldes (oleneb pulbri koguse ja/või templite liikumise täpsusest).
9. Arvestada tuleb pressitud pulbertooriku võimaliku kahanemisega paagutamisel, mida tuleb silmas pidada tehnoloogilise rakistuse (matriits, templid) projekteerimisel. Eriti suure kahanemisega (20...25 %) tuleb arvestada pulbertoorikute vedelfaaspaagutamisel, mille tulemusena saadakse peaaegu poorsuseta materjal.

### Tehnoloogia valik

Tehnoloogia valikul tuleb arvestada pulbertoote mõõtmeid, kuju, soovivat struktuuri, tihedust, mehaanilisi omadusi, tootepartii suurust, omahinda, täpsust, tootlikust. Tabelis 10.2 on nendele aspektidele tuginedes võrreldud nelja erinevat pulbertoote tootmise tehnoloogiat.

**Tabel 10.2.** Pulbertehnoloogiate võrdlus

Karakteristik	PM tavatehnoloogia (pressimine + paagutus)	Injektsioonvormimine + paagutus	Kuumisostaatpressimine	Pulbertooriku kuumstantsimine
Tooriku mõõtmed	keskmine	väike	suur	keskmine
Lõppkujulähedus	hea	suurepärase	väga hea	hea
Tootlikus	suur	keskmine	väike	suur
Tootepartii suurus	> 5000	> 5000	1...1000	> 10 000
Täpsus	suur	suur	väike	suur
Tihedus	rahuldav	väga hea	suurepärase	suurepärase
Mehaanilised omadused *	60...90 %	90...95 %	≥ 100 %	100 %
Omahind	madal	keskmine	kõrge	keskmine

\* – poorsuseta kompaktmaterjaliga (täistihematerjaliga) võrreldes

## 10.9. KORDAMISKÜSIMUSED

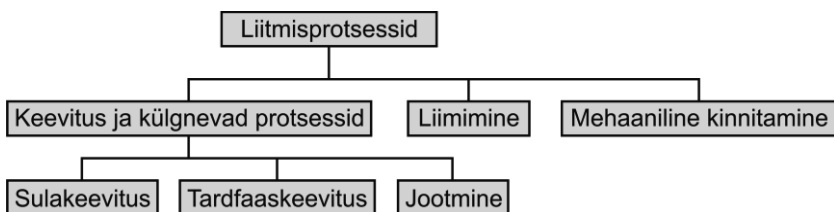
1. Nimetage peamised majanduslikud põhjused pulbermetallurgia (pulbertehnoloogia) kasutamiseks tavatehnoloogiatega (valu, survetöötlus, lõiketöötlus) võrreldes.
2. Millised on pulbermetallurgia puudused tavatehnoloogiatega (valu, survetöötlus) võrreldes?
3. Selgitage avatud ja suletud poorsuse erisust poorsetes pulbermaterjalides.
4. Üks pulbriosakeste geomeetriat iseloomustavatest kujuteguritest on piklikkus. Mida see iseloomustab?
5. Mil viisil ja otstarbel hinnatakse pulbrite tehnoloogilist omadust – pulbri vari-semisnurka?
6. Mida iseloomustab poorse materjali (või pulbri) näivtihedus ja millisel otstarbel seda määratakse?
7. Millised on tööstuslikult enim kasutust leidnud metallpulbrite saamisviisid?
8. Millised on kolm peamist tehnoloogilist etappi pulbertoodete tootmisel?
9. Milliseid tehnoloogilisi lisandeid ja mis otstarbel segamisprotsessis pulbrisegudesse tavaliselt lisatakse?
10. Millised on tööstuses kasutatavaimad pulbrite vormimismeetodid?
11. Selgitage tihendumisprotsessi (poorsuse vähenemist) pulbrite pressimisel.
12. Mis eeliseid annab pulbertooriku kahesuunapressimine ühesuunapressimisega võrreldes?
13. Millised on kolm tehnoloogilist etappi pulbermaterjalide paagutamisel?
14. Selgitage tard- ja vedelfaaspaagutuse erisusi.
15. Miks paagutatakse pulbermaterjale kaitsekeskkonnas (kaitsegaasid, vaakum)?
16. Mille poolest erinevad kombineeritud pulbrite konsolidatsiooniprotsessid – kuumisostaatpressimine ja survepaagutus?
17. Mille poolest erinevad pulbermetallurgia tavatehnoloogia – pressimine ja paagutamine – ja kuumisostaatpressimine?
18. Mis otstarbel kasutatakse pulbermetallurgias infiltreerimist?
19. Miks pulbermetallurgia on majanduslikult otstarbekas keeruka kujuga toodete (hammasrattad, ketirattad, kepsud jne) tootmiseks?
20. Pulbermetallurgia üks eelis on võimalus toota lõppkujulähedasi, täiendavat töötlust enamasti mittevajavaid tooteid. Milliseid operatsioone kasutades on mõnikord otstarbekas pulbertoorikuid täiendavalt töödelda?

# 11. MATERJALIDE LIITMISPROTSESSID

<p>11.1. LIITMISPROTSESSIDE LIIGITUS</p> <p>11.1.1. Keevituse olemus ja -protsesside liigitus</p> <p>11.1.2. Keevisliidete ja keevisõmbluste liigitus</p> <p>11.1.3. Keevisliidete tsoonid ja struktuur</p> <p>11.2. KEEVITAMISE KAASNÄHTUSED</p> <p>11.2.1. Keevitusmetallurgia</p> <p>11.2.2. Keevitusjäähkpinged ja -kujumuundused</p> <p>11.2.3. Keevitatavus</p> <p>11.3. SULAKEEVITUS</p> <p>11.3.1. Kaarkeevitus</p> <p>11.3.2. Keemilistel reaktsioonidel põhinevad sulakeevituse protsessid</p> <p>11.3.3. Sulakeevituse eriprotsessid</p> <p>11.3.4. Kontaktkeevitus</p> <p>11.4. TARDFAASKEEVITUS</p> <p>11.4.1. Tardfaaskeevitusprotsesside olemus</p> <p>11.4.2. Tardfaaskeevitusprotsessid</p> <p>11.5. PLASTIDE KEEVITUS</p>	<p>11.6. JOOTMINE</p> <p>11.6.1. Olemus ja iseärasused</p> <p>11.6.2. Jooteliited</p> <p>11.6.3. Joodised ja jooteräbustid</p> <p>11.6.4. Jootmismeetodid</p> <p>11.7. LIIMIMINE</p> <p>11.7.1. Liimimise olemus</p> <p>11.7.2. Liimliited</p> <p>11.7.3. Liimid</p> <p>11.7.4. Liimimise tehnoloogilised etapid</p> <p>11.8. LIIDETE KATSETAMINE JA LIITMISPROTSESSI VALIK</p> <p>11.8.1. Keevitus- ja jootmisdefektid</p> <p>11.8.2. Keevis- ja jooteliidete kontroll</p> <p>11.8.3. Liitmisprotsessi valik</p> <p>11.9. TERMOLÕIKUS</p> <p>11.9.1. Olemus ja liigitamine</p> <p>11.9.2. Hapniklõikus</p> <p>11.9.3. Kaarlõikus</p> <p>11.9.4. Fokuseeritud kiirega termolõikus</p> <p>11.10. KORDAMISKÜSIMUSED</p>
---	---

## 11.1. LIITMISPROTSESSIDE LIIGITUS

Suuremõõtmelisi või keeruka kujuga, samuti erinevatest materjalidest koosnevaid tooteid valmistatakse üldjuhul erinevaid **liitmisprotsesse** (*joining processes*) kasutades (vt Joonis 11.1).



Joonis 11.1. Liitmisprotsesside liigitus

**Keevitus** (*welding*) on kahe või enama detaili liitmine ja **püsiliite** ehk **kinnisliite** (*permanent joint*) moodustamine kuumutamise või surve abil, kusjuures tekib tugev metallurgiline side liidetavate metallide aatomite vahel koos ühtse kristallivõre moodustumisega. Keevitamise käigus erinevad energialiigid aktiveerivad liidetavate pindade aatomid. Keevitatakse kokku samast metallist, aga ka erinevatest metallidest tooteid. Keevitamist kasutatakse ka plastide liitmiseks. Keevitamise tulemusena saadakse **keeviskoost** (*weldment*) või **keeviskonstruktsioon** (*welded assembly*).

Keevitamise eesmärk on liidetavate detailide **põhimetalliga** (*base metal*) või **põhimaterjaliga** (*parent material*) samaväärsse keevisliite saamine, mille mehaanilised omadused – tõmbetugevus  $R_m$ , katkevenivus  $A_5$  ja purustustöö löökpaindel ei jää alla põhimetalli omale. Kulumiskindlate teraste korral on veel nõudeks pinnakihi nõutav kõvadus, kõrglegeerterastel, nt roostevabadel terastel, korrosioonikindlus.

Keevitusprotsesse kasutatakse veel kulumis-, korrosioonikindlate jm omadustega materjali kandmiseks toodete pinnale või kulunud toodete esialgsete mõõtmete taastamiseks. Seda nimetatakse **sulatuspindamiseks** (*fusion surfacing, thermal cladding*) (vt p 13.4.4. Termopindamine).

Keevitamise kui liitmistehnoloogia iseärasuseks on asjaolu, et samu seadmeid võib sageli kasutada ka materjalide termolõikamiseks. Nii saab gaaskeevituse põleteid kasutada gaaslõikamiseks ja kaarkeevituse vooluallikaid metallide kaarlõikamiseks, kasutades käsikaarkeevituse elektroode ja suurt voolu (vt p 11.9. Termolõikus).

**Jootmine** (*soldering, brazing*) hõlmab liitmisprotsesside rühma, mille korral ühendatavate materjalide vaheline pilu täidetakse kuumutamisega sulasse olekusse viidud **lisametalliga** (*filler metal*). Joodetakse allpool põhimaterjali sulamistemperatuuri (vt p 11.6. Jootmine).

**Liimimine** ehk **adhesiivliitmine** (*adhesive bonding, glueing*) on materjalide liitmisprotsesside rühm, mille korral mittemetalne liim ehk adhesiiv kantakse ühendatavatele pindadele vahele, mis märgab neid ning kõvenedes füüsikaliste ja keemiliste protsesside toimel moodustub liimliide (vt p 11.7. Liimimine).



Metallide ühendamiseks kasutatakse liitmisprotsessina enim sulakeevitust ja jootmist, mille iseloomustavaks tunnuseks on materjali soojuslik mõjutamine koos liidetavate detailide servade, lisametalli või joodise sulatamise ja nende järgneva tardumisega. Seoses uute materjalide arendamisega järjest suureneb liimimise osatähtsus, eriti auto- ja lennukitööstuses.

Igat tehnikas kasutatavat materjali on võimalik liita ühe või mitme liitmisprotsessiga, seejuures tuleb arvestada paljude asjaoludega. Võimalusel tuleb eelistada madalatemperatuurseid liitmisprotsesse nende väiksema termilise mõju tõttu nii liidetavate materjalide omadustele kui ka tekkivatele jääkpingetele ja toodete kõverdumisele.

### 11.1.1. Keevituse olemus ja keevitusprotsesside liigitus

Tahkist käsitletakse vastastikustes sidemetes olevate aatomite kogumina. Keha füüsikalised ja mehaanilised omadused on määratud aatomite paiknemisega ja nende vaheliste sidemetega. Keevitamise tulemusena on liitekohal võimalik luua samasugused aatomitevahelised sidemed nagu keha sisemuses ehk ühtne kristallivõre ja samaväärsed mehaanilised omadused nagu liidetavatel detailidel ehk põhimetallil.

Ideaalne metallurgiline side liidetavate pindade vahel nõuab järgmiste tingimuste täitmist:

- a) liitepindade suurepärase siledus ja tasetas;
- b) oksiidide, mittemetalsete lisandite ja pinnale absorbeerunud gaaside puudumine liitepindadel;
- c) liidetavate pindade ühtne kristallivõre ja orientatsioon.

Praktikas on välja arendatud palju keevitusprotsesse, mis võimaldavad täita eelnevalt loetletud tingimusi. Erinevad keevitusprotsessid hõlmavad sageli erinevaid lahendusi liitepindade puhastamiseks enne keevitamist, vältimaks nende oksüdeerumist või saastumist lisanditega keevitusprotsessi käigus. Liidetavate pindade ebatasasust võib kompenseerida jõu rakendamisega ja plastse deformeerimisega (survekeevitus) või sulatamisega (sulakeevitus).

Kvaliteetse keevisõmbluse saamise tingimuseks on:

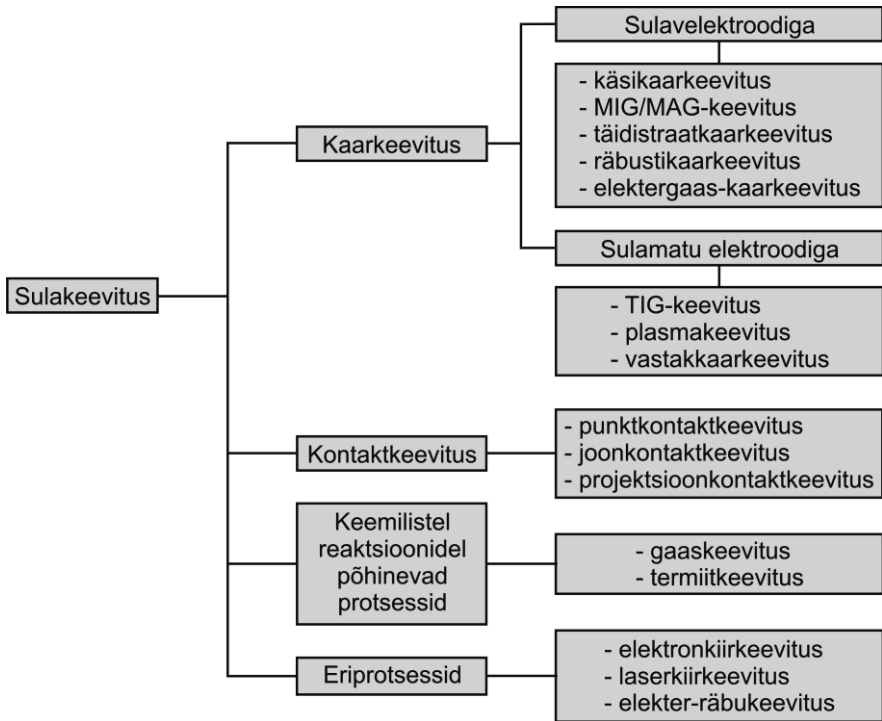
- 1) piisava temperatuuri või surve rakendamine;
- 2) meetmed liidetavate metallide kaitseks oksüdeerimise jt teiste kahjulike mõjude eest või liitepindade puhastamine;
- 3) ettevaatusabinõud kahjulike metallurgiliste protsesside (ebasobivad struktuurid, metalli terakasv) vältimiseks või kompenseerimiseks.

Keevitamisel eristatakse tardfaas- ja sulakeevitust.

**Tardfaaskeevitusel** (*solid-state welding*) toimub materjalide liitmine allpool nende sulamistemperatuuri. Liitepindadel asuvad lisandid eemaldatakse kas mehaaniliselt, keemiliselt või plastse voolamise käigus, kusjuures tekib uus puhas liitepind. Tard-

faaskeevituseks on difusioonkeevitus, hõõrdkeevitus, plahvatuskeevitus ja ultrahelikeevitus (vt p 11.4).

**Sulakeevitusel** (*fusion welding*) liidetavate detailide servad ehk põhimetall sulatatakse kokku, vajadusel täidetakse servavahemik keevituselektroodi sulamisel moodustunud **lisametalliga** (*filler metal*). Rakendatud kõrge temperatuur kiirendab keemilisi reaktsioone liidetavate pindade ja ümbritseva keskkonna vahel ja tekkinud oksiidid, räbu ja gaasid eemaldatakse sageli keevisvannist räbuse. Sulakeevituse põhiprotsesside rühmad on esitatud joonisel 11.2.

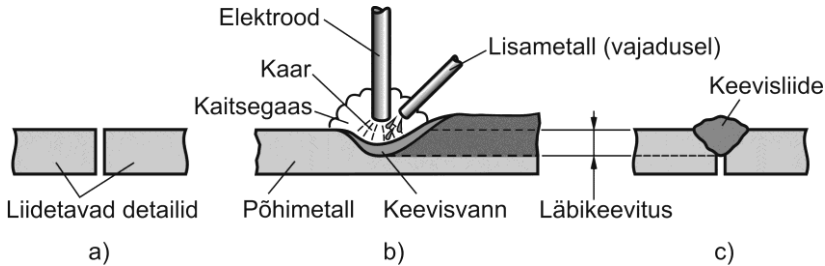


**Joonis 11.2.** Sulakeevituse põhiprotsessid

Sulakeevitusel tekib keevisõmbuluse liitepindade vahel iseloomuliku kujuga **keevisvann** (*weld pool*), mis koosneb põhimetallist ja sulanud lisametallist, mis on sinna siirdunud elektroodist. Mõnedel juhtudel koosneb keevisvann ainult sulanud põhimetallist, näiteks autogeenkeevitusel, kus sulatatakse detailide servad ilma lisametalli kasutamata (vt 11.3.2.: Gaaskeevitus ja p 11.3.1.: TIG-keevitus). Mõõtmelt väike sula keevisvann asub justkui suures metallist valuvormis ja tardudes moodustab **keevismetalli** (*weld metal*) ning struktuurselt **keevisõmbuluse** (*weld*). Et tagada keevismetallile põhimetalliga samaseid mehaanilisi omadusi, tuleb sulakeevitusel valida lisametallina sellised keevituselektroodid, keevitustraadid või

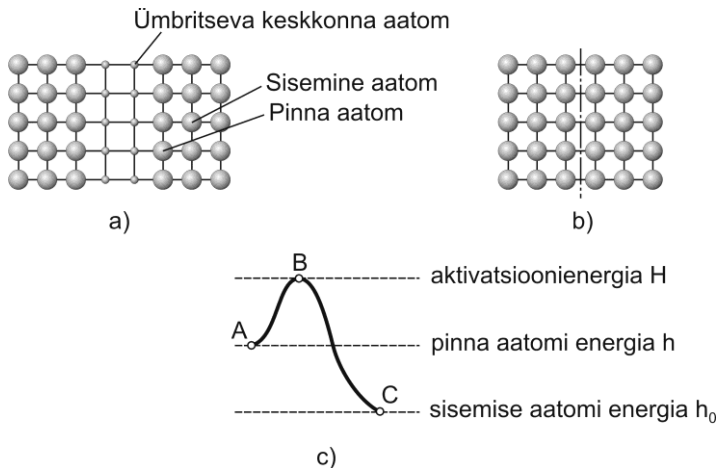
-vardad, mille mehaanilised omadused on võrdsed või mõnevõrra kõrgemad kui keevitataval põhimetallil.

Sulakeevitust kaarkeevituse näitel kirjeldab joonis 11.3



**Joonis 11.3.** Kaarkeevituse etapid: a – enne keevitamist; b – keevitamise ajal; c – pärast keevitamist

Aatomitevaheliste sidemete tekkimise mehhanismi selgitamiseks vaatleme kahe monokristalli (Joonis. 11.4) liitumist tervikuks energeetilise mudeli abil. Monokristallid liituvad siis, kui lähendada nende pinnad kristallivõre parameetriga võrdsele kaugusele. Termodünaamiliselt tähendab see vabaenergia vähenemist kahe liitepinna kadumise tulemusena. Metalli vabal pinnal punktis A on aatomi vabaenergia  $h$ . Aatomi energia metalli sisemuses on väiksem  $- (h_0)$ . (vt Joonis 11.4c). Kui metallid liituvad ja vaba pind kaob, vabaneb energia  $\Delta h = h - h_0$ . Seejuures peab aatom saama aktivatsioonienergia  $H$ , et ületada energeetilist barjääri (punkt B Joonisel 11.4c). Aktivatsioonienergia avaldub seosest  $\Delta H = H - h$ .



**Joonis 11.4.** Keesvitusprotsessi mudel monokristallidele: a – monokristallid enne keevitamist; b – monokristallid pärast keevitamist; c – süsteemi energia muutus

Toatemperatuuril takistab pinna aatomite lähenemist metalli kõvadus (mehaaniline barjäär) ja pinnale absorbeerunud gaasikiht või lisandid (keemiline barjäär). Nende barjääride ületamiseks on vaja kuumutamist või mehaanilise surve rakendamist. Keevitusel ületatakse energeetiline barjäär soojuse abil liidetavate detailide servade sulatamisega või plastse deformeerimisega.

Laiemalt võib erinevate aktivatsioonienergia järgi eristada järgmisi keevitusmeetodeid:

- a) termomeetodid, mille puhul kasutatakse kaarlahenduse, fokuseeritud energia-kiire, leegi jm soojusenergiat;
- b) mehaanilised meetodid, mille puhul liitepindu mõjutatakse mehaaniliselt (ultraheli-, plahvatus-, survekeevitus);
- c) termomehaanilised meetodid, kus kasutatakse nii mehaanilist kui ka soojusenergiat (kontaktkeevitus, difusioonkeevitus).

Keevitusprotsesse liigitatakse mehhaniseerimise taseme järgi:

- **käsikeevitus** ehk **käsitsikeevitus** (*manual welding*) on inimese – keevitaja poolt käeliselt tehtud keevitamine.
- **poolautomaatkeevitus** (*semiautomatic welding, partly mechanized welding*) on osaliselt mehhaniseeritud keevitus; üldjuhul käsikeevitus, kus keevitus-traadi või -lindi kujul lisametalli etteandmine on mehhaniseeritud vastava ajami abil ja liikumine piki keevisõmblust toimub keevitaja käe abil;
- **automaatkeevitus** (*automatic welding*) on täielikult seadmete poolt tehtud automatiseeritud keevitus, kusjuures keevituspea liikumist ja asukohta ei juhi inimene käeliselt, vaid vastavate seadmete abil. Keevitamist teostavat isikut nimetatakse keevitusoperaatoriks.
- **masinkeevitus** (*machine welding*) on keevitus, kus kõik põhioperatsioonid toimuvad automaatselt (v.a toorikute kinnitamine), kuid keevitusoperaatori kontrolli ja vaatluse all. Tavaliselt liigub keevituspea sinna kinnitatud keevituspõleti või -püstoliga piki toodet või siis liigub toode keevituspea suhtes. Tuntud ka täielikult mehhaniseeritud keevituse nime all.
- **robotkeevitus** (*robotic welding*) on spetsiaalse robotiga tehtud automaatkeevitus.

Kasutusala järgi eristatakse:

- **tootmiskeevitus** (*production welding*) on uute toodete valmistamiseks kasutatav keevitus;
- **remontkeevitus** (*repair welding*) on kahjustatud toodete parandamine keevituse teel, keevitusdefektide parandamine;
- **sulatuspindamine** (*fusion surfacing, thermal cladding*) on detailide peale etteantud omadustega kihil kandmine või esialgsete mõõtmete taastamine erinevaid keevitusmeetodeid kasutades (vt p 13.4.4. Termopindamine).

Ajalooliselt tõrjus kaarkeevitus kui liitmisprotsess möödunud sajandi 20.–30. aastatel välja neetimise, võimaldades metalli kokkuhoidu, kuna puudus vajadus detailide ülekatte ja avade puurimise järele. Järsult kasvas tootlikkus ja valmistatud keevisliited on hermeetilised. Kadus neetimisega kuulmist kahjustav tugev müra, kuid tekkisid uued ohutegurid tervisele.

Keevituse eelised võrreldes teiste liitmisprotsessidega on:

- odavam liitmisprotsess püsiliidete valmistamiseks;
- liidete head mehaanilised omadused;
- saab teha liiteid nii töökoja- kui ka välitingimustes;
- toodete massi vähenemine;
- suur tootlikkus;
- sobivus enamiku tehnikas kasutatavatele materjalidele, sh ka komposiitidele ja plastidele liitmiseks;
- võib kasutada erinevates keskkondades (õhus, vaakumis, vee all);
- suur paindlikkus toodete konstrueerimisel, kuna saab liita erinevate meetoditega valmistatud toorikuid;
- võimalus protsesse automatiseerida, nt keevitusroboteid kasutades.

Keevituse puudused on:

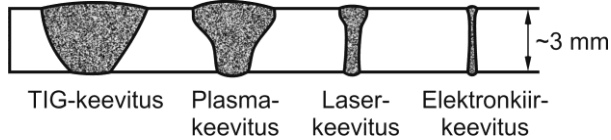
- enamik operatsioone tehakse käsitsi ja seetõttu kaasnevad küllaltki suured tööjõukulud;
- paljude keevitustööde kvaliteet oleneb inimfaktorist ehk keevitaja kutseoskustest;
- ohtlik keevitajale, kuna kasutatakse kõrget temperatuuri või kõrgepingelist elektrivoolu, kaarkeevitusega kaasneb ultraviolettkiirgus, mistõttu on vajalikud keevitaja kaitsemaskid;
- protsessi käigus võivad tekkida keevitusdefektid, sageli on vajalik pärast keevitamist liidete mittepurustav kontroll;
- keskkonda eraldub mürgiseid ühendeid, mistõttu tuleb töökohta ventileerida.

Keevitamisel sulatatakse liitepinnad kõrge energiatihedusega soojusallika abil, kusjuures keevitusprotsessid erinevad energiatiheduse poolest (Tabel 11.1). Metallide sulatamiseks kuluv aeg on pöördvõrdeline soojusallika energiatihedusega.

**Tabel 11.1.** Erinevate keevitusprotsesside energiatihedus

Keevitusmeetod	Energiatihedus, W/mm <sup>2</sup>
Gaaskeevitus	10
Kaarkeevitus	50
Kontaktkeevitus	1000
Laserkeevitus	9000
Elektronkiirkeevitus	10000

Sulakeevitusel on eelistatavad suure energiatihedusega protsessid, mille korral vähenevad nii keevisõmbluse ristlõige (vt Joonis 11.5) kui ka kujumuunded.



**Joonis 11.5.** Keevisõmbluse ristlõige erinevates sulakeevitusprotsessides

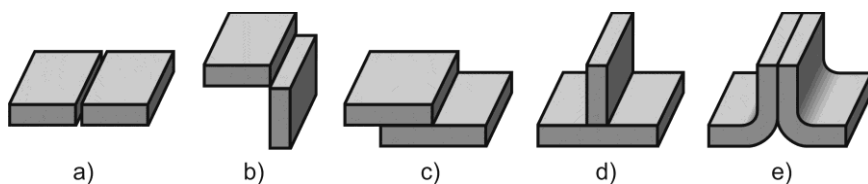
Väikese energiatihedusega protsessidel, nagu gaaskeevitus, elekterräbukeevitus ja sulatuspõkk-keevitus, tekib lai termomõju tsoon, millega kaasneb väike jahtumiskiirus ja tekib madala tugevuse ja kõvadusega, kuid plastne mikrostruktuur. Kõrge energiatihedusega keevitusprotsessidega (plasmakeevitus, elektronkiirkeevitus, laserkeevitus) kaasneb kitsas termomõju tsoon, kiire jahtumine ja paremad keevisliite mehaanilised omadused.

Keevitusprotsessi tootlikkuse näitajaks on **pealesadestuskiirus** (*deposition rate*), mida määratakse ajahükkus keevisõmblusesse sulatatud lisametalli massiga, tavaliselt kilogrammides tunni kohta (kg/h). Keevitusprotsesside tähistamiseks kasutatakse Euroopas ja USA-s erinevaid tähistusi. Tootmiskeevitusel kasutatakse keevitusprotsesside tähistamiseks tunnusnumbrite süsteemi, kus keevitusprotsessid on rühmitatud energiaallika jm tunnuste järgi rühmadeks ja alarühmadeks (vt standard EVS ISO 4063, kus eristatakse üle 70 keevitusprotsessi).

### 11.1.2. Keevisliidete ja keevisõmbluste liigitus

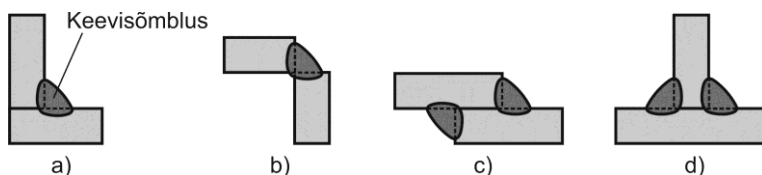
Keevituse kui tehnoloogiaprotsessiga valmivad keevisliiteid ja moodustuvad keevisõmblused. **Keevisliide** (*welded joint*) on kahest või enamast osast keevisõmblusega valmistatud kinnisliide, kusjuures ühendus tekib liidetavate pindade sulatatud servade või liidetavate pindade kontaktpinnas. Olenevalt ühendatavate detailide vastastikusest asendist eristatakse viit keevisliidete põhitüüpi (Joonis 11.6):

- a) **põkkliide** (*butt joint*), kus detailid asuvad ühes tasandis ja liidetakse nende servade kaudu;
- b) **nurkliide** (*corner joint*), detailid on nurga all, tavaliselt täisnurga all ja liidetakse nurga tipu juures;
- c) **katteliide** (*lap joint*), kus liide koosneb kahest pealikuti ülekatkest olevast detailist;
- d) **T-liide** ehk **vastakliide** (*T-joint, tee joint*), kus üks detail asub teise suhtes risti, peamiselt T-tähe kujuliselt;
- e) **otsliide** ehk **servliide** (*edge joint*), detailid asetsevad oma otstes paralleelselt ja liidetakse mõlema serva kaudu põkkõmblusega.



**Joonis 11.6.** Keevisliidete põhitüübid: a – põkkliide; b – nurkliide; c – katteliide; d – T-liide; e – otsliide

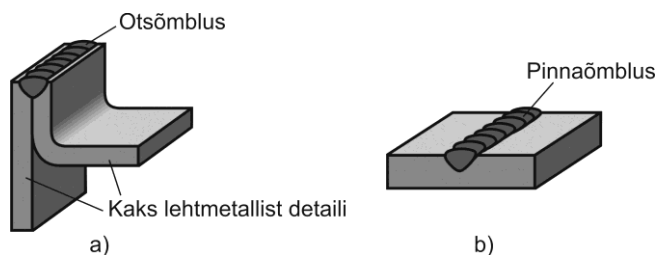
Keevitamise tulemusena moodustub **keewisõmblus** ehk **keewis** (*weld*). Eristatakse järgmisi põhiõmblusi: a) nurkõmblus (Joonis 11.7), b) põkkõmblus (Joonis 11.9), c) korkõmblus, d) soonõmblus e) punktõmblus, f) joonõmblus (Joonis 11.10).



**Joonis 11.7.** Nurkõmblused erinevates keevisliidetes: a – sisemine nurkliide; b – välimine nurkliide; c – katteliide; d – T-liide

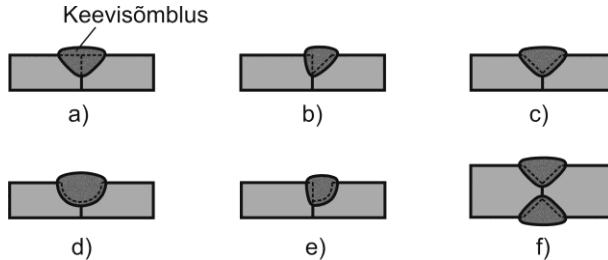
**Nurkõmblus** (*fillet weld*) on ligikaudselt võrdhaarse kolmnurga kujulise ristlõikega ja kasutatakse plaatide nurk-, kate- ja T-liidetes (Joonis 11.7). See on kõige levinum õmbluse tüüp kaar- ja gaaskeevitusel, kuna ta ei vaja detailide servade töötlemist ja liitepindadena kasutatakse detailide külgpindu. Nurkõmblused võivad olla T-liitel kas ühepoolsed või kahepoolsed, pidevad või katkendlikud. Katkendõmblused võimaldavad vähendada T-liidete kujumuundeid ja kokku hoida lisametalli.

**Põkkõmblus** (*butt weld*) leiab üldjuhul kasutust kui **servavahemikõmblus** (*groove weld*), mille puhul liidetakse detailide servad (Joonis 11.9). Eristatakse veel **pinnaõmblust** (*bead weld, surfacing weld*), kus detailide pinnale on keevitatud keevisläbimid mõõtmete taastamiseks ja **otsõmblust** (*flange weld*), kus detailide servi ei töödelda, näiteks õhukese pleki liitmisel otsõmblusega (vt Joonis 11.8).



**Joonis 11.8.** Põkkõmbluse rakendus otsõmbluse ja pinnaõmblusena

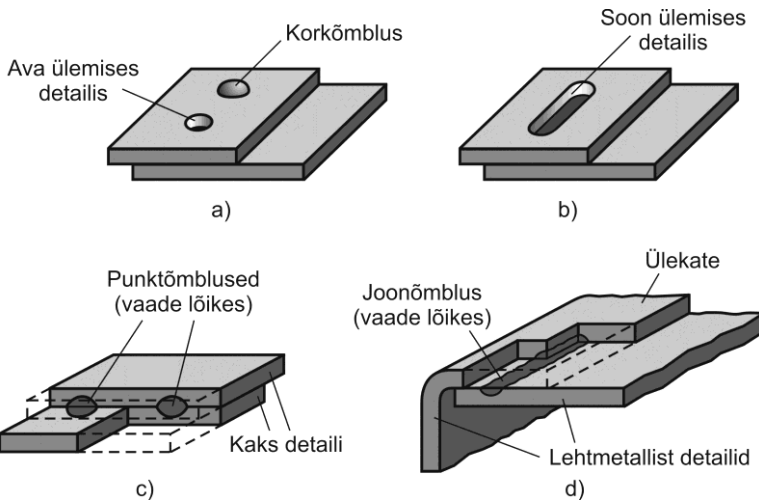
Kui on vaja tagada põkkõmbluse detailide läbisulatus nende paksuse ulatuses, siis detailide servadele antakse vajalik kuju (joon 11.9). Servavahemiku valik sõltub tavaliselt keevitatava materjali paksusest, keevitusprotsessist ja keevisõmbluse asendist.



**Joonis 11.9.** Detailide erineva servade kujuga põkkliidete põkkõmblused: a – I-õmblus; b – HV-õmblus; c – V-õmblus; d – U-õmblus; e – HY-õmblus; f – X-õmblus

**Korkõmblust** (*plug weld*) ja **soonõmblust** (*slot weld*) kasutatakse tasapindsete detailide liitmiseks katteliitena (Joonis 11.10 a ja b). Ülemisse detaili puuritakse avad või freesitakse sooned, mis täidetakse lisametalliga, sulatades nii detailid omavahel kokku.

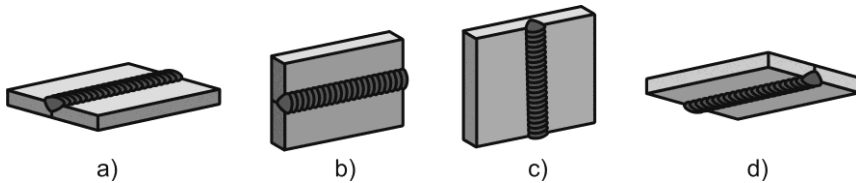
**Punktõmblust** (*spot weld*) ja **joonõmblust** (*seam weld*) kasutatakse katteliidetes, kusjuures kokkusulamine toimub piiratud ringikujulise ristlõikega alal detailide vahel (Joonis 11.10 c ja d). Tavaliselt koosneb joonõmblus liidetavate detailide vahel asetsevatest punktõmbluste jadast.



**Joonis 11.10.** Katteliite õmblusi: a – korkõmblus; b – soonõmblus; c – punktõmblus; d – joonõmblus



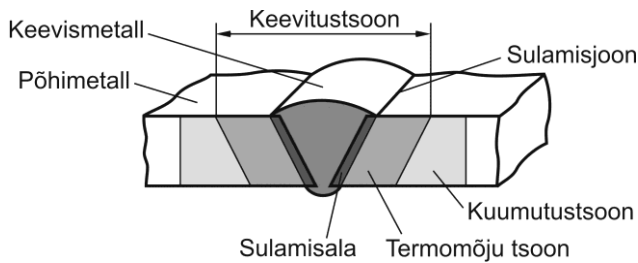
Keevisõmblus võib olla väga erinevates ruumiasendites, mida nimetatakse **keevitusasendiks** ehk **keevisõmbluse asendiks** (*welding position, work position*) (Joonis 11.11). Keevisõmbluse asend võib teatud juhtudel piirata mõne keevitusprotsessi kasutamist, nõuda keevitusparameetrite või keevituse sooritustehnika muutmist. Tootlikkuse ja keevisliidete kvaliteedi seisukohalt tuleb alati eelistada keevitamist allasendis.



**Joonis 11.11.** Keevitusasendid: a – allasend; b – rõhtasend, c – püstasend, d – laeasend

### 11.1.3. Keevisliidete tsoonid ja struktuur

Keevisliide jagatakse järgmisteks piirkondadeks (Joonis 11.12)

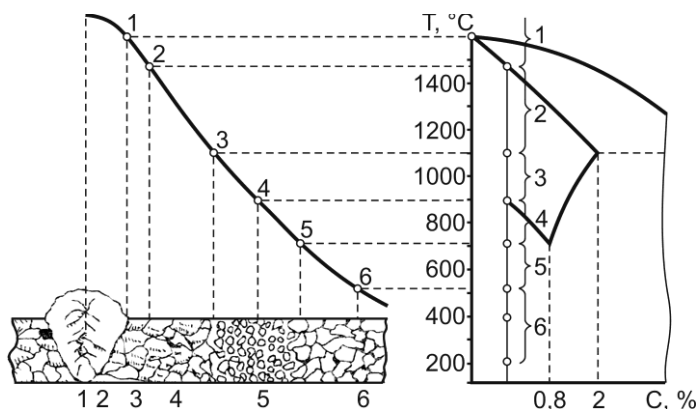


**Joonis 11.12.** Keevisliite piirkonnad

Sulamisjoonega piirnevat kokkusulamisala loetakse kriitiliseks, kuna nimetatud tsooni ebapiisava sideme korral põhimetalliga võib esineda kokkusulamatuse defekt, mis viib liite kandevõime kaotusele.

Praktikas mõjutab kõige rohkem keevisliite mehaanilisi omadusi **termomõju tsooni** (*heat-affected zone*) struktuur, laius ja omadused. Termomõju tsoon on keevisliite põhimetalli sulamata osa, kus on toimunud struktuuri muutused ja võivad tekkida defektid pragude kujul.

Vaatleme lähemalt terastoorikute keevisliite termomõju tsooni struktuure (Joonis 11.13) seostatuna terase ( $C = 0,3 \%$ ) faasidiagrammiga.



**Joonis 11.13.** Keevisliite termomõjutsooni alad: 1-2 – sulamisala (kokkusulamis-segunemis-ala); 2-3 – ülekuumutusala; 3-4 – normalisatsiooniala; 4-5 – osalise rekristallisatsiooni ala; 5-6 – rekristallisatsiooniala; 6 – sinihapruse ala

Süsinikterastel keevitamisel võivad termomõju tsoonis esineda olenevalt keevitamise termotsüklist järgmised madalamate mehaaniliste omadustega alad:

- ülekuumutusalas ferriidi tera tunduv suurenemine, mis on olenevalt keevitamise temperatuurist ja -ajast selles alas;
- osalise rekristallisatsiooni alas võib terase süsinikusaldusel üle 0,3 % ja terase leegerimisel tekkida kõva ja habras karastusstruktuur – martensiit, mis võib jääkpingete korral esile kutsuda külmpugasid. Karastusstruktuuri teket on võimalik ära hoida detailide ettekuumutusega enne keevitamist;
- sinihapruse alas eralduvad mikrostruktuuris nitriidid ja karbiidid, mis suurendavad terase haprust ja võivad põhjustada pragusid keevistoodete mehhaanilisel õgvendamisel.

Termomõjutsoonis võib tekkida normalisatsioonialas ka suurema tugevusega piirkond.

Termomõjutsooni laius on olenevalt kasutatud keevitusprotsessist (vt tabel 11.2), mis on üldjuhul seotud keevitusprotsessi energiatihedusega. Tsooni laienedes suurenevad keevistoodete kujumuundused ja võivad halveneda keevisliite mehaanilised omadused, kuna muutuvad ka laiemaks madalamate mehaaniliste omadustega alad. Seetõttu tuleb eelistada suurema energiatihedusega keevitusprotsesse.

**Tabel 11.2.** Termomõju tsooni piirkondade suurus erinevates keevitusprotsessides

Keevitusprotsess	Ala keskmine laius, mm			Termomõju tsooni laius, mm
	Ülekuumutusala	Normalisatsiooniala	Osalise rekristallisatsiooniala	
Käsikaarkeevitus	2,2	1,6	2,2	6,0
Räbustikaarkeevitus	0,8 ... 1,2	0,8 ... 1,7	0,7 ... 0,8	2,5 ... 3,7
MAG-keevitus	0,7 ... 1,0	0,6 ... 1,5	0,5 ... 0,7	1,8 ... 3,2
Gaaskeevitus	21	4	2	27
Elektterräbukeevitus	4,0 ... 5,0	3,0 ... 4,0	4,0 ... 5,0	11,0 ... 14,0

Eespool kirjeldatud lähtub, et keevisliide on heterogeenne nii oma struktuuri kui ka mehaaniliste omaduste poolest ja selle omadusi on põhimõtteliselt võimalik juhtida keevitusprotsessi valiku, keevitusparameetrite muutmise või detailide ettekuumutusega.

## 11.2. KEEVITAMISE KAASNÄHTUSED

### 11.2.1. Keevitusmetallurgia

Keevitusel sulas olekus oleva keevisvanni kuumutamisel ja hilisemal tardumisel esinevad metallide tootmise metallurgiaprotsessidega sarnased protsessid tard-, vedel- ja gaasifaasi vahel, kuid kaasnevad märksa keerukamad protsessid järgmistel põhjustel: a) keevituse soojusallika ja vanni kõrge temperatuur (terastel kuni 1800 °C); b) väiksemahuline sula keevisvann, mis ümbritsetud külma põhimetalliga; c) sula keevisvanni lühike kestus, terastel 4...40 s.

Keevisvanni kõrge temperatuuri tõttu aktiveeruvad tavametallurgiaga võrreldes paljud füüsikalised-keemilised protsessid, näiteks gaaside ja metalli vahelised reaktsioonid, mis tavaliselt halvendavad keevismetalli omadusi. Väike maht ja ümbritsetus külma põhimetalliga põhjustab sula keevisvanni kiiret jahtumist, mistõttu paljud keemilised reaktsioonid ei kulge lõpuni. Keevisvanni lühikese kestuse tõttu ei jõua alati temas lahustunud gaasid ja räbu tõusta õmbluse pinnale enne metalli tardumist, põhjustades nõnda keevisõmbluse poorsust ja räbupesasid.

Tard-, vedel- ja gaasifaasi vahel toimuvad keevitamisel järgmised protsessid: a) gaaside neeldumine ja lahustumine sulametallis; b) keevismetalli desoksüdeerimine; c) keemiliste elementide väljapõlemine; d) sula keevismetalli legerimine elektrodikatte ja -varda metalliga; e) keevismetalli rafineerimine.

Gaaside neeldumine esineb peamiselt elektrodimetalli tilkade siirdel läbi kaarevahemiku keevisvanni. Keevismetalli hapnikusisalduse suurenedes reeglina halvenevad tema mehaanilised omadused. Lämmastik halvendab terase löögisitkust, kuid

väikestes kogustes (0,001...0,008%) suurendab tugevust ja kõvadust. Teraste sula-keevitusel loetakse kõige kahjulikumaks vesiniku lahustumist keevismetallis. Vesinik satub keevisvanni tavaliselt elektrodikattesesse või rübustisse imatud niiskusest, aga ka keevitustraadile või detailidele sattunud veest ja mustusest. Tardumisel võivad tekkida õmbluses poorid, kuid teatud juhtudel võib vesinik põhjustada kesk- ja kõrgsüsinikterastel külmpragude teket (vt p 11.2.3. Keevitatavus).

Analoogselt terase metallurgiaga (vt p 5.1.1. Terasetootmine) toimub keevisvannis tavaliselt sadestav desoksüdeerimine. Sulas keevisvannis raudoksiid FeO reageerib süsiniku, mangaani ja räniga, mille tulemusel nende elementide sisaldus õmblusmetallis väheneb. Eelistatult kasutatakse sadestavat desoksüdeerimist keemiliste elementidega, mis on aktiivsemad kui keevitav metall. Selleks sisestatakse teraste keevitamisel keevismetalli aktiivseid elemente (Mn, Si, Ti jt) kas elektrodikatte, rübusti või keevitustraadi keemilise koostise abil.

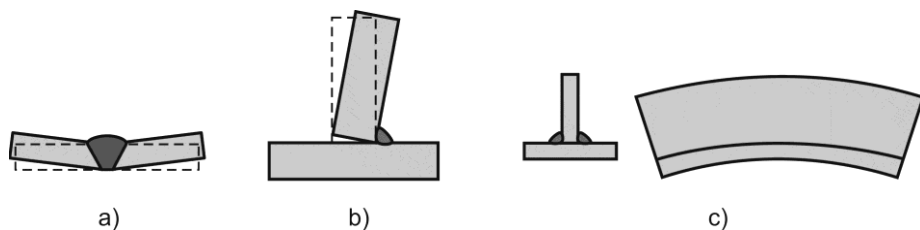
Õmblusmetalli legeerimine võib olla vajalik keemiliste elementide väljapõlemise kompenseerimiseks või korrosioonikindluse parandamiseks. Keevismetalli rafineerimise vajadus kahjulike lisandite (väävli ja fosfori) sisalduse vähendamiseks nüüdisaegsete teraste kasutamisel praktiliselt puudub.

Keevisliite omadusi saab parandada keevistoodete keevitusjärgse termotöötusega. Põhimõtteliselt on teoreetiliselt võimalik tervet keeviskonstruktsiooni lõõmutada struktuuri parandamiseks ja jääkpingete kõrvaldamiseks. Suurekoguliste toodete korral võivad seejuures tekkida täiendavad probleemid seostatuna kuumutus- ja jahtumisrežiimi kontrolliga.

Teine moodus keevisliite struktuuri ebaühtluse vähendamiseks on keevitatavate detailide ettekuumus. Detailide ettekuumus vähendab nende jahtumiskiirust pärast keevitamist. Aeglasel jahtumisel tekib pehmem ja plastsem struktuur ja on aega rauas lahustunud vesiniku eemaldamiseks. Selline moodus leiab kasutamist madallegeerteraste ja kõrgtugevate teraste keevitamisel külmpragude riski vähendamiseks (vt p 11.2.3). Toodete ettekuumus ja järeltermotöötlus on seotud täiendava energiakuluga. Hea soojusjuhtivusega metallide, nt alumiiniumi keevitamisel võidakse kasutada termomõju tsoonist soojuse kiireks kõrvalejuhtimiseks õmbluse kõrvale asetatud vasest **jahutusplaati** (*heat sink*).

### 11.2.2. Keevitusjääkpinged ja -kujumuunded

Keevitamisega kaasnevad soojusnähtused põhjustavad keevistoodetes **keevitusjääkpingeid** (*residual welding stress, welding stress*), joonmõõtmete kahanemist ja keevistoote **keevitusdeformatsioone** ehk **keevituskujumuundeid** (*welding distortions*): väändumist, kõverdumist, läbipaindumist, väljakummimist ja nurga-hälbeid (Joonis 11.14)



**Joonis 11.14.** Keevituskujumuund: a – põkkliitel; b – nurkliitel; c – T-liitel

Keevitusjäakpingeid ja kujumuundeid põhjustavad:

- ebaühtlane temperatuuriväli detailides ja detailide joonpaisumine;
- sulametalli kahanemine tardumisel;
- keevisõmbuse lähiala takistatud paisumine kuumutamisel ja takistatud kahanemine jahtumisel.

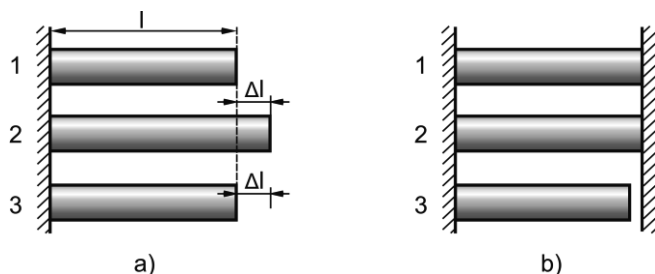
Takistatud paisumine ja kahanemine keevitamisel tekitavad toodetes nii piki- kui ka põikisuunalisi kahanemisjõude, mis muudavad keevistoote mõõtmeid ja põhjustavad detailide pikkuse vähenemist. Mõõtmete kahanemine keevistoote pikisuunas võib terasest põkkliidetele olla suurusjärgus 0,05...0,3 mm jooksva meetri keevisõmbuse kohta ja millega tuleb arvestada nii toorikute valmistamisel kui ka toodete nõutud mõõtmete tagamisel.

Vaatleme keevitusjäakpingete ja kujumuunde tekkimist ribaterase külgservale pealekeevitatud keevislābimi näite põhjal (Joonis 11.15). Keevitamisel keevisõmbuse kõrvalala kuumeneb ja hakkab pikinema soojuspaisumise toimele. Kuna riba kuum ja külm osa on omavahel jäigalt seotud, siis tema jahedam osa takistab kuumema osa paisumist, mistõttu tekivad selles survepinged, mille toimele keevisõmbuse kõrvalala deformeerub plastselt (lüheneb). Selle tulemusena paindub terasriba jahtumisel läbi (Joonis 11.15). Lisaks jäävatele deformatsioonidele tekivad keevislābimi kõrvalalal tõmbepinged, kuna terasriba külmem osa takistab kuumema osa kahanemist.

Metalli sellist käitumist keevislābimi kõrvalalal selgitavad kuumutatud varda takistamatu (Joonis 11.16a) ja kahe jääga seina vahele asetamise tõttu takistatud (Joonis 11.16b) joonpaisumise ja -kahanemise mudelid. Takistamatu joonpaisumisel kuum metallvarras pikeneb joonpaisumise  $\Delta l$  võrra ja jahtumisel samavõrra lüheneb. Takistatud joonpaisumisel kuumenenud varras pikeneda ei saa – toimub plastne deformatsioon (lühenemine) paisunud metalli mahus. Lühenemine säilib ka pärast varda jahtumist.

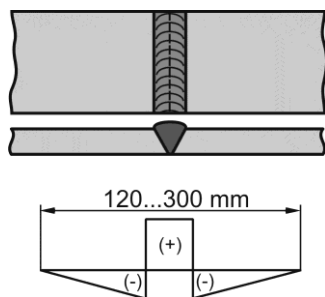


**Joonis 11.15.** Kõverdunud terasriba pärast servale keevislābimi keevitamist



**Joonis 11.16.** Varda paisumise ja lühenemise etapid kuumutamisel ja jahtumisel: a – varda pikenedamine ja lühenemine takistamata paisumisel; b – varda pikkuse muutus takistatud joonpaisumise tingimustes: 1 – lähteolekus; 2 – kuumutamise järel; 3 – pärast jahtumist

Keevituse jääkpinged võivad teatud juhtudel põhjustada keevisliite enneaegset purunemist, mõõtmete muutust ajas, kiirendatud korrosiooni. Keevisõmbluses ja lähialas tekivad jahtumisel reeglina tõmbepinged (vt Joonis 11.17), temast kaugemas alas survepinged. Karastuvate teraste keevitamisel lisanduvad termopingetele veel struktuuripinged, kuna kiirel jahtumisel tekib martensiitstruktuur on seotud mahu suurenemisega. Üldjuhul tekivad martensiidi alas survepinged. Ettekuumutust kasutades vähenevad struktuuripinged, kuna jahtumine aeglustub ja ei teki martensiitstruktuuri.



**Joonis 11.17.** Keevituse jääkpinged põkkõmbluses („+“ – tõmbepinged, „-“ – survepinged)

Kujumuundeid keevitamisel on võimalik vähendada erinevate tehniliste võtetega: detailide jäiga kinnitusega rakistesse, neile vastupidise painde andmisega enne keevitamist ja teiste meetoditega. Soovitatakse keevitada lõikudena või katkendõmblusi. Pärast keevitamist on võimalik tooteid mehaaniliselt või termiliselt õgvendada.

### 11.2.3. Keevitatavus

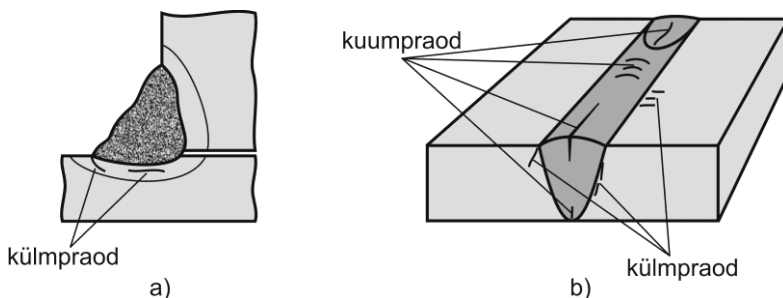
Praktikas on täheldatud, et kõiki materjale ei ole võimalik edukalt keevitada liidete soovitud omaduste saamiseks ja et ühed keevitusprotsessid sobivad paremini ühtede

ning teised paremini teiste materjalide keevitamiseks. Kõik keeviskonstruktsioonid ei sobi keevitamiseks oma konstruktiivsete lahenduste poolest ja on seetõttu ebatehnoloogilised. Neid asjaolusid seostatakse keevitamisel terminiga **keevitatavus** (*weldability*). Materjali keevitatavuse all mõistetakse nii selle võimet moodustada mainitud keevitusprotsessi kasutades kvaliteetne keevisliide kui ka konstruktiivset sobivust keevitamiseks (jäik konstruktsioon, ligipääsetavus jm) ja keevitusprotsessi kasutamissobivust selle materjali liitmiseks. Materjal sobib keevitamiseks, kui seda saab keevitada füüsikaliselt, metallurgiliselt ja keemiliselt sobiva keevitusprotsessiga ning täidetakse keevisliitele esitatud nõuded. Sageli seostatakse metalli keevitatavust keevisliites esineda võivate erinevat tüüpi pragude tekke riskiga. Materjali keevitatavuse hinnang ühele ja samale materjalile võib erinevaid liitmisprotsesse kasutades erineda, alates suurepärasest kuni täieliku ebaõnnestumiseni.

Materjali keevitatavust saab hinnata erinevat tüüpi pragude tekkimise riski hindamise alusel. Teraсте korral on neist tähtsamad praod: a) **külmpraod** ehk **vesinikpraod** (*cold cracks; hydrogen cracks*); b) **kuumpraod** (*hot cracks*); c) **lamellpraod** (*lamellar tearing*); d) **korduvkuumutuspraod** (*reheat cracks*).

Metallide keevitatavuse määramise meetodid liigitatakse kahte rühma. Esimesse rühma kuuluvad kaudsed meetodid, kus kalduvust pragunemisele hinnatakse arvutuslikul teel, võttes arvesse materjalide keemilist koostist. Saadud arvutuslikke parameetreid võrreldakse etteantud kriitiliste väärtustega. Teise kuuluvad katselised meetodid, kus keevitatavus määratakse kindla kujuga proovikehi keevitades ja uurides.

**Külmpraod.** Mõistet "külmpraod" kasutatakse ajalooliselt enim, kuna nimetatud praod tekivad pärast terasest keevisliite jahtumist ja liite purunemispind ei ole oksüdeerunud. Viimaste aastakümnete keevitusstandardites kasutatakse nende pragude liigitusel terminit vesinikpraod, kuna pragude moodustumist mõjutab suurel määral vesiniku difusioon termomõju tsooni. Vesinikpraod võivad tekkida, süsinik- ja madallegeerteraste keevitamisel termomõju tsoonis, aga võivad tekkida ka keevismetallis (Joonis 11.18).



**Joonis 11.18.** Praod keevisliidetes: a – nurkliide; b – põkkliide

Külmpragude tekkimise peamisteks põhjusteks on

- õmblusmetalli sattunud vesiniku difusioon, nt elektroodikatkest, niiskuse detailide pinnal või räbus, kaitsegaasis;
- habraste karastusstruktuuride moodustumine terases, mis seotud martensiidi tekkega;
- suured keevitusjääkpinged.

Praod moodustuvad, kui kõik kolm eelnimetatud tegurit esinevad üheaegselt. Nii ei tekiks pragusid, kui puuduksid keevistootes jääkpinged või ei esineks nii martensiitset struktuuri või vesiniku suurendatud sisaldust nii keevismetallis kui ka hiljem termomõju tsoonis. Omakorda suured jääkpinged ei põhjustaks pragude teket, kui ei oleks martensiitset struktuuri või metallis lahustunud vesinikku.

Teraste keevitavuse hindamiseks külmpragude riski järgi kasutatakse süsinikekvivalenti, mis teisendab terase koostises olevad keemilised elemendid tinglikult süsinikusisaldusele. **Süsinikekvivalenti** (*carbon equivalent, CE*) arvutamiseks kasutatakse erinevaid valemeid. Rahvusvaheliselt tunnustatud valem süsinikekvivalenti määramiseks on järgmine:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} . \quad (11.1)$$

Konstruksiooniteraste keevitavuse hindamisel loetakse standardites sageli kriitiliseks süsinikekvivalenti väärtuseks 0,43, mille ületamisel tuleb hinnata detailide ettekuumutuse kasutamise vajadust. Reeglina hinnatakse, et madalsüsinikteraste voolepiiriga alla 360 MPa ja paksusega alla 25...30 mm külmpragude risk on väike.

**Kuumpraod.** Kuumpragudeks nimetatakse pragusid keevisliites, mis on tekkinud metalli kuumutatud olekus kas keevismetallis (nt roostevabad terased, Al-sulamid) või õmbluse kõrval termomõju tsoonis (Al-sulamid) ja mille murdepind on tugevalt oksüdeerunud. Keevismetalli tardumisel tekivad dendriitide vahele vedelas faasis õhukesed kelmed, mis võivad puruneda metalli kahanemisel tekkinud pingete toimetel. Üldjuhul võivad süsinikterases praod moodustuda piki õmblust tingituna selliste elementide nagu C, S, P makrosegregatsioonist. Kuumpraod võivad tekkida hea lõiketöödeldavusega teraste keevitamisel, mis sisaldavad leegerivate elementidena Pb, S, P, Ce. Kuumpraod võivad olla austeniitsetes roostevabades terastes, mille peamiseks vältimise võtteks on sobiva keemilise koostisega elektroodi valik ja sobiva keevisõmbluse mikrostruktuuri saavutamine.



## 11.3. SULAKEEVITUS

### 11.3.1. Kaarkeevitus

#### Olemus ja liigitus

**Kaarkeevitus** (*arc welding, AW*) on sulakeevituse protsesside üldnimetus, mille puhul keevitavad materjalid sulatatakse elektrikaare ehk keevituskaare abil, mis kujutab endast suure energiatihedusega plasmat. Enamikus protsessides kasutatakse lisametalli. Liitmine toimub keevituselektroodi ja detailide vahel toimiva elektrikaare soojuse toimetel, kusjuures detailidevaheline pilu täidetakse enamikul juhtudel lisametalliga kas elektroodist või eraldi kaarde juhitud vardast.

Kasutatava elektroodi järgi eristatakse kaarkeevituse protsesse järgnevalt (vt Joonis 11.2).

**Sulavelektroodiga kaarkeevitus** (*consumable electrode welding*), mis jaguneb omakorda:

- varraselektroodiga keevitamine. Praktikast kasutatakse kattega elektroode. Puhuseks on vajadus vahetada elektroodi ja sellest tingitud protsessi mittepidevus ja väike keevituskiirus;
- pidevelektroodiga keevitamine. Kasutatakse kas keevitustraati, täidistraati või keevituslinti, mida antakse pidevalt keevituskaarde. Ei teki katkestusi keevitusprotsessis.

Sulavelektroodiga kaarkeevitusprotsesside hulka kuuluvad:

- a) **käsikaarkeevitus** (*shielded metal-arc welding*);
- b) **kaitsegaaskaarkeevitus** ehk **MIG/MAG-keevitus** (*gas metal-arc welding*);
- c) **täidistraatkaarkeevitus** (*flux cored arc welding*);
- d) **räbustikaarkeevitus** (*submerged arc welding*);
- e) **elektergaaskaarkeevitus** (*electro-gas welding*).

**Sulamatu elektroodiga kaarkeevitus** (*non-consumable electrode welding*).

Elektrood on tavaliselt valmistatud volframist või volframisulamist, harvem süsinikust. Sulamatu elektroodiga kaarkeevitusprotsesside hulka kuuluvad:

- a) **TIG-keevitus** (*tungsten inert gas welding; TIG-welding; gas tungsten arc welding*);
- b) **plasmakeevitus** (*plasma welding*);
- c) **vastakkaarkeevitus** (*stud welding*).

#### Keevituskaare ja keevisvanni kaitse ümbritseva õhu eest

Õhus keevitamisel reageerivad liidetavad metallid kõrge temperatuuri tõttu hapniku, lämmastiku ja vesinikuga, mille tõttu võivad keevisõmbluse mehaanilised omadused

oluliselt halvendada. Keevituselektroodi otsa, keevituskaart ja keevisvanni saab kaitsta õhu kahjuliku mõju eest kas rübusti, gaasi või mõlemaga. Selleks kasutatakse inertgaasidest argooni või heeliumi, teraste korral süsihappegaasi või argooni ja süsihappegaasi segu ehk segugaasi.

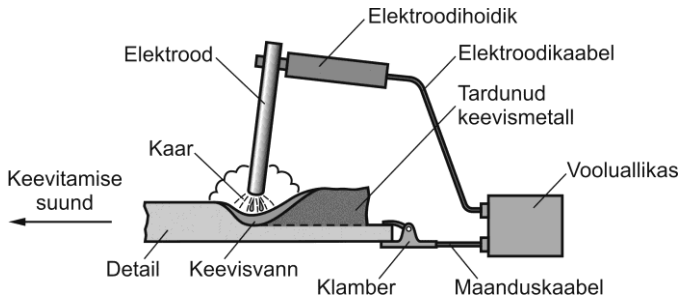
**Rübustit** (*flux*) kasutatakse liitepindadel oksiidide ja muude kahjulike lisandite tekke vältimiseks või tekkinud oksiidide lahustamiseks. Keevitamise kõrgel temperatuuril räbu sulab, kattes keevitusvanni. Jahtudes räbu tardub ja tuleb eemaldada keevisõmbluselt kas haamri või harjaga.

Rübustit võidakse kasutada erinevas kaarkeevitusprotsessis erineval viisil:

- 1) varraselektroodidele kantud kattena, mis sulab keevitamisel ja moodustab räbu (käsikaarkeevitus);
- 2) pulbrikujulise rübustina, millega kaetakse keevisvann (rübustikaarkeevitus);
- 3) õõnsa torukujulise elektroodina, mille südamik sisaldab pulbrikujulist rübustit (täidistraatkaarkeevitus).

## Keevituskaart

Kaarkeevitusel kasutatakse soojusallikana **elektrikaart** ehk **keevituskaart** (*electric arc, welding arc*), mis tekitatakse elektroodi otsa ja liidetavate detailide vahel. Keevituskaart on osa kaarkeevituse vooluahelast (vt Joonis 11.19) ja teda toidetakse erikonstruktsiooniga vooluallikast keevituskaablite abil kas alalis- või vahelduvvooluga.



**Joonis 11.19.** Käsikaarkeevituse vooluahel

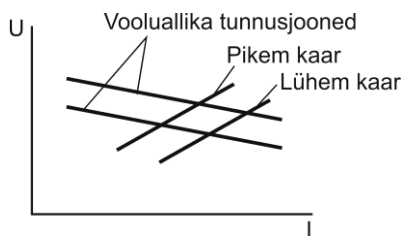
## Kaarkeevituse vooluallikad

Keevituskaare toitmiseks kasutatakse kaarkeevitusel erikonstruktsiooniga ja teljestikus „pinge-vool” välis- või välisjoontega vooluallikaid, mille puhul arvestatakse keevitajale ohutut tühijooksupinget, kaare süütamiseks vajalikku minimaalset pinget, võimalust elektroodi ja detaili lühisest tekkivat suure lühisvoolu piiramiseks, keevitusprotsessi stabiilsuse tagamist. **Vooluallika tunnusjooneks** (*voltage characteristic, volt-ampere characteristic*) nimetatakse tema klemmipinget  $U$  olenevust voolu tuge-

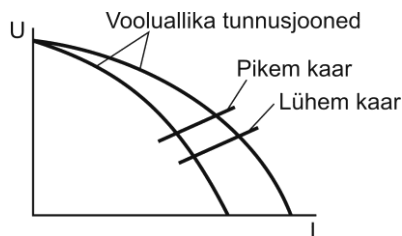
vusest  $I$  keevituse vooluahelas (vt Joonis 11.20 ja 11.21). Vooluallika tunnusjoon peab sobima kindla kaarkeevituse protsessi keevituskaare tunnusjoontega. Üldiseks kaarkeevituse vooluallikate tunnuseks on suure voolutugevuse saavutamine käsikaarkeevitusel vahemikus 40...500 A (vt p 11.3.1. Käsikaarkeevitus), MIG/MAG-keevitusel kuni 500 A (vt MIG/MAG-keevitus) ja räubustikaarkeevitusel kuni 2000 A (vt Räubustikaarkeevitus).

Kaarkeevituse vooluallikad jagunevad tunnusjoonte järgi kahte rühma:

- püsivpingega vooluallikad**, st jäiga tunnusjoonega vooluallikad (*constant voltage power sources, CV power sources*), mille puhul pinge väljundil peaaegu ei olene voolutugevusest (vt Joonis 11.20). Kasutatakse MIG/MAG-keevitusel, täidistraatkaarkeevitusel, räubustikaarkeevitusel;
- püsivvooluga vooluallikad**, st järsult langevate tunnusjoontega vooluallikad (*constant current power sources; CC power sources*), mille puhul keevitusvoolu kasvades pinge väljundil langeb järsult (vt Joonis 11.21) ja milliseid kasutatakse käsikaar-, TIG- ja räubustikaarkeevitusel.



**Joonis 11.20.** Püsivpingega vooluallika ja keevituskaare tunnusjooned MIG/MAG-keevitusel



**Joonis 11.21.** Püsivvooluga vooluallika ja keevituskaare tunnusjooned käsikaarkeevitusel erinevatel kaarepikkustel

Keevitusprotsessi stabiilsuse määrab keevituskaare ja vooluallika tunnusjoonte lõikepunkt ehk tööpunkt. Joonisel 11.21 on näidatud käsikaarkeevituse vooluallika tunnusjooned ja keevituskaare tunnusjooned erinevatel keevituskaare pikkustel. Jooniselt on näha, et keevituskaare pikenedes kaarepinge kasvab (tunnusjoon nihkub ülespoole), kuid keevitusvool väheneb. Keevituskaare lühenedes keevitusvool suure-

neb. Käsikaarkeevitusel tagab järsemalt langev tunnusjoon väiksema keevitusvoolu muutuse kaarepikkuse muutudes.

Kaarkeevituse vooluallikadena kasutatakse keevitustrafosid, keevitusalaldeid, keevitusinvertereid ja keevitusgeneraatoreid.

**Keevitustrafod** (*welding transformers*) on keevituse vahelduvvooluallikad, mis võimaldavad lihtsate tehniliste lahendustega, nt mähiste või magnetsüdamike nihutamise või magnetvälja puistevoogude muutmise reguleerida keevitusvoolu. Konstruksioonilt lihtsad ja töökindlad, kuid keevituskaare väikese stabiilsuse tõttu leiavad piiratud kasutamist. Keevitustrafode kasutus on piiratud: räubustikaarkeevitus ja käsikaarkeevitus ehitusplatsidel ja hobikeevitus.

**Keevitusalaldid** (*welding rectifiers*) on keevituse alalisvooluallikad, mis sisaldavad reeglina trafot ja alalduselemente türistoride, diodide või seleenalaldite näol. Neid iseloomustab suur mass ja tundlikkus keskkonnatingimuste (temperatuur, niiskus) kõikumisele, mistõttu kasutatakse põhiliselt sisetingimustes. Tootmisettevõtetes kasutatakse keevitamisel reeglina alalisvoolu ja keevitusalaldeid.

**Keevitusinverterid** (*welding inverters*) on elektroonsed keevituse vooluallikad, milles võrguvool alandatakse ja muudetakse 4...60 kHz sagedusega impulssvooluks. Tagasiside ahela kaudu on võimalik mikroprotsessortechnikaga kontrollida keevitusvoolu ja hoida seda püsivana. Võimaldavad saada nii alalis- kui ka vahelduvvoolu.

**Keevitusgeneraatoreid** (*welding generators*) käitatakse põhiliselt sisepõlemismootoriga ja kasutatakse välitöödel, kus elektrivõrk puudub. Puuduseks on madal kasutegur, väike töökindlus ja tööiga.

## **Keevitusparameetrid**

**Keevitusparameetriteks** (*welding parameters, welding data*) on kaarkeevitusel:

- keevitusvoolu liik ja polaarsus,
- keevitusvoolu tugevus,
- kaarepinge,
- keevituselektroodi või keevitustraadi läbimõõt,
- keevituskiirus,
- keevituse soojussisestus.

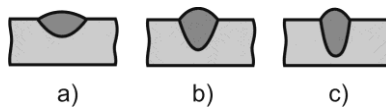
Kaarkeevitusel kasutatakse tavaliselt alalis- ja vahelduvvoolu, harvem impulssvoolu. Keevitusvoolu liik ja polaarsus valitakse olenevalt keevitusprotsessist.

**Vahelduvvoolu** (*alternating current; AC*) iseloomustab väiksem keevituskaare stabiilsus, mistõttu leiab ta piiratud kasutamist käsikaarkeevitusel ja räubustikaarkeevitusel. Alumiiniumi TIG-keevitusel kasutatakse vahelduvvoolu metalli pinna oksiidikilme eemaldamiseks.

**Impulssvool** ehk **pulssvool** (*pulse current*) on üldjuhul nelinurkse lainekujuga vahelduvvool. Kasutusalaudeks on TIG-keevitus, MIG/MAG-keevitus, plasma-keevitus.

**Alalisvool** (*direct current; DC*) tagab stabiilsema keevituskaare ja liigitub omakorda polaarsuse järgi:

- päripolaarne alalisvool – tähistatakse lühendiga  $DC^-$ , mille puhul on keevitus-elektrood ühendatud vooluallika miinus клеммiga. Kasutatakse käsikaarkeevitusel, TIG-keevitusel, plasmakeevitusel. Käsikaarkeevitusel päripolaarse alalisvooluga eraldub suurem soojushulk elektroodil kui detailidel ja ta sulab kiiremini ja täidab kiiremini detailidevahelise pilu. Keevituskaar on alt laienev ja tekib lai ning madal keevisõmblus (Joonis 11.22 a).
- vastupolaarne alalisvool ( $DC^+$ ), mille puhul keevituselektrood on ühendatud vooluallika miinus клеммiga. Kasutatakse MIG/MAG-keevitusel, aluselise kattega elektroodidega käsikaarkeevitusel. Saadakse kitsam keevisõmblus (Joonis 11.22 b).

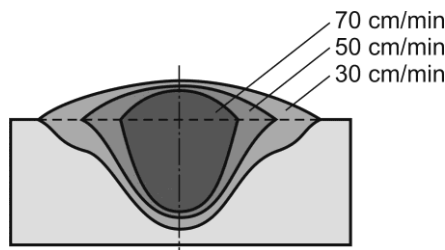


**Joonis 11.22.** Keevitusvoolu liigi ja polaarsuse mõju keevisõmbluse ristlõike kujule käsikaarkeevitusel: a – päripolaarne alalisvool; b – vastupolaarne alalisvool; c – vahelduvvool

Keevitusvoolu suurenedes kasvab keevituskaare võimsus ja suureneb läbikeevitus, paksemat materjali saab liita suurema tootlikkusega.

Kaarepinge suurenedes väheneb läbikeevitus väga vähe, kuid oluliselt suureneb õmbluse laius. Pinge kasvades muutub keevituskaar liikuvamaks.

Keevituskiirus mõjutab keevisõmbluse läbikeevituse sügavust ja kuju (vt Joonis 11.23).



**Joonis 11.23.** Keevituskiiruse mõju keevisõmbluse ristlõikele

**Keevituse soojussisestus** (*heat input*) iseloomustab keevisõmbluse pikkusühiku kohta sisestatud energiahulka, mida mõõdetakse ühikutes kJ/mm või kJ/cm ja on seotud paljuski keevituse sooritustehnikaga, näiteks kas keevitamine toimub elektroodi sirgjoonelise või võngutamise abil. Keevituse soojussisestust  $Q_e$  määratakse järgmise valemiga :

$$Q_e = \frac{k \cdot U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{mm}}, \quad (11.2)$$

kus  $U$  – kaarepinge, V;

$I$  – keevitusvool, A;

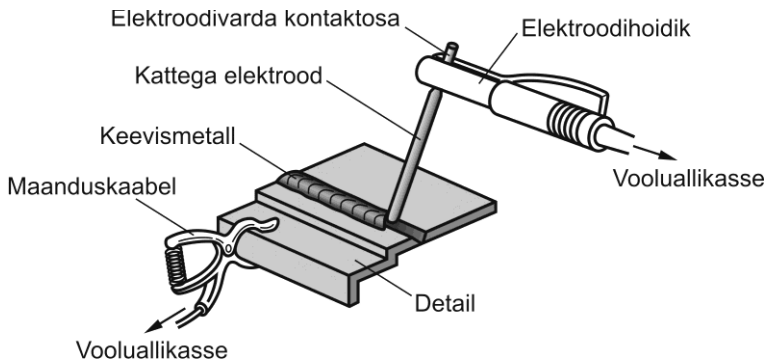
$v$  – keevituskiirus, mm/s;

$k$  – keevitusprotsessi termiline kasutegur: käsikaarkeevitusel  $k = 0,85$ ;

MIG/MAG-keevitusel  $k = 0,85$ ; TIG-keevitusel  $k = 0,6$ ; räbustikaarkeevitusel  $k = 1,0$ .

### Käsikaarkeevitus

**Käsikaarkeevitus** ehk **elektroodkeevitus** (*shielded metal-arc welding; manual metal-arc welding*) on kaarkeevituse protsess, mille puhul keevituskaar põleb kattega elektroodi otsa ja keevisvanni vahel ning elektroodi juhitakse käsitsi (Joonis 11.24).



**Joonis 11.24.** Käsikaarkeevitus

Keevituselektroodi kontaktosa on kinnitatud elektroodihoidikusse ja ühendatud kaabli abil vooluallikaga. Elektroodihoidiku käepide on elektriliselt isoleeritud keevitaja ohutuse tagamiseks. Keevitaja tekitab elektroodi otsa ja detailide vahel lühise, edasisel elektroodi eemaldamisel kaugusele 2...5 mm detailidest toimub elektroodist elektronide emissioon, kus viimased pörkuvad kokku aurustunud metalli aatomitega ja ioniseerivad kaarevahemiku. Tekib stabiilne kaarlahendus, millega kaasneb intensiivne soojuse eraldumine. Kaare piirkonnas ulatub temperatuur 5000...6000 °C, mille toimel sulab elektroodivarras ja elektroodi kate, mis liiguvad tilkadena keevisvanni. Moodustunud vedel räbu katab keevisvanni pealtpoolt. Elektroodikattest eraldub gaase (CO<sub>2</sub>, CO jm), mis tekitavad kaarevahemiku gaasikaitse ja stabilisee-

rivad kaart. Elektrodikattes olevad Mn ja Si desoksüdeerivad keevismetalli. Vajadusel saab keevismetalli legerida kattesse viidud Ni, Cr jt elementidega. Vedel keevisvann on pealt kaetud kaare piirkonnas vedela räbuga, mis edasisel jahtumisel tardub klaasjaks kelmeks tahke räbuna keevisõmbluse peal ja tuleb hiljem eemaldada. Vooluallikadena kasutatakse kas keevitusosalaldeid või -invertereid, ehitusplatsidel ka keevitustrafosid.

Käsikaarkeevituse leiutajaks loetakse Rootsi ettevõtjat Oscar Kjellbergi, kes patenteeris 1908. a kattega elektroodi laevaremondi tarbeks. Käsikaarkeevituse osatähtsus arenenud tööstusriikides väheneb ja moodustab u 20 % kõigist keevitustöödest, seevastu Indias ja Hiinas moodustab see u 80 %. Käsikaarkeevitust iseloomustab madal tootlikkus, kuna pärast ühe elektroodi sulamist tuleb keevitusprotsess katkestada, et kinnitada elektrodihoidikusse uus elektrod. Seetõttu väheneb tootlikkus.

Käsikaarkeevituse kasutusalad: eelistatult teraskonstruksioonide montaaž ehitusplatsidel, torustikud, masinaehituslikud konstruksioonid, katelde ja kraanade valmistamine ja remont. On valdkondi (nt katlaremont, torustikud), kus normatiividega nõutakse ainult käsikaarkeevituse kasutamist. Käsikaarkeevitusega saab keevitada terast ja malmi. Harvemini, tavaliselt remondiks, saab keevitada ka alumiiniumi, vaske, titaani ja niklit. Käsikaarkeevituse eelis on lai keevitatavate materjalide nimistu ja paksuste vahemik (terastele alates 1 mm, ülemist piiri pole). Kasutatakse kõikides keskkonnatingimustes – nii õhus kui ka vee all, seadmed on odavad ja portatiivsed.

Käsikaarkeevituse puudused on madal tootlikkus, keevitusasendid on piiratud elektrodide katte tüübiga; nõutavad on keevitaja väga head kutseoskused ja pikk väljaõppeaeg.

**Keevituselektroodide** (*electrodes*) varda kujul südamik valmistatakse konstruksiooniteraste keevitamisel madalsüsinikterastest, kõrglegeerteraste keevitamisel ligikaudselt samaväärselt legeerterasest.

Elektrodikatte sisaldab kuni 20 keemilist ühendit, mis on seotud sideainega ja saadud üheaegsel varda ja elektrodimassi ekstrudeerimisel. Elektrodikatte koostisse kuuluvad järgmised komponendid: kaare ioniseerijad, räbutekitajad, gaasitekitajad, desoksüdeerijad, legerivad elemendid, sideained. Keevituselektroodide tehnoloogilised omadused olenevad elektrodikatte tüübist ja eristatakse nelja katte põhitüüpi: happeline, rutiil-, tselluloos- ja aluseline kate.

Happelise kattega elektroodid sisaldavad kattes Mn, Si ja rauaoksiide ning ferromangaani ja on keevitamisel eralduvate mürgiste mangaaniaurude tõttu Euroopa Liidus keelatud.

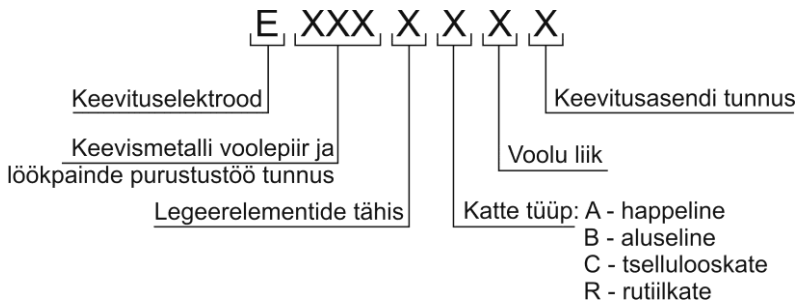
Rutiilkate sisaldab suures koguses (kuni 50%) titaanoksüüdi ehk rutiili, millel on hea elektrijuhtivus. Seetõttu saab nende elektrodidega keevitada nii alalis- kui ka vahelduvvooluga. Elektroode iseloomustavad head keevitustehnoloogilised omadused. Keevismetalli omadused vastavad poolraahulikule terasele, kuid jäävad alla aluselise kattega elektrodidega keevitamisel saadule.

Tsellulooskate sisaldab palju orgaanilisi ühendeid, mis tekitavad hea keevitusvanni gaasikaitse ja kiirelt tarduva räbu. Keevismetallil ei ole häid mehaanilisi omadusi. Kasutatakse torude ja torustike keevitamiseks.

Aluseline kate tekitab aluselise räbu. Keevismetallil on head mehaanilised omadused. Tavaliselt keevitatakse vastupolaarse alalisvooluga. Aluselise kattega elektroode kasutatakse vastutusrikaste toodete valmistamiseks. Teraste külmpfragude riski korral tuleb alati kasutada aluselise kattega elektroode. Praktikast võidakse kasutada erinevate elektrodikatete kombinatsioone.

Käsikaarkeevituse elektroodi valikul lähtutakse esmalt katte tüübist ja nõuetest keevisliite mehaanilistele omadustele. Metallkonstruktsioonide keevitamiseks kasutatakse üldjuhul rutiilkattega või kombineeritud tselluloosrutiilkattega elektroode, torustike tarvis tsellulooskattega elektroode, vastutusrikaste toodete ja suurema tugevusega teraste keevitamisel aluselise kattega elektroode.

Keevituselektroodide tähistus koosneb tähtede ja numbrite kombinatsioonist – süsinik- ja madallegeerteraste oma on näidatud joonisel 11.25. Kõrglegeerteraste keevituselektroodide tähistus põhineb nende keemilisel koostisel.



**Joonis 11.25.** Keevituselektroodide tähistus

**Keevitusparameetrite** (*welding parameters*) valik oleneb keevitatavast materjalist, elektrodikatte tüübist ja keevitatava materjali paksusest.

Edaspidi vaadeldakse keevitusparameetrite valiku järjestust käsikaarkeevituse näitel, laiendades seda teistele kaarkeevituse protsessidele.



1. Valitakse elektroodi või keevitustraadi mark keevitatava konstruktsiooniterase mehaaniliste omaduste järgi, roostevabal terasel keemilise koostise järgi.
2. Valitakse elektroodikatte või täidistraadi täidise tüüp olenevalt nõuetest keevisliitele ja sobivusest antud toote valmistamiseks.
3. Määratakse elektroodi või keevitustraadi traadi läbimõõt olenevalt keevitatava materjali paksusest. Käsikaarkeevitusel võib lähtuda tabelis 11.3 esitatud soovitustest.

**Tabel 11.3.** Keevituselektroodi läbimõõt olenevalt liidetavate detailide paksusest

Pleki paksus, mm	1...2	3...5	4...10	>10
Elektroodi läbimõõt, mm	1,5...2	3...4	4...5	5...6

Keevitusvool  $I_k$  arvutatakse olenevalt elektroodi läbimõõdust  $d_e$  käsikaarkeevitusel järgnevate valemite järgi ja korrigeeritakse proovikeevitustega:

$$I_k = 60 (d_e - 1) \quad (11.3)$$

$$I_k = 60 d_e^2 + 20 d_e \quad (11.4)$$

Kaarepinget  $U_k$  käsikaarkeevitusel ei reguleerita ja see oleneb üldjuhul keevitusvoolu tugevusest ja on arvutatav valemiga:

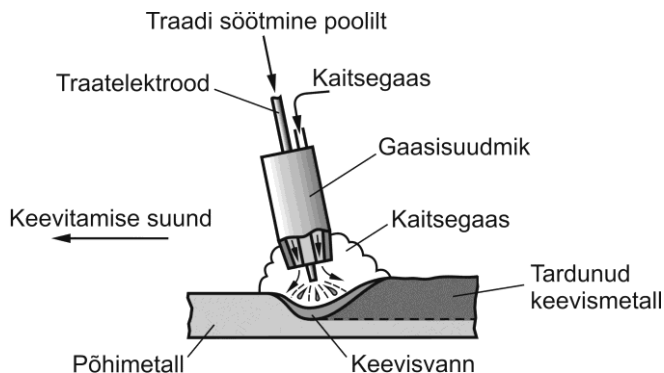
$$U_k = 20 + 0,04 \cdot I_k \quad (11.5)$$

Keevituskiirus oleneb keevitusvoolust, keevisläbimite arvust ja keevitamise sooritustehnikast ning määratakse praktikas sageli proovikeevitustega.

Arvutatakse keevituse soojussisestus, arvestades voolutugevust, kaarepinget ja keevituskiirust.

### MIG/MAG-keevitus

Kaarkeevituse protsesside tootlikkust on võimalik tõsta, kasutades elektroodi traadi kujul ja söötes seda pidevalt kaare piirkonda. Keevituskaart ja keevisvanni saab kaitsta ümbritseva keskkonna eest sinna juhitava kaitsegaasiga. Sellist kaarkeevituse protsesside rühma nimetatakse **kaitsegaaskaarkeevituseks** (*gas metal-arc welding, gas shielded metal-arc welding*). Eristatakse **MIG-keevitust** (*metal inert gas welding; MIG-welding*), **MAG-keevitust** (*metal active gas welding, MAG-welding*) ja **täidistraatkaarkeevitust** (*flux cored arc welding*). Kaitsegaaskaarkeevitus arendati välja USAs (kaitsegaasina inertgaas argoon) ja NSVLis (kaitsegaasina aktiivgaas – süsihappegaas). Tööstuslikult hakati kasutama alates 1950-ndatest aastatest. Kuna nii aktiiv- kui ka inertkaitsegaasi kasutamisel kasutatakse sama konstruktsiooniga keevitusseadet, siis võib keevitusprotsessi tähistada mõlema kombinatsioonina – MIG/MAG-keevitus. MIG/MAG-keevitust kirjeldab Joonis 11.26.



**Joonis 11.26.** MIG/MAG-keevitus

Poolile keritud keevitustraadi läbimõõduga 0,6...2,4 mm söödetakse automaatselt püsiva kiirusega etteanderullide abil keevituspõletisse, mida kutsutakse oma erilise kuju tõttu keevituspüstoliks. Keevitussuut juhivad keevitustraadile keevituspüstolis kinnitatuvas vasest voolukontakti kaudu. Keevitustraadi otsa ja detailide vahel põleb keevituskaar, mille piirkonda juhivad keevituspüstoli suudmiku kaudu kaitsegaasi. Võrreldes käsikaarkeevitusega, saab kasutada kuni 10 korda suuremat voolutihedust ja suuremat (kuni 2 korda) pealesadestuskiirust. Keevitussuut on soojuslikult palju kontsentreeritum kui käsikaarkeevitusel, mis võimaldab saada sügava läbikeevituse ja kitsama termomõju tsooni. Keevitamiseks kasutatakse vastupolaarset alalisvoolu, mis võimaldab saada stabiilsema ja pritsmeteta keevitussuuta. Nüüdisaegsetes seadmetes kasutatakse sageli impulssvoolu. Vooluallika tunnusjooned on jäigad. MIG/MAG-seade koosneb vooluallikast, keevitustraadi etteandeseadmest, gaasi-seadmetest (gaasiballoon, reductor, voolikud) ja keevituspüstolist. Keevituspüstolit jahutatakse tavaliselt läbiva kaitsegaasi joaga ja suurematel voolutugevustel (üle 300 A) jahutusvedelikuga.

Kaitsegaasi valik oleneb keevitatavast materjalist. Alumiiniumi MIG-keevitusel kasutatakse kaitsegaasina inertgaasi (Ar või Ar ja He segu), süsinikteraste MAG-keevitusel CO<sub>2</sub> või segugaasi 80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>, roostevaba terase keevitamisel Ar koos väikese (kuni 2 %) süsihappegaasi lisandiga. Keevitustraadi ja kaitsegaasi kombinatsioon väldib vedela räbukihi tekkimist keevisläbimite peale ja seetõttu puudub vajadus keevisliidete käsitsi räbust puhastamiseks. MIG/MAG-keevitus liigitub poolautomaatkeevituse rühma. Seda on võimalik kasutada nii masin- kui ka robotkeevitusena. Süsihappegaasi sisaldava kaitsegaasi puhul kasutatakse desoksüdeerijaid (Mn, Si) sisaldavat keevitustraadi kompenseerimaks keevismetalli oksüdeerumist süsihappegaasi toimel.

MIG/MAG-keevitamise põhiparameetrid on kaarepinge ja keevitussuut. Viimase suurust reguleeritakse keevitustraadi etteandekiiruse muutmisega. Keevitussuut

stabiilse kulgemise tingimuseks on vaja, et keevitustraadi sulamiskiirus oleks proportsionaalne sulamiskiirusega. Nimetatud tingimus täidetakse optimaalse “pinge-voolu” kombinatsiooni valikuga seadme seadistamisel.

Keevitusprotsessi tähtis parameeter on keevituskaare pinge, mis määrab elektroodimetalli siirdeviisi keevisvanni, keevituskaare võimsuse ja läbikeevituse sügavuse. Olenevalt kaarepingest eristatakse kolme siirdeviisi, praktikas tuntud ka kaaretüüpide nimetuse all:

- a) **lühikaarsiire** ehk **lühissiire** (*short circuit transfer, dip transfer*), praktikas tuntud kui **lühikaar** (*short arc*). Elektroodimetalli siire toimub traadi otsast keevisvanni suurte tilkadena, mis lühistavad kaarevahemiku. Esineb teraste keevitamisel madalate kaarepingete (15...20 V) ja väikeste voolutugevuste (kuni 180 A) kasutamisel. Kasutatakse õhukese pleki keevitamisel;
- b) **jämetilksiire** (*globular transfer*), esineb teraste keevitamisel pingete vahemikus 20...25 V;
- c) **pihustussiire** (*spray transfer*), praktikas tuntud kui **pihustuskaar** (*spray arc*). Esineb teraste keevitamisel segugaasi (Ar + CO<sub>2</sub>) kasutamisel kõrgete kaarepingete (18...35 V) ja suurte keevitusvoolude (175...350 A) korral. Leiab kasutamist paksema lehtmaterjali keevitamisel ja teda iseloomustab suur tootlikkus.

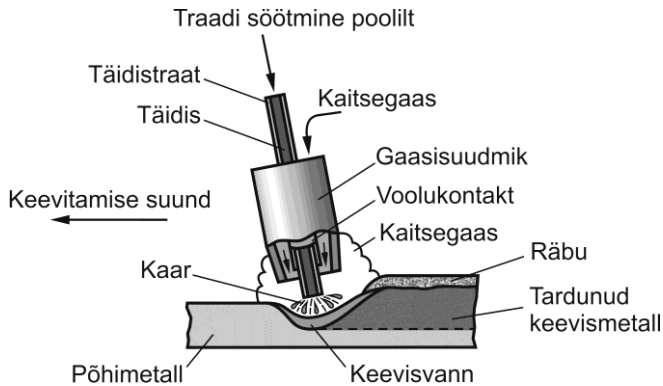
MIG/MAG-keevituse kasutusala on: tööstuses terase ja alumiiniumi keevitamisel levinuim protsess, saab keevitada ka Cu-, Ni-, Ti-, Ni-sulameid; sobib hästi nii õhukese pleki (alates 0,6 mm) kui ka paksema materjali keevitamiseks. Seejuures keevitatava terasplaadi paksusele ülemist piiri pole ja majanduslikult loetakse õigustatuks kuni 6...10 mm paksusega teraspleki keevitamisel. Eelistatult keevitatakse sisetingimustes, et vältida kaitsegaasi eemalepuhumist keevituskaare piirkonnast tõmbetuule toimel.

MIG/MAG-keevituse eelised võrreldes käsikaarkeevitusega on: suurem tootlikkus protsessi pidevuse ja suurema pealesulatuskiiruse tõttu, keevitamisel ei teki praktiliselt räbu ja keevitaja näeb keevitamise ajal moodustunud õmblust. Protsess on hästi robotiseeritav ja mehhaniseeritav. Iseloomulik on kitsam keevisõmbluse termomõju tsoon ja väiksemad kujumuunded. Saab kasutada praktiliselt kõigis keevisõmbluse ruumiasendites.

MIG/MAG-keevituse puuduseks on: ei sobi välistingimustes ja tõmbetuule käes keevitamiseks, süsihapegaasi kasutamisel võib kuni 10 % keevitustraati muutuda pritsmeteks, mis nõuab täiendavaid kulusi nende eemaldamiseks, keevitustraate piiratud valik.

## Täidistraatkaarkeevitus

MAG-keevituse edasiarendus on **täidistraatkaarkeevitus** ehk **täidistraatkeevitus** (*flux-cored arc welding*), mille puhul kasutatakse torukujulist täidisega traatelektroodi (täidistraati) ja keevitatakse üldiselt kaitsegaasi kasutades (vt Joonis 11.27).



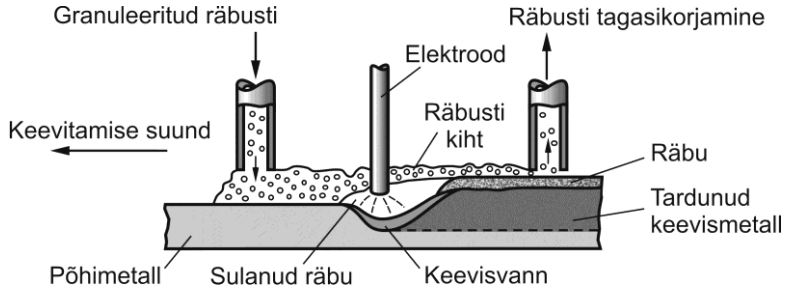
Joonis 11.27. Täidistraatkaarkeevitus

Keevitusprotsess on kombinatsioon käsikaarkeevitusest (pulbrikujuline täidis toru sees) ja MIG/MAG-keevitusest (painduv torukujuline traatelektrood, kaitsegaasi kasutamine). Täidistraadi südamikust väljavoolav räbu kaitseb täiendavalt keevisvanni ja tuleb pärast tardumist eemaldada keevisõmbluse pinnalt. Levinuim on keevitamine kaitsegaasis, süsinikteraste korral süsihappegaasis ja roostevaba terase korral segugaasis “argoon-süsihappegaas”. Keevitamine ilma kaitsegaasita leiab piiratud kasutamist keevisõmbluse madalate mehaaniliste omaduste ja keevitamisel eralduvate mürgiste ühendite tõttu. Võrreldes tavalise keevitustraadiga keevitusega iseloomustab täidistraatkeevitust suurem pealesadestuskiirus, keevituskiirus ja liite servade kokkusulamatuse defekti puudumine. Kasutatakse laialdaselt laevaehtuses jm, kuid laiemat levikut piirab täidistraadi kõrgem hind tavalise keevitustraadiga võrreldes.

## Räbustikaarkeevitus

**Räbustikaarkeevitus** (*submerged arc welding*) on kaarkeevituse protsess, mille puhul kasutatakse ühte või mitut keevitustraati ja keevituskaar põleb pulberräbusti kihil all. Tööstusliku kasutamise alguseks loetakse 1930. a. Keevitamisel söödetakse keevisvanni jämedat (läbimõõduga 1...10 mm) keevitustraati, harvem täidistraati või keevituslinti. Vahetult enne keevisvanni juhitakse voolukontakti abil keevitustraadile kas alalis- või vahelduvvool tugevusega 300...2000 A ja kaare ette juhitakse gravitatsioonijõu toimel graanulräbustit (vt Joonis 11.28). Keevituskaar põleb õõnsuses, mis on täidetud gaasidega ja metalliaurudega ning ümbritsetud pealt vedela sularäbuga. Nii kaitstakse keevituskaart ja keevisvanni ümbritseva õhu eest. Räbusti-

kiht kaitseb töölist kiirguse ja kahjulike gaaside eest, parandades töötingimusi. Tardumisel moodustab räbu keevisliite peal klaasja kooriku, mis on hiljem kergesti eemaldatav. Rübusti isoleerib keevisvanni termiliselt, mis tagab keevisliite suhteliselt aeglase jahtumise ning sitke ja plastse keevisliite. Osa rübustit ei sulata keevitamise käigus, vaid taaskasutatakse.



**Joonis 11.28.** Rübustikaarkeevitus

Kuigi on tegemist automaatkeevitusega, on protsessi kaasatud tööline (keevitusoperaator), kelle ülesandeks on osade paigutus, keevitusparameetrite seadistamine ja protsessi jälgimine. Keevitamisel kasutatakse nii alalis- kui ka vahelduvvoolu, mida saadakse nii püsivvooluga kui ka püsivpingega trafodest või alalditest. Tänapäevastes seadmetes võidakse kasutada invertervooluallikaid. Traadi etteandesüsteemid on erineva tööpõhimõttega: nii muudetava kiirusega kui ka püsiva etteandekiirusega. Üldjuhul on rübustikaarkeevitus automaatkeevitus, kus keevituspea liigub vankrikesel detailide peal (keevitustraktor) või nn keevitustornidele paigutatuna.

Rübustikaarkeevitust kasutatakse paksust süsinikkonstruktsiooniterasest ja roostevabast terasest pikkade ja suuregabariidiliste I- ja T-talade, mahutite, katelde, laevakorpuste valmistamiseks.

Rübustikaarkeevituse eelised on hea tootlikkus e pealesadestuskiirus ja keevituskiirus (ületab käsikaarkeevitust tootlikkuselt 5...20 korda ja kiiruselt 12...15 korda), suur keevituskaare energia, mis võimaldab keevitada kuni 15 mm paksust terasplaati ilma servi faasimata, keevisõmbluse hea ja stabiilne kvaliteet, puuduvad keevituspritsmed, keskkonnasõbralik, kergesti automatiseeritav ja ei ole tundlik tõmbetuule suhtes.

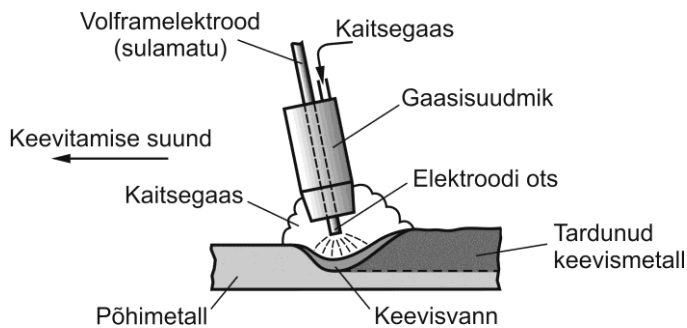
Rübustikeevituse puuduseks on, et ei saa keevitada lühikesi ja jäikusribidega tooteid, keevisõmbluse asend piiratud üldjuhul allasendiga, rangemad nõuded detailidele ja nende koostamisele, rübustid imavad niiskust, mistõttu tuleb vältida nende niiskumist ja vajadusel kuivatada.

## Elektergaaskaarkeevitus

**Elektergaaskaarkeevitus** (*electro-gas welding*) on elektriräbukeevituse protsessi edasiarendus, kui püstõmbuste keevitamisel detailide servade vahelist püstsuunas liikuvat keevisvanni kuumutatakse kaitsegaasis põleva keevituskaarega (vt p 11.3.3.: Elektriräbukeevitus). Saab keevitada samu materjale mis elektriräbukeevitusega, kuid mõnevõrra õhemaid (13...100 mm). Kasutusala on laevakered, konstruktsioonid, naftamahutid jm. Alates 1980. aastatest leidnud laialdasemat kasutamist arenenud tööstusriikides, nt USA-s.

## TIG-keevitus

**TIG-keevitus** (*tungsten inert gas welding; TIG-welding, gas tungsten arc welding*) on sulamatu elektroodiga kaarkeevituse protsess, kus keevituskaar põleb sulamatu elektroodi (peamiselt volfram ja volframisulamid) otsa ja detailide vahel ja kaarevahemikku kaitstakse sinna juhitava inertgaasiga (Joonis 11.29). Varem tuntud kui argoonkeevitus. Tööstuslikud seadmed on välja töötatud 1940. a alguses USAs. Kui keevitatakse õhukest plekki, siis tavaliselt lisametalli ei kasutata. Kui kasutatakse lisametalli, siis lisatakse seda keevisvanni eraldi varda või traadi kujul, mida sulatatakse kaare soojusega ja see siirdub tilkadena keevisvanni läbi kaare sarnaselt sulavelektroodiga keevitamisega. Keevitamisel ei moodustu keevisõmbulusele räbu ega kaasne pritsmeid. Keevisõmbuluse on kvaliteetne. Keevitusprotsess sobib kõikide keevisliidete keevitamiseks. Terase keevitamisel loetakse aeglasemaks ja kallimaks keevitusprotsessiks kui teised sulakeevitusprotsessid. Kasutatakse põhiliselt käsi-keevitusena, aga ka masin- ja automaatkeevitusena.



**Joonis 11.29.** TIG-keevitus

Keevitusvooluallikatena kasutatakse järsult langeva tunnusjoonega ehk püsivooluga alaldeid või invertreid. Teraste keevitamisel kasutatakse päripolaarset alalisvoolu, Al ja Mg keevitamisel täisnurkse lainekujuga vahelduvvoolu. Elektroodina kasutatakse puhtast volframist (W) või metallioksiididega ( $\text{ThO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ) legeritud volframvarrast. Keevituskaare süütamiseks kasutatakse tavaliselt erilist süüteseadet,

mille abil antakse elektroodile esialgu kõrgsageduslik ja kõrgpingeline lühiajaline vool, mille toimel kaarevahemik ioniseerub, ja seejärel juhitakse elektroodile keevitusvool. Kaitsegaasina kasutatakse argooni või argooni ja heeliumi segugaasi.

Tööstuslikult kasutatakse Al, Cu, Mg, Ni, Ti, pronksi, süsinik- ja kõrglegeerteraste keevitamisel, kui keevitustööde maht ei ole suur. Keevitatava metalli paksus on vahemikus 0,15...6 mm. Kasutatakse laialdaselt energeetikaseadmete torustike valmistamisel, kus esimene keevitusläbim tehakse TIG-keevitusega, edasi täidetakse servavahemik käsikaarkeevitusega.

TIG-keevituse eelised on keevisõmbluste hea kvaliteet, puuduvad keevituspritsmed ja räbu, sobib hästi õhukese metalli keevitamiseks.

TIG-keevituse puudused on väike tootlikkus ja madal keevituskiirus, kaitsegaasi kõrge hind, võib tekitada väliskeskkonnas elektromagnethäireid.

## **Plasmakeevitus**

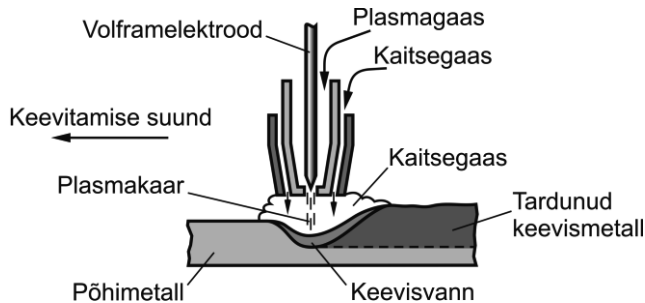
**Plasmakeevitus** (*plasma arc welding*) on kaarkeevituse protsess, kus soojusallikana kasutatakse kokkusurutud plasma energiat. Plasmakeevitus on edasiarendus TIG-keevitusest. Plasmapõletis tekitatud kaar surutakse kokku kitseneva suudmiku abil ja tema ristlõige väheneb järsult, temperatuur tõuseb ja tekib voolujuhtiv kõrgtemperatuurne (10000...30000 °C) ja suure energiatihedusega plasmakaar või plasmajuga (Joonis 11.30).

Plasmakaare tekitamisel kasutatakse plasmagaasi, tavaliselt argooni või heeliumit või nende segu, keevisvanni kaitseks argooni või heeliumit, harvem süsihappegaasi või eespool mainitud gaaside segu. Üldjuhul ei kasutata lisametalli, kuid paksema materjali keevitamisel juhitakse plasmakaare piirkonda keevitustraati plasmapõletis oleva kanali kaudu. Plasmakeevitust iseloomustab hea kaare stabiilsus, võrreldes teiste kaarkeevituse protsessidega suurem läbikeevitus, suur keevituskiirus ja keevisliite hea kvaliteet.

Plasmakeevitusel eristatakse:

- 1) **plasmakaarkeevitus** (*plasma transferred arc welding; PTA-welding*), kus elektrikaar põleb vahetult W-elektroodi otsa ja liidetavate detailide vahel ehk kasutatakse otsekaart. Enim levinud, kusjuures saab kasutada elektrit juhtivate materjalide keevitamiseks;
- 2) **plasmajugakeevitus** (*plasma non transferred arc welding, plasma jet welding*), kus kaar põleb W-elektroodi ja voolujuhtiva plasmadüüsi (*constricting nozzle*) vahel ning surutakse plasmagaasi abil kokku. Sobib dielektrikute liitmiseks ja lõikamiseks. Plasmajuga kasutatakse veel termopindamisel, plasmalõikamisel ja jootmisel;

- 3) **läbistav plasmakeevitus** (*keyhole plasma welding*). Kasutades optimaalset kombinatsiooni gaasivoolu kiirusest, voolutugevusest (üle 100 A) ja keevituskiirusest, tekib suhteliselt kitsas, liidetavaid detaile läbiv erilise kujuga keevisvann. Kasutatakse paksema materjali keevitamisel. Läbistavat keevitust kasutatakse veel elektronkiir- ja laserkeevitusel (vt 11.3.3. Sulakeevituse eriprotsessid);
- 4) **mikroplasmakeevitus** (*microplasma welding*) on õhukese materjali plasmakeevitus voolutugevusega alla 15...20 A.



**Joonis 11.30.** Plasmakaarkeevitus

Plasmakeevitust kasutatakse laialdaselt näiteks autotööstuses, mööblitarvikute valmistamisel jne.

Keevitatakse erinevaid teraseid, titaani-, nikli- ja alumiiniumisulameid, näiteks roostevabast terasest ja alumiiniumist survemahuteid, torustikke.

Plasmakeevituse elised on suur keevituskiirus (võrreldes TIG-keevitusega kuni 6...8 korda), väikesed keevistoodete kujumuunded, keevisõmbluste hea kvaliteet.

Plasmakeevituse puudused on seadmete kõrge hind, plasmapõleti suured gabariidid, mis võib piirata ligipääsu keevituskohale kitsastes tingimustes, plasmapõleti düüside kulumine.

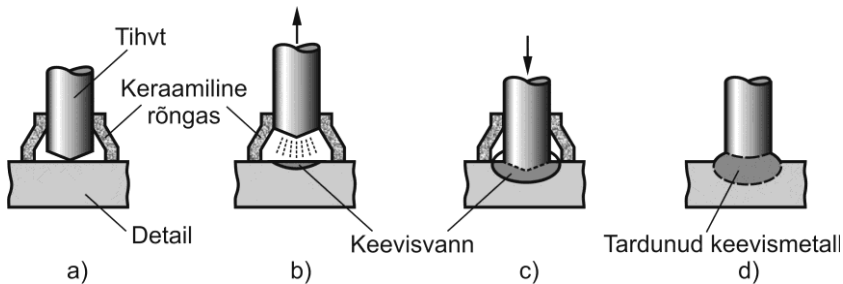
### **Vastakkaarkeevitus**

**Vastakkaarkeevitus** (*stud welding*) kuulub mittersulava elektroodiga kaarkeevitusprotsesside rühma ja on ette nähtud tihvtide, tikkpoltide ja poltide plaatide külge liitmiseks. Keevituskaart kaitstakse õhukeskkonna eest detaili ümber asetseva keraamilise rõngaga või pastakujulise rübusti abil.

Vastakkaarkeevituse etapid on esitatud Joonisel 11.31. Keevitaja asetab tihvti koos selle otsale asetatud keraamilise rõngaga püstolisse ja surub vastu liidetavat pinda. Lülitusnupule vajutades läbib keevitusvool (500...1300 A) tihvti ja keevituspüstolisse sisseehitatud pooli, mille magnetväli tõmbab tihvti detailist eemale, tekitades nii tihvti



otspinna ja detaili vahel kaarlahenduse. Tekkinud kaarlahendus sulatab tihvti otspinna ja ka detaili pinna. Edasi lülitatakse keevitusvool välja ja püstolis oleva vedru abil surutakse tihvt keevisvanni ja jahtudes tekib tugev liide poldi ja detaili vahel.



**Joonis 11.31.** Vastakäärkeevituse etapid: a – tihvti kohale asetamine, b – tihvti eemaldamine ja kaare süütamine; c – tihvti surumine keevisvanni; d – liite moodustumine ja keraamilise rõnga eemaldamine

Keevitusseade koosneb erikonstruktsiooniga järsult langeva tunnusjoonega alaldist ja püstolist. Võidakse kasutada kondensaatoritesse salvestatud energiat.

Vastakäärkeevitust kasutatakse terasest, vasest, alumiiniumisulamitest tihvtide, tikkpoltide jm liitmiseks detailidega, nt ehituslike terastaladele betooni sidumiseks vajalike tihvtide keevitamiseks, laevaehituses isoleermaterjale siduvate tihvtide keevitamiseks jm.

Vastakäärkeevituse eelis võrreldes teiste kaarkeevituse protsessiga on lühike keevitusaeg ja suur tootlikkus (nt käsitsikeevitusel kuni 10 detaili minutis, automaatkееvitusel kuni 30 detaili minutis), stabiilne ja hea keevisliite kvaliteet.

Vastakäärkeevituse puudus on seadmete suhteliselt kõrge hind.

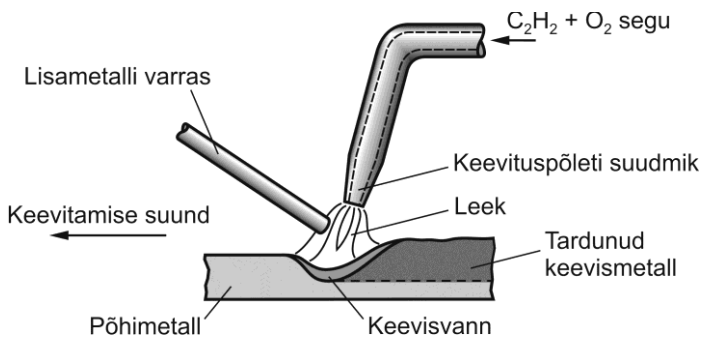
### 11.3.2. Keemilistel reaktsioonidel põhinevad sulakeevituse protsessid

Keemiliste reaktsioonide käigus eralduvat soojust, tavaliselt kas põlevgaasi või termiitsegu põlemisel eralduvat, kasutatakse tehnikas gaaskeevitusel ja termiitkeevitusel.

#### Gaaskeevitus

**Gaaskeevitus** (*oxyfuel gas welding*) on sulakeevitusprotsesside üldnimetus, kus soojusallikana kasutatakse gaasileegi põlemissoojust, mis saadakse põlevgaasi põlemisel hapnikus eriliste põletite abil. Keevitusprotsessi nimetatakse atsetüleeni kasutamisel põlevgaasina **hapnik-atsetüleenkeevituseks** (*oxy-acetylene welding*), vesiniku kasutamisel põlevgaasina **hapnik-vesinikkeevituseks** (*oxy-hydrogen welding*) jne. Paksema materjali keevitamisel võidakse kasutada lisametalli vardaid

läbimõõduga 1,6...9 mm, mis sulatatakse gaasileegi abil keevisõmblusesse. Sageli võivad lisametalli vardad olla kaetud räbustiga, mis aitab puhastada liitekohta oksiididest ja vältida keevismetalli oksüdeerumist. Keevitusräbusteid pulbrite või pastade kujul kasutatakse tavaliselt mitterauasulamite (Al ja Cu) ning legeerteraste keevitamisel. Gaasileegi energiatihedus on madal ( $10^4 \dots 10^5 \text{ W/m}^2$ ), mis jääb kuni kaks korda alla kaarkeevituse protsessidele. Seejuures moodustab gaasileek ühtlasi ka keevisvanni kaitsekeskkonna ümbritseva õhu eest. Levinuim põlevgaas on atsetüleen, mis annab hapnikus põledes temperatuuri kuni  $3480 \text{ }^\circ\text{C}$ . Propaani kasutatakse rohkem jootmisel ja maagaasi väikestes töökodades. Gaasileeki kasutatakse kõvajootmisel, aga ka keevistoodete kujumuunete vähendamiseks nende termilisel õgvendamisel. Gaaskeevitus on üldjuhul käsitsikeevitus ja tulemus oleneb keevitaja kutseoskustest.



**Joonis 11.32.** Gaaskeevitus

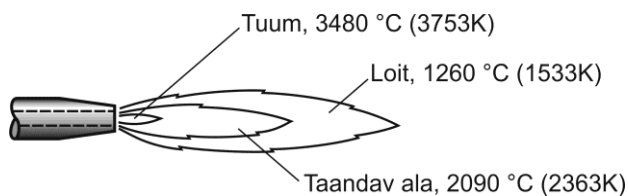
Hapnik-atsetüleenkeevitusel kasutatav kõrgetemperatuurne gaasileek koosneb kolmest alast (joonis 11.33): tuumast, taandavast alast ja loidist ehk oksüdeerivast alast. Põlemine algab tuuma väliskihis reaktsiooni järgi:



Taandavas alas tekib taandav keskkond. Gaasileegi maksimaaltemperatuur on kaugusel 3...8 mm tuuma otsast ja edasi langeb järsult. Üldjuhul keevitatakse leegi taandava osaga. Oksüdeerivas alas toimuvad õhuhapniku toimel reaktsioon:



Keevitamise ajal gaasileegi välimine ala levib piki detailide pinda ja kaitseb nii neid ümbritseva õhu mõju eest.



**Joonis 11.33.** Gaasileegi alad

Keevitusleegis toimuvaid keemilisi reaktsioone saab hinnata leegi erinevate osade värvuse järgi. Olenevalt hapniku ja atsetüleenini omavahelisest suhtest saadakse kolme tüüpi keevitusleeki: a) normaalleek, b) taandav leek, c) oksüdeeriv leek.

**Normaalleek** (*neutral flame*) saadakse teoreetiliselt juhul, kui ühele mahuosale atsetüleenile vastab üks mahuosa hapnikku. Balloonides tarnitav hapnik sisaldab lisandeid, mistõttu normaalleegi saamiseks on vaja rohkem hapnikku ehk hapniku ja põlevgaasi suhet  $O_2/C_2H_2 = 1,1...1,3$ . Normaalleegi tuum on silinderjas ja tugevalt helenduv ärapõlenud C-osakestest. Leegi alad on selgesti eristatavad. Tuuma pikkus on leegi suudmiku suurus. Kasutatakse teraste keevitamiseks.

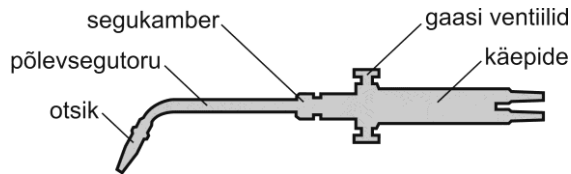
Hapniku ülehulga korral (hapnikusuhe kuni 1,5) tekkiva **oksüdeeriva leegi** (*oxidizing flame*) tuum on kooniline ja kahvatu, piirjooned ähmastunud, leegi loit sinakaslilla. Keevitusleegi temperatuur on kõrgem kui normaalleegil. Hapniku ülehulga tõttu saadakse poorne ja habras õmblus. Kasutatakse messingite keevitamisel ja kõvajoodisjootmisel (vt p. 11.6).

**Taandav leek** (*carburizing flame*) põlevgaasi suhtel ( $O_2/C_2H_2 < 1$ ) tekib atsetüleenini ülehulga korral (põlevgaasi suhtel  $O_2/C_2H_2 < 1$ ). Leegi tuuma piirjooned ei ole selged, otsas tekib roheline kroon. Leek on madalama temperatuuriga ning tahmav. Kasutatakse malmi ja mõnede mitterauasulamite keevitamisel. Keevitaja reguleerib käsitsi keevituspõleti ventiilidega gaaside hulka soovitud leegi tüübi saamiseks.

Gaaskeevituse seade koosneb keevituspõletist, ohutusseadmetega varustatud gaasivoolikutest, gaasiballoonidest, reduktoritest gaasi rõhu alandamiseks.

Keevitusgaasidena tarnitakse hapnikku 40 või 50 l balloonides normaaltõrke all 200 baari (20 MPa) ja atsetüleenini rõhu all 15...18 baari ehk (1,5..1,8 MPa). Atsetüleenini plahvatusohtlikkuse vähendamiseks lahustatakse ta atsetoonis. Atsetüleenini balloon on täidetud aktiivsöest või pimsskivist urbse materjaliga (umbes 8 %), atsetooniga (umbes 41 %) ja atsetoonis lahustunud atsetüleeniga (umbes 36 %). Lisaks jäetakse balloonis varu (15 %) gaasi paisumiseks. Gaaside käitlemisel tuleb rangelt järgida ohutusnõudeid, kuna atsetüleenini ja hapniku segu on kõikides kontsentratsioonides plahvatusohtlik.

Gaaskeevituse töövahendiks on **keevituspõleti** (*welding torch*), (Joonis 11.34). Enam levinud on injektorpõletid, kus hapnikujuga juhitakse survele 1,5...4 baari (0,15...0,4 MPa) läbi injektori kitseneva kanali, kus joa kiirus tõuseb kuni 300 m/s. Injektorist suure kiirusega väljudes tekitab hapnikujuga hõrenduse, mis tagab suhteliselt madala rõhu all oleva atsetüleeni imemise segukambrisse. Leegi võimsust reguleeritakse erineva suurusega keevitusotsikuid kasutades. Keevitussotsiku painutatud kuju võimaldab keevitusleegi parema ligipääsu õmblustele kitsastes tingimustes.



**Joonis 11.34.** Gaaskeevituse põleti

Samarõhupõletites ehk injektorita põletites juhitakse atsetüleeni ja hapnik põletisse võrdse 0,1...10 baarise rõhu all, kus nad segunevad segukambris või mõnel juhul ka otsikus. Tänapäeval kasutatakse universaalseid keevitus-lõikepõleteid. Ühise käepideme külge võib kinnitada erineva ava läbimõõduga ja keevitusleegi võimsusega keevitusotsakuid, vajadusel aga lõikeotsakuid (vt p. 11.9.2. Hapniklõikus).

Gaaskeevitusel kasutatakse kahte keevitustehnikat: **paremkeevitust** (*rightward welding*) või **vasakkeevitust** (*leftward welding*). Paremkeevitusel liigub põleti vasakult paremale, gaasileek on suunatud kuumenenud õmblusmetallile, lisametalli antakse põleti taha. Saavutatakse õmblusmetalli parem kaitse ümbritseva õhu eest, väheneb gaasi kulu kuni 20 %, kasvab tootlikkus. Kasutatakse paksema metalli keevitamiseks. Vasakkeevitusel liigub põleti paremalt vasakule ja keevitusleek on suunatud keevitamata õmbluse servale. Lisametall liigub keevitusleegi ees. Kasutatakse õhema metalli keevitamiseks. Kuna keevitaja näeb õmblust, saadakse keevisõmbluse parem väljanägemine.

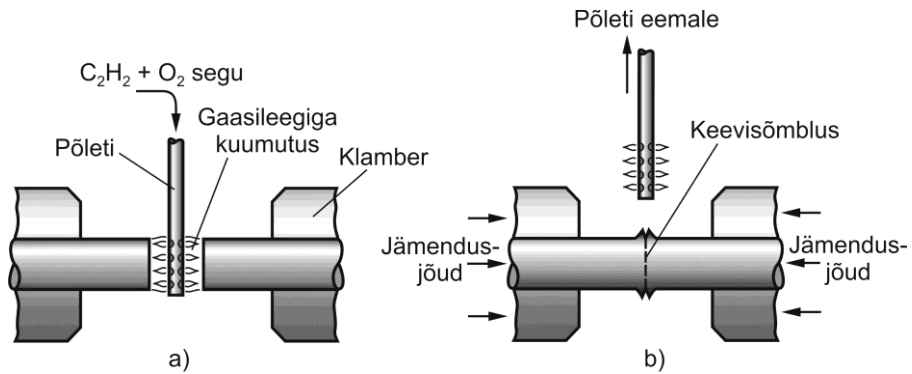
Gaaskeevitust kasutatakse teraste, malmi, mitterauasulamite nagu vase-, alumiiniumi ning magneesiumisulamite jt keevitamiseks, välja arvatud rasksulavad metallid. Levinud malmivalandite defektide parandamisel, samuti õhukese teraspleki keevitamiseks (nt autoremondil), torude ja torustike keevitamisel ehitustel.

Gaaskeevituse eelised on võimalus keevitada piiranguteta kõigis keevisõmbluste asendites, seadmed on mobiilsed ja universaalsed.

Gaaskeevituse puudused on madal tootlikkus ja sobivus ainult õhukese pleki (paksusega kuni 4...6 mm) keevitamiseks, gaaside kõrge hind ja plahvatusohtlikkus, raskused stabiilse kvaliteedi tagamisega.

Gaaskeevituse eriprotsesside hulka kuulub **gaassurvekeevitus** (*pressure gas welding*), mis on sisuliselt survekeevituse protsess, mille korral detailid ühendatakse kogu kontaktpinna ulatuses pindade eelneva kuumutamise gaasileegi abil kas sulasse või plastsesse olekusse koos järgneva kokkusurumisega (Joonis 11.35).

Kasutatakse raudteerööbaste, torude ja varraste jm liitmiseks; on tänapäeval välja tõrjutud hõõrd-, sulatuspõkk- jt keevitusprotsesside poolt.

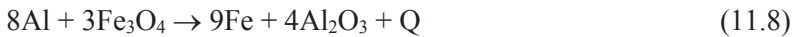


**Joonis 11.35.** Gaassurvekeevitus

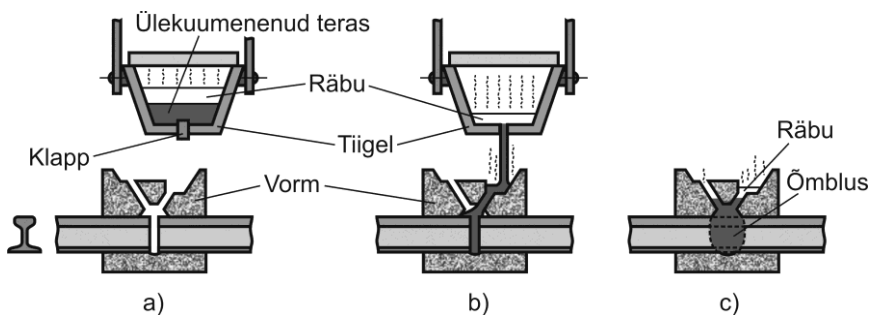
### Termitkeevitus

**Termitkeevitus** (*thermit welding*), samuti tuntud ka kui alumiiniumtermitkeevitus, on sulakeevitusprotsess, kus detailide servade liitmiseks kasutatakse eksotermilise keemilise reaktsiooni – termitsegu põlemissoojust. Lisametall on sulametall ja liitmisprotsessil on rohkem ühist valamise ja keevitamise vahel.

Peene raudoksiidi (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) ja alumiiniumi pulbrid paigutatakse valmistatava liite kohal asetsevasse tiiglis (Joonis 11.36) ning süüdatakse kuumutamisel temperatuurini umbes 1300 °C. Termitsegu põlemisel toimub järgnev keemiline reaktsioon:



Temperatuur tiiglis tõuseb selle reaktsiooni tulemusena kuni 2600...3000 °C, sula alumiiniumoksiid voolab rübuna tiiglis sulanud metalli peale ja kaitseb seda õhuga kontakteerumise eest. Keevitamine toimub tulekindlates vormides (grafiit, liiv), kuhu paigutatakse keevitavate detailide otsad. Kui termitreaktsioon on umbes 30 sekundi jooksul lõpule jõudnud, siis avatakse tiigli väljalaskeava ja ülekuumenenud metall voolab vormi. Sageli kuumutatakse detailide servi gaasipõletiga ette. Ülekuumenenud metall sulatab detailide servad ja ühendab tardudes liidetavad pinnad. Edasi vorm eemaldatakse ja valukanalite elemendid eemaldatakse gaasilõikamise või teiste meetoditega. Liitepind on hea pinnakvaliteediga ja ei nõua täiendavat töötlemist.



**Joonis 11.36.** Termiitkeevituse etapid: a – termiitsegu süütamine; b – ülekuumenenud metall voolab vormi; c – keevismetalli tardumine

Termiitkeevitust kasutatakse sageli tingimustes, kus puudub vooluvõrk, nt raudteerööbaste ja sardbetooni varraste liitmiseks, samuti vask- ja alumiiniumkaablite jätkamiseks, valandite ja sepiste pragude parandamiseks.

Termiitkeevituse eelised on keevismetalli suhteliselt head mehaanilised omadused, väikesed kujumuunded, protsess on suhteliselt odav. Puudused on termiitsegu ja keeruliste vormide kasutamise vajadus.

### 11.3.3. Sulakeevituse eriprotsessid

#### Energiakiirega keevitusprotsessid

Energiakiirega keevituse all mõeldakse sulakeevitust, kus liidetavatele detailidele juhitakse kontsentreeritud kitsas energiakiir, mis sulatab metalli.

**Elektronkiirkeevitus** (*electron-beam welding*) on sulakeevitusprotsess, kus materjali sulatamiseks vajalik soojusenergia tekib kiirendatud elektronide toimel. Keevituspotsess arendati välja 1950. aastatel algselt tuumareaktorite, hiljem lennuki- ja kosmosetööstuse tarvis. Elektronkiirkeevituse alaliigid on: a) kõrgvaakumkeevitus; b) keskvaakumkeevitus; c) mittevaakumkeevitus.

Liidetavad detailid kinnitatakse erilisse kambrisse, milles tekitatakse vaakum. Elektronkahuri abil tekitatakse kiirendatud elektronide voog. Elektronide voog koondatakse elektronkahuris fookuseeriva magnetlätse abil ja suunatakse töökambrisse liidetavate detailide pinnale. Kiirendatud elektronide kineetiline energia muutub metalli pinnaga kokkupuutel soojuseks ja temperatuur detaili pinnal tõuseb kuni 5000...6000 °C. Keevitamisel antakse detailidele pöörlev või kulgev liikumine. Kuna elektronide kokkupõrkel eraldub röntgenikiirgus, on kamber vooderdatud pliiga. Suuremate keevitusseadmete vaakumkambrid mahutavad kuni 16 m pikkuseid detaile.

Elektronkiirkeevituse kasutusalad on energeetikaseadmete, sh tuumareaktorite valmistamine, lennukiehitus (lennukiturbiinid), laevaehitus, masinaehitus, nt hammas-

ratasplokkide valmistamine, sõjanduses soomustehnika valmistamine, elektroonika-tööstus jm. Keevitatakse erinevaid teraseid, komposiitmaterjale ja praktiliselt kõiki tehnikas kasutatavaid raskuslavaid metalle (molübdeeni, nioobiumi, volframit jt) ja kergmetalle, nagu titaani, alumiiniumi. Majanduslikel põhjustel ei kasutata elektronkiirkeevitust madalsüsinikteraste keevitamisel.

Elektronkiirkeevituse eelised kaarkeevituse ees on elektronkiire suur energiatihedus (vt Tabel 11.1), mis võimaldab keevitada ühe läbimiga kuni 400 mm paksust terasplaati, suur keevituskiirus, keevisliite peeneteraline mikrostruktuur ja head mehaanilised omadused, kitsast termomõju tsoonist tingitud väikesed kujumuundused, suur protsessi kasutegur (kuni 75 %).

Elektronkiirkeevituse puudused on seadmete kõrge hind, suhteliselt madal tootlikkus, tingituna ajakulust vaakumi loomiseks töökambris.

Elektronkiirt kasutatakse mitte ainult keevitamiseks, vaid samuti lõiketöötamiseks, nt materjalidesse avade puurimiseks (vt p 12.11.3. Termilised töötlusmeetodid), termotöötamiseks, korrosioonikindlate pinnete saamisel.

**Laserikiirkeevitus** ehk **laserkeevitus** (*laser-beam welding*) põhineb liitekohale suunatud ja fokuseeritud laserikiire kasutamisel. Valguskiire allikaks on optiline kvantgeneraator ehk laser. Keevitusprotsessi kasutamise alguseks loetakse 1970. a ja seda on pidevalt täiustatud nii uute laserite kasutuselevõtuga kui ka kombinatsioonid kaarkeevituse protsessidega. Laevaehituses kasutatakse laialdaselt **laserhübriidkeevitust** (*laser hybrid welding*), kus tootlikkuse tõstmiseks on laserkeevitus kombineeritud, kasutades täiendavalt MIG/MAG- või harvem TIG-keevitusprotsesse ja liitekohta juhitakse lisametalli.

Laserkiirt kasutatakse veel jootmiseks (vt p. 11.6.4), laserlõiketöötamiseks (vt p. 11.9.4 ja 12.11.3) samuti toodete ning keevisõmbluste puhastamiseks.

Laserkeevitusel ja -lõikamisel kasutatakse: a) gaaslasereid; b) tahkislasereid, c) dioodlasereid ehk pooljuhtlasereid.

Gaaslaseritena kasutatakse põhiliselt CO<sub>2</sub> lasereid. Neid iseloomustab suurem kiirguse lainepikkus – 10,6 µm, hea laserikiire kvaliteet, suur võimsus – kuni 40 kW, suured gabariidid.

Tahkislaseritena kasutatakse Nd:YAG-lasereid, kuid tulevikus Yb:YAG-lasereid. Neid iseloomustab laserikiire väike lainepikkus – 1,06 µm. Väiksem lainepikkus võimaldab kasutada laserikiire juhtimiseks detailidele kiudoptilisi kaableid ja seetõttu sobib hästi robotkeevituseks. Nd:YAG laserite puuduseks loetakse madalat kasutegurit – 4 %.

Diodlaserid kuuluvad pooljuhtlaserite rühma ja nende aktiivosa koostis on GaAs.

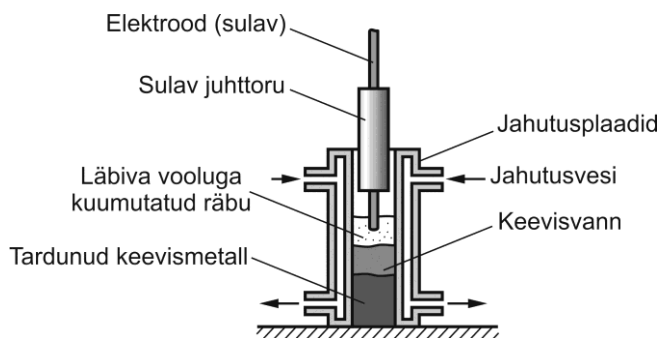
Laserikiirkeevitust kasutatakse laialdaselt metallide, plastide ja komposiitmaterjalide liitmiseks elektroonikatööstuses, laevaehituses, autotööstuses jm. Saab kasutada raskkeevitatavate metallide nagu Ta, Zr jt keevitamiseks.

Laserikiirkeevituse eelised kaarkeevituse ees on suur keevituskiirus ja suur tootlikkus, minimaalne termomõju tsooni laius ja väikesed kujumuunded, keevisliidete head mehaanilised omadused. Erinevalt elektronikiirkeevitusest puudub vajadus vaakumkambriga järgi. Keevitamisel ei eraldu röntgenikiirgust.

Laserikiirkeevituse puuduseks on seadmete kõrge hind ja suhteliselt väike kasutegur, vajadus kasutada täpseid toorikuid.

### Elekträräbukeevitus

**Elekträräbukeevitus** ehk **räbukeevitus** (*electro-slag welding*) kuulub erikeevitusprotsesside rühma, mille puhul keevisliide saadakse elektrit juhtiva sula räbu abil, mis sulatab liidetavate detailide servad (Joonis 11.37). Keevitusprotsessi alustamiseks kasutatakse kaarkeevitusseadmeid. Püstasendis keevisõõnbluse keevitamiseks piiratakse detailidevaheline pilu vesijahutusega vasest jahutusplaatidega, mis hoiavad liidetavate servade vahel nii sula keevismetalli kui ka räbu. Protsessi alustamiseks puistatakse detailidevahelise pilu põhjas asetsevale alusplaadile granuleeritud rübustit. Traadikujulise elektroodi ots on paigutatud selle õõnsuse lähedale ja tekitatakse lühiajaliselt kaarlahendus, mis sulatab rübustit. Pärast teatud koguse sularäbu tekkimist elektrikaar kustub ja vool läbib vedelat räbu. Räbu on elektrolüüdiks, milles eraldub keevituseks vajalik soojus, mis sulatab nii lisametalli kui ka detailide servad. Vedel räbu katab sula keevismetalli ja kaitseb seda väliskeskkonna eest. Vooluallikana kasutatakse tavaliselt jäiga tunnusjoonega trafosid.



**Joonis 11.37.** Elekträräbukeevitus

Elekträräbukeevitust kasutatakse paksuseinaliste (kuni 950 mm) keemiatööstuse, tuumaenergeetikaseadmete, survemahutite, ehitustalade valmistamiseks süsinik- ja



madallegeerterastest, harvem roostevabast terasest. Valmistatakse ainult püstõmbulsi pikkusega kuni 6500 mm.

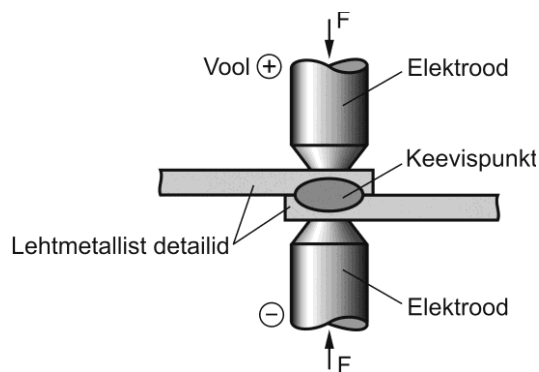
Elektriräbukeevituse eelised on suur tootlikkus ja võimalus keevitada väga paksu materjali ühe läbimiga, kvaliteetne keevisliide ja minimaalsed kujumuunded, puuduvad keevituspritsmed.

### 11.3.4. Kontaktkeevitus

#### Kontaktkeevituse olemus

**Kontaktkeevitus** ehk **takistuskeevitus** (*resistance welding*) on keevitusprotsesside rühma üldnimetus, mille puhul liitekohta kuumutatakse läbiva elektrivoolu toimel, seejuures võidakse rakendada survejõudu. Tavaliselt on tegemist sulakeevitusega.

Vaatleme kontaktkeevituse olemust punktkontaktkeevituse kui enim levinud keevitusprotsessi näite põhjal (Joonis 11.38). Õhukesest lehtmetailist detailid asetatakse üksteise peale, vastastikku asetsevate keevitusmasina elektrodide vahele. Edasi rakendatakse elektrodidele survejõudu ja tekitatakse lokaalne elektriline kontakt detailide vahel. Kaob vajadus liitepindade kaitsmiseks ümbritseva keskkonna eest kaitsegaasi või räbustiga. Järgnevalt juhitakse lühiajaliselt (alla 1 s) läbi kontaktpinna madalapingeline (tavaliselt alla 10 V), kuid suure voolutugevusega (kuni 20000 A) vool. Elektrivool läbib kontaktpinda ja kuumutab seda kuni sulamiseni ja tekib keevisõmblus, mida tema iseloomuliku kuju järgi kutsutakse **keevispunktiks** ehk **-tuumaks** (*weld nugget*). Keevisliite tugevuse määrab keevispunkti läbimõõt, mis on tavaliselt vahemikus 3...10 mm. Keevispunkti ümbritseb võõna kitsas termomõju tsoon. Kontaktkeevituse parameetrid on: a) keevitusvool; b) keevitusaeg; c) survejõud elektrodidele.



Joonis 11.38. Punktkontaktõmblus

Kontaktkeevitust iseloomustatakse keevitusvoolu ja survejõu **keevituse ajagraafikutega** ehk **keevituse tsüklogrammidega** (*welding current and pressure cycle*), mille

kuju oleneb keevitava materjali omadustest ja keevitusprotsessi konkreetsetest rakendustest (Joonis 11.39). Surve rakendamise tõttu toimub detailide liitumine madalamal temperatuuril kui kaar- ja gaaskeevitusel. Teatud juhtudel võidakse pärast keevisõmbluse moodustumist rakendada elektroodidele täiendavat survejõudu, tekitades paremate mehaaniliste omadustega peeneteralise struktuuri. Enne keevitusvoolu rakendamist võidakse detaile kuumutada lühiajaliselt väikese vooluga (ettekuumutus) või pärast keevitamist anda veel täiendav vooluimpulss tekkinud karastusstruktuuri noolutamiseks.

Liidetavad detailid koos elektroodidega moodustavad osa keevituse vooluahelast ja elektrivoolu läbimisel liitepinnas eralduv soojushulk on väljendatav valemiga:

$$Q = I^2 R t, \quad (11.9)$$

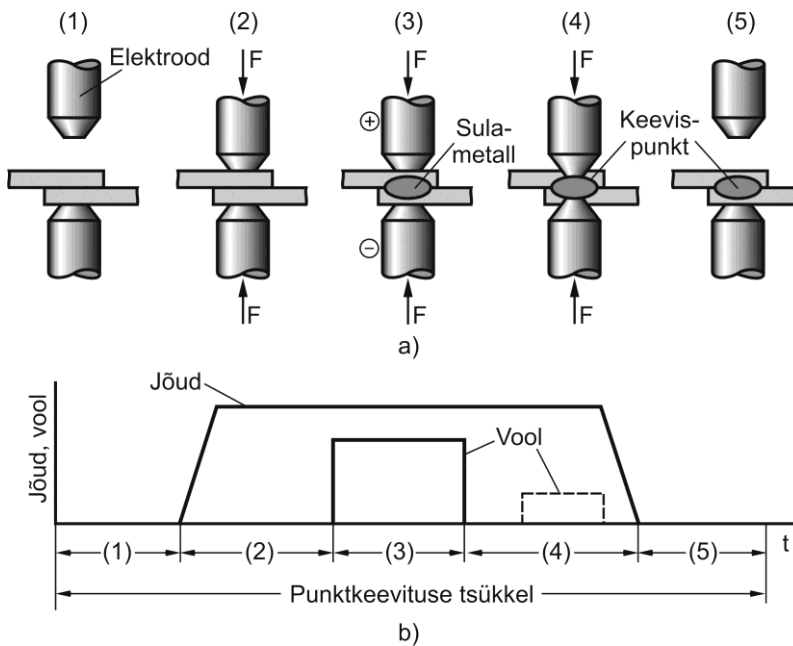
kus  $Q$  – soojushulk, J,

$I$  – vool, A,

$R$  – vooluahela takistus,  $\Omega$ ,

$t$  – aeg, sekundites.

Valemist selgub, et enim mõjutab keevitusel eralduvat soojushulka voolutugevus, aga ka voolu kestus ja vooluahela takistus.



**Joonis 11.39.** Punktkontaktkeevitus: a – etapid (1 – toorikute asetamine elektroodide vahele; 2 – jõu rakendamine; 3 – voolu rakendamine; 4 – voolu väljalülitamine (jõu säilimisega); 5 – keevitunud tooriku eemaldamine) ja b – ajagraafik

Vooluahela takistus  $R$  moodustub kontakttakistusest elektrodide ja detailide vahel  $R_1$ , elektrodide takistusest  $R_2$ , põhimetalli takistusest  $R_3$  ja kontakttakistusest liitepindade vahel  $R_4$ . Ideaalsel juhul peaks kontakttakistus  $R_4$  olema suurim ja ülejäänud takistused minimaalsed. Kontakttakistus elektrodilt detailile  $R_1$  oleneb detailide pinna olukorrast (oksiidid, pind), elektrodide kontaktpinna suurusest (mõõtmetest, kujust), oksiididest ja elektrodidele rakendatud survejõust. Elektrodide takistus on minimeeritud, kasutades madala eritakistusega vaskelektroode, mida reeglina jahutatakse veega. Põhimetalli takistus  $R_3$  on võrdeline tema eritakistusega ja pöördvõrdeline lehtmaterjali paksusega ning tõuseb märgatavalt temperatuuri tõustes. Liitepindadel ei lubata värvi, õli, mustust ja teisi lisandeid, kuna aurustudes tekitavad nad poore jm keevitusdefekte. Keevitusvoolu ja tema rakendusaja suurenedes teatud väärtuseni suureneb sula keevispunkti (tuuma) läbimõõt kiiresti.

Elektrodidele rakendataval survejõul on suur mõju keevitusprotsessile. Kui rakendatav jõud on ebapiisav, põhjustab see sädelemist elektrodide ja põhimetalli vahel, elektrodide kiiret kulumist. Liigsuure jõu rakendamisel pritsitakse sulametaili detailide vahelt välja, elektrodid surutakse detailidesse ja plastse deformatsiooni toimel tekivad punktkontaktkeevitusel nendes süvendid.

### **Punkt-, joon- ja projektsioonkontaktkeevitus**

**Punktkontaktkeevitus** ehk **punktkeevitus** (*resistance spot welding*) on sulakeevitusprotsess, mille puhul pealistikku asetsevate detailide vahel tekib punktikujuline keevisõmblus keevitusvoolu ja survejõudu rakendavate elektrodide toimel. Leviniim ja lihtsaim on lehtmetailist detailide liitmisprotsess siis, kui ei nõuta keevisliite hermeetilisust.

Punktkontaktkeevituse etapid (1) kuni (5) ja ajagraafik on esitatud joonisel 11.39. Keevitamiseks kasutatakse vahelduvvoolu, uuemates seadmetes ka alalisvoolu.

Punktkeevitusseadmeis antakse surve ülemisele elektrodile kas kangüsteemiga või pneumo- või hüdrocilindri abil. Punktkeevituse mobiilsust saab tõsta **punktkeevitustange** (*spot welding guns*) kasutades, mille puhul kasutatakse statsionaarset vooluallikat, kuid eraldi ajamiga suruõhuga toimivaid keevitustange. Kasutatakse keevitusrobotites, aga ka autokerede remondil ja mujal. Alates 1980. aastatest seoses elektroonika kiire arenguga on välja töötatud **portatiivsed keevituspead** (*transguns*), mis sisaldavad nii vooluallikat kui ka elektrodidele jõu rakendamise seadet.

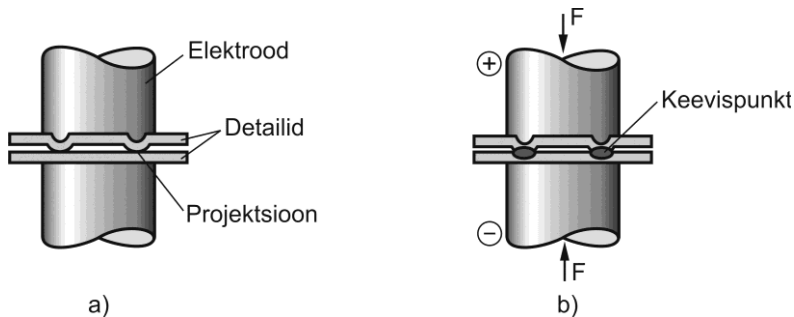
Punktkontaktkeevitust kasutatakse laialdaselt autotööstuses, kus ühes autos võib olla 5000...10000 keevispunkti, aga ka mööblitarvikute jt lehtmetailist toodete valmistamisel. Protsess on hästi automatiseeritav keevitusrobotite abil. Keevitatakse põhiliselt madalsüsnikterasest detaile paksusega 0,5...3 mm, kuid on võimalik keevitada

terasplekki paksusega kuni 6 mm. Tööstuslikult keevitatakse samuti roostevaba terast ja alumiiniumi.

Punktkontaktkeevituse eelised on protsessi lühike kestus ja suur tootlikus, sobivus automatiseerimiseks. Keevitamisel ei ole vaja lisametalli ega kaitsegaasi.

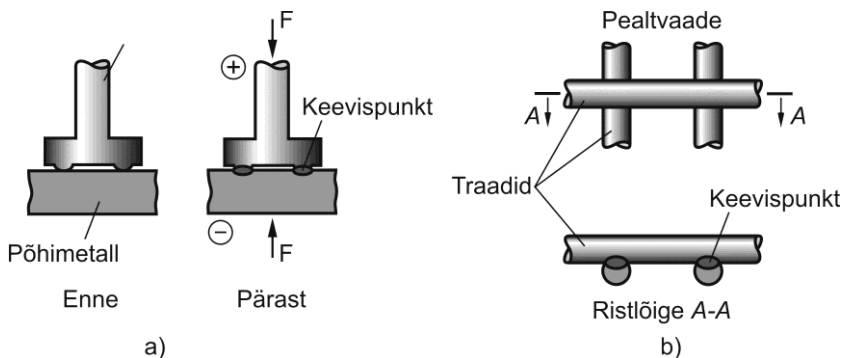
Puuduseks on punktõmbluste madal tõmbe- ja väsimustugevus, defektsete keevisõmbluste parandamise võimatus, seadmete kõrge hind ja vooluvõrgu ebaühtlane koormamine.

**Projektsioonkontaktkeevitus** ehk **reljeefkontaktkeevitus** (*resistance projection welding*) on kontaktkeevituse protsess, mille puhul keevisliide tekib ühe või mõlema detaili pinnast väljaulatuvate osade (projektsioonide) vahel või vardakujuliste detailide ristumispunktides kontaktpindu läbiva lokaalse suure tihedusega elektrivoolu ja rakendatava survejõu toimel. Kahe lehtmetaili keevitamise näide on Joonisel 11.40a ja b. Ülemisele detailile on stantsitud väljaulatuvad osad, millest juhitakse läbi keevitusvool. Kuna kontaktpind on väike, siis saavutatakse suur voolutihedus ja väljaulatuvate osade kiire sulamine. Detailide hind küll kasvab stantsimisoperatsiooni tõttu, kuid seda kompenseerivad keevisliide paremad mehaanilised omadused. Kasutatakse tasapindseid elektroode ja press-tüüpi punktkeevitusseadmeid.



**Joonis 11.40.** Projektsioonkontaktkeevitus: a – enne keevitamist; b – keevitamise ajal

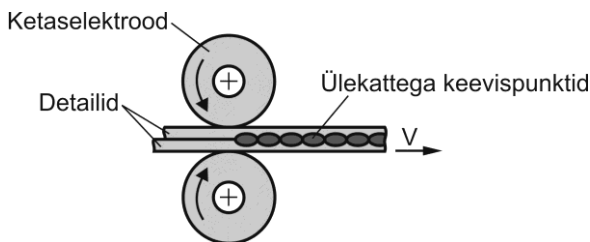
Projektsioonkontaktkeevitust kasutatakse ka poltide, tihvtide, mutrite liitmiseks plekiga (Joonis 11.41a), aga ka punktristliitena traadi või varraste (Joonis 11.41b). liitmisel. Punktristliitena valmistatakse sardbetooni võrku, ostukeskuste kaubakärusid, grille jm tooteid. Projektsioonkontaktkeevitus on levinud hulgitootmises.



**Joonis 11.41.** Projektsioonkontaktkeevituse näiteid: a – poldi keevitus pleki külge; b – varraste punktristliide

**Joonkontaktkeevitus** ehk **joonkeevitus** (*resistance seam welding*) on kontaktkeevituse protsess, mille korral keevisõmblus tekib katteliites detailide vahel neid kokkusuruvate ja keevitusvoolu rakendavate ketaselektroodide toimel keevispunktide jadana (Joonis 11.42). Vaskketaselektroodid pöörlevad tavaliselt ühtlase kiirusega ja nihutavad detaile edasi, ühtlasi juhitakse neile ajaliste intervallide järel keevitusvoolu, mille tulemusena tekivad järjestikused eraldi keevispunktid, harvem ülekattega keevispunktid.

Joonkontaktkeevitust kasutatakse hermeetiliste õmbluste saamiseks, nt lehtmetailist kütusepaakide, mahutite, radiaatorite jm valmistamiseks.



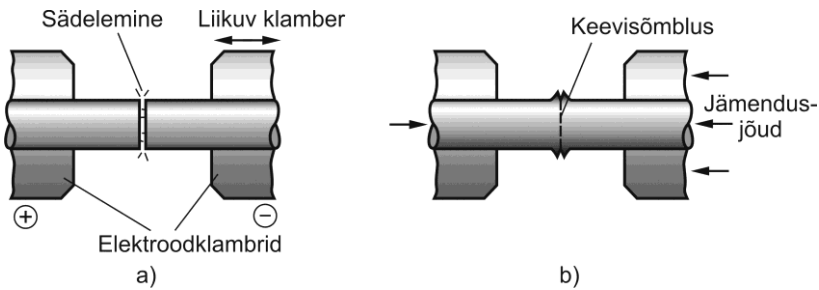
**Joonis 11.42.** Joonkontaktkeevitus

### Põkk-kontaktkeevitusprotsessid

**Põkk-kontaktkeevitus** on kontaktkeevituse protsesside üldnimetus, mille puhul detailid liidetakse terve ristlõike ulatuses, sulatatades neid läbiva elektrivooluga või kasutades induktioonkuumutust ja rakendades seejärel survejõudu. Põkk-kontaktkeevitust kasutatakse põkkliidete saamiseks. Eristatakse järgmisi keevitusprotsesse: a) sulatuspõkk-kontaktkeevitus; b) takistuspõkk-kontaktkeevitus; c) löökontaktkeevitus; d) kõrgsageduskontaktkeevitus; e) kõrgsagedusinduktsioonkeevitus.

**Sulatuspõkk-kontaktkeevitus** ehk **sulatuspõkk-keevitus** (*flash welding*) on kontaktkeevituse protsess, mille puhul saadakse põkkliide detailide otspindade kuumutamiseks sulasse olekusse koos järgneva detailide kokkusurumisega.

Detailid kinnitatakse keevitusseadme kontaktide vahele ja lähendatakse aeglaselt liikuva klambri abil kokkupuutesse (Joonis 11.43a). Keevitamiseks kasutatakse ühefaasilist vahelduvvoolu. Keevitusvoolu sisselülitamisel eraldub kontaktpinnas soojus, metall sulab ja tekivad mikrokaarlahendused detailide otspindade vahel. Kui detailide otspinnad on kattunud sulametalli kihiga, siis rakendatakse jämendamisjõudu (Joonis 11.43b) ja osa sulametalli ja metalli oksiide paisatakse otspindadest välja, mistõttu keevisliite metall on lisanditest suhteliselt puhas. Liitepinna ristlõige suureneb ja tekib iseloomulik jämendusvöö, mis tuleb sageli järgneva mehaanilise töötusega eemaldada.



**Joonis 11.43.** Sulatuspõkk-kontaktkeevitus: a – algetapp, b – lõppetapp

Sulatuspõkk-keevitust kasutatakse praktiliselt kõigi tehnikas kasutatavate metallide liitmiseks. Saab liita erinevaid metalle, nt alumiiniumi ja vaske, niklisulameid ja terast jm. Leiab kasutamist valtsmetalli tootmisel, torude valmistamisel, raamide, talade valmistamisel, traadi ja sardbetooni armatuuri jätkamisel, elektrotehnika tööstuses.

Sulatuspõkk-keevituse eelised on võimalus keevitada suure ristlõikepindadega (kuni 10 000 mm<sup>2</sup>) detaile, puuduvad erinõuded detailide otspindade kvaliteedile, keevisliite head mehaanilised omadused.

Keevitusprotsessi puuduseks on, et liidetavate detailide kontaktpindadel peab olema võrdne ristlõikepindala, samuti raskused väikeste detailide samateljelisuse tagamisel.

**Takistuspõkk-kontaktkeevitus** ehk **takistuspõkk-keevitus** (*upset welding*) on kontaktkeevituse protsess liitepindade kuumutamiseks neid läbiva elektrivooluga allapoole sulamistemperatuuri plastsesse olekusse sellele järgneva survejõu rakendamiseks. See ei ole tüüpiline sulakeevitusprotsess, kuid paljuski sarnane sulatuspõkk-kontaktkeevitusega. Kasutatakse samu keevitusseadmeid, kuid erinevalt sulatuspõkk-

keevitusest rakendatakse liitmisprotsessi algetapil kohe survejõudu koos keevitusvooluga ja ei esine kaarlahendusi detailide otspindade vahel.

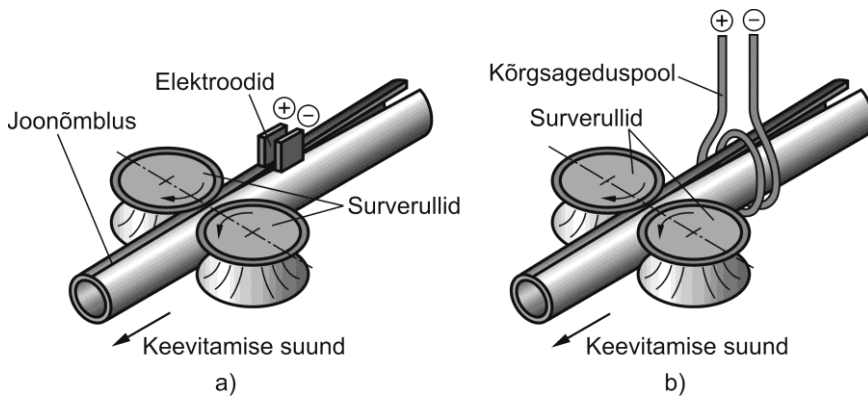
Kasutusalad on sarnased sulatuspõkk-keevitusele, kuid on piiratud detailide suhteliselt väikese ristlõikepinnaga (kuni 300 mm<sup>2</sup>).

**Löökpõkk-kontaktkeevitus** (*percussion welding*) on sulatuspõkk-keevitusele sarnane protsess, mille puhul tekib liide liitepindade lühiajalisel sulatamisel (alla 10<sup>-3</sup> s) elektrilahenduse toimetel koos samaaegse või järgneva kiire löögiga kokkusurumisega. Leiab põhiliselt kasutamist elektroonikatööstuses.

**Kõrgsageduskontaktkeevitus** (*high-frequency seam welding*) on kontaktkeevituse protsess, mille puhul liitepindu kuumutatakse neid läbiva kõrgsagedusvooluga. Kasutatakse keevistorude valmistamisel, kusjuures liitepindu kuumutatakse libisevate kontaktide (elektroodide) kaudu neid läbiva kõrgsagedusvooluga (10...500 kHz) (Joonis 11.44 a), mille järel rakendatakse valtside survejõudu.

**Kõrgsagedusinduktsioonkeevitus** (*high-frequency induction welding*) on eelmise protsessi erim, mille puhul keevituskoha ees liikuva pooli abil kuumutatakse detailide servad pöörivoolude toimetel ja edasi rakendatakse valtside survejõudu (Joonis 11.44 b).

Kõrgsagedusinduktsioonkeevitust kasutatakse väiksema läbimõõduga torude, kõrgsageduskontaktkeevitust suuremate torude valmistamisel. Keevituse protsessi iseloomustab suur keevituskiirus, mis ulatub kuni 150 m/min.



**Joonis 11.44.** Torude kõrgsageduskeevitus: a – kõrgsageduskontaktkeevitus; b – kõrgsagedusinduktsioonkeevitus

## 11.4. TARDFAASKEEVITUS

### 11.4.1. Tardfaaskeevitusprotsesside olemus

**Tardfaaskeevitus** (*solid-state welding*) on keevitusprotsesside rühm, mille puhul detailide ühendamine toimub allpool materjalide sulamistemperatuuri. Tardfaaskeevitusel saavutatakse ühendatavate pindade liitumine kas ainult survet ja kuumutamist või ainult survet rakendades. Paljude tardfaaskeevituse protsesside olulisteks parameetriteks on surve või temperatuuri rakendamise aeg. Kui kasutatakse kombinatsioonis kuumutamist ja survet, siis rakendatav soojushulk ei ole piisav liitepindade sulatamiseks. Selle poolest erineb tardfaaskeevitus põhimõtteliselt teistest keevitusprotsessidest. Üldjuhul liidetakse tardfaaskeevitusel pinnad materjali deformeermisega plastses olekus.

Metallurgiline side kahe sarnase või erineva metalli vahel saavutatakse tardfaaskeevitusel nende liitepindade viimisega täielikku kontakti ja metallidevahelise kohesioonideme tekkimisega. Kuna ei toimu metalli kuumutamist sulamistemperatuurini, siis keevisliitel puudub termomõjutsoon ja keevisõmblust ümbritsev ala säilitab oma esialgsed mehaanilised omadused. Tardfaaskeevitusel ei vajata lisametaili ega kaitsegaase. Paljud tardfaaskeevitusprotsessidega valmistatud keevisõmblused on ühendatud detailide kogu ristlõikepinna ulatuses, erinedes nii enamikust sulakeevituse punkt- või joonõmblustest. Tardfaaskeevituse protsesse saab kasutada eri tüüpi materjalide ja metallide liitmiseks, kusjuures sellega ei kaasne nende materjalide erinevast soojuspaisumisest ja elektrijuhtivusest tekkivaid probleeme.

### 11.4.2. Tardfaaskeevitusprotsessid

#### Sepakeevitus

**Sepakeevitus** (*forge welding*) on keevitusprotsess, mille korral tekib liide ääsil või ahjus ettekuumutatud detailide pindade sepa poolt vasaralöökidega deformeermise tulemusena. Algselt hakkasid sepakeevitust kasutama relvasepad. Tänapäeval tööstuslikult ei kasutata.

#### Külmkeevitus

**Külmkeevitus** (*cold welding*) kuulub tardfaaskeevitusprotsesside rühma, mille puhul tekib liide toatemperatuuril suurte plastsete deformatsioonide tekitamisega ilma detaile kuumutamata. Liitepinnad puhastatakse lisanditest, viiakse kokkupuutesse ja rakendatakse suurt survejõudu. Vähemalt üks liidetavatest metallidest, eelistatult mõlemad, peavad olema väga plastsed ning oluliselt mitte kalestuma deformeermise käigus. Suurte survete ja deformatsioonistmete rakendamisel oksiidikelmed detailide pinnal purunevad ja liidetavad metallid deformeeruvad vastastikku plastselt.

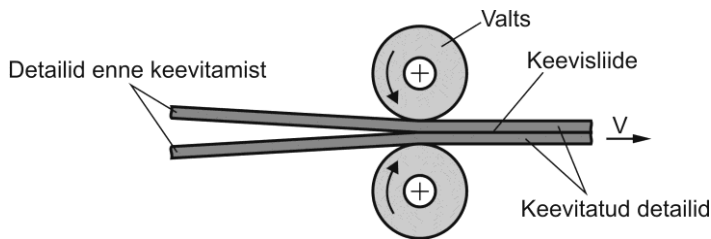


Kasutatakse plastsetest metallidest (Cu, Al, Ni, Au, Ag, Zn) väikesemõõtmeliste detailide paksusega 0,2...15 mm liitmiseks.

Eristatakse punkt- ja põkk-külmkeevitust. Punktkülmkeevitusel saadakse katteliide üksikutes punktides suuri kohtsurveid ( $150...1000 \text{ N/mm}^2$ ) rakendades. Katteliiteid kasutatakse alumiiniumist juhtmete või fooliumi ühendamiseks vasega elektrotehnikas ja aparaadiehituses. Külmsurvekeevituse näiteks on 1- või 2-eurone bimetalne münt, mis on saadud stantsis erinevast metallist toorikute deformeerimisel.

## Valtskeevitus

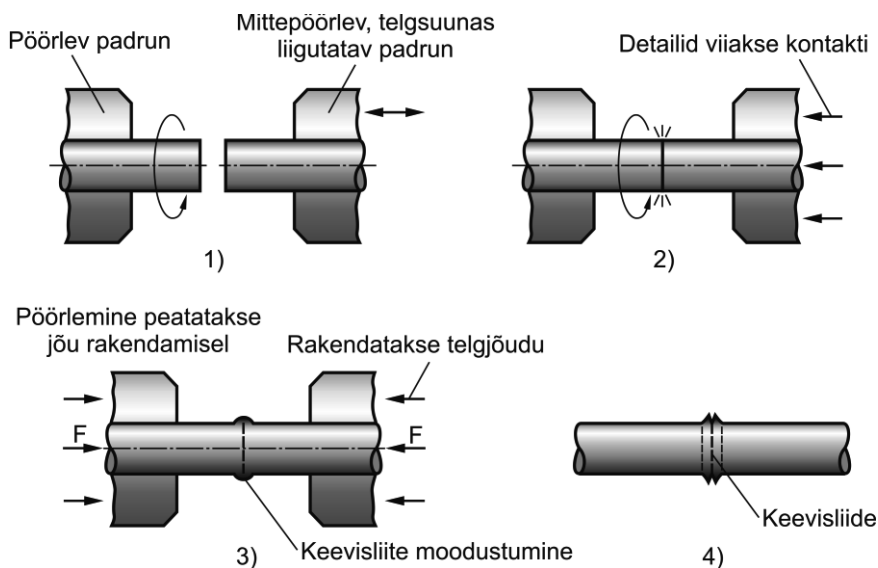
**Valtskeevitus** (*roll welding*) on tardfaaskeevituse protsess, mille puhul detailide liitumine toimub kettakujuliste valtside poolt rakendatud survejõu abil. Keevitada võib nii detaile kuumutamata (külmvaltskeevitus) kui kuumutades (kuumvaltskeevitus). Valtskeevitus on kombinatsioon sepa- ja külmkeevitusest, olenevalt sellest, kas enne keevitamist kuumutati detaile või mitte. Kasutatakse näiteks bimetalse lattmetalli roostevaba terase-süsinikterase tootmisel (vt Joonis 11.45).



Joonis 11.45. Valtskeevitus

## Hõõrdkeevitus

**Hõõrdkeevitus** (*friction welding*) on tardfaaskeevituse protsess, mille korral liide saadakse detailide kontaktpindade hõõrdumisel tekkiva soojuse ja järgneva kokkusurumise toimele (vt Joonis 11.46). Liugehõõrdumiseks kulunud mehaaniline töö muundub kontaktpindu kuumutavaks soojuseks. Liitpinnas olevad oksiidkihted purunevad ja surutakse plastse deformatsiooni abil radiaalsihis välja. Edasi surutakse liitepinnad kokku ja nende plastse deformatsiooni tulemusena tekib metallurgiline side pindade vahel. Olgugi et hõõrdkeevitust loetakse tardfaaskeevituseks, võib tekkida õhuke sulametalli kelme liidetavate detailide otspindades.



**Joonis 11.46.** Hõõrdkeevituse etapid: 1 – detailid lähteasendis; 2 – detailide viimine kontakti; 3 – telgjõu rakendamine; 4 – moodustunud keevisliide

Hõõrdesoojuse saamiseks kasutatakse enamikul juhtudel detailide pöörlemist, kuid harvem ühe detaili sirgjoonelist liikumist teise suhtes. Viimast varianti saab kasutada mittepöördekahakujuliste detailide liitmiseks ja keevitusprotsessi ise nimetatakse **lineaarhõõrdkeevituseks** (*linear friction welding*).

Pöördekahade liitmisel eristatakse kahte põhimõttelist lahendust ja hõõrdkeevituse protsessi:

- otsehõõrdkeevitus;
- inertshõõrdkeevitus.

**Otsehõõrdkeevitusel** (*continous-drive friction welding, direct-drive friction welding*) pöörleb üks detail püsiva kiirusega, teine on paigal ja liitepinnas tekib hõõrdesoojus. Kui on saavutatud vajalik temperatuur, pöörlemine pidurdatakse ja detailid surutakse kokku.

**Inertshõõrdkeevitusel** (*inertia friction welding*) on pöörlev detail ühendatud ühtlase kiirusega pöörleva hoorattaga. Seejärel lülitatakse välja hooratta ajam ja detailid surutakse omavahel kokku. Hoorattas salvestunud kineetiline energia muutub hõõrde-  
töök ja kuumutab liitepindu. Keevitustsükkel kestab ligikaudu 20 sekundit.

Hõõrdkeevitamisel tuleb arvestada asjaolu, et plastse deformatsiooni tulemusena väheneb detailide pikkus ja keevisõmbeluse piirkonnas tekib detailide jämendumine. Jämendusvöö eemaldatakse tavaliselt järgneva treipingis töötlemisega.

Hõõrdkeevituse seadmed meenutavad oma väliskujult treipinke. Tööstuses on enim levinud inertshõõrdkeevitus.

Hõõrdkeevitust kasutatakse metallidest, metallmaatrikskomposiitidest ja plastidest toorikute liitmiseks. Leiab laialdast kasutust auto-, kosmose-, põllutöömehhanika ja kaitsetööstuses jm hulgi- ja suurseriitootmises. Nii valmistatakse hammasratas-plokke, kardaanvõllisid, amortisaatoreid, mootoriklappe, hüdrocilindrite kolbe, pukse jt pöördekehasid. Elektrotehnikatööstus kasutab laialdaselt hõõrdkeevitust eri metallidest (alumiinium-vask) liidete saamiseks. Laevaehituses valmistatakse eri tüüpi terastest (roostevaba teras-süsinikteras) liiteid veepumpade ja jõuallikate tarbeks.

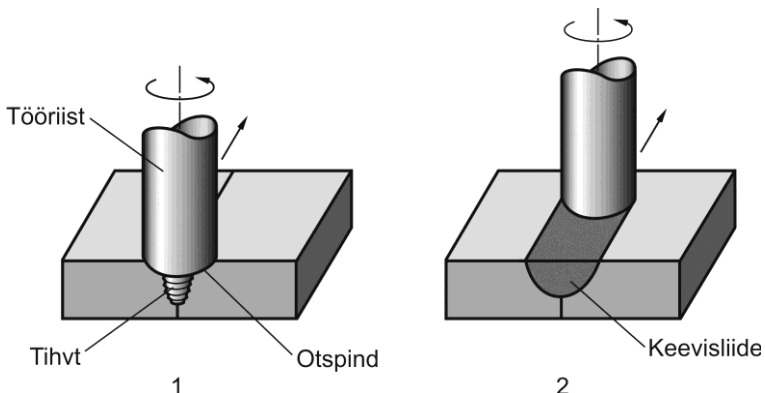
Hõõrdkeevituse eelised võrreldes kaar- ja kontaktkeevitusega on järgmised: puudub vajadus lisametalli ja kaitsegaasi järele, liite kitsas termomõjutsoon, hea tootlikkus ja liidete kvaliteet, võrreldes kontaktkeevitusega 5...10 korda väiksem energiakulu.

Hõõrdkeevituse puuduseks on: piirangud silindriliste detailide läbimõõdule (kuni 100 mm), kallid seadmed.

### Otshõõrdkeevitus

**Otshõõrdkeevitus** (*friction stir welding*) on mehaanilisel energial põhinev tardfaaskeevituse protsess materjali kuumutamiseks tööriista otspinna pöörlemisel tekkiva hõõrdesoojuse toimel ja järgneva ümberpaigutamisega. Otshõõrdkeevitus patenteeriti 1991. a Inglismaal.

Pöörleval tööriistal on astmeline silindriline osa ja väljaulatuv peenem silindriline või kooniline osa – tihvt. Liidetavad toorikud kinnitatakse jäigalt töölauale, tööriista otspind hõõrdub vastu pealispinda, tihvt pöörleb vahepinnas ja kuumutab seal nende servi temperatuurini kuni  $0,8 T_s$ , mille tulemusena metall läheb üle plastsesse olekusse. Tööriista esiserva all olev metall siirdub surve all tahapoole ja paigutub ümber.



**Joonis 11.47.** Otshõõrdkeevitus: 1 – toorikud lähteolekus; 2 – keevisõmbluse moodustumine

Otshõõrdkeevitust kasutatakse liidete saamiseks plastsete metallide (Al, Cu, Zn, Mg) vahel kui ka alumiinium-teras vahel. Kasutatakse alumiiniumist kergkonstruktsioonide (nt laevapaneelid) valmistamiseks. Tänapäeval kasutatakse laialdaselt USAs autotööstuses robotkeevitusena, kusjuures keevituskiirus võib tõusta kuni 2 m/min.

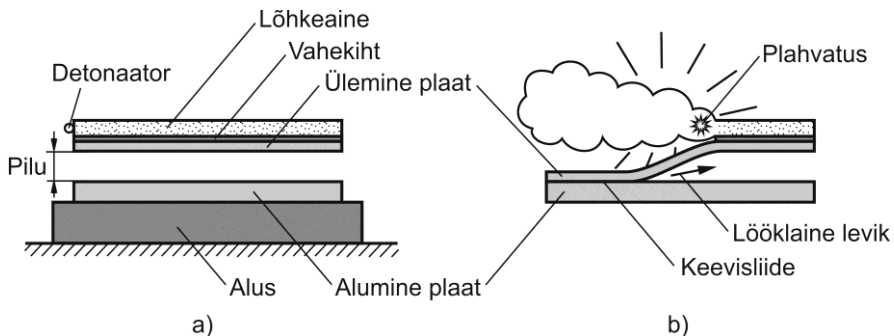
Otshõõrdkeevituse elised kaarkeevituse protsesside ees on järgmised: vähenevad valmistuskulud ja valmistusaeg (alumiiniumi keevitusel võrreldes MIG-keevitusega kuni 5 korda), puudub lisametalli ja kaitsegaasi vajadus, keevisliite hea kvaliteet ja mehaanilised omadused materjali kalestumise tõttu, keskkonda ei eraldu mürgiseid ühendeid.

Otshõõrdkeevituse puudused on: tööriista lühike püsivusaeg ja seadmete kõrge hind.

### Plahvatuskeevitus

**Plahvatuskeevitus** (*explosion welding*) on tardfaaskeevituse protsess, mille korral tekib liide plahvatusel toimel tekkinud plastse deformatsiooni tulemusel. Massiivsem põhidetail asetatakse alusele (Joonis 11.48), mille peale asetatakse väikese nurga all või rõhtselt teine detail. Liikuva detaili peale asetatakse lõhkeaine, mille madalamasse otsa kinnitatakse sütik. Lõhkeaine plahvatusel liigub lööklaine suure kiirusega piki ülemist detaili. Liitepinnas hakkab metall voolama, purunevad oksiidkihted ning liidetavate detailide pindade aatomid lähenevad ning tekib tugev metallurgiline side. Kuna liide tekib väga lühikese aja jooksul (mikrosekundid), siis ei jõua areneda difusiooniprotsessid detailide vahel. Lainekujuliselt deformeerunud metall liitepinnas suurendab liite tugevust.

Plahvatuskeevitust kasutatakse laialdaselt mitmekihiliste materjalide saamiseks. Näiteks terasest detailid pindalaga kuni 32 m<sup>2</sup> plakeeritakse alumiiniumiga jm. Plahvatuskeevitust kasutatakse sageli erinevatest metallidest torude ülekattega liitmiseks.

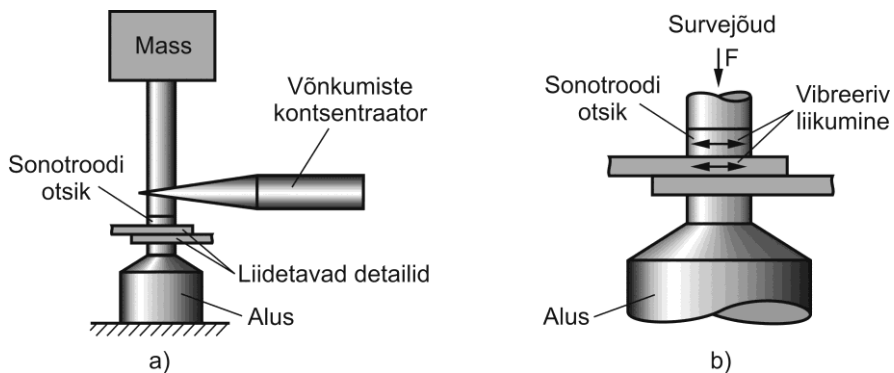


**Joonis 11.48.** Plahvatuskeevitus: a – detailid lähteolekus; b – keevitamise protsess

## Ultrahelikeevitus

**Ultrahelikeevitus** (*ultrasonic welding*) on tardfaaskeevituse protsess, mille puhul pealistikku asetsevad metallist detaile surutakse algselt kokku väikese kinnitava jõuga ja liitumine saadakse paralleelselt detailide pinnaga rakendatud ultrahelivõnkumiste tulemusena. Protsessi kirjeldus katteliite näitel on esitatud Joonisel 11.49. Sonotrood on seade piezoelektrilise muunduri abil võnkumiste amplituudiga 13...130  $\mu\text{m}$  ja sagedusega 15...75 KHz edastamiseks toorikutele. Ultrahelivõnkumiste tekitatud lokaalsed nihkepingsed purustavad oksiidikelmed liitepindades ja deformeerivad neid plastselt, mille tulemusena tekib tihe kontakt ja luuakse tugev metallurgiline side pindade vahel. Kontaktpinnas eraldub soojust detailidevahelise hõõrdumise ja plastse deformatsiooni tulemusena. Liitepindade temperatuur on suhteliselt madal, nt alumiiniumi keevitamisel kuni 350 °C. Tavaliselt on ultrahelivõnkumiste sagedus 15...75 kHz ja amplituud 0,018...0,13 mm. Rakendatav survejõud on tunduvalt väiksem kui külркеevitusel ja ei kutsu esile märkimisväärset liitepindade deformeerumist.

Ultrahelikeevitust kasutatakse põhiliselt Al ja Cu ning nende sulamite, harvem terase, kulla, hõbeda, haruldaste metallide ja nende kombinatsioonide liitmiseks. Keevitatava materjali paksus on alumiiniumi korral kuni 3 mm, kõvemate sulamite korral 0,4...1,0 mm. Kasutatakse pooljuhtide, päikesepaneelide elektrikontaktide, juhtmete, mähiste ja rootorite keevitamiseks auto-, aparaadi-, elektroonika- ja kosmose-tööstuses, aga ka lõhkeainete ja keemiareaktiivide kapseldamiseks tingimustes, kus ei tohi kasutada kõrget temperatuuri või elektrivoolu. Laialdaselt levinud termo-plastidest kilede liitmisel (vt p. 11.5. Plastide keevitus).



**Joonis 11.49.** Ultrahelikeevituse etapid: a – detailid lähteolukorras; b – keevitusprotsess

## Difusioonkeevitus

**Difusioonkeevitus** (*diffusion welding*) on tardfaaskeevituse protsess, mille puhul liide tekib kõrgel temperatuuril liidetavate metallide kontaktpindade aatomite vastastikuse

difusiooni ja surve rakendamise tulemusena. Ei esine liidetavate detailide makrodeformatsioone. Detailide liitepinnad lihvitakse ja asetatakse üksteise peale. Rakendatakse survejõudu ( $1 \dots 20 \text{ N/mm}^2$ ) ja kuumutust vahemikus  $0,5 \dots 0,7 T_s$ . Protsess toimub üldiselt vaakumis, harvem kaitsegaasikeskkonnas. Liitepindade vahele võidakse asetada lisametalli kiht fooliumi kujul paksusega alla  $0,3 \text{ mm}$ .

Difusioonkeevitus võimaldab saada defektideta liiteid ja seetõttu kasutatakse lennuki-ehituses ja kosmosetööstuses alumiiniumi, titaani, nikli, metallmaatrikskomposiitide ja kuumustugevate teraste liitmiseks. Samuti kasutatakse difusioonkeevitust klaasi liitmiseks optikatööstuses ja kõvasulamite ning kermiste liitmiseks stantside valmistamisel, keraamika liitmiseks terasega, volframi liitmiseks vasega jm.

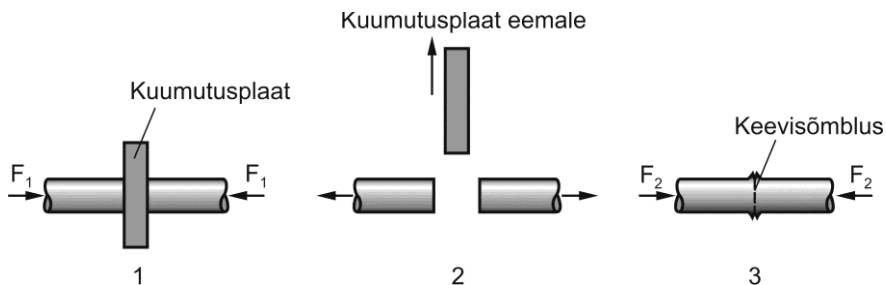
Difusioonkeevituse laialdasemat kasutamist piirab pikk keevitustsükkel, mis on seotud ajakuluga vaakumi tekitamiseks töökambris, originaalseadmete kõrge hind ja vähene tootlikkus.

## 11.5. PLASTIDE KEEVITUS

Termoplastide liitmiseks kasutatakse sulakeevitust, kus liitepindu kuumutatakse pehmesse või sulasse olekusse ja rakendatakse survet, mille toime toimub materjali voolamine ja arenevad difusiooniprotsessid. Tulemusena tekib tugev molekulaarne side. Kuna termoplastid pehmenevad ja sulavad tunduvalt madalamatel temperatuuridel kui metallid, on ka aktiveerimiseks vajalik soojuse vajadus väiksem. Aktiveerimisenergia võidakse saada mehaanilise hõõrdumise või detailide vastastikuse liikumise tulemusel (ultrahelikeevitus, hõõrdkeevitus) või siis välist soojusallikat kasutades.

**Kuumplaatkeevitus** (*hot plate welding*) on levinuim plastide keevitusprotsess. Liidetavad detailid kinnitatakse keevitusseadme liikuvate plaatide külge, liitepindade vahele asetatakse üleskuumutatud ja toote kujule vastav kuumutusplaat, mis on enamasti materjali külgekleepumise vastu kaetud fluororgaanilise polümeeriga. Detaile surutakse vastava ajamiga kergelt vastu kuumutusplaati, rakendatakse kerget survet plaatidele kuni plasti sulamistemperatuurini ja sulamaterjali kelme tekkimiseni. Seejärel kuumutusplaat eemaldatakse detailide vahelt ning detailid surutakse kokku ning lastakse surve all jahtuda (Joonis 11.50). Tavaliselt kuumutatakse plaati temperatuurini kuni  $260 \text{ }^\circ\text{C}$ , keevitusaeg on piirides 10 sekundist kuni 60 minutini.

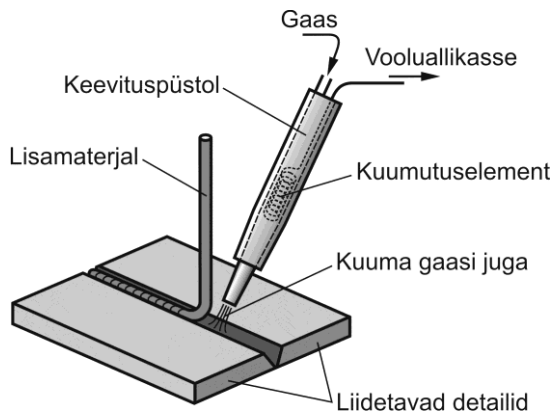
Kasutatakse laialdaselt plastist vee- ja gaasitorude liitmiseks.



**Joonis 11.50.** Kuumplaatkeevituse etapid: 1 – servade kuumutamine, 2 – kuumutusplaadi eemaldamine, 3 – detailide kokkusurumine

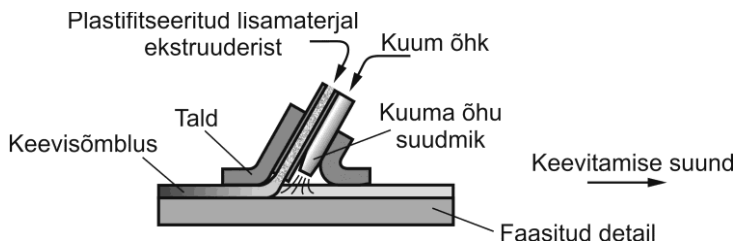
**Kuumgaaskeevitus** (*hot-gas welding*) on lihtsaim termoplastide keevitusviis välise soojusallika kasutamisega.

Detailide servad faasitakse V-kujuliselt. Erilise kujuga keevituspüstoli suudmikust juhitakse detailide servadele kuuma (200...400 °C) õhu või inertgaasi juga, mis pehmendab nii detailide servad kui ka lisamaterjali varda või lindi, mis surutakse detailidevahelisse pilusse (Joonis 11.51). Liitmisprotsessi kiirus on väike ja oleneb suurel määral operaatori oskustest, mistõttu kasutatakse harva tootmisprotsessis, kuid sagedamini toodete remontimisel. Kasutatakse põkkliidete ja katteliidete valmistamiseks.



**Joonis 11.51.** Kuumgaaskeevitus

**Ekstrusioonkeevitus** (*extrusion welding*) on sarnane kuumgaaskeevitusega, mille puhul liite servi kuumutatakse kuuma õhu joaga ja servavahemikku surutakse ekstruuderist kuum lisamaterjal (vt p 14.2.1. Plasttoodete vormimine). Seejärel rakendatakse õmbluse pinnale survet keevituspea külge kinnitatud tallaga või rullidega (Joonis 11.52). Keevitatakse pikemaid õmblusi, soovitatavalt plasttoorikuid paksusega üle 6 mm.



**Joonis 11.52.** Ekstrusioonkeevitus

**Infrapunakiirguskeevitus** (*infrared radiation welding*) on kontaktivaba, kuumplaatkeevituse edasiarendus. Materjali kuumutamiseks kasutatakse infrapunakiirguslampe, mille kiirgus neeldub plasttoorikutes ja kuumutab nende servad. Selle järel rakendatakse liidetavatele toorikutele survejõudu.

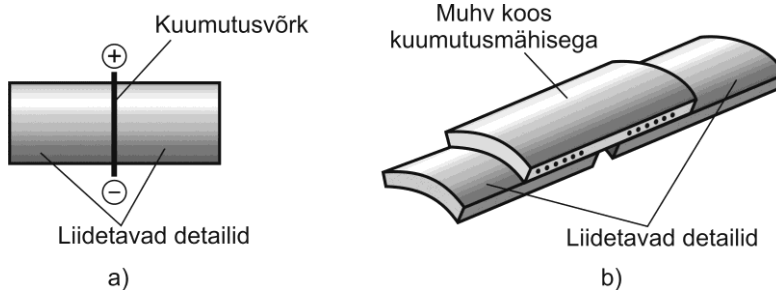
**Ultrahelikeevitus** (*ultrasonic welding*) on sarnane metallide ultrahelikeevitusega, kuid erinevuseks on ultrahelivõnkumiste suunamine risti liitepindadega. Ultrahelivõnkumiste sagedus on 15...40 kHz ja amplituud 10...100 µm, kestus 0,5...1,5 s. Iseloomulik on suur keevituskiirus ja liidete hea kvaliteet, protsessi hea automatiseeritavus. Kuna seadmed on kallid, sobib suurte tootmismahude korral ja tavaliselt väikesemõõtmeliste komponentide või kilede liitmiseks. Valmistatakse katteliiteid.

**Hõõrdkeevitus** (*friction welding*) on sarnane metallide hõõrdkeevitusega ja seda kasutatakse peaaegu kõikide termoplasttoorikute liitmiseks.

**Laserikiirkeevitus** (*laser welding*) on sarnane metallide laserikiirkeevitusega (vt p 11.3.3). Saab keevitada kuni 10 mm paksust plasttoorikut. Kuna liitmisprotsess on kontaktivaba ja puhas, on see perspektiivne hügieeni seisukohalt, nt meditsiiniseadmete valmistamisel ja toiduainetetööstuses pakendamisel, samuti mikroelektronikatööstuses.

**Implantaatkeevitus** (*implant welding, electrofusion welding*) on põhimõtteliselt kuumplaatkeevituse protsessi edasiarendus, kus liidetavate detailide vahele asetatakse üleskuumutatatud metallplaat või -võrk, mis jääb liite sisse. Torude liitmisel asetatakse liidetavate torude otstele kuumutusmähisega muhv (Joonis 11.53). Implantaat kuumutab kõrvalasuvat termoplasttoru ja sulatab selle otsad, mille järel rakendatakse survejõudu ja implantaat jääb liitesse. Levinud laialdaselt gaasi- ja veetorustike valmistamisel muhvikujulise implantaadi kasutamisega.





**Joonis 11.53.** Implantaatkeevitus: a – takistustraadist võrguga; b – takistuskuumutatava muhviga

## 11.6. JOOTMINE

### 11.6.1. Olemus ja iseärasused

Sageli ei ole võimalik või otstarbekas kasutada liitetehnoloogiana keevitamist ja alternatiivsed liitetehnoloogiad, sh jootmine, võivad olla tehniliselt ja majanduslikult eelistatumad.

**Jootmine** (*soldering, brazing*) on püsiliidete valmistamise protsesside üldnimetus, mille puhul sulatatakse lisametall ja liidetavate toorikute vaheline pilu täidetakse sulametalliga ilma liidetavaid materjale sulatamata. Pilu täitvat metallisulamit, mis on võimeline liidetavaid materjale märgama ning pärast tardumist moodustama jooteliite, nimetatakse **joodiseks** (*solder, brazing filler metal*). Saadud jootmise tulemit – jootekohta, nimetatakse **jooteks** ehk **jooteoõmbluseks** (*soldered seam, brazed seam*), toodet **jootekoostuks** (*brazement, brazed assembly*). Oma olemuselt on jootmine sulakeevituse ja tardfaaskeevituse vahepealne protsess.

Eristatakse kõvajoodisjootmist ja pehmejoodisjootmist.

Joodise sulamistemperatuuri järgi eristatakse:

- 1) **pehmejoodisjootmist** (*soldering*), mille puhul jooteliide saadakse kasutades joodiseid sulamistemperatuuriga  $< 450\text{ °C}$  (Pb, Sn, Zn baasil pehmejoodised tõmbetugevusega  $50 \dots 100\text{ N/mm}^2$ );
- 2) **kõvajoodisjootmist** (*brazing*), mille puhul kasutatakse joodiseid sulamistemperatuuriga  $> 450\text{ °C}$  (Cu, Ag, Ni, Al baasil kõvajoodised tõmbetugevusega kuni  $700\text{ N/mm}^2$ , näiteks Cu-Zn-, Ag-Cu-Zn-, Cu-Zn-Ni-Cu-P-joodiseid (vt Tabel 11.4)).

Jootmise põhitingimused on:

- a) liitepindade **märgumine** (*wetting*) joodisega;
- b) joodise voolamine jootepilusse kapillaarjõudude toimele;
- c) joodise **laialivalgumine** (*spreading*) liitepindadel.

Liitepindade märgumine oleneb valitud lisametallist ja liitepindade puhtusest. Oksiidikelmed, õli jm lisandid halvendavad liitepindade märgumist, mistõttu tuleb neid eelnevalt puhastada ja kaitsta jootmisprotsessi käigus oksüdeerimise eest. Liitepinna märgumist joodisega saab parandada jooteräbustite kasutamisega, pindade eelneva metallitamisega, jootmisega vaakumis.

Jootepindade puhastamiseks kasutatakse keemilist töötlemist, näiteks lahustiga puhastamist või mehaanilisi meetodeid nagu liivajugatöötlust ja harjamist. Sageli kasutatakse räbusteid pindade puhastamiseks ja puhtana hoidmiseks, tagamaks seeläbi liitepindade märgumise joodisega.

Kapillaarjõudude toimele liigub jootepilu kõrval sulatatud vedel lisametall jootepilusse. Teoreetiliselt saab näidata, et jootepilu täitub lisametalliga seda paremini, mida suurem on joodise pindpinevus ja väiksem jootepilu. Laialivalgumine oleneb joodise viskoossusest, jooteliite geomeetriast ja liitepindade märguvusest joodisega.

Pehmejoodisjootmist kasutatakse juhtudel, kui jooteliide ei allu märgatavatele mehaanilistele koormustele ja töötab madalatel temperatuuridel, nt elektroonikakomponendid ja elektrotehnikaseadmed. Kõvajoodisjootmist kasutatakse juhtudel, kui on nõutav liite töövõime suhteliselt kõrgetel temperatuuridel ja/või kui jooteliitele mõjuvad suured mehaanilised koormused (nt lennukiturbiinid, konstruktsioonidetailid, lõikeriistad jm). Eesti keele praktikas tavaliselt ei eristata mõlemat jootmisviisi, vaid kasutatakse üldnimetust jootmine.

Jootmise kui liitemetodi eelised võrreldes keevitamisega:

- 1) praktiliselt kõik tehnomaterjalid (metallid, klaas, keraamika, komposiidid), samuti muud erinevad materjalid on sobiva joodise ja räbusti valimisel liidetavad; saab liita halva keevitavusega materjale;
- 2) teatud jootmismeetodid võimaldavad lühikest tsükliaga ja seega suurt tootlikkust;
- 3) mõned jootmismeetodid võimaldavad samaaegselt saada palju liiteid, järelikult sobivad hulgitootmiseks;
- 4) saab liita õhukesi toorikuid, mida ei ole võimalik keevitada;
- 5) vajatakse vähem soojust kui sulakeevitusel, mistõttu kaasnevad väiksemad kujumuundused;
- 6) termomõjutsooniga seotud probleemid on keevitamisega võrreldes väiksemad. Seega saab kasutada juhtudel, kui kõrge temperatuur kahjustab põhimaterjali.

Jootmise kui liitemetodi puudused ja kasutamise piirangud:

- 1) jooteliite tugevus on üldjuhul väiksem keevisliite omast;
- 2) isegi kui kvaliteetse jooteliite tugevus on suurem kui joodise tugevus, jääb see üldjuhul alla põhimetalli omale;
- 3) jooteliidete temperatuuritundlikkus, kasutamine kõrgendatud temperatuuridel võib põhjustada liite tugevuse vähenemist või isegi jootesulamist; elektroo-

nikakomponentide pehmejoodisjootmisel võimaldab see asjaolu just komponentide eemaldamist ja defektsete komponentide väljavahetamist.

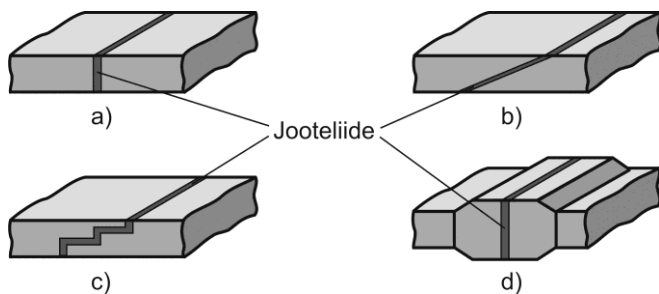
- 4) joodise ja joote koostis erinevad liidetavate põhimaterjalide koostisest, mistõttu on korrosiooni risk galvaanilise paari tekkimise tõttu kasutamisel agressiivsetes keskkondades.

Jootmist kasutatakse erinevates tööstusharudes, nt autotööstuses torustike kui ka erinevatest metallidest kereosade liitmisel, elektrotehnika- ja elektroonikatööstuses (juhtmed ja kaablid), lõikeriistade valmistamisel (karbiidkermistest lõikeplaatide kinnitamisel tera pideme külge), juveelitööstuses, keemiatööstuse ja soojustehnika seadmetes (torud, torustikud ja soojusvahetid) jm. Jootmisprotsesside kasutamine laieneb lennukite reaktiivmootorites kasutatavate uute keraamiliste materjalide kasutuselevõttuga, samuti kosmosetööstuses, tuumaenergeetikas jm. Jootmist kasutatakse kõigis tööstusharudes seadmete remondil ja hooldustöödel.

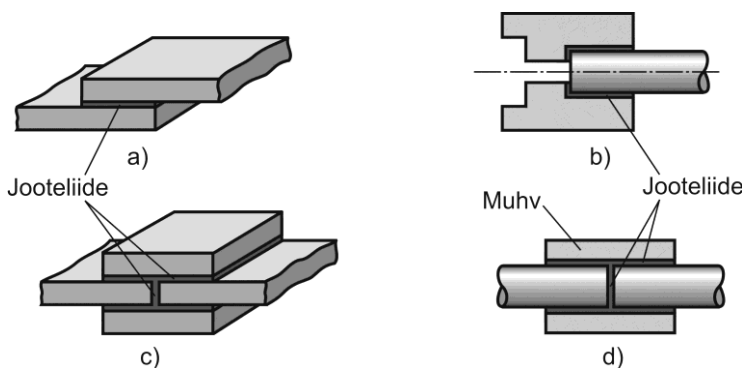
### **11.6.2. Jooteliited**

Kõvajoodisjootmisega valmistatavate jooteliidete kavandamisel tuleb arvestada liite mehaanilise tugevuse nõudega. Seetõttu on vajalik liite korrektne kavandamine. Jooteliite kandevõime tagatakse tavaliselt sobiva jootepilu ja liitepinna suurusega. Tugevusarvutustes võetakse pingete määramisel aluseks liitepinna suurus ja järelikult liitepinna pindala suurenedes vähenevad pinged jooteliites.

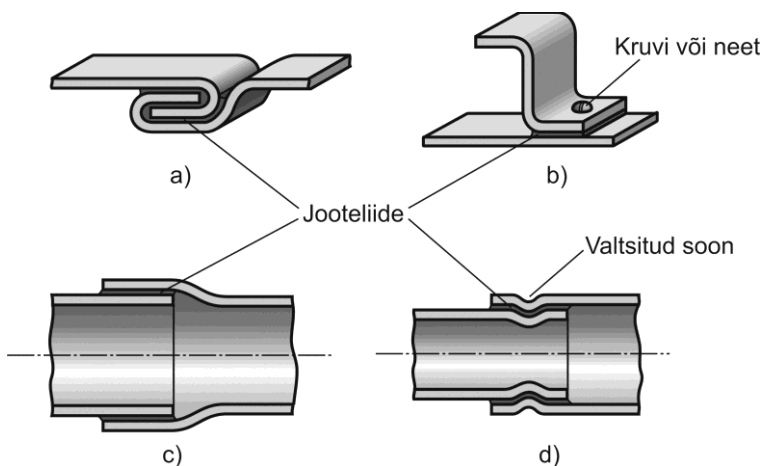
Kasutatavamad jooteliited on põkkliide ja katteliide. Mõlemad on kohandatud jootmisprotsessile mitmel erineval moel. Liitepinna suurendamiseks põkkliites on sageli ühendatavad pinnad töödeldud kas kaldu või astmeliselt (Joonis 11.54). Eelistatult kasutatakse katteliidet, kuna see võimaldab suurendada liitepinda ja nii vähendada pingeid liites. Ülekatte suurus on tavaliselt kolmekordne õhema detaili paksus. Mõned katteliidete näited on esitatud Joonisel 11.55. Katteliidete eeliseks jootmisel võrreldes keevitamisega on see, et lisametall seob detailid terve kontaktpinna ulatuses, mitte ainult mööda õmbluse külgpindu. Pehmejoodisliidete tugevust saab suurendada nende mehhaanilise lukustamisega enne jootmist (Joonis 11.56) erinevate meetoditega. Kui kasutatakse pehmejoodiseid, siis on üldiselt ülesandeks liite hea elektrijuhtivuse või hermeetilisuse saavutamine. Seetõttu ei kasutata põkkliideid, vaid katteliideid ja painutatud detailidega otsliideid.



**Joonis 11.54.** Joodetud pötkliited: a – ristservadega; b – kaldservadega; c – astmeline; d – suurendatud ristlõikega

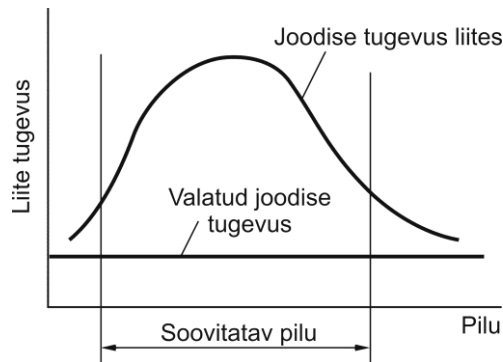


**Joonis 11.55.** Joodetud katteliited: a – tavaliide; b – silindriliste osade liide; c – mitmekihiline liide; d – torude muhviga liide



**Joonis 11.56.** Lukustusega pehmejoodisliited: a – valtsimisega (enne jootmist); b – kruvi või neediga; c – toru jämendamisega; d – soone valtsimisega

Jooteliite tugevus oleneb pilust detailide vahel ehk **jootepilust** (*hot joint clearance*) (Joonis 11.57), mis seab täpsemad nõuded detailide koostamisele. Pilu peab olema piisavalt suur, et ta ei takistaks sula lisametalli voolamist pilusse. Kui pilu on liiga suur, siis väheneb kapillaarmõju ja detailide vahel võib olla lisametalliga katmata alasid. Liite maksimaalse tugevuse saavutamiseks tuleb kasutada optimaalse suurusega jootepilu tagamaks joodise suurema tugevuse liites valatud joodise tugevusega võrreldes (vt Joonis 11.57). Pilu suurus oleneb kasutatavast joodisest ja on suurem vaskjoodiste korral (0,5...0,7 mm) ja väiksem hõbejoodiste korral (0,025...0,05 mm). Jootepilu suurus määratakse jootetemperatuuril.



**Joonis 11.57.** Jootepilu mõju liite tugevusele

### 11.6.3. Joodised ja jooteräbustid

**Pehmejoodis** (*solder, soldering filler metal*) on joodis sulamistemperatuuriga alla 450 °C. Tuntumad on tina- ja pliisulamid, mis on täiendavalt legeeritud antimoniga. Alumiiniumisulameid joodetakse Sn-Zn-, Cd-Zn- või Al-Si-Zn-joodistega. In-Sn-joodiseid kasutatakse metallide liitmiseks klaasiga jne.

**Kõvajoodis** (*brazing filler metal*) on joodis sulamistemperatuuriga üle 450 °C; neid toodetakse sulamistemperatuuriga 580...1240 °C. Tuntuimad on Cu, Ag ja Al baasil kõvajoodised, kuid erijuhtudel kasutatakse samuti Pd, Au, Ni, Co jt metallide baasil joodiseid (vt Tabel 11.4). Vaskjoodised leiavad laialdast kasutust malmi, kõvasulamite, kermiste ja vase jootmisel odavuse ja liidete küllaltki heade tugevusomaduste tõttu. Vaskdetailide ja -torude jootmisel kasutatakse sageli Cu-P-joodist, mis kuulub **iseräbustuvate joodiste** (*self-fluxing filler metals*) hulka, kus fosfor taandab metallioksiide ja parandab põhimetalli märgumist. Puhtal vasel on kõrge sulamistemperatuur ja seda kasutatakse sageli lõikeriistade valmistamisel WC-Co kõvasulamist terikuplaatide kinnitamiseks. Vasesulamid (Cu-Ni-Ti-, Cu-Ni- ja Cu-Zn-sulamid) on madalama sulamistemperatuuriga. Pikaajaliseks tööks kõrgetel temperatuuridel (kuni 980 °C), aga ka korrodeeruvates keskkondades leiavad kasu-

tamist niklipõhised joodised, näiteks Ni-Cr-Fe-Si-B- ja Ni-P-sulamid jt. Hõbejoodiseid (Ag-Cu-Ti-, Ag-Ti-, ja Ag-Cu-Zn-sulamid) kasutatakse titaani, keraamika, kõrglegeerteraste jootmisel. Hõbejoodised on kallid, kuid tagavad liite head mehaanilised omadused. Kuumustugevate teraste, supersulamite ja keraamika jootmiseks võidakse kasutada kullasulamid (Au-Ni- või Au-Pd-sulamid), nt lennukiturbiinide valmistamiseks ja remondiks. Kulumiskindlate kermiste liitmiseks terasega võidakse kasutada veel Ag-Cu-Zn-, Ag-Cu-Zn-Cd-, Cu-Ni- või Cu-Zn-Ni-joodiseid kui ka keerukama koostisega kõvajoodiseid. Vastutusrikaste toodete ja erinevat tüüpi metallide jootmiseks kasutatakse **amorfseid joodiseid** (*amorphous filler metals*), mis on saadud sulast olekust ülikiire jahutamisega.

**Tabel 11.4.** Enim levinud kõvajoodised ja nende kasutusala

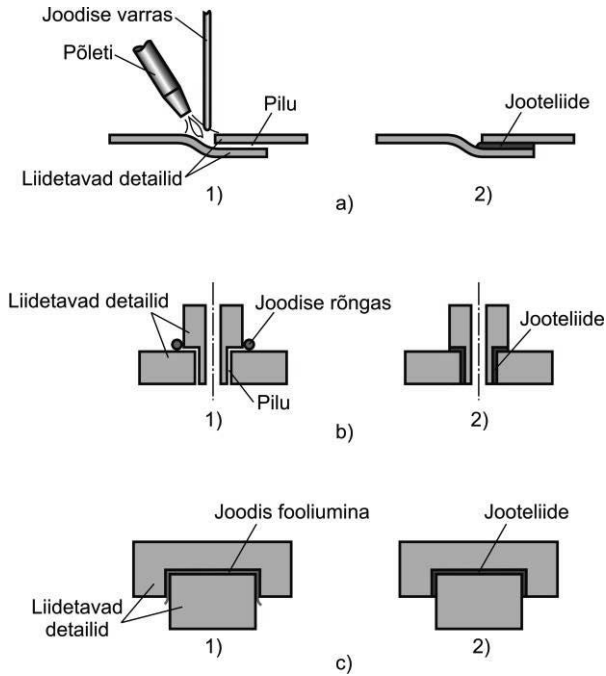
Joodise rühm	Joodetavad metallid	Jootmistemperatuur, °C
Al-Si-sulamid	Al ja Al-sulamid	563...620
Cu ja Cu-sulamid	Rauasulamid, Cu ja Cu-sulamid ja Ni-sulamid, roostevaba teras	925...1150
Cu-P-sulamid (iseräbustuvad)	Cu ja Cu-sulamid	700...925
Ag-sulamid	Kõik metallid, v.a Al ja Mg	620...980
Au-sulamid	Rauasulamid, Ni- ja Co-sulamid	900...1100
Ni-sulamid	Roostevaba teras, Ni- ja Co-sulamid	925...1200

Jootmistehnoloogia kasutamisel on tähtsal kohal sobiva joodise valik, kusjuures tuleb arvestada järgmiste teguritega: a) joodise **ühilduvus** (*compatibility*) põhimaterjalidega, mis tähendab vedelfaasi madalat pinnaenergiat (pindpinevust) ja head põhimaterjali märgamist; b) jootetemperatuuri ja liidetavate materjalidega seotud piirangud; c) toote kasutustemperatuuri piirangud; d) jooteliite kavandamisega seotud piirangud; e) nõutavad mehaanilised või füüsilised omadused, nt elektrijuhtivus, soojusjuhtivus.

Jootmisel kasutatakse joodiseid erineval kujul: traadi, varda, fooliumi ja pastana. Kasutamise näited on esitatud Joonisel 11.58. Sageli kasutatakse valmisjoodiseid, mis võivad olla eelnevalt välja stantsitud fooliumist ja mis asetatakse detailide vahele (vt Joonis 11.58 c).

Harvemini tekib joodis liidetavate detailide vahele asetatud või kantud vahekihi sulamisel, millega kaasneb madalama sulamistemperatuuriga eutekkoostisega joodise moodustumine. Näiteks on alumiiniumi jootmine, kus detailide pinnale kantakse eelnevalt erinevate meetoditega Cu või Ag kiht, milles Al lahustumisel kuumutamisel tekib joodise ülesandeid täitev eutekkoostisega sulam (vastavalt Al-Cu- või Al-Ag-sulam). Protsessi nimetatakse kontaktreaktiivjootmiseks. Joodis võib samuti tekkida reaktiivräbusti lagunemisel, nt alumiiniumi jootmisel kasutatav räbusti sisaldab tsinkloriidi, mis kuumutamisel temperatuurini 400 °C tõrjub sulast räbust

välja tsingi, mis märgab detailide pinda katvat oksiidikelmet ja sellest läbi tungides toimib joodisena.



**Joonis 11.58.** Erineval kujul joodiste kasutamine: 1 – enne jootmist, 2 – pärast jootmist: a – vardana ja gaaspõletiga; b – toorikute kõrvale asetatud joodisena rõnga kujul; c – fooliumina toorikute vahel

**Jooteräbusti** (*soldering flux, brazing flux*) on materjal, mis väldib jootmisel liitepindade oksüdeerumist ja/või eemaldab oksiidide ja teiste ebasoovitavate ühendite kelme liite pindadelt. Jooteräbustitena kasutatakse peamiselt **kampolrähusteid** (*rosin base fluxes*) ja tsinkkloriidi. Kõvajoodisjootmisel kasutatakse sageli **booraksit** (*borax*) ja teisi boori ühendeid. Pärast jootmisprotsessi tuleb rähusti jäägid toodetelt eemaldada. Vastasel korral võivad nad esile kutsuda toote korrosiooni. Alternatiiviks rähusti kasutamisele on jootmine kas vaakumis või taandava gaasi keskkonnas.

Jootmistehnoloogia sobivust selle materjali liitmiseks hinnatakse tema tehnoloogilise omaduse – **joodetavusega** (*solderability, brazeability*). Arvesse võetakse järgmisi tegureid nagu kasutatav kuumutusviis, põhimaterjali keemiline koostis, nõuded liitepinna puhtusele ja vajadus jooteliite järelpuhastamise järgi, joodise keemiline koostis, liitepinna kaitsmise moodus oksüdeerimise eest, jootmistemperatuur ja -aeg, jooteliite tüüp ja kavandamine (liite geomeetria, jootepilu suurus, jootmisasend).

#### 11.6.4. Jootmismeetodid

Jootmismeetodite liigitamise aluseks on tavaliselt kasutatav soojusallikas.

**Gaasjootmisel** ehk **gaasipõletiga jootmisel** (*torch soldering, flame soldering, torch brazing, flame brazing*) toimub kuumutamine gaasileegi abil nagu gaaskeevitamiselgi. Liidetavate detailide peale asetatakse jooteräbusti, hapniku-põlevgaasi leegiga kuumutatakse detailid jootetemperatuurini, mille järel lisatakse gaasileeki lisametalli traadi või varda kujul (vt Joonis 11.58 a). Keevitaja käsitseb gaasipõletit analoogselt gaaskeevitusega ja kasutab taandavat leeki (vt p 11.3.2. Gaaskeevitus). Kasutatakse põhiliselt remonttöodel. Meetodit on võimalik mehhaniseerida, juhtides koostatud detailid ühe või mitme gaasipõleti alt läbi. Gaasjootmisel kasutatakse peamiselt jootepõleteid, harvem vedelkütusel töötavaid jootelampe. Gaasjootmist kasutatakse nii pehme- kui kõvajoodisjootmisel. Meetodi eelised on kasutatava seadmeistiku (põletid) universaalsus ja odavus, protsessi mehhaniseerimise ja automatiseerimise võimalus. Puuduseks on räbustijääkide eemaldamise vajadus.

**Ahijootmine** (*furnace soldering, furnace brazing*) on seeriatootmise meetod, kus joodetavad tooted ja joodis kuumutatakse ahjus. Eelnevalt koostatud detailid koos kohaleasetatud joodisega laaditakse partiina ahju, kuumutatakse ahjus jootetemperatuurini ja jahutatakse. Jootmise käigus kontrollitakse ahju keskkonda, mis peab olema kas neutraalne või taandav. Teatud juhtudel kasutatakse vaakumahje. Olenevalt ahju keskkonnast on võimalik välistada räbusti kasutamist. Hulgitootmise tingimustes kasutatakse pidevtoimeahje. Ahijootmist kasutatakse nii pehme- kui kõvajoodisjootmisel. Ahijootmise eelised on suur tootlikkus (paljude toodete jootmine ahjus), protsessi parameetrite (temperatuur, kestus, kuumutus- ja jahutuskiirus, kaitsekeskkonna koostis) kontrollitavus ja korratavus. Enamasti puudub vajadus räbustite ja jooteliite räbustijääkidest puhastamise järgi. Väheneb kõverdumiste oht toodete ühtlase kuumenemise tõttu. Meetodi puuduseks on suured kulutused seadmetele, kaitsekeskkonna moodustamiseks ning suurenenud energiakulu vajaduse tõttu kuumutada tooteid tervikuna.

**Kontaktjootmine** ehk **takistusjootmine** (*resistance soldering, resistance brazing*) on meetod, mille puhul ühendatavad tooted kuumutatakse neid läbiva elektrivooluga. Liitepindadele kantakse eelnevalt räbusti ja joodise kiht või asetatakse joodis fooliumina liidetepindade vahele. Kasutatakse voolujuhtivate, suhteliselt väikeste ja lihtsa kujuga toodete liitmiseks. Meetodi eelised on suur kuumutuskiirus, vähene liitepindade oksüdeerumine, suhteliselt lihtsate ja odavate seadmete kasutamine. Seadmed on sageli sarnased kontaktkeevitusel kasutatavate seadmetega.

**Sukeldusjootmine** (*dip soldering, dip brazing*) on jootmine kuumutamiseega sulajoodise vannis (nii pehme- kui ka kõvajoodisjootmisel), sulasoolavannis, mis võib täita samuti räbusti ülesannet (kõvajoodisjootmisel), või õlivannis (pehmejoodis-



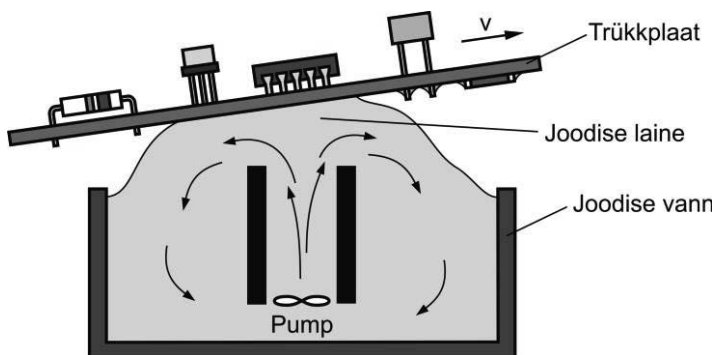
jootmisel). Meetodit iseloomustab suur kuumutuskiirus ja võimalus joota samaaegselt kas ühte või mitut toodet.

**Infrapunajootmine** (*infrared soldering, infrared brazing*) on jootmismeetod, kus kuumutamiseks kasutatakse infrapunalampe võimsusega kuni 5000 W, mille kiirus suunatakse ja fokuseeritakse liitepindadele. Meetod on aeglane ja kasutatakse nii pehme- kui ka kõvajoodisjootmisel õhukeste metalltoorikute korral.

**Jootkeevitus** (*brazing*) erineb ülejäänud jootmismeetoditest kasutatava liite tüübi poolest. Põkkõmbluse servavahemik täidetakse analoogselt kaar- või gaaskeevitusega (vt p 11.3. Sulakeevitus) sulajoodisega kapillaarmõju kasutamata. Jootõmblus koosneb ainult lisametallist, seejuures põhimetalli sulamist ei toimu. Saab kohandada gaaskeevituse, MIG-, TIG- või laserkeevitusprotsessi. Leiab kasutamist õhukese lehtmetaili liitmisel. Liitepindadele võidakse eelnevalt kanda **tinatamisega** (*tinning*) õhuke vahekiht ehk puhverkiht, saavutades nii liitepindade hea märguvuse joodisega. Jootkeevitust kasutatakse tsingitud plekist toorikute liitmisel MAG-keevitusseadmetega ja valudefektide parandamisel gaasjootmisena.

**Jooteljootmisel** (*iron soldering*) kuumutatakse pehmejoodist ja jooteliidet **jootli** ehk **jootetõlviku** (*soldering iron*) abil. Jootli kuumutuspeind on tavaliselt valmistatud hea soojusjuhtivusega vasesulamist.

**Lainejootmine** (*wave soldering*) ja **lohistusjootmine** (*drag soldering*) on pehmejoodistega sukeldusjootmise alaliikideks pehmejoodiste kasutamiseks. Trükkplaatide valmistamisel asetatakse plaadi avadesse komponendid, trükkplaat kinnitatakse konveierisse nii, et elektroonikakomponentide juhtmeviigud ulatuvad läbi plaadi ja asetsevad allpool. Trükkplaadid liiguvad konveieri abil läbi vedela joodise lainest (Joonis 11.59). Sukeldusjootmisega võrreldes on lainejootmise eeliseks võimalus joota mistahes mõõtmetega trükkplaate.



**Joonis 11.59.** Lainejootmise põhimõte

**Kondensatsioonjootmine** (*vapor-phase reflow soldering, condensation soldering*) on pehmejootmismeetod küllastunud auru keskkonnas joodetavate toodete ja joodise kuumutamise ja kondenseerumisel eralduva aurustussoojuse toimetel. Aur kondenseerub trükkplaadi peal, kuumutab seda ja sulatab pehmejoodise ning aitab moodustada jooteliiteid. Aurustuva vedelikuna kasutatakse madala aurustumistemperatuuriga, joodetavate toodete suhtes keemiliselt inertseid ja mittemürgiseid vedelikke. Meetodi eelis on pindade ühtlane kuumutamine, mistõttu jootmise tulemus ei olene toodete kujust, suur tootlikkus (üheaegselt joodetakse palju detaile), protsessi parameetrite (temperatuur, gaasikeskkonna koostis) kontrollimise täpsus.

## 11.7. LIIMIMINE

### 11.7.1. Liimimise olemus

**Liimimine** ehk **adhesiivliitmine** (*adhesive bonding, glueing*) on materjalide liitmisprotsesside rühm, mille korral mittemetallne liim ehk adhesiiv kantakse vedelas olekus ühendatavatele pindadele. Liim märgab neid ja kõvenedes moodustab **liimivuugi** (*adhesive film, glue line*). Liimimise tulemus on **liimliide** ehk **liimis** (*adhesive bond, adhesive joint*).

Liimimisel on mõningaid sarnasusi jootmisega, nt liim märgab ja katab ühendatavad pinnad ning on vaja tagada optimaalne pilu ühendatavate pindade vahel. Erinevuseks on, et liim on mittemetall, reeglina polümeer ja liimi kõvenemine toimub tavaliselt kas toatemperatuuril või kõrgemal (kuni 150 °C) temperatuuril.

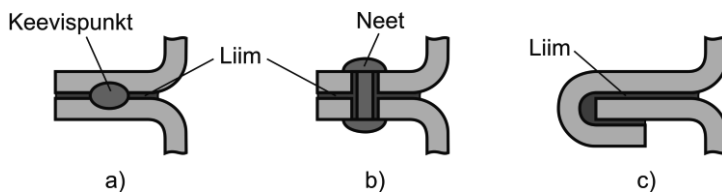
Liimi **kõvenemisel** (*curing*) muutuvad adhesiivi füüsikalised omadused – liim muutub tahkeks ja see toimub tavaliselt keemilise reaktsiooni tulemusena. Liimi kõvenemine võib toimuda vajaliku temperatuuri, rõhu, keemilise reaktsiooni, niiskuse, valguskiirguse, katalüsaatorite või nende kombinatsiooni toimetel, ka lahusti eemaldumisel. Liimi kõvenemine nõuab aega (mõnel juhul kuni 24 tundi), mis on üldiselt selle liitmisemeetodi puudus.

Liimliite tugevuse määrab nii liimi enda tugevus kui ka sideme tugevus liimi ja liidetavate materjalide vahel. Liimimisel ei kahjusta liimi madal kõvenemistemperatuur tooteid. Liimliited on hermeetilised. Parimate tulemuste saavutamiseks peavad olema täidetud järgmised tingimused: a) liitepinnad peavad olema puhtad – vabad mustusest, õlist ja oksüüdikiledest; b) liim peab olema vedel ja märgama liidetavaid pindu; c) liitepinnal peab olema pinnakaredus, mitte ideaalselt sile.

Liimliide peab olema nii kavandatud, et kasutada maksimaalselt ära selle liitmisemeetodi eeliseid. Liimimist kasutatakse väga paljude materjalide puhul, kusjuures liita saab erineva suurusega toorikuid. Mõned liimid on elastsed pärast kõvenemist ning sobivad erineva joonpaisumisteguriga materjalide liitmiseks. Liimimist kasu-

tatakse selliste materjalide liitmiseks nagu metallid, klaas, plastid, keraamika, kummi, puit, komposiitmaterjalid jm. Liimliiteid kasutatakse laialdaselt mööblitööstuses, elektroonikas, trükitööstuses, pakendites, meditsiinis, hambaravis, auto- ja lennukitööstuses. Eriti laieneb liimimise kasutus viimati mainitud tööstusharudes seoses plastide ja komposiitmaterjalide laialdasema evitamise ja põhjusel, et liimliidritel on suur väsimustugevus. Seda vaatamata tootlikust iseloomustavale aja kulule, mis on vajalik liimi täielikuks kõvenemiseks.

Liimimise eelised võrreldes keevituse ja jootmisega on järgnevad: a) väike termomõju ühendatavatele detailidele ja väikesed sisepinged ning toodete minimaalne kõverdumine; b) ühtlane pingete jaotus liimistes ja pingekontsentraatorite puudumine, mistõttu väsimustugevus on kuni 20 korda parem kui punktkevisõmblustes; c) liimid on odavad ja pakutav lai tööstuslik valik; d) majanduslik põhjendatus; e) liimliited summutavad müra, lööke, vibratsioone; f) liimliidete hermeetilisus; g) liimi pealekandmist on võimalik automatiseerida, nt robotite abil; h) liimliiteid võib kasutada kombineeritult punktkontaktkevisõmblustega või neetidega (vt Joonis 11.60).



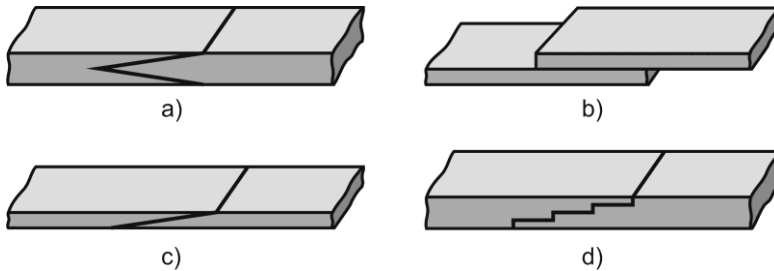
**Joonis 11.60.** Kombineeritud liimliited: a – punktkevisõmblustega, b – neetidega, c – painutamisega

Liimimise puudused võrreldes keevituse ja jootmisega on järgnevad: a) puudub universaalne liim kõigile tehnomaterjalide jaoks, mistõttu on raske teha valikut sobiva liimi osas, kuna tööstuslike liimide valik on lai; b) enamik liime ei ole stabiilsed kasutustemperatuuridel üle 150...180 °C, erandina kuni 260 °C; c) mõned liimid kahanevad kõvenemisel tunduvalt, tekitades suuri sisepingeid; d) mõned väga tugevad liimid on sageli haprad ja madala sitkusega, osa neist muutuvad hapraks madalatel temperatuuridel; e) liimliidete kvaliteeti on raske kontrollida traditsiooniliste mittepurustava kontrolli meetoditega, sageli sobivad ainult purustavad meetodid; f) liimide mürgisus, lühike kasutamise- või säilivusaeg ja taaskasutamise võimatus.

### 11.7.2. Liimliited

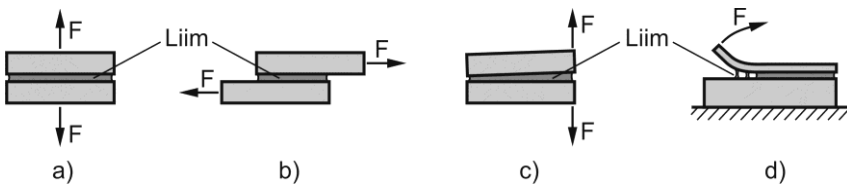
Liimliidete põhitüübid on samad kui jootmisel (vt p 11.6.2). Eelistatult kasutatakse katteliiteid. Põkkliidete korral töödeldakse liitepinnad astmeliselt või kaldu liitepinna suurendamiseks ja nendes pingete vähendamiseks. Tüüpilised liimliited on näidatud Joonisel 11.61. Mõnel juhul saab kombineerida liimimist teiste liitmisprotsessidega

(punktkeevitus, neetimine, painutamine, et suurendada liite tugevust või tagada selle hermeetilisus (Joonis 11.60). Punktkeevituse kombineerimist liimimisega nimetatakse **keevitusliimliitmiseks** (*weld bonding*), mida kasutatakse laialdaselt autotööstuses.



**Joonis 11.61.** Liimliidete tüüpe: a – kiilukujuline põkkliide, b – katteliide, c – kaldserv-põkkliide, d – astmeline põkkliide

Liimliidete kavandamise juures tuleb arvestada nii liidetavate materjalide kui ka liimi sobivusega liimimiseks ja liidete kasutustingimustega, seda eriti just erinevat tüüpi ja omadustega materjalide liitmisel. Kavandamisel tuleb arvesse võtta liites tekkivaid pingeid (Joonis 11.62). Vältida tuleb liites pingeid, mis kutsuvad esile **lahtirebimist** (*cleavage*) või serva **lahtikoorimist** (*peeling*). Eelistada tuleb liimliite töötamist nihkele ja tuleks vältida tõmbepingeid. Toatemperatuuril võib liimliite nihketugevus olla suurusjärgus 14...50 N/mm<sup>2</sup>, tõmbetugevus 4...8 N/mm<sup>2</sup>.



**Joonis 11.62.** Pingeolukord liimliidetes: a – tõmme, b – nihe; c – lahtirebimine; d – lahtikoorimine

### 11.7.3. Liimid

Liimi põhikomponendiks on **liimaine** ehk **liimvaik** (*adhesive substance, resin, gluten*), mis on üldjuhul kõrgmolekulaarne sünteetiline orgaaniline ühend ehk polümeer, mille liimivad omadused olenevad makromolekulide ehitusest ja struktuurist. Harvemini kasutatakse looduslikke või anorgaanilisi aineid. Liime tarnitakse vedelal, pastade, geelide, kilede või tahkel kujul. Paljudel juhtudel on liimid kahekomponentsed ja segatakse vahetult enne kasutamist kokku.

Liime liigitatakse kasutusala järgi kahte põhigruppi:

- koormusele töötavad **konstruktsiooniliimid** (*structural adhesives*), mis on

mõeldud jõudude ülekandeks;

- vähekoormatud **mittekonstruktsiooniliimid** (*nonstructural adhesives*), mille ülesandeks on detailide fikseerimine või liidete hermeetiseerimine – **hermeetiseerivad liimid** (*sealing adhesives*).

Edaspidi vaadeldakse metallide ühendamiseks kasutatavaid konstruktsiooniliime. Põhikonstruktsiooniliimidena kasutatakse epoksü-, polüuretaan-, tsüanoakrülaat-, akrüül-, modifitseeritud fenool- ja anaeroobseid liime. Puidu, naha ja plastide liimimiseks kasutatakse fenoolliime.

Levinuimad on epoksüliimid, mis on termoreaktiivsed ja tagavad liite hea tõmbe- ja nihketugevuse, sitkuse, jäikuse, keemilise püsivuse, väikese kahanemise ja sisepinged kõvenemisel. Neid saab kasutada temperatuurivahemikus – 50 kuni + 250 °C ja liite nihketugevus on piirides 20...50 N/mm<sup>2</sup>. Liimi kõvenemine nõuab olenevalt temperatuurist aega 2...12 tundi.

Anaeroobsed liimid on valmistatud akrüülestrite baasil ja kõvenevad õhuhapniku piiratud juurdepääsu tingimustes 6 kuni 24 tunni jooksul. Anaeroobsel akrüülliidil on hea adhesioon metalli, plasti, keraamika, klaasi jt materjalidega. Nende unikaalsus seisneb selles, et ühekomponentsetena säilivad nad isoleerituna hapnikust kuni üks aasta ja kõvenevad toatemperatuuril kiiresti. Kasutatakse samuti tihendusmaterjalina.

Uue põlvkonna liimidel kantakse liidetavatele pindadele eraldi liimi ja kiirendit ning reaktsioon toimub pindade ühendamisel. Puuduseks on väike tugevus kõrgendatud temperatuuridel ja ebameeldiv lõhn enne kõvenemist.

Tsüanoakrülaatliimid, tuntud ka kui superliimid, kõvenevad niiskuse toimel vähem kui 2 sekundi jooksul. Need liimid annavad liidetele suure tugevuse ja sobivad plastide, metallide ja kummi liitmiseks. Kasutust piirab nende madal tugevus lahtirebimisele, haprus, väike temperatuuri- ja niiskuskindlus, kõrge hind.

Modifitseeritud fenoolliimid on ilmastikukindlad ja suhteliselt kuumuskindlad (kuni 200...300 °C) ja sobivad nii metallide, komposiitmaterjalide kui ka keraamika, klaasi ja kummi liimimiseks. Konstruktsiooniliimina kasutatakse sageli aeroobseid akrüülliidliime. Liimid on kahekomponentsed ja üks komponentidest, eelkõige kiirendi, lisatakse vahetult enne kasutamist. Kõvenemine toimub kiirelt liimi polümerisatsioonil. Seda tüüpi liimid ei sisalda lahusteid ja kõvenemisel ei eraldu mürgiseid ühendeid ning liiteid iseloomustavad head tugevusomadused.

Polüuretaanliimid on iseäraliku morfoloogilise ehitusega, kõvenevad keemilise reaktsiooni tulemusena, valmistatakse nii ühe või kahekomponentsetena. Kõvenemisel ei eraldu ühendeid ja neid iseloomustab suurepärase adhesioon. Liimi eeliseks on kiire kõvenemine, väike kahanemine ja väikesed sisepinged kõvenemisel, suur sitkus. Sobivad elastsete liimliidete saamiseks ja kasutamiseks temperatuuridel 65...120 °C.

#### 11.7.4. Liimimise tehnoloogilised etapid

Liimliidete valmistamise tehnoloogilised etapid on järgmised:

1. Liimaine viimine olekusse, kus ta on kasutatav liimina, tavaliselt vedelal kujul.
2. Liimitava materjali pinna ettevalmistamine. Ühendatavad pinnad tuleb puhastada lisanditest, nagu õli, mustus, rooste, tagikiht, et tagada liitepindade märgamine liimiga ja selle laialivalgumine. Ühendatavad pinnad puhastatakse kas mehaaniliselt (abrasiivjuga töötlus), lahustitega, aurujoaga või keemilise söövitamisega, aktiveeritakse kiiritusmeetoditega, krunditakse.
3. Liimi ettevalmistamine – kõvendi, plastifikaatori, kiirendi, lahusti lisamine.
4. Liimi kandmine ettevalmistatud pindadele ühe või mitme kihina pintsli, pihusti, dosaatori, rulli või pahtellabida abil. Toatemperatuuril valmistatakse tahkeid vaikliime kiledena või pulbritena.
5. Ühendatavate pindade kokkusurumine. Lahustiga liimide korral võib liidetavad pinnad kokku suruda alles enamiku lahusti aurumise järel. Lahusteid mittesisaldavate liimide puhul võib pinnad kohe kokku suruda nii, et ei jääks pindade vahele õhumulle. Protsessi käigus tuleb kontrollida liimikihi paksust. Vajalik rakendatav surve ja temperatuur määratakse vastavalt liimi tootja soovitudele.
6. Liimi kõvendamine kas toatemperatuuril või kõrgendatud temperatuuril, tagades pindade tiheda kontakti ja piisava aja kõvenemiseks.

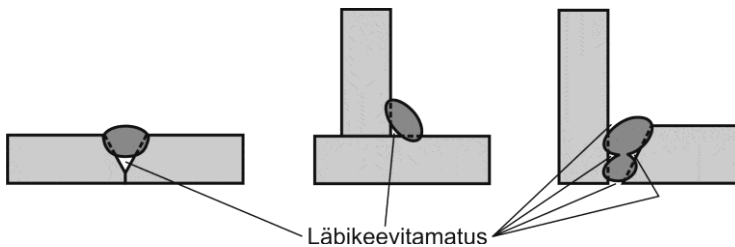
### 11.8. LIIDETE KATSETAMINE JA LIITMISPROTSESSI VALIK

#### 11.8.1 Keevitus- ja jootmisdefektid

Keevituse või jootmisprotsessi käigus võib tekkida nii õmbluses kui ka termomõju tsoonis defekte, mis vähendavad liite ristlõiget ning järelikult tugevust ja hermeetilisust. **Keevitusdefektid** (*weld imperfections*) on kõrvalekalded keevisliidete pidevuses, ristlõike suuruses ja kujus. Eristatakse väliseid ja sisemisi keevitusdefekte. Peamised keevitusdefektid on:

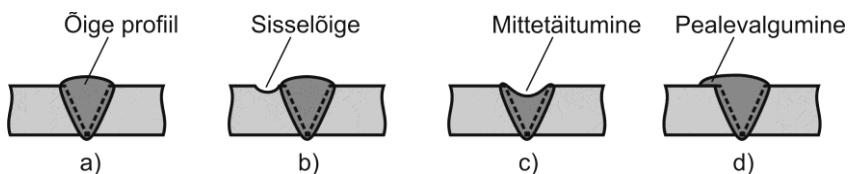
- 1) **praod** (*cracks*). Eristatakse külm- ja kuumpragusid (vt Joonis 11.18), mis vajavad väljalõikamist ja uuesti keevitamist. Tekkimise põhjuseks on põhimaterjali omadused ja ebasobiv keevitustehnoloogia;
- 2) **poorid** (*pores*) ja **kahanemistühikud** (*shrinkage cavities*). Teatud mõõtmete piires ja nende hõivatud ristlõike suurusest olenevalt on poorid lubatud ja ei vaja tavaliselt parandamist;
- 3) **suletised** (*solid inclusions, inclusions*) on räbu- või oksiidiosakesed keevis- või jootõmbluses, ka volframelektroodi osad TIG-keevitusel. Teatud mõõtmetega suletised on lubatud;

- 4) **kokkusulamatus** (*lack of fusion*) ja **läbikeevitamatus** (*lack of penetration*), mille korral liite servad ei ole kokku sulanud (vt sulamisala, Joonised 11.12 ja 11.13) või liide ei ole detailide paksuses läbi keevitatud (vt Joonis 11.63). Kokkusulamatus defekti ei lubata ja liide tuleb lahti lõigata ja uuesti keevitada. Üldjuhul tuleb tagada keevisõmbluse läbikeevitus ja erandina, madalate keevisliite kvaliteedinõuete korral, võidakse lubada mõningast läbikeevitamatus;



**Joonis 11.63.** Läbikeevitamatuses tingitud defektid

- 5) keevisõmbluse ristlõike ja kuju hälbed, nt kui õmbluse kõrval esinevad soontena **sisselõiked** (*undercuts*) (Joonis 11.64 b), kui servavahemik ei ole täitunud ehk on moodustunud **mittetäitumine** (*incompletely filled groove*) (Joonis 11.64 c) või kui keevismetall on valgunud ühele poole põhimetalli peale – tegemist on **pealevalgumisega** (*overlap*) (Joonis 11.64 d). Nurkõmbluse kaatetite erinevus üle lubatud piiride on sageli mitteaktsepteeritav. Sisselõiget loetakse oluliseks defektiks ja vajab parandamist soone täiskeevitamisega, ülejäänud kõrvalekalded peavad olema lubatud piires.



**Joonis 11.64.** Keevisliidete kuju ja ristlõike defektid: a – ideaalne pötkliide; b – sisselõiked; c – mittetäitumine; d – pealevalgumine

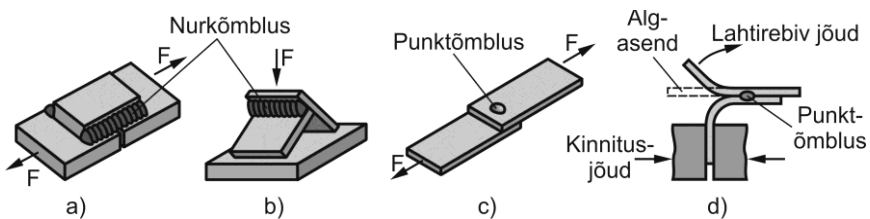
Jooteliidetes on defektideks joodise pealevalgumine, pilu mittetäielik täitumine joodisega, poorid, tühikud ja räbupesad.

### 11.8.2. Keevis- ja jooteliidete kontroll

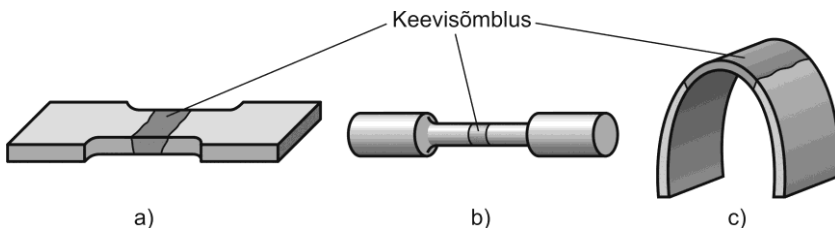
Keevis- ja jooteliidete defekte saab hinnata kasutades **purustuskatset** (*destructive test*) või **mittepurustavat kontrolli** (*non-destructive evaluation*).

## Purustuskatse

Purustuskatsel lõigatakse keevisliitest välja katsekehad, mida katsetatakse liidet purustades. Rakendatav katsemeetod oleneb liite tüübist ja liitmisprotsessist. Näiteks kasutatakse punktõmbluste purustuskatsel nii tõmbekatset, liite lahtirebimis- kui ka kiilkatset (Joonis 11.65c ja d) ning tulemust hinnatakse sageli keevispunkti läbimõõdu abil. Eespool nimetatud katseid võidakse kasutada ka liim- ja jooteliidete korral. Purustuskatsel lõigatakse keevisliitest välja tõmbeteimi ja löökpainde teimi katsekehad (vt Joonis 11.66). Nurkliiteid, aga ka MAG-keevitusega valmistatud põkkliiteid katsetatakse sageli murdele ja uuritakse liitepinda. Keevitatud põkkliidetes võidakse liite plastilisust ja pragude esinemist testida paindeteimiga (vt Joonis 11.66c). Keevisliite struktuuri ja keevitusdefekte uuritakse keevisliite makrolihvil, kusjuures kõvaduse mõõtmised makrolihvi erinevates piirkondades võimaldavad hinnata karastusstruktuuride teket.



**Joonis 11.65.** Keevisliidete mehaanilised katsed: a – nurkõmbluse tõmbe-nihkekatsed; b – nurkõmbluse murdekatsed; c – punktõmbluse nihke-tõmbekatset; d – punktõmbluse lahtirebimiskatsed



**Joonis 11.66.** Põkkliidete purustavad katsed: a ja b – tõmbeteimikud; c – paindekatskeha

## Mittepurustav kontroll

Mittepurustava kontrolli rakendamisel ei purustata keevisõmblust ja enamasti hinnatakse defektide olemasolu kaudselt, nende poolt tekitatud nn indikatsioonide abil. Loetleme neist mõned olulisemad.

**Visuaalkontrolli** (*visual inspection*) abil tuvastatakse keevisliidete välisdefekte visuaalse vaatluse abil või kasutades lihtsamaid nurkõmbluste mõõtevahendeid. Tootmises on kõigi keevisliidete visuaalkontroll kohustuslik.



**Kapillaarkatsel** (*liquid-penetrant testing*) kantakse keevisliite pinnale värvilist erivedelikku, mis tungib keevisliite pragudesse ja pooridesse ning paljastab need kas tava- või ultraviolettkiirguse käes.

**Hermeetilisuskatsel** ehk **tiheduskatsel** (*leaking testing*) kasutatakse keevisliite surveproovi nii õhu või veega kui ka õlivalgendkriitkapillaarkatset. Viimaste puhul kantakse kontrollitava liite ühele poolele kriidivee suspensioon või kapillaarvedelik, liite teisele poole petrooleumi või valget ilmutusvärvi. Kui õmblus pole hermeetiline, imbub petrooleum või kapillaarvedelik kapillaarjõudude toimel läbi liite defektide ja annab liite vastaspoolel kas õlised või kapillaarvedeliku laigud. Jooteliidete kontrolliks kasutatakse ka vaakumkatset.

**Magnetpulberkatse** (*magnetic particle testing*) põhineb peenikesest rauaoksiidi pulbrist koosneva suspensiooni pealekandmises liitepindadele ja selle mõjutamises välise magnetväljaga. Välises magnetväljas moonduv magnetjõujoonte orientatsioon pragude, sisselõigete jt pinnadefektide kohal ja on hästi silmaga nähtav.

**Induktsioonkatsel** (*induction testing*) tekitatakse liites väline magnetväli ja induktiivanduritega määratakse magnetvälja tugevuse muutuse kaudu defektid. Kasutatakse seeriatootmises. Kontrollitavad materjalid peavad olema ferromagnetilised.

**Ultrahelikatsel** (*ultrasonic testing*) juhitakse materjali fokuseeritud ultrahelivõnkumised sagedusega üle 20 kHz, mis peegelduvad defektidelt. Saab määrata nii sisemiste defektide suurust kui ka asukohta.

**Radiograafiakatse** (*radiographic testing*) on materjalide kiirguskontrolli meetodite rühma üldnimetus, mis põhineb uuritava objekti elektromagnet- või ultralühilaine-kiirtega läbivalgustamisel metallis ja defektis kiirguse neeldumise erinevuste tuvastamisel. Keevisliidete katsetamine toimub röntgeni- või gammakiirgusega (radioaktiivsete isotoopide  $\text{Ir}^{192}$ ,  $\text{Co}^{60}$ ,  $\text{Ce}^{137}$ ) abil. Levinuim on terasplaatide (paksusega kuni 50 mm) korral **röntgenograafiakatse** (*X-ray testing*), mille abil saab määrata nii keevitusdefektide tüüpi, mõõtmeid kui ka asukohta. Perspektiivis areneb röntgenkontroll digitaaltehnikaga kasutamise suunas. Paksemate terasplaatide (50...225 mm) korral kasutatakse **gammaraadiograafiakatset** (*gamma radiographic testing*), mille puhul valgustatakse keevisliidet läbi gammakiirgusega. Meetodi kasutamine on piiratud isotoopide kasutusaja ja rangete ohutusnõuetega.

Üldiselt on mittepurustav kontroll ja purustavad katsed kulukad. Nõuded konkreetse meetodi rakendamiseks ja katsetamise mahu osas esitatakse kas standardites või vastavates normatiivaktides. Automaatkeevituse kasutamisel võidakse mittepurustavaid katseid rakendada ainult esimeste toodete korral vähendamaks valmistuskulusid.

### 11.8.3. Liitmisprotsessi valik

Metallide keevitamisel tuleb keevitusprotsessi valikul arvestada põhimetalli keevitavusega seotud erinevat tüüpi pragude tekke riskiga (vt p 11.2.3), aga ka keeviliidete konstruktsiooniga (õmbluse tüüp ja ligipääsetavus, keevitusasend), samuti iga keevitusprotsessi võimaluste ja parameetritega.

Metallide keevitavuse põhilised mõjurid on põhimetalli ja lisametalli omadused ning liitepindade seisukord. Põhimetalli mõju keevitavusele oleneb füüsikalistest omadustest nagu sulamistemperatuur, soojusjuhtivus ja joonpaisumistegur. Madala sulamistemperatuuriga metallid, nt alumiinium ja vask, on teoreetiliselt hästi keevitavad. Hea soojusjuhtivusega vase keevitamisel levib soojus kiiresti keevioõmbluse kõrvalalasse, mistõttu võib olla oluline lisasoojuse kasutamine vajaliku temperatuuri hoidmiseks. Suuremad probleemid tekivad eri metallide või erinevat tüüpi teraste (roostevaba teras + süsinikteras) kokkukeevitamisel, tingituna nende erinevaist sulamistemperatuuridest ja joonpaisumisteguritest. Nimetatud asjaolud võivad põhjustada nii keevistoodete kõverdumist kui ka isegi pragude teket. Erinevate metallide ja sulamite sulakeevitusel peab lisametall olema ühilduv mõlemaga, mida on tihti raske saavutada. Sageli tuleb seetõttu eelistada liitmisprotsessina tardfaaskeevitust või jootmist. Osa metalle ja nende erinevaid kombinatsioone saab hästi keevitada vaid ühte keevitusprotsessi kasutades. Seejuures tuleb arvestada keevitava materjali paksusega. Õhukese pleki keevitamiseks sobivad ühed keevitusprotsessid, paksu plaadi keevitamiseks teised (Tabel 11.5).

**Tabel 11.5.** Soovitavad liitmisprotsessid olenevalt metallist ja toorikute paksusest

Materjal	Paksus *	Käsikaarkeevitus	Räbustikaarkeevitus	MAG- keevitus	Täidistraatkeevitus	TIG-keevitus	Plasmakeevitus	Elektriräbukeevitus	Punktkontaktkeevitus	Sulatuspökk-keevitus	Gaaskeevitus	Elektronkiirkeevitus	Laserikiirkeevitus	Hõõrdkeevitus	Difusioonkeevitus	Ahijootmine kõvajoodisega
Süsinikteras	ÕP	+	+	+		+			+	+	+	+	+			+
	KP	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+			+
	PP	+	+	+	+				+	+	+	+	+			+
	P	+	+	+	+	+		+		+	+	+		+		+
Madallegeerteras	ÕP	+	+	+		+			+	+	+	+	+		+	+
	KP	+	+	+	+	+			+	+		+	+		+	+
	PP	+	+	+	+				+	+		+	+		+	+
	P	+	+	+	+			+		+		+	+		+	+
Roostevabateras	ÕP	+	+	+		+	+		+	+	+	+	+		+	+
	KP	+	+	+	+	+	+		+	+		+	+		+	+
	PP	+	+	+	+		+			+		+	+		+	+
	P	+	+	+	+			+		+		+	+		+	+
Malm	ÕP															+
	KP	+									+					+
	PP	+	+	+	+						+					+
	P	+	+	+	+						+					+
Alumiinium ja Al-sulamid	ÕP	+		+		+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
	KP	+		+		+	+		+	+		+	+	+	+	+
	PP	+		+		+				+		+	+		+	+
	P	+		+				+		+		+	+		+	+
Titaan ja Ti-sulamid	ÕP			+		+	+			+		+	+		+	+
	KP			+		+	+			+		+	+		+	+
	PP			+		+	+			+		+	+		+	+
	P			+			+			+		+	+		+	+
Vask ja Cu-sulamid	ÕP			+		+	+			+		+				+
	KP			+			+			+		+		+		+
	PP			+						+		+		+		+
	P			+						+		+		+		+

\*Materjali paksused: ÕP – õhuke plekk paksusega kuni 3 mm; KP – keskmise paksusega plekk 3...6 mm; PP – paksplekk (6...19 mm); P – plaat paksusega üle 19 mm.

Eri tehnomaterjalide liitmiseks sobivad erinevad liitmisprotsessid. Tabelis 11.6 on esitatud liitmisprotsesside sobivus eri materjalidele.

**Tabel 11.6.** Liitmisprotsesside sobivus eri materjalidele

Materjal	Liitmisprotsess						
	Kaar-keevitus	Gaas-keevitus	Elektron-kiirkeevitus	Kontakt-keevitus	Kõvajoo-disjootmine	Pehmejoodisjootmine	Liimine
Malm	T	S	M	H	R	M	T
Süsinik- ja madallegerteras	S	S	T	S	S	T	T
Roostevabateras	S	T	T	S	S	T	T
Alumiinium ja Al-sulamid	T	T	T	T	T	H	S
Vask ja Cu-sulamid	T	T	T	T	S	S	T
Nikkel ja Ni-sulamid	S	T	T	S	S	T	T
Titaan	T	M	T	T	R	H	T
Termoplastid	S (kuumplaat)	S (kuumgaas)	M	T (indukt-sioonkuumus)	M	M	T
Reaktoplastid	M	M	M	M	M	M	T
Elastomeerid	M	M	M	M	M	M	S
Keraamika	M	H	T	M	M/H	M	S
Erinevad metallid	R	R	T	R	R/T	S	S

Märkused: S – soovitatav, hästi teostatav ja annab suurepärase tulemuse; T – tavaliselt kasutatav; R – raskustega kasutatav; H – harva kasutatav, M – mittekasutatav

Keevitusprotsessi valikul tuleb arvesse võtta nii majanduslikke tegureid kui ka keevitusasendit (vt Joonis 11.11). Keevitusasend võib teatud juhtudel piirata mõne keevitusprotsessi kasutamist, nõuda keevitusparameetrite või keevituse sooritus-tehnika muutmist. Tootlikkuse ja keevisliidete kvaliteedi seisukohalt tuleb alati eelistada keevitamist allasendis.

Inseneri ülesandeks on teha valik arvukate keevitusprotsesside vahel, olles teadlik nii keevitamisele iseloomulikest üldistest probleemidest kui ka iga keevitusprotsessi iseärasustest ja nõuetest.

Tabelis 11.7 on võrreldud erinevaid sulakeevituse protsesse keevitamise eri aspektidest lähtuvalt.

**Tabel 11.7.** Erinevate sulakeevituse protsesside võrdlus

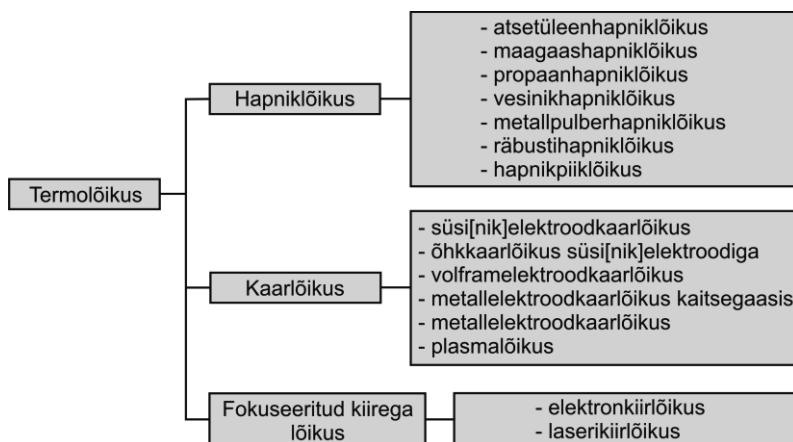
Keevitusprotsess	Toimine	Keevitavad materjalid	Soojusallikas	Elektrood	Soojusisestus	Läbi keevitus, mm	Kujumuund*	Seadmete hind
Käsikaarkeevitus	Käsitsi	Teras, malm, Al	Kaar	Varras	Keskmine	Piirangu-teta	1...2	Madal
MIG/MAG-keevitus	Poolauto-maatne	Teras, Al, Mg	Kaar	Traat	Keskmine	6...10	2...3	Keskmine
TIG-keevitus	Käsitsi	Enamik metalle	Kaar	W	Keskmine	3	2...3	Keskmine
Räbustikaarkeevitus	Auto-maatne	Teras	Kaar	Traat, lint	Keskmine	25	2...3	Keskmine
Gaaskeevitus	Käsitsi	Enamik metalle	Gaasi-leek	–	Madal	3	2...4	Madal
Elektronkiir- ja laserikiirkeevitus	Mehhaniseeritud	Enamik metalle	Energiakiir	–	Kõrge	20...300	3...5	Kõrge
Plasma-keevitus	Mehhaniseeritud	Enamik metalle	Plasma-kaar	W	Kõrge	12...18	2...4	Kõrge

\*Märkus: kujumuund: 1 – suured; 5 – väiksed

## 11.9. TERMOLÕIKUS

### 11.9.1. Olemus ja liigitamine

**Termolõikus** (*thermal cutting*) on metallide ja teiste materjalide lõikamisprotsesside üldnimetus, millega kaasneb lõigatava materjali põlemine, sulamine, aurustumine või sublimeerumine. Termolõikusmeetodeid liigitatakse materjali lõiketsoonist eemaldamise viisi, kasutatava soojusallika ja kasutusotstarbe järgi (Joonis 11.67).



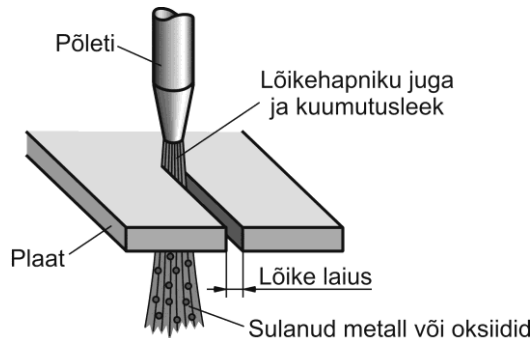
**Joonis 11.67.** Termolõikuse meetodid

Kasutusotstarbe järgi eristatakse **eralduslõikust** (*cutting*) ja **pinnalõikust** (*gouging*). Eralduslõikust kasutatakse toorikute väljalõikamiseks lehtmaterjalist, avalõikamiseks, tükeldamiseks. Pinnalõikust kasutatakse valandite, keevisõmbluste jt toodete pinnakihis olevate defektide kõrvaldamiseks, needipeade eemaldamiseks, soonte lõikamiseks, keevitustoorikute kaldservamiseks jm.

## 11.9.2. Hapniklõikus

**Hapniklõikus** (*oxygen cutting*) on termolõikusprotsesside (gaaslõikus, hapnikrübustilõikus, metallpulberhapnikulõikus, hapnikpiiklõikus) üldnimetus, mis põhineb lõigatava metalli ja hapniku vahelisel reaktsioonil kõrgetel temperatuuridel.

Kasutatavaim on **gaaslõikus** (*oxyfuel cutting, flame cutting, torch cutting*), mille all mõistetakse termolõikusprotsesse, mis põhinevad lõigatava metalli põlemisel hapnikus, kusjuures lõigatava metalli süttimiseks vajalik temperatuur saadakse põlevgaasi (atsetüleen, vesinik, maagaas, propaan) põlemisel hapnikus. Reaktsiooniks vajalikku temperatuuri hoitakse hapniku ja põlevgaasi gaasileegi abil, mis suunatakse lõikekohta. Mõnede metallide puhul intensiivistatakse reaktsiooni rübustite või metallipulbri lisamisega hapnikuvoolu (rübustihapniklõikus, metallpulberhapniklõikus).



Joonis 11.68. Gaaslõikus

**Atsetüleen-hapniklõikusel** ehk **hapnik-atsetüleenlõikusel** (*oxy-acetylene cutting*) kasutatakse põlevgaasina atsetüleeni, **propaan-hapniklõikusel** ehk **hapnik-propaanlõikusel** (*oxy-propane cutting*) propaani jt.

Raua põlemisel hapnikus eraldub palju soojust vastavuses reaktsiooniga:



Reaktsioon ei alga enne temperatuuri *ca* 870 °C, mistõttu metall tuleb gaasileegi abil kuumutada süttimistemperatuurini hapnikus. Pärast süttimistemperatuurini kuumenemist juhitakse lõikekohale hapnikujuga (või suurendatakse kuumutamiseks kasutatava leegi hapnikusisaldust), mis süütab metalli. Põlemisel eraldub palju soojust, mis

kulub alumiste metallikihtide kuumutamiseks – põlemine levib kogu paksuse ulatuses. Tekkiv sulas olekus metallioksiid eemaldatakse lõikekohast hapnikujoa kineetilise energiaga. Teoreetiliselt peaks põlemisprotsessis eralduvast soojusest protsessi pidevuseks piisama. Küllalt suurte soojuskadude tõttu tuleb siiski lisaks metalli põlemisele säilitada samuti põlevgaasi põlemisel saadud soojust.

Gaaslõikamine võimaldab lõigata metallisulameid, millised rahuldavad järgmisi tingimusi:

- 1) metalli hapnikus süttimistemperatuur on sulamistemperatuurist madalam;
- 2) moodustuvate metallioksiidide sulamistemperatuur on metalli sulamistemperatuurist madalam;
- 3) põlemissoojus on protsessi pidevuse seisukohalt piisav, nt terase gaaslõikamisel eraldub 70% soojusest metalli põlemisest hapnikus ja 30% kuumutusleegist;
- 4) metalli soojusjuhtivus ei tohiks olla liiga suur põlemisel eralduva soojuse hajumise vähendamiseks;
- 5) lõikamisel tekkiv räbu (metallioksiidid) on lõiketsoonist kergelt eemaldatav.

Vask, alumiinium ja nende sulamid, samuti malm ja kõrgleegeritud kroom- ja kroomnikkelterased ei täida kõiki eespool esitatud tingimusi. Kõrgleegeritud kroomterased ei ole lõigatavad raskesulava räbu (sulamistemperatuur üle 2000 °C) tekkimise tõttu, mis isoleerib metalli hapnikujoast. Malmil on sulamistemperatuur süttimistemperatuurile liiga lähedal. Alumiiniumil ja alumiiniumisulamitel oksiidide sulamistemperatuur ületab märgatavalt metalli süttimistemperatuuri. Vasel ja vasesulamitel on liialt suur soojusjuhtivus. Kõige paremini on lõigatavad konstruktsiooniterased (süsnikisisalduseni kuni 0,7 %). Keskmise süsnikisisaldusega konstruktsiooniterased vajavad siiski lõikekoha karastumise ja karastuspragude vältimiseks ettekuumutust. Roostevabast terasest ja alumiiniumist keevistoorikute töötlemiseks kasutatakse tööstuses plasmalõikust.

Põlevgaasidest on gaaslõikamisel levinuim atsetüleen. Maagaasiga ja propaaniga lõikamine on levinud (kuigi tootlikkus väheneb) kasutatavate gaaside odavuse tõttu.

Gaaslõikamist (nii eraldus- kui ka pinnalõikamist) tehakse sageli käsitsi, spetsiaalsete **gaaslõikuritega** ehk **gaaslõikepõletitega** (*cutting torch, cutting blowpipe*), kuigi põhimõtteliselt on võimalik lõigata ka gaaskeevituspõletit kasutades. Gaaslõikureid liigitatakse põlevgaasi, samuti otstarbe järgi: universaalsed ja eriotstarbelised, näiteks tükeldamiseks, avalõikamiseks jms. Käsilõikamine ei kindlusta tavaliselt kvaliteetset lõiget ja tootlikkus on suhteliselt madal. Tootlikkuse suurendamiseks ja lõikekvaliteedi parandamiseks kasutatakse **gaaslõikemasinaid** (*flame cutting machine, torch cutting machine*), sh programmjuhtimisega seadmeid. Viimasel juhul on saavutatav toorikutetäpsus kuni  $\pm 0,4$  mm, käsilõikusel 0,7...1,0 mm. Lõike kvaliteet sõltub hapnikujoa kiirusest, ettekuumutustingimustest ja lõikamiskiirusest. Tootlik-

kuse suurendamiseks kasutatakse **pakettlõikust** (*stack cutting*), kus toimub mitme üksteise peale kinnitatud materjali samaaegne lõikus.

**Räbustihapniklõikusel** ehk **hapnikräbustilõikusel** (*flux oxygen cutting, chemical flux cutting*) toimub põlemisprotsessi intensiivistamine mineraalse räbusti lisamisega hapnikujukka. Räbusti põlemisel tekib lisasoojus, tõuseb lõiketsooni temperatuur. Sellele lisaks parandavad madalama sulamistemperatuuriga räbusti põlemissaadused, reageerides rasksulavate oksiididega, viimaste voolavust ja lõikest eemaldamist. Kasutatakse juhul, kui gaaslõikus ei ole tõhus, nt kõrglegeeritud kroomteraste, vase ja vasesulamite, titaani- ja niklisulamite termolõikamisel.

**Metallpulberhapniklõikusel** (*metal-powder cutting*) juhitakse hapnikujukka rauapulbrit. Pulbri põlemisel tekib lisasoojus, tõstes lõiketsooni temperatuuri. Lisaks sellele parandavad põlemissaadused, reageerides rasksulavate oksiididega, viimaste voolavust ja lõikest eemaldumist. Metallpulberhapniklõikamine ja räbustihapniklõikamine on asendumas plasmakaarlõikamisega.

**Hapnikpiiklõikus** (*oxygen lance cutting*) on hapniklõikus hapniku juhtimisega läbi metalltoru, mille põlemisel hapnikus eraldub lõikumiseks vajalik soojus. **Hapnikupiik** (*oxygen lance*) on välisdiameetriga 20...35 mm paksuseinaline terastoru hapniku juhtimiseks lõikekohale. Lõikamine algab toru otsa kuumutamise ja süttimistemperatuurini. Hapniku juhtimisel torusse selle ots süttib. Hapnik on vajalik nii toru põlemiseks kui ka põlemisjäakide väljapuhumiseks piigi süvenemisel materjali. Kasutatakse valupeade eemaldamiseks terasvalanditelt, avade põletamiseks terasesse, malmi, alumiiniumi, betooni jne. Meetodit võidakse kasutada veaaluseks lõikuseks.

Võrreldes mehaanilise lõikamisega on hapniklõikusel järgmised eelised: teraste korral suurem lõikekiirus, saab valmistada keerulise kujuga ja paksust terasest toorikuid, lõigata keevistoorikutele kaldservi, käsilõikeseadmed on portatiivsed ja kasutatavad välitingimustes.

Hapniklõikuse puudused on saadud toorikute mõõtmete suured tolerantsid, lõigatavate materjalide piiratud valik, tervisele kahjulike gaaside ja ühendite eraldumine ja ventilatsiooni vajadus.

### 11.9.3. Kaarlõikus

**Kaarlõikus** (*arc cutting*) on termolõikuse protsess metalli sulatamisega elektrikaare toimel elektroodi ja lõigatava metalli vahel. Vaatleme enim levinud meetodeid.

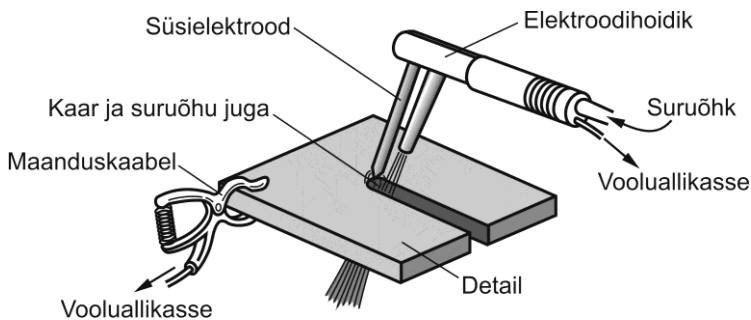
**Metallelektroodkaarlõikus** (*shielded metal arc cutting*) on kaarlõikamine metalli sulatamisega elektrikaare toimel erikattega lõikeelektroodi ja lõigatava metalli vahel. Suurim tootlikkus saavutatakse, kui lõikeelektroodi kaldenurk lõigatava pinna suhtes on *ca* 10°, kasutades 20...30 % suuremaid voolutugevusi kui käsitsi kaarkeevita-



misel. Metallelektroodkaarlõikust kasutatakse metallkonstruktsioonide lammutamisel, vanaraua tükeldamisel ja remonditöödel. Lõigata saab põhimõtteliselt kõiki metalle, puuduseks on väike tootlikkus ja lõikepinna halb kvaliteet.

**Süsielektroodkaarlõikusel** (*carbon arc cutting*) toimub sulatuslõikamine elektri-kaare toimel süsielektroodi ja lõigatava metalli vahel. Lõikepinna kvaliteet ja ka protsessi tootlikkus on madalad.

**Õhkkaarlõikus süsielektroodiga** ehk **õhkkaarlõikus** (*air carbon arc cutting*) juhitakse elektroodihoidiku sees oleva kanali kaudu kaare piirkonda suure kiirusega õhujuga (Joonis 11. 69), mis eemaldab sulametalli lõiketsoonist, tagades märksa suurema tootlikkuse. Kasutatakse peamiselt teraste ja malmi eralduslõikamisel, samuti pinnalõikamisel, näiteks keevitamiseks ettevalmistaval kaldservamisel (nt U-servakuju saamiseks) või pinnadefektide ja valupeade ning eemaldamiseks valanditelt jms. Õhujoa oksüdeeruva toime tõttu mitterauasulamite lõikamisel peaaegu ei kasutata.



**Joonis 11.69.** Õhkkaarlõikamine süsielektroodiga

**Plasmalõikus** (*plasma arc cutting*) on termolõikamise protsess, mille puhul metall sulatatakse plasmajoa toimel (plasmajugalõikamine) või elektri-kaare ja plasmajoa koosmõjul (plasmakaarlõikamine) (vt samuti p 11. 3.1.: Plasmakeevitus).

**Plasmakaarlõikusel** (*plasma transferred arc cutting, plasma arc cutting*) kasutatakse elektri-kaare otsetoimega **plasmakaarlõikureid** (*plasma transfer-type torch*), millistes kaarlahendus tekitatakse sulamatu volframelektroodi otsa ja lõigatava metalli vahel. Metall sulatatakse elektri-kaare ja plasmajoa koostoimel, kusjuures temperatuur lõiketsoonis ulatub kuni 33 000 °C. Plasmagaasidena kasutatakse erinevaid gaase, nt argooni, lämmastikku kui ka suruõhku. Metallide lõikamisel leiabki peamist kasutamist plasmakaarlõikus, kusjuures lõigata saab kõiki metalle, isegi magneesiumi, mis teiste termolõikamise meetoditega ei ole lõigatav.

Algselt kasutati plasmakaarlõikust metallide ja sulamite lõikamisel, millised ei ole gaaslõikusega lõigatavad. Praegu on kasutusala laienenud samuti konstruktsiooniteraste lõikamisele, kuna plasmakaarlõikusel ületab lõikekiirus 5...8kordselt gaas-

lõikust. Lisaks suurele lõikekiirusele iseloomustab meetodit 3...4 korda kitsam termomõjutsoon võrreldes hapniklõikusega ja sellest johtuvad väiksemad lõigatud toorikute kujumuunded.

**Plasmajugalõikusel** (*plasma non-transferred arc cutting*) kasutatakse **plasmajuga-lõikureid** (*plasma non-transfer-type torch*), mille kaarlahendus on lõikurisene. Väljuva plasmajoa temperatuur on kuni 16 000 °C.

Plasmajugalõikust kasutatakse peamiselt vähese või halva elektrijuhtivusega mitte-metallsete materjalide, plastide ja komposiitmaterjalide termolõikamiseks.

#### 11.9.4. Fokuseeritud kiirega termolõikus

**Laserlõikus** ehk **laserikiirlõikus** (*laser-beam cutting*) on termolõikus materjali sulatava või aurustava laserikiirega (vt samuti p 11.3.3.: Laserikiirkeevitus). Eristatakse: 1) gaas-laserlõikust; 2) hapnik-laserlõikust; 3) lasersublimatsioonlõikust.

**Gaaslaserlõikusel** (*endothermic laser cutting, gas-assisted laser-beam cutting*) eemaldatakse lõikekohas sulanud või aurustunud metall gaasijoaga (lämmastik, õhk), mida nimetatakse abigaasiks.

**Hapniklaserlõikusel** (*exothermic laser cutting, oxygen-assisted laser-beam cutting*) intensiivistatakse lõikamisprotsessi metalli süütava hapniku juhtimisega lõikekohale, st eksotermilise reaktsiooniga.

**Lasersublimatsioonlõikusel** (*laser beam sublimation cutting*) lõigatav materjal aurustatakse laserikiire poolt ja puhutakse lõikest välja abigaasi (N<sub>2</sub>, Ar, He) poolt.

Laserlõikusmeetodite eelised on suur lõikekiirus, kitsas termomõjutsoon, väikesed kujumuunded ja väikesed tolerantsid. Lõigata saab nii metalle kui ka mittemetalseid materjale. Metallide lõikamiseks kasutatakse CO<sub>2</sub>-lasereid kui ka Nd:YAG tahkislasereid, mis töötavad pidev- või impulssrežiimis.

**Elektronkiirlõikus** (*electron-beam cutting*) on termolõikamine metalli sulatava või aurustava elektronikiirega vaakumis. See on veelgi suurema energiatihedusega kui laser- ja plasmalõikus. Kasutatakse eritöödel.

## 11.10. KORDAMISKÜSIMUSED

### Liitmisprotsesside alused

1. Millised protsessid kuuluvad liitmisprotsesside hulka ja mis on nende põhimõtteline erinevus?
2. Milline on keevituse kui liitmisprotsessi olemus ja eesmärgid liite omaduste osas?
3. Loetlege kolm põhilist tingimust kvaliteetse keevisõmbluse saamiseks.
4. Kuidas liigitatakse keevitusprotsesse Euroopas ja milles on nende põhimõtteline erinevus?
5. Loetlege keevisõmbluste põhitüübid ja nende rakendus vastavates keevisliidetes.
6. Millistes keevisliidetes kasutatakse nurkõmblusi?
7. Mis on termomõjutsoon ja millest oleneb selle laius?
8. Millist rolli täidavad keevitusel rübustid ja räbu?
9. Selgitage käsi-, poolautomaat- ja automaatkeevituse erinevust.

### Keevitamise kaasnähtused

1. Mille poolest erinevad keevitamisel metallurgiaprotsessid vastavatest protsessidest metallurgias?
2. Avage mõiste "keevitatavus" sisu. Milliste nähtustega seda tavaliselt seostatakse?
3. Loetlege külmpingude tekkimise põhjused? Millistes terastes on nende pingude risk suurim?
4. Kuidas saab arvutuslikult hinnata konstruktsiooniteraste külmpingunemise riski? Esitage vastav valem.
5. Mille poolest erinevad kuumpraod külmpingudest? Milliste metallide puhul on kuumpraod iseloomulikud?
6. Millised on keevituse jääkpingete ebasoovitavad mõjud keeviskonstruktsioonidele?

### Sulakeevitus

1. Mis põhjustel kasutatakse kaarkeevitusel eelistatult alalisvoolu, mitte vahelduvvoolu?
2. Mis vahe on kaarkeevitusel sulav- ja sulamatu elektroodiga?
3. Loetlege põhilised kaarkeevituse parameetrid.
4. Mis vahe on püsivpingega ja -vooluga vooluallikatel?
5. Loetlege vähemalt 4 kaarkeevituse levinuimat protsessi. Milline neist sobib kõige paremini püstiste paksust terasest keevisõmbluste valmistamiseks?
6. Mis määrab käsikaarkeevituse elektroodide keevitustehnoloogilised omadused (keevismetalli omadused, räbu eemaldatavus, keevitusasendid jm)?

7. Milliste põhimõtete järgi valitakse kaarkeevitusel elektroodi või keevitustraadi läbimõõd ja keevitusvool?
8. Missuguste keevitusprotsesside korral kasutatakse pidevat keevituselektroodi traadi kujul? Mis on selle eelised?
9. Mis ülesandeid täidab käsikaarkeevitusel elektroodi kate?
10. Mille poolest erineb täidistraat täistraadist ja kattega elektroodist?
11. Loetlege MIG/MAG-keevituse eelised käsikaarkeevituse ees?
12. Milliste keevitusprotsesside korral ja metallide keevitamisel kasutatakse kaitsegaasina süsihappegaasi, argooni, segugaase või heeliumi?
13. Mis on keevitusrübusti põhilised ülesanded rübustikaarkeevitusel?
14. Kirjeldage, mille poolest erineb poldi vastakkaarkeevitus poldi kontaktkeevitusest?
15. Mille poolest erineb plasmakeevitus TIG-keevitusest?
16. Milliseid kaitsegaase kasutatakse TIG-keevitusel?
17. Miks ei kasutata TIG- ja MIG/MAG-keevitusel rübusteid?
18. Miks eelistatakse sulamatu elektroodiga keevitamisel elektroodimetallina volframi?
19. Kuidas toimub MAG-keevitusel keevisvanni kaitse ümbritseva õhu eest ja keevismetalli desoksüdeerimine?
20. Kirjeldage, millised keemilised reaktsioonid toimuvad gaaskeevituse leegis ja seostage neid leegi piirkondadega.
21. Kuidas toimub keevitusleegi temperatuuri ja soojusvõimsuse reguleerimine gaaskeevitusel?
22. Mis on parem- ja vasakkeevituse erinevus gaaskeevitusel?
23. Kuidas saab gaaskeevituse põletit kasutada ka gaaslõikamiseks?
24. Mis on soojusallikaks termiitkeevitusel?
25. Kirjeldage elektronkiirkeevituse olemust ja eeliseid võrreldes kaarkeevitusega.
26. Millist tüüpi laserite kasutamisel saab laserikiire juhtimiseks kasutada kiudoptilist kaablit?
27. Mis on soojusallikaks elektrirübustikeevitusel?
28. Kirjeldage kontaktkeevituse (takistuskeevituse) olemust ja erinevust kaarkeevituse protsessidest.
29. Mille poolest erineb takistuspõkk-keevitus sulatuspõkk-keevitusest ja millal tekib suurem materjali jämedumine keevitustsoonis?
30. Millist kahte põhilist ülesannet täidab punktcontactkeevitusel surve rakendamine keevituselektroodidele?
31. Miks ei kasutata kontaktkeevitusel kaitsegaase ega rübusteid?
32. Milline kontaktkeevituse parameeter – surve, aeg, voolutugevus, ülemineku-takistus – mõjutab kõige rohkem eralduvat soojushulka (vt valem kontaktkeevitusel)?

33. Kirjeldage elektroodidele surve ja voolu rakendamise järjestust e ajagraafikut punktkontaktkeevitusel.
34. Kuidas valmistatakse joonkeemisõmblusi kontaktkeevitusega?
35. Milliseid tooteid valmistatakse põkk-kontaktkeevitusega ja missuguste toodete korral on see protsess on eelistatuim?
36. Mis on projektsioonkontaktkeevituse (reljeefkontaktkeevituse) olemus ja eelis?

### **Tardfaaskeevitus**

1. Kirjeldage külmsurvekeevituse olemust ja protsessil esinevaid nähtusi.
2. Mille poolest erineb inertshõõrdkeevitus otshõõrdkeevitusest? Millise kujuga detaile liidetakse eelistatult nende protsessidega?
3. Kirjeldage difusioonkeevituse olemust ja miks on tema kasutamine piiratud?
4. Kirjeldage plahvatuskeevituse olemust, milline on liitepinna kuju ja kuidas see mõjutab keevisliite omadusi?

### **Plastide keevitus**

1. Millist keevitusmeetodit (tardfaas- või sulakeevitus) kasutatakse peamiselt plastide keevitamisel ja kirjeldage selle põhimõtet?
2. Loetlege plastide keevitamise põhimeetodid ja milliseid neist kasutatakse torude liitmisel?
3. Millal kasutatakse plastide keevitusel ettekuumutud plaati?
4. Mille poolest erineb kuumgaaskeevitus ekstrusioonkeevitusest?
5. Mis on implantaatkeevitus ja kus seda kasutatakse?

### **Jootmine**

1. Tooge jootmisprotsessi määratlus.
2. Kirjeldage jootmise ja sulakeevituse põhimõttelist erinevust.
3. Millised valmistusprotsessi parameetrid mõjutavad oluliselt jooteliidete tugevust?
4. Millest lähtudes valitakse joodis?
5. Milles seisneb joodisega märgamine jootmisprotsessis?
6. Millest oleneb jootepilu suuruse valik?
7. Millised on jooteliidete põhitüübid?
8. Loetlege põhijoodiste grupid?
9. Millised on jooteräbustite ülesanded?
10. Milliseid jootmismeetodeid kasutatakse nii kõva- kui pehmejoodisjootmisel?

### **Liimimine**

1. Mis on liimliide ja kuidas seda valmistatakse?
2. Mille poolest erineb konstruktsiooniliim mittekonstruktsiooniliimist?
3. Milliste konstruktiivsete lahendustega saab vähendada pingeid põkkliimliidetes?
4. Loetlege liimimise põhietapid.

## **Liidete katsetamine ja liitmisprotsessi valik**

1. Mis on keevitusdefekt ja kuidas neid liigitatakse?
2. Loetlege sisemisi keevitusdefekte ja nende määramise meetodeid.
3. Loetlege väliseid keevitusdefekte ja nende määramise meetodeid.
4. Millises seisnevad keevisliidete purustavad katsed?
5. Millised mittepurustava kontrolli meetodid võimaldavad määrata sisemiste keevitusdefektide olemasolu ja mõõtmeid?

## **Termolõikus**

1. Kirjeldage ajaliselt terase gaaslõikamise etappe.
2. Milliseid tingimusi peavad rahuldama metallisulamid selleks, et neid saaks töödelda gaaslõikamisega?
3. Milliseid termolõikuse viise kasutatakse metallide lõikamisel, milliseid ei ole võimalik töödelda gaaslõikamisega?
4. Millal ja miks on otsatarbekohane kasutada pakettlõikust?
5. Miks ja milliste materjalide puhul juhitakse lõikamisel hapnikku rauapulbrit?
6. Milline on põhimõtteline vahe plasmakaar- ja plasmajugalõikamisel?
7. Millised on plasmalõikamise eelised hapniklõikamise ees?
8. Milliseid lõikemeetodeid kasutatakse roostevaba terase ja alumiiniumi lõikamisel?
9. Loetlege laserlõikamise eelised ja puudused?

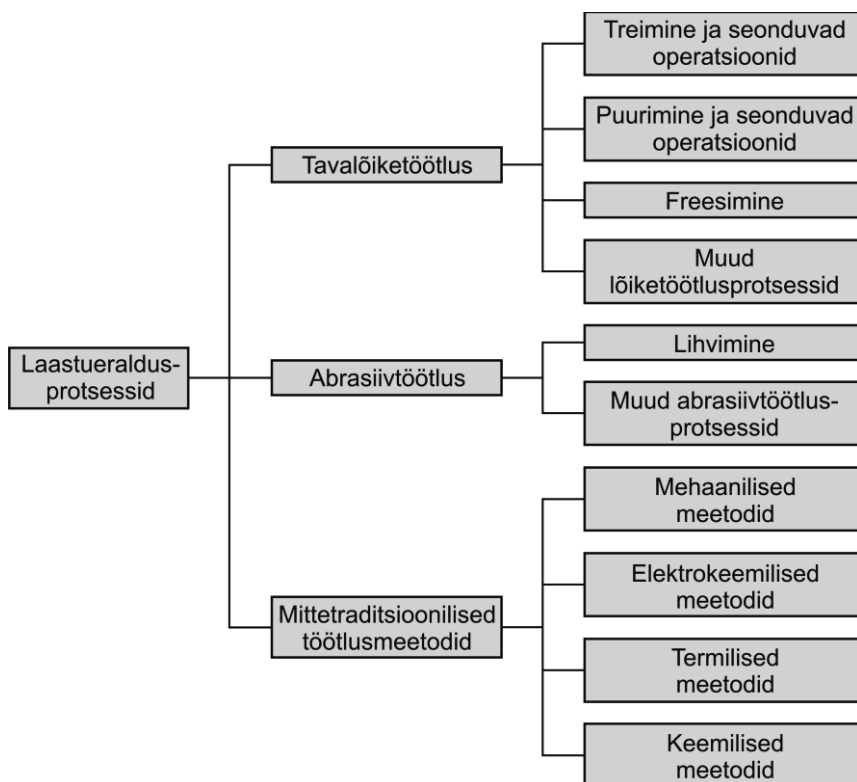
## 12. LÕIKETÖÖTLUS

<p>12.1. LÕIKETÖÖTLUSE ALUSED</p> <p>12.1.1. Lõikeprotsessid</p> <p>12.1.2. Laastutekkeprotsess</p> <p>12.1.3. Lõikeprotsessi mehaanika</p> <p>12.1.4. Soojusnähtused laastu-eraldusprotsessis</p> <p>12.1.5. Lõikevedelikud</p> <p>12.2. LÕIKERIISTAD</p> <p>12.2.1. Üksservlõikuri geomeetria</p> <p>12.2.2. Mitmikservlõikurid</p> <p>12.2.3. Terikumaterjalid</p> <p>12.2.4. Teriku kulumine ja püsivus</p> <p>12.2.5. Lõiketöödeldavus</p> <p>12.3. TREIMINE JA SISETREIMINE</p> <p>12.3.1. Lõikeparameetrid treimisel</p> <p>12.3.2. Treimisprotsess ja treiterad</p> <p>12.3.3. Universaaltreipingid</p> <p>12.3.4. Muud treipingid</p> <p>12.3.5. Sisetreimine ja sisetreipingid</p> <p>12.4. PUURIMINE JA TEISED AVALÕIKEPROTSESSID</p> <p>12.4.1. Avalõikeprotsessid, avalõikurid</p> <p>12.4.2. Lõikeparameetrid puurimisel</p> <p>12.4.3. Puurpingid</p> <p>12.5. FREESIMINE</p> <p>12.5.1. Freesimisprotsessid ja freesid</p>	<p>12.5.2. Lõikeparameetrid freesimisel</p> <p>12.5.3. Freespingid</p> <p>12.6. HÖÖVELDUS</p> <p>12.6.1. Hõöveldusprotsess ja hõövellõikurid</p> <p>12.6.2. Hõövelpingid</p> <p>12.7. KAMMLÕIKUS</p> <p>12.8. KEERMESTUS</p> <p>12.9. HAMBALÕIKUS</p> <p>12.10. LIHVIMINE JA MUUD ABRASIIVTÖÖTLUS-PROTSESSID</p> <p>12.10.1. Abrasiivid ja abrasiivlõikurid</p> <p>12.10.2. Lihvimisprotsess</p> <p>12.10.3. Lihvimismeetodid ja lihvpingid</p> <p>12.10.4. Muud abrasiivtöötlusmeetodid</p> <p>12.11. MITTETRADITSIOONILISED TÖÖTLUS-MEETODID</p> <p>12.11.1. Mehaanilised töötlusmeetodid</p> <p>12.11.2. Elektrokeemilised töötlusmeetodid</p> <p>12.11.3. Termilised töötlusmeetodid</p> <p>12.11.4. Keemiline töötlus</p> <p>12.11.5. Töötlusviisi valik</p> <p>12.12. KORDAMISKÜSIMUSED</p>
--	---

## 12.1. LÕIKETÖÖTLUSE ALUSED

**Laastueraldusprotsessid** (*material removing processes*), praktikas tuntud kui **lõiketöötlus** (*machining*) moodustavad materjali eraldusprotsesside perekonna, mille käigus toorikult eemaldatakse liigne materjal lõpliku geomeetria ja täpsusega detaili saamiseks. Protsesside „puu” on näidatud Joonisel 12.1. Kõige tähtsamaks „puuharuks“ on **tavalõiketöötlus** (*conventional machining*), mille puhul terava lõikeriista abil mehaaniliselt eemaldatakse materjali soovitava kujuga (geomeetriaga) detaili saamiseks. Kolm lõiketötluse põhiprotsessi on treimine, puurimine ja freesimine. Muud lõiketötlusprotsessid hõlmavad hõveldamist, kammlõikamist ja saagimist. Laastueemaldusprotsesside eraldi rühma moodustab **abrasiivtöötlus** (*abrasive machining*), mille käigus materjal eemaldatakse mehaaniliselt mikrolaastuna kõvade abrasiivosakeste poolt. Siia rühma kuuluvad lihvimine, plankimine, superfiniš ja poleerimine (vt p 12.10).

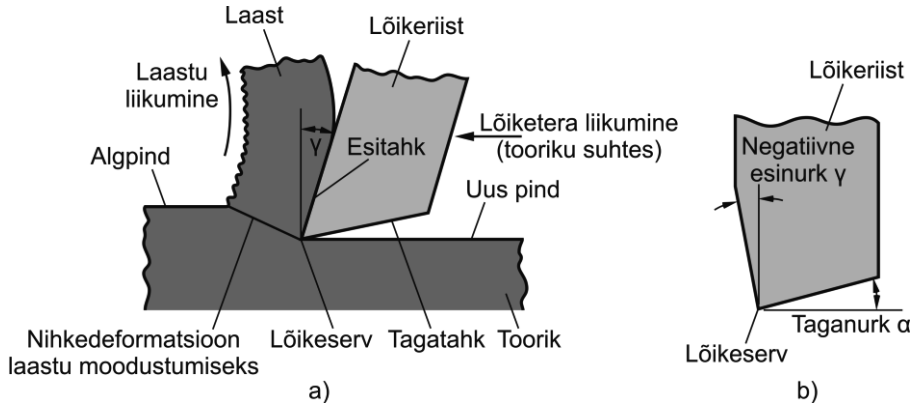
**Mittetraditsioonilisel töötusel** (*nontraditional machining*) kasutatakse materjali eemaldamiseks teisi energialiike kui tavalõiketöötusel terava lõikeserva või abrasiivi osakestega. Kasutatakse mehaanilist, elektrokeemilist, keemilist ja termilist töötlust või nende kombinatsiooni (vt p 12.11).



Joonis 12.1. Laastueraldusprotsesside liigitus



**Lõiketöötlus** (*machining*) on töötlemisviis, mille puhul soovitava kuju, mõõtmete ja pinnakvaliteediga detail saadakse toorikult materjalikihi mahalõikamisega. Lõiketöötlusel toimub materjali eraldamine valdavalt deformeerimisega nihkel. Tekkinud laast juhitakse eemale, mille tulemusena moodustub uus pind. Protsessi kirjeldab Joonis 12.2.



**Joonis 12.2.** Lõiketöötlaste skeem ristõikes: a – teriku esinurk  $\gamma$  on positiivne; b – teriku esinurk  $\gamma$  on negatiivne

Lõiketöötlus on üks tähtsamaid valmistusprotsesse, mille tulemusena valmib suurem osa masinate ja aparatuuride osadest. Lõiketöötlaste eelised on:

1. Töödeldavate materjalide mitmekesisus. Teoreetiliselt on võimalik lõiketöötelda kõiki tahkiseid, sh plaste ja komposiitmaterjale. Tingituna materjali suurest kõvadusest ja haprusest valmistab raskusi keraamika lõiketöötlus, kuid enamust keraamilisi materjale on võimalik edukalt lõigata abrasiivtöötlustega. Samuti on võimalik lõiketöötelda karastatud teraseid nüüdisaegsetest lõikeriistmaterjalidest lõikureid või abrasiivtöötlust kasutades.
2. Detailide kuju ja geomeetria suur mitmekesisus. Lõiketöötlust saab kasutada korrapärase geomeetriaga pindade, nagu tasapinnad, silindrilised pinnad ja ümaravad, valmistamiseks. Kasutades erineva kujuga lõikeriistu ja andes neile erinevaid liikumistrajektore, on võimalik saada mittekorrapärase geomeetriaga pindu, nt keeret või T-sooni. Kombineerides erinevaid lõikeprotsesse, saab valmistada keeruka kujuga pindu. Erinevalt valu- või survetöötlastest saab valmistada täis- või teravnurkade all asetsevaid pindu, sooni jm.
3. Mõõtmete täpsus. Lõiketöötlustega on võimalik valmistada võrreldes teiste valmistusmeetoditega (valu, survetöötlaste) palju täpsemaid (väiksemate tolerantsidega) ja väiksema pinnakaredusega pindu.
4. Majanduslik põhjendus. Väikeseeria- ja üksiktootmise tingimustes võib lõiketöötlaste olla majanduslikult põhjendatum kui valu- või survetöötlaste.

Lõiketötluse puudused on:

1. Lõiketötlusega tekivad jäätmed laastu kujul.
2. Sageli võib töötlsaeg olla pikem kui alternatiivseid valmistusprotsesse kasutades (valu ja survetöötus).
3. Suured kulutused seadmetele, energiale ja tööjõule.
4. Ebasoovitavad kaasmõjud nagu töödeldud pinna kalestumisest tingitud suurenenud kõvadus ja sisepinged, mis võivad halvendada lõiketöödeldavust, põhjustada detailide kõverdumist või kiirendatud korrodeerumist.

Üldjuhul teostatakse lõiketöötlust pärast sellised valmistusprotsesse nagu valu ja survetöötus, kusjuures detailidele antakse lõplik geomeetria, mõõtmed ja pinna-kvaliteet.

### 12.1.1. Lõikeprotsessid

Materjalide lõiketöötus ei ole mitte üks tehnoloogiline protsess, vaid protsesside rühm.

Iseloomulik tunnus on toorikult materjalikihi eraldamiseks lõikeriista kasutamine. Laastu eraldamiseks on vaja lõikeriista ja tooriku liikumist teineteise suhtes. Üldjuhul nimetatakse seda liikumist lõikeliikumiseks, mida iseloomustatakse **lõikekiirusega** (*cutting speed*). Lõikeliikumine antakse toorikule, nt treimisel, kuid paljudel juhtudel lõikeriistale, nagu nt puurimisel ja freesimisel. Teisene liikumine kindlustab lõikeprotsessi pidevuse ja seda nimetatakse ettenihkeliikumiseks ja vastava liikumise kiirust **ettenihkeks** (*feed*). Ettenihkeliikumine kulgeva liikumisena antakse kas lõikeriistale või toorikule. Ümarlihvimisel (vt p 12.10.3) antakse detailile väiksema pöörlemissagedusega pöördliikumine, mida nimetatakse **ringettenihkeks** (*rotary feed*).

Kindla geomeetriaga detailide, nt keermelõikamisel või hammasrataste valmistamisel rullumismeetodil (vt p 12.8 ja 12.9) peab detaili pöörlemiskiirus olema kindlas vahekorras lõikuri kiirusega. Sellist liikumist nimetatakse **kooskõlaliikumiseks** (*coordinated rotating*).

Lõiketöötusel tungib lõikeriist materjali kiilukujulise terikuna (vt Joonis 12.2) ning kombineerides nii lõikeriista lõikeserva kaju kui ka tema liikumistrajektooriga, on võimalik valmistada soovitud geomeetriaga pindu.

### Lõikeprotsesside põhitüübid

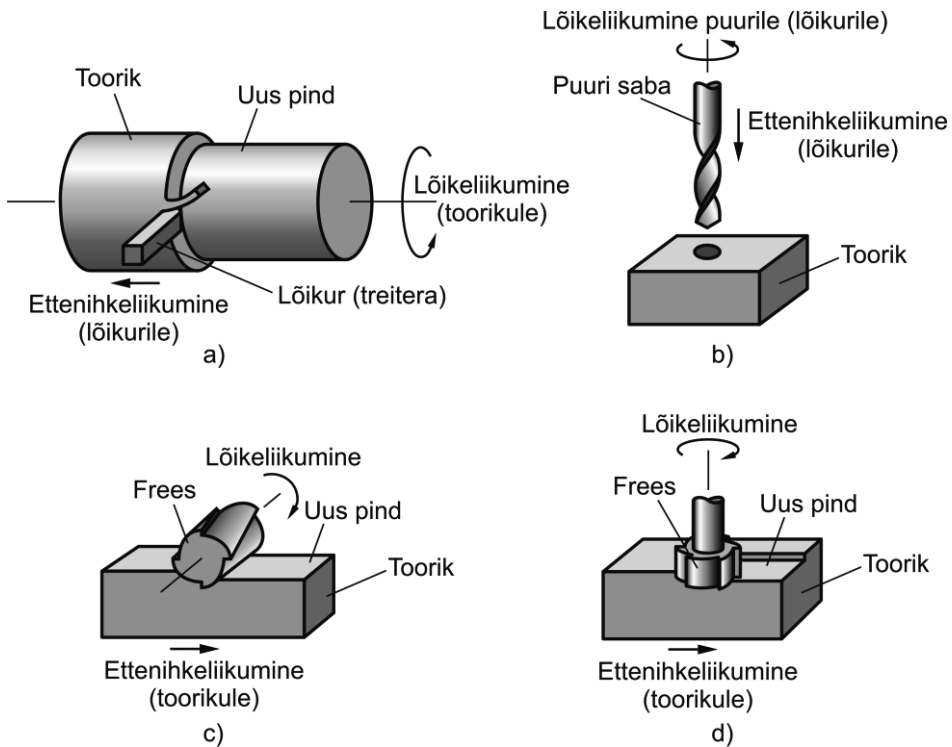
Erinevate lõiketöötusprotsessidega on võimalik saada kindla geomeetria ja tekstuuriga pindu.

**Treimisel** (*turning*) kasutatakse pöörlevalt toorikult materjal kihi eraldamiseks **üksservlõikurit** (*single-point tool, single-tip tool*) (Joonis 12.3a). Lõikeliikumine

antakse toorikule pöörleva liikumisena ja ettenihe saadakse lõiketera aeglasel liikumisel paralleelselt piki tooriku telge (pikitreimise näitel).

**Puurimist** (*drilling*) kasutatakse ümaravade saamiseks. Seda tehakse tavaliselt **mitmikservlõikuriga** (*multiple cutting-edge tool, multipoint tool*) – kahe lõikeservaga pöörleva lõikeriistaga, puuriga. Ettenihkeliikumine antakse puurile paralleelselt pöörlemisteljega liikumisena materjali sisse (vt Joonis 12.3b).

**Freesimisel** (*milling*) liigub pöörlev mitmikservlõikur, frees, üle töödeldava tooriku ja moodustab tasapinna või ettenihkeliikumise suunalise sirge pinna. Lõikeliikumine antakse pöörlevale freesile. Freesimise kaks põhiviisi on **silinderfreesimine** ehk **perifeerfreesimine** (*peripheral milling, plain milling*) (Joonis 12.3c) ja **laupfreesimine** (*face milling*) (Joonis 12.3d).



**Joonis 12.3.** Lõiketöötlemise põhiprotsessid: a – treimine; b – puurimine; c – silinderfreesimine (perifeerfreesimine); d – laupfreesimine

Ülejäänud tavalilõiketöötlemisprotsessid on hõõvelvõeldus, kammlõiketus ja saagimine. Lõiketöötlemisel sõltub töötlemistõpsus töötlemisprotsessist ja on kõrgeim treimisel ja väiksem freesimisel.

## Lõikeriist

**Lõikeriist** ehk **lõikur** (*cutting tool*) koosneb tooriku ja laastuga kokku puutuvast **terikust** (*cutting part*) ja **lõikuri kinnitusosast** ehk **lõikuri pidemest** (*tool shank*). Lõikeriista terikul on üks või mitu teravat lõikeserva ja see on valmistatud toorikust kõvemast materjalist. Teriku lõikeservade ülesandeks on eraldada toorikult laastu. Terikul on kaks tahku: **esitahk** ehk **esipind** (*rake face*) ja **tagatahk** ehk **tagapind** (*flank*). Esitahk, mida mööda juhatakse tekkinud laast lõikest eemale, on ruumis orienteeritud kindla nurga all, mida nimetatakse **esinurgaks** (*side rake angle*) tähistusega  $\gamma$ . Seda nurka mõõdetakse esipinna ja töödeldava pinnaga risti asetseva tasandi vahel. Esinurk võib olla nii positiivne kui ka negatiivne (vt Joonis 12.2) ja nurga suurus oleneb töödeldava materjali omadustest. Esinurga suurenedes (teravam terik) tungib terik paremini töödeldavasse materjali, seejuures vähenevad lõikejõud ja lõiketemperatuur. Esinurga suurenedes üle optimaalse väheneb teriku serva ristlõige, halvenevad soojuse äravoolu tingimused lõikeriista pidemesse ja lõikepinkki, mille tulemusena lüheneb püsivusaeg.

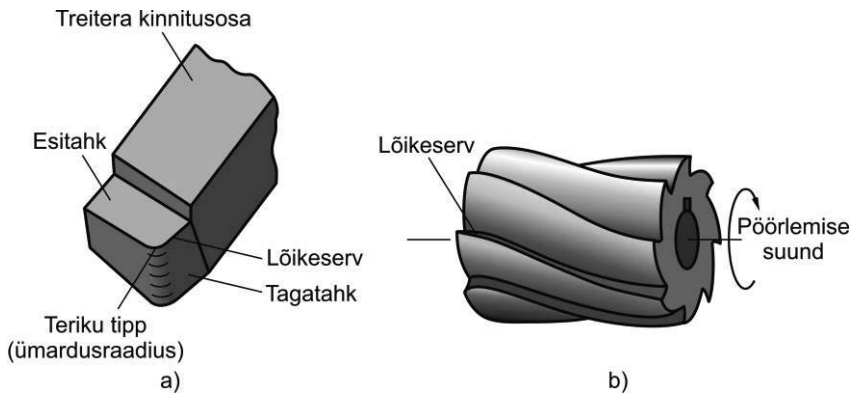
Teriku tagatahk on suunatud töödeldud pinna poole ning selle asetus peab tagama teriku ja töödeldud pinna vahelise hõõrdumise ja hõõrdkulumise vähenemise. Tagatahu orienteerituse ruumis määrab **taganurk** (*side relief angle, side clearance angle*) tähistusega  $\alpha$ .

Enamik lõikeriistu on keerulisema geomeetriaga, kui näidatud Joonisel 12.2.

Eristatakse kahte lõikeriistade pühitüüpi:

- a) üksservlõikurid;
- b) mitmikservlõikurid.

**Üksservlõikuril** (*single-point tool, single-tip tool*) on üks lõikeserv ja teda kasutatakse treimisel (Joonis 12.4 a). **Mitmikservlõikuritel** ehk **hulkservlõikuritel** (*multipoint tool, multiple-cutting-edge tool*) on enam kui üks lõikeserv ja neile antakse tavaliselt pöördliikumine. Neid kasutatakse tavaliselt puurimisel ja freesimisel (Joonis 12.4 b). Olgugi, et frees erineb oma kujult üksservlõikurist, siis paljud tema geomeetria elemendid on sarnased, kuna freesi iga lõikehammas meenutab oma kujult treiterikut.



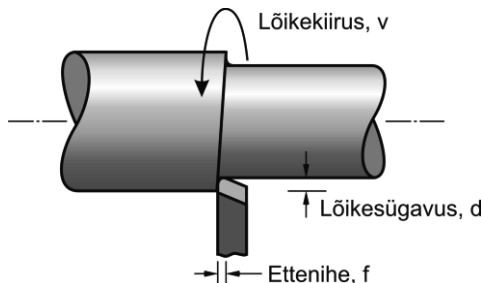
**Joon 12.4.** Lõikeriistad: a – ükskeservlõikur (treilõikur); b – mitmikeservlõikur (kruihammas- tega silinderfrees)

### Lõikerežiim

**Lõikerežiim** (*cutting conditions*) on lõikeprotsessi määravate parameetrite (ettenihe, lõikesügavus, lõikekiirus) kogum.

Lõiketöötlus toimub lõikeriista ja tooriku vahelise suhtelise liikumise tulemusena. Esmast liikumist, mis tagab laastu eraldamise toorikult, nimetatakse **lõikeliikumiseks** (*speed motion*) ja see toimub kindla lõikekiirusega  $v$ . **Lõikekiirus** (*cutting speed*) on lõikuri lõikeserva ja töödeldava pinna suhteline kiirus. Lõikekiirust mõõdetakse praktikas m/min, harvem m/s. Lõiketöötlusel liigub lõikeriist aeglaselt piki töödeldavat toorikut ja seda nimetatakse ettenihkeks. **Ettenihe** (*feed*) on tööriista (või tooriku) poolt läbitud teekond töötlustsükli (pöörde, käigu, kaksikkäigu jms) või selle osa (näiteks tööriista hamba) kohta. Ettenihe tagab lõikeprotsessi pidevuse. Ettenihet mõõdetakse treimisel ja puurimisel mm/pöörde kohta, teiste protsesside korral mm/min või mm/lõikeserva kohta. **Lõikesügavuse** (*depth of cut*)  $d$  all mõeldakse teriku tungimise sügavust toorikusse ehk lihtsustatult terikuga eraldatava materjalikihi paksust.

Lõikeparameetrid treimisel on näidatud Joonisel 12.5.



**Joonis 12.5.** Lõikeparameetrid treimisel: lõikekiirus, lõikesügavus ja ettenihe

Lõiketöötlusmeetodid on:

1. **Koorivtöötlus** ehk **koorimine** (*roughing*), mille käigus valandite, sepi- ja stantside jt toorikute esialgsel lõiketöötlusel eemaldatakse suurem osa töötlusvarust. Koorivtöötlusel eraldatakse enne siluvtöötlust paks materjalikiht ilma nõueteta pinna täpsuse ja -kvaliteedi osas. Juhul kui toorikult on vaja eemaldada materjal mitme kihina, siis esimene või esimesed neist teostatakse koorivtöötlusena. Koorivtöötlusel kasutatakse võimalikult suurt ettenihet ja lõikesügavust, kuid siluvtöötlusega võrreldes madalamat lõikekiirust.
2. **Siluvtöötlus** ehk **poolpuhas töötlus** (*semifinishing*) on koorivtöötlusele järgnev, täpsemat kuju ja mõõtmeid ning siledamat pinda tagav lõiketöötlus. Lõiketöötlus toimub suhteliselt väikeste ettenihete ja lõikesügavustega, kuid suurema lõikekiirusega kui koorivtöötlusel.
3. **Viimistlustöötluste** (*finishing*) tulemusena saadakse lõplikult viimistletud (puhas) pind.

### Lõikevedelikud

Lõiketöötlusel kasutatakse sageli lõikeriista jahutamiseks ja hõõrdumise vähendamiseks jahutavaid või määrivaid **lõikevedelikke** ehk **jahutus-määrdevedelikke** (*cutting fluids*). Lõikevedeliku kasutamise vajadus on tavaliselt kajastatud lõikerežiimi parameetrite valikus. Tooriku ja lõikeriista materjalist oleneva lõikerežiimi määramisel on lõikevedelikel otsustav roll lõiketöötluse õnnestumisel.

### Metallilõikepingid

**Metallilõikepingid** ehk **lõikepingid** (*machine tools*) leiavad kasutamist lõiketöötlusel. Lõikepink on mehhaniseeritud või automatiseeritud tootmisvahend (masin), mis tööriista ja tooriku omavahelisel liikumisel annab toorikule etteantud kuju (geomeetria).

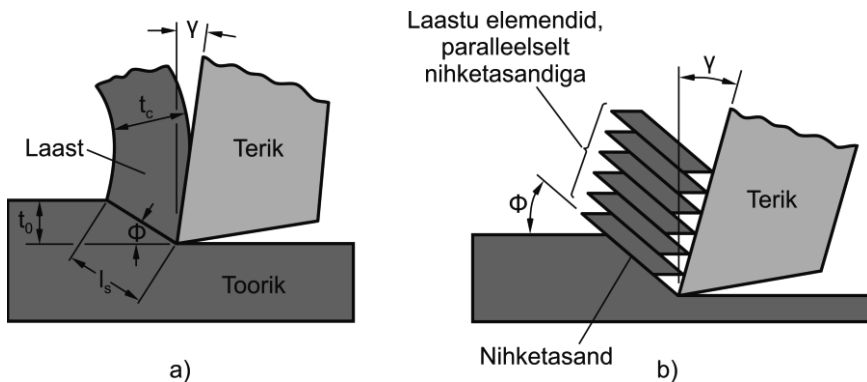
Metallilõikepinke kasutatakse tooriku kinnitamiseks, lõikeriista positsioneerimiseks tooriku suhtes, lõikeprotsessi varustamiseks vajaliku energiaga ning lõikerežiimide seadistamiseks. Lõikepinkide kasutamisel tuleb tagada detailide vajalik täpsus ja tulemuste korratavus. Seejuures on töötlemistäpsus suurel määral süsteemi "lõikepink-kinnitusrakis-toorik" jäikusest. Erinevate lõiketöötlusprotsesside korral kasutatakse erinevaid lõikepinke nagu treipingid, freespingid, puurpingid jne või on ühes lõikepingis kombineeritud mitu lõikeprotsessi. Selliseid lõikepinke nimetatakse **töötluskeskuseks** (*machining center*), millel on võimalik tooriku ühe paigaldusega teha erinevaid operatsioone (treimine, puurimine, freesimine, sisetreimine jt) ja mida juhib **arvjuhtimissüsteem** (*computer numerical control system, CNC system*). Tavalõikepinke juhitakse operaatori (töölise) poolt käsitsi, kelle tegevus seisneb tooriku kinnitamises lõikepink, lõikeriistade vahetamises, lõikeparameetrite ja

lõiketrajektoori seadistamises juhtimishoobade jm mehaaniliste vahendite abil. Paljudes nüüdisaegsetes lõikepinkides on pinkide juhtimine täielikult automati-seeritud. Sellised lõikepingid on tuntud **arvjuhtimispinkidena** ehk **CNC-pinkidena** (*computer numerical control machine, CNC-machine*).

### 12.1.2. Laastutekkeprotsess

Enamiku lõiketöötlusprotsesside geometria on keeruline. Seetõttu kasutatakse laastutekkeprotsesside kirjeldamiseks **ortogonaallõikemudelit** (*orthogonal cutting model*). Tavaliselt vaadeldakse lõikekiirusega risti oleva kiiliteriku lõikeserva tungi-mist materjali, mille puhul jõud mõjuvad lõikeprotsessis ühes tasandis ehk kahe-mõõtmeliselt (Joonis 12.6). Praktikas ei ole lõikeservad ja teriku tahud lõikekiirusega risti ja protsess on keerulisem – tegemist on kolmemõõtmelise protsessiga. Ortogonaalmudel võimaldab kirjeldada laastu tekkeprotsessi, mõjuvaid jõudusid ja nähtusi lõikeprotsessis.

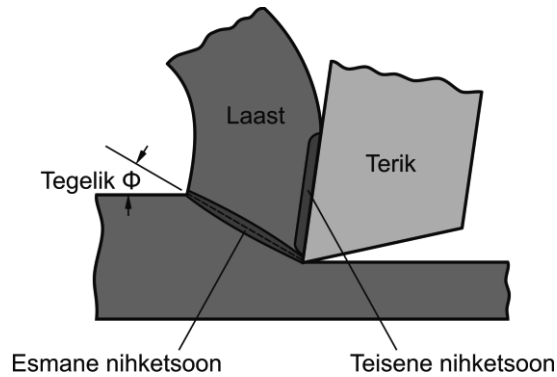
Lõikeprotsessis kiiliteriku lõikeserv deformeerib sissetungimisel tema ees olevat materjali elastselt ja plastelt. Materjali nihkedeformatsiooni tulemusena moodustub nn **nihketasandis** (*shear plane*) laast (Joonis 12.6b). Nihketasand on tasand, mida mööda toimub nihe plastse deformatsiooni käigus ja mis asetseb lõikekiiruse suhtes nihkenurga  $\Phi$  all. Lõikeserva edasitungimisel materjali terav lõikeserv purustab selle ja eraldab põhimaterjalist tekkivad üksikud laastu elemendid paksusega 1...10  $\mu\text{m}$ , mis nihkuvad üksteise suhtes ja moodustavad laastu. Laast omandab kihilise struktuuri. Laastutekkeprotsessis esialgne laastu paksus  $t_0$  suureneb paksuseni. Plastsete deformatsioonide toimel toimub seega laastu jämendumine, mida iseloomustab **laastu paksenemistegur** (*chip thickness ratio*)  $r = t_0/t_c$ . Kuna laastu paksus pärast lõikamist on suurem kui esialgne, siis see suhe on alati väiksem kui 1.



**Joonis 12.6.** Ortogonaallõikamine: a – lõikamise skeem; b – laastu tekkimine lõikeprotsessis

Lõikeprotsessis levivad deformatsioonid lisaks laastule veel töödeldud pinnale ja lõikeserva ette, mille tulemusena töödeldud pind muutub kalestumise tõttu kõvemaks ja hapramaks.

Praktikas ei toimu nihkedeformatsioon ühes tasandis, vaid õhukeses deformatsiooni-piirkonnas (vt Joonis 12.7). Lisaks esmasele nihkedeformatsioonile nihketasandis esineb ka nn teisene nihketsoon tingituna hõõrdumisest laastu ja teriku esipinna vahel.



**Joon. 12.7.** Laastu tegelik tekkemehhanism

Laastu moodustumise protsess oleneb töödeldava materjali omadustest ja lõike-režiimist, mille tulemusena tekivad erinevat tüüpi laastud:

1. **Murdelaast** ehk **lülilaast** (*discontinuous chip, segmented chip*), (Joonis 12.8a), koosneb ebakorrapärase kujuga eraldi või nõrgalt seotud osadest ja tekib suhteliselt habraste materjalide (malm, pronks) töötlemisel väikestel lõikekiirustel. Tekkinud pind on ebatasane ja seoses muutuvate lõikejõududega võivad lõikamisega kaasneda vibratsioonid. Suur hõõrdumine laastu ja teriku esitahu vahel, aga ka suur ettenihkekiirus ja suur lõikekiirus võivad soodustada sellist tüüpi laastu teket ka teiste materjalide töötlemisel.
2. **Voolavlaast** ehk **pidevlaast** (*continuous chip*), (Joonis 12.8b), tekib plastsete materjalide lõikamisel suurte kiirustega ja teriku suure esinurga puhul. Töödeldud pind on sile. Pikk, voolav laast keerdub lõikeprotsessis spiraali ja kerib ennast ümber detaili või teriku, valmistades probleeme. Seetõttu kasutatakse eriti automaatpinkides lõikuritel **laastumurdikut** (*chip breaker*) (vt p. 12.2), mis muudavad pideva laastu tükkideks ja võimaldavad nii mehhaniseeritult laastu koguda ja transportida lõikepingist eemale.
3. **Terikukasvajaga voolavlaast** (*continuous chip with built-up edge*) võib tekkida plastsete materjalide (alumiinium, vask) lõiketöötlusel väikeste või keskmiste lõikekiirustega. Laastu hõõrdumisel vastu teriku esitahu võib laast

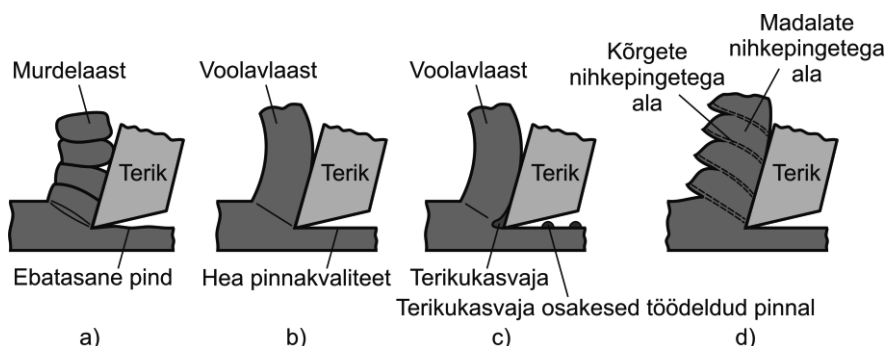


selle külge kleepuda, moodustub terikukasvaja (Joonis 12.8c). Tulemusena halveneb töödeldud pinna kvaliteet ja täpsus.

**Terikukasvaja** (*built-up edge*) moodustumine on tsükliline protsess – esialgu moodustis tekib ja kasvab mõõdetelt, mille edenedes osa temast kantakse ära laastuga, osa surutakse töödeldud pinda. Puhastõõtlemlisel on terikukasvaja negatiivne nähtus, kuid koorival töötlemisel isegi positiivne, kuna kasvab teriku esinurk ja lõikur muutub teravamaks.

Terikukasvajast saab vältida järgmiste võtetega: lõikekiirust suurendades, lõikesügavust vähendades, suurendades teriku esinurka või kasutades lõikevedelikke. Praktikas saab terikukasvaja tekkimist tuvastada selle järgi, et töödeldud pinna kvaliteet halveneb.

4. **Elementlaast** ehk **astmeline laast** (*serrated chip, shear-localized chip*) on voolavlaastuga sarnane poolpidev laast, mille välimine pind on sakiline, terikupoolne pind aga sile (Joonis 12.8d). Võib tekkida rasktöödeldavate materjalide nagu titaani, niklisulamite ja roostevabade teraste lõiketõõtlusel suurte lõikekiirustega.



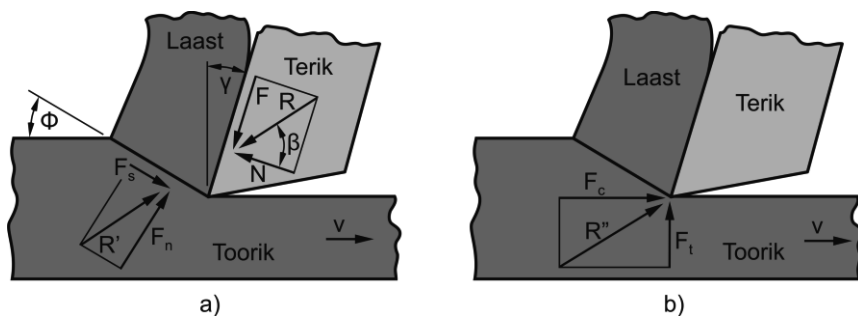
**Joonis 12.8.** Laastu tüübid: a – murdelaast; b – voolavlaast; c – terikukasvajaga voolavlaast; d – elementlaast

### 12.1.3. Lõikeprotsessi mehaanika

#### Jõud lõikeprotsessis

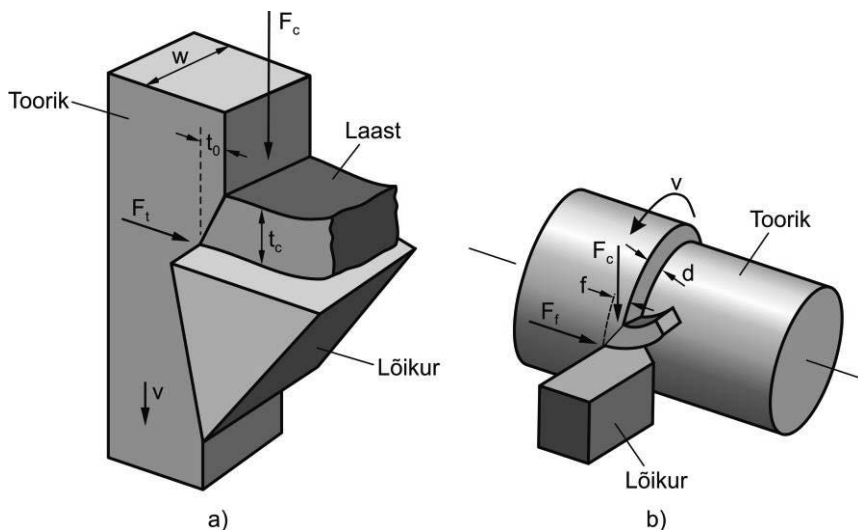
Vaatleme laastule ja terikule mõjuvaid jõude lõikeprotsessi ortogonaalmudeli alusel (Joonis 12.9a). Terikule mõjuvaid jõude saab lahutada kaheks teineteisega risti olevaks komponendiks järgmiste vektoritena: **hõõrdejõud** (*friction force*)  $F$ , mis takistab laastu liikumist piki esitahku ja **normaaljõuks** (*normal force*)  $N$ . Mõlema jõu vektorite resultantjõud on vektor  $R$ . Terikule mõjuva resultantjõuga  $R$  võrdne jõud  $R'$  mõjub vastasuunas laastu poolt toorikule, kuna jõudude süsteem on tasakaalus. Laastule mõjuv **nihkejõud** (*shear force*)  $F_s$  põhjustab nihkedeformatsiooni nihketasandil. Selle jõuga risti on **normaaljõud** (*normal force to shear*)  $F_n$ . Praktikas ei

mõõdeta neid jõudude komponente, kuna nad olenevad suurel määral lõikerežiimist ja lõikeriista geometriast. Määratakse jõu komponendid meid huvitavas kahes suunas: lõikekiiruse suunas mõjuv jõukomponent, tuntud kui **lõikejõud** (*cutting force*)  $F_c$  ja temaga risti olev (laastu paksusest sõltuv) jõud, tuntud kui **eemaletõukejõud** (*thrust force*)  $F_t$ . Mõlemad jõud koos resultantjõuga on näidatud skemaatiliselt joonisel 12.9b.



**Joonis 12.9.** Lõikejõud ortogonaallõikamisel: a – terikule ja laastule mõjuvad jõud; b – terikule mõjuvad mõõdetavad jõud

Ortogonaalmudelit võib kasutada treimise ja teiste üksservlõikuritega protsesside ligikaudseks kirjeldamiseks niikaua, kui ettenihke suurus on väike võrreldes lõikesügavusega. Lõiketötluse praktikas lisandub veel ettenihkeliikumine ja **ettenihkejõud** (*feed force*)  $F_f$ . Üleminekut ortogonaalmudelilt tegelikule treimisele kirjeldavad Joonis 12.10 ja Tabel 12.1. Treimisel nimetatakse eemaletõukejõudu radiaaljõuks.



**Joonis 12.10.** Treimise ortogonaalmudel (a) ja tegelik skeem (b)

**Tabel 12.1.** Treimisprotsessilt ortogonaalmudelile üleminek

1.	<b>Treimine</b>	2.	<b>Lõikamise ortogonaalmudel</b>
3.	Ettenihke $f$	4.	Laastu paksus enne lõikamist $t_0$
5.	Lõikesügavus $d$	6.	Lõikelaius $w$
7.	Lõikekiirus $v$	8.	Lõikekiirus $v$
9.	Lõikejõud $F_c$	10.	Lõikejõud $F_c$
11.	Ettenihkejõud $F_f$	12.	Eemaletõukejõud $F_t$

Lõikeprotsessis mõjuvate jõudude suuruse teadmine on vajalik nii lõikeriista tugevusarvutustes, tooriku deformeerumise ja töötlemistäpsuse hindamisel, lõikepingi mehhanismide konstrueerimisel ning ajami-elektrimootori võimsuse määramisel.

Treimisel moodustab **lõikejõud** (*cutting force*)  $F_c$  resultantjõust 90...95 % ja määrab ca 99 % töötlemiseks vajalikust võimsusest ja selle järgi määratakse treipingi mootori võimsus. **Ettenihkejõud** (*feed force*)  $F_f$  moodustab tavaliselt 50 % lõikejõust, kuid kuna ettenihkekiirus on väike, siis on ka võimsuse vajadus väike ja sellega ei arvestata pingi mootori valikul. **Radiaaljõud** ehk **eemaletõukejõud** (*radial force, thrust force*)  $F_t$  moodustab tavaliselt kuni 50 % ettenihkejõust, surudes toorikut terikust eemale, ja võib mõjutada pikkade ja suhteliselt peenikeste võllide töötlemisel nende täpsust ning põhjustada detailide tünnikujulisust (Joonis 12.11). Silinderfreesimisel võib vastufreesimisel (vt p 12.5.1) see jõud suurendada pinnakaredust ja täpsust. Jõud lõikeprotsessis kasvavad materjali tugevuse ja kõvaduse, lõikesügavuse ja ettenihkekiiruse suurenedes. Lõikekiiruse kasvades kuni 100 m/min lõikejõud suureneb, kuid kiiruse edasisel suurenemisel jääb praktiliselt samale tasemele.

Lõikamisel mõjuvaid jõude on võimalik arvutada empiiriliste valemite abil.

### Lõikevõimsus

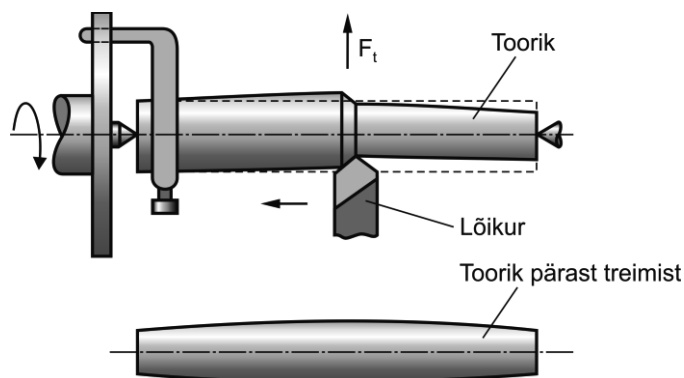
**Lõikevõimsus** (*cutting power*) arvutatakse lõikejõu  $F_c$  järgi:

$$P_c = F_c \cdot v, \quad (12.1)$$

kus  $P_c$  – lõikevõimsus, W;

$F_c$  – lõikejõud, N;

$v$  – lõikekiirus, m/s.



**Joonis.12.11.** Radiaaljõu (eemalduspea) mõju detaili kujule treimisel. Toorik on kinnitatud tsentrite vahele

#### 12.1.4. Soojusnähtused laastueraldusprotsessis

Lõiketöötlemisel muutub ligikaudu 98 % kogu kulutatud mehaanilisest energiast soojuseks, mille tulemusena võib lõiketsoonis teriku ja laastu piirpinnas temperatuur tõusta üle 600 °C. Ainult 2 % energiat salvestub elastse energiana laastus. Soojus tekib nii lõigatava materjali deformeerimise kui ka laastu ja tooriku hõõrdumisel vastu lõikeriista tahke. Suurem osa tekkinud soojusest (25...85 %) eemaldatakse laastuga, kuid märkimisväärne kogus läheb toorikusse (nt treimisel *ca* 10 %, puurimisel kuni 50 %) ja lõikeriista (2...8 %). Tooriku kuumenemisel muutuvad selle mõõtmised joonpaisumise tulemusena. Seetõttu on vaja soojusnähtusega arvestada nii täpsete detailide valmistamisel kui ka suure joonpaisumisteguriga materjalide nagu alumiinium või roostevaba austeniitteras siluvtöötlemisel. Tekkinud kuum laast võib kujutada ohtu tööpingi operaatorile. Kõrge temperatuur koos suurte kontaktpingetega põhjustavad teriku kõvaduse vähenemist ja kiiremat kulumist ning vähendavad tema **püsivusaega** (*tool life*).

Lõiketemperatuur kasvab lõikerežiimi parameetrite ning materjali mehaaniliste omaduste ja kõvaduse suurenemisel. Suurim mõju lõiketemperatuurile on lõikekiirusel, vähim mõju lõikesügavusel. Seetõttu on sageli vajalik, eriti automaatpinkide kasutamisel, soojuse eemalejuhtimiseks lõiketsoonist suunata sinna jahutavat lõikevedelikku.

#### 12.1.5. Lõikevedelikud

Lõikeprotsessi jahutamiseks ja laastu töötlemistsoonist eemaldamiseks, nt lihvimisel, kasutatakse **lõikevedelikke** ehk **jahutus-määrdevedelikke** (*cutting fluids*). Need täidavad järgmisi ülesandeid: a) lõiketemperatuuri alandamine laastu nihke- ja hõõrdetsoonis jõudude vähendamise ja soojuse eemalejuhtimise abil; b) hõõrdumise

vähendamine laastu ja teriku ning teriku ja tooriku vahel; c) laastu eemaldamine lõikepiirkonnast lihvimisel ja freesimisel.

Lisaks võivad lõikevedelikud vähendada lõikejõude ja vajalikku lõikevõimsust, tagada tooriku mõõtmete stabiilsust ja parandada pinna kvaliteeti, vältida teriku-kasvaja tekkimist, vähendada lõikeriista kulumist ja tõsta lõikeriista püsivusaega.

Lõikevedelikud jagunevad jahutavateks ja määrivateks.

**Jahutavate lõikevedelike** (*coolants*) ülesandeks on peamiselt soojuse eemalejuhtimine, alandades lõikeriista ja tooriku temperatuuri. Jahutavad vedelikud valmistatakse vee baasil, sageli õlide emulsioonidena vees. Jahutavad vedelikud on tõhusad suurte lõikekiiruste korral, kus soojuse eraldumine ja kõrge temperatuur on probleemiks.

**Määrdevedelikud** (*lubricants*) on peamiselt õlide baasil ja on tõhusad väikese lõikekiirusega (alla 120 m/min) lõikeprotsesside nagu keerrestamine keerme- puuridega (vt p 12.8) või kammlõikamine kammlõikuritega (vt p 12.7). Määrdevedelikud sisaldavad hõõrdumise vähendamiseks veel väävlit, fosforit, klooriühendeid, mis reageerides nii laastu kui ka teriku esitahuga, moodustavad seal tahke määrdeaine kelme. Praktikas mõlema lõikevedeliku tüübi juures eelpoolmainitud mõjud kattuvad.

Lõikevedelikke võib liigitada mitmete tunnuste järgi, neist levinum liigitus on järgmine:

- a) õlid;
- b) emulsioonid;
- c) sünteetilised vedelikud;
- d) poolsünteetilised vedelikud.

Lõikevedelikku võib juhtida lõiketsooni järgmiste meetoditega:

- a) **jugajahutus** (*flood cooling, flooding*), mille käigus jahutav vedelik suunatakse otse lõiketsooni pumba abil, nt treimisel vooluhulgaga 10 l/min ja freesimisel kuni 22 l/min;
- b) **udujahutus** (*mist cooling*), mille käigus jahutav vedelik suunatakse lõiketsooni kõrgsurve õhujoa poolt peenikeste piisakestena. Töötlemise käigus on toorik hästi nähtav;
- c) **kõrgsurvejahutus** (*high pressure cooling*), mille korral juhitakse jahutusvedelik suure surve (5,5...35 MPa) all otse lõiketsooni, mis toimib sageli ka laastumurdikuna.

Kasutamisel saastuvad lõikevedelikud mikrolaastudega, õlidega, prügiga, bakteritega, mistõttu nad kaotavad oma omadused või muutuvad ohtlikuks keskkonnale. Probleemi saab lahendada lõikevedeliku perioodilise uuendamisega, filtreerimisega,

tsentrifuugimisega jt võtetega või siis kuivtöötusega. Seoses järjest kasvavate keskkonnanõuetega muutub vanade lõikevedelike utiliseerimine kallimaks. Lõikevedeliku juhtimiseks lõiketsooni on vaja paaki, pumpa, filtreid, torustikke jm ja see nõuab perioodilist hoolt, mistõttu on levinud tendents kasutada **kuivlõiketöötlust** (*dry machining*), olgugi et tuleb vähendada lõikekiirusi lõikeriista ülekuumenemise vältimiseks. Lõikeriistade tootjad on välja töötanud sobivad terikumaterjalid (vt p 12.2.3) kuivlõiketöötluseks.

## 12.2. LÕIKERIISTAD

Lõiketöötlemisel kasutatav **lõikeriist** ehk **lõikur** (*cutting tool*) peab olema lõiketöötluseks sobiva kujuga. Lõikeriist koosneb **terikust** (*cutting part*), mis puutub lõikeprotsessis vahetult kokku tooriku ja laastuga, ja **lõikuri kinnitusosast** ehk **lõikuri pidemest** (*tool shank*) (vt Joonis 12.4). Teriku elementideks on **esitahk** (*rake face*) ja **tagatahk** (*flank*) ning nende lõikejoon, mida nimetatakse **lõikeservaks** (*cutting edge*). Treiteradel eristatakse vahetult töödeldud pinna poole suunatud **peatagatahku** (*major flank*) ja **abitagatahku** (*minor flank, heel*).

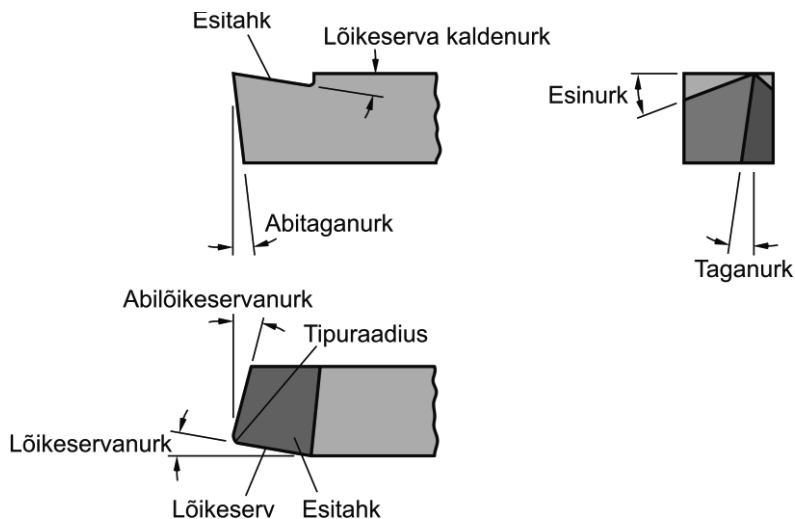
Lõikeserv võib olla sirgjooneline (tavaliselt mitmikservlõikurid) või siis koosneda materjali eraldavast **pealõikeservast** (*side cutting edge, major cutting edge*) ja temaga teatud nurga all asetsevast **abilõikeservast** (*end cutting edge, minor cutting edge*). Pealõikeservaks nimetatakse töödeldava materjali poole suunatud ja materjali sisse tungivat lõikeserva ning abilõikeservaks töödeldud pinna poole pööratud lõikeserva. Abilõikeserv ei osale otseselt lõikeprotsessis. Nende servade lõikepunkt moodustab **teriku tippu** (*tool tip, tool point*). Treiteradel on tavaliselt teriku tipp kujundatud **tipuradiusega** (*nose radius*). Terav või väikese raadiusega teriku tipp tekitab treimisel kindla kujuga töötlemisjäljed detailil, mis võivad halvendada pinna kvaliteeti (Joonis 12.13). Raadiusega teriku tipp on mehaaniliselt tugevam. Lõikeservad võivad olla sirged või keerukama kujuga. Terik või terikud kinnituvad lõikuri kinnitusosa külge ja selle abil omakorda lõikepinku.

Lõikeriistu ehk lõikureid liigitatakse sageli kasutatava lõikeprotsessi järgi: trei-lõikurid, puurid, freesid jne.

Veel saab liigitada lõikeriistu nende konstruktsiooni järgi: **üksservlõikur** (*single-point tool, single-tip tool*) ja **mitmikservlõikur** (*multipoint tool, multiple-cutting-edge tool*), näiteks puurid, freesid, keermepuurid, hõõritsad jt. Nende lõikeriistade konstrueerimisel kasutatakse samu põhimõtteid kui üksservlõikurite korral, kuna laastu moodustumise mehhanism on kõigi lõiketöötuse protsesside puhul põhimõtteliselt sarnane.

### 12.2.1. Üksersvlõikuri geometria

Erinevalt lõikamise ortogonaalmudelitest (vt Joonis 12.10), kus teriku lõikeserv ja tahud asetsevad risti lõikekiiruse suunaga, on praktikas lõikeriista tahud ja lõikeservad orienteeritud ruumis selliselt, et tagada efektiivne lõikeprotsess. **Teriku geometriat** (*tool geometry*) on otstarbekas kirjeldada nende lõikuri elementide (tahud, servad) asendiga ruumis, nt nurkadega kindlate mõõtetasandite suhtes. Lõikeriista geometria mõjutab lõikeprotsessi. Vaatleme üksersvlõikuri geometriat pikitreilõikuri näitel (Joonis 12.12).

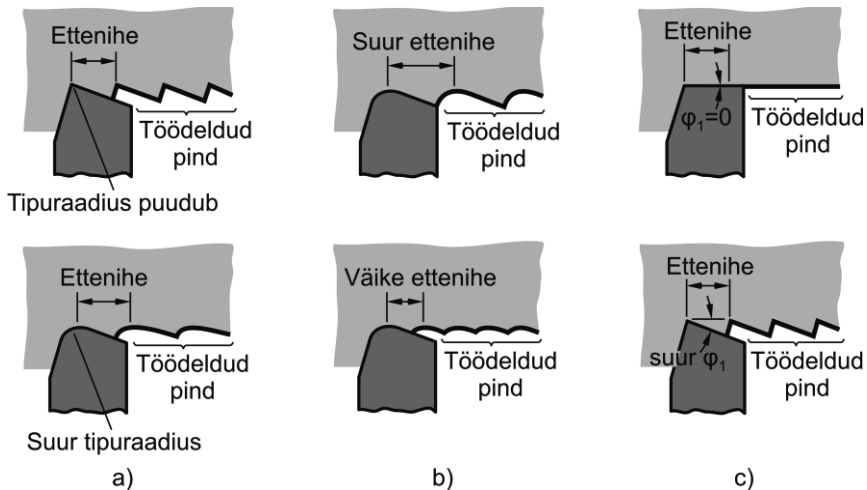


**Joonis 12.12.** Pikitreilõikuri geometria

Esitahu asendi ruumis määravad **esinurk**  $\gamma$  (*side rake angle*) ja **lõikeserva kaldenurk**  $\lambda$  (*back rake angle, cutting edge inclination edge*). Esinurga suurenedes (vt Joonis 12.2) muutub terik teravamaks ja tungib kergemini töödeldavasse materjali. Liigsuure esinurga korral väheneb nii teriku tugevus kui ka võime juhtida soojust eemale lõikuri pidemesse. Positiivse esinurga korral on teriku tipp esitahu kõrgeim punkt ja negatiivse väärtuse korral madalaim punkt (vt Joonis 12.12). Lõikeserv ise võib asetseda horisontaalselt, kuid tavaliselt horisontaaltasandi suhtes nurga all, mida nimetatakse lõikeserva kaldenurgaks. Lõikeserva kaldenurga muutmisega on võimalik juhtida tekkinud laastu kas lõikurist paremale või vasakule poole. Näiteks kui treitera tipp on pealõikeserva madalaim punkt, siis lõikeserva kaldenurk on positiivne ja laast voolab paremale, vastasel juhul aga vasakule. Peatagatahu asendit ruumis kirjeldab **taganurk**  $\alpha$  (*side relief angle, side clearance angle*) ja abitagatahu asendit **abitaganurk**  $\alpha_1$  (*end relief angle, end clearance angle*). Taganurga ülesandeks on vähendada hõõrdumist teriku ja tooriku vahel.

Lõikeservade asendi plaanis (vt Joonis 12.12) määravad **lõikeservanurk**  $\varphi$  (*side cutting edge angle, cutting edge angle*) ja **abilõikeservanurk**  $\varphi_1$  (*end cutting edge angle*). Lõikeservanurga kasvades vähenevad jõud teriku sissetungimisel toorikusse, abilõikeservanurga vähenedes väheneb teriku tipu poolt tekitatud töötlemisjälje kõrgus (vt Joonis 12.13). Lõikeservanurga suurus oleneb treimisel nt töötlemisoperatsioonist (otsatreimine, astmetreimine, pikitreimine) ja on sageli määratud kasutatud lõikuri lõikeplaadi kujuga (vt Joonis 12.30). Abilõikeservanurk  $\varphi_1$  tekitab vahemiku abitagatahu ja moodustunud uue pinna vahel, vähendades nende vahelist hõõrdumist.

Teriku tipp võib olla terav ja see tekitab töödeldud pinnale töötlemisjäljed. Lõikeprotsessis teriku lõikeosa geometria justkui kopeeritakse detaili pinnale (Joonis 12.13); teriku tipuraadiuse kasvades, ettenihkekiiruse ja abilõikeservanurga vähenedes töödeldud pinnale moodustuvate töötlemisjälgede kõrgus väheneb. Teriku kuludes tema tipuraadius kasvab ja pinna töötlemisjälgede kõrgus väheneb.



**Joonis 12.13.** Üksersvlõikuri geometria ja ettenihke suuruse mõju tooriku pinnakaredusele: a – tipuraadiuse mõju; b – ettenihke mõju; c – abilõikeservanurga mõju

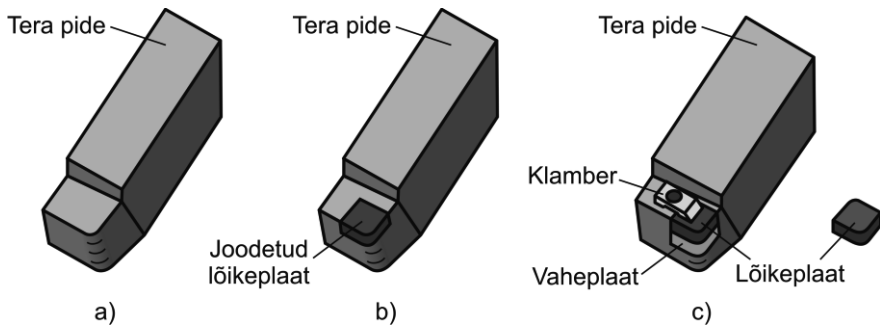
**Lõikuri markeerimisel** (*tool geometry signature, tool signature, tool nomenclature*) antakse tähistuses kindlas järjestuses teriku nurkade väärtused ja tipuraadiuse suurus.

Lõikeriista geometria valik oleneb töödeldavast materjalist ja teriku materjalist. Kiirlõiketerasest terviktreilõikuri esinurk võib olla positiivne väärtusega  $+5...20^\circ$ , kuid kõvasulamist ja keraamikast lõikeplaatide kasutamisel nihkepingete vähendamiseks ja survepingete suurendamiseks on otstarbekohane kasutada väikest või isegi negatiivset esinurka suurusega kuni  $-15^\circ$ . Seejuures teriku tugevuse tagamiseks valitakse taganurk võimalikult väike, nt tavaliselt  $5^\circ$ .

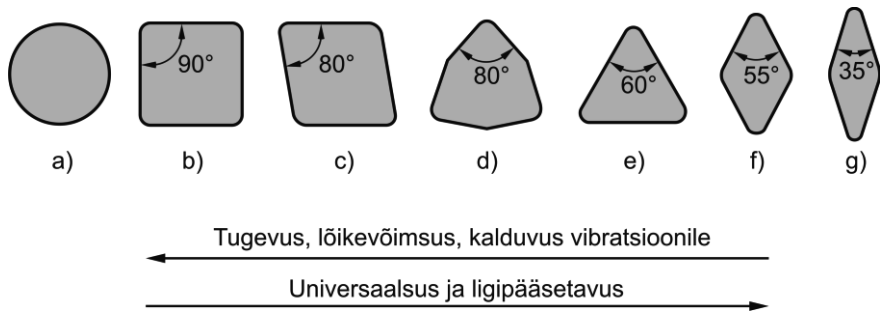


Kalli ja suure kulumiskindlusega kõvasulami kokkuhoiuks valmistatakse ainult lõikeriista terik sellest materjalist **lõikeplaatidena** (*inserts, toolbits*). Lõikeplaadid võidakse kinnitada lõikeriista kinnitusosa külge jootmisega. Jootmisel tekkivate sisepingete tõttu võib sellise teriku tööiga olla piiratud. Levinumad on mehaaniliselt kinnitatavad lõikeplaadid (Joonis 12.14). Kui plaadi lõikeserv on kulunud, siis vabastatakse lõikeplaat ja pööratakse ette järgmine lõikeserv ning lõikeplaat kinnitatakse uuesti. Kõvasulamist lõikeplaatide alla asetatakse plaatide kõveruse kompenseerimiseks vaheplaat.

Tööstuslikult valmistatakse väga erineva kujuga lõikeplaatide (Joonis 12.15).



**Joonis 12.14.** Üksersvlõikurite teriku kujundusi: a – terviktreilõikur; b – joodetud lõikeplaadiga treilõikur; c – mehaaniliselt kinnituvat lõikeplaadiga treilõikur

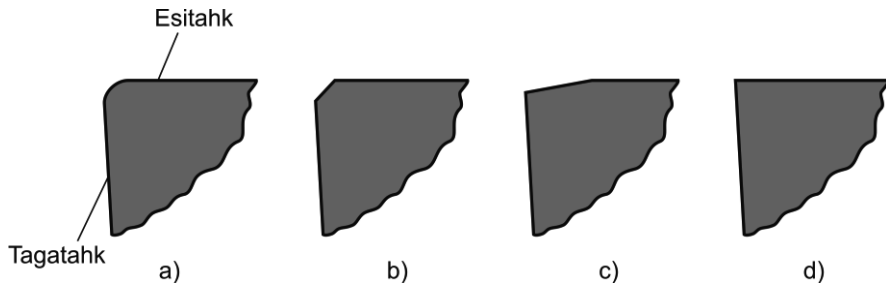


**Joonis 12.15.** Enim levinud lõikeplaatide kujud: a – ümmargune; b – ruudukujuline; c – rombikujuline tipunurgaga 80°; d – kuusnurkne tipunurgaga 80°; e – kolmnurkne; f – rombikujuline kahe tipunurgaga 55°; g – rombikujuline kahe tipunurgaga 35°

Üldjuhul valitakse suurema tipunurgaga lõikeplaatide teriku suurema tugevuse ja tootlikkuse tagamiseks. Näiteks ümarad lõikeplaadid on oma kaju tõttu kõige tugevamad, kuid vajavad suuremat lõikevõimsust ja lõikeprotsessis võivad tekkida vibratsioonid. Majandusliku tõhususe tagab asjaolu, et neid lõikeplaatide saab lõikeosa kuludes treilõikuris pöörata ja nii kasutada lõikeplaati suure arvu pindade töötlemiseks.

miseks. Ruudukujuline lõikeplaat võimaldab kasutada nelja lõikeserva, kolmnurkne kolme ja rombikujuline ainult kahte lõikeserva. Sageli kasutatakse negatiivsete esinurkadega kahepoolseid lõikeplaate ja nii lõikeservade arv kahekordistub. Kitsastes ruumioludes, nt otstreimisel, astmetreimisel ja kujutremisel (vt p 12.3.2) on otstarbekas kasutada rombikujulisi lõikeplaate, kuna nad on universaalsemad ja võimaldavad paremat ligipääsu töödeldavale pinnale.

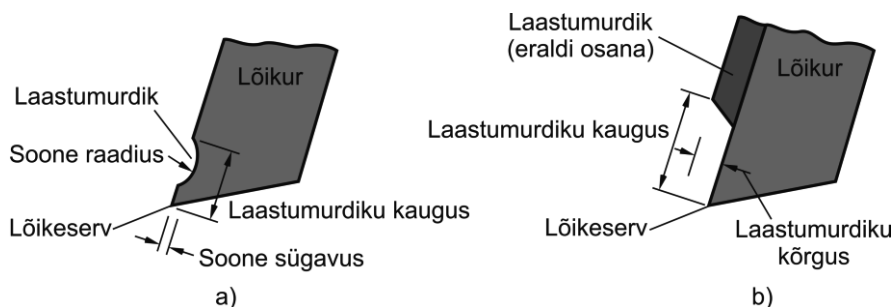
Tavaliselt valmistatakse lõikeplaadid teravate lõikeservadega, kuid kuna selline terav serv on kõvadel ja habrastel lõikeriistamaterjalidel nõrgem, siis võib see kergesti puruneda. Seetõttu võivad lõikeservad olla töödeldud (Joonis 12.16) kas väikese raadiusega (0,25 mm), väikese kaldenurga all ( $15^\circ \dots 20^\circ$ ) või faasiga. Nüüdisaegsete lõikeriistade valik on suur ja reeglina on nende geometria optimeeritud töötlemistingimustele vastavalt.



**Joonis 12.16.** Lõikeplaatide servade kujundusi: a – raadiusega; b – faasiga; c – kaldpinnaga; d – terav

### Laastumurdikud

Plastsete materjalide treimisel tekib pidev ja keerdunud laast, mis takistab tooriku töötlemist ja laastu automatiseeritud eemaldamist lõikepingist. Treilõikuri ja detaili vahele kiilunud laast võib kahjustada töödeldud pinda. Seetõttu kasutatakse sageli **laastumurdikuid** (*chip breakers*), mis soodustavad laastu tihedamat keerdumist ja nii põhjustades tema murdumist lühikesteks lõikudeks. Laastumurdikuid kasutatakse kahel kujul: a) teriku esipinnale kujundatud soontena (Joonis 12.17a) või teriku esitahule mehaaniliselt kinnituva kaldservaga plaadikesena. Mehaanilise kinnituse korral on võimalik laastumurdja asukohta täpsustada vastavalt lõikerežiimidele. Laastumurdiku abil on soovitatav saada C-tähe kujulised või number 9 kujulised laastulõigud pikkusega ca 25 mm.



Joonis 12.17. Laastumurdikud: a – soonega esitahul; b – kinnituva plaadikesega

## 12.2.2. Mitmikservlõikurid

Enamik lõiketöötlemisel kasutatavaid mitmikservlõikureid (puurid, freesid jt) saavad lõikeprotsessis pöörleva liikumise. Ainult kammlõikamisel (vt p 12.7) ja saagimisel antakse lõikeriistale kulgev liikumine.

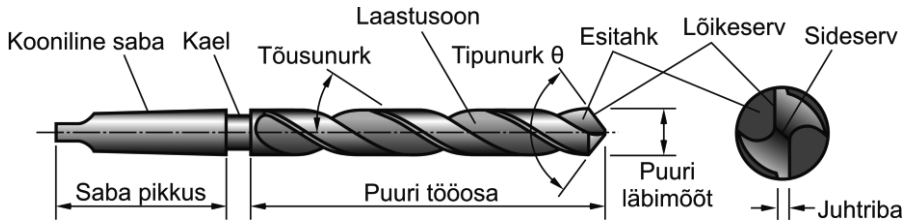
### Puurid

**Puurid** (*drills, drill bits*) on enim levinud lõikeriistad avade saamiseks **puurimisega** (*drilling*) (vt p 12.4). Enim levinud on **keerdpuur** ehk **spiraalpuur** (*twist drill*) läbimõõduga 0,15...75 mm. Standardse keerdpuuri geometriat kirjeldab Joonis 12.18. Keerdpuuril on kaks krurvijoonelist **laastusoon** (*flute, cutting flute*) **kruvisoone tõusunurgaga** (*helix angle*) ligikaudu  $30^\circ$ . Puurimise ajal juhivad laastusooned tekkinud laastu avast välja. Laastu paremaks eemalejuhtimiseks oleks soovitatav, et laastusoon oleks maksimaalse suurusega laastu mahutamiseks, kuid puurile piisava tugevuse andmiseks peab spiraalsoonte vaheline ühendusosa omama piisavat paksust. Puuril on otspinnas kaks lõikeserva **tipunurgaga** (*point angle*)  $\theta$ . Tipunurga suurus oleneb töödeldavast materjalist. Üldjuhul teraste töötlemisel on see ligikaudu  $120^\circ$ , alumiiniumi ja plastide puurimisel väiksem, nt  $90^\circ$ . Abilõikeservadeks on puuril **juhtribade** (*margins*) servad. Puuri tippu läbib ja kahte lõikeserva ühendab **sideserv** (*chisel edge*). Lõikamise algstaadiumis on pöörleval sideserval kalduvus puuri ava kõrvale juhtida keskpunktist, vähendades nii positsioneerimise täpsust. Lõikeservadega külgnev puuri tipus asetsev laastusoon osa toimib kui esitahk, mida mööda liigub laast. Puuri tagapinna moodustab tema otspinnas asetsev kaldu teritatud otspind.

Puur saab pöörleva lõikeliikumise ja teljesuunalise ettenihkeliikumise, mille tulemusena moodustub laast.

Erinevalt treilõikurist on lõikeprotsess puurimisel keerulisem, kuna puurimisel on lõikekiirus teriku igas lõikeserva punktis erinev. Maksimaalne lõikekiirus on

välisläbimõõdul ja puuri tipus on see null. Puuri sidoserv ei lõika, vaid muljub materjali.

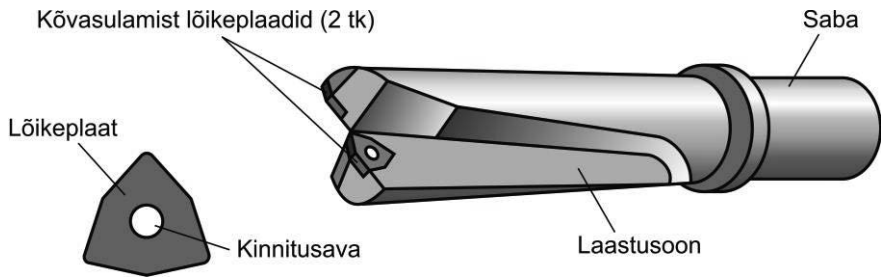


**Joonis 12.18.** Keerdpuuri (spiraalpuuri) osad ja geomeetria

Puurimise probleemiks on laastu eemaldamine. Lõikamisel peab laastusoonel olema piisav ristlõige laastu mahutamiseks kogu puuri pikkuse ulatuses. Moodustunud laast surutakse laastusoonetes vastu tooriku pinda, tekitades nii hõõrdumist laastu ja ava vahel. Lisaks laastu hõõrdumisele vastu esitahku tekib veel hõõrdumine puuri välispinna ja moodustunud ava vahel. Selle tulemusena kuumenevad nii puur kui ka toorik ja tekib vajadus puuri jahutada. Jahutava lõikevedeliku juhtimine puuri tipu juurde on raskendatud, kuna laast voolab vastassuunas vedeliku liikumisele. Laastu eemaldamise raskuste ja puuri kuumenemise tõttu on spiraalpuuriga puuritud ava sügavus piiratud, tavaliselt kuni 4 puuri läbimõõtu. Puurid võivad olla varustatud sisemiste kanalitega lõikevedeliku pumpamiseks lõikeossa tipu lähedale.

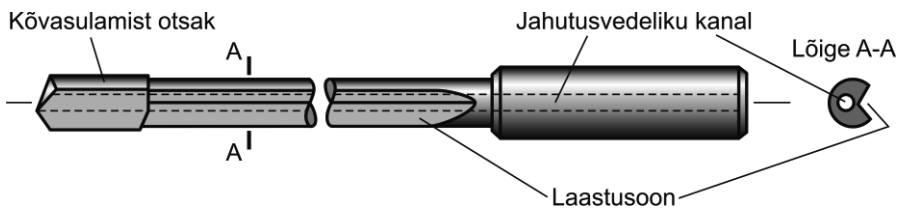
Tavaliselt valmistatakse keerdpuurid termotöödeldud kiirlõiketerasest, kuid nad võivad olla varustatud joodetud kõvasulamist lõikeplaatidega. Väiksema läbimõõduga puuride tööosa võib olla tervikuna valmistatud kõvasulamist ja joodetud puuri keha külge. Lisaks keerdpuuridele kasutatakse ka teisi puuride tüüpe, nt sirgsoonpuurid, püssipuurid, lapikpuurid jne.

**Sirgsoonpuure** (*straight-flute drills*) kasutatakse samamoodi kui keerdpuure, kuid nad erinevad keerdpuuridest terve puuri pikkuses asetsevate kahe sirge laastusoonest (Joonis 12.19). Puuri lihtsam konstruktsioon võimaldab kasutada lõikeservadena kõvasulamist lõikeplaatide, mis on kinnitatud puuri mehaaniliselt või jootmisega. Seetõttu saab kasutada suuremaid lõikekiirusi. Lõikeplaatide suurus määrab seda tüüpi puuride minimaalse läbimõõdu, mis on tavaliselt 16 mm, kusjuures maksimaalne läbimõõt võib ulatuda kuni 125 mm.



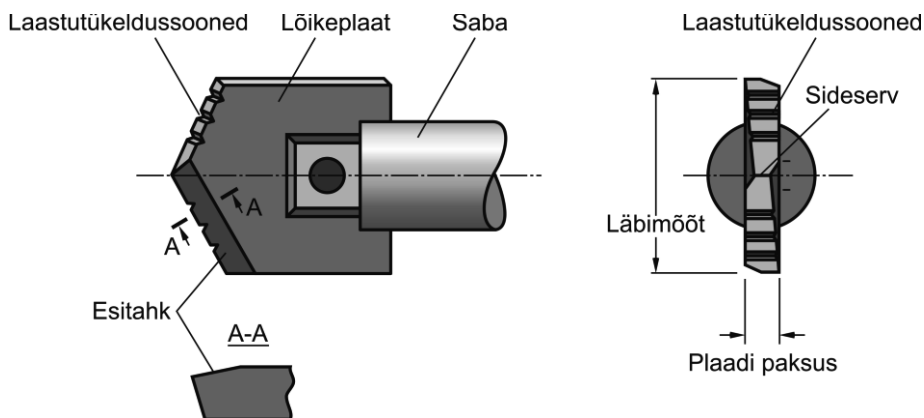
**Joonis 12.19.** Lõikeplaatidega sirgsoonpuur

Sügavpuurimiseks mõeldud sirgsoonpuuride edasiarendust nimetatakse **püssipuuriks** (*gun drill*) (Joonis 12.20). Sellise puuriga on võimalik puurida avasid pikkuse/läbimõõdu suhtega kuni 125. Puuril on üks kõvasulamist lõikeserv ja üks laastusoon. Puuris on kanal lõikevedeliku juhtimiseks lõiketsooni. Laast ja lõikevedelik eemalduvad laastusooone kaudu. Vastupidiselt tavapuurimisele on püssipuuri kasutamisel puur paigal ja toorik pöörleb. Püssipuure valmistatakse tavaliselt läbimõõduga 2 mm kuni 50 mm.



**Joonis 12.20.** Püssipuur

Suuremate (üle 75 mm) avade valmistamiseks kasutatakse **lapikpuuri** ehk **lamepuuri** (*spade drill*) (Joonis 12.21). **Lapikpuure** valmistatakse läbimõõduga 25 mm kuni 150 mm. Vahetatav puuri lõikeplaat kinnitub hoidikusse, mis tagab puurile suure jäikuse lõikeprotsessis, seejuures on puur on tunduvalt kergem kui keerdpuur.



Joonis 12.21. Lapikpuur

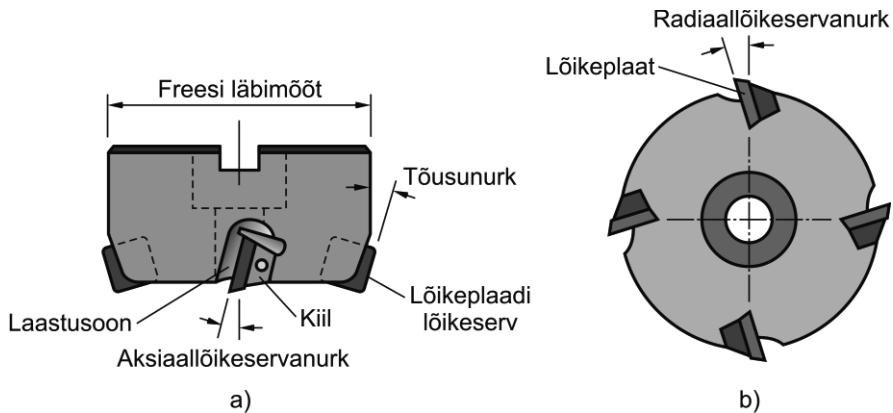
## Freesid

**Freeside** (*milling cutters*) liigitus on seotud nendega teostatavate operatsioonidega. Freesid liigituvad silinderfreesideks, kujufreesideks, laupfreesideks ja sõrmfreesideks (otsfreesideks).

**Silinderfreese** (*plain milling cutters, plain mills*) (vt Joonis 12.4b) kasutatakse **silinderfreesimisel** ehk **perifeerfreesimisel** (*peripheral milling, plain milling*) (vt p 12.5.1). Freesi silinderpinnal asetseb rida lõikehambaid, millest igaüks moodustab teriku. Sirghammastega silinderfreesil asetsevad lõikehambad paralleelselt freesi teljega, mistõttu tekivad iga üksiku hamba sissetungimisel lõigatavasse materjali löögid terikule ja väljumisel suured lõikejõu muutused, mis mõjuvad kahjulikult lõikeriistale ja lõikepingile. Tavaliselt on lõikehambad orienteeritud kaldu freesi telje suhtes, vähendades nii löökkoormusi lõikehammade materjali sissetungimisel ja muutes lõikeprotsessi sujuvamaks, kuna samaaegselt osaleb lõikeprotsessis mitu lõikehammast. Neid freese nimetatakse **kruvihammassilinderfreesideks** (*helical plain milling cutters, helical plain mills*).

**Kujufreesid** (*form milling cutters, form mills*) on silinderfreesid, mille lõikeservad ei ole sirged, vaid erilise kujuga, mis kantakse toorikule lõikeprotsessis edasi. Enim tuntud on kujufreesid hammasrataste valmistamiseks, mille puhul freesi hammaste kuju vastab hambavahe kujule (vt p 12.9).

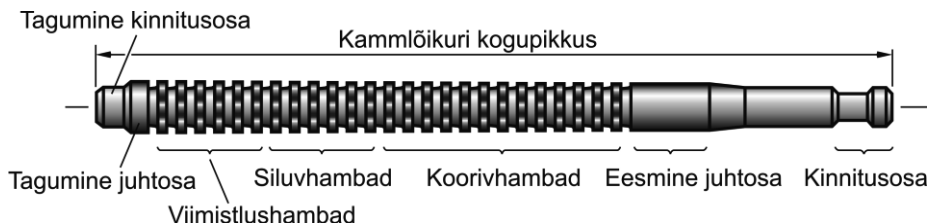
**Laupfreesid** (*face milling cutters, face mills*) on freesid, mille lõikeservad asetsevad nii freesi silinderpinnal kui ka otspinnal. Laupfreesid võivad olla valmistatud tervikfreesidena kiirlõiketerasest või varustatud mehaaniliselt kinnitatud vahetatavate kõvasulamist lõikeplaatidega (Joonis 12.22). Laupfreese kasutatakse **laupfreesimisel** (*face milling*) (vt p 12.5.1).



**Joonis 12.22.** Nelja lõikeplaadiga lauprees: a – külgvaates; b – otsvaates

**Sõrmfreesid** ehk **otsfreesid** (*end milling cutters*) (Joonis 12.44c) meenutavad esialgsel vaatlusel puuri. Täpsemal vaatlusel on näha, et peamiselt on sõrmfreesi lõikeserv silindripinnal, harvemini lisaks otspinnal. Frees võib olla sirgete või keerulisema kujuga lõikeservadega. Sõrmfreese kasutatakse soonte, kujupindade valmistamisel ja kontuurfreesimiseks. Freesi hambad silindripinnal võivad olla kujundatud kaldu kruvipinna järgi, mistõttu seda tüüpi freesid kuuluvad **kruvihammasfreeside** (*helical milling cutters, helical mills*) rühma. Otsfreese (sõrmfreese) kasutatakse **otsfreesimisel** (*end milling*) (vt 12.5.1).

**Kammlõikur** (*broach, broaching tool*) koosneb reast üksteise järel asetsevatest lõikehammastest (Joonis 12.23) ja kasutatakse erineva kujuga avade, tasapindade ja kujupindade valmistamiseks **kammlõikusega** (*broaching*) (vt p. 12.7). Kammlõikur saab sirgjoonelise lõikeliikumise ja erinevalt enamikust lõikeprotsessidest ettenihkeliikumine kammlõikamisel puudub. Lõikeprotsessis lõikavad kõik hambad laastu, kusjuures iga järgnev hammas on eelmisest kõrgem. Materjal eemaldatakse ühe kammlõikuri töökäiguga, nt ava töötlemisel tõmbamisega või lükkamisega läbi eelnevalt puuritud ava. Kammlõikuril tagab juhtosa kammlõikuri sujuva sisenemise töödeldavasse avasse ja tema tsentreerimise. Lõigatava pinna kuju on määratud lõikeservade kontuuriga, eriti viimistlusosa lõikeservade omaga. Arvesse võttes kammlõikuri keerulist kuju ja kasutatavaid väikeseid lõikekiirusi, valmistatakse enamik kammlõikureid kiirlõiketerasest. Malmi töötlemisel võidakse kasutada kas joodetud või mehaaniliselt kinnitatud kõvasulamist lõikeplaatidega kammlõikureid.



Joonis 12.23. Kammlõikuri avatöötluks

### 12.2.3. Terikumaterjalid

Lõiketöötlemisel on kriitiline tähtsus lõikeriista teriku materjali õigel valikul. Valikul tuleb arvestada nii töödeldava materjali omaduste (lõiketöödeldavus), lõiketöötluks viisi (puhas- või koorivtöötluks), lõikerežiimi parameetrite kui ka lõikepingi karakteristikutega jms.

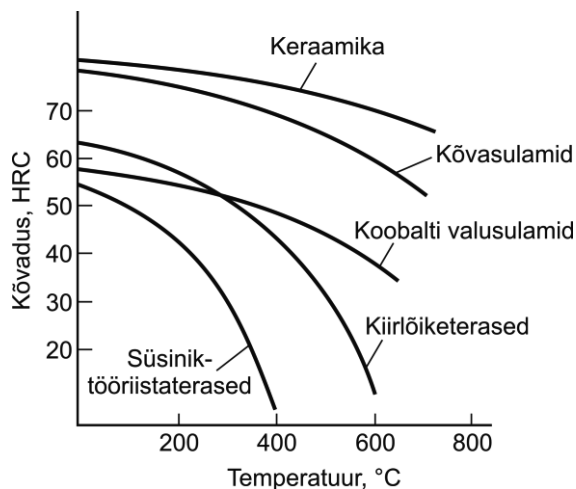
Lõikeriista teriku materjali valiku aluseks on kolm omadust, mis tuginevad nende purunemise analüüsile:

1. **Sitkus** (*toughness*). Vältimaks **habrast purunemist** ehk **murdepurunemist** (*fracture failure*), peab lõikeriista materjalil olema suur sitkus, s.o peab olema võimekus absorbeerida energiat ilma purunemata. Sitkust iseloomustab tavaliselt materjali tugevuse ja plastsuse kombinatsioon.
2. **Kuumkõvadus** ehk **punakõvadus** (*hot hardness*). Kuumkõvadus on materjali omadus säilitada kõvadus kõrgetel temperatuuridel.
3. **Kulumiskindlus** (*wear resistance*). Kulumiskindlus on lõikeriistade omadus vastu pidada eelkõige abrasiivkulumisele. Terikumaterjal peab olema kõvem kui töödeldav materjal. Materjali kulumiskindlus oleneb eelkõige tema kõvadusest ja peaks olema võimalikult suur. Teisteks mõjuriteks on pinnasiledus (tasasel pinnal on väiksem hõõrdetegur), lõiketera ja töödeldava materjali keemiline koostõju, lõikevedelike kasutamine jne.

Terikumaterjalidel peavad olema kõik need omadused. Materjalidena kasutatakse tööriistateraseid (süsinik-, legeertööriistaterased ja kiirlõiketerased), koobaltisulameid, kõvasulameid, kermiseid, kõvapinnetega kiirlõiketeraseid ja kõvasulameid, lõikekeraamikat, ülikõvu materjale (teemant, kuubiline boornitriid).

Enim levinud terikumaterjalid (enam kui 90%) on kiirlõiketerased ja kõvasulamid. Ajalooliselt on lõikeriistade areng kulgenud järjest suuremate lubatud lõikekiiruste suunas, millega kaasneb lõiketemperatuuri tõus. Terikumaterjalide kõvadus ja järelkult ka kulumiskindlus vähenevad kõrgendatud temperatuuridel (vt Joonis 12.24). Süsiniktööriistaterastel on iseloomulik kõvaduse vähenemine juba alates 200 °C. Suurim kõvadus lõiketemperatuuril, nt 600 °C juures on keraamil ja kõvasulamitel.





**Joonis 12.24.** Terikumaterjalide kõvaduse olenevus temperatuurist

## Tööriistaterased

**Mittelegeertööriistaterased** ehk **süsiniktööriistaterased** (*non-alloy tool steels, plain carbon tool steels*) leiavad piiratud kasutamist puidulõikeriistade ja lukksepatööriistade (peitlid, meislid, saeched, haamid) valmistamisel. Pärast karastamist kõvaduseni ligikaudu 60 HRC säilivad lõikeomadused temperatuuridel kuni 200...250 °C. Süsiniktööriistaterased ei leia üldjuhul kasutamist metallide lõiketöölusel. **Madallegeertööriistaterased** (*low-alloy tool steels*) võivad taluda mõnevõrra kõrgemat temperatuuri, kuni 250...350 °C, kesk- ja kõrglegeertööriistaterased – 400 °C...500 °C.

**Kiirlõiketerased** (*high-speed steels, HSS*) kujutavad endast kõrglegeertööriistateraseid, mida kasutatakse töötemperatuuridel kuni 700 °C. Koostisest lähtudes eristatakse kaht tüüpi kiirlõiketeraseid (vt ka p 5.1.2. Soojuskindlad tööriistaterased):

- 1) **volframkiirlõiketerased** (*tungsten-type HSS*) sisaldavad 8...20 % volframi, lisaks veel kroomi, vanaadiumi ja koobalti (0...12 %). Enim tuntud on 18 % volframi sisaldavad kiirlõiketerased ja neid iseloomustab hea lihvitavus, kuid suhteliselt kõrge hind;
- 2) **molübdeenkiirlõiketerased** (*molybdenum-type HSS*) sisaldavad lisaks volframi 5...10% molübdeeni ja 1,5...6 % titaani. Molübdeeni lisamine tõstab kuumkõvadust ja abrasiivkulumiskindlust. Neid iseloomustavad väiksemad kujumuunded termotöölusel ja nad on odavamad kui volframkiirlõiketerased. 95 % kiirlõiketerastest lõikeriistadest valmistatakse seda tüüpi terastest.

Kõik kiirlõiketerased sisaldavad 0,75...1,5 % süsinikku ning neid tarnitakse eeltermotöödeldult. Kiirlõiketerased leiavad kasutamist keerulise kujuga mitmikservlõikurite

valmistamisel nagu puurid, keermepuurid, freesid, hambalõikurid, kammlõikurid jm, mis üldjuhul ei tööta suurtel lõikekiirustel (teraste puhul 17...35 m/min). Kiirlõiketerased on suurema sitkusega ja odavamad kui kõvasulamid. Sageli on kiirlõiketerasest lõikurid, nt puurid, pinnatud kulumiskindlate õhukeste keraamiliste pinnetega.

**Koobalti valusulamid** (*cast cobalt alloys*) sisaldavad 38...50 % Co, 15...20 % W, 30...33 % Cr ja temperatuuridel üle 250 °C on neil suurem kuumkõvadus kui kiirlõiketerastel. Nendest valmistatakse valu teel keerulise kujuga lõikeriistu ilma järgneva termotöötletusega ning nad leiavad kasutamist koorivtöötlemisel suurematel lõikekiirustel kui kiirlõiketerased ja suurematel ettenihetel kui kõvasulamid. Sobivad plastide, grafiidi jt mittemetallide lõikamiseks. Tänapäeval on koobaltisulamid enamasti asendatud kõvasulamitega.

**Kõvasulamid** (*hardmetals, cemented carbides*) on suure kõvadusega (üle 80 HRA), tugevad ja kulumiskindlad pulbermetallurgia meetodil valmistatud, peamiselt volframkarbiidi ja koobalti baasil (WC-Co) komposiitmaterjalid. Lõiketöötlusel kasutatakse peamiselt kõvasulameid koostisega WC-Co, WC-TiC-Co ja WC-TiC-TaC-Co. Kõvasulamid võeti esmakordselt kasutusele 1920-ndate keskpaigas Saksamaal. WC-Co-kõvasulamid pole kõige sobivamad teraste lõiketöötluks suure keemilise afiinsuse (ühtivuse) tõttu terase ja kõvasulami koostisesse kuuluva WC vahel. See põhjustab teriku kiirendatud **kulumist esitahul** ehk **lohkulumist** (*crater wear*) karbiidi koosseisu kuuluva süsiniku difusioonist ja keemilisest reaktsioonist kontaktpinnas terik-laast tingituna. On kasutatavad temperatuuridel kuni 950...1000 °C. Kasutatakse mitteraudmetallide (Al, messing, Cu, Mg, Ti) töötlemiseks, samuti hallmalmi lõiketöötlemisel. Kõvasulamite karbiiditerade suurus on 0,5...5 µm. Mainitud kõvasulamigrupi kuumkõvadus suureneb karbiidiosakeste suuruse vähenemisel, kuid paindetugevus on suurem jämeteralistel sulamitel. Lõiketöötlusel kasutatavate kõvasulamite koobaltisisaldus on tavaliselt 3...12 %. Koobaltisisalduse suurenedes komposiidi kulumiskindlus väheneb, kuid tugevus kasvab. Seetõttu kasutatakse suurema koobaltisisaldusega kõvasulameid koorivtöötlusel ja katkendlõikamisel (nt freesimisel), väiksema koobaltisisaldusega sulameid siluvtöötlusel või viimistlustöötlusel.

Mitmekarbiidsetes kõvasulamites asendatakse osa volframkarbiidi titaankarbiidiga (sulamid WC-TiC-Co) või titaan- ja tantaalkarbiidiga (sulamid WC-TiC-TaC-Co), mille tulemusena kasutustemperatuur tõuseb kuni 1100...1150 °C. Sellise koostisega kõvasulamid on väiksema esitahu lohkkulumisega teraste töötlemisel, kuid väiksema kulumiskindlusega tagatahul mitterauasulamite lõikamisel. Kolmekarbiidised WC-TiC-TaC-Co sulamid sobivad kuumustugevate teraste ja sulamite ning titaani lõiketöötluks. Kõvasulamite omadusi on parandanud alamikroonsete (karbiiditerade suurus alla 1 µm) sulamite kasutuselevõtt.

Rahvusvaheline standard ISO 513:2005 liigitab kõvasulamid jt terikumaterjalid (kermised, kõvapindegas kõvasulamid, lõikekeraamika) gruppideks olenevalt kasutusala ja omadustest. Kasutusala järgi rühmitatakse terikumaterjalid gruppideks: P, M, K, N, S, H. Grupi tähisele järgnev number iseloomustab terikumaterjali omadusi suuremalt kõvaduselt (väiksemalt sitkusest) väiksema kõvaduse (suurema sitkuse) suunas. Kõvemaid terikumaterjale kasutatakse siluv-, sitkemaid koorivtöölusel (vt Tabel 12.2).

**Tabel 12.2.** Lõiketöölusel kasutatavate terikumaterjalide grupid ISO 513 järgi, töödeldavad materjalid ja töötlemistingimused

ISO grupp	Töödeldav materjal	Kasutusala ja töötlemistingimused
<b>P 01</b>	Teras ja terasvalu	Puhas- ja peentreimine
P10	Teras ja terasvalu	Puhastreimine ja keermelõikamine suurtel lõikekiirustel
P20	Teras ja terasvalu	Kujutremine, keermelõikamine ja freesimine keskmistel lõikekiirustel ja keskmiste ettenihetega
P30	Teras, terasvalu, roostevaba teras, tempermalm	Treimine ja freesimine
P40	Teras, terasvalu, roostevaba teras	Koorivtreimine ja freesimine
P50	Teras, terasvalu, roostevaba teras	Läbilõikamine ja koorivtreimine
<b>M 10</b>	Teras, terasvalu, Mn-teras, hallmalm, legeermalm	Peentreimine ja freesimine
M20	Teras, terasvalu, Mn-teras, hallmalm, legeermalm	Peamised treimisoperatsioonid
M30	Teras, terasvalu, kuumuskindlad terased, hallmalm, legeermalm	Töötlus keskmistes ja rasketes lõiketingimustes, katkendlik lõikeprotsess
M40	Pehmed, hästi töödeldavad väikese tõmbetugevusega terased	Koorivtöötlus
<b>K 01</b>	Hall- ja kõrgtugev malm, suure ränisisaldusega Al-sulamid	Peentreimine heades töötingimustes
K10	Hallmalm (HB 220), tempermalm, karastatud teras, kivimid, klaas, plastikud, kõvakummi	Peentreimine ja freesimine
K20	Hallmalm (HB 220), Cu- ja Al-sulamid, puit	Treimine
K30	Hallmalm, mitteraudmetallid ja mitterauasulamid	Kooriv treimine suhteliselt madalate lõikekiiruste ja suure ettenihkega

Standardi ISO-513 alusel liigitatakse lõikeriistamaterjalid viide rühma:

**P** – (markeeritakse sinise värviga) on ette nähtud voolavlaastu andvate materjalide, peamiselt teraste lõiketööluseks;

**M** – (markeeritakse kollase värviga) on suurema universaalsusega ja kasutatakse mangaanateraste, kuumustugevate ja roostevabade austeniitateraste, hea lõiketöödeldavusega teraste ning temperalmi töötamiseks.

**K** – (markeeritakse punase värviga) on ette nähtud väikese plastsusega materjalide, nagu karastatud terase ja malmi, temperalmi, mitteraudmetallide ja nende sulamite, plastide ning puidu töötlemiseks.

**N** – (markeeritud roheline värviga) kasutatakse alumiiniumi ja teiste mitteraudmetallide ja nende sulamite ning süsinikkiudkomposiitmaterjalide töötlemiseks. Tabelis 12.2 näitamata.

**S** – (markeeritakse pruuni värviga) on mõeldud kõrgtemperatuursete erisulamite lõiketöötamiseks. Tavaliselt kasutatakse lõikurimaterjalina kõvapinnetega kõvasulamid või armeeritud oksüüdkeramikat. Tabelis 12.2 näitamata.

**H** – (markeeritud halli värviga) on mõeldud karastatud terase ja malmide lõiketöötamiseks. Lõikurimaterjalid on peamiselt kuubilise boornitriidi või keraamika baasil, aga ka karbiidide baasil. Tabelis 12.2 näitamata.

## **Kermised**

**Kermised** (*cermets*) on karbiidide, oksiidide, nitriidide, boriidide jt suure kõvadusega rasksulavate metallide ühendite ja metalse materjali baasil komposiitmaterjalid. Tüüpilised kermised on TiC, TiN, TiCN baasil, metallsideaineks on Ni ja Mo sulam. Kermiste kasutusala on teraste, roostevabade teraste ja malmide **kiirviimistlustöötlus** (*high-speed finishing*), kus kasutatakse suuremaid lõikekiirusi ja väiksemaid ettenihkeid kui kõvasulamite korral. Sageli puudub vajadus pinna täiendava lihvimise järele.

## **Kõvapinnetega kõvasulamid, kermised ja kiirlõiketerased**

Oluline edu lõikeriistamaterjalide arengus saavutati möödunud sajandi 60-ndate lõpus, kui võeti kasutusele kõvapinnetega kõvasulamid. Kõvasulamist lõikeplaadid kaeti õhukese ühe või mitmekihilise keraamika- (TiC, TiN, TiCN ja /või Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiCN) või teemantpinnetega. Pinne paksusega 2...10 µm kantakse alusele kas **füüsikalise aursadestusega** (*physical vapor deposition, PVD*) või **keemilise aursadestusega** (*chemical vapor deposition, CVD*) (vt p 13.4.5). Esimese põlvkonna pinnad olid ühekihilised, tänapäeval reeglina mitmekihilised. Optimaalsed omadused annab mitmekihiline kõvapinne. Tavaliselt on WC-Co-kõvasulamil esimeseks kihiks TiC või TiCN, millel on hea adhesioon ja kõvasulamiga sarnane joonpaisumistegur. Järgnevad võivad olla TiN, TiCN, TiAlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Kõvapinnad WC-Co-kõvasulamil suurendavad kulumiskindlust, väheneb difusioonkulumise oht, mistõttu saab TiCN pinnetega lõikeriistu kasutada töötemperatuuridel kuni 1000 °C ja kaob vajadus jahutava lõikevedeliku järgi.

Kõvapinnetega lõikeplaatide kasutatakse malmi ja terase treimisel ja freesimisel kõrgetel lõikekiirustel juhtudel, kui dünaamilised ja termilised löögid on minimaalsed. Katkendlõikeprotsesside korral võib esineda pinde lahtikoorumist ja seetõttu on eelistatud pinneteta lõikurid. Üldjuhul võimaldavad kõvapindega lõikeplaadid kasutada suuremaid lõikekiirusi kui pinneteta lõikeplaadid.

Lõikeriistade püsivusaega suurendatakse veel teemantpinnete ja räninitriidpinnete kasutamisega.

TiCN- ja TiAlN-kõvapinded leiavad kasutamist roostevaba terase töötlemisel, kroomkarbiidsed pinded Al, Cu ja Ti töötlemisel. Lõikeriistade püsivusaega saab suurendada veel teemantpinnete, tsirkooniumnitriid- ja räninitriidpinnete kasutamisega. Teemantpindega kõvasulamist lõikeriistu kasutatakse kaljusse avade puurimiseks nafta puuraukude rajamisel, komposiitmaterjalide ja silumiinide (Al-Si sulamid) lõiketöötlusel.

## **Keraamika**

**Keraamika** (*ceramics*) on valmistatud paagutatud peeneteralisest alumiiniumoksiidist ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) jt raskesulavatest ühenditest ja kasutatakse alates 1950-ndate keskpaigast. Lisaks alumiiniumoksiidile sisaldavad nad tsirkooniumoksiidi ja titaankarbiidi, mis suurendab materjali sitkust ja termolöögikindlust. Nimetatud keraamikat iseloomustab eriti suur abrasiivkulumiskindlus ja kuna ta on inertne, siis puudub terikukasvaja moodustumise oht. Keraamikat kasutatakse malmi ja terase puhastöötlemiseks suurtel lõikekiirustel (800...1000 m/min), kasutades väikest ettenihet ja lõikesügavust. Tuleb kasutada jäika lõikepinka ja vältida löökkoormusi. Alates 1970. aastast hakati kasutama kuumustugevate teraste, malmi ja silumiini lõiketöötluks nn musta oksiidkeraamikat (70 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 30 % TiC) ja hiljem räninitriidkeraamikat. Nimetatud materjalid on tuntud ka kui superkeraamika.

Rasketöödeldavate materjalide puhastöötluks kasutatakse veel sialooni ( $\text{SiN}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ränikarbiidkiududega armeeritud alumiiniumoksiidi jt materjale. Lõikekeraamikat iseloomustab suhteliselt madal hind.

## **Ülikõvad materjalid – teemant ja kuubiline boornitriid**

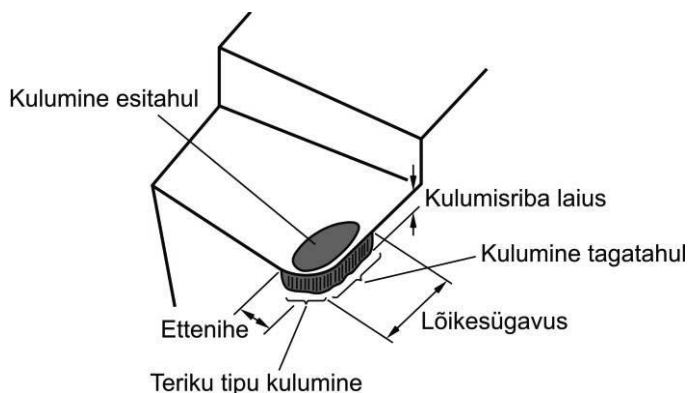
**Teemant** (*diamond*) on tuntud materjalidest kõige kõvem. Teda iseloomustab hea soojusjuhtivus (võrreldes kõvasulamitega 5 korda parem), suur elastsusmoodul (4 korda suurem kui terasel), väike joonpaisumistegur ja suur kulumiskindlus. Need omadused võimaldavad saada lõiketöötluks hea pinnakvaliteedi ja täpsuse. Loodusliku teemandi monokristallidest valmistatakse lõikurite terikuid, kõvadusmõõturite indentoreid jm. Suurem osa tehnilisest looduslikust teemandist kasutatakse abrasiivmaterjalina (vt p 12.10.1). Tööstuses kasutatavast teemandist moodustab enamiku paagutatud polükristalne teemant (*sintered polycrystalline diamond*).

Teemant leiab kasutamist pulbrina abrasiivlõikeriistade valmistamisel ja polükristal- sena treiterades, puurpeades, tõmbesilmades jne. Väikese paindetugevuse tõttu sobib polükristalne teemant peamiselt viimistlusoperatsioonideks. Alates 800 °C algab teemandi muutumine grafiidiks ja kulumiskindluse järsk vähenemine, mis piirab tema kasutamist kõrgematel temperatuuridel. Polükristalne teemant ei sobi oma kõrge afiinsuse tõttu süsinikteraste, Ti, Ni ja Co-sulamite lõiketötluseks ja teda kasutatakse mitteraudmetallide, klaaskiudkomposiitide ja grafiidi kiirlõiketötluseks. Teemandit võib kasutada pindena terikul. Tavaliselt kantakse teemantpinne PVD või CVD meetodil kõvasulamalusele, millest lõigatakse laserlõikusega segmendid, mis joodetakse terakeha taskutesse.

Teemandi järel teisel kohal kõvaduse järgi on **kuubiline boornitriid** (*cubic boron nitride, CBN*). Kuubilist boornitriiti kasutatakse pulbrina abrasiivlõikeriistade valmistamisel ja ka abrasiivmaterjalina, sfääri-, silindri- ja plaadikujuliste polükristallist terikutena treiterades, puurpeades, tõmbesilmades jm. Kuubilist boornitriiti kasutatakse kõvade materjalide viimistlustötluseks, seejuures teraste ja Ni-sulamite lõiketötluseks, kuna ta ei reageeri nendega keemiliselt madalast afiinsusest tingituna. Võrreldes kõvasulamitega saab suurendada lõikekiirusi 10...20 korda. Lõikeriistade kulumiskindluse tõstmiseks kasutatakse samuti kuubilisest boornitriidist pindeid paksusega 0,5...1,0 µm

#### 12.2.4. Teriku kulumine ja püsivus

Teriku pinnad, puutudes kokku laastu ja toorikuga, kuvad suure surve, hõõrdumise ja kõrge temperatuuri toimele. Kui lõikejõud muutuvad liiga suureks, siis lõikeriist puruneb; kui lõiketemperatuur muutub liiga kõrgeks, siis lõikeriist pehmeneb (kuumkõvadus väheneb) ja kulub kiirelt. Teriku kulumine võib avalduda **kulumisribana** (*land*) **kulumisena tagatahul** (*flank wear*) või **kulumisena esitahul** ehk **lohkkulumisena** (*crater wear*), samuti **teriku tipuraadiuse kulumisena** (*nose radius wear*) (Joonis 12.25) või siis kombineeritult. Kulumist tagatahul mõõdetakse kulumisriba laiusega ja lohkkulumist kulumislohu sügavuse või pindalaga. Kulumisriba tagatahul võib olla ebaühtlase laiusega, nt tooriku välispinna kokkupuutealal võib kulumisriba olla laiem, tingituna tooriku pinnakihi suurendatud kõvadusest või abrasiivsusest. Lõikeprotsessis viib pidevalt kasvav kulumine lõpuks tööriista muutmise kasutuskõlbmatuks.



**Joonis 12.25.** Kulumisjälgedega treitera

Lõikeriist võib lõikeprotsessis lõikevõime kaotada järgmistel põhjustel:

1. **Habras purunemine** ehk **murdepurunemine** (*fracture failure*) esineb siis, kui lõikejõud teriku tipus on liiga suured, põhjustades selle habra purunemise.
2. **Termodeformeerumine** (*temperature failure*) esineb siis, kui lõiketemperatuur muutub nii kõrgeks, et teriku tipp muutub pehmeks ja deformeerub plastiselt, mille tulemusena lõikeserv kaotab oma terava serva.
3. **Pidev kulumine** (*gradual wear*) on lõikeserva kulumine, mis põhjustab lõikeriista kaju kaotuse, vähendades lõikamise tõhusust.

Lõikeriista habras purunemine ja termodeformeerumine viivad lõikeriista enneaegsele väljavahetamisele. Nendest kolmest purunemismehhanismist on pidev kulumine prevaleeriv, kuna võimaldab ära kasutada lõikeriista kogu tööressurssi.

Lõikeriista purunemise ja kulumise juures tuleb arvestada tooriku kvaliteediga. Kui tera tipp puruneb lõikeprotsessis, siis kahjustab see enamasti tooriku pinda. Pinna selline vigastus nõuab kas tooriku parandamist või väljapraakimist. Purunemist saab vältida, kasutades selliseid lõikerežiime, mis tingivad pidevat kulumist ilma habra purunemiseta või plastse termodeformeerumiseta. Seejuures tuleb lõikeriista vahetada enne lõikeserva katastroofilise kulumise algust.

Lõikuri terik kulub erinevate mehhanismide järgi, millest igaüks võib teatud töötlemistingimustel olla prevaleeriv. Pideval kulumisel eristatakse järgmisi kulumisliike ja nähtusi.

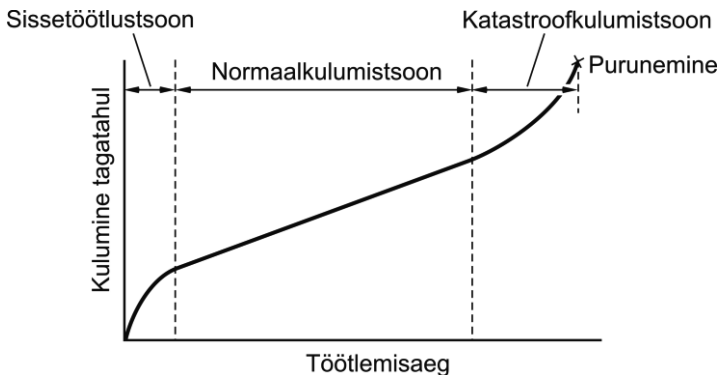
- **Abrasioonkulumine** (*abrasion*) on teriku tööpindade kriimustamine tooriku struktuuris olevate kõvade osakeste (karbiidid, nitriidid jm) poolt. Abrasioonkulumine esineb nii esitahul kui ka tagatahul, kõige suuremal määral tagatahul.

- **Adhesioonkulumine** (*adhesive wear*) on põhjustatud suurtest survetest ja kõrgetest temperatuuridest laastu hõõrdumisest esitahul vastastikuse haardumise tõttu molekulaarjõudude toimel.
- **Difusioonkulumine** (*diffusion wear*) toimub kõrge temperatuuril (üle 800 °C) teriku kontaktpinnas aatomite difusiooni (ümberpaigutumise) tõttu töödeldavasse toorikusse. Selle tagajärjel muutuvad teriku keemiline koostis ja mehaanilised omadused, kuna difundeeruvad välja terikule kõvadust andvad keemilised elemendid. Protsessi jätkudes muutub teriku pind rohkem vastuvõtlikuks abrasioon- ja adhesioonkulumisele. Difusioonkulumist peetakse lohkkulumise põhimehhanismiks. Näiteks WC-Co-kõvasulamite kasutamisel teraste lõiketöötlusel väheneb karbiidide süsinikusisaldus süsiniku difusiooni tõttu, mis põhjustab teriku kõvaduse langust ja kiirendab kulumist. Samal põhjusel on piiratud teemandi kasutamine teraste lõiketöötlusel (vt p 12.2.3).
- **Keemilised reaktsioonid** (*chemical reactions*) avalduvad teriku-laastu kontaktpindadel peamiselt oküdeerumisena kõrgetel lõiketemperatuuridel. Oksiidikiht kui teriku põhimaterjalist pehmem eemaldub, mille tulemusena paljastuvad oksüdeerumiseks uued pinnad.

### Lõikuri püsivusaeg

**Lõikuri püsivusaeg** (*tool life*) on lõikeriista kasutusaeg, mis on seotud teriku kulumisega.

Teriku kulumist iseloomustatakse tagatahu kulumisriba laiuse sõltuvusega töötlemisajast (Joonis 12.26).



**Joonis 12.26.** Lõikuri kulumine tagatahul olenevalt töötlemisajast

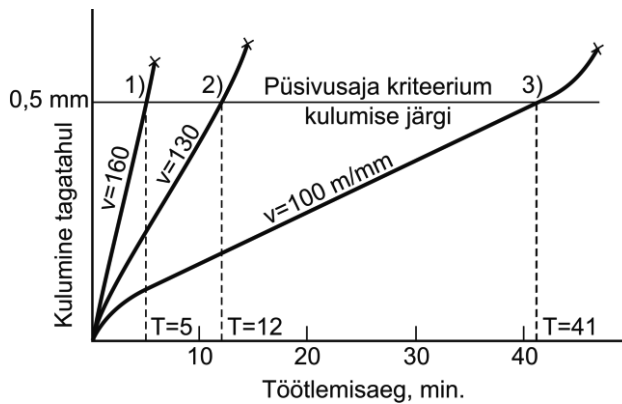
Analoogsed kulumiskõverad iseloomustavad lihvketta kulumist (vt p 12.10.2. Joonis 12.67) ja kulumisnähtusi masinates.

Kulumiskõveratel eristatakse kolme tsooni:



- 1) **sissetöötlustsoon** (*break-in region, initial wear region*), kus kulub terik esimeste töötlemisminutite jooksul kiirelt;
- 2) **normaalkulumistsoon** (*steady-state wear region, secondary wear region*), mis järgneb sissetöötlustsoonile ja seda piirkonda iseloomustab kulumise lineaarne sõltuvus ajast;
- 3) **katastroofkulumistsoon** (*failure region, accelerating wear region*), kus kulumine kiireneb järsult.

Kulumiskõvera kuju oleneb nii tooriku materjalist kui ka lõikerežiimist. Tooriku kõvem materjal põhjustab teriku kiirema kulumise. Sarnaselt mõjutab kulumist lõikekiiruse (Joonis 12.27), ettenihke või lõikesügavuse suurendamine. Kõige suurem mõju teriku kulumisele on lõikekiirusel.



**Joonis 12.27.** Lõikeriista kulumiskõverad erinevatel lõikekiirustel

Lõikuri püsivusaega saab määratleda kui lõikuri tööaega katastroofkulumiseni. Praktikas on lõikuri tööaeg lühem, kuna tekib raskusi teriku taastaval ümberteritamisel või töötlemise käigus halveneb liigselt töödeldava tooriku pinnakvaliteet. Kulumisriba laiust tagatahul (Joonis 12.25) saab lugeda lõikeriista kulumise kriteeriumiks. Joonisel 12.27 on teriku püsivusaja kriteeriumiks tagatahu kulumisriba laius 0,5 mm. Kõvasulamist lõikeplaatide kasutamisel on püsivusaja kriteeriumiks treimisel kulumisriba laius 0,5 mm, puurimisel 0,4 mm, hõõritsemisel 0,1 mm. Kiirlõiketeraste kasutamisel hinnatakse treimisel ja freesimisel lubatud kulumiseks 1,5 mm, puurimisel 0,4 mm. Kui lõiketöötlusel on esitatud täpsuse või pinnakvaliteedi ranged nõuded, vähendatakse lubatud kulumist. Lõikeriista püsivusaeg on üldjuhul lõikekiiruse määramise kriteeriumiks. Sellest järeldub, et tuleb monitoorida lõikeriista kulumist lõikepingis. Seda saab teha kaudmeetodil jooksvalt lõikeprotsessis, nt mõõtes müra või lõikejõudude muutumist. Otsese meetodi kasutamisel tuleb lõikepink peatada, lõikeriist eemaldada ja mõõta kulumist tööriistamikroskoobi või mõõtemasinaga.

Kulumiskõveraaid uurinud *F. Taylor* on pakkunud järgmise seose lõikekiiruse  $v$  ja püsivusaja  $T$  vahel, mida tuntakse **Taylori valemina** (*Taylor tool life equation*) :

$$vT^m = C \text{ või } v_1T_1^m = v_2T_2^m, \quad (12.2)$$

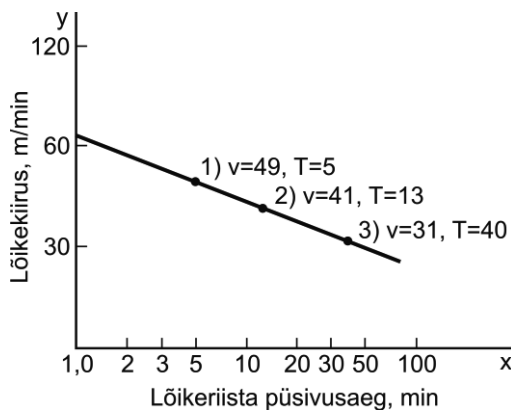
kus  $v$  – lõikekiirus, m/min;

$T$  – püsivusaeg, min;

$C$  – tegur;

$m$  – astendaja.

Tegur  $C$  oleneb töödeldavast materjalist ja terikumaterjalist ning on teraste töötlemisel vahemikus 70...700. Astendaja  $m$  väärtus oleneb terikumaterjalist. Tavaliselt on  $m$  kiirlõiketerasest terikute kasutamisel treimisel 0,125, kõvasulamite kasutamisel 0,22, keraamika kasutamisel 0,6. Kuna  $m$  väärtus on väike, siis isegi väikeste lõikekiiruse muutuste korral muutub püsivusaeg järsult. Lõikekiiruse ja püsivusaja vahelist sõltuvust on otstarbekas vaadelda logaritmilises skaalas (Joonis 12.28). Graafiku kaldenurk iseloomustab püsivusaja muutust lõikekiiruse muutudes, kusjuures graafiku kalle on väiksem kulumiskindlamate terikumaterjalide kasutamisel ( $m$  väärtus on suurem). Graafikutelt lähtub, et kui suurendada lõikekiirust 25 %, siis teriku püsivusaeg väheneb kolm korda. Järelikult ei pruugi lõikekiiruse suurendamine olla alati tootlikkuse tõstmisel tõhus.



**Joonis 12.28.** Lõikekiiruse ja püsivusaja olenevus logaritmilises teljestikus

Lõikeriistade tootjad annavad oma tootekataloogides oodatava püsivusaja kindlate lõikerežiimide juures, mis on treimisel vahemikus 2...20 min. Kasutades *Taylori* valemit, on võimalik hinnata oodatavat püsivusaega töötlemisprotsessi lõikeparameetrite muutmisel. Lõiketöötlemise automaatliinide kasutamisel tuleb arvestada ühe töövahetuse pikkuse teriku püsivusajaga ja vastavalt valida lõikekiirus.

### 12.2.5. Lõiketöödeldavus

Tooriku materjal on olulise mõjuga lõiketöötlusprotsessile. Materjali **lõiketöödeldavus** (*machinability*) on materjali tehnoloogiline omadus, mis iseloomustab tema sobivust lõiketöötamiseks lõikeriistadega ja lõikepinkidel. Lõiketöödeldavust saab hinnata paljude kriteeriumite järgi, millistest olulisemad on: 1) teriku püsivusaeg; 2) lõikejõud ja lõikevõimsus; 3) saavutatav pinnakvaliteet; 4) laastu eemalejuhtimise kergus.

Lõiketöödeldavus on loomult kompleksnäitaja ja seetõttu on raske kvantitatiivselt hinnata erinevaid materjale. Lõiketöödeldavust käsitletakse tavaliselt kui töödeldava materjali omadust, kuid see on veel paljudest teistest teguritest. Siia alla kuuluvad nii töötlusprotsess, lõikeriista materjal ja lõikerežiim. Olenevalt töötlemisviisist (koorivtöötlus või puhastöötlus) on tähtsad erinevad kriteeriumid. Näiteks koorivtöötlusel on kriteeriumiks lõikejõud ja laastu eemaldamise kergus. Puhastöötlusel on olulisel kohal detaili pinnakaredus ja lõikamisel tekkinud kalestunud pinnakihi paksus ning pingete iseloom selles. Ühe materjali lõikamisel saavutatakse pikem püsivusaeg, kuid teise materjali korral saadakse parem pinnakvaliteet. Kõik need tegurid teevad raskeks materjalide lõiketöödeldavuse hindamise. Erinevate materjalide lõiketöödeldavust hinnatakse katseliselt leitud **lõiketöödeldavusteguriga** (*machinability rating*) tavaliselt mingi etalonmaterjali suhtes. Teguri määramisel võetakse arvesse selliseid näitajaid nagu püsivusaeg, lõikuri kulumine, lõikejõud, lõiketemperatuur, materjali eemalduskiirus lõikamise standardrežiimil.

Etaloniks võetakse eri maades erinevad terasemargid, näiteks USA-s hea lõiketöödeldavusega terase mark B1112 (0,08...0,13 % C, 0,6...0,9 % Mn jne), millele vastab Euroopas terase mark 10S10 (0,1...0,12 % C, 0,75...1,1 % Mn), Venemaal aga süsinikteras C45 (0,42...0,5 % C, 0,5...0,8 % Mn).

Kerglõiketöödeldavatel materjalidel on lõiketöödeldavustegur suurem kui 1 ja rasketöödeldavatel materjalidel alla 1. Mõningate materjalide lõiketöödeldavustegurid on esitatud Tabelis 12.3.

Lõiketöödeldavust mõjutavad tooriku materjali mehaanilised omadused – kõvadus ja tugevus. Kui kasvab kõvadus, suureneb abrasioonkulumine ja väheneb lõikeriista püsivusaeg. Materjali tõmbetugevuse suurenedes kasvavad lõikejõud, lõikevõimsus ja lõiketemperatuur, mis kokkuvõttes muudavad materjali raskemini töödeldavaks. Seejuures võib kõvadusel olla erandjuhul vastupidine mõju lõiketöödeldavusele. Näiteks väikese kõvadusega madalsüsinikterased on sageli nii plastsed, et see halvendab lõiketöödeldavust, põhjustades pinnakaredust suurendava terikukasvaja teket.

**Tabel 12.3.** Erinevate metallide lõiketöödeldavustegur

Tooriku materjal	Brinelli kõvadus	Lõiketöödeldavustegur
Etalonteras – hea lõiketöödeldavusega teras 10S10	180...220	1,0
Süsinikkonstruksiooniteras (0,08...0,15 % C)	130...170	0,5
Süsinikkonstruksiooniteras (0,2...0,3 % C)	140...210	0,65
Süsinikkonstruksiooniteras (0,4...0,5 % C)	180...230	0,55
Madallegeerkonstruksiooniteras	170...230	0,45...0,65
Roostevaba teras (austeniitne)	160...210	0,35...0,55
Roostevaba teras (martensiitne)	190...210	0,9
Kerglõiketöödeldavusega teras	160...220	1,50
Tööriistateras (karastamata)	200...250	0,3
Malm	100...200	0,55...0,7
Titaan ja titaanisulamid	160...280	0,2...0,3
Alumiinium ja alumiiniumisulamid	50...130	1,25...5,0

Materjali keemiline koostis mõjutab lõikeriista kulumismehhanismi ja läbi selle ka lõiketöödeldavust. Näiteks konstruksiooniterase süsiniksisalduse kasvades suurenevad nii kõvadus kui ka tugevus, mistõttu lõiketöödeldavus halveneb. Legeerivad elemendid, nagu kroom, molübdeen ja volfram, moodustavad terases karbiide ja halvendavad lõiketöödeldavust. Mangaani ja nikli lisamine suurendavad terase tugevust ja sitkust, kuid halvendavad lõiketöödeldavust. Alumiiniumil ja ränil on kahjulik mõju terase töödeldavusele kõvade ja abrasiivsete oksiidide tekkimise tõttu. Peeneteralise struktuuriga teras on oma suurema tugevuse tõttu halvema lõiketöödeldavusega kui jämeteraline, kuid samal ajal saavutatakse parem pinnasiledus.

Lõiketöödeldavus oleneb ka metallurgilistest mõjuritest. Näiteks on rahuliku terase lõiketöödeldavus parem kui keev- või poolrahulikel terastel. Süsiniksisalduseni 0,3...0,45 on külmvaltsteraste lõiketöödeldavus parem kui kuumvaltsterastel, kuid teraste süsiniksisaldusel üle 0,4 % on kuumvaltsteraste lõiketöödeldavus parem. Väga sitked kuumustugevad terased on raskesti lõiketöödeldavad ja tuleb eelistada mittetraditsioonilisi töötlusmeetodeid. Valusulamite korral tuleb arvestada nende suurendatud abrasiivsusega, mistõttu tuleb eelistada suurema kõvadusega terikumat materjali. Suure joonpaisumisteguriga materjalide, näiteks alumiiniumi töötlemisel, võib esineda mõõtmete täpsusega probleeme. Vähem vastutusrikaste toodete valmistamisel kasutatakse kerglõiketöödeldavusega teraseid, mis on legeritud lõike-

töödeldavuse parandamiseks selliste elementidega nagu S, Pb jt, mis võimaldab vältida voolava laastu tekkimist ja juhtida laastu hõlpsasti lõiketsoonist eemale.

Austeniitne roostevaba teras on raskesti töödeldav, kuna tekib väga pikk ja voolav laast ning esineb suur tooriku vibratsiooni oht, mistõttu on vaja kasutada jäika lõikepinkki.

Hallmalm on üldiselt hästi lõiketöödeldav, kuid murdelaastu ja vibratsioonide tekkimise tõttu ning teriku murenemise vältimiseks tuleb kasutada sitkemat lõikuri-materjali.

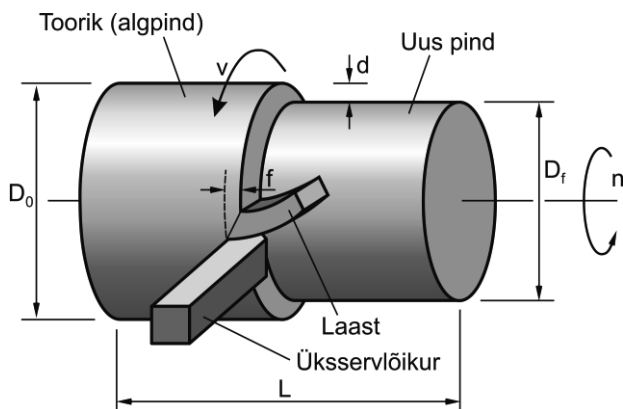
### **Mitteraudmetallide ja mittemetallide lõiketöödeldavus**

Alumiiniumi ja vase töötlemisel tuleb arvestada terikukasvaja tekkega, mis avaldub pinnasileduse järsus halvenemises. Seda saab vältida lõikevedeliku kasutamisega. Alumiiniumi valusulamid on abrasiivsed, mistõttu on vaja kasutada kõvemini terikumaterjali. Messing on hästi töödeldav, kuid pronksid on messingist halvemini töödeldavad. Titaan ja -sulamid on väga madala soojusjuhtivusega, mis põhjustab kõrget lõiketemperatuuri koos terikukasvaja tekkega. Seetõttu loetakse titaani ja titaanisulameid rasktöödeldavate materjalide hulka.

Termoplastide lõiketöötlusel, tingituna nende madalast soojusjuhtivusest, elastsusmoodulist ja pehmenemistemperatuurist, materjal pehmeneb, muutudes kuumenemisel kummitaoliseks ja kleepub teriku külge. Selle vältimiseks tuleb lõiketsooni juhtida lõikevedelikku. Lõikamisel on vaja kasutada suure esi- ja taganurgaga terikuid, kuna need on teravamad, väikeseid lõikesügavusi ja ettenihkeid ning suhteliselt suurt lõikekiirust. Reaktoplastid on haprad ja nende lõiketöödeldavus on üldiselt termoplastide omaga sarnane. Armeeritud plastid on väga abrasiivsed ja raskesti lõiketöödeldavad (vt ka p 14.2.2. Plastide lõiketöötlus).

## **12.3. TREIMINE JA SISETREIMINE**

Treimine on lõiketöötlusprotsess, mille käigus eemaldatakse pöörlevalt toorikult materjali ükskservlõikuri abil. Lõikeriist-treilõikur saab pikitreimisel liikumise päralleelselt pöörleva tooriku teljega (vt Joonis 12.29). Treitakse tavaliselt lõikepingis, mida nimetatakse **treipingiks** (*lathe*), mis tagab tooriku pöörlemise ja treilõikuri etteantud kiirusega ja lõikesügavusega lõikeliikumise. Treimisega on võimalik saada silindrilisi ja koonilisi pindu, tasaseid otpindu ning keerulise kujuga välis- või sisepindu (kujupindu), samuti lõigata keeret.



Joonis 12.29. Silinderpinna pikitreimine

### 12.3.1. Lõikeparameetrid treimisel

**Lõikekiirus** (*cutting speed*) treimisel määratakse valemiga:

$$v = \pi D_0 n, \quad (12.3)$$

kus:  $v$  – lõikekiirus, m/min;

$D_0$  – tooriku välisläbimõõt, m (otstreimisel kasutatakse keskläbimõõtu  $D_m$ );

$n$  – tooriku pöörlemissagedus,  $\text{min}^{-1}$  ehk pöret/ min.

Tooriku **pöörlemissagedus** (*rotational speed*),  $\text{min}^{-1}$

$$n = \frac{v}{\pi D_0}. \quad (12.4)$$

**Ettenihke** (*feed*)  $f$  on lõikeserva poolt läbitud teekond ettenihkeliikumise suunas töötlustsükli jooksul, treimisel tooriku ühe pöörde kohta, mm/pöore.

**Ettenihkekiirus** (*feed rate*)  $f_r$  on lõikeserva liikumiskiirus minutis, mm/min:

$$f_r = n f. \quad (12.5)$$

**Lõikesügavus** (*depth of cut*)  $d$  on töödeldava ja töödeldud pinna vaheline kaugus (mm) mõõdetuna risti ettenihkesihiga. Välispikitreimisel

$$d = \frac{D_0 - D_f}{2}, \quad (12.6)$$

kus:  $D_0$  – tooriku algläbimõõt enne töötlemist;

$D_f$  – tooriku lõpläbimõõt, mm.

Laastu eraldamiseks vajalik töötlemisaeg  $T_m$ , min avaldub seosest:

$$T_m = \frac{L_1}{nf}, \quad (12.7)$$

kus:  $L_1$  – löikepikkus, mm (vt Joonis 12.29) on tooriku pikkuse  $L$ , tera minimaalse ülejooksu ja sissejooksu kauguste summa. Saab arvutada ka valemiga

$$T_m = \frac{L_1 \pi D_0}{vf}. \quad (12.8)$$

**Materjali eemalduskiirus** (*material removal rate*)  $R_{mr}$ , mm<sup>3</sup>/min võrdub

$$R_{mr} = vfd. \quad (12.9)$$

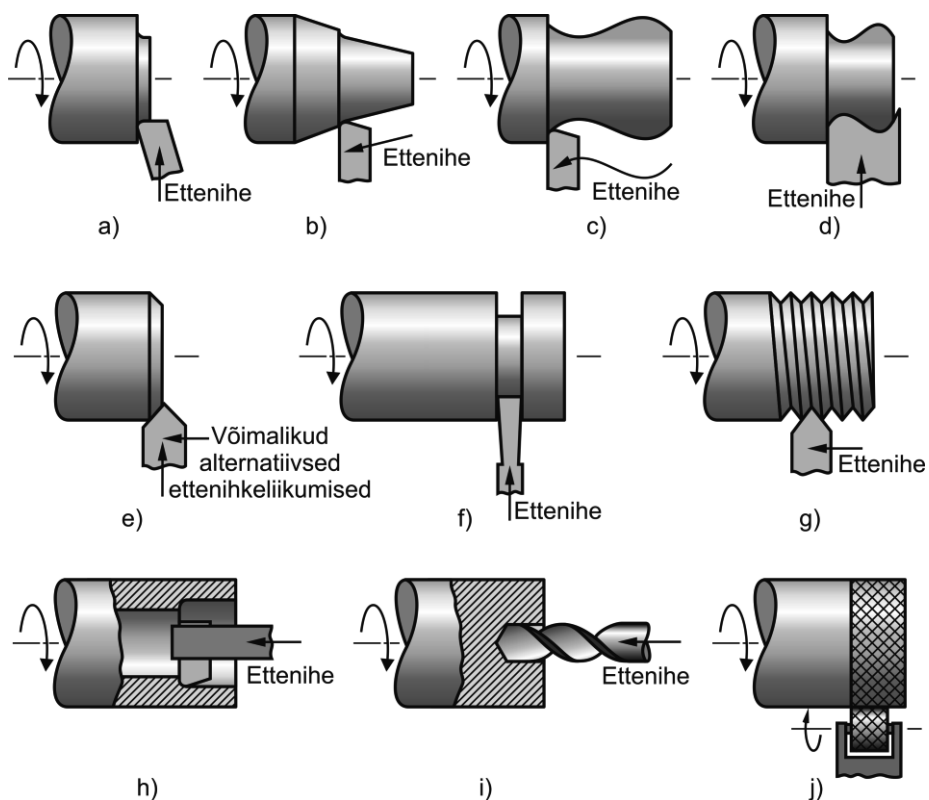
### 12.3.2. Treimisprotsess ja treiterad

Treipinkidel teostatud treimisoperatsioonid ja sellele vastavad **treiterad** ehk **treilõikurid** (*lathe tools*) on:

- **Silinderpinna treimine** (*straight turning*). Treiteraga ehk treilõikuriga (piki-treiteraga) pikiettenihkega silindrilise pinna saamine (Joonis 12.29).
- **Ostreimine** (*facing*). Treilõikur (otsatera) liigub mööda pöörleva tooriku otspinda kuni teljeni, moodustades seal tasapinna (Joonis 12.30a).
- **Koonuse treimine** (*taper turning*). Treilõikur (pikitreitera) saab kaldettenihke, moodustades koonilise pinna (Joonis 12.30b).
- **Kontuurtreimine** (*contour turning*). Treilõikur (astmetaera, pikitreitera) liigub sirgettenihkest erineva, detaili kuju kopeeriva kontuuri järgi (Joonis 12.30c).
- **Kopeertreimine** ehk **kujutreimine** (*form turning*). Kujupind tekib detaili kujule vastava lõikeservaga treilõikur – kopeertera ehk kujutera radiaalsel liikumisel ehk ristettenihkel toorikusse (Joonis 12.30d).
- **Faasitreimine** (*chamfering*). Treilõikuri lõikeserv saab kas piki- või ristettenihke ja lõikab silindrilise pinna otsa lühikese koonilise pinna ehk faasi (Joonis 12.30e).
- **Mahalõikamine** (*cut off*). Treilõikur (mahalõiketera) saab ainult ristettenihke radiaalsuunas ja eemaldab tooriku või detaili ühe osa teisest. Nimetatakse ka **tükeldamiseks** (*parting*) (Joonis 12.30f).
- **Keermestamine** (*threading*). Treilõikur (keermetera) saab tooriku teljega paralleelse ettenihkeliikumise ja moodustab silindripinnal keerme (Joonis 12.30g).
- **Sisetreimine** (*boring*). Treilõikur (sisetreitera) saab avaga toorikus selle teljega paralleelse pikiettenihke ja töötleb sisemist silindripinda (Joonis 12.30h).
- **Puurimine** (*drilling*). Silindrilisse pöörlevasse toorikusse ava puurimine toimub treipingis puuriga, mis on kinnitatud tagapuki pinooli ja saab ettenihke

piki tooriku telge. Hõõritsemine toimub analoogselt puurimisega (Joonis 12.30i) (vt p. 12.4).

- **Rihveldamine** (*knurling*). Ei ole lõiketötluse, vaid survetötluse operatsioon, mida teostatakse treipingis. Silindrilise pinna karestamine toimub erilise mustriaga rulliga selle surumisel pöörlevasse toorikusse korrapärase mustri saamiseks (Joonis 12.30j).
- **Soonetreimine** (*grooving*). Treilõikuriga (mahalõiketera, soonetera) ristette-nihkega silindrilisse toorikusse soone lõikamine (vt Joonis 12.30f). Erineb mahalõikusest selle poolest, et tera tipp ei liigu tooriku teljeni.



**Joonis 12.30.** Peamised treimisoperatsioonid: a – otstreimine; b – koonuse treimine; c – kontuurtreimine; d – kopeertreimine (kujutreimine); e – faasitreimine; f – mahalõikamine või soonetreimine; g – keermestamine; h – sisetreimine; i – puurimine; j – rihveldamine

Enamikul treimisoperatsioonidel kasutatakse üksservlõikureid. Keermestamisel kasutatakse üksservlõikurit või kopeertera, mille geometria vastab kerme profiilile. Kopeertreimine toimub selleks spetsiaalselt konstrueeritud üksservlõikuriga – kopeerteraga, mille kaju kantakse edasi toorikule. Mahalõikamine ja soonetreimine on sisuliselt lõiketötlus erilise kopeerteraga (kujuteraga). Puurimisel kasutatakse



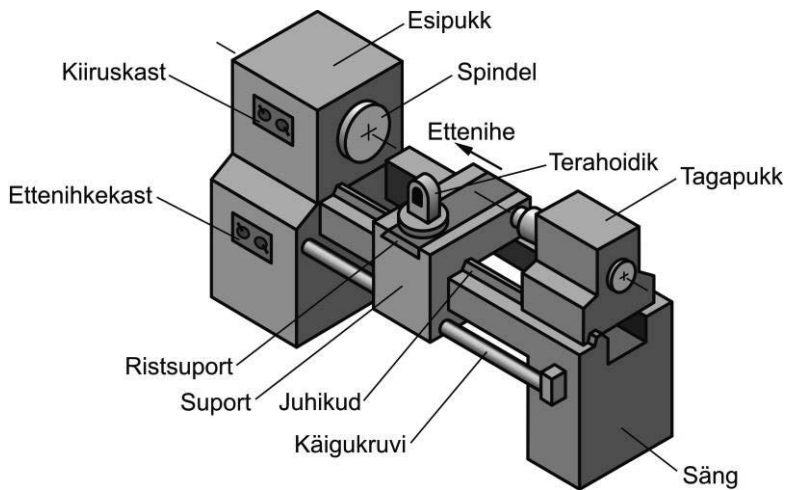
tavaliselt keerdpuure (vt Joonis 12.18). Rihveldamine toimub tooriku teljega paralleelse ühe või kahe karastatud rihveldusrulli abil, mis on kinnitatud treipingi terikuhoidikusse ja surutakse pöörlevasse toorikusse.

### 12.3.3. Universaaltreipingid

Vaatleme metallilõikepinkide ehitust enim levinud pingitüübi, universaaltreipingi näitel.

**Treipink** (*lathe turning machine*) on lõikepink, millega töödeldakse peamiselt pöördkehi toorikult laastu eemaldades. **Universaaltreipink** (*engine lathe, screw-cutting machine*) on treipink, millel saab treida pöördpinda, otspinda ja lõigata keeret. Universaaltreipink koosneb järgmistest osadest (Joonis 12.31). **Sängile** (*bed*) toetuvad ja kinnituvad kõik lõikepingi osad. Sängi vasakpoolsele otsale toetub **esipukk** ehk **spindlikast** (*headstock*), milles asub spindli ajam-kiiruskast ja millest ulatub välja **spindel** (*spindle*). Spindel on lõikepingis pöörlemist edastav töövõll. Lõikepinkides edastab spindel pöörlemise toorikule (treipingis) või lõikeriistale (näiteks puurpingis). Treipingis on tooriku kinnitamiseks lõikepingi spindel varustatud erinevat tüüpi padrunite või tsentriga. **Kiiruskasti** (*gearbox*) mehhanismid ja ülekanded võimaldavad muuta spindli pöörlemissagedusi ja -suunda. Spindlile on paigutatud tooriku kinnitusseade, tavaliselt padrun. Esipukist allpool paikneb **ettenihkekast** (*feed box*), kus on mehhanismid ja ülekanded supordi erinevate liikumiskiiruste saamiseks ja reverseerimiseks.

Esipuki vastas paikneb sängi parempoolses otsas **tagapukk** (*tailstock*), mida võib pikisuunas nihutada. Tagapukis olevasse **pinooli** (*quill, tailstock spindle*) võib kinnitada tooriku otsa toetamiseks pöörleva või mittepöörleva tsentri või vajadusel puuri. Treiterad kinnitatakse **suportis** (*carriage*) asetsevasse **terahoidikusse** ehk **lõikurihoidikusse** (*tool post*), mis saab ettenihkeliikumise **pingi juhikute** (*ways*) suhtes kas piki- või ristsuunas. Suportisse kinnitub **ristkelk** ehk **ristsuport** (*cross-slide*), mille abil saab terahoidik radiaalsuunas liikumise risti tooriku teljega ehk ristettenihke. Suporti eesosas asetsevat osa nimetatakse **supordipõlleks** (*carriage apron, apron*), milles asetsevad mehhanismid, mis muudavad **käiguvõlli** ehk **veovõlli** (*feed rod*) või **käigukruvi** ehk **veokruvi** (*leadscrew*) pöörleva liikumise supordi kulgliikumiseks. Käigukruvi kasutatakse keerme lõikamiseks.



**Joonis 12.31.** Universaaltreipink

Tavatreipingid ja teised eespool kirjeldatud lõikepingid kuuluvad **horisontaaltreipinkide** (*horizontal turning machines, horizontal lathe*) rühma, kuna nende spindel on horisontaalne. Suure läbimõõduga, suhteliselt lühikeste ja raskete detailide töötlemiseks on sobivam paigaldada toorik nii, et ta pöörleks ümber vertikaalse telje. Sellise konstruktsiooniga treipingid on **vertikaaltreipingid** (*vertical turning machines, vertical lathe*).

Treipingi suurust kirjeldatakse töödeldava **treitooriku maksimumläbimõõduga** (*swing*), mis iseloomustab treipingi kahekordset tsentrite kõrgust. Sageli näidatakse treipingi tehnilise karakteristikuna **tsentrite kõrgust** (*one-half swing*), mis näitab treipingi tsentrite kaugust pingi sängist ja mis määrab treitava tooriku võimaliku maksimaalse raadiuse. Pingi **tsentrite vahekaugus** (*distance between centers*) näitab pingi tsentritesse kinnitatud tooriku suurimat pikkust.

### Tooriku kinnitusmeetodid treipingis

Tavaliselt kasutatakse peamiselt nelja tooriku kinnitusmeetodit treipingis (Joonis 12.32). Kasutatakse ka paigaldamist tornile (Joonis 12.33). Suure pikkuse-läbimõõdu suhtega võllide korral kasutatakse tsentritesse kinnitamist (Joonis 12.32a). Tsentritesse kinnitamisel kasutatakse esipukile kinnituvat ja koos toorikuga pöörlevat **esitsentrit** (*head center*) ja tagapuki pinoolile kinnituvat **tagatsentrit** (*tailstock center*). Pöörlemine antakse spindlilt toorikule **kaasaveopadruni** (*dog plate*) ja **kaasaveduki** ehk **kaasavedaja** (*lathe dog, lathe carrier*) abil. Kaasaveopadrun on kinnitatud treipingi spindlile ja paneb kaasaveduki kaudu pöörlema töödeldava tooriku. Kaasaveduk on toorikule kinnituv klambrikujuline rakis, mille painutatud osa haarab kaasa kaasaveopadruni soon või väljaulatuv sõrm ja edastab nii

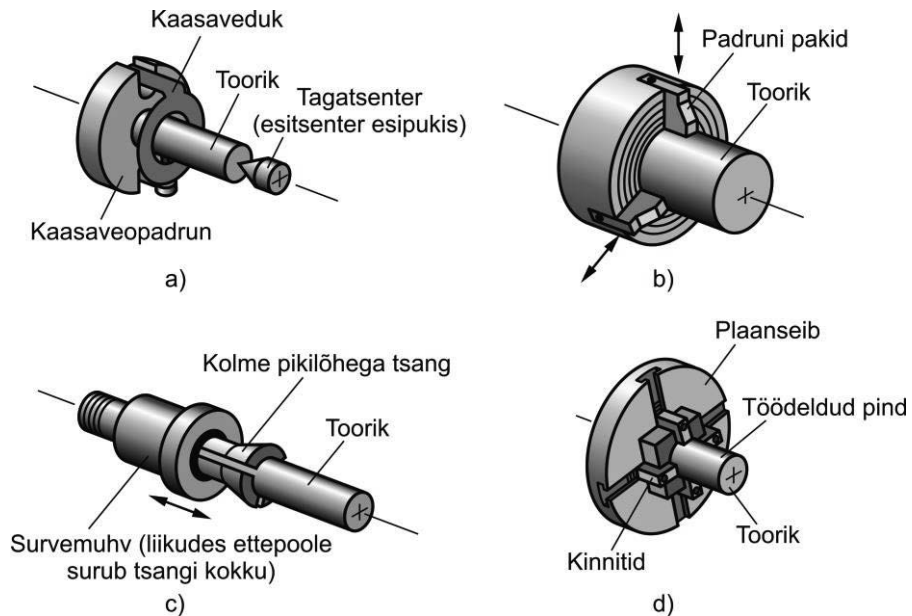
pöördemomendi spindlilt toorikule (Joonis 12.32a). Tagatsentrina kasutatakse kas pöördtsentrit või liikumatut tsentrit. **Pöördtsenter** (*live center, revolving center*) on tagapuki pinooli kinnituv ja toorikuga kaasa pöörlev tsender. Toorikute otstes puuritakse eelnevalt tsentriavad (vt p. 12.4.1), mille kaudu ta kinnitub tsentritesse. Pöördtsenter pöörleb veerelaagritel ja leiab kasutust suurematel pöörlemiskiirustel. Kuna puudub tsentri ja tooriku vaheline suhteline pöörlemine, siis ei toimu hõõrdumist tooriku ja tsentri vahel. **Liikumatu tsender** (*dead center*) kinnitatakse tagapuki pinooli toetamiseks tooriku tsentriava kaudu toorikut. Tsentri ja tooriku ava vastastikusel hõõrdumisel mõlemad kuumenevad, seetõttu kasutatakse liikumatut tsentrit tavaliselt väiksematel pöörlemiskiirustel. Koorivtöölusel võidakse tooriku vasakpoolne ots kinnitada padrunisse ja parempoolne ots tsentrisse.

Lühikesed toorikud kinnitatakse **padrunisse** (*chuck*). Padrunid võivad olla väga erineva konstruktsiooniga ja neil võib olla kolm või neli väljaulatuvat **pakki** (*jaw*), mille abil kinnitatakse toorik tavaliselt välispinnalt. Padrunipakkidega on võimalik kinnitada ka torukujulisi toorikuid siseavast. **Kolmepakiline padrun** (*three-jaw chuck*) sisaldab kolme liikuvat osa ehk pakki, mis liiguvad keskmee poole üheaegselt ja tsentreerivad tooriku (Joonis 12.32b). Seda padrunit nimetatakse **isetsentreerivaks padruniks** (*self-centering chuck*). Kolmepakilise padruni pakid võib padruni soontes ümber keerata ja nii haarata välisläbimõdult suuremaid toorikuid. Teised padrunid, nt **neljapakiline padrun** (*four-jaw chuck*) sisaldavad nelja paariviisi sõltumatu liikumisega pakki. Selliseid padroneid kasutatakse pöördkehadest erineva kujuga, nt nelinurkse ristlõikega toorikute kinnitamiseks treipinki. Padroneid võidakse kasutada koos või ilma tagapuki tsentriteta.

Suhteliselt lühikesed silindrilised toorikud kinnitatakse kolmepakilisse padrunisse. Pikemate toorikute korral tuleb toorikut teisest otsast toetada tagatsentriga või siis otstest eemal toetada **liikumatu lünetiga** (*steady rest*) või **liikuva lünetiga** (*follow rest*). Lünett on treimisel kasutatav tugi pikkade toorikute jäikuse tõstmiseks.

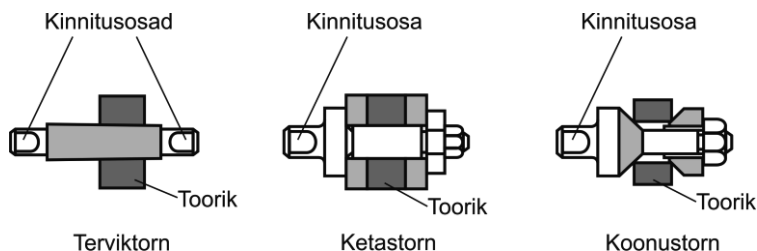
**Tsangpadrun** (*collet chuck*) kujutab endast silindrilist pikilõhistega ja radiaalsuunas elastselt deformeeruvate haaratselementidega vedruterasest detaili, mis koonilise välispinna kaudu on kontaktis koonilise avaga survemuhviga (Joonis 12.32c). Survemuhvi liikumisel pikisuunas surutakse tsangi kinnituselemendid vastu tooriku välispinda radiaalsuunas kokku. Kasutatakse tavaliselt varbtoorikute kinnitamiseks treipinki. Kuna tsangpadruni mokaade liikumisulatus on piiratud, saab teda kasutada ainult teatud läbimõdduga toorikutele.

**Plaanseib** (*face plate*) on treipingi spindlile paigutatud kettakujuline tarvik, mille külge saab soontes sõltumatult liikuvate **kinnitite** (*clamps*) abil saab kinnitada ebakorrapärase kujuga toorikuid (vt Joonis 12.32d). Kinnitatakse selliseid toorikuid, milliseid ei ole võimalik treipinki kinnitada teiste meetoditega.



**Joonis 12.32.** Tooriku kinnitusmeetodid treipingis: a – tsentritesse koos kaasavedukiga (esitsenter joonisel näitamata); b – kolmepakilisse isetsentreerivasse padrunisse, c – tsangpadrunisse; d – plaanseibil

Kettakujulisi detaile, millel on vaja töödelda mõlemad otspinnad või mille juures tuleb pärast treimisoperatsiooni tagada järgneval lõiketötlusel (nt hammasrataste hamba- lõikusel) ava ja lõigatava pinna samatelgsus, kasutatakse paigaldamist tornile. **Tornide (mandrels)** kolm põhitüüpi on näidatud Joonisel 12.33. **Terviktorn (solid mandrel)** töödeldakse (lihvitakse) täpselt kinnitusava mõõdu järgi, kusjuures tema pind on väikese koonilisusega. Puuritud või sisetreitud avaga toorik pressitakse tornile. Torn koos toorikuga kinnitatakse treipingi tsentritesse. Ettenihkejõu toimel pressitakse torni tooriku avasse. **Ketastorni (disk mandrel)** korral kinnitatakse avaga toorik või toorikud mutriga torni otspindade vahele. Toorikuid saab kiirelt eemaldada. **Koonustornid (cone mandrels)** ei taga suurt tsentreerimistäpsust, kuid nende eeliseks on asjaolu, et neid saab kasutada tooriku erineva läbimõõduga avade korral. Võidakse kasutada **tsangtorne (collet mandrels)**, milles on pikipilud ja mis võimaldavad kinnitada toorikut tsangi läbimõõtu suurendades.



**Joonis 12.33.** Tooriku paigaldamine tornile: a – terviktorn; b – ketastorn; c – koonustorn

### 12.3.4. Muud treipingid

Lisaks mitmesugusteks treimistöodeks ja keermelõikuseks kasutatavatele **universaal-treipinkidele** (*engine lathe*) (Joonis 12.31) on olemas terve rida teisi, spetsiifilise funktsionaalsusega või automatiseeritud treimistöid võimaldavaid treipinke. Selliste treipinkide hulka kuuluvad: a) tööriistatreipink; b) kiirlõiketrepink; c) revolver-treipink; d) automaattreipink; e) poolautomaattreipink.

**Tööriistatreipink** ehk **instrumentaaltreipink** (*toolroom lathe*) on väiksem kui universaal-treipink, kuid võimaldab muuta lõikekiirusi ja ettenihkeid laiemas vahemikus. Pinki iseloomustab suurem töötlustäpsus ja seetõttu kasutatakse seda tööriistade, rakiste jt täpsete detailide valmistamiseks.

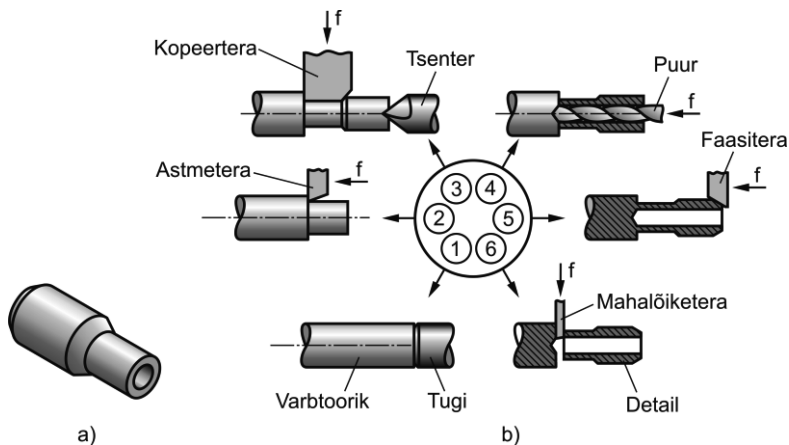
**Kiirlõiketrepink** (*speed lathe*) on lihtsama ehitusega kui universaal-treipink. Tal puudub suport ja veokruvi selle liikumapanekuks. Lõikurid toetuvad toele. Pöörlemiskiirused on suured, kuid erinevate kiiruste arv piiratud. Kasutatakse puidu treimisel, rotatsioonvormimisel (vt p 8.4.2) ja poleerimisel.

**Revolvertreipink** (*turret lathe*) on treipink, mille tagapukk on asendatud **revolverpeaga** (*turret*), mis tavaliselt saab pikiettenihke. Revolverpea igasse pesasse saab kinnitada erinevaid lõikeriistu. Lõikeriista vahetus toimub kiiresti revolverpead pöörates. Lõikurid, mis saavad pikiettenihke (treiterad, puurid, hõõritsad), kinnitatakse revolverpea pesadesse. Ristettenihkega treiterad kinnitatakse ristkelgu (ristsupordi) lõikurihoidikusse. Lisaks võib pink olla varustatud täiendavate ristsuportitega. Revolverpead koos erinevate lõikeriistadega pööratakse ümber vertikaalse või horisontaalse telje. Revolvertreipinke kasutatakse keerukate detailide valmistamiseks, mille juures on vajalik mitmete lõikeriistade kasutamine.

Treipinkide juhtimissüsteemi järgi eristatakse veel poolautomaat- ja automaattreipinke. **Treiautomaat** ehk **automaattreipink** (*automatic lathe, turning automatic*) on treipink, mille töö on täielikult treimisoperatsioonide läbiviimiseks automatiseeritud. Varbtoorikute töötlemiseks kasutatakse sageli tsangpadruniga varustatud **varbtrei-automaate** (*automatic bar machine, automatic bar lathe*), kus varbtoorikuid töödeldakse erinevate lõikeriistadega ja valmisdetail lõigatakse maha mahalõike-

teraga. Keermestatud poltide jt keerulisemate detailide valmistamiseks kasutatakse **universaaltreiautomaate** ehk **universaalautamaatreipinke** (*automatic screw machines*), mis on tavaliselt varustatud täiendavalt radiaalsuunas liikuvate ristsuportitega. Eristatakse veel **poolautomaatreipinke** (*semiautomatic lathes, semi-automatic machines*), milles tooriku paigaldamine ja detaili mahavõtmine ja pingi käivitamine toimub käsitsi pingi operaatori poolt, töötlemisprotsess aga automaatsükli järgi. Need treipingid on levinud üksiktoorikute (valandite, sepiste jm) töötlemisel. **Arvjuhtimisega treikeskustes** ehk **CNC-treikeskustes** (*computer numerical control turning centers, CNC turning centers*) toimub töötlemine **arvjuhtimise** (*computer numerical control, CNC*) abil. Sellised pingid võimaldavad sageli teha ka freesimis-, puurimis- ja keermestustöid.

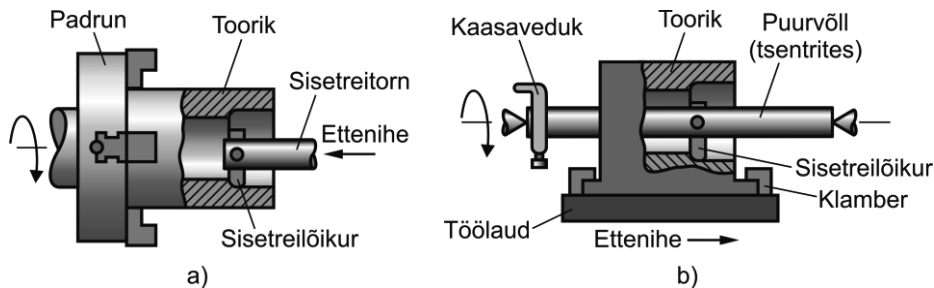
Varbtoorikute töötlemiseks kasutatakse **ühespindlilisi varbtreipinke** (*single-spindle bar machines, single-spindle bar lathes*), tootlikkuse tõstmiseks ka **mitmespindlilisi varbtreipinke** (*multiple-spindle bar machines, multiple-spindle automatic lathes*). Mitmespindlilistes varbtreipinkides on enam kui üks spindel, tavaliselt 4, 6 või 8. Toorikut töödeldakse igas spindlis samaaegselt erinevate lõikeriistadega. Töötlemise lõppedes spindlis ühes positsioonis, pööratakse spindel järgmise positsiooni ja töödeldakse selles. Joonisel 12.34 on näidatud kuuespindlilise varbtreiautomaadi töötlemisetapid. Pingi spindlid (6 tk) kinnituvad trumlile ja neid pööratakse kiirelt pärast ühes positsioonis töötlemist järgisesse positsiooni. Igas positsioonis on võimalik kinnitada lõikeriistad ristsuportisse (ristkelku) või pikisuportisse (pikikelku). Näiteks söödetakse varbtoorik positsioonis 1 toeni, positsioonis 2 toimub välisläbimõõdu treimine, positsioonis 3 kopeertreimine ja positsioonis 4 puurimine. Positsioonis 5 lõigatakse treiteraga faas ja positsioonis 6 toimub valmis detaili mahalõikamine.



**Joonis 12.34.** Töötlemine kuuespindlilisel varbtreiautomaadil: a – töödeldud detail; b – töötlemisjärjestus positsioonides: 1 – varb liigub toeni; 2 – välisläbimõõdu treimine; 3 – kopeertreimine (kujutreimine); 4 – puurimine; 5 – faasitreimine; 6 – mahalõikamine

### 12.3.5. Sisetreimine ja sisetreipingid

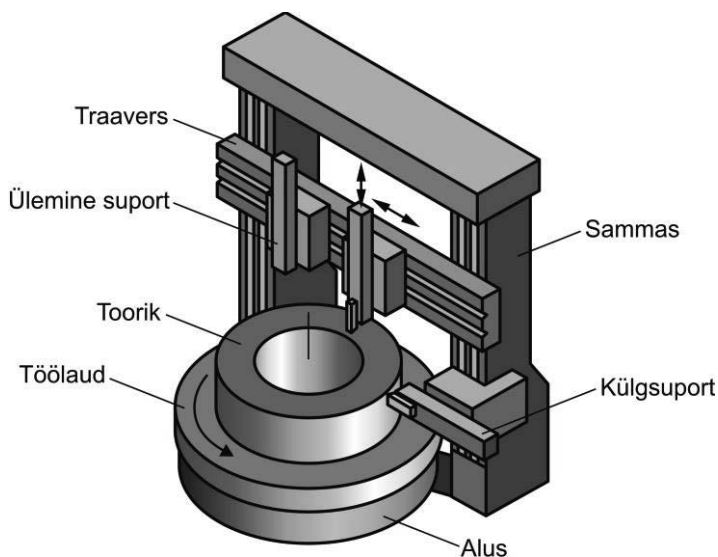
Sisetreimine sarnaneb silinderpinna treimisega. Kasutatakse ükservlõikureid ja tavaliselt pöörlevat toorikut. Erinevuseks tavatreimisest on see, et töödeldakse eelnevalt valmistatud ava sisepinda, mitte silindrilise tooriku välispinda. Sisetreimisel kasutatavaid metallilõikepinke nimetatakse **sisetreipinkideks** (*boring machines, boring mills*). Nad erinevad oma konstruktsioonilt tavatreipinkidest, kuid ka viimaseid võidakse kasutada sisetreimiseks. Sisetreipingid liigitatakse horisontaal- ja vertikaalsisetreipinkideks. Selline pinkide liigitus viitab lõikepingi spindli või tooriku telje orientatsioonile. Horisontaalsisetreimisel võib töötlemine toimuda kahel viisil. Esimesel juhul kinnitatakse toorik pöörlevasse padrunisse ja sisetreilõikur on kinnitatud konsoolsele **sisetreitornile** (*boring arbor*), mis saab ettenihke tooriku telje suunas (Joonis 12.35a). Teine võimalik seadistus on selline, kus sisetreilõikur on kinnitatud **puurvõllile** (*boring bar*), mis ise on toetatud tsentrite vahele ja saab pöörleva liikumise (Joonis 12.35b). Toorik saab pikiettenihke.



**Joonis 12.35.** Sisetreimise variandid: a – sisetreitorni ettenihkega; b – tooriku ettenihkega

**Vertikaalsisetreipink** (*vertical boring machine*), tuntud ka kui **karusellsisetreipink**, on ümber vertikaalse telje pöörleva töölauga sisetreipink raskete ja suhteliselt lühikeste toorikute töötlemiseks (Joonis 12.36). Toorik kinnitatakse töölauale, mille läbimõõt võib ulatuda 12 meetrini. Üheaegselt saab erinevate lõikeriistadega töödelda sisepinda, silindrilist välispinda kui ka otspinda. Ülemistesse suportitesse kinnitatakse sisetreimise ja otstreimise treilõikurid. Pingi külgsuportitesse võib lõikeriistu kinnitada revolverpeadesse. Sellist revolverpeaga lõikepinkki nimetatakse **vertikaal-revolvertreipingiks** (*vertical turret lathe*).





Joonis 12.36. Vertikaalsisetreipink

## 12.4. PUURIMINE JA TEISED AVALÕIKEPROTSESSID

Silindriliste läbivate ja umbavade valmistamiseks kasutatakse puurimist. **Puurimine** (*drilling*) on avade moodustamiseks rakendatav lõiketöötlus, mille korral lõikeriist – puur pöörleb ja liigub oma telje sihis.

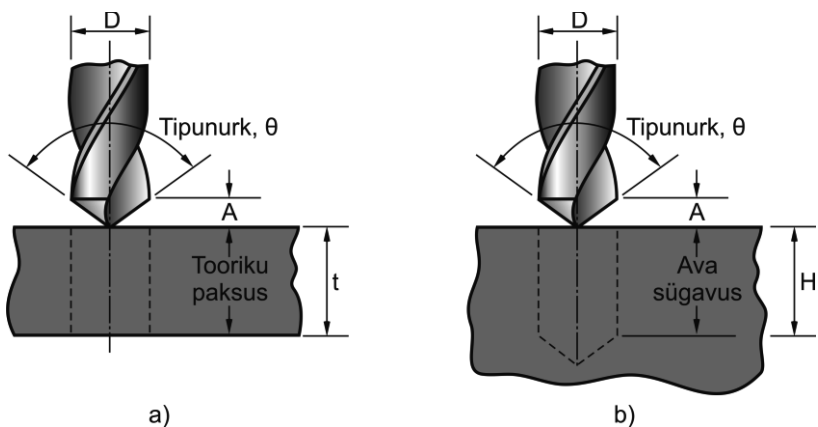
Erinevalt sisetreimisest, kus toimub olemasoleva ava läbimõõdu suurendamine, valmistatakse puurimisel toorikus ava. Pöörlev puur liigub materjali sisse, moodustades puuri läbimõõduga võrdse ava.

Puurimist tehakse tavaliselt **puurpinkidel** (*drilling machines, drill presses*), kuid võidakse kasutada ka teisi lõikepinke, nt treipinki. Puuritud ava täpsuse suurendamiseks ja pinnakvaliteedi parandamiseks kasutatakse **hõõritsemist** (*reaming*), ava läbimõõdu suurendamiseks **avardamist** (*core drilling*). Avalõikeprotsesside alla kuuluvad veel keermepuurimine, silinder-, koonus- ja otssüvistus ning tsentripuurimine (tsentriava puurimine).

### 12.4.1. Avalõikeprotsessid, avalõikurid

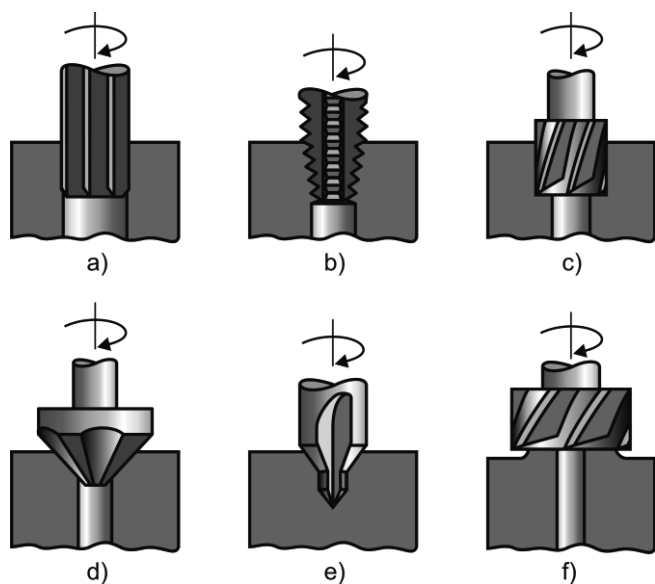
Puurimine on läbivate kui ka umbavade saamise kõige levinumaid lõiketöötluste viise. Puuritakse puuri pöörlemise (pealiikumine) ja sirgjoonse liikumise (ettenihe) koostoime tulemusena. Mõlemad liikumised annab puurpink tööriistale. Enim levinud on avade lõiketöötlus keerdpuuridega ehk spiraalpuuridega (Joonis 12.37).





**Joonis 12.37.** Puurimine: a – läbivava; b – umbava

Puurimisega on seotud terve rida avalõikeoperatsioone, mis on näha Joonisel 12.38. Enamik neist operatsioonidest järgnevad puurimisele: esmaselt puuritakse ava, millele järgnevad teised avatöötlusoperatsioonid. Tsentriavade puurimine (tsentripuurimine) ja otssüvistus on erandid sellest. Kõiki avalõikeprotsesse iseloomustab pöörleva mitmikservlõikuri kasutamine.



**Joonis 12.38.** Avalõikeoperatsioonid: a – hõõritsemine; b – keermepuurimine; c – silindersüvistamine; d – koonussüvistamine; e – tsentripuurimine; f – otssüvistamine

Avalõikeoperatsioonideks on:

- **Hõõritsemine** (*reaming*). Kasutatakse avade viimistlemisel suurema täpsuse ning väiksema pinnakareduse saamiseks pärast puurimist või avardamist. **Hõõritsal** (*reamer*) on kuni 12 lõikehammast, mis on eraldatud tavaliselt sirgete laastusoontega ja mis eemaldavad õhukese laastu (Joonis 12.38a).
- **Keermepuurimine** (*tapping, thread tapping*) on puuritud ava sisepinnale keerme lõikamine **keermepuuriga** (*tap*) (Joonis 12.38b).
- **Silindersüvistamine** (*counterboring*). Kasutatakse puuritud ava otsa silindrilise süvendi töötlemiseks, mis on vajalik poldi- või kruvipeade süvistamiseks. Pinna silindersüvistamiseks kasutatakse **silindersüvistit** (*counterbore*) (Joonis 12.38c).
- **Koonussüvistamine** (*countersinking*) on ava otsale koonilise kuju andmine, nt peitpeaga kruvipea mahutamiseks. Töötlemiseks kasutatakse **koonussüvistit** (*countersink*) (Joonis 12.38d).
- **Tsentripuurimine** (*center drilling, centering*). Seisneb tsentritesse kinnitavate toorikute otstesse tsentriavade puurimises, samuti täpse asukohaga eelava puurimises järgnevas ava lõplikuks puurimiseks. Tsentripuurimiseks kasutatakse **tsentripuuri** (*center drill*) (Joonis 12.38e).
- **Otssüvistamine** (*spot facing*). Freesimisega sarnane, ava teljega risti asetseva tugipinna töötlemine kasutades otssüvistit (Joonis 12.38f).
- **Avardamine** (*core drilling*). Kasutatakse puuritud ava läbimõõdu suurendamiseks erilise lõikeriista – **avardi** (*core drill*) abil, kusjuures saavutatakse suurem ava täpsus. Võrreldes keerdpuuriga on avardil suurem lõikeservade arv ja need asetsevad silindripinnal, mitte otpinnal.

#### 12.4.2. Lõikeparameetrid puurimisel

**Lõikekiirus** (*cutting speed*)  $v$  on puuri lõikeserva pealiikumise suunaline kiirus, m/min, puuri välisläbimõõdul

$$v = \pi Dn, \quad (12.10)$$

kus  $D$  – puuri välisläbimõõt, m;

$n$  – puuri pöörlemisagedus, pöör/min ehk  $\text{min}^{-1}$ .

Ettenihkeliikumine on puuri teljesihiline liikumine, mis antakse puurpinkides samuti puurile. Puuri **ettenihkekiirus** (*feed rate*)  $f_r$ , mm/min on

$$f_r = nf = 2nf_z, \quad (12.11)$$

kus  $f$  – pöördetenihe, mm/pööre;

$f_z$  – pöördetenihe lõikeserva kohta.

Puurimiseks (laastu eraldamiseks) vajalik töötlemisaeg  $T_m$ , min avaldub läbivava puurimisel seosest

$$T_m = \frac{t + A}{f_r}, \quad (12.12)$$

kus  $t$  – tooriku paksus, mm;

$A$  – puuri sisenemiskäik (Joonis 12.37a), mis oleneb puuri geometriast (läbimõõt, tipunurk);

$f_r$  – ettenihkekiirus, mm/min.

Tegelik töötlemisaeg on mõnevõrra suurem, sest puur peab avast ka pisut väljuma.

Umbava puurimisel töötlemisaeg

$$T_m = \frac{H + A}{f_r}, \quad (12.13)$$

kus  $H$  – ava sügavus, mm (vt Joonis 12.37b).

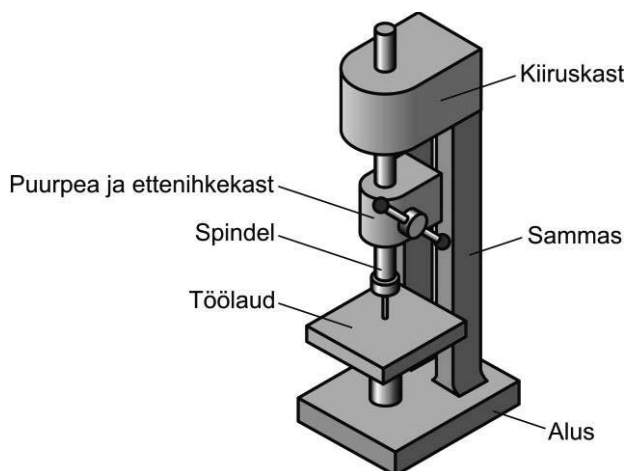
Materjali eemalduskiirus puurimisel,  $\text{mm}^3/\text{min}$  võrdub puuri ristlõikepinna ja ettenihkekiiruse korrutisega:

$$R_{mr} = \frac{\pi D^2 f_r}{4}. \quad (12.14)$$

### 12.4.3. Puurpingid

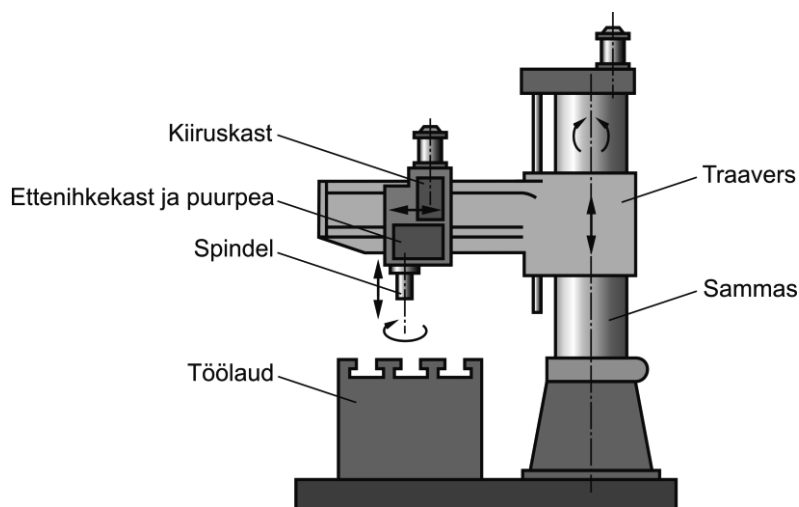
Avade puurimiseks kasutatakse lõikepinke – **puurpinke** (*drilling machines, drill presses*). Üldotstarbeliste puurpinkide hulka kuuluvad vertikaal- ja radiaalpuurpink.

**Vertikaalpuurpingi** (*upright drilling machine, upright drill*) töölauale kinnitatakse töödeldav toorik (Joonis 12.39). Töölaud kinnitub konsoolselt ja on püstsuunas nihutatav. **Puurpea** (*drilling head*) koos tema spindlisse kinnitatud ja pöörleva puuriga liigub piki alusele kinnitatud samba juhikuid ja saab ettenihkeliikumise. Puuritava ava ja puuri telgede ühitamiseks nihutatakse töölaual toorikut. Töölauda konstruktsioon ja mõõtmed ei võimalda töödelda suuremõtmelisi toorikuid. Väiksemate toorikute korral võidakse kasutada lihtsama konstruktsiooniga **lauapuurpinke** (*bench drill, bench-type drill press*).



**Joonis 12.39.** Vertikaalpuurpink

**Radiaalpuurpink** (*radial drilling machine, radial drill*) on mõeldud suuremõõtmeliste ja raskete toorikute töötlemiseks (Joonis 12.40). Puurpea saab liikuda piki traaversit ja samuti pöörduda ümber samba. Puuri ja lõigatava ava telg ühildatakse puurpea pööramisega ümber samba ja tema nihutamiseks piki traaversit. Suurte toorikute korral võidakse töölaud eemaldada ja toorik paigutatakse otse alusele.



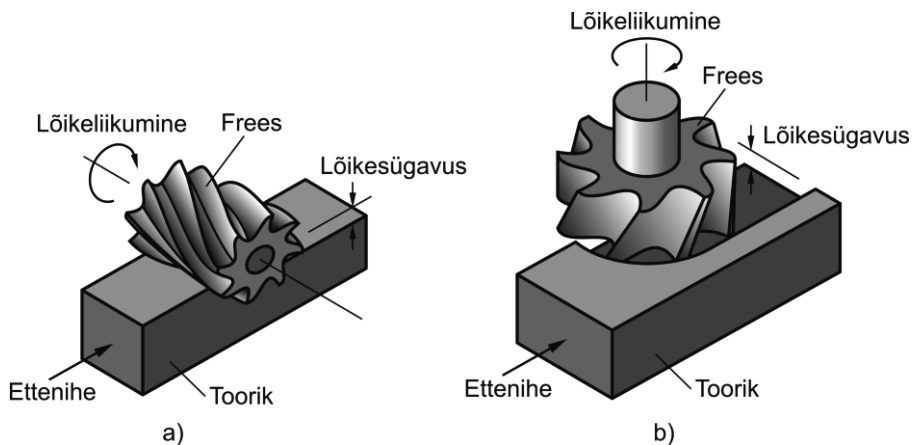
**Joonis 12.40.** Radiaalpuurpink

Seeriatootmises kasutatakse sageli mitmespindlilisi puurpinke. **Spindlite ridaasetusega puurpink** (*gang drill*) koosneb ühele alusele kinnitatud üksteise kõrval

asetsevast vertikaalpuurpingist (2...6 tk) ja ühisest töölauast. Puurpeades on kinnitatud erinevad avalõikeriistad. Näiteks algul puuritakse ava, siis nihutatakse toorik järgmise puurpea alla, kus toimub hõõritsemine, edasi ava silindersüvistatakse, keermestatakse jne. Hulgitootmises kasutatakse **mitmespindlilisi puurpinke** (*multiple-spindle drill*), kus ühes puurpeas asetseb suur arv spindleid ja puuritakse samaaegselt mitmeid avasid.

## 12.5. FREESIMINE

**Freesimine** (*milling*) on lõiketötluse protsess, mille käigus toorik liigub pöörleva mitmiklõikeservlõikuri – freesi alt läbi (vt Joonis 12.41). Freesimist kasutatakse tasapindade, kujupindade, soonte, keermete ja hammasrataste valmistamisel. Freesimisel on lõikeriista pöörlemistelg risti tooriku ettenihke suunaga. Selle iseärasuse tõttu erineb freesimine põhimõtteliselt puurimisest. Freesimisel kasutatavat lõikeriista nimetatakse **freesiks** (*milling cutter*), mille lõikeservad (nimetatakse ka freesi hammasteks), võivad asetseda nii lõikuri silinderpinnal või ka otspinnal. Freesimisel kasutatavaid lõikepinke nimetatakse **freespinkideks** (*milling machines, mills*). Freesimisel moodustub tavaliselt tasapind, kuid on võimalik saada ka muu kujuga pindu, kasutades erinevaid freesi trajektoore või hammaste kuju. Tingituna suurest võimalike töödeldavate pindade kujust ja kõrgest tootlikkusest on freesimine üks kõige universaalsemaid lõiketötlusprotsesse.



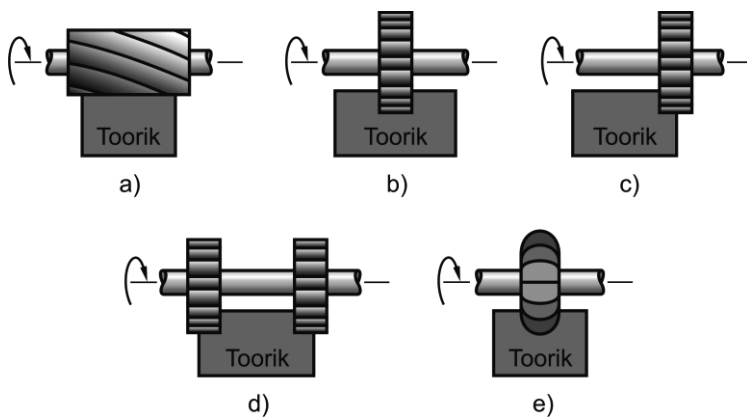
**Joonis 12.41.** Freesimise põhiliigid: a – silinderfreesimine (perifeerfreesimine); b – laupfreesimine

### 12.5.1. Freesimisprotsessid ja freesid

Freesimise põhiliikideks on silinderfreesimine ja laupfreesimine (Joonis 12.41a ja b). Enamiku freesimisoperatsioonide tulemusena kujundatakse pindu freesi või tooriku ettenihkelikumise trajektoori järgi.

#### Silinderfreesimine

**Silinderfreesimisel** ehk **perifeerfreesimisel** (*peripheral milling, plane milling*) on freesi telg paralleelne töödeldud pinnaga ja lõikeservad asetsevad hammastena lõikuri perifeersel silindripinnal. Joonisel 12.42 on näidatud silinderfreesimise põhiviisid. **Tasafreesimine** ehk **tasapinna freesimine** (*slab milling*) on tasapinna töötlemine, mille puhul on frees tavaliselt pikem kui töödeldav pind ja ulatub üle selle servade. **Soonefreesimine** (*slot milling, slotting*) on toorikutesse soonte freesimine freesiga, mille laius on tooriku laiusest väiksem. **Küljefreesimine** ehk **küljpinna freesimine** (*side milling*) on tooriku külgede freesimine. **Freesikomplektiga küljefreesimine** (*straddle milling*) on sisuliselt sama kui küljpinna freesimine, kuid samaaegselt töödeldakse tooriku mõlemat külge. **Kopeerfreesimine** ehk **kujufreesimine** (*form milling*) toimub erikujuga hammastega freesiga, mille profiil kopeeritakse toorikusse. Seetõttu liigitatakse kopeerfreesimist sarnaselt kopeertreimisega (vt Joonis 12.30d) kopeerlõiketöötluseks. Keerukate pindade kujufreesimiseks kasutatakse **freesikomplektiga kopeerfreesimist** (gang milling) – freesimine ühele freestornile kinnitatud mitme erineva kujuga freesiga.



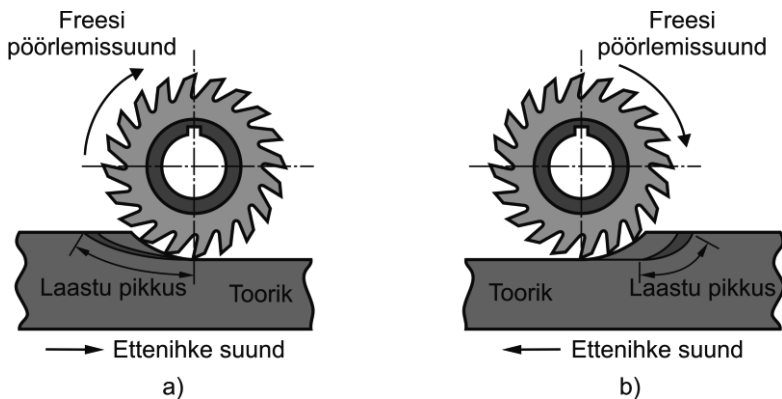
**Joon.12.42.** Silinderfreesimise (perifeerfreesimise) meetodid: a – tasafreesimine; b – soonefreesimine; c – küljefreesimine; d – freesikomplektiga küljefreesimine; e – soone kopeerfreesimine (kujufreesimine)

Silinderfreesimisel eristab freesi pöörlemissuund kahte freesimise kinemaatilist skeemi (Joonis 12.43). **Vastufreesimisel** (*up milling, conventional milling*) on freesi hammaste liikumissuund vastupidine tooriku ettenihke suunale. **Pärfreesimisel** ehk

**kaasafreesimisel** (*down milling, climb milling*) langeb freesi hammaste liikumise suund tooriku ettenihke suunaga kokku.

Vastufreesimisel lõikavad freesi hambad toorikuse tungimisel väga õhukese laastu, mille paksus kasvab kuni freesi hammaste väljumiseni toorikust. Sarnaselt muutuvad ka lõikejõud, mis on minimaalsed freesi hammaste tungimisel toorikuse ja maksimaalsed väljumisel. Selline töötlusskeem võimaldab eemaldada laastu tooriku pinnakihi alt ja sobib toorikute töötlemiseks, mille pinnakiht on kõva ja sisaldab abrasiivosakesi, nt valandid. Seejuures püüab vertikaalne lõikejõu komponent toorikut töölaualt lahti rebida, mistõttu võib halveneda töödeldud pinna kvaliteet. Laastu pikkus on suurem kui pärfreesimisel ja see tähendab seda, et freesi hambad on toorikuga kontaktis pikemalt kui pärfreesimisel, mis vähendab lõikuri püsivusaega.

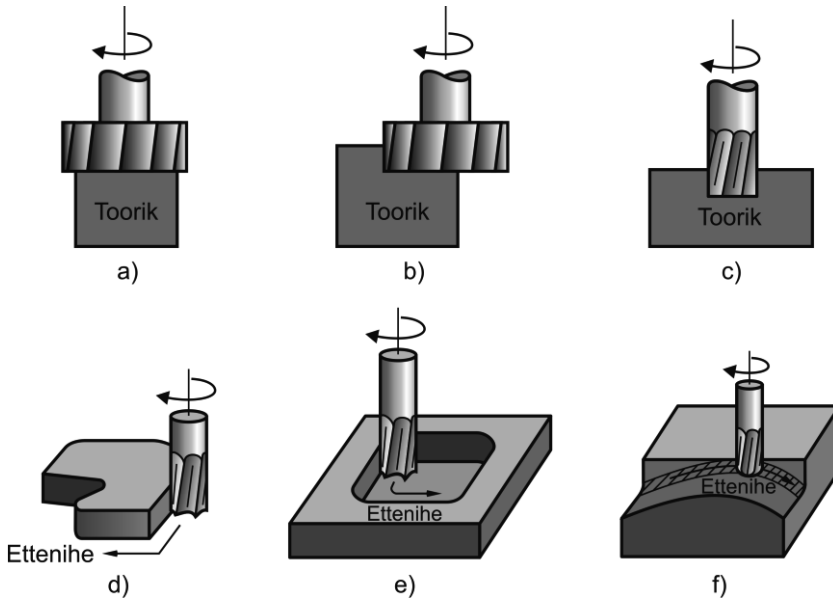
Pärfreesimisel on lõikejõud suunatud allapoole, surudes toorikut vastu freespingi töölauda. See tagab töödeldud pinna parema kvaliteedi. Toorikuga kontaktis oleva laastu pikkus on lühem kui vastufreesimisel, mis tähendab, et freesi hambad on lühemat aega kontaktis eemaldatava materjaliga. See suurendab freesi püsivusaega vastufreesimisega võrreldes.



**Joonis 12.43.** Silinderfreesimise kinemaatilised skeemid: a – vastufreesimine; b – pärfreesimine

## Laupfreesimine

**Laupfreesimisel** (*face milling*) on freesi telg risti töödeldava pinnaga ja lõikamine toimub nii otspinnal kui ka välisperimeetril asetsevate lõikservade poolt. Sarnaselt silinderfreesimisega kasutatakse erinevaid laupfreesimise variante, millest mõned on näidatud joonisel 12.44.



**Joonis 12.44.** Freesimisoperatsioonid: a – tavapärase laupreesimise; b – astme laupreesimise; c – otsfreesimise; d – profiilfreesimise; e – taskufreesimise; f – kontuurfreesimise

**Tavapärasel laupreesimisel** (*conventional face milling*) töödeldakse tasapinda ja freesi läbimõõt on suurem kui töödeldava tooriku laius (Joonis 12.44a). Töötlemiseks kasutatakse **laupreesi** (*face milling cutter*).

**Astme laupreesimisel** (*partial face milling*) ulatub frees üle tooriku ühe serva – toimub astme laupreesiga freesimine (Joonis 12.44b).

**Otsfreesimisel** ehk **freesimisel sõrmfreesiga** (*end milling*) lõigatakse toorikusse sooni, kusjuures freesi läbimõõt on tooriku laiuselt väiksem (Joonis 12.44c). Töötlemiseks kasutatakse **otsfreesi** ehk **sõrmfreesi** (*end-milling cutter*).

**Profiilfreesimine** (*profile milling*) on sõrmfreesiga freesimise alaliik, mille puhul töödeldakse tasapindse tooriku välisperimeetrit kahemõõtmelise pinnaprofiili saamiseks (Joonis 12.44d).

**Taskufreesimine** (*pocket milling*) on sõrmfreesiga freesimise alaliik, kus töödeldakse tasapindsesse toorikusse madalaid süvendeid (Joonis 12.44e).

**Kontuurfreesimisel** (*surface contouring, contour milling*) kasutatakse ümara otsaga sõrmfreesi, harvem täisnurksete lõikeservadega sõrmfreesi, mis liigub edasi-tagasi kõverjooneliselt piki töödeldavat pinda ruumilise (kolmemõõtmelise) pinna moodustamiseks (Joonis 12.44f). Kasutatakse **tööriistavao sisselõikuseks** (*die sinking*) ja muude keerukate kolmemõõtmeliste süvendite ja pindade valmistamiseks.



### 12.5.2. Lõikeparameetrid freesimisel

Vaatleme lõikeprotsessi silinderfreesimisel. Lõikeliiikumine on freesi pöörlev liikumine. Lõikekiirus, m/min võrdub

$$v = \pi D n, \quad (12.15)$$

kus  $D$  – freesi lõikeosa maksimaalläbimõõt, m;

$n$  – freesi pöörlemisagedus,  $\text{min}^{-1}$ .

Ettenihkeliikumine on töödeldava tooriku kulgliikumine. Ettenihkekiirus  $f_r$ , mm/min on:

$$f_r = n f_t N, \quad (12.16)$$

kus  $f_t$  – **hambaettenihe** (*chip load*), mm/hammas;

$n$  – freesi pöörlemisagedus,  $\text{min}^{-1}$ ;

$N$  – freesi hammaste arv.

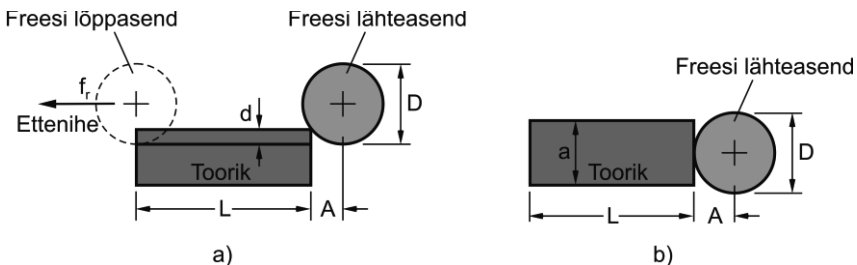
Freesimise töötusaeg  $T_m$ , min on nii silinderfreesimisel, kui laupfreesimisel (Joonis 12.45):

$$T_m = \frac{L + A}{f_r}, \quad (12.17)$$

kus  $L$  – tooriku pikkus, mm;

$f_r$  – ettenihkekiirus, mm/min

$A$  – freesi sisenemiskäik, mis on freesi läbimõõdust  $D$ , lõikesügavusest  $d$  (Joonis 12.45a) ning laupfreesimisel tooriku laius  $a$  (Joonis 12.45b).



**Joonis 12.45.** Töötusaja arvutuskeem: a – silinderfreesimisel; b – laupfreesimisel

Materjali eemalduskiirus freesimisel,  $\text{mm}^3/\text{min}$  võrdub eraldatava materjalikihi ristlõikepinna ja ettenihkekiiruse korrutisega:

$$R_{mr} = a d f_r, \quad (12.18)$$

kus  $a$  – tooriku töödeldava pinna laius, mm;

$d$  – lõikesügavus, mm;

$f_r$  – ettenihkekiirus, mm/min.

### 12.5.3. Freespingid

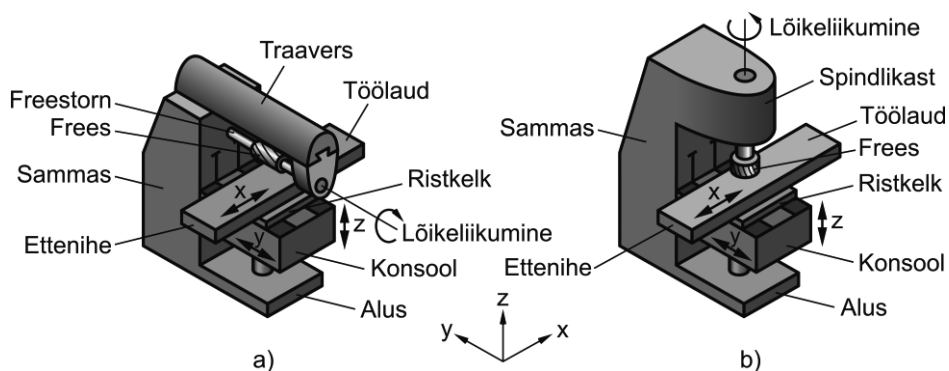
Freespinkidel peab olema spindel pöörleva freesi kinnitamiseks ja töölaud tooriku paigaldamiseks, kinnitamiseks ja talle ettenihkeliikumise andmiseks. Lähtuvalt spindli asetusest, liigituvad freespingid vertikaal- ja horisontaalfreespinkideks (vt Joonis 12.46).

**Horisontaalfreespink** (*horizontal milling machine, horizontal mill*) on horisontaalse spindliga löikepink silinderfreesimiseks (tasapindade freesimine, soonefreesimine, küljefreesimine, kopeerfreesimine jne). **Vertikaalfreespink** (*vertical milling machine, vertical mill*) on vertikaalse spindliga löikepink, sobiv toorikute laupfreesimiseks, otsfreesimiseks, kontuurfreesimiseks jne.

Freespinke võib liigitada konstruktsiooni muude iseärasuste järgi järgmisteks tüüpideks:

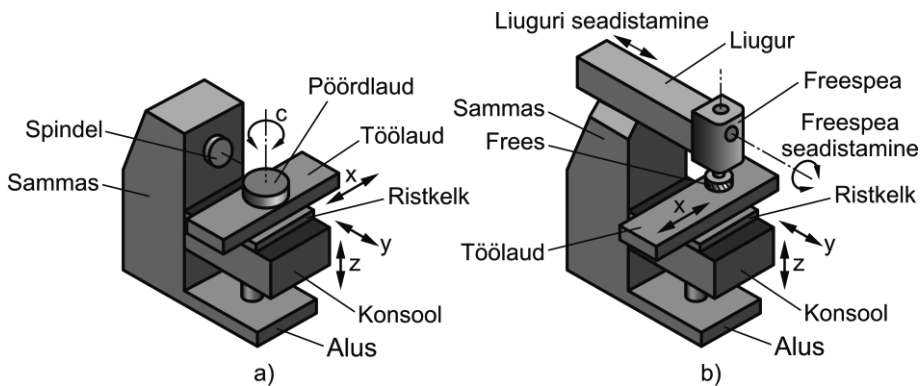
a – konsoolfreespingid; b – konsoolita freespingid; c – kopeerfreespingid; d – arvjuhtimisega freespingid.

**Konsoolfreespink** (*knee-and-column milling machine*) on freespink, mille töölaud on pingi sängiga ühendatud konsoolilt (Joonis 12.46). On enim levinud freespink. Pink koosneb **sambast** (*column*) ja ühest otsast samba külge kinnituvast **konsoolist** (*knee*), mis on vertikaalsuunas üles-alla liigutatav ja mille peal asetseb töölaud. Töölaud saab ajami kaudu ettenihkeliikumise. Konsoolfreespingid võivad olla nii horisontaalsed kui ka vertikaalsed. Horisontaalkonsoolfreespingil (Joonis 12.46a) kinnitub silinderfrees spindlisse asetatud **freestornile** (*milling arbor*) ja torni üht otsa toetatakse **traaversile** (*overarm*) kinnituva tugilaagriga. Töölaua peal asetsevat ristkelku saab nihutada y-telje suunas, töölaua mehaanilise ettenihkega x-telje suunas ja konsooli nihutada vertikaalselt z-telje suunas. Vertikaalkonsoolfreespingil (Joonis 12.46b) kinnitatakse frees otse spindlisse ilma freestorni kasutamata.



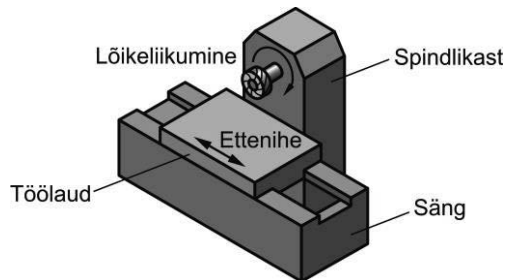
**Joonis 12.46.** Konsoolfreespinkide põhitüübid: a – horisontaalfreespink; b – vertikaalfreespink

Eristatakse veel konsoolfreespinkide kahte eritüüpi. **Universaalfreespink** (*universal milling machine, universal knee-and-column milling machine*) on horisontaalspindliga ja vertikaaltelje ümber pööratava töölauaga konsoolfreespink (Joonis 12.47a). Selline töölaud võimaldab töödelda toorikutel kaldpindu, krüvipindu ja teisi keerukaid pindu. Teine freespingi tüüp on **laiuniversaalfreespink** (*ram-type milling machine, ram mill*) (Joonis 12.47b). Horisontaalselt liikuvale liugurile kinnitub freespea koos spindliga, mida saab seadistada nii liuguri abil kui ka pöörata ümber horisontaalse telje. Need iseärasused võimaldavad lõikepingile laia universaalsust erineva kujuga pindade töötlemiseks.



**Joonis 12.47.** Erikonstruktsiooniga konsoolfreespingid: a – universaalfreespink; b – laiuniversaalfreespink

**Konsoolita freespink** (*bed-type milling machine*) on mõeldud toorikute hulgi-töötlemiseks. Töölaud on konstrueeritud jäigemaks kui konsoolfreespinkidel, mis võimaldab kasutada suuri ettenihkekiirusi ja lõikesügavusi ja töödelda pindu suure tootlikkusega. Tüüpiline sellise lõikepingi kujundus on näidatud Joonisel 12.48. Töölaud on kinnitatud otse jäigale metallilõikepingi sängile, selle asemel, et kinnitada konsoolile. Töölaua ettenihkeliikumine on piiratud ainult töölaua pikisuunas ja toorik liigub freesi eest läbi. Freesi saab seadistada vertikaalsuunas piki pingi sammast.



**Joonis 12.48.** Konsoolita ühespindiline freespink

Konsoolita freespink võib olla **ühespindliline freespink** ehk **simpleksfreespink** (*simplex milling machine*) nii vertikaal- kui ka horisontaalfreespingina.

**Kahespindlilisel freespingil** ehk **dupleksfreespingil** (*duplex milling machine*) on kaks spindlikasti freespeadega, mis on tavaliselt horisontaalsed ja asetsevad mõlemal pool pingi sāngi. Tooriku külgpindade töötlemine toimub üheaegselt mõlemalt poolt. **Kolmespindliline freespink** ehk **tripleksfreespink** (*triplex milling machine*) on lisaks kahele horisontaalfreesile veel varustatud vertikaalfreesiga, laiendades nii pingi töötlusvõimekust.

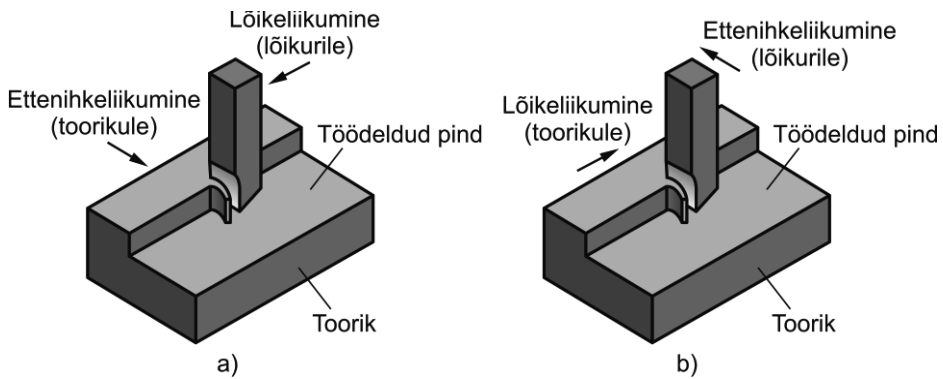
**Pikifreespink** (*planer type milling machine, planer type mill*) on pika ja ainult pikisihis liikuva töölauga freespink, mis võimaldab üheaegselt töödelda mitme freesiga. Nende konstruktsioon on sarnane pikihöövelpinkide (vt p. 12.6, Joonis 12.51) konstruktsiooniga, kusjuures üksservlõikur (höövellõikur) on asendatud freespeasse kinnitatud freesiga. Need pingid on ette nähtud väga suurte toorikute töötlemiseks. Pingi sāng on väga raske ja madalal maapinna suhtes ning sammastele kinnituvad freespead on ülevalt toetatud töölaua kohal asetseva sildkonstruktsiooniga ehk traaversiga.

**Kopeerfreespink** (*tracer mill, profiling mill, duplicator*) on freespink detaili töötlemiseks kopeeri abil. Kopeer on kopeerpingi osa – kindla profiiliga joonlaud, nukk jms materiaalne juhikpind, mille järgi toorikut töödeldakse. Freesile antakse trajektoor mehaanilise jälgimissüsteemi abil, kus mööda kopeeri või ruumilise mudeli pinda mööda liikuva rulli abil antakse freesile kopeeri rulli liikumisele vastav trajektoor. Kasutatakse nii profiil- kui ka kontuurfreesimisel (vt Joonis 12.44). Kasutatakse keerulise kujuga toorikute töötlemiseks, mida ei saa töödelda tooriku tavaliste ettenihkeliikumiste abil freesi suhtes. Seda tüüpi pinke on välja tõrjumas **arvjuhtimisega freespingid** (*CNC milling machines*).

## 12.6. HÖÖVELDUS

### 12.6.1. Hööveldusprotsess ja hōōvellōikurid

**Hōōveldusega** (*shaping, planing*) töödeldakse tasaseid või sirgjoonelisi kujupindu ning mitmesuguse profiiliga sooni. Kasutatakse ükservlōikureid, mis liiguvad tooriku suhtes sirgjooneliselt. Eristatakse **risthōōveldust** (*shaping*) (Joonis 12.49a), mille puhul antakse sirgjooneline lõikeliikumine lõikurile, toorikule antakse katkendlik, lõikeliikumisele ristsihis ettenihkeliikumine. Risthōōveldamise eriliigiks on **pūsthōōveldus** ehk **tōukamine** (*slotting*). Tōukamisel antakse lõikurile liikumine vertikaalsuunas. **Pikihōōveldus** (*planing*) antakse sirgjooneline lõikeliikumine toorikule ja lõikur saab katkendliku, lõikeliikumisele ristsihis ettenihkeliikumise (vt Joonis 12.49b).



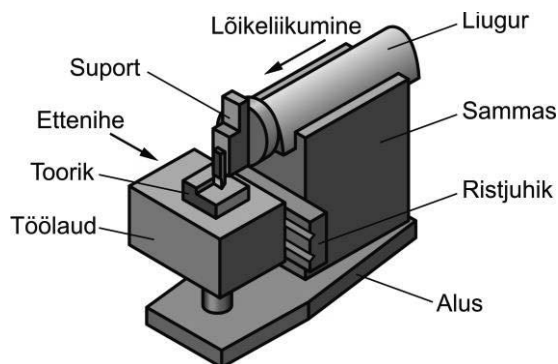
Joonis 12.49. Hõõveldus: a – rishhõõveldus; b – pikihõõveldus

Hõõveldus on katkendlõikus: hõõvellõikur tungib töökäigul toorikusse, millega kaasneb löökkoomus. Lõikeprotsessile on iseloomulik lõikuri kaksikkäik – töö käigule järgneb kas lõikuri või tooriku liikumine algasendisse ehk tagasikäik. Lõikeprotsessi lõikeliikumist iseloomustatakse kaksikkäikude arvuga minutis (kk/min) ja perioodilise lõikuri (pikihõõveldamine) või tooriku (risthõõveldamine) ettenihkeliikumisega kaksikkäigu kohta (mm/kk). Hõõveldamist iseloomustab madal lõikekiirus ja löökkoomustest tingituna kasutatakse tavaliselt kiirlõiketerasest, erilise painutatud kujuga lõikureid.

## 12.6.2. Hõõvelpingid

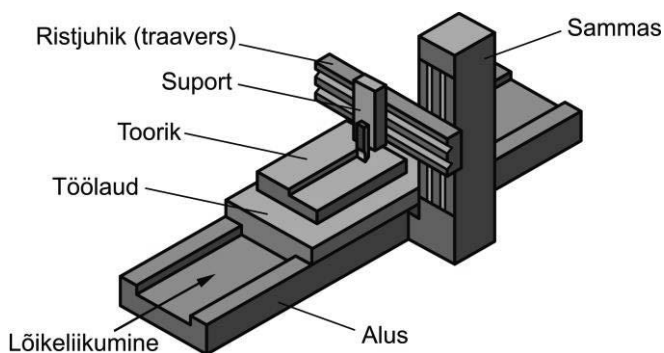
**Risthõõvelpingis** (*shaper*) kasutatakse painutatud kujuga lõikurit, mis liigub horisontaalselt liuguri abil sambal (Joonis 12.50). Liuguri liikumisel ettepoole lõikab lõikur laastu, mille järel järgneb lõikuri liikumine algasendisse (tagasikäik). Selle käigus tõuseb lõikur pisut tooriku kohale ja libiseb tagasi piki töödeldud pinda. Toorik on kinnitatud töölauale ja saab iga kaksikkäigu järel risti lõikeliikumisele ettenihkeliikumise. Lõikepingi ajam on kas mehaaniline või hüdrauliline. Kasutatakse suhteliselt lühikeste toorikute töötlemiseks.

Hõõvellõikurile võidakse anda lõikeliikumine vertikaalsuunas. Seda töötlemiskeemi nimetatakse püsthõõveldamiseks ehk tõukamiseks ja vastavat hõõvelpinkki **püsthõõvelpingiks** ehk **tõukepingiks** (*vertical shaper, slotting machine*). Tõukamist kasutatakse sageli toorikutesse soonte lõikamisel, hammasratastele liistusoonte valmistamiseks. Tõukamine (püsthõõveldamine) leiab samuti kasutamist silinderhammasrataste valmistamisel (vt p 12.9).



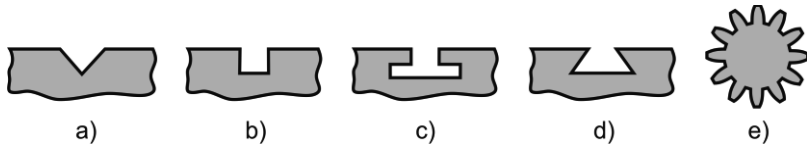
**Joonis 12.50.** Risthöövelpink

**Pikihöövelpink** (*planer*) on mõeldud suuremate toorikute töötlemiseks, kui see on võimalik risthöövelpingis. Lõikeliikumine saadakse töölauale kinnitatud tooriku sirgjoonelise liikumisega. Lõikur on kinnitatud traaversile ja saab iga tooriku kaksikkäigu järel ettenihkeliikumise risti lõikeliikumisega. Kasutatakse nii **ühesambalisi pikihöövelpinke** (*open-side planer, single-column planer*) (Joonis 12.51) kui ka **kahesambalisi pikihöövelpinke** (*double-column planer*). Sambale ja traaversile võib kinnitada mitmeid lõikureid ja ühe töölauda liikumisega töödelda erinevaid sirgjoonelisi pindu. Ühesambalises höövelpingis saab töödelda laiemaid toorikuid kui kahesambalistes.



**Joonis 12.51.** Ühesambaline pikihöövelpink

Pikihööveldamist kasutatakse nii sirgjooneliste pindade, erineva profiiliga soonte kui ka kujupindade töötlemiseks (Joonis 12.52). Tasapindade töötlemisel on freesimine pikifreespinkides välja tõrjunud pikihööveldamise.

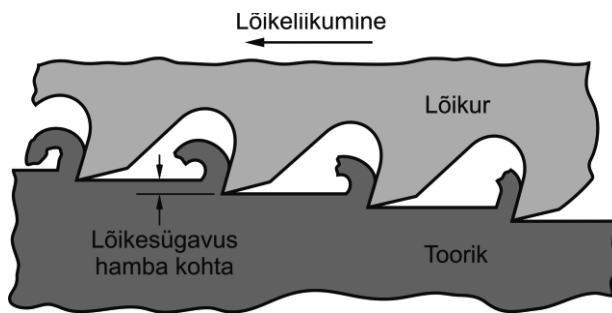


Joonis 12.52. Hõõveldamisega valmistatavad pinnad

## 12.7. KAMMLÕIKUS

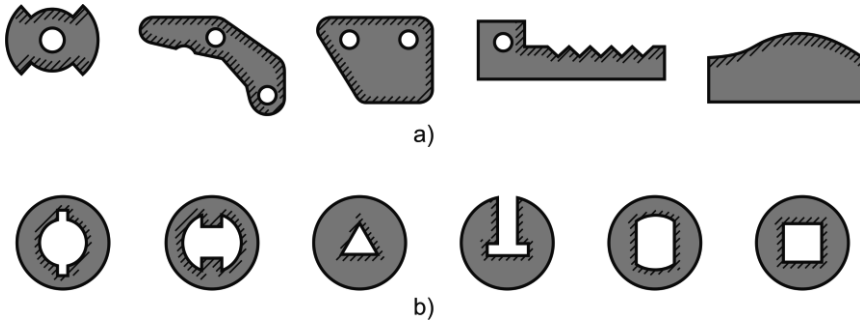
**Kammlõikus** ehk **kammtöötlus** (*broaching*) on avade ja välispindade töötlemine mitmikservlõikuri – hulkhambulise **kammlõikuri** (*broach, broaching tool*) tõmbamise või tõukamise teel piki töödeldavat pinda (Joonis 12.53) kammlõikepingil. Lõikeriistana kasutatakse kammlõikurit, mille telje suunas asetsevad lõikehambad selliselt, et iga järgnev neist on eelnevast kõrgem. Kammlõikur saab sirgjoonelise lõikeliikumise ja eraldab ühe töökäiguga kogu töötlusvaru. Kammlõikus on unikaalne selle poolest, et erinevalt teistest lõiketötlusprotsessidest puudub tooriku ja lõikuri vaheline ettenihkeliikumine. Ettenihkeliikumine kammtöötlusel on asendatud lõikehammade kõrguse suurenemisega lõikuri pikkuse ulatuses, kusjuures iga lõikehammas eraldab laastu, mis mahutatakse hammaste vahelistesse soontesse. Lõpliku pinna kuju annavad kammlõikuri kalibreerivtötlushambad (vt Joonis 12.23). Kammlõikamise puhul on tegemist lõiketötluse kopeermeetodiga.

Enamikul juhtudel tõmmatakse kammlõikurit piki töödeldavat pinda, kuid harvem kasutatakse skeemi, kus lõikur surutakse läbi eelnevalt puuritud ava. Kammtöötlusel kasutatakse **kammlõikepinke** (*broaching machines*). Kammtöötluse eeliseks on suur tootlikkus, töötlemise täpsus ja hea töödeldud pinna kvaliteet ning töödeldavate pindade kuju suur varieeruvus. Kammlõikepingid on suhteliselt lihtsa konstruktsiooniga. Kammtöötluse puuduseks on tööriistaterasest valmistatud keerukate lõikeriistade kõrge hind.



Joonis 12.53. Kammlõikus

Eristatakse **väliskammlõikust** (*external broaching*) väliste pindade töötlemiseks ja **sisekammlõikust** (*internal broaching*) avade töötlemiseks. Joonisel 12.54 on toodud näiteid kammtöötlusega valmistatavatest pindadest.



**Joonis 12.54.** Kammlõikusega valmistatavad pinnad: a – väliskammlõikusega; b – sisekammlõikusega

## 12.8. KEERMESTUS

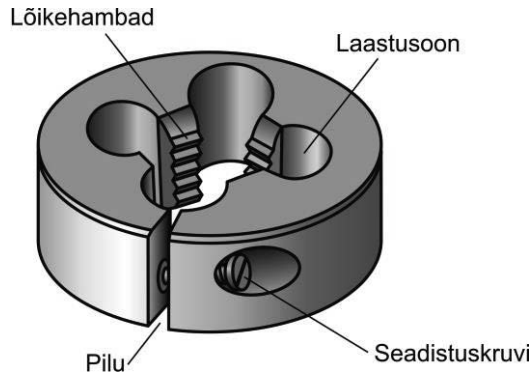
Keermestatud detaile kasutatakse nii kinnituselementidena lahtivõetavate liidete saamisel (poldid, kruvid, mutrid) kui ka masinaehituses kulgeva liikumise saamiseks käigukruvi abil (nt treipinkides keermestamisel, erinevates lõikepinkides töölaua positsioneerimisel). Väliskeeret saab plastsetest metallisulamitest valmistada surve-töötlusega – keermerrullimisega (vt p 8.3.12), kuid see ei ole majanduslikult põhjendatud väikeste tootmismahdade korral. Keermestatud toorikuid saab valmistada valamise, kuid valatud toorikuid tuleb täiendavalt lõiketöödelda.

### Väliskeerme lõikamine

Kõige lihtsam ja universaalsem keermetöötlusmeetod on **keermestus üksserv-lõikuriga** ehk **üksservlõikurkeermestus** (*single-point threading*) (Joonis 12.30g). Treipingis lõigatakse nii tavaliselt suurema profiiliga täpseid keermeid. Treilõikuri profiil peab vastama keerme profiilile ja tema liikumine peab olema selline, et tooriku ühe pöörde jooksul liiguks keermetera **keerme samm** (*pitch*) võrra. Selline liikumine tagatakse treipingi käigukruvi abil (vt p 12.3.3). Tavaliselt on vaja teha enam kui üks läbim ehk töökäik. Väikese sammuga keermete (samm alla 2 mm) puhul nihutatakse lõikurit iga töökäigu alguses tooriku telje suunas. Suuremate keermete lõikamisel nihutatakse lõikurit iga töökäigu alguses paralleelselt keerme servaga. Treipingis keermelõikust kasutatakse väikeste või keskmiste tootmismahdade korral (väikeseeriatootmises), kuid suurseriatootmises on majanduslikult otstarbekam kasutada lühema töötlusajaga meetodeid.



Väliskeermete sammuga kuni 2 mm lõikamisel kasutatakse **keermelõikureid** (*threading die*) (Joonis 12.55).

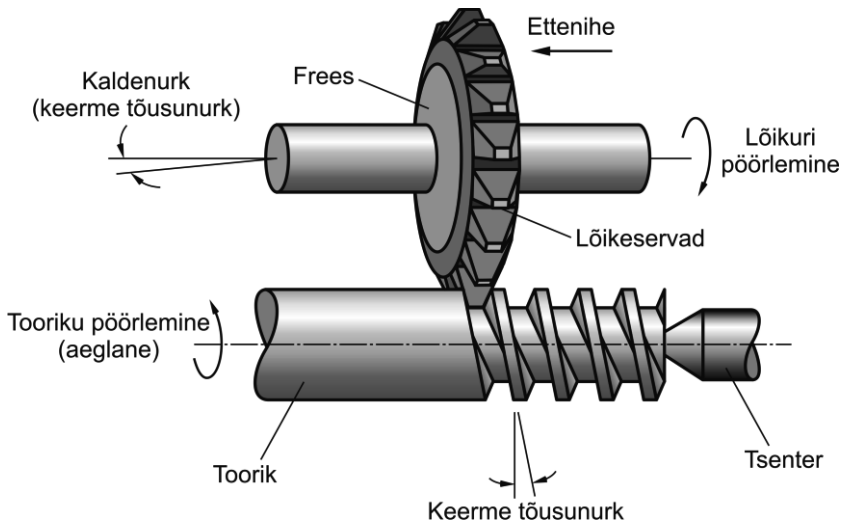


**Joonis 12.55.** Keermelõikur väliskeerme lõikamiseks

Keermelõikur meenutab kujult mutrit, millel on samasugune keere kui lõigataval keermel, kuid ta on valmistatud karastatud tööriistaterasest ja tal on 3...8 ava, mille abil moodustuvad lõikuri lõikeservad ja sooned tekkinud laastu mahutamiseks. Tavaliselt kinnitatakse keermelõikur käepidemega raami – **keermeklupi** (*threading die stock, diestock*) sisse. Käsikeermestamisel keeratakse keermelõikurit keermeklupi abil toorikule ja moodustub keere. Sagedamini kinnitatakse toorik treipinki ja keermelõikurit tagapukiga toetades lõigatakse kaks-kolm keermeniiti, mille järel saab keermelõikur moodustunud keermelt ettenihke. Hõõrdumise vähendamiseks kasutatakse lõikevedelikuna õli või mõnda teist määrivat lõikevedelikku.

Keerme lõikamisel kasutatakse treipinkidel **iseavanevaid keermestuspäid** (*self-opening threading dies*). Keermestuspea korpusesse on kinnitatud prismaatilised või ümarad keermelõikurid, mis pärast keermelõikust eemalduvad, kiirendades lõikuri eemaldamist lõikepiirkonnast.

**Keermefreesimine** (*thread milling*) põhineb keerme profiilile vastava kujufreesi kasutamisel (Joonis 12.56). Toorik kinnitatakse erilisse keermefreespinkki ja talle antakse aeglane pöörlemine. Frees, mis on kinnitatud kaldu keerme tõusunurga all, saab pöörleva lõikeliiikumise ja tooriku teljega paralleelse ettenihkeliikumise. Keermefreesimist kasutatakse suuremate keermete valmistamiseks, kus ei saa kasutada keermelõikepäid ja kui keermelt nõutakse suuremat täpsust.



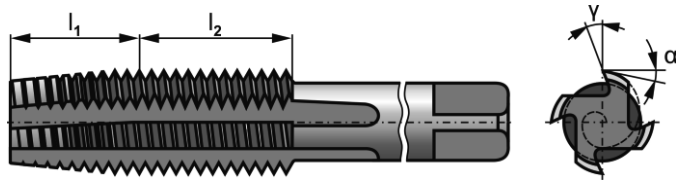
**Joonis 12.56.** Väliskeerme freesimine kujufreesiga

**Keermelihvimine** (*thread grinding*) on sarnane keermefreesimisega, erinevuseks on see, et lõikuriks on keerme profiili omav lihvketas ja lõikuri pöörlemiskiirus on tunduvalt suurem. Kasutatakse eriti täpsete keermete lõikamiseks või eelnevalt lõigatud keermete viimistluseks. Sobib karastatud terasest keermete viimistlustöötamiseks.

### Sisekerme lõikamine

Sisekermeid läbimõdduga kuni 20 mm lõigatakse **keermepuurimisega** ehk **keermepuurkeermestamisega** (*tapping, thread tapping*). Lõikeriistana kasutatakse **keermepuuri** (*tap*) (vt Joonis 12.57), mis kujutab endast tööriistaterasest valmistatud silindrist lõikurit, mis on sama läbimõddu ja keermesammuga kui lõigatav keere. Keermepuuris on pikisooned lõikeservade moodustamiseks. Keermepuuri ots on kooniline, hõlbustades nii tema sisenemist lõigatavasse materjali. Keermepuur pöörleb ja samaaegselt saab teljesuunalise ettenihkeliikumise. Tavaliselt kasutatakse keermepuuriga keermestamisel puurpinke. Eelnevalt puuritakse toorikusse keerme miinimumläbimõddule vastav ava. Keermepuurimise lõpetamiseks puuri pöörlemis-suunda muudetakse ja ta väljub toorikust.

Analoogselt iseavanevate keermestuspeadega väliskeermete lõikamisel kasutatakse sisekeermete saamisel **lahtivõetavaid keermepuure** (*collapsible taps*). Selliseid keermepuure saab pärast keermelõikamist töödeldud avast kiirelt eemaldada.



Joonis 12.57. Keermepuur sisekerme lõikamiseks

## 12.9. HAMBALÕIKUS

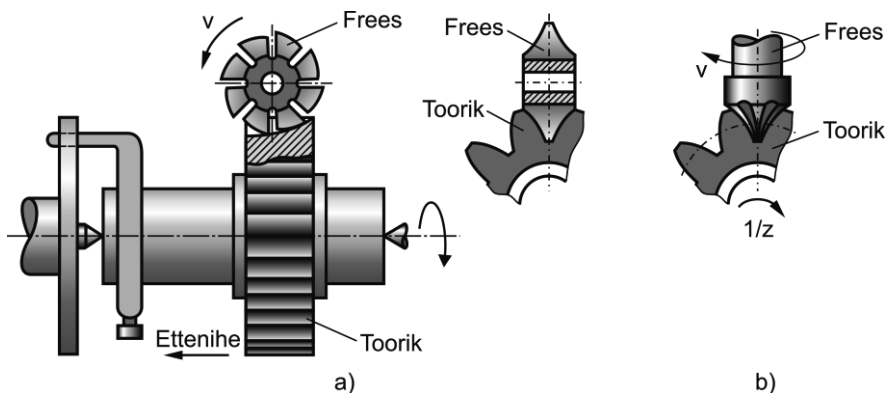
Eristatakse **sirghammastega hammasrattaid** (*spur gears*) ja **kaldhammastega hammasrattaid** (*helical gears*), mida kasutatakse pöördemomendi ülekandmiseks paralleelsete võllide vahel. **Koonushammasrattaid** (*bevel gears*) ja **tiguhammasrattaid** ehk **tigurattaid** (*worm gears*) kasutatakse pöördemomendi ülekandmiseks ristuvate võllide vahel. Edaspidi vaadeldakse sirghammastega silinderhammasrataste hambalõikusmeetodeid.

Hambalõikusel kasutatakse kahte meetodit: kopeermeetodit ja rullumismeetodit.

### Hambalõikus kopeermeetodil

Hambalõikus **kopeermeetodil** (*form cutting*) põhineb hammaste profileerimisel lõikuriga, millel on hammaste vahe profiil. Siia alla kuuluvad hammaste kammlõikus hambavahe profiilile vastava kammlõikuriga ja hambafreesimine, kasutades ketas- või sõrmmoodulfreesi. Mooduli all mõistetakse hammasrataste hambumismoodulit, mida kasutatakse hammasrataste normeerimiseks.

**Hambafreesimisel** (*gear milling, form milling*) (Joonis 12.58) lõigatakse iga hambavahe selle profiilile vastava erilise moodulfreesiga. Freesile antakse pöörlev lõikeliikumine. Hammasratta toorik kinnitatakse horisontaalfreespingi (vt p 12.5.3) töölaualle tsentritesse ja saab sirgjoonelise ettenihkeliikumise. Pärast hambavahe töötlemist pööratakse toorikut perioodiliselt ühe hamba võrra erilise rakise – jagamispea abil. Üks kindel ketasmoodulfrees sobib ainult kindla hammaste arvuga hammasrataste lõikamiseks, mistõttu on vaja hankida terve freeside komplekt erineva hammaste arvuga hammasrataste valmistamiseks. Tootlikkus on väike, kuna töödeldakse igat hambavahet eraldi. Samuti ei ole hamba profiil täpne. Seetõttu kasutatakse hambafreesimist üksiktootmises väikese pöörlemissagedusega hammasrataste valmistamiseks, eelistatult seadmete remondil. Meetodi eelis on tavalise horisontaalfreespingi, mitte eripingi kasutamine. Võrreldes rullumismeetodil kasutatavate tigufreesidega (Joonis 12.60), on lõikeriist tunduvalt lihtsam ja odavam.



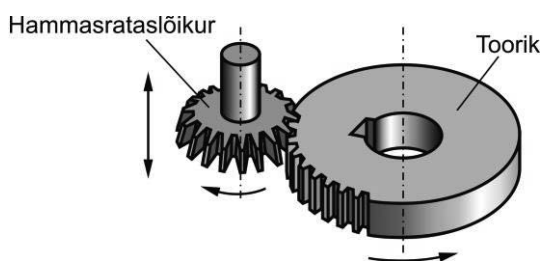
**Joonis 12.58.** Hambafreesimine: a – ketasmoodulfreesiga; b – sõrmmoodulfreesiga

**Hammaste kammlõikust** (*gear broaching*) (vt p 12.7. Kammlõikus) kasutatakse seeria- ja hulgitootmisel. Kammlõikust iseloomustab suur tootlikkus ja hamba- profiilide täpsus ning hea pinnakvaliteet. Koonushammasrataste valmistamisel kasutatakse hambahööveldust.

### Hambalõikus rullumismeetodil

Hambalõikus **rullumismeetodil** (*generating method*) põhineb lõikuri ja tooriku vastastikust hambumist jälgendaval liikumisel. Eristatakse hambatõukamist ja hambalõikust tigufreesiga.

**Hambatõukamisel** (*gear shaping*) töödeldakse hambad **hambatõukepingis** (*gear shaping machine, gear shaper*), kasutades kas hammasrataslõikurit (Joonis 12.59) või hammaslattelõikurit.



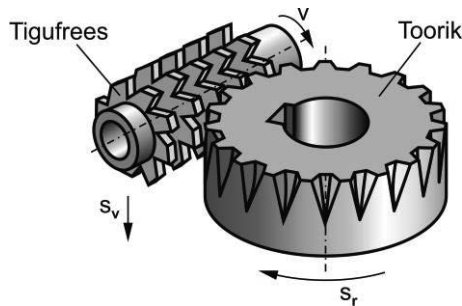
**Joonis 12.59.** Hambalõikus hammasrataslõikuriga

**Hammasrataslõikur** ehk **hambatõukur** (*gear-shaper cutter*) on kiirlõiketerasest valmistatud hammasrattakujuline tööriist, mille ühes otspinnas on lõikehambad. Lõikurile antakse vertikaalsuunas alla liikudes lõikeliikumine ja tema tagasi liikumisel eemaldub toorik lõikurist. Nii toorik kui ka lõikur saavad kindla pöörlemis- sagedusega kooskõlastatud liikumise, mis imiteerib hammasrataste hambumist.

Hammasrataslõikuri liikumisel alla (töökäik) eemaldatakse hambavahemik või osa sellest laastuna. Kuna protsess on pidev, siis iseloomustab seda hea tootlikkus ja hambaprofiili suur täpsus. Hambalõikamine rullumismeetodil on universaalsem kui kopeerimismeetodil, kuna ta võimaldab lõigata mainitud hambumismooduliga lõikuriga erineva hammaste arvuga rattaid. Hammatõukamine eeldab erilõikepingi – hammatõukepingi kasutust.

Lõikeriistana võidakse kasutada samuti **hammaslattelõikurit** (*rack-shaped cutter*), mis kujutab endast kiirlõiketerasest valmistatud vastavate lõikeservadega hammaslatti.

**Hambalõikusel tigufreesiga** (*gear hobbing*) imiteeritakse silinderhammasratta ja tiguratta hambumist, kusjuures tigu on kujundatud lõikehammastega **tigufreesina** (*hobbing cutter*) (Joonis 12.60) ja hammasratta silindrilise toorikuna. Lõikeriista nimetatakse oma kasutusotstarbe järgi ka **tigumoodulfreesiks**. Tigufrees saab pöörleva lõikelikumise ja sirgjoonelise ettenihkelikumise vertikaalsuunas ülalt alla. Toorik ja tigufrees pöörlevad teineteise suhtes kindla kooskõlastatud pöörlemiskiirusega. Lõikeprotsess on pidev, tootlik ja hammaste profiil täpne. Selline hambalõikus eeldab eripingi ja tigufreeside kasutamist. Kasutatakse seeria- ja hulgitootmises.



Joonis 12.60. Hambalõikus tigufreesiga

### Hammasrataste viimistlustöötlus

Hammasrataste tööea pikendamiseks neid üldjuhul viimistletakse ja termotöödeldatakse. Enne termotöötlust (karastus ja noolutus) kasutatavate viimistlusoperatsioonide hulka kuuluvad šeiverdus ja hammasrataste pindsilumine. Kuna termotöötlusega võivad kaasned a tooriku deformatsioonid, siis pärast seda viiakse vajadusel läbi hammaste lihvimine ja plankimine (vt samuti p 12.10.4).

**Šeiverdus** (*gear shaving*) on hammasrataste viimistlemine hammasratta- või hammaslatikujulise eritööriista **šeiivriga** (*gear-shaving cutter, shaver*). Šeiivri hammaste külgpindadel on töödeldud teravate lõikeservadega sooned. Šeiivri ja

hammasratta hambumise ja šeiври samaaegse teljesuunalise võnkumise tulemusena eraldatakse töödeldavatelt hammastelt õhuke laast, mille tulemusena hammasratta täpsus suureneb. Šeiverdus on enim kasutatav hammasrataste viimistlusmeetod, mis toimub reeglina enne termotöötlust.

**Hammasrataste pindsilumine** (*gear burnishing*) on hammasrataste hammaste kuju ja pinnakvaliteedi tõstmine plastseid deformatsioone kasutades. See toimub (analoogselt šeiverdusega) töödeldava hammasratta ja suure kõvadusega tööriisthammasratta hambumises. Pindsilumise tulemusena toimub hammasratta hammaste tööpindade silumine ja kalestumine.

**Hammasrataste lihvimisel** (*gear grinding*) kasutatakse lihvkettaid, mille kuju oleneb sellest, kas lihvitakse kopeer- või rullumismeetodil. Kopeerimeetodi korral (analoogselt hambafreesimisele ketasmoodulfreesiga) lihvitakse hammasratta iga hambavahe eraldi, kasutades hambavahekujulise profiiliga lihvketast. Lihvides rullumismeetodil, kasutatakse tasaste külgpindadega lihvkettaid. **Hammasrataste plankimine** (*gear lapping*) tehakse töödeldava hammasratta hambumises malmist hammasrattaga. Plankimiseks kasutatakse peenikest abrasiivi sisaldavat plankimispastat (vt samuti 12.10.4. Muud abrasiivtöötlusmeetodid).

## 12.10. LIHVIMINE JA MUUD ABRASIIV-TÖÖTLUSPROTSESSID

**Abrasiivtöötlus** (*abrasive machining*) on töötlus abrasiivlõikuriga või vaba abrasiiviga. Peamiseks abrasiivtöötlusmeetodiks on **lihvimine** (*grinding*) – tooriku pinna puhastöötlus abrasiivlõikuriga (lihvkettaga). Abrasiivtöötlusprotsesside hulka liigituvad samuti hoonimine, plankimine, superfiniš ja poleerimine (vt p 12.10.4.)

Abrasiivtöötluste tehniline ja majanduslik olulisus on tingitud võimalusest:

- töödelda sobivat abrasiivlõikurit või abrasiivi kasutades igasuguse kõvadusega metalseid ja mittemetalseid materjale;
- saada kõrgkvaliteetseid, väikese pinnakaredusega pindu ( $R_a$  0,025...1,6  $\mu\text{m}$ );
- saavutada toodete kõrge töötlustäpsus.

Abrasiivtöötlusmeetodid on samuti abrasiivveejugatöötlus, abrasiivjugatöötlus ning voolabrasiivtöötlus, mida käsitletakse kui mittetraditsioonilisi töötlusmeetodeid (vt p 12.11.1. Mehaanilised töötlusmeetodid).

### 12.10.1. Abrasiivid ja abrasiivlõikurid

**Abrasiivlõikur** (*abrasive tool; bonded abrasive*) koosneb abrasiivosakestest ja sideainest. Sideaine ülesandeks on abrasiivosakeste sidumine ja abrasiivlõikurile (lihvketas, luisk, segment, abrasiivlint) vormi andmine. Järgnevalt käsitleme peamiselt

**lihvkettaid** ehk **abrasiivkettaid** (*grinding wheel*) kui enim kasutatavaid abrasiivlõikureid. Lihvketta koostisosad (abrasiiv, sideaine) ja nende paigutuse iseärasusi määratlevad viis olulisemat parameetrit: (1) abrasiivmaterjal; (2) abrasiivitera suurus; (3) sideaine; (4) struktuur; (5) kõvadusaste.

### Abrasiivmaterjal ja sideaine

**Abrasiivmaterjalidest** ehk **abrasiividest** (*abrasive material*) on kõige laialdasemat rakendust leidnud alumiiniumoksiid, ränikarbiid, kuubiline boornitriid ja teemant (vt Tabel 12.4). Neist suurima kõvadusega on teemant, **soojuskindlusest** (*heat resistance*) aga alumiiniumoksiid.

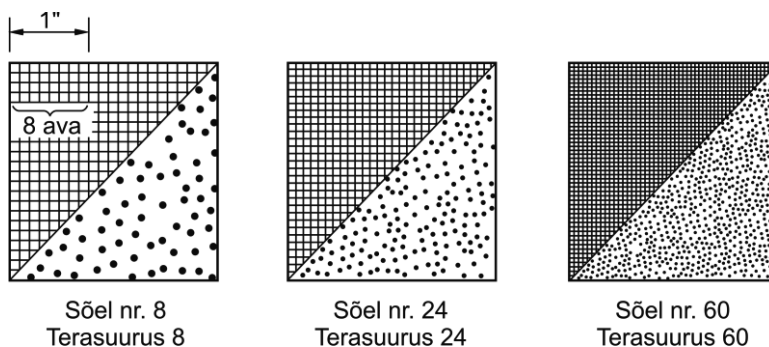
**Tabel 12.4.** Abrasiivide kõvadus ja soojuskindlus

Abrasiiv	Mikrokõvadus HV	Soojuskindlus*
Alumiiniumoksiid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2000...3000	1700...2000
Ränikarbiid (SiC)	2100...3000	1500...2000
Kuubiline boornitriid (cBN)	5700	1200...1400
Teemant	7000	700...850

\* Materjali võime säilitada kuumenemisel talitusomadused (kõvadus, tugevus).

Abrasiivmaterjali iseloomustab lisaks kõvadusele ja soojuskindlusele kulumiskindlus, sitkus/haprus. **Haprus** (*friability*) iseloomustab abrasiivosakeste purunemisvõimet paljastamaks uued teravad, laastueraldamisvõimega teravad servad.

Abrasiivi **terasuurus** (*grain size*) on oluline soovitava pinnakvaliteedi (väikese pinnakareduse) ja abrasiivtöötamise tootlikuse aspektist. Mida väiksem on terasuurus, seda parem on töödeldava pinna kvaliteet. Terasuuruse kasvades suureneb töödeldava **materjali eemalduskiirus** (*material removal rate*). Abrasiivi terasuuruse valik oleneb samuti töödeldavast materjalist – kõvema materjali töötlemiseks kasutatakse peenematerjalist, pehmemate puhul jämedamaterjalist abrasiivi. Abrasiivi terasuurust hinnatakse **teralisusega** (*grit size*) – sõelanalüüsil saadud põhifraktsiooni tera suurus. Näiteks teralisus 24 tähendab, et põhifraktsioon jääb sõelale, kui sõela ühe tolli (1") külje pikkusega alal on 24 ava. Seega, mida suurem on teralisust iseloomustav number, seda peenem on abrasiivitera (vt Joonis 12.61). Lihvketaste valmistamisel kasutatava abrasiivi terasuurus on tavapäraselt 8...250. Terasuurust iseloomustatakse ka meetermõõdukus, näiteks teralisus 100 tähendab tera suurust sajandikes millimeetrites, seega 1 mm.



**Joonis 12.61.** Sõelad osakeste teralisuse määramiseks; mida suurem sõela number, seda väiksem teralisus.

**Sideainel** (*bonding material*) on abrasiivtöötluses oluline ülesanne. Sidudes abrasiiv-osakesi, peab ta samal ajal rahuldama vastuolulisi tingimusi. Näiteks sideaine peab olema habras (kergesti purunema) nürinenud abrasiiv-osakeste väljamurenemiseks, sitke (vastupidavus löikejõu kõikumistele), tugev (sidumaks abrasiiv-osakesi kuni nende täieliku purunemiseni või väljamurenemiseni ning vältimaks purunemist lihvketta pöörlemisega kaasnevate tsentrifugaaljõudude toimel). Igasugune sideaine peab taluma löikeprotsessi kõrget temperatuuri.

**Klaasjassideained** (*vitrified bonds*) on keraamilised sideained, mille koostisesse kuuluvad savi ja teised keraamilised materjalid. Sellise sideainega lihvkettaste valmistamiseks vormitakse (pressitakse) keraamilised komponendid ja kuivatatakse. Järgneb kõrgtemperatuurne põletus, mille käigus sideaine muutub klaasile sarnaselt kõvaks ja tugevaks. Klaasjassideaine on habras, mistõttu sellise sideainega lihvkettas ei talu lööke, kuid nad võivad töötada iseteritavana, mis on nende peamine eelis. Selliste sideainetega lihvkettad moodustavad umbes 50...60 % lihvkettastest, nad on piisava tugevusega ja soojuskindlad (kuni 1250 °C).

**Silikaatsideained** (*silicate bonds*) on sideained vesiklaasi (naatriumsilikaat  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) baasil. Silikaatsideainega lihvkettaste tugevus on väiksem kui klaasjassideainega lihvkettastel, samuti on neil väiksem temperatuuritaluvus.

**Orgaaniliste sideainetena** (*organic bonds*) kasutatakse polümeervaike, šellakit ja kummi. **Vaiksideainetena** (*resinoid bonds*) kasutatakse reaktoplaste, näiteks fenool-formaldehüüdvaike. Selliste sideainetega lihvkettad on suure tugevusega ja leiavad kasutamist jämeliivimisel. **Šellaksidainet** (*shellac bond*) kasutatakse tugevate, aga vaiksideainetega lihvkettastega võrreldes väiksema jäikusega lihvkettaste valmistamiseks. Erinevalt vaiksideainetega kettastest, leiavad šellaksidainega lihvkettad kasutamist peenliivimisel hea pinnakvaliteedi saavutamiseks. **Kummsidainet** (*rubber bond*) iseloomustab teiste sideainetega võrreldes suurem elastsus.

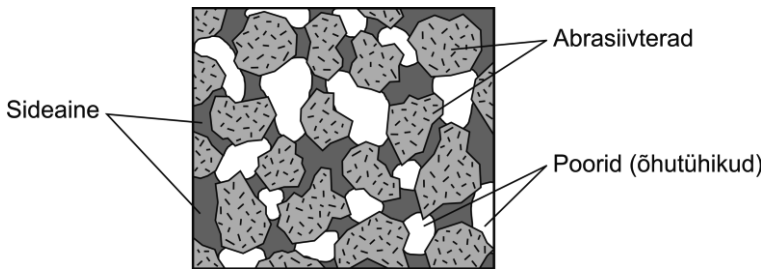


Kasutatakse suure pöörlemissagedusega, õhukeste lihvketa valmistamiseks, mille valdav rakendusvaldkond on tükeldamine ja valukanalite eemaldus valanditelt.

**Metallsideaineid** (*metallic bonds*) – tavaliselt pronks, ka nikkel – kasutatakse abrasiivlõikurite valmistamisel, milles abrasiivina kasutatakse teemanti ja kuubilist boornitriidi. Lihvkettale kantakse seejuures ainult suhteliselt õhuke, kuni 6 mm paksune abrasiivi ja sideaine kiht. Abrasiivikihi sidumine ketta südamikuga, mis valmistatakse tavaliselt alumiiniumisulamist, toimub kõrgel temperatuuril ja surve all.

### **Abrasiivlõikuri struktuur ja kõvadusaste**

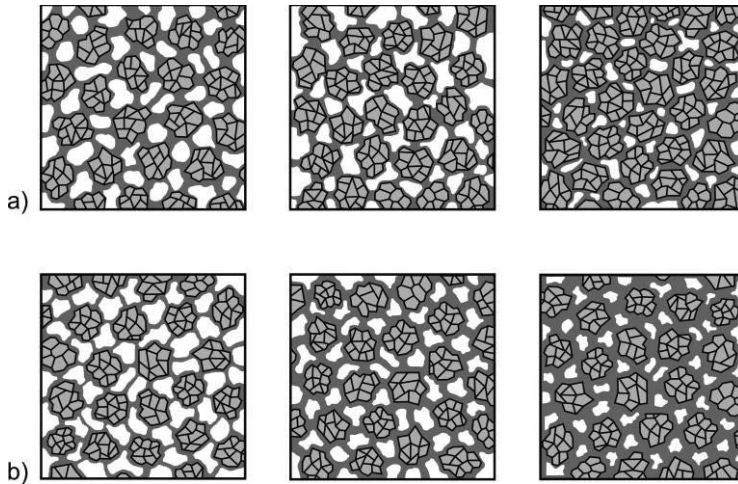
**Lihvketta struktuuri** (*wheel structure*) iseloomustab abrasiivosakeste vaheline kaugus, mis on abrasiivi mahulisest sisaldusest ja teralisusest. Lisaks abrasiivosakestele (20...60 mahuprotsenti) ja sideainele on abrasiivlõikurid poorsed (vt Joonis 12.62).



**Joonis 12.62.** Lihvketta struktuuriosad

Eristatakse abrasiivi tihedat, keskmist ja hõredat paigutust lihvketta struktuuris (vt Joonis 12.63a). Hõreda struktuuriga abrasiivlõikuris on abrasiivosakeste sisaldus väike ja poorsus suur. Tiheda struktuuriga abrasiivlõikuris, vastupidi, on poorsus väike ja abrasiivosakeste sisaldus suur. Hõreda (poorse) struktuuriga lihvkettaid kasutatakse intensiivsetel lõikerežiimidel, kui eraldub suhteliselt palju laastu, mis täidab lihvketta poore. Tiheda struktuuriga lihvkettaid kasutatakse ainult viimistlemisel ning keskmise struktuuriga lihvkettaid sitkete materjalide lihvimisel.

**Lihvketta kõvadusaste** (*wheel grade*) iseloomustab sideaine abrasiivteri koos hoidvat jõudu. Mida suurem on abrasiivlõikuri kõvadusaste, seda tugevam on side abrasiivterade vahel. Suurema kõvadusastmega abrasiivlõikur (lihvketas) sisaldab rohkem ja suurema tugevusega sideainet ning vähem poore (vt Joonis 12.63b). Ühest ja samast abrasiivmaterjalist ja sideainest lihvkettal võib olenevalt poorsusest olla erinev kõvadusaste. Kõvadusastme järgi liigitatakse lihvkettaid kolme gruppi: pehmed, keskmised ja kõvad. Iga grupp jaguneb omakorda järkudeks, näiteks kõva, väga kõva, eriti kõva jne.



**Joonis 12.63.** a – lihvketta struktuur: abrasiivi hõre, keskmine ja tihe paigutus ja b – kõvadusaste: pehme, keskmise kõvadusega, kõva

Kui on valitud liiga suure kõvadusastmega ketas, võivad nürinenud abrasiivterad jääda lihvkettasse, millega kaasneb lihvitava pinna kvaliteedi halvenemine ja materjali eemalduskiiruse vähenemine. Liiga pehme lihvketta valimisel kulub abrasiivlõikuri kiirelt. Et ära kasutada abrasiivlõikuri iseteritusvõimet, lihvitakse kõvu materjale pehmete ketastega. Pehmeid materjale lihvitakse kõvade ketastega. Eriti pehmete metallide (alumiinium ja vasesulamid) töötlemiseks kasutatakse eriti pehmeid lihvkettaid, kuna kõvad abrasiivkettad ummistuvad kiirelt lõikeprotsessis eemalduva laastuga.

### Lihvketaste markeerimine

Lihvketaste markeerimiseks kasutatakse mitmeid markeerimissüsteeme. Vaatleme lihvketaste markeerimist USA standardi ANSI (*American National Standards Institute*) kohaselt.

Markeering sisaldab kõiki eespool käsitletud abrasiivlõikuri parameetreid – abrasiivmaterjal, abrasiivi terasuurus (teralisus), sideaine, struktuur ja kõvadusaste. Joonisel 12.64 on näide abrasiivketta markeerimisest: abrasiiv – alumiiniumoksiid (A), abrasiivi terasuurus 46, lihvketta kõvadusaste (H) – keskmine, struktuur (6) – keskmine ning sideaine (V) – klaasjas.

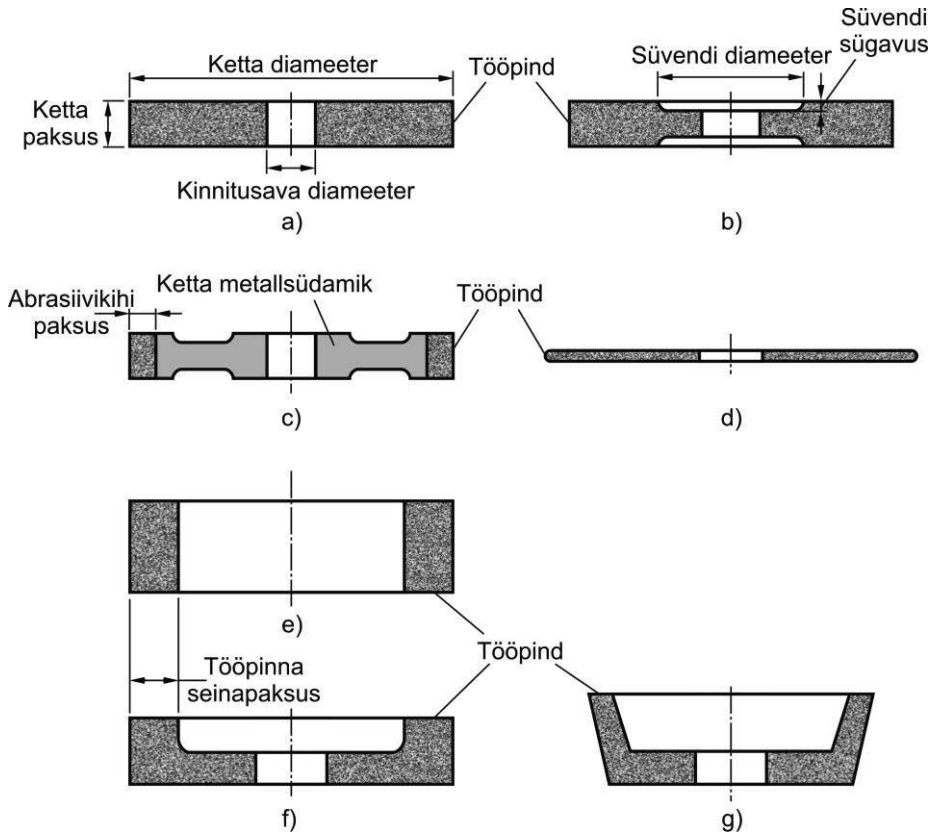
30	A	46	H	6	V	XX
						<p><b>Tootja märgistus</b> kettale (soovi korral)</p> <p><b>Sideaine tüüp:</b> E - šellak, R - kummi, RF - tugevdatud kummi, S - silikaat, V - klaasjas jne.</p> <p><b>Struktuur:</b> skaala vahemikus 1-15: 1 - väga tihe struktuur, 15 - väga avatud struktuur</p> <p><b>Kõvadus:</b> skaala A-Z: A - pehme, M - keskmine, Z - kõva</p> <p><b>Terasuurus:</b> 8...24 - jäme, 30...60 - keskmine, 70...180 - peen, 220...600 - väga peen</p> <p><b>Abrasiivi tüüp:</b> A - alumiiniumoksiid, C - ränikarbiid</p> <p><b>Prefiks:</b> tootja sümbol abrasiivile (soovi korral)</p>

**Joonis 12.64.** Lihvketta markeerimissüsteem Standardi ANSI B74.13-1977 järgi

Teemanti ja kuubilist boornitriidi sisaldavaid lihvkettaid tähistatakse erinevalt – selliste abrasiivlõikurite markeeringus näidatakse lisaks eeltoodule abrasiivi sisaldava kihi paksus (mm või tolli) ning abrasiivi kontsentratsiooniaste.

### Lihvketaste kuju

Erinevate lihvimistööde tarvis kasutatakse erineva geomeetria ja mõõtmetega lihvkettaid. Abrasiivlõikuri geomeetria (kuju) peab tagama vajaliku kontakti tooriku viimistlustöölusele kuuluvate pindadega. Lihvketaste tüüpe on esitatud Joonisel 12.65.



**Joonis 12.65.** Lihvketaste tüüpe: a – tasaste külgpindadega; b – kahepoolse külgsüvendiga; c – abrasiivi (teemant, kuubiline boornitriid) sisaldava kihiga välisperimeetril; d – mahalõike; e – silindriline; f – silindriline kausjas; g – kooniline kausjas

Lihvkettaid (a), (b), (c) kasutatakse ketta välispinnaga **perifeerlihvimiseks** (*peripheral grinding*). Õhukest lihvkettast (d) kasutatakse mahalõikamiseks. Lihvkettad (e), (f) ja (g) on ette nähtud lihvimiseks ketta otspinnaga, st **otslihvimiseks** (*face grinding*).

### 12.10.2. Lihvimisprotsess

Lihvkettaid kasutatakse eelkõige pindade viimistlemisel. Peamised lihvimismeetodid on (vt samuti p 12.10.3. Lihvimismeetodid ja lihvpingid):

- tasalihvimine;
- ümarlihvimine, sh välisümarlihvimine ja siselihvimine;
- tsentriteta lihvimine.

Abrasiivlõikureid kasutatakse lisaks lihvimisele, kui eesmärgiks on toorikute hea pinnakvaliteet ning kujutäpsus, samuti muudeks töödeks, milliste puhul pinnakvaliteet ei ole esmase tähtsusega:

- **mahalõikuseks** (*cutting off*) – toorikute osadeks lõikamine;
- **jämelihvimiseks** ehk **koorivaks lihvimiseks** (*snagging*) – seisneb suure koguse metalli abrasiivlõikuriga eemaldamises;
- **tööriistaterituseks** (*tool grinding*) – kulunud lõikeriistade (treiterad, freesid, puurid jms) lõikegeomeetria taastamine.

Järgnevalt analüüsime lihvimisprotsessi ja käsitleme enim kasutatavaid lihvimismetodeid.

### Lihvimisprotsessi analüüs

Lihvimisele on teiste lõiketöötlusmeetoditega võrreldes iseloomulikud suured lõikekiirused ja väike laast. Joonisel 12.66. on esitatud dlhvimisprotsessi iseloomustavad parameetrid tasalihvimisel.

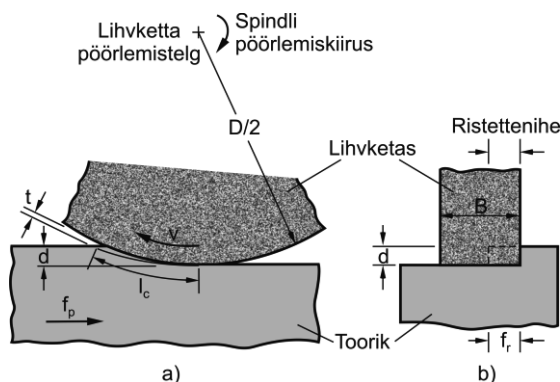
**Lihvketta ringkiirus** (*wheel speed*), m/min:

$$v = \pi Dn, \quad (12.19)$$

kus  $D$  – lihvketta välisläbimõõt, m,

$n$  – lihvketta pöörlemissagedus,  $\text{min}^{-1}$ .

**Lõikesügavus** (*infeed; depth of cut*)  $d$  on ühe läbimiga eemaldatava materjalikihi paksus. Enamiku lihvimismetodite puhul saab **pikiettenihke** (*transverse feed*)  $f_p$  toorik. Töötlemaks pinda kogu ulatuses, antakse tasalihvimisel (vt Joonis 12.66) lihvkettale iga töökäigu lõpul **ristettenihe** (*crossfeed*)  $f_r$ . Ümarlihvimisel (vt Joonis 12.71) ja pöörleva töölauaga tasalihvimisel (vt Joonis 12.69b, d) antakse toorikule ka **ringettenihe** (*rotary feed*).



**Joonis 12.66.** Tasalihvimise geomeetria: a – külgvaates ( $t$  – laastu paksus,  $l_c$  – laastu pikkus); b – otsvaates

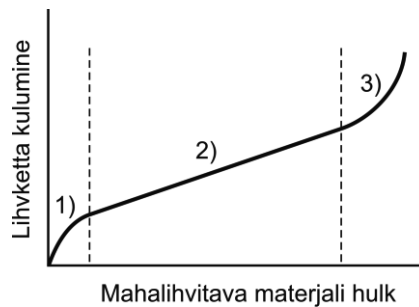
Lihvimise pinnakvaliteet on seda parem, mida väiksem on lihvketta abrasiivi terasuurus, tihedam struktuur (abrasiivosakeste sisaldus) ning suurem lihvketta ringkiirus (vt samuti Joonis 12.68).

### Lihvketta kulumine, teritamine ja rihtimine

Lihvketta kulumismehhanisme on kolm:

- 1) **abrasiivterade purunemine** (*grain fracture*), mille tulemusena osa teradest eemaldub lõikejõudude toimel, paljastades uued lõikeservad;
- 2) abrasiivterade **hõõrdkulumine** (*attritious wear*), mis on lõikevõime kaotuseni viiv abrasiivosakeste teravate lõikeservade ümardumine;
- 3) **sideaine purunemine** (*bond fracture*), mis on tervete abrasiivterade lõikejõudude toimel eemaldumine. Viimati nimetatud kulumismehhanism oleneb abrasiivlõikuri kõvadusastmest (vt 12.10.1. Abrasiivid ja abrasiivlõikurid).

Abrasiivlõikuri kulumiskõver, millel on eristatavad kulumise kolm staadiumi, on esitatud Joonisel 12.67. Nendes kulumisstaadiumites esineb samaaegselt mitu kulumismehhanismi, millistest üks on prevaleeriv.



**Joonis 12.67.** Lihvketta kulumiskõver: 1 – sissetöötlustsoon; 2 – normaalkulumissoon; 3 – katastroofkulumissoon

Lihvketta kulumise esimeses staadiumis prevaleerib kulumismehhanismina abrasiivterade purunemine ja sellega kaasnev uute lõikeservade paljastumine. See kulumisstaadium vastab abrasiivlõikuri kulumiskõvera **sissetöötlustsoonile** (*break-in region; initial wear region*). Kulumiskõvera teisele tsoonile, **normaalkulumissoonile** (*steady-state wear region; secondary wear region*) on iseloomulik lineaarne seos lihvketta kulumise ja eemaldatava materjalikoguse vahel (kulumise intensiivsus on konstantne). Kulumise selles staadiumis prevaleerib teine kulumismehhanism – abrasiivterade hõõrdkulumine. Kulumise kolmandas, katastroofilise kulumise staadiumis (vastab kulumiskõvera **katastroofkulumissoonile** (*failure region, accelerating wear region*)) on enamik abrasiivosakesi nürinenud, mistõttu eemaldatava materjali kogus hakkab vähenema, töödeldava pinna ja abrasiivketta temperatuurid kasvavad. Tooriku materjali eemaldamise intensiivsus väheneb ka

seetõttu, et abrasiivterade vahelised tühikud (poorid) ummistuvad laastuga. Kulumise selles staadiumis on prevaleerivaks mehhanismiks sideaine purunemisest põhjustatud abrasiivterade tervikuna eemaldumine ja sellest tingitud lihvketta kiire kulumine.

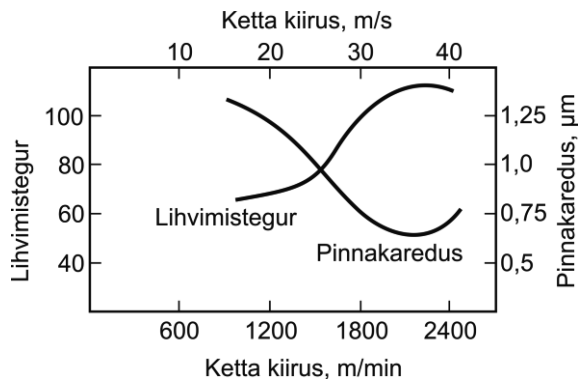
Lihvketta kulumiskõvera tõusunurka iseloomustab **lihvimistegur** (*grinding ratio; G ratio*)

$$G = \frac{V_m}{V_k}, \quad (12.20)$$

kus  $V_m$  – eemaldatava materjali maht;

$V_k$  – lihvketta mahuline kulumine.

Lihvimistegur on tavaliselt vahemikus 60 kuni 120 ja on seda suurem, mida suurem on lihvketta ringkiirus (vt Joonis 12.68). See on seletatav eemaldatava laastu ristlõike ja sellest tingitud abrasiivterade purunemise vähenemisega ketta ringkiiruse kasvades. Kuna ringkiiruse suurenedes paraneb ka pinnakvaliteet, on mõistetav, miks lihvitakse tavaliselt suurte kiirustega. Liigsuurte kiirustega kaasneb töödeldava pinna ja lihvketta temperatuuri tõus, mille tulemusena halvnevad nii pinna kvaliteet kui väheneb lihvimistegur.



**Joonis 12.68.** Lihvimisteguri ja lihvitava pinna kvaliteedi olenevus lihvketta ringkiirusest

Kulumise kolmandas staadiumis tekib vajadus **lihvketta terituseks** (*dressing*). Teritamisel eemaldatakse nürinenud abrasiivterad ja lihvketta pooridesse kogunenud laast. Teritusel kasutatakse **teritusabinõuna** (*dressing tool*) teist abrasiivketast või **teritusluisku** (*dressing stick, abrasive stick*). Teritus ei garanteeri lihvketta kuju taastamist. Abrasiivlõikuri silindrilise geomeetria taastamine saavutatakse **lihvketta rihtimisega** (*truing*). Rihtimisel tagatakse **rihtimisabinõu** (*truing tool*), milleks on rihtimisketas või luisk ja lihvketta kontrollitav vastastikune asetus ja liikumine, tagamaks lihvketta esialgse geomeetria taastamine.

## Lihvimisparameetrite valikupõhimõtted

Lihvimisprotsessi mõjutab arvukalt parameetreid – lihvketta mark, lihvimisvedelik, lõikerežiimid (ketta ringkiirus, lõikesügavus, ettenihe). Lihvimisel kasutatakse üldjuhul **lihvimisvedelikke** (*grinding fluids*), milliste ülesanne on nagu teistegi lõiketöötlusmeetodite puhul töödeldava pinna jahutus, samuti laastu eemaldamine. Tabelis 12.5 on esitatud olulisemad põhimõtted lihvimisprotsessi parameetrite valikul.

**Tabel 12.5.** Lihvimisprotsessi parameetrite valikupõhimõtted

Kasutusvaldkond	Soovitused
Konstruksiooniterase ja malmide lihvimine	Abrasiivmaterjal – alumiiniumoksiid ( $Al_2O_3$ )
Mitterauasulamite lihvimine	Abrasiivmaterjal – ränikarbiid (SiC)
Karastatud tööriistateraste lihvimine	Abrasiivmaterjal – kuubiline boornitriid (cBN)
Suure kõvadusega keraamiliste materjalide, kõvasulamite ja klaasi lihvimine	Abrasiivmaterjal – teemant
Pehmete (väikese kõvadusega) materjalide lihvimine	Kasutatakse jämeda abrasiiviga kõvu suure kõvadusastmega lihvkettaid
Kõvade materjalide lihvimine	Kasutatakse peene abrasiiviga väikese kõvadusastmega lihvkettaid
Lihvimine hea pinnakvaliteedi saamiseks	Kasutatakse peene abrasiiviga ja tiheda struktuuriga lihvkettaid, ketta ringkiirus suur, väike pikiettenihe
Lihvimine maksimaalse materjalimahu eemaldamiseks	Kasutatakse jämeda abrasiiviga ja hõreda struktuuriga (poorseid) lihvkettaid, suur pikiettenihe

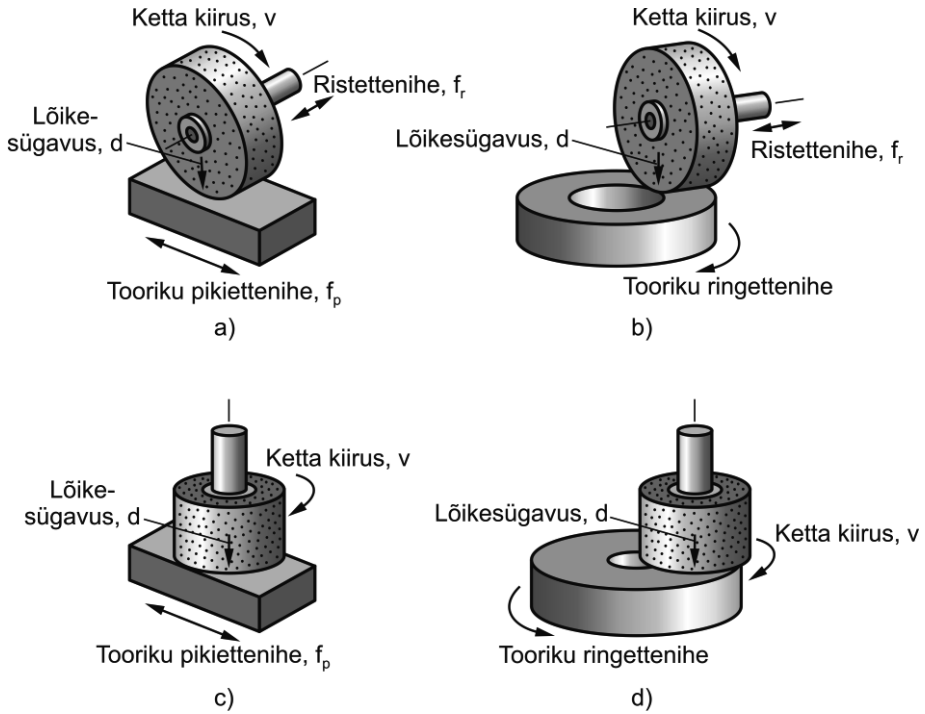
### 12.10.3. Lihvimismeetodid ja lihvpingid

Käsitleme alljärgnevaid lihvimismeetodeid: (1) tasalihvimine, (2) ümarlihvimine, (3) tsentriteta lihvimine, (4) roomelihvimine, (5) lintlihvimine.

#### Tasalihvimine

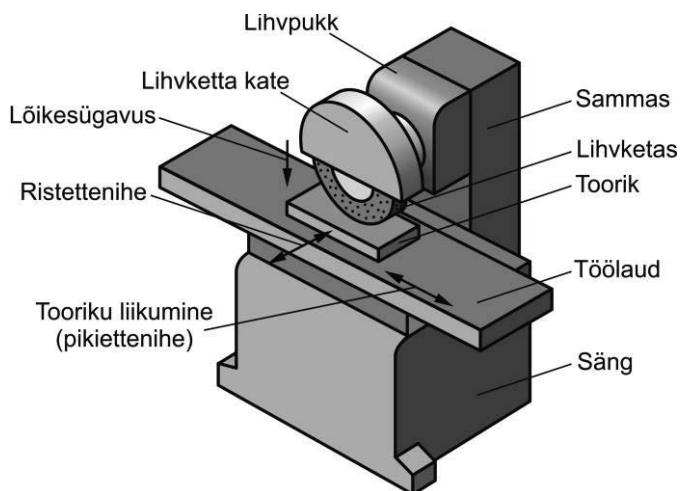
**Tasalihvimist** (*surface grinding*) rakendatakse tavapäraselt tasaste pindade viimistlemiseks. Sarnaselt freesimisega (vt p 12.5) lihvitakse lihvketta silindrilise perifeeriaga nn **perifeerlihvimine** (*peripheral grinding*) või lihvketta otpinnaga, nn **otslihvimine** (*face grinding*) (vt Joonis 12.69). Perifeerlihvimisel kasutatakse horisontaallihvpinke, milliste spindli pöörlemistelg on horisontaalne (vt Joonis 12.70). Otslihvimisel kasutatakse vertikaallihvpinke, milliste spindli pöörlemistelg on vertikaalne.





**Joonis 12.69.** Tasalihvimise variandid: a – horisontaalspindel, töölauda edasi-tagasi pikiettenihe; b – horisontaalspindel, pöörleva töölauda ringettenihe; c – vertikaalspindel, töölauda edasi-tagasi pikiettenihe; d – vertikaalspindel, pöörleva töölauda ringettenihe

Kõige tavapärasem on horisontaalspindliga **horisontaaltasalihvpink** (*horizontal-spindle surface grinder*) (vt Joonis 12.70). Lihvitakse kasutades töölauale kinnitatud tooriku edasi-tagasi pikiettenihet  $f_p$ . Perioodiliselt, töölauda iga käigu lõpus antakse lihvkettale ristettenihe  $f_r < B$  ( $B$  – lihvketta laius) pikiettenihkega ristuvast suunas. **Lõikesügavus** (*infeed; depth of cut*)  $d$  tagatakse lihvketta töödeldava pinna normaalsuunalise perioodilise etteandmisega.



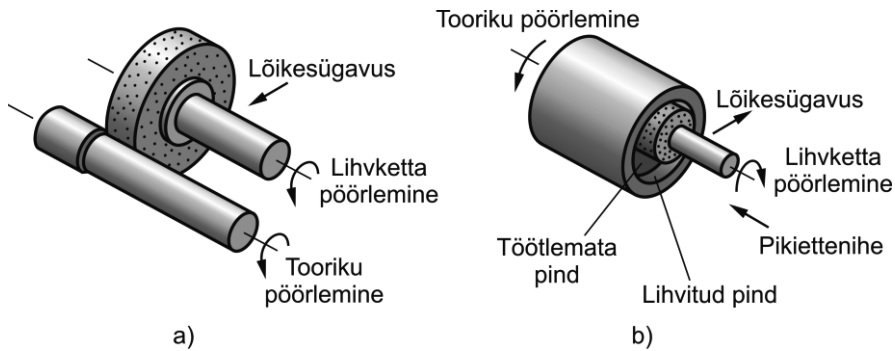
**Joonis 12.70.** Horisontaalspindliga horisontaaltasalihvipink

Horisontaallihvimist kasutatakse pinnasiledust parandava viimistlemise kõrval ka kui **kopeerlihvimist** ehk **kujulihvimist** (*form grinding*) lihvketta vertikaalsuunalise ettenihkega. Lihvimist, kus tooriku edasi-tagasi pikiettenihe on asendatud ettenihkeliikumisega tooriku pinnaga ristiasetsevas suunas, nimetatakse **ristlihvimiseks** (*plunge-cut grinding; plunge grinding*), tasalihvimisel ka vertikaalsettenihkega lihvimiseks. Ristlihvimise tulemusena antakse tooriku pinnale lihvketta välispinna profiil. Ristlihvimist kasutatakse ka ümarlihvimisel (vt Joonis 12.72).

**Vertikaaltasalihvpingis** (*vertical-spindle surface grinder*) on lihvketta läbimõõt üldjuhul tooriku laiusest suurem, mistõttu puudub vajadus lihvketta perioodilise ristettenihke järgi – lihvitakse tooriku pikiettenihkega. Selline töötluskeem võimaldab saada pindade suurepärase tasapindsuse. Vertikaaltasalihvpinke ja horisontaallihvpinke kasutatakse samuti, kui toorikutele antakse pöörleval töölaual ringettenihe (vt Joonis 12.69d, b).

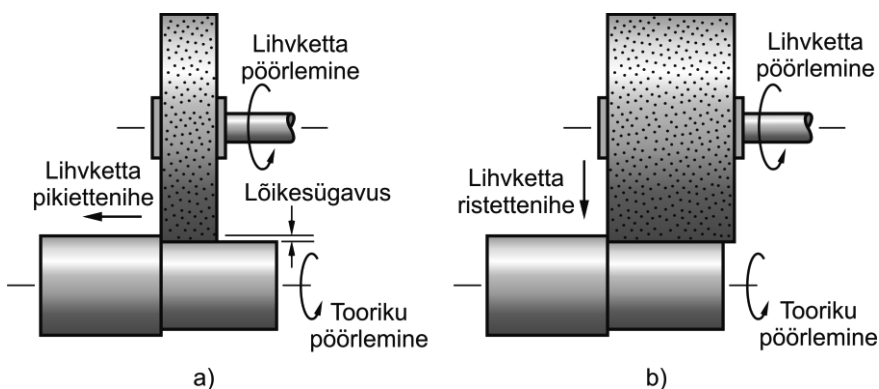
### Ümarlihvimine

**Ümarlihvimine** (*cylindrical grinding*) on pöördpinna lihvimine ümarlihvpingis. Eristatakse **välisümarlihvimist** (*external cylindrical grinding; center-type cylindrical grinding*) ja **siselihvimist** ehk **siseümarlihvimist** (*internal cylindrical grinding; internal grinding*) (vt Joonis 12.71).



**Joonis 12.71.** Ümarlihvimine: a – välisümarlihvimine, b – sisetümarlihvimine (siselihvimine)

Välisümarlihvimine (Joonis 12.71a) meenutab välispinna treimist nii tööriista asetuse kui ka kasutatavate lõikepinkide – **ümarlihvpinkide** (*cylindrical grinding machines*) konstruktsiooni poolest. Ümarlihvpinkides kasutatakse treipingi terahoidiku (lõikurihoidiku) asemel lihvpukki, mille elektrimootor annab lihvkettale pöörlemise. Lihvketta ringkiirus on 1200...2000 m/min. Tsentrite vahele või padrunisse kinnitatud silindrilise tooriku ringettenihke kiirus on 18...30 m/min. Pikiettenihe antakse toorikule või lihvkettale (vt Joonis 12.72a). Pikiettenihe  $f_p$  võetakse tavaliselt lihvketta laiuse osana ( $f_p = 0,2...0,7 B$ ) tooriku pöörde kohta, kus  $B$  – lihvketta laius, mm. Lõikesügavus  $d = 0,01...0,1$  mm on eraldatava materjalikihi paksus mõõdetuna risti pikiettenihkega. Tasalihvimisele sarnaselt on võimalik pikiettenihke asemel kasutada lihvketta ettenihet tooriku pöörlemisel ristsuunas (Joonist 12.72b). Sellist lihvimist nimetatakse tasalihvimisele sarnaselt **ristlihvimiseks** (*plunge-cut grinding; plunge grinding*).



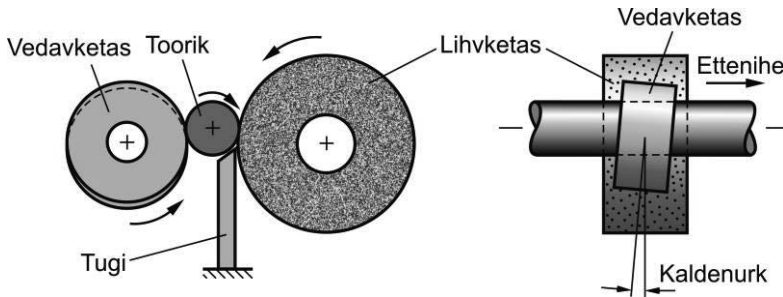
**Joonis 12.72.** Ümarlihvimine: a – pikiettenihkega (pikilihvimine), b – ristettenihkega (ristlihvimine)

Välisümarlihvimist kasutatakse võllide (sh väntvõllide), liugelaagrite, valtside, spindlite jms lihvimiseks. Lihvimine tagab termotöödeldud toorikute lõppviimistluse – mõõtmed, kuju, pinnakaredus.

Siseümarlihvimine (Joonis 12.71b) meenutab sisetreimist. Siselihvpingi padrunisse kinnitatud tooriku ringettenihe on 20...60 m/min; lihvketta ringkiirus on välisümarlihvimisele sarnaselt 1200...2000 m/min. Lihvketas saab tooriku teljesuunalise pikiettenihke või ettenihke tooriku pöörlemisteljega rist-suunas (ristlihvimine). Siselihvimist kasutatakse termotöödeldud toorikute avade täpseks töötamiseks.

### Tsentriteta lihvimine

**Tsentriteta lihvimine** (*centerless grinding*) on silindriliste detailide välis- või siselihvimise meetod, kui lihvitavat toorikut tsentrite vahele või padrunisse ei kinnitata (vt Joonis 12.73). Eristatakse **tsentriteta välislihvimist** (*external centerless grinding*) ja **tsentriteta siselihvimist** (*internal centerless grinding*).



**Joonis 12.73.** Tsentriteta välislihvimine

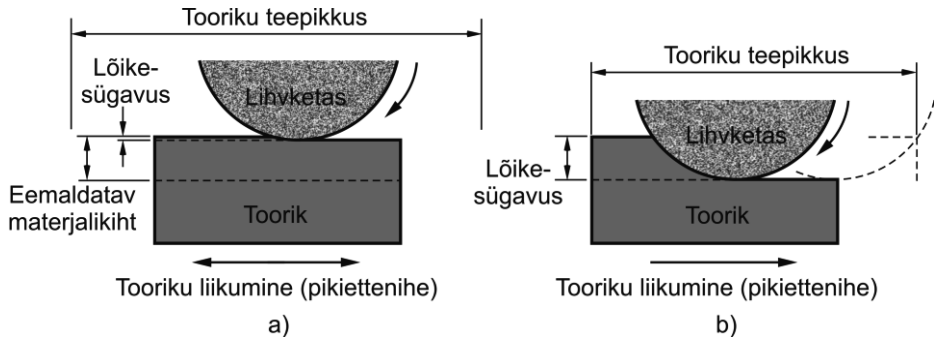
Tsentriteta lihvimisel toorikut lihvipinki tsentrite vahele (või padrunisse) ei kinnitata, mistõttu märkimisväärselt lüheneb töötlemisele kuluv aeg. Tsentriteta lihvimist kasutatakse silindriliste detailide, nii lühikeste kui ka pikkusega mitu meetrit, hulgi viimistlemiseks.

Tsentriteta välislihvimisel (Joonis 12.73) saab toele toetuv toorik teljesuunalise ettenihkeliikumise kahe pöörleva ketta vahel, millistest üks on lihvketas. Lihvketta ringkiirus on 1200...1800 m/min. Tooriku piki- ja ringettenihe tagatakse kaldu asetseva teljega vedavkettaga, mis pöörleb lihvkettaga võrreldes märgatavalt väiksema ringkiirusega. Vedavketta telje kaldasend on vajalik toorikule pikisuunalise liikumise andmiseks.

### Roomelihvimine

**Roomelihvimine** (*creep feed grinding*) on suure lõikesügavuse ja väikese ettenihkega lihvimine. Selle lihvimismeetodi nimetus tuleneb väga väikese pikiettenihke

kasutamisel. Roomelihvimise erisus tavapärase tasalihvimisega võrreldes selgub Joonisel 12.74.



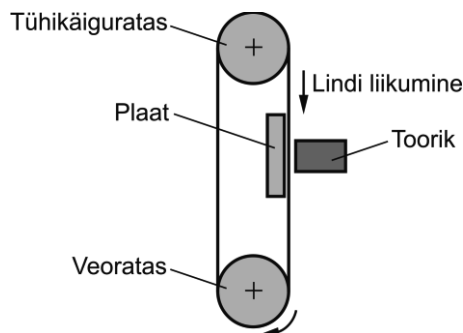
**Joonis 12.74.** Lihvimismooduste võrdlus: a – tavatasalihvimine ja b – roomelihvimine

Roomelihvimisel kasutatav lõikesügavus on 1000...10000 korda suurem kui tavatasalihvimisel. Samavõrra väiksem on pikiettenihe. Sama materjalimahu eemaldamiseks kulub roomelihvimisel märgatavalt vähem aega kui tavapärasel lihvimisel, kuna lihvketas on toorikuga pidevas kontaktis ja puudub vajadus tooriku edasi-tagasi ettenihkeliikumise järgi.

Roomelihvimise põhimõtet kasutatakse nii tasa- kui välisümarlihvimisel. Tasapindade roomelihvimisega töödeldakse toorikutesse näiteks sügavaid sisselõikeid (sooni). Silindriliste toorikute roomelihvimise näiteks on väliskeerme lõikamine keerme profiili omava lihvkettaga. Silindriliste pindade roomelihvimist nimetatakse **süvalihvimiseks** (*deep grinding*). Roomelihvimise eelisteks tavalihvimisega võrreldes on: (1) materjali suur eemalduskiirus, (2) töödeldud pindade parem geomeetiline täpsus, (3) töödeldava tooriku madalam pinnatemperatuur. Lihvitakse enamasti spetsiaalselt selle lihvimismeetodi tarvis arendatud **roomelihvpinkidel** (*creep feed grinders*).

### Lintlihvimine

**Lintlihvimisel** (*abrasive belt grinding*) kasutatakse abrasiivlõikurina lihvlinti (vt Joonis 12.75). **Lihvlindi** (*abrasive belt*) joonkiirus on tavaliselt 700...1700 m/min. Seda lihvimismeetodit kasutatakse juhul, kui esmaseks on toorikute pinnakvaliteet, mitte töödeldavate pindade geomeetria täpsus.



Joonis 12.75. Lintlihvimine

### 12.10.4. Muud abrasiivtöötlusmeetodid

Muude abrasiivtöötlusmeetodite hulka kuuluvad hoonimine, plankimine, superfiniš ja poleerimine. Need abrasiivtöötluste viimistlusmeetodid võimaldavad saada lihvimisega võrreldes veelgi siledamat pinda ja täpsemat töötlust. Tabelis 12.6 on esitatud erinevate viimistlusmeetodite abil saadav pinnakaredus ja töödeldavate pindade geometria.

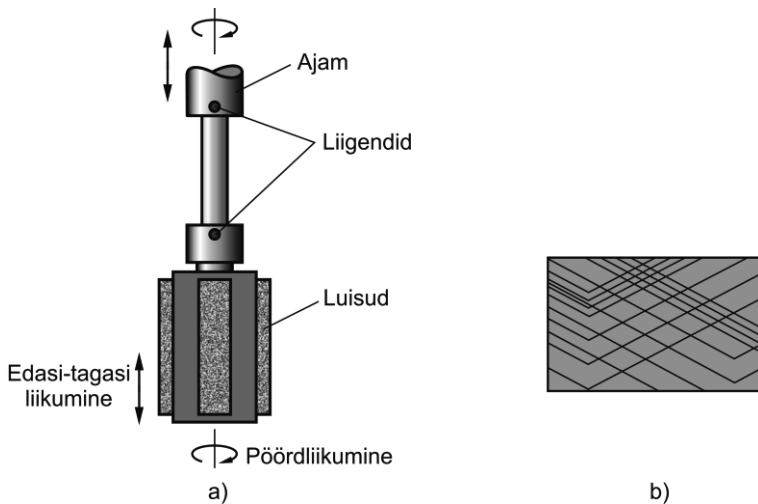
**Tabel 12.6.** Töödeldavate pindade geometria ja pinnakaredus erinevaid abrasiivviimistlusmeetodeid kasutades

Viimistlusprotsess	Töödeldava pinna geometria	Pinnakaredus (pinnakonaruste kõrgus), $\mu\text{m}$
Lihvimine	Tasapinnad, silindrilised sise- ja välispinnad	0,2...1,6
Hoonimine	Silindrilised sisepinnad	0,1...0,8
Plankimine	Tasapinnad, sfäärilised pinnad	0,025...0,4
Superfiniš	Tasapinnad, silindrilised ja koonilised välis- ja sisepinnad	0,01...0,2
Poleerimine	Erineva geometriaga pinnad	0,01...0,8

### Hoonimine

**Hoonimine** (*honning*) on viimistlusmeetod, mis võimaldab saada suure täpsusega, siledaid (väikse pinnakaredusega) ja spetsiifilisi mikroprofiiliga silindrilisi sisepindu. Selline hoonimisele iseloomulik pinna mikroprofiil on sobiv õlikihi hoidmiseks hõõrdepinnal (näiteks sisepõlemismootori silinder). Abrasiivlõikuriks on peeneralised, **hooni** (*honning tool; hone*) kinnitatud **hoonimisluisud** (*honning sticks; honing stones*). Luiskude arv hoonis (hoonimispeas) oleneb töödeldava silindrilise pinna läbimõõdust ja on minimaalselt 2 (püssitoru hoonimisel) ulatudes kümneteni suure läbimõõduga avade viimistlemisel.

Hoonile antakse kaks liikumist – pöörliikumine ja edasi-tagasi ettenihkeliikumine (Joonis 12.76). Liikumised tuleb seada selliselt, et hoonimisluisud ei satuks hooni tagasikäigu lõpul samasse kohta, st ei kordaks sama trajektoori. Sel juhul tekib töödeldavale pinnale sobiv töötlusjälgede muster (võrk). Hooni ringkiirus on tavaliselt 15...150 m/min, surve töödeldavale pinnale 1...3 N/mm<sup>2</sup>. Hoonimisel kasutatakse üldjuhul lõikevedelikku (jahutus-määrdevedelikku) hooni jahutamiseks ja laastu eemaldamiseks.

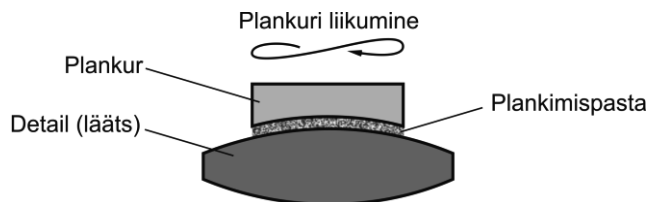


**Joonis 12.76.** Hoonimisprotsessi: a – hoon (hoonimispea); b – hooni töötlusjäljed

## Plankimine

**Plankimine** (*lapping*) on abrasiivviimistlustöötlus, mille puhul abrasiiviosakesed on surutud töödeldava pinna ja suhteliselt pehmest materjalist (tavapäraselt malm, vask) **plankuri** (*lapping tool, lap*) vahele. Plankuril on töödeldava pinnaga sama kuju (geomeetria). Plankimisel kasutatakse abrasiivi (näiteks alumiiniumoksiid) sisaldavat **plankimispastat** (*lapping compound*). Plankitakse väga väikest kiirust ja survet kasutades, sageli ka käsitsi.

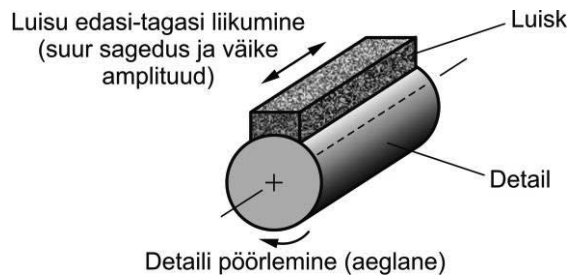
Plankimist kasutatakse näiteks optika läätsede (vt Joonis 12.77), laagripindade, kaliibrite jms lõppviimistlusel.



**Joonis 12.77.** Optikaläätse plankimine

## Superfiniš

**Superfiniš** (*superfinishing*) on viimistlusmeetod, kus kasutatakse hoonimisega sarnaselt luiske, kuid hoonimisest erinevalt saab lisaks silindrilistele sisepindadele töödelda ka silindrilisi ja koonilisi välispindu ning tasapindu (vt Joonis 12.78 ja Tabel 12.6). Erinevalt hoonimisest: (1) luisud kujutavad endast elastset süsteemi ega muuda seetõttu eelneval töötlusel (lihvimisel) saadud kujundi makrogeomeetriat (st ei kõrvalda kujukälbeid); (2) luiskude võnkumise ulatus on väiksem, kuni 5 mm; (3) võnkumissagedus on tunduvalt suurem, kuni 1500 võnget/min; (4) kontaktsurved on väiksemad, alla 0,3 N/mm<sup>2</sup>; (5) löikekiirused on väikesed – alla 15 m/min; (6) kasutatud abrasiivi terasuurus on üldjuhul väiksem.



Joonis 12.78. Silindrilise välispinna superfiniš

## Poleerimine

**Poleerimine** (*polishing*) on pinnakareduse vähendamise enim levinud meetod, kusjuures tooriku kuju (geomeetria) ei muutu. Kasutatakse enamasti dekoratiivpindade töötlemiseks. Abrasiivlõikuriks on elastne (riidest, nahast, vildist, kalevist) ketas (mõnikord lint), mille pinnale on kantud (liimitud) peeneteraline abrasiiv. Poleerimisketta ringkiirus on kuni 2300 m/min. Poleeritakse samuti elastsele kettale (lindile) töötlemisprotsessis kantava **poleerpastaga** (*polishing compound; polishing paste*). **Poleerimisel poleerpastaga** (*buffing*) kasutatakse pehmemaid kettaid, poleerketaste ringkiirus on suurem (2400...5200 m/min) ning kasutatav abrasiiv on peenem.

## 12.11. MITTETRADITSIOONILISED TÖÖTLUSMEETODID

Tavapärasel lõiketöötusel (treimine, freesimine, puurimine jne) kasutatakse teravaservalisi teritatud lõikureid ning materjali eemaldamisel moodustub laast. Lisaks tavapärastele mehaanilisele lõiketöötusele laastu eemaldades on terve rida töötlusmeetodeid, mille puhul materjali eemaldamine toimub teistel põhimõtetel. **Mittetraditsioonilisel töötlusel** (*non-traditional machining*) eemaldatakse materjal mehaanilist, elektrokeemilist, keemilist või termilist energiat, samuti nende



kombinatsiooni kasutades. Selliste töötlusviiside puhul puudub vajadus terava-servalise lõikeriista järgi.

Vajadus mittetraditsiooniliste töötlusmeetodite järgi tuleneb uutest nõuetest materjalidele ja nende töötlusviisidele. Nende nõuete hulka kuuluvad näiteks:

- vajadus töödelda uusi, spetsiifiliste omadustega (suur kõvadus, tugevus, sitkus) materjale, mille lõiketöötlus tavapäraste meetoditega on raske või võimatu.
- vajadus töödelda keerulise geomeetriaga pindu, mis tavapäraste lõiketöötlusmeetoditega on raske või võimatu.
- toodete või nende pindade kahjustumise vältimine, mis sageli võib kaasneda laastu eraldava lõiketöötlusega.

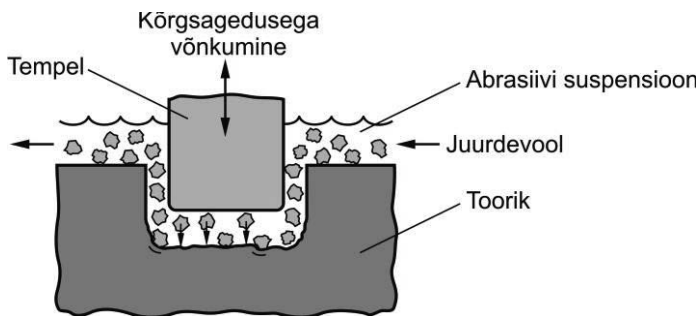
Kõnealusel osas käsitletakse tööstuses enim rakendust leidnud mittetraditsioonilisi töötlusmeetodeid, mida saab liigitada töödeldava materjali eemaldamisel kasutatud energia liigi järgi nelja gruppi:

1. **Mehaanilised meetodid.** Neid meetodeid (ultrahelitöötlus, veejugatöötlus, abrasiivveejugatöötlus, abrasiivjugatöötlus, voolabrasiivtöötlus) iseloomustab töödeldava materjali erosioon suure kiirusega vee-, abrasiivi- või abrasiivvee-joa toimel.
2. **Elektrokeemilised meetodid.** Nende meetodite puhul kasutatakse materjali eemaldamiseks elektrokeemilist energiat.
3. **Termilised meetodid.** Neid töötlusmeetodeid (elektroerosioontöötlus, elektronkiirlõiketöötlus, laserikiirlõiketöötlus jms) iseloomustab termilise energia kasutamine töötlemisel. Kitsasse piirkonda kontsentreeritud termiline energia (kontsentreeritud energiavoog) eemaldab materjali sulamise või aurustamise teel.
4. **Keemilised meetodid.** Keemiliste töötlusviiside puhul toimub materjali selektiivne eemaldamine (söövitamine) sobivalt valitud kemikaale kasutades.

### 12.11.1. Mehaanilised töötlusmeetodid

#### Ultrahelitöötlus

**Ultrahelitöötlus** ehk **ultrahelilõiketöötlus** (*ultrasonic machining*) on materjali töötlus (lihvimine, avade moodustamine jms) ultraheli kasutades. Meetod põhineb töödeldava materjali eemaldamisel abrasiivosakeste poolt, millele ultrahelisagedusega ja väikese amplituudiga võnkuv tööriist annab kiirendava liikumise. Sagedusega umbes 20 000 Hz võnkuva tööriista (templi) (vt Joonis 12.79) amplituud on ligikaudselt 0,075 mm. Tempel vibreerib töödeldava pinnaga ristsuunas ja saab lõikamisprotsessi edenedes samasuunalise ettenihke.



**Joonis 12.79.** Ultrahelitöötlus

Ultrahelitöötlusel kasutatav tööriist (tempel) valmistatakse nii konstruktsiooni- kui tööriistaterastest, messingist, kõvasulamist. Abrasiivina vedeliku ja abrasiivi suspensioonis (abrasiivi kontsentratsioon 20...60 %) kasutatakse suure kõvadusega boornitriidi (BN), boorkarbiidi ( $B_4C$ ), alumiiniumoksiidi ( $Al_2O_3$ ), ränikarbiidi (SiC), teemanti. Töötlemisel peab vedeliku ja abrasiivi suspensioon pidevalt tsirkuleerima, toomaks töötlemise piirkonda uut abrasiivi ja eemaldamaks löikeprotsessis eemaldavaid töödeldava materjali osakesi. Mida peenem abrasiiv, seda kvaliteetsem jääb töödeldud pind.

Löikepiirkonnast materjali eemaldamise intensiivsus suureneb tööriista võnkesageduse ja amplituudi kasvades. Töötlemisega ei kaasne üksnes töödeldava materjali, vaid samuti tööriista (templi) kaju muutus abrasiivse erosiooni teel. Olenevalt töödeldavast materjalist võib töödeldava materjali ja tööriista mahulise erodeerumise suhe olla 100:1 (klaasi töötlemisel) kuni 1:1 (tööriistateraste töötlemisel).

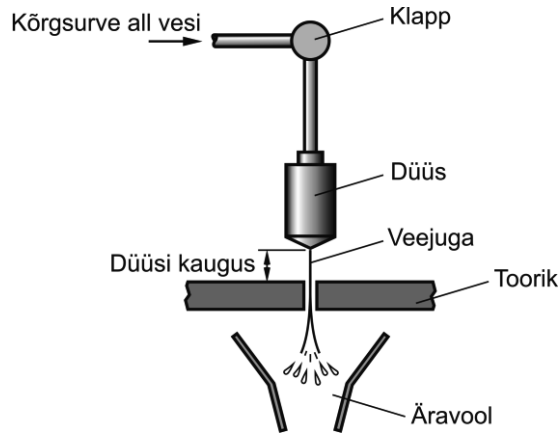
Ultrahelitöötluse kasutamise põhjuseks on eelkõige vajadus töödelda suure kõvadusega hapraid materjale, näiteks keraamikat, klaasi, kõvasulameid jms. Meetodit saab edukalt kasutada samuti metallide (roostevaba teras, titaan) töötlemisel. Lisaks kõvade materjalide töötlemisele on ultrahelitöötlus otstarbekas samuti ümarast erineva ristlõikega avade (sügavuse ja diameetri suhtega  $< 3:1$ ) ja keeruka kujuga õõnsuste (süvendite) töötlemisel.

Ultrahelitöötluse eelis on materjali struktuuri muutva termomõju puudumine, ohutus, võimalus töödelda materjale kõvaduse laias diaposoonis. Ultrahelitöötlus on üks vähestest sobivatest meetoditest klaasi lõiketöötlemisel.

### **Veejugatöötlus ja abrasiivveejugatöötlus**

**Veejugatöötlusel** ehk **veejugalõikusel** (*water-jet machining; water-jet cutting*) kasutatakse materjali eemaldamiseks kitsast kõrgkiiruselist veejuga (vt Joonis 12.80). Kitsas veejuga läbimõõduga 0,1...0,4 mm moodustub vee voolamisel läbi düüsi. Düüsi väljuva veejoo kiirus ulatub kuni 900 m/s, vee rõhk kuni 400 MPa.

Kulumiskindel düüs valmistatakse suure kõvadusega materjalidest – safiir, rubiin, teemant.



Joonis 12.80. Veejugatöötlus

Olulised lõikeprotsessi parameetrid veejugalõikusel (töötlusel) on düüsi ava läbimõõt (0,1...0,4 mm), vee rõhk (kuni 400 MPa), lõikekiirus ning düüsi otsa kaugus (tavaliselt suurusjärgus 3 mm) töödeldavast pinnast. Lõikekiirus olenevalt lõigatava materjali omadustest ja paksusest on 5...500 mm/s.

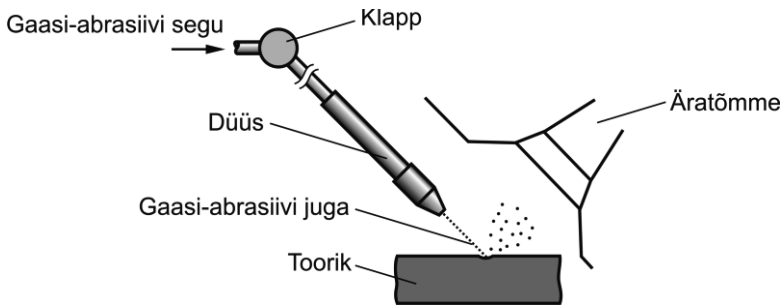
Veejugalõikust kasutatakse väikese kõvaduse ja tugevusega suhteliselt pehmete mittemetallsete materjalide (plastid, tekstiil, polümeerkomposiidid, nahk jms) lõikuseks. Veejugalõikuse peamised eelised on materjali struktuuri muutva termomõju puudumine, väike materjalikadu tänu kitsale lõikepiirkonnale.

**Abrasiivveejugatöötlus** ehk **abrasiivveejugalõikus** (*abrasive water-jet machining, abrasive water-jet cutting*) on sobiv meetod erinevate materjalide (metallid, keraamika, plastid, polümeerkomposiidid jms) lõikamiseks veejoa kineetilist energiat kasutades. See on võimalik tänu abrasiivi lisamisele veejoasse vahetult enne sisenemist kitsast veejuga moodustavasse düüsi. Kasutatakse alumiiniumoksiidi ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), kvartsi ( $\text{SiO}_2$ ), ränikarbiidi ( $\text{SiC}$ ) jt suure kõvadusega abrasiive. Veejugatöötlusel kasutatavatele protsessi parameetritele lisanduvad abrasiivveejugatöötlusel täiendavalt abrasiivosakeste suurus ja kontsentratsioon veejoas. Düüsi ava diameeter on mõnevõrra suurem kui veejugatöötlusel – 0,25...0,6 mm (tagamaks abrasiivisaldusega veejoa piisav energia). Düüsi otsa kaugus on märgatavalt väiksem – umbes  $\frac{1}{4}$ ... $\frac{1}{2}$  veejugatöötlusel kasutatavast, vähendamaks abrasiivi sisaldava veejoa hajumist. Abrasiivveejugatöötlust kasutatakse sobivat abrasiivi valides põhimõtteliselt igasuguste materjalide lõikamisel. Eriti sobivaks on meetod

osutunud polümeerkomposiitide, näiteks süsinikkiudarmeeritud komposiitidest toorikute lõikamisel.

### Abrasiivjugatöötlus ja voolabradiivtöötlus

**Abrasiivjugatöötlusel** ehk **abrasiivjugalõikusel** (*abrasive jet machining*) eemaldatakse (lõigatakse) materjali suurekiiruselise, abrasiivi sisaldava gaasijoa toimel (vt Joonis 12.81). Abrasiivjoha kiirus, samuti rõhk, on tunduvalt väiksemad kui veejugatöötlusel – kiirused 2,5...5 m/s, rõhk 0,2...1,4 MPa. Abrasiivjoha moodustava düüsi läbimõõt on 0,075...1 mm. Abrasiivina (osakeste suurus 15...40 µm) kasutatakse alumiiniumoksiidi (alumiiniumi ja messingi töötlemisel), ränikarbiidi (teraste ja keraamika töötlemisel), klaasipulbrit (poleerimisel) jms. Abrasiivi kandegaasidena kasutatakse õhku, lämmastikku, süsihappegaasi ja heeliumi. Düüsi otsa kaugus töödeldavast pinnast on 3...75 mm. Töötlemisel eraldub palju tolmu, mistõttu seadmed on varustatud imiventilaatoriga.



**Joonis 12.81.** Abrasiivjugatöötlus

Abrasiivjugatöötlust kasutatakse peamiselt kõvade ja habraste materjalide töötlemisel. Meetod on sobimatu pehmete ja elastsete materjalide (näiteks polümeerid) töötlemiseks. Kasutatakse kas materjali kohttötluseks (kidaemaldus, kraadilõikus), samuti pindade puhastamisel, poleerimisel jne. On sobiv õhukese ja hapra materjali (klaas, keraamika) lõikamiseks.

**Voolabradiivtöötlus** (*abrasive flow machining*) on pindade abrasiivtöötlus, kasutades abrasiivjoha asemel edasi-tagasi voolavat abrasiivi. Töötlemiskeskonnana kasutatakse (abrasiivisisaldusega) viskoelastset (nii viskoossete kui ka plastsete omadustega) polümeeri, mida sunnitakse edasi-tagasi ühest töösilindrist teise üle töödeldava pinna voolama. Abrasiivina kasutatakse näiteks ränikarbiidi (SiC).

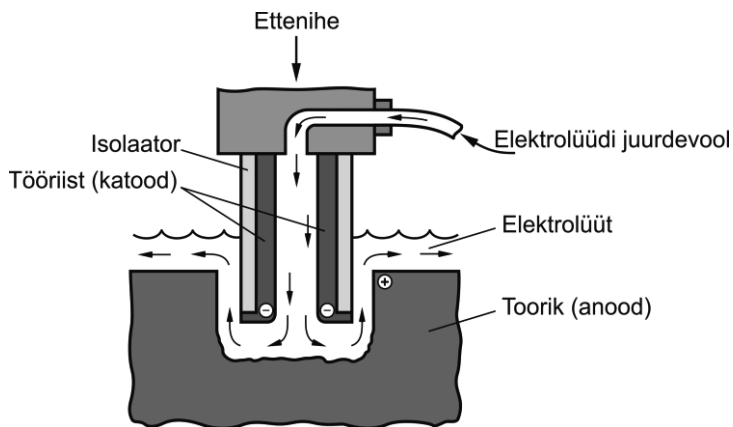
Voolabradiivtöötlust kasutatakse raskelt ligipääsetavate pindade (näiteks avad ja õõnsused) viimistlevaks töötlemiseks tavapärase abrasiivtöötlemise asemel – poleerimiseks, kidaemalduseks, raadiuse moodustamiseks teravatel servadel jms.

### 12.11.2. Elektrokeemilised töötlusmeetodid

Elektrokeemilisel töötlusel kasutatakse materjali eemaldamiseks elektrilist energiat kombineerituna keemiliste reaktsioonidega. Protsessid elektrokeemilisel töötlusel on olemuselt vastupidised protsessidele galvaanilisel pindamisel. Töödelda saab vaid elektrivoolu juhtivaid materjale.

#### Elektrokeemiline töötlus

**Elektrokeemilisel töötlusel** (*electrochemical machining*) töödeldav toorik (anood) lahustub elektrolüüsi protsessis. Töödeldav pind moodustub kopeermeetodil – tooriku pinnad omandavad töötleva tööriista (katood) geomeetria (vt Joonis 12.82). Elektrolüüsi protsessis eralduv (lahustuv) anoodi materjal ei sadestu tööriistkatoodile, vaid eemaldatakse töötluspiirkonnast kiirelt voolava elektrolüüdiga.



**Joonis 12.82.** Elektrokeemiline töötlus

Tööriist-elektrood valmistatakse vasest, messingist, roostevabast terasest. Tööriista ettenihkekiirus on proportsionaalne materjali töötlemise piirkonnast eemaldumise kiirusega. Eemaldatud materjali maht  $V$  on, vastavuses Faraday esimese seadusega, proportsionaalne voolutugevusega ja töötlusajaga:

$$V = CIt, \quad (12.21)$$

kus  $C$  – konstant, mis sõltub eemaldatava materjali aatomkaalust, valentsist ning tihedusest;

$I$  – voolutugevus;

$t$  – töötusaeg.

Olulisteks töötlusprotsessi parameetriteks elektrokeemilisel töötlusel on voolutugevus, elektrolüüdi takistus, pilu tööriista ja töödeldava tooriku vahel (0,075...0,75

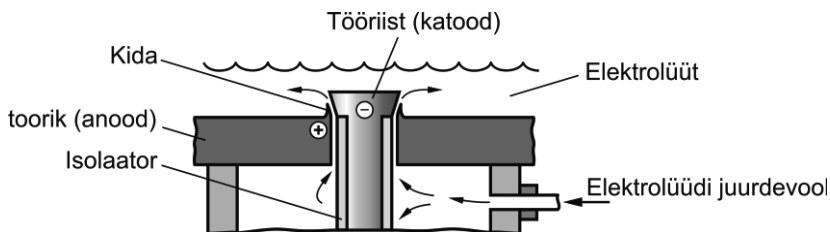
mm) ja elektroodi ristlõikepind. Kasutatakse vee baasil elektrolüüte, mille takistust saab vähendada lisades sobivaid sooli, näiteks NaCl, NaNO<sub>3</sub>. Töötluspiirkonnast eemaldatavad töödeldava materjali mikroskoopilised osakesed tuleb elektrolüüdist eemaldada, kasutades separeerimismeetodeid, näiteks tsentrifuugimist jms.

Elektrokeemilise töötamise eelised on: (1) pindu kahjustava termomõju puudumine; (2) parem pinnakvaliteet lõiketöötlemisega võrreldes; (3) tööriista vähene kulumine (erosioon); (4) kõvade ja raskelt lõiketöödeldavate materjalide suur töötluskiirus. Puudused on: (1) suur elektrikulu; (2) probleemid elektrolüüsil tekkinud keskkonnohtliku jääkmaterjali kõrvaldamisega.

Elektrokeemilist töötlust kasutatakse tavaliselt juhul, kui voolu juhtiv toorik on tavapärase lõiketöötlemisega raskelt töödeldav või kui lõiketöötlemine ei ole võimalik tooriku keeruka geomeetria tõttu. Töödeldava materjali kõvadus ei avalda töödeldavusele mõju, kuna materjal ei eemaldu mehaaniliselt, vaid elektrokeemiliselt. Elektrokeemilise töötlemise tüüpkasutusvaldkonnad on: (1) **tööriistavao sisselõik** (*die sinking*), näiteks stantsidesse, survevaluvormidesse jms; (2) mitme ava samaaegne moodustamine; (3) ümarast erineva ristlõikega avade moodustamine; (4) viimistlev töötlemine, näiteks kidaeemaldus, lihvimine.

### Elektrokeemiline kidaeemaldus ja lihvimine

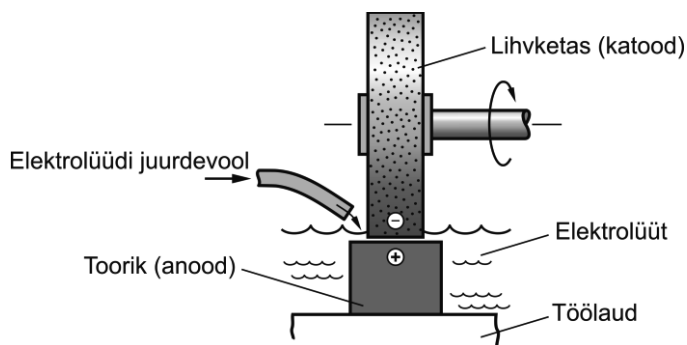
**Elektrokeemilise kidaeemaldusega** (*electrochemical deburring*) eemaldatakse eelnevatel töötlemismeetoditel moodustunud kidad. Eelneval töötlemisel, näiteks lõiketöötlemisel, ava ümber moodustunud kida eemalduse näide on näha Joonisel 12.83.



**Joonis 12.83.** Elektrokeemiline kidaeemaldus

Kida eemaldamine tagatakse tööriist-elektroodi sobiva geomeetriaga. Tööriista piirkond, mis töötlemisel ei osale, kaetakse isolatsioonmaterjaliga.

**Elektrokeemiline lihvimine** (*electrochemical grinding*) on pinna lihvimine elektrit juhtiva abrasiivtööriista abil elektrokeemiliste ja mehaaniliste protsesside koostoimel (vt Joonis 12.84). Elektrokeemilisel teel eemaldub valdav osa (95 %) materjalist ja vaid vähene osa (5 %) abrasiivi abil.



**Joonis 12.84.** Elektrokeemiline lihvimine

Elektrokeemilisel lihvimisel kasutatava voolujuhtiva lihvketta sideaineks on kas metall (kui abrasiivina kasutatakse teemanti) või elektrijuhtivust kindlustavate metalsete osakestega voolu juhtiv polümeer (kui abrasiivina kasutatakse alumiiniumoksiidi). Töödeldav materjal eemaldatakse töötlemispiirkonnast voolava elektrolyüdiga.

Elektrokeemilise lihvimise eelis tavapärase lihvimisega (vt p 12.10.2. Lihvimisprotsess) võrreldes on lihvketta tunduvalt pikem püsivusaeg, kuna valdav osa töödeldavast materjalist eemaldatakse mitte abrasiivselt, vaid elektrokeemiliselt. Eeliseks on samuti lihvketta väiksem teritusvajadus, töödeldavate pindade olekut muutva mehaanilise ja termilise mõju puudumine. Kasutatakse kõvasulam tööriistade teritamisel, kirurgiliste nõelte ja õhukeseseinaliste torude, habrastest materjalidest habraste toodete lihvimisel jms.

### 12.11.3. Termilised töötlusmeetodid

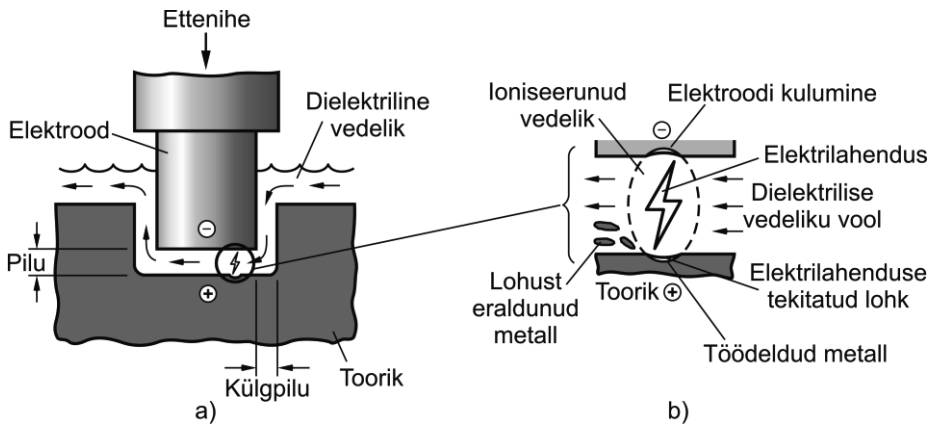
Termilise energia kasutamisel põhinevad töötlusmeetodid, erinevalt elektrokeemilistest töötlusmeetoditest, mõjutavad töödeldavaid pindu termiliselt. Kitsasse piirkonda kontsentreeritud termilise energia toimel eemaldatakse töödeldav materjal sulamise või aurustamise teel. Termilisel energial põhinevateks laialdaselt tööstuslikku rakendust leidnud meetoditeks on elektroerosioontöötlus, laserikiirlõiketöötlus ja elektronikiirlõiketöötlus.

#### **Elektroerosioontöötlus**

**Elektroerosioontöötlus** (*electric discharge machining*) on elektrit juhtivate materjalide töötlemismeetod, mis põhineb elektroodide (tööriist ja töödeldav materjal) vahel tekkivate lühiajaliste elektrilahenduste toimel. Elektrilahendustel eraldub lokaalselt materjali sulatav või aurustav soojus. Eristatakse mahtelektroerosioon- ja traat-elektroerosioontöötlust. Samuti kui elektrokeemilisel töötlusel, ei ole elektroerosioontöötlusel töödeldava materjali mehaanilistel omadustel (kõvadus, tugevus) tähtsust

töödeldavuse seisukohalt, kuna tegemist ei ole mehaanilise töötlusmeetodiga. Töödeldavuse seisukohalt on oluline tooriku materjali sulamistemperatuur.

**Mahtelektoerosioontöötlus** (*ram electric discharge machining, ram EDM*) on elektroerosioontöötlus tööriistakujuliste süvendite, avade jms kopeerimeetodil moodustamiseks elektritjuhtivasse materjalidesse (vt Joonis 12.85a). Töötlus on võimalik dielektrilistes vedelikes. Ioniseeritud osakeste voog dielektrikus kujutab endast voolujuhti, mida läbib impulssidena  $10^{-4} \dots 10^{-6}$  sekundi kestel suure tihedusega vool. Eraldunud sulanud materjal jahtub dielektrilises vedelikus, kusjuures moodustuvad 0,005...0,01 mm suurused osakesed (vt Joonis 12.85b), mis eemalduvad töötluspiirkonnast dielektrilise vedeliku voolu toimel.



**Joonis 12.85.** Mahtelektoerosioontöötlus: a – põhimõtteline skeem; b – protsessid elektroodide vahemikus

Elektrilahendused toimuvad lühimat teed pidi elektroodide vahel, mistõttu purunemine (elektroerosioon) algab kõigepealt vähima piluga piirkondades. Erodeerunud elektroodide vaheline kaugus nendes piirkondades suureneb, mistõttu järgnevad elektrilahendused tekivad teistes, vähima vastastikuse kaugusega piirkondades. Lõpptulemusena materjali suure sagedusega kohtemaldamise tulemusena kopeeritakse toorikule järk-järgult tööriista **külgpülu** (*overcut*) (0,02...0,05 mm) võrra suurema (vt Joonis 12.85a) kuju. Selleks, et protsess kulgeks pidevalt, tuleb elektroodide (toorik ja tööriist) vahekaugus hoida konstantsena.

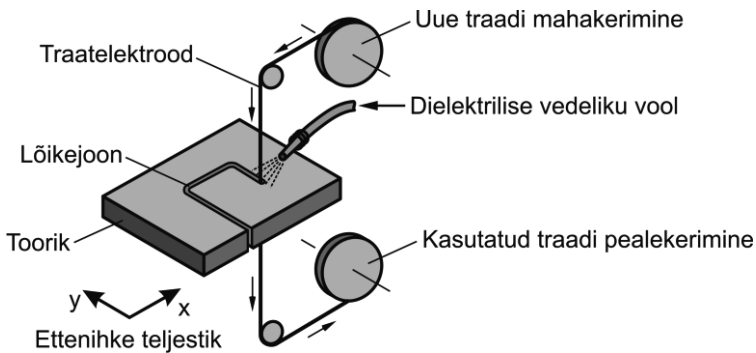
Olulisemateks tehnoloogilisteks parameetriteks elektroerosioontöötlemisel on voolutugevus ja elektrilahenduste sagedus. Mõlema parameetri kasvades erodeerimise kiirus suureneb. Töödeldud pinna siledus on seda parem, mida suurem on elektrilahenduste sagedus ja väiksem vool.



Elektrilahenduste toimel ei erodeeri mitte ainult toorik, vaid ka tööriist (vt Joonis 12.85b). Tooriku ja elektroodi erodeerumisintensiivsuste suhe on vahemikus 1...100 olenevalt tooriku ja elektroodi materjalist. Tööriist-elektrood valmistatakse grafiidist, vasest, messingist, Cu-W ja Ag-W pulbersulamitest jt. Elektroodi materjal valitakse sõltuvalt vooluallikast (vooluimpulsside sagedus), töödeldavast materjalist ja soovitud pinnasiledusest.

Mahtelektroerosioontötlust kasutatakse mitmesugustest kulumiskindlatest materjalidest tööriistade (pressvormid, stantsid, survealuvormid, tõmbesilmad jms) sisemiste õõnsuste töötlemiseks (vt samuti tööriistavao sisselõikus elektrokeemilisel meetodil p 12.11.2). Elektroerosioontötlust kasutatakse samuti rasktöödeldavatest materjalidest või keerulise geomeetriaga konstruktsioonidetallide valmistamiseks. Näiteks õhukese-seinalised detailid, mille jäikus on tavapäraseks mehaaniliseks töötlemiseks ebapiisav, tooriku välispinna suhtes kaldu asetsevad või ebakorrapärase ristlõikega avad jms.

**Traatelektroerosioontötlus** (*electric discharge wire cutting, wire EDM*) on elektroerosioontötluse erimeetod, kus tööriistana kasutatakse väikese läbimõõduga traati toorikusse kitsaste sisselõigete tegemiseks (vt Joonis 12.86). Erinevalt mahtelektroerosioontötlusest on tegemist mitte kopeeriva, vaid pinda genereeriva (kujundava) tötlusmeetodiga.

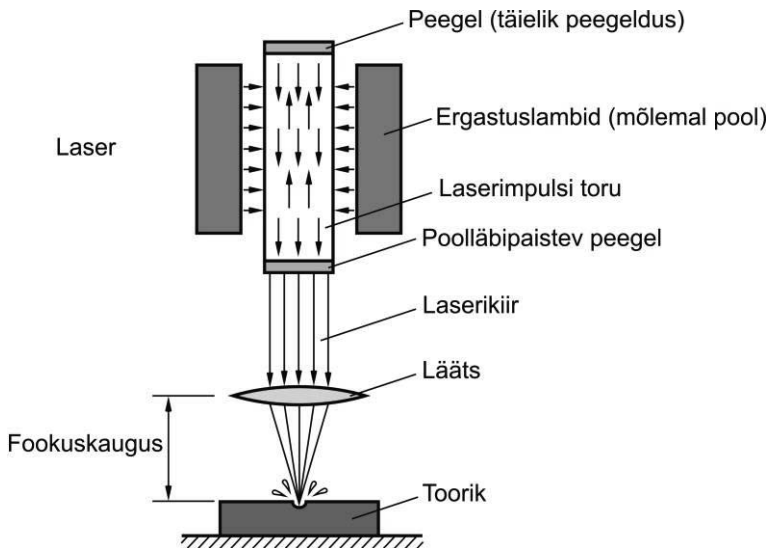


**Joonis 12.86.** Traatelektroerosioontötlus

Traatelektroerosioontötlusel saab toorik traadi suhtes etteantud kontuuri mööda ettenihke. Lõikava traadi pidev aeglane liikumine ühelt poolilt teisele tagab lõiketsooni ühtlase laiuse, mis on traadi diameetrist (külgpilu moodustumise tõttu) mõnevõrra suurem. Sarnaselt mahtelektroerosioontötlusega toimub tötlus dielektrilist vedelikku kasutades, mida antakse pideva joana lõiketsooni (vt Joonis 12.86) või toimub protsess dielektrilise vedelikuga täidetud vannis. Kasutatakse traatelektroodi läbimõõduga 0,05...0,3 mm. Traadi materjalina sobivad messing, vask, volfram, molübdeen. Väikese läbimõõduga traati kasutades on võimalik ühe lõikega valmistada tööriista omavahel hästi kokku sobituvad matriits ja tempel.

## Laserikiirlõiketöötlus

Laser on optiline muundur (kvantgeneraator), mis muundab elektrienergia koherentseks valguskiireks. Laseri valguskiirt iseloomustab tavapäraste valgusallikatega võrreldes monokromaatus (laserikiirel on teoreetiliselt ühesugune lainepikkus) ja kollimeeritus (valguskiirte paralleelsus). Need laseri omadused võimaldavad laserikiire optiliste läätsedega fokuseerimist suure energiatihedusega punktiks töödeldaval toorikul. Lasereid kasutatakse laserkeevitamisel, -jootmisel, -lõikamisel, -pindamisel, -karastamisel aga ka vahemaade mõõtmisel. **Laserikiirlõiketöötlus** ehk **laserlõiketöötlus** (*laser-beam machining*) on materjali lõiketöötlus (näiteks avade lõikamine) kontsentreeritud laserikiire energiat kasutades (vt Joonis 12.87). Laserikiirlõiketötlusel kasutatakse peamiselt süsihappegaaslasereid ja pooljuhtlasereid. Laserlõiketöötlemisel koherentne valguskiir on kontsentreeritud optiliselt (kiire läbimõõt on 5...25 µm), samuti ajaliselt – laserikiire pulseerimise tulemusena toimub töödeldava materjali sulamine ja aurustumine.



Joonis 12.87. Laserlõiketöötlus

Laserikiirlõiketöötlust kasutatakse väikeste avade ja soonte sisselõikamisel ning materjali tükeldamisel. Sobiv eelkõige õhukeste toorikute, milliste töötlemine mehaaniliste meetoditega ei ole lõikejõudude tõttu võimalik, töötlemisel. Võimalik on saada avasid läbimõõduga, mis on samas suurusjärgus fokuseeritud laserikiire diameetriga. Suuremate avade lõikamisel (läbimõõt üle 0,5 mm) töödeldakse suunates laserikiirt mööda ava perimeetrit. Laserikiire suur energiatihedus võimaldab saada suure sügavuse ja läbimõõdu suhtega (10:1 ja enam) avasid ja sisselõikeid.

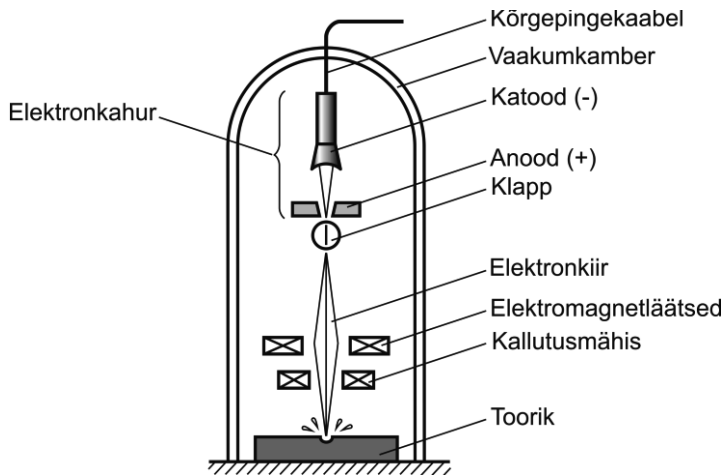
Laserlõiketöötlus võimaldab töödelda põhimõtteliselt kõiki materjale – metallid, keraamika, klaas, plastid, kumm, riie, puit jne.

### Elektronkiirlõiketöötlus

Elektronkiirtöötlusel kasutatav nn elektronkahur genereerib ja kiirendab elektronide voo kiiruseni umbes 75 % valguse kiirusest. Elektronkiir fokuseeritakse töödeldavale pinnale, kasutades elektromagnetilisi läätsi, suure energiatihedusega punktiks läbimõduga 10...25  $\mu\text{m}$  (vt Joonis 12.88). Pinnaga põrkudes elektronide kineetiline energia muundub termiliseks energiaks, mis sulatab või aurustab töödeldava materjali lokaliseeritud alas.

Elektronkiirt kasutatakse samuti kui laserkiirt mitmel otstarbel – elektronkiirkeevitamisel, elektronkiirjootmisel, elektronkiirpindamisel, metallide rafineerival elektronkiirümbersulatusel, elektronkiirkarastusel ja elektronkiirlõiketöötlemisel.

**Elektronkiirlõiketöötlus** (*electron-beam machining*) on materjalide lõiketöötlus (näiteks avade lõikamine), kasutades sulatavat ja aurustavat kontsentreeritud elektronkiirt (vt Joonis 12.88). Erinevalt laserlõiketöötlustest toimub elektronkiirega töötlus vaakumis.



**Joonis 12.88.** Elektronkiirlõiketöötlus

Elektronkiirlõiketöötlust kasutatakse täppistöötlemisel – väikeste avade (läbimõduga suurusjärgus 10...50  $\mu\text{m}$ ) lõikamiseks, kitsaste sisselõigete (laiusega suurusjärgus 20  $\mu\text{m}$ ) tegemiseks jms. Kasutatakse valdavalt õhukeste materjalide (paksusega 0,25...6 mm) lõikamiseks. Eriti sobiv väga õhukeste toorikute, milliseid mehaaniliste meetoditega lõigata ei ole võimalik, töötlemisel. Elektronkiire suur energiatihedus

võimaldab saada väga suure paksuse ja läbimõõdu suhtega (üle 100:1) avasid ja sisselõikeid. Töödelda saab põhimõtteliselt kõiki materjale.

#### 12.11.4. Keemiline töötlus

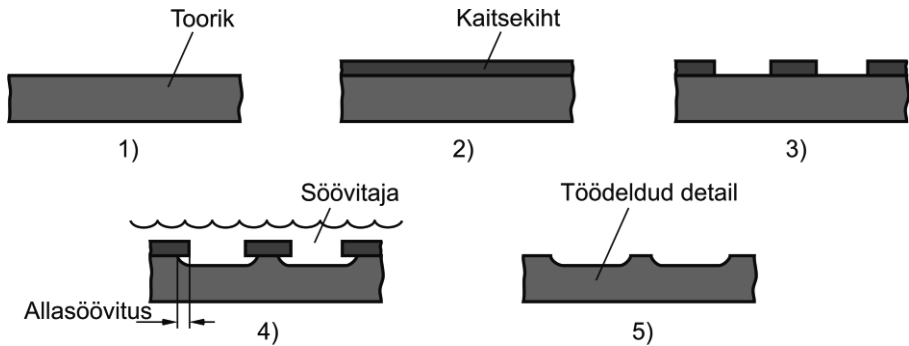
**Keemilisel töötlusel** (*chemical machining*) eemaldatakse materjali toorikult keemilisel teel **söövitajat** (*etchant*) kasutades. Materjali keemiliste eemaldusviisidena on tuntud keemiline freesimine, keemiline väljalõikus, keemiline graveerimine jt. Materjali eemaldusmehhanism on kõikide meetodite puhul ühesugune – söövitamine.

Keemilisel töötlusprotsessil on neli järgmist etappi (operatsiooni):

1. **Puhastus.** Töödeldavate pindade söövitamisele eelnev puhastus saasteainetest (nt rasvad) on vajalik tooriku pinna ettevalmistamiseks kaitsekihi pealekandmiseks ja söövituse ühtluse tagamiseks.
2. **Söövitusvastase kaitsekihi pealekandmine.** Valikulise söövituse tagamiseks kantakse tooriku pinna piirkondadesse, millistelt materjali ei tohiks eemaldada, söövituskindel **kaitsekiht** (*resist, maskant*).
3. **Söövitus.** Töötamise selles etapis toimub materjali eemaldamine (söövitamine) tooriku piirkondadest, mis ei ole korrosioonikindla kaitsekihiga kaetud. Söövitatakse igale töödeldavale materjalile sobivas söövitajas. Näiteks alumiiniumisulamite puhul on söövitajaks  $\text{FeCl}_3$  või  $\text{NaOH}$ , magneesiumisulamite puhul  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , süsinikteraste puhul  $\text{HCl} + \text{HNO}_3$  jne. Pärast sobiva paksusega materjalikihi eemaldamist lõpetatakse söövitus pesemisega.
4. **Kaitsekihi eemaldus** (*demasking*). Toimub pärast söövitamisele järgnevat pesemist.

Suurim erisus erinevate keemiliste töötlusviiside vahel on kaitsekihi pealekandmise tehnoloogia. Kaitsekihina kasutatakse mitmesuguseid vastava söövitaja suhtes resistentseid polümeere, mis kantakse tooriku pinnale kolmel erineval meetodil: (1) **lõikamis-koorimismeetod** (*cut and peel method*), mis seisneb polümeerse kaitsva kihi pealekandmises (pihustades, sukeldades, pintseldades), millele pärast polümeeri-seerimist järgneb kaitsekihi eemaldus piirkondadest, mis allutatakse söövitamisele; (2) **sõeltrüki** ehk **siidtrüki meetod** (*screen resist method, screen printing method*), mis seisneb kaitsekihi toorikule kandmises läbi roostevabast terasest või siidist sobivates kohtades olevate avadega võrgu (šabloon); (3) **fotograafiline meetod** (*photoresist method, photographic resist method*), kus rakendatakse fotograafiast tuntud valgustamist ja ilmutamist, moodustamaks toote pinnale soovitava profiiliga kaitsekiht. Meetod eeldab valgustundliku kihi kasutamist, mille läbi negatiivi ultraviolettkiirgusega töötlusel eemaldatakse kaitsev polümeer söövitusele allutatavatest piirkondadest.

**Keemiline freesimine** (*chemical milling*) seisneb materjalikihi eemaldamises mitte mehaanilisel teel nagu tavapärasel freesimisel, vaid keemiliselt, söovitades (vt Joonis 12.89).



**Joonis 12.89.** Keemiline freesimine: 1 – pinna puhastus; 2 – kaitsekihi pealekandmine; 3 – kaitsekihi kohtemaldus söövitatavatest piirkondadest; 4 – söövitus; 5 – söövitageja ja kaitsekihi eemaldus

**Keemiline väljalõik** (*chemical blanking*) seisneb materjalikihi toorikult kohtemaldamises kahelt poolt söovitades. Väljalõigatavaks tooteks on tooriku kaitsekihiga kaitstud osad. **Keemiline graveerimine** (*chemical engraving*) on keemiline töötlus eesmärgiga moodustada töödeldava tooriku ühele poolele soovitatav reljeef. Graveerida saab ka mehaanilist abrasiivtööriista kasutades. Erisuseks on, et keemilisel graveerimisel puuduvad tooriku pinnaolekut muutvad lõikejõud ja meetod võimaldab saada nii süviste kui ka kõrgendikega pinnareljeefi, muutes kaitsekihi mustrit.

Keemilist töötlust kaitsekihi pealekandmisel fotograafilisel meetodil nimetatakse **fotokeemiliseks töötluks** (*photochemical machining*) nii fotokeemilisel freesimisel kui ka fotokeemilisel väljalõikusel. Fotokeemilisi töötlusviisi kasutatakse juhul, kui soovitatav pinnareljeef peab olema suure täpsusega ( $\pm 0,01$  mm).

Keemiline töötlus leidis esmaselt ja leiab ka praegu laialdast kasutamist lennukitööstuses, näiteks materjalikihtide eemaldamiseks lennukitiibade suurtelt pindadelt. Laialdaselt kasutatakse ka graveerimisel jms. Keemilise töötlu eelis tavapärase lõiketöötluksuga võrreldes on mehaanilise töötluksuga kaasnevate lõikejõudude puudumine, mis teeb selle sobivaks õhukeste toorikute töötlemisel. Eriti hästi sobib suurte pindade töötluksel (sest söövituskiirus ei olene töödeldava pinna pindalast). Töödelda saab põhimõtteliselt igasuguse kujuga igasugusest metallist toorikuid. Puuduseks on ohtlike kemikaalide kasutamine ja sellega seotud keskkonnoaohutus, samuti töötluksu suhteliselt väike kiirus (0,02...0,05 mm/min).

### 12.11.5. Töötlusviisi valik

Mittetraditsiooniliste töötlusviiside kasutusvaldkonnad on juhtumid, mil tavapärased mehaanilisi lõiketöötlusmeetodeid (freesimine, treimine, lihvimine jne) ei saa kasutada või on see raskendatud – keerulise geomeetriaga ja suurte mehaaniliste omadustega (kõvadus, tugevus jms) materjalidest tooted. Toorikute geomeetrilistest iseärasustest tulenevad valikud erinevate töötlusmeetodite vahel on Tabelis 12.7. Mitmed mittetraditsioonilised töötlusmeetodid on sobivad **mikrotöötluks** (*micromachining*), see tähendab materjali eemaldamist toorikute väga väikestest piirkondadest. Tabelis 12.8 on toodud soovitusd mittetraditsiooniliste töötlusviiside valikuks olenevalt töödeldavast materjalist (metallid, keraamika, klaas jms).

**Tabel 12.7.** Soovitusd töötlusmeetodi valikuks olenevalt tooriku geomeetriast

Geomeetria iseärasus	Soovitatav töötlusviis
Väikese läbimõõduga (< 0,1 mm) avad	Elektronkiirlõiketöötlus, laserikiirlõiketöötlus
Suure sügavuse ja läbimõõdu suhtega (H/D > 20) avad	Elektrokeemiline töötlus, elektroerosioontöötlus
Ebakorrapärase (mitteümara) ristlõikega avad	Elektroerosioontöötlus, elektrokeemiline töötlus
Kitsad, sh kõverjoonelised sisselõiked	Elektronkiirlõiketöötlus, laserikiirlõiketöötlus, veejugatöötlus, abrasiivveejugatöötlus, traatelektroerosioontöötlus
Mikrotöötlus (materjali eemaldus tooriku väikestest piirkondadest)	Fotokeemiline töötlus, laserikiirlõiketöötlus, elektronkiirlõiketöötlus
Väikese sügavusega süvendid, sh pinna keeruline reljeef tasapinnalisel toorikul	Keemiline töötlus
Tööriistavagude (sisemiste õõnsuste) sisselõikus	Mahtelektroerosioontöötlus, elektrokeemiline töötlus

**Tabel 12.8.** Soovitusd töötlusmeetodi valikuks olenevalt tooriku materjalist

Töödeldav materjal	Mittetraditsioonilised töötlusmeetodid							Tavalõike-töötlusmeetodid	
	Mehaanilised		Elektro-keemilised	Termilised			Keemilised	Freesimine	Lihvimine
	Ultraheli-töötlus	Veejuga-töötlus	Elektro-keemiline töötlus	Elektro-erosioontöötlus	Elektron-kiirtöötlus	Laser-töötlus	Keemiline töötlus		
Alumiinium	C	C	B	B	B	B	A	A	A
Teras	B	D	A	A	B	B	A	A	A
Supersulam	C	D	A	A	B	B	B	B	B
Keraamika	A	D	D	D	A	A	C	D	C
Klaas	A	D	D	D	B	B	B	D	C
Plast	B	B	D	D	B	B	C	B	C
Papp	D	A	D	D	–	–	D	D	D
Tekstiil (sh nahk)	D	A	D	D	–	–	D	D	D

Töödeldavus: A – hea; B – rahuldav; C – halb; D – puudub (mittekasutatav töötlusmeetod)

## 12.12. KORDAMISKÜSIMUSED

### Lõiketöötluste alused

1. Millised on lõiketöötluste eelised teiste valmistusprotsesside ees?
2. Millised on lõikeprotsesside kolm põhitüüpi?
3. Millised on lõiketöötlemise lõikerežiimi parameetrid?
4. Mis tingimustel tekib volav laast ja miks selline laastutüüp võib tekitada probleeme?
5. Kuidas mõjutab terikukasvaja lõiketöötlemise täpsust ja pinna kvaliteeti?
6. Kirjeldage lõikeprotsessis toorikule ja lõikeriistale mõjuvaid jõudusid ja milline neist on neist kõige suurem?
7. Kuidas alandatakse teriklõikamisel lõiketemperatuuri?
8. Mille poolest erineb koorivtöötlemine siluvtöötlemisest?

### Lõikeriistad

1. Loetlege enim levinud ükserservlõikureid ja nende geomeetria elemente.
2. Loetlege enim kasutatavaid mitmikservlõikureid ja nendega teostatavaid operatsioone.
3. Kirjeldage keerdpuuri ehitust ja lõikeprotsessi iseärasusi, nt võrreldes treimisega.
4. Mille poolest erineb silinderfrees laupfreesist ja milliste pindade töötlemiseks neid kasutatakse?
5. Loetlege nõuded lõikeriistade terikumaterjalidele.
6. Millise kriteeriumi abil saab hinnata lõikeriista kulumist ja tema seost püsivusajaga?
7. Millist seost kirjeldab lõiketöötlusel *Taylori* valem ja milline on tema praktiline kasutus?
8. Selgitage materjalide lõiketöödeldavuse olemust.
9. Mille poolest erinevad kiirlõiketerasest lõikeriistad kõvasulamist lõikeplaadiga varustatud lõikeriistadest?
10. Millise eesmärgiga kantakse lõikeriistade terikutele pinded ja tooge näiteid enim levinud pinnetest?

### Treimine

1. Loetlege treipinkides teostatavad peamised treimisoperatsioonid.
2. Loetlege universaaltreipingi põhiosad.
3. Mida iseloomustab treipingi tehniline karakteristik – tsentrite kõrgus?
4. Kuidas kinnitatakse silindrilisi toorikuid treipinki?
5. Kirjeldage revolvertreipingi, poolautomaattreipingi ja automaattreipingi erinevust universaaltreipingist.
6. Milliseid pindu ja milliste lõikeriistadega töödeldakse sisetreimisel?

7. Kirjeldage vertikaaltreipingi tööpõhimõtet ja teostatavaid töötlusoperatsioone.
8. Milliste lõikeparameetrite muutmisega on võimalik lühendada töötlusaega pikitreimisel? Millised on kriteeriumid nende parameetrite määramiseks?
9. Kirjeldage liikumisi lõikeprotsessis ja lõikeriistu treimise mahalõikeoperatsioonil.
10. Esitage valem lõikekiiruse määramiseks treimisel. Kuidas määratakse lõikekiirus mahalõikamisel?
11. Kirjeldage kopeertreimise erinevust pikitreimisest.

### **Puurimine**

1. Loetlege peamised avalõikeoperatsioonid.
2. Miks kasutatakse hõõritsemist ja mille poolest erineb hõõrits keerdpuurist?
3. Milliseid operatsioone saab teha puurpinkidel?
4. Kirjeldage vertikaalpuurpingi ehitust ja kuidas tagatakse puuritava ava ja puuri samatelgsus?
5. Miks kasutatakse suurtesse ja rasketesse toorikutesse avade puurimiseks radiaalpuurpinkid? Kuidas ühildatakse puuritava ava ja puuri teljed?
6. Millised on liikumised ja lõikeparameetrid puurimisel?
7. Kirjeldage ava valmistamist püssipuuriga.
8. Mis eesmärgil ja millise lõikuriga puuritakse tsentriavasid?

### **Freesimine**

1. Loetlege freesimise lõikeparameetrid.
2. Kirjeldage silinderfreesimist (perifeerfreesimist) ja kasutatavaid lõikeriistu.
3. Kirjeldage laupfreesimist ja kasutatavaid lõikeriistu.
4. Missuguseid freese ja freespinke kasutatakse soonte valmistamiseks?
5. Kirjeldage taskufreesimist, liikumisi lõikeprotsessis ja kasutatavaid lõikeriistu.
6. Mille poolest erineb päriefreesimine vastufreesimisest? Millist neist kasutatakse valandite lõiketöötlemisel?
7. Mille poolest erineb horisontaalfreespink vertikaalfreespingist? Milliseid freese nendes freespinkides kasutatakse?
8. Mille poolest erineb konsoolfreespink konsoolita freespingist? Kumba kasutatakse raskete toorikute töötlemisel?
9. Kirjeldage dupleksfreespingi tööd.

### **Hööveldus**

1. Milliseid pindu saab töödelda hööveldamisega? Lõikeprotsessi iseärasused võrreldes freesimisega kui pideva lõiketöötlusprotsessiga?
2. Mille poolest erineb pikihööveldamine püsthööveldamisest ja risthööveldamisest?
3. Kirjeldage liikumisi ja lõikerežiimi parameetreid hööveldamisel.



4. Miks on hõõveldus katkendlõikamine? Kuidas see mõjutab tootlikkust ja lõikeriista püsivusaega?

### **Kammtöötlus**

1. Kirjeldage kammlõikuri ehitust ja liikumisi kammlõikusel.
2. Loetlege kammlõikuse kasutusala, eelised ja puudused.
3. Kirjeldage ava kammlõikust: lõikeriist, liikumised lõikeprotsessis, lõikepink, protsessi tootlikkus ja täpsus.
4. Miks kasutatakse kammlõikust peamiselt hulgi- ja seeriatootmises, harvemini üksiktootmises?

### **Keermestus**

1. Kirjeldage, milliste meetoditega, lõikeriistade ja lõikepinkidega lõigatakse suuremat (sammuga 12 mm ja enam) väliskeeret.
2. Kirjeldage väiksema, sammuga kuni 2 mm, väliskeerme valmistamist.
3. Kirjeldage sisekerme lõikamise meetodeid, lõikeriistu ja kasutatavaid lõikepinke.
4. Mis on keermefreesimise ja keermelihvimise kasutusala?

### **Hambalõikus**

1. Kirjeldage hambalõikuse kopeerimeetodi olemust, kasutatavaid lõikeriistu ja lõikepinke.
2. Kirjeldage silinderhammasratta lõikamist rullumismeetodil hammasrataslõikuriga. Millist tööpinkki hambalõikamisel kasutatakse?
3. Loetlege hambalõikamise kopeerimeetodi – hambafreesimise – eelised ja puudused. Miks kasutatakse hambafreesimist reeglina üksiktootmises ja seadmete remondil, kuid mitte näiteks autotööstuses?
4. Kirjeldage ketasmoodulfreesiga hambalõikamisel tooriku ülesseadmist, kasutatavat lõikepinkki, rakiseid ja liikumisi lõikeprotsessis.
5. Millised on hambalõikuse hulgitootmisprotsessid?
6. Millised on hammasrataste viimistlusprotsessid.

### **Lihvimine ja muud abrasiivtöötlusprotsessid**

1. Mis on abrasiivtöötlusmeetodite tehniline ja majanduslik olulisus?
2. Millised on lihvketta viis olulisemat parameetrit?
3. Millised on olulisemad lihvketastes kasutatavad abrasiivmaterjalid?
4. Millised on lihvketaste valmistamisel kasutatavad sideained?
5. Mida iseloomustab lihvketta kõvadusaste?
6. Mis iseloomustab lihvketta struktuuri?
7. Millised on peamiselt lihvimismeetodid?
8. Millised on lihvketta kolm peamist kulumismehhanismi?
9. Miks ja kuidas lihvkettaid teritatakse ning rihitakse?

10. Millise abrasiiviga lihvketaid kasutatakse suure kõvadusega keraamikast või kõvasulamitest lõikeriistade teritamiseks?
11. Mis on tsentriteta lihvimine?
12. Mis on roomelihvimine ja mille poolest erineb see tavapärasest lihvimisest?
13. Nimetage olulisemad abrasiivtötlusmeetodid, mis võimaldavad saavutada lihvimisega võrreldes veelgi parema pinnakvaliteedi?

### **Mittetraditsioonilised tötlusmeetodid**

1. Millised on mittetraditsiooniliste tötlusmeetodite neli materjali eemaldamisel kasutatud energia liigil põhinevat gruppi?
2. Milline on ultrahelitötluse põhimõte?
3. Kirjeldage veejugatötluse põhimõtet.
4. Millised on veejugatötluse, abrasiiv-veejugatötluse ja abrasiivjugatötluse erisused?
5. Millised on peamised elektrokeemilise tötluse rakendused (meetodid)?
6. Millised on elektrokeemilise tötluse peamised eelised tavapärase lõiketötlusega võrreldes?
7. Kuidas voolutugevus elektroerosioontötlusel mõjutab tötluskiirust ja töödeldud pinna kvaliteeti?
8. Mille poolest eristuvad mahtelektroerosioontötlus ja traatelektroerosioontötlus?
9. Millised on keemilise tötluse neli etappi?
10. Millised on keemilisel tötlusel kasutatava söövitusvastase kaitsekihi pealekandmise peamised meetodid?

## 13. PINNATEHNIKA

13.1. PIND JA PINNAOMADUSED	
13.2. PINNAPUHAUSTUS	
13.2.1. Mehaaniline puhastus	
13.2.2. Keemiline puhastus	
13.3. VÄRVIMINE	
13.3.1. Värvipinded	
13.3.2. Emailpinded	
13.4. PINDAMINE	
13.4.1. Keemiline pindamine	
13.4.2. Elektrokeemiline pindamine	
	13.4.3. Kuumsukelpindamine
	13.4.4. Termopindamine
	Pihustuspindamine
	Sulatuspindamine
	13.4.5. Aursadestuspindamine
	Füüsikaline aursadestus
	Keemiline aursadestus
	13.4.6. Mehaaniline pindamine
	13.5. KORDAMISKÜSIMUSED

### 13.1. PIND JA PINNAOMADUSED

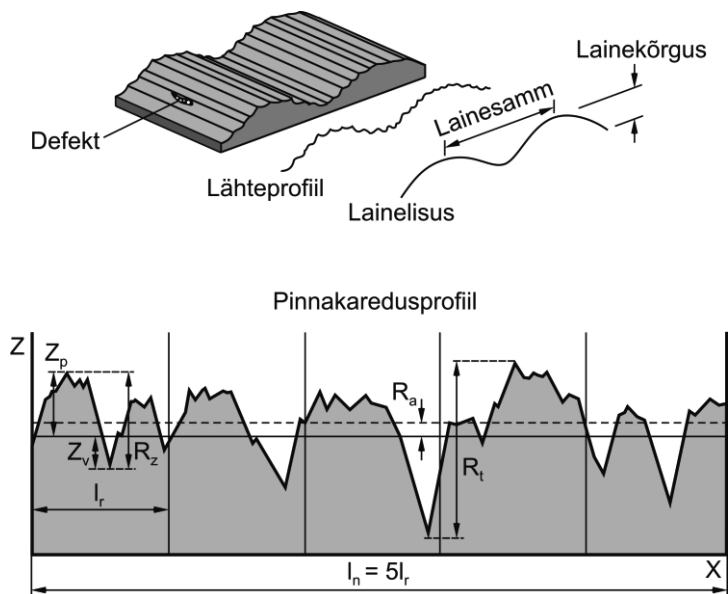
#### Pinna terviklikkus

Detaili/toote pind oleneb eelkõige tootmisprotsessist – töödeldavast detailist, tööpingist, tööriistast, keskkonnast ja töötlemisparameetritest, pinnaomadused aga omakorda kõigist neid mõjuritest. Töötlemise käigus leiavad aset

- töödeldava detaili kuumenemine;
- töödeldava materjali plastne deformatsioon (jäähpinged);
- pinnageomeetria muutus (karedus, lainelisus, praod, kõverdumine);
- keemilised reaktsioonid, eelkõige tööriista ja töödeldava materjali vahel.

Pinnaomadused sisaldavad kahte aspekti: pinna topograafiaga seotut ja pinnakihi omadusi.

Topograafia all peetakse silmas pinnakaredust, lainelisust, kujuhälveid ja pinna-defekte (vt Joonis 13.1). Tüüpiline pinnakareduse profiil sisaldab tippe ja süvendeid, mis omakorda moodustavad lainelisuse. Pinnadefektid lisanduvad pinna tekstuuri, kuid neid mõõdetakse eraldi. Töötlemise tulemusena muutusteks pinnakihis on plastne deformatsioon, jääkpinged, praod ja muud metallurgilised muutused (rekristallisatsioon, faasimuutused, vananemine, teradevaheline toime, vesinikhaprus). Pinnadefektideks võivad olla ka tööstlusest tingitud kohalikud plastsed deformatsioonid.



**Joonis 13.1.** Pinna ja karedusprofiil: profiilikõrgus  $R_t$  lähtepikkusel  $l_n$ ,  $R_z$  – lähtepikkusel  $l_r$ ; profiilikoordinaatide (tippkõrguste  $Z_p$  ja -sügavuste  $Z_v$ ), aritmeetiline keskmine  $R_a$  – lähtepikkusel  $l_r$

### Pinnaomadused ja toote kasutusomadused

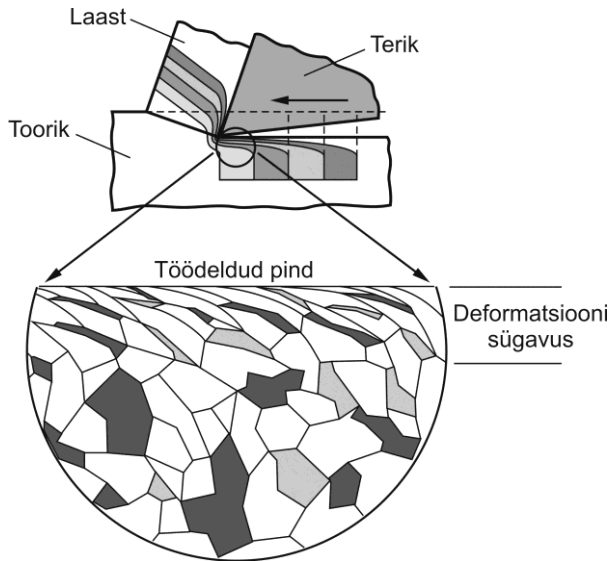
Toote rahuldavad kasutusomadused olenevad eelkõige heast disainist, kvaliteetsetest valmistustehnoloogiatest (sh pinnatöötlus) ja lihtsast montaažist.

Erinevad töötlemismeetodid annavad eri pinnatekstuurid (karedus, lainelisus, ebataasused). Lisaks põhjustavad erinevad töötlemisprotsessid pinnal või pinna läheduses keemiliste, füüsikaliste, mehaaniliste ja metallurgiliste omaduste muutusi. Enamikul juhtudel piirduvad muutused pinnakihis 0,1 kuni 2 mm, mille mõju võib olla kasulik või kahjulik olenevalt töötlemismeetodist, materjalist ja toote otstarbest. Joonisel 13.2 on esitatud erinevate töötlemisprotsessidega saadavad pinnakaredused, mida peab silmas pidama nii toote konstrueerimisel, valmistamisel kui ka eksploatatsioonis.

Töötlemisprotsessidest (laastuga või laastuta) põhjustatud plastset deformatsiooni pinnakihis iseloomustab Joonis 13.3. Töödeldava materjali eemaldamise tulemusena jäävad pinnakihti reeglina tõmbepinged, mikropraod ja lähtematerjalist erinev kõvadus. Siinjuures „kahjustatud pinnakihi“ paksus/sügavus oleneb tööriista geometriast ja töötlemisparameetritest (eelkõige kiirusest).

Protsess	Pinnakareduse $R_z$ vahemik, $\mu\text{m}$									
	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,80	0,40	0,20	0,10	0,05
Gaaslõikus Jämelihvimine Saagimine	■	■								
Puurimine Elektroerosioonöötlus Freesimine			■	■	■					
Hõõritsemine Treimine Trummeldus				■	■	■				
Elektrokeemiline lihvimine Lihvimine Hoonimine					■	■	■	■		
Elektropoleerimine Poleerimine Soveldamine							■	■	■	■
Liivvormvalu Kuumvaltsimine Sepistamine Püsivormvalu	■	■	■		■					
Sulavmudeltäppisvalu Ekstrusioon Külmvaltsimine Survevalu				■	■	■	■			

Joonis 13.2. Erinevate töötlusprotsessidega saadavad pinnakaredused



Joonis 13.3. Lõiketöötlemisest põhjustatud pinnakihi plastne deformatsioon

Selles peatükis vaadeldakse pinnatööstlustest pinna puhastust, värvimist ja mitmeid pindamismeetodeid. Samas mitmed analoogse mõjuga pinnatehnoloogiad on esitatud õpiku teistes osades (4. peatükis): pindkarastus, termokeemiline tööstlus (tsementiitmine, mitiitimine, nitrotsementiitmine, pinnakihi rikastamine metallidega) jt.

## 13.2. PINNAPUHASTUS

### 13.2.1. Mehaaniline puhastus

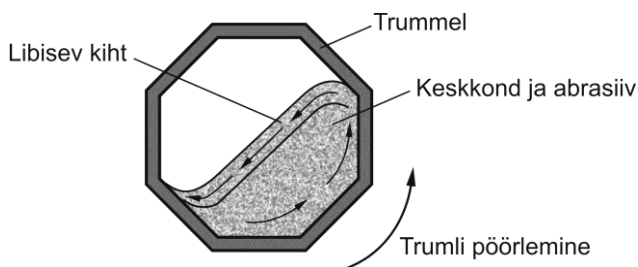
#### Jugatöötlus

On tavapärase, et mitmesuguste valmistusprotsesside käigus moodustuvad pinnale erinevad saasted. Olgu see siis liiv liivvormvalandite pinnal, erineva termomõju tulemusena moodustunud tagi (metallioksiidid) või muud pinnale kleepunud osakesed. Need tuleb pinnalt eemaldada enne dekoratiivsete või kaitsvate pinnete pealekandmist. Enam levinud mooduseks on **jugatöötlus** (*blast treatment*): **liivjuga-töötlus** (*sand blasting*) või **haaveljugatöötlus** (*shot blasting*), mille korral abrasiivsed osakesed suunatakse suure kiirusega mehaaniliselt või õhu abil läbi düüsi detaili/toote pinnale. Õhurõhk on piires 400...600 kPa terase ja malmi, 60...400 kPa mitterauasulamite korral; osakeste kiirus kuni 400 m/s.,

#### Trummeldus

**Trummeldamine** (*tumbling, barrel finishing*) on sobiv viimistlusmeetod väikeste detailide ja suurte koguste korral. Meetodit kasutatakse kraatide eemaldamiseks, servade ümardamiseks, rooste või tagi eemaldamiseks, pinna poleerimiseks, valgendamiseks või kalestamiseks, valmistamiseks pinda ette enne lõppviimistlust või koostamist. Trummeldamisel kasutatakse erineva kujuga (heksagonaal- või ortogonaalristlõikega) horisontaalteljelisi mahuteid, milles detaile „segatakse“ mahutis pöörlemissagedusega 10...50 l/min. Trummeldamiseks laaditakse mahutisse teatud tasemeni detailid kas lisandite (liiv, graniitkillustik, keraamilised graanulid) kasutamise või ilma.

Joonisel 13.4 on esitatud trummelduskeskkonna (detailid + abrasiiv) nn pinnalibisemine, mis tagab abrasiivlõikamise tulemusena pinnakonaruste, rooste ja tagi eemaldamise, servade ümardamise. Abrasiivi mõju ilmneb ainult väikeste jõudude ja kiiruste korral. Suurtel kiirustel ja tsentrifugaaljõudude toimele vastavat abrasiivlõikamist aset ei leia. Kasutatakse mitmesuguseid erineva osakeste kuju ja suurusega looduslikke ja tehisabrasiive. Lisaks abrasiividele võidakse kasutada mitmeid jahvatuskeskkondasid (vesi, söövitavad vesilahused). Sel puhul on tegemist **märgtrummeldamisega** (*wet tumbling*).



**Joonis 13.4.** Materjali liikumise skemaatiline kujutus trummelseadmes

## Vibratsioonitöötlus

**Vibratsioonitöötlus** (*vibratory finishing*) kasutatakse laialdaselt kraaditustamiseks, servade ümardamiseks, tagi eemaldamiseks, poleerimiseks, puhastamiseks ja peenviimistlemiseks. Erinevalt trummeldamisest viiakse vibratsioonitöötlamine läbi avatud mahutites. Võnkesagedus ja -amplituud valitakse vastavuses detaili suuruse, kuju, kaalu ja materjaliga.

Trummeldus- ja vibratsiooniprotsessid on lihtsad ja ökonoomsed ning võimaldavad töödelda suure hulga detaile partiide kaupa. Pehmetest mitterauasulameist detailide viimistlusaeg on lühike (ca 10 min), samas kõvemate teraste viimistlusaeg võib ulatuda paari tunnini. Sageli kasutatakse mitut operatsiooni, vähendades järjestikku abrasiivosakeste suurust. Vaatamata laialdasele kasutusele ja suurtele mahtudele, on eelnimetatud protsessid rohkem kunst kui teadus. Mõjureid on palju (detail, keskond, abrasiiv), mistõttu sageli valitakse neid proovimise meetodil.

## Abrasiivlinttöötlus

**Abrasiivlinttöötlusel** (*belt sanding*) hoitakse detaili vastu abrasiivlinti, kuni vajalik pinnaviimistlus on saavutatud. Seda võib vaadelda kui pinna lihvimisprotsessi (vt samuti p 12.10.3. Lihvimismeetodid ja lihvpingid). Tingituna abrasiivlinde liikumisest on viimistlevale pinnale omased paralleelsed kriiped, mis olenevad abrasiivlinde tera suurusest. Sileda pinna saamiseks kasutatakse järjestikku erineva abrasiivosakese suurusega linte. Abrasiivlinttöötlus on sageli käsitöötlus, mistõttu ka väga töömahukas. Samuti on meetod raskesti kasutatav teravaservaliste detailide korral.

## Poleerimine

**Poleerimine** (*polishing*) on operatsioon, mille korral pöörleva kangas- või viltkettaga kontaktis oleva detaili ja lisatud peene abrasiivi toimele leiab aset pinnaviimistlus. Poleerimise tulemusena eemaldatakse detaililt väga vähesel määral metalli – kõrvalduvad peened kriimud, oksiidikiht. Tulemuseks on tasane peegelpind. Nii nagu abrasiivlinttöötlus, on ka poleerimine eelkõige käsiprotsess ja töömahukas. Kasutatakse ka poolautomaatset poleerimist, kus detail kinnitatakse vastavasse rakisesse (vt samuti p 12.10.4. Muud abrasiivtöötlusmeetodid).

## **Elektropoleerimine**

**Elektropoleerimine** (*electropolishing*) on vastupidine protsess elektrokeemilisele pindamisele (on juttu selle peatüki p 13.4.1), kus materjali eemaldamine pinnalt on analoogne selle sinna sadestamisega. Alalisvoolu-elektropoleerimisseadmes on detail anoodiks. Elektrivoolu rakendamisel eraldub materjal pinnalt, eelistatumalt kõrgematelt pinnakonarustelt. Majanduslikult pole otstarbekas rohkem kui 2...3 µm eemaldamine mis tahes pinnalt. Suhteliselt sileda lähtepinna korral on tulemuseks peegelpind. Algselt kasutati elektropoleerimist metallograafias mikrolihvide valmistamiseks. Hiljem hakati kasutama roostevaba teraslehtede ja teiste toodete poleerimiseks. Kasutatakse eelkõige keeruka kujuga detailide korral, kus abrasiivpoleerimine on raskendatud.

### **13.2.2. Keemiline puhastus**

Keemilised puhastusprotsessid on tõhusad õli, mustuse, tagi ja muu võõrmaterjali eemaldamiseks toote pinnalt, mis on vajalik järgnevalks värvimiseks või pindamiseks. Keskkonna-, tervishoiu- ja ohutusnõuetest tulenevalt on paljud varem kasutatud tööstuslikud protsessid täna keelatud või modifitseeritud. Olgu need mehaanilised meetodid, millega käib kaasas lenduv tolm või keemilised meetodid, millega omakorda kaasnevad ohtlikud mürgised või mittekeskkonnasõbralikud saasted.

#### **Leelispuhastus**

**Leelispuhastuse** (*alkaline cleaning*) viisiks on põhiliselt „seep-vesi“, mida kasutatakse metalltoodetelt väga mitmesuguse saaste (sh õli, määrded, vaha, metallitolm ja mustus) kõrvaldamiseks. Puhastusaineteks on tavaliselt aluseliste soolade, lisandite ja pindaktiivsete ainete või seebi komplekslahused, mis vähendavad pindpinevust, emulgeeruvad, dispergeeruvad ja eemaldavad saaste. Tegelik puhastus leiab aset ühe või mitme järgnevalt nimetatud mehhanismi järgi: 1) šamponiseerimine – rasva ja muu orgaanilise komponendi reageerimine aluseliste sooladega, 2) saaste eemaldamine pinnalt, 3) mittelahustuvate vedelike dispergeerumine või emulgeerumine, 4) metallioksiidide lahustumine.

Aluselisi puhastusaineid kantakse peale sukeldamise või pihustamise teel ja tavaliselt neid kuumutatakse puhastusefekti tõhustamiseks. Puhastamisele järgneb vesiloputamine puhastusjääkide ja muu jäänud saaste kõrvaldamiseks ja üldiselt ka kuivatamine, kuna ohtlikud puhastusained ei aurustu kiirelt ja mõned soodustavad korrodeerumist.

#### **Lahustipuhastus**

**Lahustipuhastuse** (*solvent cleaning*) korral kasutatakse õli, määrded, rasva jm pinnal oleva saaste eemaldamiseks nende lahustamist orgaaniliste lahustega, mis on saadud kivisöest või naftast (petrooleum, bensiin, mineraalsed piiritused, metüülkloriid, etü-



leen jt) või selliste vedelikega nagu atsetoon, benseen, toluool jt alkoholid. Väikesed detailid puhastatakse nende vedelikesse sukeldamise või pihustamise teel, suured detailid üldiselt pihustamise või pühkimise teel. Lahustiga puhastamine on atraktiivne nii suurte detailide korral kui ka toodete korral, mis on tundlikud nii temperatuuri ja aluseliste lahuste suhtes (näiteks alumiinium, plii ja tsink) kui ka orgaaniliste lisanditega toodete korral. Üldiselt on puhastatavad kõik metalltooted ja praktiliselt puuduvad piirangud detaili/toote suuruse ja kuju osas. Eemaldada pole võimalik lahustitega mittelahustuvaid saasteid, näiteks nagu metallioksiidid, liiv, jootmisel ja keevitamisel tekkinud anorgaanilised räbud.

### **Ultrahelipuhastus**

Väikeste detailide puhastamiseks kasutatakse hea tulemuse saavutamiseks **ultrahelipuhastust** (*ultrasonic cleaning*). Ultrahelipuhastusel paigutatakse detailid vastavasse võrkkorvi ja sukeldatakse puhastusvanni, eelkõige veebaasil lahustesse. Vannis on ultrahelimuundur, mis kasutatavatel sagedustel kutsub esile vedeliku kavitatsiooni. Moodustuvatel mullidel on aktiveeriv mõju puhastusele, mistõttu mustust eemaldub juba 1...3 min jooksul. Enamik süsteeme töötab sagedusel 10...40 kHz. Pidades silmas asjaolu, et kasutatakse vesilahuseid, asendab ultrahelipuhastus paljusid keskonnale ebasõbralikke lahustiga protsesse.

### **Aurrasvatus**

**Aurrasvatustamisel** ehk **aurrasvaärastusel** (*vapor degreasing*) kasutatakse klooreritud või fluoreeritud lahuseid õli, määrde ja vaha eemaldamiseks metalltoodete pinnalt. Mittesüttiv lahus, nagu triklooretüleen kuumutatakse keemistemperatuurini, detailid puhastatakse ja saasted eemaldatakse nende aurudega. Aur kondenseerub detaili pinnal ja peseb sealt lahustuvad saasted vedellahusesse. Siinjuures auruga rasvatustamine on tunduvalt efektiivsem kui külmlahustiga puhastus. Kuna puhastatav pind kuumeneb kondenseeruva auru toimel, peab järgnema aurukeskkonnast detaili eemaldamisele kuivatus.

Auruga puhastus on kiire ja paindlik protsess. Seda võib kasutada kõikide metalltoodete korral, aga ei sobi kummi, plastiku ja orgaaniliste materjalide korral (lahuste aurud rikuvad pinna). Peamiseks piiranguks on võimetus eemaldada mittelahustuvaid saasteid, mistõttu peab puhastusprotsessis kasutama ka teisi puhastusmeetodeid (mehaanilist ja keemilist puhastust jt).

### **Hapesõovitus**

**Hapesõovitus** (*acid pickling*) korral puhastatakse metalltooted algselt tahmast ja muust saastest, seejärel aga sukeldatakse happelisse lahusesse, eemaldamaks oksiide ja mustust, mis on jäänud pinnale eelnevatest töötlusoperatsioonidest. Kõige tavalise-

maks lahuseks on 10 % väävelhape lahus, vanni temperatuuriks 80...100 °C. Kasutatakse ka muraanhapet, kas külmalt või kuumalt.

Pärast söövituvannist väljavõtmist peab detaile pesema happejääkide eemaldamiseks pinnalt ja seejärel sukeldama aluselisse vanni vältimaks korrosiooni. Tuleb vältida ülesöövitamist, sest selletõttu suureneb pinnakaredus.

### 13.3. VÄRVIMINE

Värvid ja emailid on olnud pikka aega enam kasutatavamad pinnaviimistlusviisid, mis varieeruvad väga laias vahemikus olenevalt tootele esitatavatest nõuetest.

#### 13.3.1. Värvpinded

Enamik tänapäeva värve on sünteetilised orgaanilised ühendid, mis sisaldavad värvipigmente ja kuivavad polümeerisatsiooni või selle ja hapniku adsorptsiooni koosmõju tulemusena. Vesi on kõige tavalisem värvide pigmendikandja. Kuumuse toimel kuivavad nad kiiremini, kuid paljud sünteetilised värvid kuivavad vähem kui ühe tunni jooksul ilma kuumutamata. Varem kasutatud õli baasil värvid on tingituna pikast kuivamisajast ja keskkonnamõjudest kaotamas tööstuslikku tähtsust.

Värve kasutatakse väga mitmetel põhjustel, tavaliselt kaitseks ja dekoratiivsetel eesmärkidel, pinna ebatasasuste kõrvaldamiseks, pinna friksioonomaduste muutmiseks, aga ka pinna valgus-, soojus- või kiirgusomaduste muutmiseks.

Värvide enam kasutatavaks orgaanilisteks koostisosadeks on nitrotsellulooslakid (orgaanilistes lahustes lahustunud termoplastid), alküüdid, akrüülid (vajavad katalüsaatoreid või ahikuumutust) või asfaltvärvid (asfaldi lahus lahustites). Enam kasutatavateks on nitrotselluloosvärvid, autotööstuses akrüülvärvid, asfaltvärvid aga elektrotehnikatööstuses.

#### Värvimisviisid

Tööstuslikeks värvimismoodusteks on sissekastmine (sukeldamine), käsipihustus, automaatpihustus või elektrostaatiline värvimine. Kasutatakse mitmeid värvikihte: 1. kiht ehk kruntvärv tagab adhesiooni ning pinnasilenemise, tõstab korrosioonikindlust ja väldib lõppkihi pinnanihkeid. Need omadused on tagatud suurema pigmendikoguse kasutamisega võrreldes viimistleva kihiga lõppvärvuse ja väljanägemise andmiseks. Mitmekihiliste värvipinnete korral peetakse silmas, et lõppkiht ei mõjuks aluskihtidele.

**Sukelvärvimine** (*dipping*) on lihtsamaid ja ökonoomsemaid mooduseid detaili kogu pinna katmiseks. Sissekastmine toimub käsitsi või konveieril. Sobib hästi kruntimiseks ja väikeste detailide katmiseks. Ei sobi juhtudel, kui värvida on tarvis osa

pinda või saada õhukest ja ühtlast värvpinnet. Teiseks puuduseks on värvi voolamine, põhjustades lainelise pinna ja värvitilga alumises punktis.

**Pihustusvärvimine** (*spray painting*) on tõenäoliselt kõige laialdasemalt kasutatav värvimisviis selle universaalsuse ja ökonoomsuse tõttu. Tavavärvimisel värv pihustatakse ja kantakse pinnale suruõhu abil. Seejuures käsipihustus on universaalseim, aga tööjõumahukas ja aeganõudev. Samas nõuab meetod ka arvestatavaid oskusi ühtlase pinde saamiseks, samuti on paksemate värvpinnete saamiseks vaja mitmekordset värvimist vahepealse kihi kuivatamisega. Automaatpihustusvärvimine on eelkõige vajalik suurte koguste toodete värvimiseks. Lihtsaim automaatvärvimiseseade koosneb transportkonveierist ja reast statsionaarseist värvimispeadest. Puuduseks on suur värvikadu ja raske on saada ühtlast värvpinnet. Kasutatakse tööstuslikke roboteid, tagamaks pihusti liikumise, mis imiteerib selle liikumist käsivärvimisel. Robotvärvimine säästab inimest ebamugavast tööst, aga ka sageli tervistkahjustavast toimest.

**Elektrostaatilisel värvimisel** (*electrostatic painting*) kasutatakse nii käsi- kui ka automaatpihustusvärvimist. Värvitava detaili ja pihusti vahel rakendatakse alalisvool. Pihustatud värviosakesed omandavad sama laengu, mis pihusti. Vastupidise laenguga detail tõmbab ligi värvipiisku – nende liikumine on kombinatsioon kineetilisest ja elektrostaatilisest trajektoorist. Mida kõrgem on pinge, seda suurem on elektrostaatiline toime. On välditud ülepihustust enam kui 60...80 % ulatuses. Puuduseks on detaili servadel paksema pinde moodustumine võrreldes tasapinnalise osaga. Vaatamata nimetatud puudusele on elektrostaatiline värvimine väga soositud keeruka kujuga detailide värvimisel.

**Pulbervärvimine** (*powder painting*) on elektrostaatilise värvimise erim, kuid siin on värviosakesed pigem tahked kui vedelad. Eri värvikihid, nagu krunt ja viimistluskiht, kuumutatakse ühe kuumutuse käigus erinevalt iga värvikihi järgesest kuumutamisest tavapihustamise korral. Lisaks kogutakse möödapihustatud pulber ja taaskasutatakse.

Nüüdisaegne pulbervärvimise tehnoloogia võimaldab saada kvaliteetseid suurepärase pinnaomadustega väiksema maksumusega pindeid võrreldes vedelvärvimisega. Pulbervärvimise majanduslikud eelised kaaluvad üle selle piirangud: protsess pole kõige sobilikum suurte või temperatuuritundlike toodete korral. Samuti pole võimalik saada õhukesi pindeid (alla 0,03 mm). Tabelis 13.1 on esitatud pulbervärvimisel plastidest enam kasutatavate termoreaktiivpulbritest pinnete omadused ja kasutus.

**Tabel 13.1.** Erinevate pulbervärvipinnete omadused ja kasutus

Omadused	Epoksüvärvpinne	Epoksü-/polüestervärvpinne	Polüestervärvpinne	Polüuretaanvärvpinne	Akrüüüretaanvärvpinne
Paksus, mm	0,1...5 <sup>1)</sup>	0,1...2,5	0,1...2,5	0,1...2,5	0,1...2,5
Metalli temperatuur, °C	250 °C/3 min 150 °C/30 min	250 °C/3 min 180 °C/25min	220 °C/7 min 170 °C/ 20 min	220 °C/7 min 190 °C/17 min	220 °C/7 min 200 °C/ 25 min
Ilmastikukindlus	Kehv	Kehv	Väga hea	Väga hea	Suurepärane
Pliiatsikõvadus, HB	5H	2H	2H	3H	3H
Löögikindlus, <sup>2)</sup> N	300...600	300...600	300...600	300...600	100...250
Keemiline püsivus	Suurepärane	Väga hea	Hea	Hea	Väga hea
Suhteline hind	2	1 (kõige kallim)	3	4	5
Kasutus	Mööbel, autod, ahjud	Veesoojendid, radiaatorid, kontorimööbel	Arhitektuur-alumiinium, välismööbel, farmiseadmed	Rattaveljed, mänguväljakute seadmed	Pesumasinad, külmkapid, ahjud

<sup>1)</sup> Suurema paksusega pinned saadakse mitmekihilise või keevkihtvärvimisega

<sup>2)</sup> Pindepakuse 0,5 mm korral

Pulbervärvimisel tuleb arvestada mitmete aspektidega, milleks on:

- pihustuspüstoli tüüp ja arv (sõltub paljudest mõjuritest alates detaili suurusest, kogusest, liini kiirusest, pulbri tüübist),
- värvi muutmise aeg/sagedus,
- ohutus,
- kuumutusahju tüüp – pinnatud detailid pannakse ahju pulbri sulatamiseks, voolamiseks ja kuivamiseks.

### 13.3.2. Emailpinded

Metalltooteid võib katta ka mitmete klaasjate, anorgaaniliste materjalidega, mis tagavad korrosiooni- ja abrasiivkulumiskindluse, dekoratiivse (värvilise) väljanägemise, elektrisolatsiooni või kuumuskindluse. Seda protsessi nimetatakse **emailimiseks** (*porcelain enameling*) – keraamiliste pindmaterjalidega pindamistehnoloogiad ja -protsessid.

Emailimisprotsess koosneb järgmistest operatsioonidest: (a) pindmaterjali ettevalmistamine, (b) pindmaterjali pealekandmine, (c) kuivatamine (vajadusel) ja (d) kuumutamine. Pindmaterjali ettevalmistamine seisneb klaasja materjali pulbri või lobri saamises. Pealekandmine on analoogne orgaaniliste värvipinnete pealekandmisega: kuiva pulbri või lobri pealepihustamise, sissekastmise või muul teel. Kuumutamine toimub temperatuuril *ca* 800 °C (tegemist on paagutamise analoogse protsessiga), mille tulemusena saadakse mittepoorne email. Emailikihi paksus on piires 0,01 kuni

2 mm. Paksemate pinnete saamiseks korratakse emailimist mitu korda soovitud paksuse saamiseks. Emailimist kasutatakse väga mitmesuguste toodete korral, kaasa arvatud vannitoa sisseseade (vannid, kraanikausid), majapidamisseadmete (pesumasinad, veeboilerid, pliidid) korpused, köögitarbed, haigla sööginõud, autosummutid, reaktiivmootorite osad jt. Emailide koostis on erinev ja oleneb tootele esitatavatest nõuetest.

### 13.4. PINDAMINE

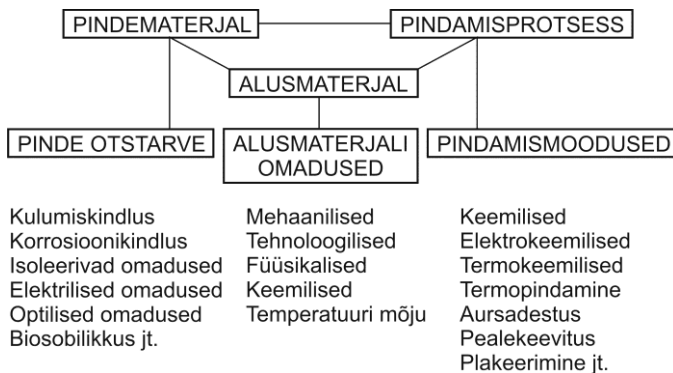
Paksude pinnete (paksusega alates 10 µm) ja õhukeste pinnete (paksus alla 10 µm) ja kilede (alla 1 µm) pealekandmiseks kasutatakse erinevaid protsesse, mille korral kantakse materjali kiht pinnale. Metallitooted kaetakse eelkõige galvaanamise, pihustamise ja aursadestamise teel.

Pinnete pealekandmise põhilisteks eesmärkideks on:

1. Tagada korrosioonikindlus.
2. Suurendada kulumiskindlust ja vähendada pinna hõõrdetegurit.
3. Anda tootele välimus (näiteks anda pinnale eriline värvus või tekstuur).
4. Suurendada elektrijuhtivust või elektritakistust.
5. Valmistada ette pind järgnevateks tööstusteks.
6. Taastada kulunud pindu.

Toote materjali (alusmaterjali) ja pindmaterjali ning pindamisprotsesside vahelised seosed on esitatud Joonisel 13.5. Saadavate pinnete omadused olenevad eelkõige pindmaterjalidest ja nende pealekandmiseks kasutatavatest pindamisprotsessidest.

Kaitsvate pinnete põhilisteks pealekandmise moodusteks on keemiline ja elektro-keemiline pindamine, kuumsukelpindamine, termopindamine, aursadestuspindamine ja ka mehaaniline pindamine.



**Joonis 13.5.** Pindmaterjali, pindamisprotsessi ja alusmaterjali seos pinde omaduste ja pindamismoodustega

### 13.4.1. Keemiline pindamine

#### Mittemetalsed pinded

**Keemilise pindamise** (*chemical plating*) korral kaetakse metalli pind mittemetalsete, mittejuhtivate pinnetega, mis tagab vastupanu reale mittesoovitavatele mõjudele. Enam populaarseteks pinneteks on oksiid-, kromaat- ja fosfaatpinded, aga ka pinna mustamine.

**Kromaatpindeid** (*chromate coatings*) on võimalik kasutada kõikide alumiiniumi-, magneesiumi-, tsingi- ja vasesulamite korral (aga ka kaadmiumi ja hõbeda korral), sukeldades neid keemilisse vanni. Metallipind kattub keeruka krooniülendiga, mis annab pinnavärvused alates heledast läbi sinise, kollase, pruuni, oliivroheline kuni mustani. Enamik saadavaid pindeid on pehmed ja geelitaolised, mis aga kõvenevad kuivamisel. Neid kasutatakse nii korrosioonikindluse tagamiseks, aluskihina värvpindadel kui ka eriliste pinna värvusvarjundite saamiseks värvlisandite pindesse lisamisel pehmes olekus.

**Fosfaatpinded** (*phosphate coatings*) moodustuvad metallide (tavaliselt teras või tsink) sukeldamisel vanni, milles metallifosfaadid (raua, tsingi- ja mangaanifosfaadid) on lahustunud fosforhappe lahustes. Saadud pindeid kasutatakse eelkõige värvpinnete aluspindena või vajaliku nakke tagamiseks kummi või plastikuga. Lisaks on fosfaatpinded suure karedusega, tagamaks suurepärase õlide või määrdeainete hoidmise pinnal. Näitena võib siinjuures tuua pindeid materjali vormitavuse parandamiseks või kinnitusvahendite ja -poltide korral, mille korrosioonikindlus tagatakse vaha või õliga immutatud fosfaatpindega.

**Mustamine** (*blackening*). Paljusid terasdetailide töödeldakse musta rauaoksiidpinde saamiseks, mis tagab särava, käsitlemisel mittekorrodeeruva pinna. Kuna sellised oksiidid moodustuvad kõrgendatud temperatuuridel, kuumutatakse detailide vastavas keskkonnas, mis sisaldavad süsinikku või spetsiaalseid mustavaid sooli. Erisooli kasutades on võimalik saada ka sinist või pruuni pinda (on kasutatavad ka tina, tsingi, alumiiniumi jt metallide ja sulamite korral).

#### Vooluta pindamine

Galvaanpindamisel on enamasti võimatu ühtlase paksusega pinde saamine juba mõõdukalt keerukate detailide korral; pindeid pole võimalik kanda voolu mittejuhtivatele materjalidele, samuti vajatakse palju energiat. Seetõttu on tehtud suuri jõupingutusi, vältimaks välisvooluallikat. Need meetodid on tuntud **vooluta pindamisena** (*electroless plating, autocatalytic plating*). Arvestatavaid tulemusi on saadud nikli korral, kuid ka vask- ja koobaltpindeid on võimalik peale kanda.

Vooluta pindamise korral kasutatakse keerukaid pindamislahuseid (sisaldavad metallisoolasid, taandavaid agente, kompleksagente, pH-regulaatoreid ja stabilisaatoreid),

mille tulemusena pinnatava detaili pind toimib katalüsaatorina või kuumeneb katalüsaatorite toimetel. Pindamislahuses olevad metalliioonid taandatakse metalliks ja sadestatakse pinnale. Kuna sadestamine on puhtalt keemiline protsess, on saadavad pinded ühtlase paksusega sõltumata detaili geometriast. Kahjuks on aga sadestuskiirus märgatavalt madalam võrreldes galvaanpindamisega. Populaarsem on vooluta nikeldamine, kusjuures sadestamiseks kasutatakse erinevaid lahuseid (nii aluselisi kui ka happelisi). Pinded on nii hea korrosioonikindluse kui ka kõvadusega (kõvadus vahemikus 50...55 HRC).

Vooluta pindamise moodus võimaldab peale kanda ka komposiitpindeid, mille korral koos metalliga (näiteks nikliga) sadestatakse ülipeeneid kõvamaterjali (teemant, räni-karbiid, alumiiniumoksiid) osakesi. Saadakse pinne, mille kõvafaasi hulk võib ulatuda kuni 50 %-ni; saadakse komposiitpinne, mille korrosioonikindlus on sama, mis nikkelpindel, kuid kõvafaasi tõttu on neil väga suur kõvadus ja kulumiskindlus. Vooluta pindamisega saadud komposiitpindeid kasutatakse näiteks plastsurvevaluvormide korral (polümeersed materjalid sisaldavad arvestataval määral abrasiiv-täiteaineid).

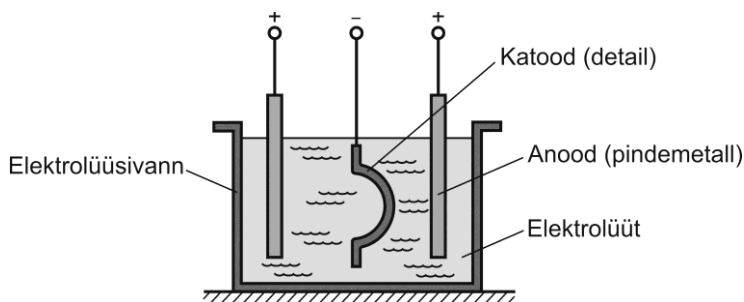
### 13.4.2. Elektrokeemiline pindamine

#### Galvaanpindamine

Suurtes kogustes metall- ja plastdetailidele kaetakse elektrokeemiliselt, saamaks metallpindeid, mis tagavad korrosiooni- või kulumiskindluse, parandavad väljanägemist (kas värvilised või säravad) või suurendavad mõõtmeid. Praktiliselt on kõik metallid ja metallisulamid (alumiinium, vask, messing, teras ja tsingisulameist survevalandid) elektrokeemiliselt pinnatavad.

Joonisel 13.6 on tüüpiline **galvaanpindamise** ehk **elektrolüütpindamise** (*galvanizing, electroplating*) põhimõtteline skeem. Kaetavate detailide (olles katoodiks) ja anoodimaterjali (milleks on saadava pinde metall või inertne elektrood) vahel rakendatakse alalisvool. Mõlemad komponendid sukeldatakse voolujuhtivasse elektrolüüti, mis võib samuti sisaldada lahustunud metallisoolasid või juhtivust suurendavaid lisandeid. Vastavalt rakendatud voolule liiguvad metalliioonid katoodile, kaotades oma laengu ja sadestudes detaili pinnale. Samas kui protsess on oma loomult lihtne, on kvaliteetse pinde saamiseks vajalik paljude parameetrite valik ja kontroll, sh elektrolüüt ja selles lahustunud komponentide kontsentratsioon, vanni temperatuur, elektrivoolu ja -pinge väärtused. Nimetatud mõjuritele lisandub ka detaili keerulisus, mistõttu protsessi kontroll on äärmiselt oluline.

Pinnatavate detailide pind peab olema eelnevalt ettevalmistatud, tagamaks rahuldava tulemuse. Pinnadefektid (kriimustused, poorid jm) peavad olema eelnevalt kõrvaldatud sileda ja läikiva pinna saamiseks.



**Joonis 13.6.** Galvaanpindamisseadme põhimõtteskeem

Enam kasutatavamateks pinneteks on tsink-, kroom-, nikkel-, vask-, kaadmium-, tina-, kuld-, hõbe- ja plaatina pinnepind. Galvaanpind on õhemad võrreldes kuumsukeltsink-pinnetega ja eeliseks on nende saamisel kõrgete temperatuuride mittekasutus. Nikkelpind pakuvad head korrosioonikindlust, kuid on kallimad ja pole nii säravad. Särava pinna saamiseks kasutatakse tavaliselt kroomimist, kuid mida üksikuna kasutatakse harva – aluspinnetena kasutatakse vask- ja nikkelpindeid (vask või nikkel tagab sileda aluspinna ja võimaldab minimeerida kroompinde paksust. Sel moel saadav lõppkroomitud pind on väga atraktiivse väljanägemisega. Kuld-, hõbe- ja plaatina pinnepindeid kasutatakse juveeli- ja elektroonikatööstuses, tagades detailile väärismetallidele omased pinnaomadused.

**Kõvakroomimist** (*hard chromium plating*) kasutatakse kõvapinnete (pinnakõvadus 65...70 HR15N) saamiseks tööriistadel ja teistel toodetel, kus on vajalik hea kulumis- ja korrosioonikindlus, aga ka kulunud detailide mõõtmete taastamiseks. Kõvakroompind on tunduvalt paksemad tavakroompinnetest (paksus kuni 200  $\mu\text{m}$ ). Näiteks kasutatakse pakse pindeid diiselmootorite silindrite sisepinna katmiseks. Kuna kroompinne ei anna tasandavat efekti, saame pinde sama kareda, kui oli aluspind – oluline määrimise seisukohalt.

Galvaanpindamine viiakse tavaliselt läbi pidevprotsessina, kus üksikud detailid kinnitatakse/riputatakse konveierile, mis viib nad läbi puhastus-, pindamis-, pesu- ja fikseerimisvannide. Tavaliselt pinnatakse samaaegselt üht liiki detaile, kuna lahuse koostis, sukelduskestus, voolutihedus jt parameetrid olenevad suurel määral detaili suurusest ja kujust.

### Anodeerimine

**Anodeerimine** (*anodizing*) on elektrokeemiline protsess, mille tulemusena formeerub metalli pinnal püsiv oksiidikiht. Enam kasutatakse anodeerimist alumiiniumi ja magneesiumi korral, kuid ta on kasutatav ka tsingi, titaani ja teiste vähem tuntud metallide korral. Anoodpindeid kasutatakse eelkõige dekoratiivsetel eesmärkidel; samas tagavad nad ka korrosioonikaitse. Kui võrrelda anodeerimist galvaanimisega



(mõlemad on elektrokeemilised protsessid), siis on siin 2 põhilist erinevust: (1) kui galvaanimisel on kaetav detail katoodiks, siis anodeerimisel vastupidi – detail on anoodiks, kui elektrolüüsivann ise on katoodiks; (2) galvaanimisel pinne kasvab kaetava metalli ionide sadestamisel pinnale, anodeerimisel moodustub oksiidpinne läbi keemilise reaktsiooni alusmetalliga.

Anoodpinnete paksus on tavaliselt vahemikus 1,5 kuni 15  $\mu\text{m}$ . Anodeerimisel, eriti alumiiniumi korral, võime saada väga erineva värvusvarjundiga pindeid. On võimalik saada ka väga paksu anoodpindeid (kuni 25  $\mu\text{m}$ ) näiteks alumiiniumil; sellist protsessi nimetatakse ka **kõvaanodeerimiseks** (*hard anodizing*) ja neid kasutatakse eelkõige kulumis- ja korrosioonikindlate pinnetena.

Poorseid oksiidpindeid kasutatakse ka täiendava pinde aluspindena, näiteks värvpindele, aga ka õli kandva pindena survetöötlusprotsessides.

### 13.4.3. Kuumsukelpindamine

Suur osa metalltooteid kaetakse korrosioonikindlate pinnete nende otsesel kastmisel sulametalli vanni. Sellist pindamismoodust nimetatakse **kuumsukelpindamiseks** (*hot dipping*).

Kõige enam kasutatavad pindematerjalid on tsink, tina, alumiinium jt.

**Kuumtsinkimine** (*hot-dip zincing, galvanizing*) – ajalooliselt enam kasutatavam terase korrosiooni vastu kaitsmise moodus (tsink on ohverdavaks anoodiks, kaitses alusmetalli rauda). Terastooted või plekk puhastatakse õlist, mustusest ja roostest nende sukeldamise teel tsinkammooniumkloriidi lahusesse ja kuivatatakse. Seejärel toode sukeldatakse tervenisti sulatsingi vanni (vannitemperatuur on *ca* 450 °C). Tsink ja raud reageerivad metallurgiliselt, andes aluspinde, mis koosneb mitmetest rauatsingi ühendeist, pealispind aga praktiliselt puhtast tsingist.

Pinde paksust määratletakse tavaliselt läbi kaalu pinnauhikule, olles piires 100...300  $\text{g}/\text{m}^2$ -le, olenedes sukelduse kestusest ja väljastamise kiirusest. Õhemate pinnete saamiseks kasutatakse õhujuga või mehaanilist pühkimist liigse tsingi eemaldamiseks toote vannist väljastamisel. Samas ei taga õhukesed pinded pikaajalist kaitset, kuna tsink hävib korrosiooni käigus. Samas paksudel pinnetel on oht nende pragunemisele ja ka koorumisele. Pinnete omadused ja väljanägemine varieeruvad sulami lisandite, näiteks tina, antimoni, plii ja alumiiniumi lisamisega. Raua lisamine (10%) suurendab pinde tugevust ja ka korrosioonikindlust, eelkõige täppkorrosioonikindlust. Tava-kasutuses tsinkpinnatud pleki korral kasutatakse painutust, mistõttu ei tohi pinne vigastuda. Probleem on tingitud pleki punktkeevitusel, kus tsink aurustub punktõmbluse kohal.

Põhilisteks piiranguteks kuumtsinkimisel on toodete suurus (on määratud tsiingivanni mõõtmetega) ja metalli struktuurimuutused, mis võivad kaasneda tsinkimis-temperatuuril.

**Tinatamine** (*tinning*) on oluline protsess toodete joodetavuse parandamiseks. Pinne saadakse sukelpindamisel rübustit sisaldavasse sulatinavanni. Pidades silmas tina kõrget hinda ja suhteliselt pakse sukelpindeid, saadakse tänapäeval enamik tina-pindeid galvaanimise teel. Kasutatakse ka ternmetallist (15...20% Sn, ülejäänud Pb) pindeid, mis on odavamad ja tagavad rahuldava korrosioonikindluse paljudes kasutustes.

#### 13.4.4. Termopindamine

Pindamise meetodit, mille korral erineva otstarbega pinnete (korrosioonikindlad, kulumiskindlad jt) saamine põhineb eri kujul soojusenergia kasutamisel, nimetatakse **termopindamiseks** (*thermal surfacing*). Meetodid võib jagada kahte suurte gruppi:

- 1) pihustuspindamine,
- 2) sulatuspindamine.

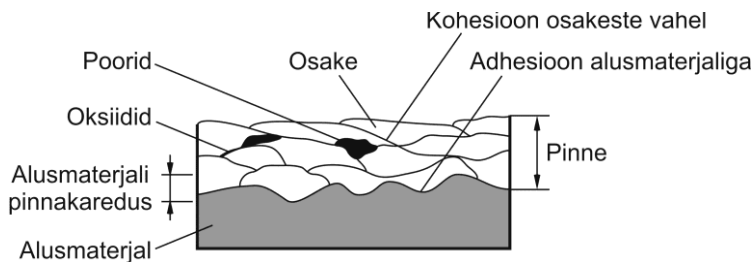
#### Pihustuspindamine

Pihustuspindamise ehk termopihustamise moodused olid tuntud juba 20. sajandi algul, kuid plahvatuslikult hakkas termopihustamise tehnoloogiate ja materjalide rakendamine edenema ja mitmekesistuma 60-ndatel aastatel.

**Termopihustus** (*thermal spraying*) hõlmab tehnoloogiaid, mille korral metallsed või mittemetallsed pindmaterjalid kantakse pihustamise teel aluspinnale sulas või poolsulas olekus. Pindmaterjalid võivad olla traadi, varda või pulbri kujul. Pihustatavad materjalid viiakse gaasileegi (hapniku ja põlevgaasi segu), elektrikaare või plasmajoa abil plastsesse või vedelasse olekusse. Kuum pihustatud materjal suunatakse põletist gaasi- või plasmajoaga (ka paukgaasi lööklainega) alusmaterjalile. Enamikku metalle, oksiide ja raskmetallide ühendeid ning nende baasil kermiseid võib peale kanda erinevate pihustusmoodustega. Pihustusmooduseid, mille korral pealekantavaks materjaliks on metallid või metallisulamid, nimetatakse **metallitamiseks** (*metallizing, metal spraying*).

Tavaliselt karestatakse kaetava materjali pind enne pihustuspindamist jugatöötluse (haavli- või abrasiivjoaga) teel.

Pihustatava materjali sulaosakesed, põrkudes vastu alusmaterjali, deformeeruvad ja moodustavad õhukesi erikujulisi (nii geomeetria kui ka suuruse poolest) liblejaid osakesi. Kokkupuutes aluspinnaga need jahtuvad ja tarduvad kiiresti. Pealekantud kihid moodustavad nõnda alusmaterjalil soovitava paksusega pinde, millele omane lamelne struktuur on esitatud Joonisel 13.7.



**Joonis 13.7.** Pihustuspinde põhimõttestruktuur

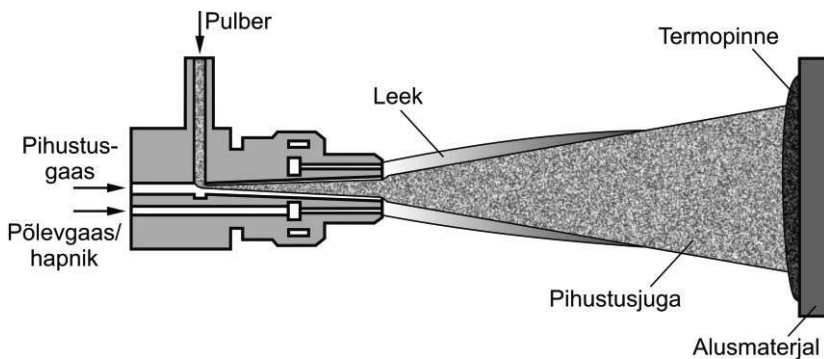
Side ehk nake alus- ja pindmaterjali vahel võib olla mehaaniline, keemiline või kombinatsioon nendest. Nakke parandamiseks kasutatakse täiendavat termotötlust, mispuhul alus- ja pindmaterjali difusiooni või keemilise reaktsiooni tulemusena nakketugevus märgatavalt suureneb.

Pealekantud pinde tihedus (poorsus) oleneb materjali tüübist, pihustumoodusest, pihustustingimustest ja pinde täiendavast tötlusest. Tavaliselt on tihedus 85...95 % kompaktse materjali tihedusest. Pinde omadused olenevad eelkõige pinde poorsusest, sidemeist pinde üksikute osakeste vahel (kohesioonist), nakkest pinde- ja alusmaterjali vahel (adhesioonist) ja pindmaterjali keemilisest toimest alusmaterjalile.

Termopihustuse võib soojusenergia saamise moodustest lähtudes liigitada kahte suurde gruppi: I gruppi kuuluvad moodused, kus soojusallikaks on põlevgaasid ja -vedelikud (näiteks atsetüleen, propaan, vesinik, vedelkütus), II gruppi – moodused, kus soojusallikaks on elektrienergia (elektri- või plasmakaar, kõrgsagedusvool).

I grupi termopihustuse põhiviisiks on **leekpihustus** (*flame spraying*), kas tavaleekpihustus (allahelikiirusega leekpihustus) või kiirleekpihustus (ülehelikiirusega leekpihustus). Tavaleekpihustamise korral suunatakse pihustatav materjal hapnik-põlevgaasi jukka, kus see sulab (Joonis 13.8). Olenemata sellest, kas materjal on traadi, varda või pulbri kujul, kantakse osakesed alusmaterjali pinnale leegi abil. Leegi abil on võimalik pihustada väga paljusid materjale. Pihustamiseks ei sobi ainult need materjalid, mis ei sula või põlevad ja oksüdeeruvad tugevalt hapnik-põlevgaasi leegis.

Leekpihustusseadmes on võimalik muuta leegi omadusi: mõjutada selle temperatuuri, kuju ja pihustatava materjali osakeste kiirust. Tabelis 13.2. on esitatud leekpihustamisel erinevate põlevgaasidega saadavad temperatuurid.



Joonis 13.8. Leekpihustuse põhimõtteskeem

Tabel 13.2. Temperatuurid eri soojusallikate korral

Soojusallikas	Temperatuur, °C
Atsetüleen – hapnik	3100
Vesinik – hapnik	2690
Maagaas – hapnik	2735
Propaan – hapnik	2640
Elektri- ja plasmakaar	2200...8300

Pihustatav materjal kantakse pinnale mitmekihilisena (kihtide paksus ~0,1mm). Tegelik pealekantud pinde paksus oleneb reast mõjureist:

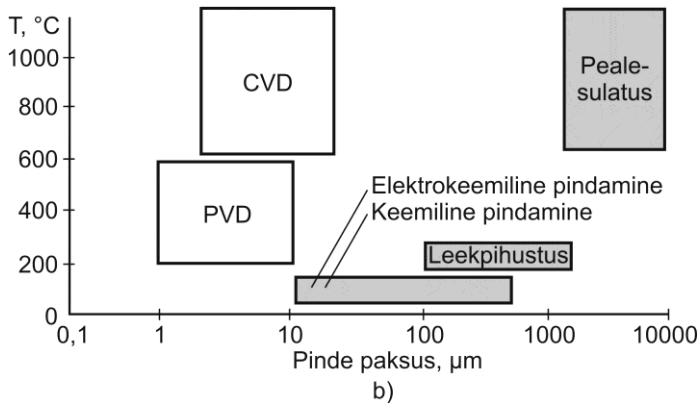
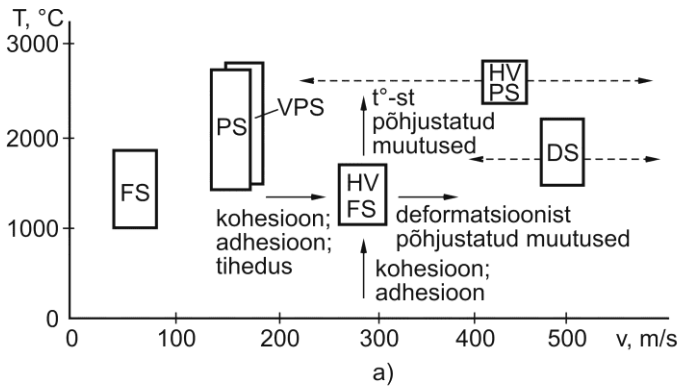
- 1) pealekantava materjali tüübist ja omadustest,
- 2) kaetava detaili materjalist ja omadustest,
- 3) kaetavale detailile vajalikest talitusomadustest,
- 4) kaetud detaili pihustusjärgsest töötlemisest.

Kiirleekpihustusmooduste gruppi kuulub **suurekiiruseline hapnik-kütuspihustus** (*high velocity oxy-fuel spraying, HVOF-spraying*). HVOF-leekpihustuse korral (levinud põhiliselt USA-s) kasutatakse põlevkütusena petrooli või põlevgaasina propüleeni, etüleeni, vesinikku ja propaani.

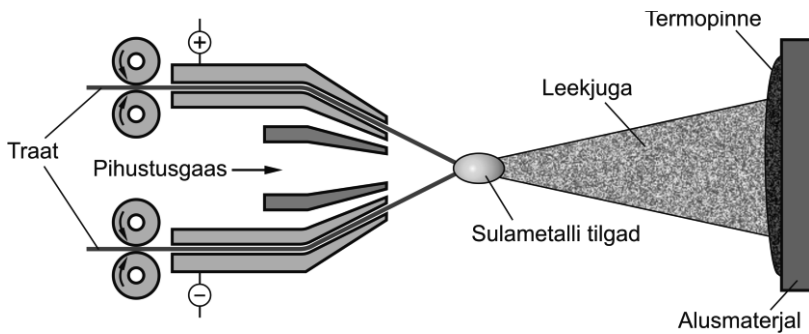
Pulber viiakse põletisse kandegaasi – lämmastiku abil, kusjuures põleti konstruktsioon võimaldab suunata pulbri leegi keskele. Pulbriosakesed lahkuvad põletist kiirusega, mis ületab helikiiruse kuni 4 korda. See on suurem, kui on võimalik saada mistahes teise pihustusmooduse korral. Leegi ja pulbriosakeste suur kineetiline energia põhjustab alusmaterjali täiendava soojenemise. See tagab parema pinde nakke, suurema tiheduse ja kõvaduse. Võimalik on peale kanda nii plastseid puhtaid metalle kui ka kõvu karbiide. Venemaal on välja töötatud nn **dünaamiline külmgaspihustus** (*cold dynamic spraying*), kus suruõhu abil on võimalik saada kiirusi 400...1000 m/s. See tagab hea nakke ja pinnete suure tiheduse. Selle meetodiga on võimalik peale kanda eelkõige plastsetest metallidest pindeid.

**Detonatsioonipihustus** (*detonation spraying*) põhineb võrreldes teiste leekpihustusmoodustega teistsugusel põhimõttel: pulbriportsjonid kuumenevad ja need kantakse alusmaterjalile detonatsiooniseadmes põlevgaasi ja hapniku segu (paukgaasi) plahvatamisel tekkiva soojuste lööklaine abil.

Erinevate pihustusviiside, kiiruse ja temperatuuri mõju pinnete paksusele, tihedusele ja nakkele on esitatud Joonisel 13.9. Elektri kaarel põhinev pihustusmoodus on **elekterkaarpihustus** ehk **kaarpihustus** (*electric arc spraying*), mille korral kasutatakse nii metalltraati või -vardaid kui ka metallümbrises pulbreid (pulbertäidistraati). Kaks üheaegselt etteantavat traati (varrast) sulavad nende vahel tekkiva elektri kaare kõrge temperatuuri tõttu (Joonis 13.10). Sulametall pihustatakse ja kantakse alusmaterjalile suure kiirusega gaasijoaga (sagedamini õhujoaga). Selle mooduse põhiline puudus on pidevmaterjali kasutamise vajadus.



**Joonis 13.9.** Erinevate pindamisviiside võrdlus: a – temperatuuri ja kiiruse mõju termo- pihustamisel; b – saadavate pinnete paksused ja protsessi temperatuurid (FS – leekpihustus, PS – plasmapihustus, DS – detonatsioonipihustus, CVD – keemiline aursadestus, PVD – füüsikaline aursadestus)



**Joonis 13.10.** Kaarpihustuse põhimõtteskeem

**Plasmakaarpihustus** ehk **plasmapihustus** (*plasma arc spraying*) on termopihustuse moodus, mille korral kasutatakse plasmapõletit. Selles tekib plasmakaar sulatab ja kannab pindmaterjali alusmaterjalile. Kaarlahendus leiab aset plasmapõletis, ilma et alusmaterjal selle moodustamisel osaleks (nn siirdamata plasmakaar). Kaar tekib volframkatoodi ja anoodiks oleva katoodi ümbritseva düüsi vahel. Inert- või taandav gaas, sisenedes surve all katoodi ja anoodi vahelisse alasse, ioniseerub, andes kõrgtemperatuurse plasma. Kuum plasma temperatuuriga kuni 8000 °C väljub düüsis suure kiirusega joana. Pulbrikujuline pindmaterjal viiakse kuuma plasmajukka, kus see sulab ja kantakse alusmaterjalile.

Vaakumplasmapihustus on plasmapihustuse üks mooduseid, mis viiakse läbi vaakumkambris. Selle eeliseks on oksiidide tekkimise vältimine pindes. See on eriti oluline pinnete kasutamisel lennukimootorites ja kosmoserakettides. Seadmete maksumus ületab aga ca 10 korda plasmapihustusseadmete tavalise maksumuse. Ka protsess ise on kallis.

Tabelis 13.3 on esitatud erinevate termopihustusmooduste võrdlus (pulbriosakeste kiirus, pinnete poorsus ja nakketugevus). Energiamahukamate pulberpihustusviiside hulka kuuluvad leekpihustus; ökonoomsem on kaarpihustus. Enam kasutatavad pulberpihustusviisid (kaar-, leek- ja plasmapihustus) järjestuvad energia erikulu (1 kg materjali pealekandmiseks kuluva energia) poolest ligilähedaselt vahekorras 1:3:5. Kaarpihustus on niisiis otstarbekas eelkõige suurte pindade korrosioonitõrjel (näiteks torude, mahutite jms katmisel alumiiniumi ja tsingina). Pulbrite pealekandmine gaasileegi, plasmajoa ja detonatsiooniga on eelistatav uute detailide tugevdamisel ning kulunud detailide taastamisel eriomadustega materjale kasutades.

**Tabel 13.3.** Termopihustusstehtehnoloogiate võrdlus  
(pihustuskiirus, pinnete poorsus ja nake)

Pihustusviis	Kiirus, m/s	Poorsus, %	Nake, N/mm <sup>2</sup>
Pulberleekpihustus	30	6...15	17...70
Traatleekpihustus	180	2...8	15...20
Kaarpihustus	240	0,5...2	40
Plasmapihustus	240...1200	<1	20...70
Detonatsioonpihustus	1100	<0,5	>100
Kiirleekpihustus (HVOF)	600...1200	1...3	60...80

### Sulatuspindamine

**Sulatuspindamine** (*fusion surfacing, thermal cladding*) on pindamismoodus, mille korral metallisulamid kantakse pinnale erinevaid keevitusmeetodeid kasutades. Tegemist on sulatuskeevitusega, mil leiab aset sulatus pinde- ja alusmaterjali vahel. Erinevalt pihustuspinnetest, mille korral nake on eelkõige tingitud mehaanilistest sidemetest, on sulatuspinnete korral tegemist metallurgiliste sidemetega. Viimane tagab hea vastupanu abrasiivkulumisele. Sulatuspindamist kasutatakse nii uute detailide tugevdamiseks kui ka kulunud ja korrodeerunud detailide taastamiseks. Tavaliselt on pinnete paksus piires 0,5 kuni 2,5 mm, kuid pinded paksusega 10 mm ja enam on samuti võimalikud.

Sulatuspinnete saamiseks kasutatakse mitmeid mooduseid: elekterkaarpealekeevitust, plasmakaarpealesulatust, elektronkiir- ja laserkiirpealesulatust.

### **Elekterkaarpealekeevitus**

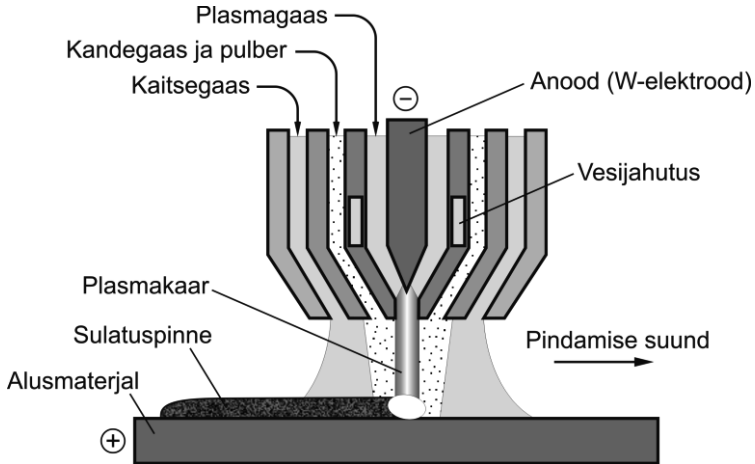
**Elekterkaarpealekeevituse** ehk **keevituspindamise** (*electric arc surfacing*) korral kasutatakse pealesulatusmaterjalina spetsiaalelektroode, pulbertäidistraati ja -linti või pulberlinti. Võrreldes teiste pealesulatusmeetoditega on keevituspindamisel rida eeliseid:

- a) pinde saamine on lihtne, kasutades rübusti all või kaitsegaasis keevitusprotsesse,
- b) suur protsessi tootlikkus ja parem kvaliteet võrreldes tavakeevitusprotsessidega.

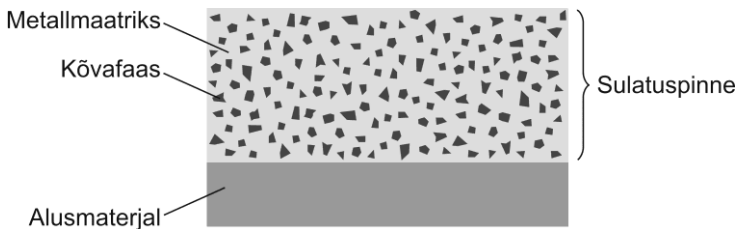
### **Plasmakaarpealesulatus**

**Plasmakaarpealesulatus** (*plasma transferred arc surfacing, PTA-surfacing*) on üsna laialdast kasutamist leidnud moodus paksude kulumiskindlate pinnete pealekandmiseks, kus pealekantav materjal antakse plasmakaarde, mis kaare toimel sulab (Joonis 13.11). Tänu unikaalse soojusenergia allikale – plasmakaarele – on meetodil väga suurt potentsiaal protsessi väikese maksumuse (võrreldes teiste pindamismoodustega), lihtsa opereerimise tõttu ei vaja moodus täiendavat pinnatöötlust. Eel-

kõige võimaldab plasmakaarpealekeevitus saada kvaliteetseid pindeid (hea metallurgiline nake, väike poorsus), mille koostisosadeks on metallmaatriks ja karbiidne kõvafaas. Enam kasutatavad komposiitsulatuspinded põhinevad Ni-maatriksil, mis on armeeritud karbiididega (WC/W<sub>2</sub>C). Sellise struktuuriga (Joonis 13.12) pinnetele on omane suurepärase kulumis- ja korrosioonikindlus.



**Joonis 13.11.** Plasmakaarpealesulatus põhimõtteskeem



**Joonis 13.12.** Plasmapealesulatatud komposiitpinde struktuur

### Laseri- ja elektronkiirpealesulatus

**Laserikiirpealesulatus** (*laser beam surfacing*) ja **elektronkiirpealesulatus** (*electronbeam surfacing*) on analoogne plasmapealesulatuslega, kuid pindmaterjali pealekandmine toimub üheaegselt sulatamisega (nagu plasmakaare korral) või kasutatakse eelnevalt pealepihustatud pindekihi järgnevat laseri- või elektronkiirega sulatamist. Lasertechnoloogia laiendab eelkõige plasmapihustuspinnete kasutusala.

Laserpealesulatus võimaldab kõrgema temperatuuri ja protsessikontrolli tõttu (a) legerida pindmaterjaliga alusmaterjali, (b) sulatada ainult pindmaterjali ja (c) jahutada kiiresti sulatatud pinnet (näiteks saada amorfse struktuuri).



## Pealejootmine

**Pealejootmine** (*overlay brazing*) tähendab väga kõvade pindmaterjalidega, näiteks kõvasulamiga pinna armeerimist-tugevdamist. Võrreldes teiste kõvapindamismoodustega, saab peale kanda väga paksu 0,25...2,5 mm ja kõvu (*ca* 70 HRC ja rohkem) pindeid. Detaili pinnale asetatud vahejoodidega kõvasulamplaat (või pulber) kuumutatakse kuni joodise sulamiseni. Kasutusvaldkondadeks on kett- ja ketassaagide hambad, kivipuuride otsikud, naftapuurimispead jt detailid, millelt nõutakse suurt kulumiskindlust.

### 13.4.5. Aursadestuspindamine

**Aursadestuse** ehk **aurustussadestuse** (*vapor deposition*) tulemusena moodustub alusmaterjalil õhuke pinne kas aurustatud metalli kondenseerumise või keemilise reaktsiooni tulemusena piirpinnal gaas-alusmaterjal. Siia gruppi kuuluvad kaks pindamisprotsessi: füüsikaline ja keemiline aursadestus.

#### Füüsikaline aursadestus

**Füüsikalisel aursadestamisel** (*physical vapor deposition, PVD*) aurustatakse materjal vaakumkambris, mis sadestub (kondenseerub) alusmaterjalile õhukese pindena. Võimalik on sadestada metalle, sulameid, keraamikat ja teisi anorgaanilisi ühendeid nii metallidele, klaasile kui ka plastidele.

Füüsikalist aursadestust kasutatakse:

- a) õhukeste dekoratiivsete pinnete saamiseks plast- või metalldetailidel (trofeed, mänguasjad, suled, sulepead, kellakorpused, auto interjööri detailid). Pindeks on õhuke alumiiniumkile (paksus *ca* 150 nm), mis lakiga kaetuna omandab hõbedase või kroomi väljanägemise,
- b) peegelduvate pinnete (eelkõige magneesiumfloriid MgFe) saamiseks optilistel läätsedel,
- c) elektrijuhtivate kontaktide saamiseks elektroonikaseadmete mikroskeemides (eelkõige metallidest kuld),
- d) õhukeste kõvapinnete saamiseks (titaannitriid (TiN), titaankarbonitriid (TiCN) jt) tööriistanduses (lõikeriistad, stantsid, valuvormid jpm) (vt p 12.2.3. Terikumatel materjalidel).

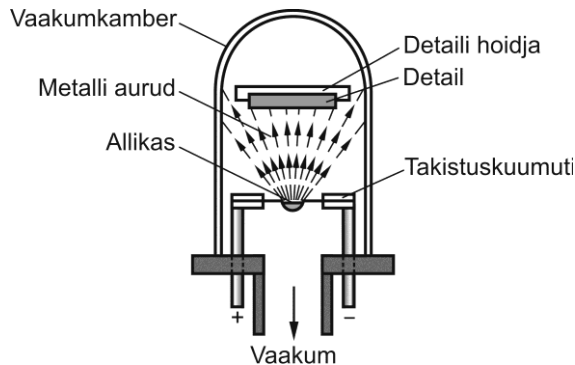
Füüsikaline aursadestusprotsess koosneb järgnevatest etappidest: (1) pindmaterjali aurustamine, (2) auru suunamine alusmaterjalile ja (3) aurude sadestamine alusmaterjalile. Kõik protsessid leiavad aset vaakumkambris.

Aurustamiseks kasutatakse tahkise või vedeliku takistuskuumutust, ioonpommitust jt meetodeid. Need ja teised kombineeritud meetodid võib jagada 3 gruppi: (1) vaakumaurustus, (2) atomisatsioon (pihustus) ja (3) ioonpindamine. Tabelis 13.4 on esitatud nende protsesside kokkuvõte.

**Tabel 13.4.** Füüsilise aursadestuse protsessid (PVD-protsessid)

PVD-protsess	Iseärasused ja võrdlus	Pindematerjalid
Vaakumaurustus	Seadmed on suhteliselt lihtsad ja odavad; võimalik pinnata ainult puhaste metallidega; nake on kehv võrreldes teiste PVD-protsessidega	Al, Ag, Au, Cu, Cr, Mo, W
Atomisatsioon	Parem nake võrreldes vaakumaurustusega; võimalik katta ka keemiliste ühenditega; madalam sadestuskiirus; raskem protsessi kontroll	Ag, Au, Cr, TiC, TiN, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> jt.
Ioonpindamine	PVD-protsessidest parima katvusega ja pinde nakkega; keerukam protsessi kontroll; suurem sadestuskiirus võrreldes atomisatsiooniga	Ag, Au, Cr, Mo, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , TiC, TiN

**Vaakumaurustus** (*vacuum evaporation*). Enamikku puhtaid metalle on võimalik sadestada alusmaterjalile, viies nad esmalt vaakumis tardolekust auruks ja lastes seejärel sellel kondenseeruda alusmaterjali pinnale (Joonis 13.13). Pindematerjal kuumutatakse piisavalt kõrgele temperatuurile selle aurustamiseks, kuna aurustus toimub vaakumis, on aurustumiseks vajalik temperatuur madalam, kui see on normaalrõhul. Samuti on välistatud pindematerjali oksüdeerumine kuumutustemperatuuril.



**Joonis 13.13.** Füüsilise vaakumaursadestusseadme põhimõtteskeem

Materjali aurustamiseks võib kasutada erinevaid mooduseid: takistuskuumutust või elektronkiiritust.

Takistuskuumutusaurustamisel kuumutatakse voolu abil tiiglit, milles paikneb pindematerjal (näiteks W, Mo). Puuduseks on pindematerjali saastumine tiiglimaterjaliga. Elektronkiiraurustamisel suunatakse elektronide voog suure kiirusega (pommitamisega) pindematerjalile, mille tulemusena toimub materjali aurustumine. Kuna tiigli kuumutus praktiliselt puudub, on pinne minimaalselt saastunud tiiglimaterjaliga.

Pinnatav pind positsioneeritakse aurustustiigli suhtes nii, et oleks tagatud ühtlane pinne; vajadusel kasutatakse mehaanilist manipulaatorit.

**Atomisatsioonil** (*sputtering*) pommitatakse tahkise (või vedeliku) pinda kõrgenergeetiliste aatomiosakestega; löögimomendil pinnaga eralduvad sealt üksikud aatomid. Sobivaimaiks kõrgenergeetilisteks osakesteks on ioniseeritud gaas, näiteks argoon, millest elektriväljas moodustub plasmagaas. Kuna PVD-protsessis pinde/katoodimaterjali pommitamisel argooni ioonidega ( $\text{Ar}^+$ ) kutsub esile pinna-aatomite lahkumise ja sadestumise alusmaterjalile, moodustub sellel õhuke pinne. Kaetav detail paigutatakse katoodi lähedale, mistõttu see kuumeneb ja tagab parema nakke. Kui vaakumaurustus piirub metallidega, siis atomisatsioon on kasutatav mistahes materjalide korral – metalded ja mittemetalded materjalid, sulamid ja polümeerid (vt Tabel 13.4). Sulamitest ja keemilistest ühenditest pinnete koostis ei erine lähtematerjali koostisest.

**Ioonpindamine** (*ion plating*) on kombinatsioon atomisatsioonist ja vaakumsadestusest õhukeste pinnete sadestamiseks alusmaterjalile. Pindamiskambris paigutatakse alusmaterjal (on katoodiks) ülevalpool pindematerjalist anoodi. Kamber vakumeeritakse, kambrisse antakse argoon ja rakendatakse elektrivälja ioniseerimaks gaasi ( $\text{Ar}^+$ ) ja moodustamaks plasmat. Leiab aset pinnapuhastus. Järgnevalt kuumutatakse pindematerjali, et moodustuks aurud. Kuumutusmoodustena kasutatakse samu viise, mis aursadestusel (takistuskuumus, elektronkiiritus jt). Aurustatud materjali ioonid liiguvad läbi plasma ja moodustavad alusmaterjalil pinde. Atomisatsioon jätkub ka sadestuse ajal, seega ioonpommitus toimub mitte ainult argooni ioonidega, vaid ka pindematerjali ioonidega, mis energetiseeruvad, kuna neile mõjub sama elektrivälja, mis argoonilegi. Selle ioonpindamisprotsessi tulemusena saadakse ühtlase paksuse ja suurepärase nakkega alusmaterjaliga pinded. Keemilise ühendi (näiteks TiN, TiC) saamiseks juhitakse pindamiskambrisse väikeses koguses N- ja C-sisaldusega gaasi). Katta on võimalik ebakorrapärase kujuga detaile, kuna atomisatsioon toimub plasmaväljas. Üheks näiteks on TiN-pinded kiirlõiketerastel.

PVD-protsessi eelisteks on pinde ühtlus ja hea nake, suur sadestuskiirus, pinde suur tihedus ja võimalus katta ka avade sisepindu ja teisi õõneskehasid.

### **Keemiline aursadestus**

Füüsikaline aursadestus on pinde saamine materjali aurufaasi alusmaterjalile kondenseerimisel; see on puhtalt füüsikaline protsess. Võrdluseks, **keemiline aursadestus** (*chemical vapor deposition, CVD*) seisneb gaaside segu ja kuumutatud alusmaterjali vastastikusel mõjus, põhjustades gaasi koostisosade lagunemise ja õhukese pinde moodustumise alusmaterjali pinnal. Reaktsioonid toimuvad suletud kambris; moodustub reaktsiooniprodukt (kas metall või ühend) ja kasvades moodustub pinne alusmaterjali pinnal. Enamik CVD-reaktsioone eeldab kuumust, kuid olenevalt

kasutatavatest kemikaalidest võivad reaktsioone põhjustada ka teised energiaallikad, näiteks ultraviolettvalgus või plasma.

Nüüdisaegne CVD-tehnoloogia on orienteeritud eelkõige pinnetele kõvasulameil ja päikesepatareidel, rasksulavatest metallidest pinnetele turbiinilabadel ja teistele rakendustele, kus oluline on kulumine ja korrosioon või termolöök.

CVD-tehnoloogia põhilised eelised on: (1) kanda peale rasksulavaid materjale allpool nende sulamis- või paagutustemperatuure, (2) tera suurus on kontrollitav, (3) protsess on läbiviidav atmosfäärirõhul (pole vaja vaakumseadmeid), (4) pinde hea nake alusmaterjaliga. Puudused on: (1) kasutatavate kemikaalide korrodeeruv toime ja toksilisus, (2) osade reaktsioonikomponentide kõrge hind ja (3) materjali utiliseerimine on raskem.

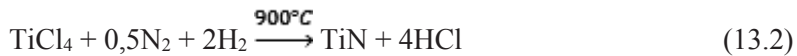
Tavaliselt kasutatakse reageerivate gaaside või aurudena metallihüdroiidide ( $MH_x$ ), -kloriidide ( $MCl_x$ ), -fluoriidide ( $MF_x$ ) jt, kus M = sadestatav metall. Samuti kasutatakse reaktsioonides vesinikku ( $H_2$ ), lämmastikku ( $N_2$ ), metaani ( $CH_4$ ), süsinikdioksiidi ( $CO_2$ ) ja ammoniaaki ( $NH_3$ ).

Näitena mõned reaktsioonid, millel põhinevad CVD-protsessid:

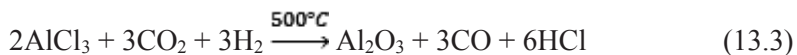
Nikkelpinde (Ni) saamiseks



Titaannitriidpinde (TiN) saamiseks kõvasulamil



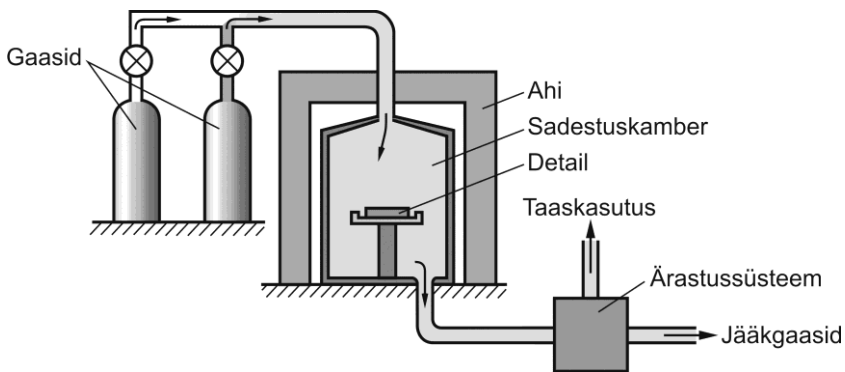
Alumiiniumoksiidpinde ( $Al_2O_3$ ) saamiseks kõvasulamil



Volframpinde (W) saamiseks lennukiturbiinilabadel



Seadme põhimõtteskeem on esitatud joonisel 13.14.



**Joonis 13.14.** Keemilise aursadestusseadme põhimõtteskeem

### 13.4.6. Mehaaniline pindamine

**Mehaaniline pindamine** (*mechanical plating*), eelkõige **trummelpindamine** (*peen plating, impact plating*) on trummelduse üks variatsioonidest (vt p 13.21), mille korral moodustuvad pinded pehmetest plastsetest külmetsevituvatest metallipulbritest detaili pinnale. Üldjuhul väikesed detailid esmalt puhastatakse, võidakse katta ka õhukese vase või tina baasil galvaanpindega. Seejärel asetatakse detailid ja pindmaterjali pulber trummelseadmesse, kasutades vajadusel klaas- või keraamilisi sfäärilisi kehi, keemilisi aktivaatoreid jt protsessi kiirendajaid. Detaili pind kattub metalliga keskkonnas olevate klaas- või keraamiliste kuulikeste ja detailiga kontaktis oleva pulbri osakestega löögi/surve toimel ühtlase õhukese pindga. Võimalik on mehaaniliselt katta kõikide metallidega, mida on võimalik saada pulbri kujul. Tuntum on tahke tsinkimisprotsess – **šerardatsioon** (*sherardizing*). Üldiselt viiakse mehaaniline pindamine läbi toatemperatuuril, mistõttu puudub oht vesinikhaprumisele ja teeb mooduse külgetõmbavaks karastatud terase korral. Mehaanilisteks pindamismoodusteks on ka **plakeerimine** (*cladding*) ja **pulbermetallurgiapindamine** (*powder metallurgy plating*).

Plakeerimine on eelkõige tasapindsete toodete (pleki) katmine teise metalli või sulamiga, rakendades valtsimist, valamist jt mooduseid. Saadava pinde/kihi paksus moodustab saadava liitmetalli – bimetalli paksusest 5...50 %. Bimetallile on omane alusmetalli mehaaniline tugevus ja pindmetalli korrosioonikindlus ja kuumapüsivus või muu omadus. Pulbermetallurgia meetod seisneb pulberkihi vormimises (pressimine, valtsimine) toote pinnal ja kihi järgnevas termo- või termomehhanotöötlemises, eelkõige külgepaagutamises tard- või vedelolekus. On põhilisi mooduseid bimetalsete liugelaagrimaterjalide valmistamisel.

## 13.5. KORDAMISKÜSIMUSED

1. Milliseid abrasiive kasutatakse jugatöötlusel ja puhastusoperatsioonidel?
2. Kirjelda, millised on trummeldus- ja vibratsioonviimistluse põhilised erinevused?
3. Milliseid keemilisi meetodeid ja kemikaale kasutatakse detailide puhastamisel?
4. Milline on leelispuhastuse mehhanism ja millist saastet on võimalik eemaldada?
5. Milliseid pinnasaasteid pole võimalik eemaldada lahusteid kasutades?
6. Milliseid pinnalisandeid/saasteid on võimalik kõrvaldada happega söövitamisega?
7. Millised on kruntimise eesmärgid värvimisel?
8. Milline on pulbervärvimise protsess?
9. Millised on elektrostaatilise pulberpihustusvärvimise eelised?
10. Milliseid metallpindeid on võimalik peale kanda sukelpindamise teel?
11. Millised on põhilised keemilised pindamismoodused?
12. Millised on põhilised elektrokeemilised pindamismoodused?
13. Millised on galvaanpindamisprotsessi üldised parameetrid?
14. Millised on galvaankroomkõvapinnete külgetõmbavad omadused?
15. Mis on vooluta pindamine ja milliseid pindeid on võimalik saada?
16. Mis on pihustuspindamise ja sulatuspindamise põhiline erinevus?
17. Milline on pihustuspinde põhimõtestruktuur? Pinde nake alusmetalliga?
18. Kuidas liigitatakse termopihustuse moodused?
19. Kuidas mõjutavad temperatuur ja pulbriosakeste kiirus pinde omadusi (tihedus, kohesioon, adhesioon)?
20. Millised on erimeetoditega (pihustus, sulatus, keevitus) saadavate pinnete paksused?
21. Kuidas liigitatakse aursadestusprotsessid?
22. Milliseid kõvapindeid on võimalik peale kanda PVD-pindamismoodusega?
23. Mida kujutab endast CVD-protsess?
24. Milles seisneb mehaaniline pindamine? Milliseid metalle on võimalik peale kanda?
25. Mis on šerardatsioon? Millised on mooduse eelised võrreldes kuumtsinkimisega?

# 14. PLASTIDE, KERAAMIKA JA KOMPOSIITMATERJALIDE TEHNOLOOGIA

14.1. SISSEJUHATUS	14.3.1. Klaasitoodete tehnoloogia
14.2. PLASTIDE TÖÖTLEMINE	14.3.2. Tehnokeraamika tehnoloogia
14.2.1. Plasttoodete vormimine	14.4. KOMPOSIITMATERJALIDE TÖÖTLEMINE
14.2.2. Plastide lõiketöötlemine	14.4.1. Pulberkomposiitide valmistamine
14.2.3. Viimistlus ja koosteoperatsioonid	14.4.2. Kiudarmeeritud komposiitide valmistamine
14.2.4. Plasttoodete projekteerimise iseärasused	14.4.3. Laminaatkomposiitide valmistamine
14.2.5. Kummi ja elastomeeride töötlemine	14.5. KORDAMISKÜSIMUSED
14.3. KERAAMIKA TEHNOLOOGIA	

## 14.1. SISSEJUHATUS

Kuuendas peatükis käsitletud plastid, keraamika ja komposiitmaterjalid erinevad tunduvalt oma struktuuri ja omaduste poolest metallidest ja nende sulamitest. Mittemetallsetest materjalidest toodete tehnoloogia erineb üldjuhul metallide tehnoloogiast ning mõnevõrra erinevad ka nende projekteerimispõhimõtted.

Üldiselt kasutatakse plaste, keraamikat ja komposiite koormustel, mis on võrreldes metallidega lähemal maksimaalsetele lubatavatele väärtustele (see kehtib nii mehaanilise pinge, kasutustemperatuuri jt projekteerimisel arvestatavate tegurite kohta). Metallide puhul on võimalik üldjuhul selgelt eristada materjali ja toote valmistamist – mittemetallide puhul valmib lõpptoode sageli ühe operatsiooniga lähtematerjalidest (millele järgnevad mõnikord puhastus ja viimistlusoperatsioonid). Mittemetallide puhul osatakse valmistada suuremõtmelisi tooteid ühe tervikuna ning selle abil välditakse tülikaid ja tehniliselt keerukaid koosteoperatsioone. Mittemetallist toodete pinnad ei vaja sageli täiendavat viimistlust, nende värv on määratud lähtematerjalide valikuga ning valmistusmeetod tagab üldjuhul sobiva pinnakvaliteedi ja -täpsuse. Viimistlusoperatsioonide vähesus või puudumine on metallisulamitega võrreldes oluline eelis, sest paljude mittemetallsete materjalide töötlemine võib olla keerukas ja kallis. Mittemetallide liitetehnoloogiad võivad samuti märgatavalt erineda metallide omadest.

Nagu metallide puhul, olenevad ka mittemetallide omadused valmistustehnoloogiast. Aktsepteeritava kvaliteediga toodete saamiseks tuleb osata õigesti materjali valida ning ühtlasi leida ka õige valmistustehnoloogia antud kujuga toote saamiseks.

## 14.2. PLASTIDE TÖÖTLEMINE

Plastide tootmine ja töötlemine oleneb plastitüübist ja toote konstruktsioonist. Termoplastide vormimiseks kasutatakse valamist, pressimist ja ekstrudeerimist; termoreaktiive peamiselt pressitakse ja valatakse. Konkurentsivõimelise plasttoote saamiseks tuleb valida odavaim, piisavate mehaaniliste omadustega plastitüüp või **kompaund** (*compound*) ning sobivaim töötlusmeetod nii lõpptoodet kui ka valitud materjali arvestades. Tehnoloogia valikus arvestatakse lisaks detaili suurusele, kujule, tootesarja suurusele ühtlasi seda, kas kavatakse kasutada termoplasti, reaktoplasti või elastomeeri (vt p 6.2 ja 6.3). Kuna termoplastide sulamine ei toimu üldjuhul mingil kindlal temperatuuril, vaid teatavas temperatuurivahemikus, tuleb neid vormimiseks reeglina kuumutada temperatuurini, kuni nad sulavad. Plast võib olla vormimise ajal tard-, poolsula- või täissulaolekus.

Plastist toote valmistamise tsükli võime tehnoloogilisest aspektist jaotada kolmeks staadiumiks: 1) lähtepolümeerimaterjali ettevalmistus; 2) plasti töötlemise põhiprotsess; 3) toote viimistlus.

### Ettevalmistavad protsessid

Lähtepolümeerimaterjali ettevalmistuse ülesanne on töödeldavate materjalide tehnoloogiliste omaduste parandamine, aga sellesse protsesside gruppi võiks kuuluda ka plastpooltoodete valmistamine. Pooltootena käsitletakse tavaliselt graanulite, tablettide või lehtede valmistamist, mida siis omakorda kasutatakse lähtematerjalina lõpptoote valmistamiseks juba plastitöötlemise põhiprotsessis. Ettevalmistavate tehnoloogiate ja protsessidena vaadeldakse tavaliselt segamist, valtsimist, tableteerimist, purustamist, lähtematerjalide eelsoojendamist ja granuleerimist.

### Plastitöötlemise põhiprotsessid

Põhiprotsesside käigus toimub polümeerimaterjalidest toote vormimine. Põhiprotsessidena vaadeldakse tavaliselt järgmisi töötlemismeetodeid: ekstrusioon, survevalu, kalandreerimine, termovormimine ja pressimine.

Põhiprotsesse võib jaotada omakorda:

- primaarsed põhiprotsessid, mille korral toote vormimine toimub ühe protsessina, näiteks ekstrusioon ja survevalu;
- sekundaarsed protsessid, mille korral toote vormimine toimub pooltootest – lehest, kilest, preformist jne, näiteks termovormimine, mille korral tooted vormitakse eelnevalt tavaliselt kalandreerimisel valmistatud lehest.



Põhiprotsessi valik toote valmistamiseks oleneb nii toote konstruktsioonist kui ka toote materjalist – kas on tegu termoplastse või reaktoplastse materjaliga. Enamik termoplastide töötlemise protsesse koosneb järgnevatest etappidest:

- Lähtematerjali soojendamine pehmenemiseni või voolavasse olekusse.
- Pehmenenud plasti vormimine erinevates vormimisabinõudes ehk vormides. Sellist vormimist võiks ka nimetada plastse deformatsiooni tekitamiseks.
- Vormitud toote jahutamine temperatuurini, mille korral plastne deformatsioon fikseerub ehk fikseerub materjali uus vorm. Siia, viimasesse etappi kuulub ka toote eraldamine vormist.

Reaktoplastsete materjalide töötlemise viimane, materjali vormi fikseerimise etapp toimub aga, vastupidiselt termoplastidele, vormi soojendamisel, et kiirendada kõvenemiseks vajalike ristsildamisreaktsioonide kulgu töödeldavas materjalis.

Reaktoplastide vormimine saab toimuda ainult enne polümerisatsioonireaktsiooni lõppemist, sest selle tulemusena tekib kolmemõõtmeline jäik molekulaarstruktuur, mida ei saa detaili kuju muutmiseks enam deformeerida, ilma et detail puruneks. Elastomeeride töötlemine erineb kahest eeltoodust sedavõrd, et seda käsitletakse kõnealuse peatüki alajaotuses eraldi.

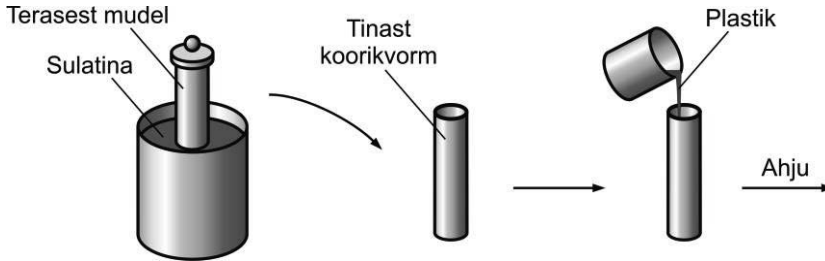
### 14.2.1. Plasttoodete vormimine

#### Valamine

**Valamine** ehk **valu** (*casting*), täpsemalt vabavalu on lihtsaim ning tõenäoliselt vanim meetod plasti vormimiseks. Valatavate plastide hulka kuulub terve rida termoplaste, nagu näiteks mitmed akrüülid, polüamiidid, polüuretaanid ja PVC **plastisoolid** (*plastisols*). Plastisooliks nimetatakse PVC polümeeri suspensiooni plastifikaatoris. Kuumutamisel üle 170 °C lahustuvad mõlemad komponendid teineteises ja jahutamisel alla 60 °C moodustub tahke, suure venivusega sitke plast. Vabavalu korral valatakse sulaolekus termoplast vormi, mis jäljendab oma kujult soovitava toote kuju. Välja on töötatud erinevaid valumeetodeid. Näiteks paksude plastplaatide tootmiseks võidakse termoplast valada klaasplaadile (vormi). Pidevat plastlehte või -kilet toodetakse valades sulaplasi (vajadusel survet kasutades) kahe liikuva lindi vahelisse pilusse. Lindid on roostevabast terasest ja väga sileda pinnaga.

Paljude reaktoplastide vormimiseks kasutatakse samuti valumeetodit. Nii saab vormida kõiki plaste, milles polümerisatsioon toimub normaaltemperatuuril ja atmosfäärirõhul. Tavalisemad valatavad reaktoplastid on fenoolplastid (PF), küllastamata polüestrid (UP), epoksüplastid (EP), silikoonplastid (SI) ja polüuretaanid (PUR). Mitmed neist vajavad täielikuks kõvenemiseks (polümerisatsioonireaktsiooni lõpuni kulgemiseks) täiendavat kuumutamist, mis mõnikord toimub pärast vormist eemaldamist või koos vormiga. Joonisel 14.1 on kujutatud meetodit, milles plasti

valuvormiks on tinast koorikvorm. Vorm saadakse terasest mudeli (mis vastab plastist detaili kujule) kastmisel sulatinasse. Pärast jahtumist saab koorikvormi eemaldada terasest mudeli pinnalt ja kasutada seda reaktoplasti valuvormina. Plast kõveneb toatemperatuuril või kuumutades seda ahjus temperatuuril 65...95 °C. Pärast kõvenemist eemaldatakse plastist detail vormist. Tinavormi saab korduvalt kasutada või vajadusel ümber sulatada.



**Joonis 14.1.** Tinast koorikvormi saamine ja reaktoplastist toote vabavalu

Vabavalu korral tavaliselt valatavates plastides täidiseid ei kasutata, kuid soovi korral saab sellesse suhteliselt lihtsalt sisse viia pulbrilist või kiulist armatuuri, et muuta materjali omadusi (mehaanilisi, elektrilisi, triboloogilisi jne) ning alandada hinda. Olenevalt kasutatavast plastist (ja lisandite olemasolust või puudumisest) on tooted läbipaistvad või poolläbipaistvad. Valumeetod on enamasti suhteliselt kulusäästlik, sest puudub vajadus kallite ja keeruka konstruktsiooniga vormide, seadmete ja juhtautomaatika järgi. Tüüpilised valatavad tooted on plaadid, lehed, kiled, torud, silindrilised toorikud. Sageli valatakse ka väikeseid ehiseid, dekoratiivseid esemeid, kujukesi, pukse, hammasrattaid ja nende toorikuid, läätseid jne. Valumeetodil saadud detailide kujutäpsus võib olla küllaltki suur, kuid probleemiks on nende ebaühtlane kvaliteet. Kvaliteediprobleemid väljenduvad ebaühtlasest segamisest tulenevast mehaaniliste omaduste varieeruvuses, gaasipoorides ja -tühimikes ning suures kahanemises. Vabavalu meetodil saab valmistada ka õõnestooteid. Selleks lastakse vormi valatud materjalil tarduda vaid osaliselt. Materjal tardub esmalt vormi pindadel ning vormiõõnes veel tardumata materjal valatakse tagasi.

## Ekstrusioon

**Ekstrusioon** (*extrusion*) on pidev vormimise protsess, mille korral sula või voolavas olekus polümeerne materjal, põhiliselt siiski termoplastne materjal, vormitakse tooteks selle liikumisel läbi vormiva kanali, mida nimetatakse suuliseks või ekstrusioonipeaks.

Ekstrusioon on primaarne töötlemisprotsess, sest plast viiakse täielikult voolavasse olekusse ning talle antakse täielikult uus ning enamasti lõplik toote vorm. Samas on ekstrusioon kui tehnika mõnede muude plastitöötlemisprotsesside koostisosa. Neil

juhtumisel on ekstrusiooni ülesandeks materjali ettevalmistamine järgnevaks mingil muul meetodil toimuvaks vormimiseks.

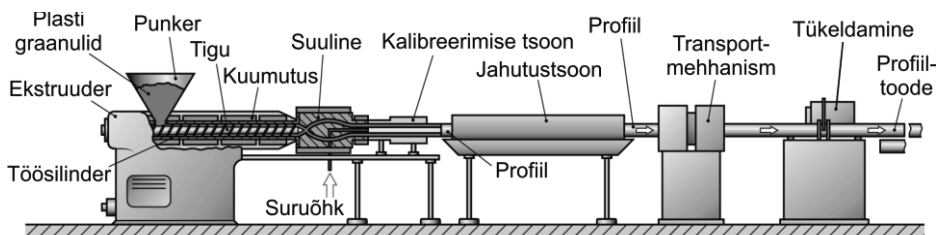
Ekstrusiooni toodeteks on sarnaselt metallide ekstrusioonile (vt. p 8.3.2) profiilid, mida võiks ette kujutada toodetena, mille kaks mõõdet on oluliselt väiksemad kolmandaga võrreldes. Profiilid võivad olla suhteliselt lihtsa ristlõikega, mille moodustavadki need kaks väiksemat mõõdet, näiteks torud, lehed, kiled, aga ka suhteliselt keerukama ristlõikega, nagu aknaraamid, elektriinstallatsiooni karbid jne.

Tänapäeval levinuimad ekstrudeeritavad plastid on PVC, PE ja PP. Suurenenud on ehituses kasutatavate plastvahtude ekstrudeerimine, mille korral levinuimad plastid on PE, PVC ja PS. Uute materjalide käitlemisel leitakse enamasti tingimused nende töötlemiseks ekstrusiooni abil.

Ekstruuderi skeem on antud Joonisel 14.2. Termoplasti graanulid antakse punkrist pöörleva teo kuuma töösilindrisse. Ekstruuderi kuumas silindris segatakse ja kuumutatakse plast, ühtlasi toimub töösilindris plasti kokkupressimine. Ekstruuderi silindri temperatuur oleneb vormitavast plastist ja on vahemikus 140...240 °C. Plast pressitakse läbi ekstrusioonipea ehk suulise, millega antakse plasttootele soovitud ristlõige. Ekstrusioonipea võib olla ka kuumutatav. Suulise järel on tavaliselt kalibreerimisseade ehk kalibraator. Kalibraatori ülesanne on tagada jahtumisel profiilide täpsed mõõtmed. Pärast kalibraatorist väljumist toode jahutatakse kas õhu- või veejuga abil. Olenevalt toote kujust, läbimõõdust, omadustest ja otstarbest liigub toode pärast suulisest väljumist konveieril tükeldusliinile või keritakse see rullidele.

Kokkuvõtlikult seisneb ekstrusiooniprotsess järgmises:

- materjali plastifikatsioon ekstruuderis;
- plastses olekus materjali vormimine suulisest ehk materjali viimine plastsesse olekusse;
- vormitud materjali jahutamine;
- vastuvõtt, lõikamine, kerimine.



**Joonis 14.2.** Tiguekstruuder termoplastist profiiltoote valmistamiseks. Ekstruuderi suuline võib olla vahetatav võimaldamaks eri toodete valmistamist sama ekstruuderi abil

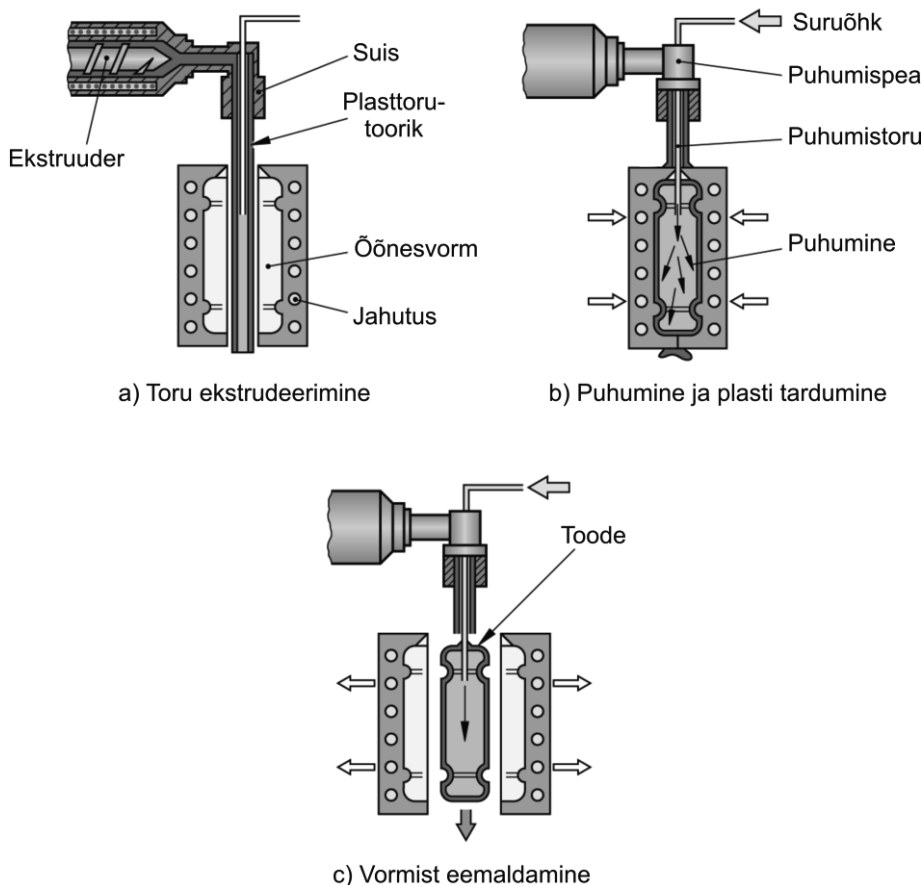
Ekstrusioon on suhteliselt odav ja kiire plasti vormimismeetod. Ekstrusioonimeetodil toodetakse ühtlase ristlõikega profiiltooteid, mis võivad vajadusel olla ka õõnsad (torud), ekstrusiooni abil kaetud juhtmed ja kaablid, kiled ja lehtmaterjal, peened kiud ja kiukimbud. Ekstrusioonimeetodil saab kilet toota kahel erineval viisil:

- **ekstrusioon lindimeetodil** (*cast film extrusion*), mille korral ekstrudeeritav materjal surutakse läbi pilusuulise ning jahutatakse järgnevalt jahutusvõllidel või veevannis;
- puhumismeetodil, mille korral on ekstrusioon ja sellele järgnev kile puhumise operatsioon vahetult üksteisele järgnevad. **Kilepuhumine** (*film blowing*) on levinuim meetod kõikvõimalike kiletoodete vormimiseks. Tüüpiliselt ekstrudeeritakse esmalt õhukesesena toru (nn varrukas). Ekstruuderi suulise keskosast väljuv õhujuga venitab suulisest väljuva poolsula plasti vajaliku läbimõõduga silindriks, kusjuures silindri välisperimeetrile paigutatud õhujoad jahutavad plastikile seejärel toatemperatuurile.

### **Puhumisvormimine**

**Puhumisvormimine** (*blow molding*) on meetod liitekohtadeta, ühtlase paksusega õõnestoodete saamiseks. Puhumisvormimine on levinuim meetod polüetüleenist (PE), polüvinüülkloriidist (PVC), polüpropüleenist (PP) ja polüeeter-eeterketoonist (PEEK) plastpudelite ja teiste mahutite, kanistrite ja õõnestoodete saamiseks. Toorikuna kasutatakse tavaliselt ekstrudeeritud või survevalu abil saadud torukujulist **vormitoorikut** (*parison*). Joonisel 14.3 on antud puhumisvormimise põhimõtteskeem. Ettekuumutatud toorik asetatakse vormipoole vahele, vormipooled sulguvad, misjärel rakendatakse vormipessa vajalik gaasi- või õhusurve. Puhumisvormimisel toimub plasti nii radiaalsuunaline kui ka teljesuunaline venitus, mis suurendab materjali tugevust. Toorik omandab vormi siseõõne kuju ja plast tahkub kokkupuutes jahutatavate vormiseintega. Vorm avatakse, toode eemaldatakse vormist ja vajadusel eemaldatakse tootelt kraat.

Puhumisvormimist on hakatud järjest enam lisaks pakenditööstusele kasutama ka autotööstuses suhteliselt keeruka kujuga suuregabariidsete plastosade valmistamiseks: autode kütusepaagid, istmete seljatoed, ventilatsioonisüsteemi osad, kokkupõrkesüsteemi osad jne. Puhumisvormimisel võidakse kuju anda kahe- või enamakihilisele materjalile, mis on valmistatud **koekstrusiooni** (*coextrusion*) abil.



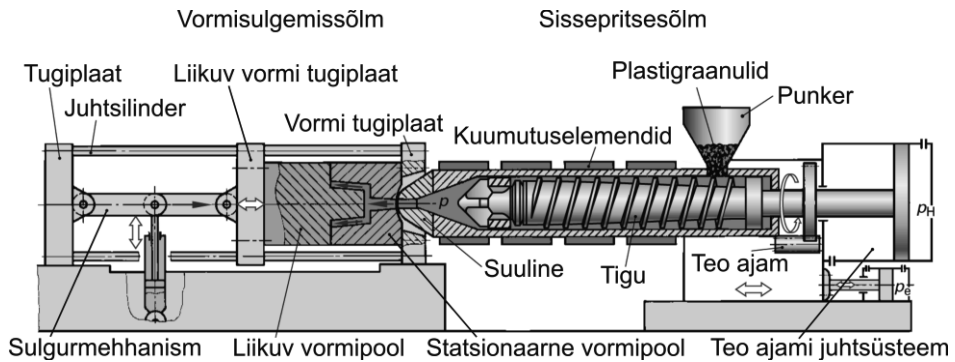
**Joonis 14.3.** Puhumisvormimise tehnoloogilised etapid: a – kuumutatavasse vormi asetatakse plastist torukujuline toorik; b – vormipooled suletakse, õhusurve venitab tooriku vastu vormipesa seina; c – pärast jahtumist vorm avatakse ja toode eemaldatakse vormist

Puhumisvormimine võib olla kombineeritud ekstrudeerimisega; sel juhul puudub vajadus tooriku ettekuumutamiseks. Ekstruuderit suulisest väljuv vormind vormitakse otsekohe puhumisvormimise abil tooteks. Puhumisvormimisel kasutatavad vormid on suhteliselt keerukad, ning neis on lisaks tootele kuju andmiseks vajalikule vormipesale veel gaasi- või õhukanalid ning jahutuskanalid. Vormi materjal peab olema hea soojusjuhtivusega, piisava tugevusega, sobima vormitava plastiga ja olema hinnalt vastuvõetav. Vormimaterjalina kasutatakse roostevaba terast ja tööriistaterast, vase-, alumiiniumi- ja berülliumisulameid.

### Survevalu

**Survevalu** (*injection molding*) on kõige tähtsam termoplastide vormimiseks kasutatav meetod. Lisaks termoplastide vormimisele leiab see meetod kasutust ka armeeritud

termo- ja reaktoplastide vormimiseks. Levinuimad töödeldavad materjalid on termoplastidest PS, ABS, PE, PP, PC, PMMA, PA jt ning reaktoplastidest UP, PF, elastomeeridest NBR, SBR. Survevalu kasutatakse nii plastide kui ka metallide (vt p 9.4.3) ja pulbermaterjalide (vt p 10.4.3) puhul. Lähtematerjal on üldjuhul graanulite kujul. Tüüpilise survevalumasina põhimõtteline skeem on esitatud Joonisel 14.4.

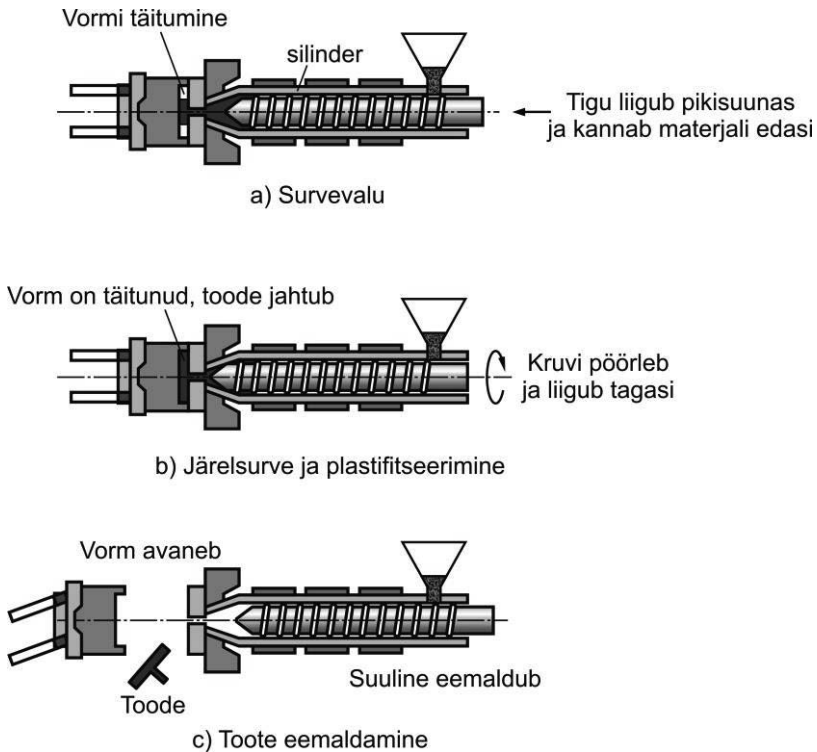


**Joonis 14.4.** Survevalumasina skeem

Survevalumasinas antakse tooraine punkrist masina töösilindrisse, milles see liigub edasi teo abil. Samaaegselt toimub materjali kuumutamine termoplastide puhul kuni sulaolekusse viimiseni, reaktoplaste moodustavate eelpolümeeride puhul mõõdukalt, kuni vajaliku temperatuurini. Kui vajalik kogus materjali on teo ette kogunenud, liigub tigu silindris edasi surudes sulandi vormi. Teo pöörlemisel tekkiva hõõrdumise tõttu kuumutatakse täiendavalt materjali. Tiguvõllil olev sulgurrõngas (klapp) takistab materjali tagasivoolu vormist silindrisse. Silinder lõpeb suulisega, mille abil saab reguleerida plasti vooluhulka valukanalite süsteemi. Survevalu protsess koosneb järgnevatest järjestikustest protsessidest, mis on skemaatiliselt esitatud Joonisel 14.5:

- Vormi sulgumine. Samal ajal toimub valusõlmes materjali plastifitseerimine. See materjali ettevalmistusprotsess toimub teo pöörleva liikumise tulemusena, analoogselt tiguekstruudris toimuvaga (vt Joonis 14.2). Erinevus ekstruuderist on selles, et materjali väljumist survevalu silindrist ettevalmistamise perioodil ei toimu ning teo pöörlemisel silindri etteotsa transporditav materjal sunnib samas tigu ennast tahapoole liikuma, mida teo edasi-tagasi liikumise hüdro süsteem ka võimaldab.
- Valusõlme liikumine vormi vastu. Sissepritseks ettevalmistatud materjali kogus on selleks ajaks transporditud valusõlme silindris teo ette.
- Materjali surumine survevalu vormi teo suulise poole liikumisel tekkiva rõhu mõjul (teo pöörlevat liikumist üldjuhul ei toimu).
- Valusõlme eemaldamine vormist, vormitud toote jahutamine vormis, edasi vormi avamine ning toote eraldamine vormist. Samal ajal toimub vormisõlmes

teo pöörleva liikumise tulemusena uue materjali ettevalmistamine ning transportimine silindri etteossa.



**Joonis 14.5.** Survevalu põhietapid: a – survevalu; b – järelsurve ja plastifitseerimine; c – detaili eemaldamine

Survevaludetail kõveneb vormis toote mõõtmetest ja massist olenevalt 1...30 s. Olenevalt kasutatavast materjalist ja toote kujust on rõhk vormis vahemikus 40...200 N/mm<sup>2</sup>. Termoplastide valuvorme jahutatakse ja reaktoplastide valuvorme kuumutatakse. Termoplastide vormimisel on silindri temperatuur 100...280 °C ja rõhk 57...400 N/mm<sup>2</sup>, vormi temperatuur on tavaliselt 30...90 °C.

Tänapäeval jälgib ning kontrollib kogu survevaluprotsessi ja survevalumasinate tööd sisseehitatud arvuti, mis tagab toodete pideva väljastamise ja nende kvaliteedi. Suland surutakse jaotuskanalite kaudu ühte või mitmesse suletud vormipessa. Kuna vormi tööpinnad on madalama temperatuuriga, toimub vormiõõnes sulandi tardumine. Kui vormi pesad on täitunud materjaliga, jäetakse surve materjalile alles, selleks et kompenseerida mingil määral vormis tarduva materjali kahanemisest tingitud valandi mahu vähenemist. Liigvarajane plasti tahkumine on ebasoovitav, sest tulemusena tekivad defektid vormitavas tootes. Vormipooled peavad olema vormimisoperatsiooni

ajal piisava jõuga suletud ning lihtsalt avatavad detaili vormist eemaldamiseks. Vormi sulgemisel tuleb vältida löögi tekkimist, sest see lühendab vormi tööiga. Vormipoolte sulgemiseks kasutatakse mitmesuguseid sulgurmehhanisme (mehaanilisi, hüdraulilisi ja hüdraulilis-mehaanilisi mehhanisme).

Plasti survevalu protsess on üsna sarnane metalli survevalule (vt p 9.4.3) ning võrreldav on ka toote pinnaviimistlus: detail on sageli kasutamiseks või järgnevaks koosteoperatsiooniks piisava pinnakvaliteedi ja kujutäpsusega. Tüüpilised survevalu abil saadavad detailid on massiga 50 g kuni 25 kg.

Survevaluvormid on konstruktsioonilt keerulised ja hinnalt kallid. Tingituna kõrgetest rõhkudest vormis ja suurtest tootesarjadest kasutatakse vormide valmistamiseks spetsiaalset tööriistaterast. Sulandi vormi sissepritsimise käigus töötab tigu kolvina, mis surub materjali vormi valukanalisse. Vormis olev jaotuskanalite süsteem projekteeritakse tootest lähtuvalt. Pärast seda, kui valatav materjal on pressitud vormi ja ta on seal jahtunud, avaneb vorm oma lahutuspinna nii, et valand ja valukanalite jäägid jäävad vormi liikuva poole külge. Edasise vormi avanemise käigus saab vormi tõukurite süsteem liikumise valumasina piirajalt ja sellega käivitub väljatõukamise protsess. Vormi konstruktsioon on esitatud Joonisel 14.6. Vormi osadeks on veel juhtelemendid, kinnituselemendid ja detaili väljatõukajad. Valukanalite süsteem võib olla koos vormiga jahutatav või ka vormis eraldi kuumutatav. Viimasel juhul on tegu **kuumvalukanalite süsteemiga** (*hot runner system*). Kuumvalukanalite korral hoitakse plast pärast suulisest väljumist pidevalt sulaolekus ja nii on võimalik säästa materjali ja lühendada tsükli aega. Materjali ühtlase temperatuuri tõttu on toode tunduvalt kvaliteetsem: vorm täitub ühtlasemalt ja välditakse sulandi turbulentset voolamist toitekanalites. Samas on kuumvalukanalitega vormide ehitus ja protsessiparameetrite kontroll keerukam. Kui valukanalid on külmad, tahkub sula plastimass iga vormimistsükli järel valukanalis ja tuleb sealt enne järgmist vormimisoperatsiooni eemaldada.

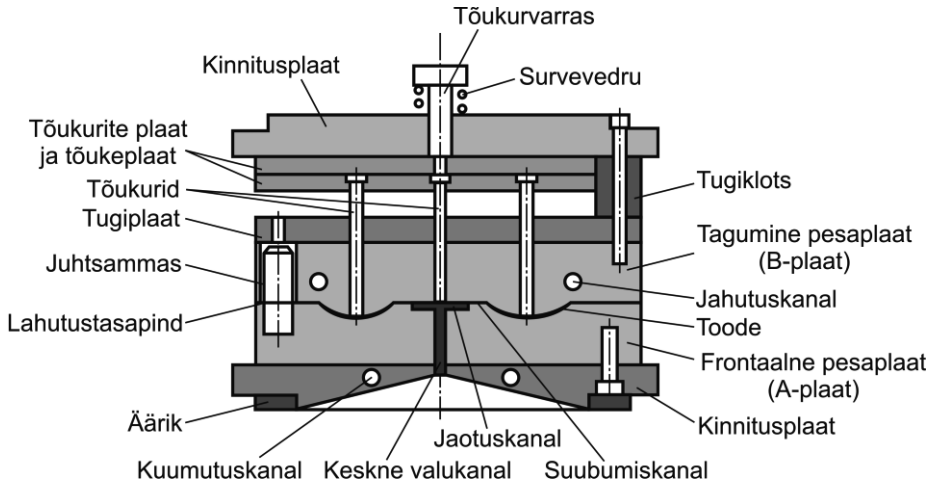
Survevalumasina suurus on määratud pressimisjõu, pressitava materjali koguse ja maksimaalse võimaliku pressivormi suurusega. Tavaliselt liigitatakse survevalumasinad pressimisjõu järgi, mis suurimatel võivad ulatuda 10 000 tonnini.

Pressimissuund võib olla nii horisontaalne kui ka vertikaalne. Muus osas on survevalumasinad oma konstruktsioonilt põhimõtteliselt sarnased: erinevused on masinaosade kvaliteedis, juhtprogrammis ja raami jäikusel.

Armeeritud plastide survevalu võib tingida vajaduse teistsuguste tigude järgi kui mittearmeeritud plastide survevalu. Eesmärgiks on vältida kiudude purunemist siirde- ja survetsükli jooksul. Ühe võimalusena kasutatakse kaksiktigu, mille korral liigub materjal teineteisest piisaval kaugusel olevate tiguvõllide vahel. Olemas on ka kaheastmelise toimega vormid, kus esimeses etapis antakse materjal suhteliselt



madalal surveel jaotuskanalitesse ja teises etapis pressitakse materjal kanalitest vormi. Nende võtete abil püütakse armeerivad kiud toimetada võimalikult pikkadena ja vigastusteta vormi. Loomulikult muudavad sellised abinõud vormi kallimaks.



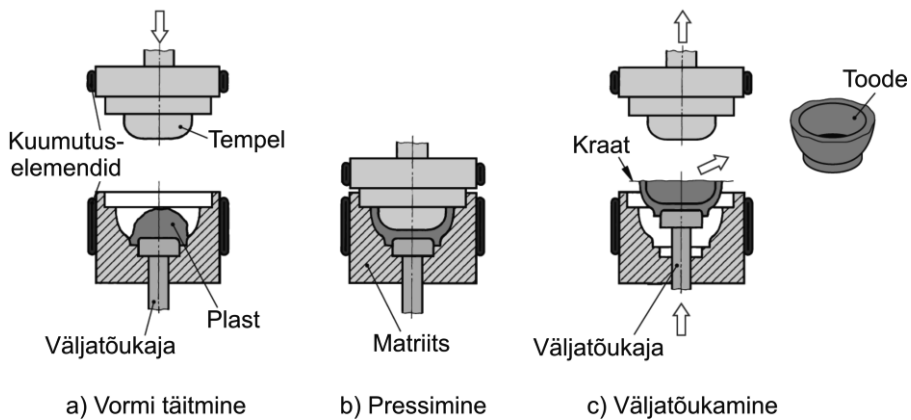
**Joonis 14.6.** Survevaluvorm ja selle osad

Survevalu kasutatakse ka reaktoplastide vormimiseks, mille korral on silindri temperatuur 80...95 °C ja rõhk 100...200 N/mm<sup>2</sup>. Nende plastide survevalu põhineb asjaolul, et reaktoplastid käituvad lühikese aja vältel nagu termoplastid. Hiljem materjal kõveneb kuumas vormis (140...180 °C) toimuvate reaktsioonide tulemusena. Nagu näha, toimub reaktoplastide ettekuumutus võrreldes termoplastidega tunduvalt madalamal temperatuuril ning nende kõvenemiseks peab valuvormi temperatuur olema kõrgem. Reaktoplastide kõvenemine valuvormis toimub tavaliselt 20...120 s jooksul. Reaktoplastide suhteliselt pikk tsüklaeg ongi nende kõrval peamiseks survevalu piiravaks teguriks. Vormimisoperatsioone saab kiirendada, kasutades mitmepositsioonilisi vorme (üks sissepritsesüsteem toidab mitut vormi) või eemaldada vorm niipea, kui väliskuju on fikseerunud ja kõvendada detail ahjus lõplikult eraldi.

### Survevormimine

Reaktoplastide levinuim vormimismeetod on **survevormimine** (*compression molding*), sarnasuse tõttu kuumpressimisele pulbertehnoloogias (vt p 10.6.1) ka **kuumpressimine** (Joonis 14.7). Etteantud kogus mittepõlmeriseerunud plasti (mis on sageli ette kuumutatud) doseeritakse lahtise vormi ühte poolde (vormipessa). Materjal võib olla graanulite või tablettide kujul. Teine, üldjuhul kuumutatav vormipool suleb vormi ja ettekuumutatud materjalile rakendatakse surve vahemikus 10...150 N/mm<sup>2</sup>. Materjali pehmenedes ja surve toimele täidetakse vorm ühtlaselt.

Vormi kuumutatakse ja survet säilitatakse, kuni plast on täielikult polümeriseerunud (kõvenenud). Seejärel vorm avatakse ja toode eemaldatakse vormist. Vormid valmistatakse üldiselt metallist (teras, alumiiniumsulamid) ning nende kuumutamiseks kasutatakse tavaliselt õli või elektrilisi kuumutuselemente. Vormides võib olla mitu pesa ning ühe pressimistsükliga saab valmistada korraga mitu toodet. Kuigi enamasti kasutatakse survevormimist reaktoplastide vormimiseks, on eriti viimasel ajal hakatud seda rohkem kasutama termoplastide ja erinevate polümeerkomposiitide vormimiseks. Tsükliäeg on määratud soojusleviga kuumutatavalt vormilt toorikusse ja kõvenemise kiirusega (polümerisatsiooniajaga) ning on tavaliselt vahemikus 1...20 min.



**Joonis 14.7.** Survevormimise põhimõtteskeem: a – ettekuumutatud graanulid või tablett asetatakse kuumutatavasse vormi; b – kuumutatav tempel suleb vormi ja rakendab pressimisjõu; c – pärast kõvenemist (reaktoplastid) või jahtumist (termoplastid) vorm avatakse ja toode eemaldatakse vormist

Vormi ja seadme maksumus on survevormimisel võrreldes konkureerivate meetoditega madalam, kusjuures toodetel on hea kujutäpsus ja pinnakvaliteet. Seetõttu on survevormimise eeliseks sageli täiendavate viimistlusoperatsioonide vähesus või puudumine. Eelised avalduvad eriti selgelt suure kujutäpsusega väikeseeriatootmise juures. Survevormimine ei ole sobiv meetod, kui tootel on eri paksusega osad (plasti kõvenemiseks on vaja suhteliselt pikka aega) või kui tegu on suurseriatootmisega. Enamik tooteid on suhteliselt lihtsad, sest materjali voolamine vormis on piiratud. Tüüpilised pressitud tooted on tihendid, autokere välispaneelid, lennukite kerepaneelid (kergekootud osad), sõidukite sisepaneelid.

Levinuimad töödeldavad termoreaktiivsed plastid on fenoolplastid (PF), melamiinplastid (MF), küllastamata polüestrid (UP), karbamiidplastid (UF) ja epoksüplastid (EP). Järjest enam kasutatakse survevormimist ka kiudarmeeritud komposiitide (nii

termoreaktiivse kui ka termoplastse maatriksiga) töötlemiseks. Armeerivatest kiududest ja plastist valmistatakse esmalt **vormikompaund** (*molding compound*) või siis pihustusmeetodi abil saadud kiude sisaldav lehttoorik. Vormikompaundide vormimine survevormimise meetodil toimub eespool kirjeldatud viisil. Tsükliajad on tavaliselt vahemikus 1...5 min ja tüüpilised tooted on vannid, tervisekapslid, kraanikausid, seadmekorpused ja mitmesugused elektrotehnikas kasutatavad detailid.

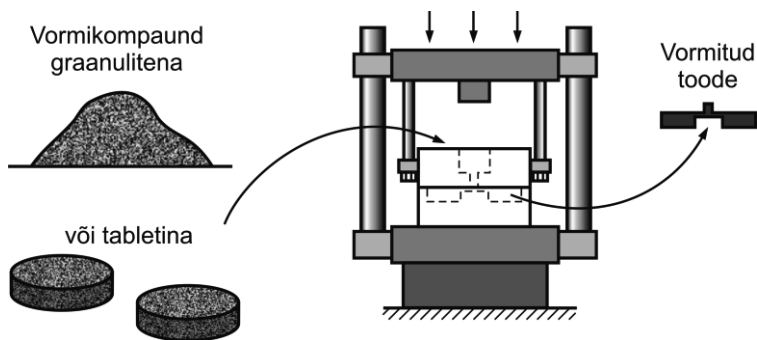
Kui lähtematerjalina kasutatakse kiudarmeeritud termoplasti, lõigatakse esmalt lehtmaterjalist vajaliku suurusega toorikud. Infrapunakuumutuse abil kuumutatakse lehttoorikud tööstustemperatuurini. Toorikud vormitakse vastava kujuga jahutatavates vormides pressi abil. Võrreldes reaktoplastidega, on termoplastide vormimine kiirem ja tekkivaid tööstusjääke saab taaskasutada. Lisaks saab termoplastist detailide ühendamiseks kasutada keevitust.

Pressimiseks kasutatavad seadmed on tavaliselt suhteliselt lihtsad. Surve tekitamiseks kasutatakse hüdro- või mehaanilist pressi, mis on varustatud paralleelsete pressiplaatidega surve ülekandmiseks ja tooriku kuumutamiseks (termoplastide puhul jahutamiseks). Vormitavate detailide pindala on tavaliselt vahemikus 15 cm<sup>2</sup>...2,5 m<sup>2</sup> ning pressimisjõud 50 kN...100 MN (5...10 000 t). Tavaliselt on vormid valmistatud tööriistaterasest ning poleeritud või kaetud kroompindega. Vormi temperatuur on tavaliselt vahemikus 150...200 °C ning erijuhtudel kuni 650 °C. Vormide kuumutamiseks kasutatakse elektrilisi kuumutuselemente, auru, kuuma õli või gaase.

## **Valupressimine**

**Valupressimist** ehk **transfeervormimist** (*transfer molding*) kasutatakse mõnikord survevormimise (kuumpressimise) asemel vältimaks materjali turbulentset ja ebaühtlast voolamist vormipesas. Valupressimise korral laetakse mittepoleeriseerunud toormaterjal survekambrisse, milles see kuumutatakse sulaolekusse (Joonis 14.8). Seejärel rakendatakse pressimisurvet ja materjal surutakse läbi vormi toitekanalite vormipesa. Temperatuuri ja rõhku hoitakse kuni termoreaktiivplasti täieliku kõvenemiseni. Tsükliaja lühendamiseks ning vormi, kolvi, silindri jt vormi osade tööea pikendamiseks võidakse toormaterjali enne laadimist kuumutada.

Kuna materjal siseneb vormi vedelas olekus, on vormi täitmiseks vajalik rõhk suhteliselt väike kuni vormiõhne täieliku täitumiseni. Valupressimisega saadud tooted võivad olla keeruka kujuga, suurepärase viimistlusega, kujutäpsed ja sisaldada õhukeseseinalisi osi. Lisaks võidakse valupressimisel kasutada sissevormitavaid osi ehk **sisetükke** (*inserts*). Sisetükk on mingi teisest materjalist (plast, metall) detail, mis vormitakse detaili sisse vormimisoperatsiooni käigus. Valupressimise korral saab sisetüki hõlpsasti asetada vormipesa enne pressimisoperatsiooni, milles see sulaplasi sissesurumisel plasti tardudes fikseeritakse.



**Joonis 14.8.** Valupressimise põhimõtteskeem. Plast viiakse sulalekusse kuumutatavas silindris, misjärel kolb surub plasti vormipessa

Valupressimist kasutatakse suhteliselt keerukate toodete väikeseeria- ja kesksuurseeria valmistamiseks. Valupressimisele on iseloomulikud samad võtted, mis iseloomustavad kuumpressimist ja survevalu ning võimaldavad survevalu eelseid rakendada ka reaktoplastide vormimiseks. Reaktoplasti võidakse lisada tselluloosi, klaasi, vilgukivi, alumiiniumoksiidi, kaltsiumkarbonaati armatuurina (mehaaniliste ja elektriliste omaduste parandamiseks) või täiteainena (omahinna alandamiseks, kahanemise piiramiseks). Meetodi puuduseks on materjalikaod vormikanalites, kuna ka neis polümeer kõveneb ja muutub jäätmeks, mis enne järgmist vormimistsüklit tuleb eemaldada. Valupressimisel saadud tavatooted on mitmesugused elektrotehnikas kasutatavad lülitusseadmete osad, kuumustugevust nõudvad kodumasinatööstuse osad, väiksemad plastist konstruktsioonelemendid, millelt nõutakse suurt kõvadust ja jäikust, sõidukite detailid ja suur keemilist püsivust nõudvad detailid.

### Külmpressimine

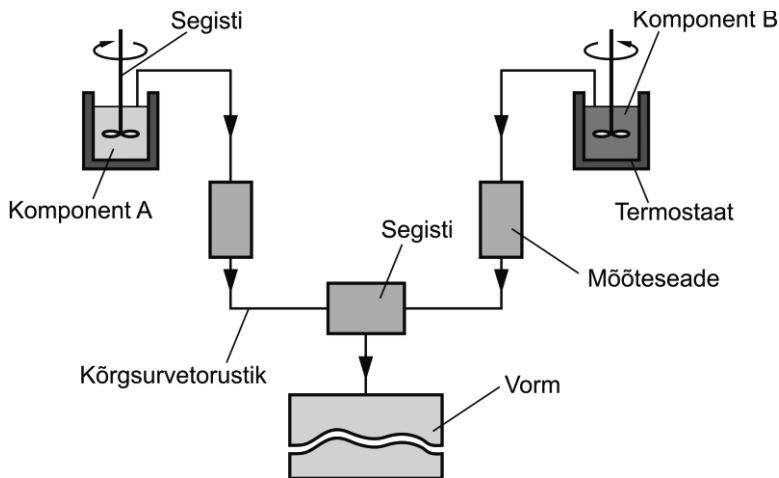
**Külmpressimisel** (*cold molding*) vormitakse termoreaktiivvaigul põhinev plastitoorik külmalt, eemaldatakse vormist ja kõvendatakse seejärel eraldi ahjus. Kuigi protsess on kiirem ja odavam, on saadavad tooted tunduvalt väiksema kujutäpsusega ja tagasihoidliku pinnaviimistlusega.

### Reaktsioonvalu

**Reaktsioonvalu** ehk **reaktsioonsurvevalu** (*reaction injection molding, RIM*) korral doseeritakse ja pressitakse (pritsitakse) rõhul 13...20 N/mm<sup>2</sup> kaks polümeeri komponenti segistisse, milles komponendid segunevad. Polümeerimass läbib reduktori (milles alandatakse rõhk ettenähtud tasemele) ja pritsitakse seejärel vormipessa. Vormis toimub reaktoplasti komponentide vahel eksotermiline polümerisatsiooni-reaktsioon, mille tulemusena polümeer tahkub. Joonisel 14.9 on esitatud reaktsioonvalu põhimõte.

Kuna täiendavalt vormi ei kuumutata, kujuneb tsükliajas määravaks reaktoplasti kõvenemiseks vajalik aeg, mis on tavaliselt vahemikus 1...10 min. Vormid valmistatakse terasest, alumiiniumist või niklisulamist. Peamiselt kasutatakse reaktsioonvalu polüuretaani, polüamiidi ja diskreetsete kiudude või helvestega armeeritud komposiitmaterjalide vormimiseks. Reaktsioonvalatud toodete mehaanilised omadused varieeruvad laias vahemikus, olenevalt baaspolümeeride ja täiteainete valikust. Võimalik on saada elastomeerseid, painduvaid või struktuursete omadustega vahttooteid (välispinnal kõva poorideta kiht, siseosa vahttäidisega), monoliitseid (ilma vahttäidiseta) tooteid või komposiitmaterjalist tooteid. Diskreetsete armatuurikiudude kasutamisel on meetodi tähisena levinud lühend RRIM, milles esimene täht viitab armeerimisele (*reinforced reaction injection molding*).

Polüuretaanist toodete korral kasutatakse lähtetoorainena polüooli ja isotsüanaati. Komponente segatakse ja tsirkuleeritakse torustikus pidevalt tardumise vältimiseks. Sissepritse viiakse läbi spetsiaalse segamispea (segisti) abil, millesse komponendid antakse kõrgsurvetorustiku kaudu. Materjal pritsitakse vormi mõne sekundi jooksul olenevalt kasutatavatest materjalidest ja toote suuruselt. Tooraine tardumisaeg on väikeste detailide puhul 2...6 s, vormimisaeg on 20...200 s.



**Joonis 14.9.** Reaktsioonvalu põhimõtteskeem

Protsessi käigus tekib vormis rõhk 0,5...1,0 N/mm<sup>2</sup>, mis on võrreldes mitmete teiste meetoditega suhteliselt väike. Sellest tulenevalt on ka vormid suhteliselt odavad, see omakorda võimaldab ka väiksemate seeriade majanduslikult tasuvat valmistamist.

Reaktsioonvalu kasutatakse enam transpordivahendite osade valmistamiseks. Suurimad selle tehnoloogia abil valmistatavad tooted on kaaluga kuni 50 kg, millele vastab 1000-tonnine vormi kokkusurumishõõde.

Reaktsioonvalu meetodil saadud tooted on üldjuhul suhteliselt madalate jäikus- ja tugevusnäitajatega, mistõttu meetod ei sobi raskkoormatud toodete valmistamiseks. Selle meetodi abil saadud tooteid iseloomustab suur elastsus (vetruvus) ja löögi-kindlus. Tüüpilisteks toodeteks on autode pörkkeelemendid, ventilatsioonisüsteemide osad, autode uksepaneelid, armatuurilauad, roolid jms). Mittevahustuvaid polüuretaane kasutatakse ka arvutite ja külmikute korpuste, veesuuskade, kuumaveeboilerite isolatsiooni jpt toodete valmistamiseks.

### **Lehtmaterjalist toodete vormimine**

Lehtmaterjalist toodete vormimine ehk **termovormimine** (*thermoforming*) on meetod termoplastist lehttoorikutest toodete vormimiseks. Meetod põhineb termoplastide omadusel soojenedes pehmeneda ning jahtudes uuesti kõveneda. Termovormimise lähtematerjaliks on eelnevalt valmistatud termoplastne lehtmaterjal, mida kuumutatakse pehmenemiseni ning järgnevalt surutakse või venitatakse vormi pinnale. Kui plastide primaarsete töötlemisprotsesside korral kuumutatakse plast voolavustemperatuurini, siis termovormimise korral toimub materjalide töötlemine allpool klaasistumis/kristallisatsioonitemperatuuri, piirkonnas, kus ilmnevad plastide termovõi kummielastsed omadused. Nüüdisajal võimaldab see kõrge efektiivsusega meetod valmistada väga erinevaid tooteid, näiteks pakenditopse kuni 100 000 tk/h, või suuri mahuteid (basseine) mõõtmetega 8 x 4 x 1,5 m 1 tk/h. Levinuimad töödeldavad materjalid on amorfised plastid, nagu PS, ABS, SAN, PMMA, aga ka poolkristallilised PP ja PE ning sageli ka mitmekihilised materjalid.

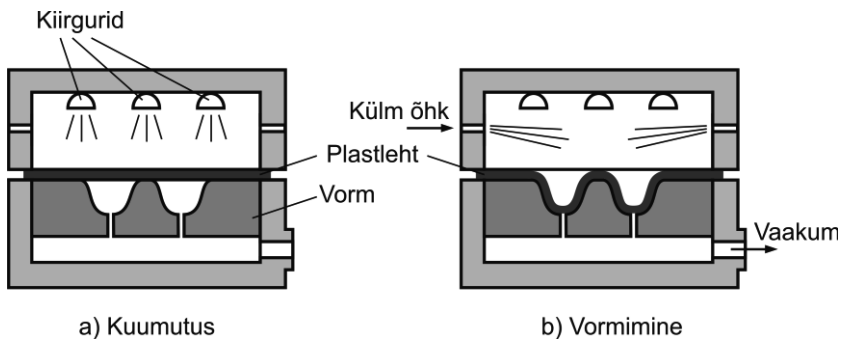
Vormimiseks soojendatakse plastleht temperatuurini 100...200 °C ja surutakse (rõhuga kuni 2,5 N/mm<sup>2</sup>) või imetakse vaakumi abil vastu vormi (mudelit), mille kuju ta jahtudes omandab. Kasutatakse nii üle- kui alarõhu abil vormimist (vastavalt pneumovõi vaakumvormimist) või mehaanilist termovormimist. Toormaterjal võib olla üksikute lehtede või rullmaterjali kujul. Kui toormaterjal antakse ette rullis, eelneb vormimisele kuumutamine ahjus või mõne muu kuumutusseadme (näiteks infrapunakiirgurid) abil. Pärast lehtmaterjali soojendamist vajaliku temperatuurini antakse sellele üle- või alarõhu abil kuju kas vormis või mudeli abil (mida mõnikord kutsutakse vastavalt „emaseks“ või „isaseks“ vormiks). Pärast jahtumist eemaldatakse toode vormist ja lõigatakse (trimmitakse) sellelt üleliigne osa. Tootmisjäák suunatakse taaskasutusse. Termovormimist selle erinevates versioonides (pneumovormimine, vaakumvormimine, mehaaniline termovormimine) kasutatakse samuti metallide üliplastsel lehtvormimisel (vt p 8.4.5. Üliplastne lehtvormimine).

Lehtmaterjalist toote vormimisel vaakumi abil kuumutatakse plastlehte otse vormipesa kohal infrapunakiirgurite abil (Joonis 14.10). Materjali kuju muudetakse üle- ja alarõhu rakendamisega; kusjuures mõnikord kasutatakse mõlemat. Toote välispinna kuju ja pinna kvaliteet on määratud vormipesa pinnaga. Juhul kui vormimiseks

kasutatakse mudelit (ehk „isast“ vormi), kopeerib toote sisepind mudeli välispinna kuju. Vormimistsükli pikkuseks on tavaliselt mõni minut.

**Mehaaniline termovormimine** (*mechanical thermoforming*) ehk kahepoolne vormimine toimub lehtmaterjali ettekuumutamise ja tootele antakse kuju mittekuumutatavate templi ja matriitsi vahel.

Termovormitud toote ristlõikes on eri osad erineva paksusega, sest tooriku eri osi deformeeritakse (venitatakse) vormimise käigus erineval määral. Tüüpilised termovormitud tooted on suhteliselt lihtsakujulised, õhukeseseinalised: näiteks jogurtitopsid, toidu säilitamise karbid, reisikohvrid, plastkandikud, valgustite korpused, külmikute sisepaneelid, dušikabiinide paneelid, aga ka pimedate kirja (Braille´ kirja) kandvad reljeefsed lehed.



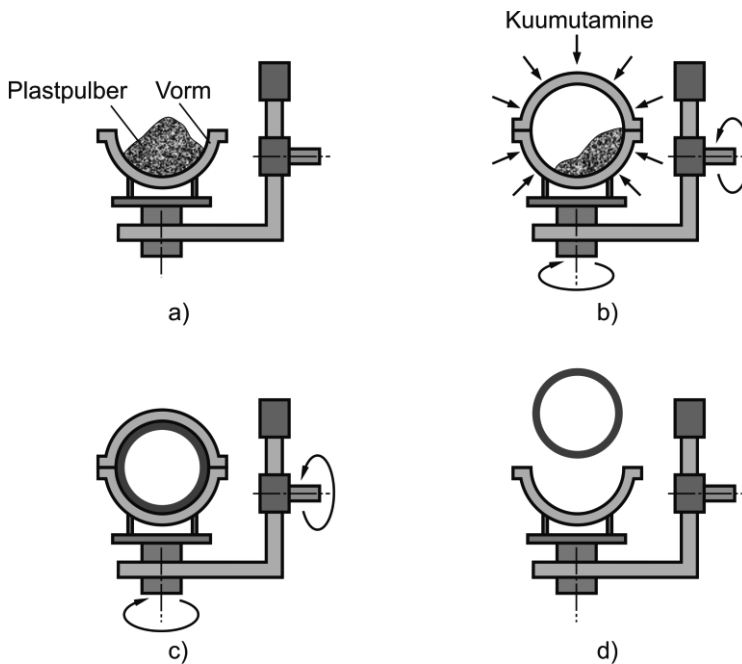
**Joonis 14.10.** Termoplastse lehtmaterjali vaakumvormimine: a – kuumutus; b – vormimine

### Rotovormimine

**Rotovormimist** ehk **rotatsioonvalu** (*rotational molding, rotomolding*) kasutatakse õhnsate, ilma liitekohtadeta suuremõõtmeliste toodete vormimiseks. Tüüpilisteks toodeteks on erinevad mahutid, kanistrid, väikesed ujumisbasseinid, kanuude ja sõudepaatide kered, kohvrid, kiivrid, prügikastid, heitveemahutid, välikäimlad, erinevad sõidukite ja veoautode osad ning paneelid, mänguasjad jne. Üldiselt kasutatakse rotovormimist selliste toodete vormimiseks, mille kuju on liiga keerukas ja mõõtmed liiga suured, et vormida neid puhumisvormimise abil. Tavalisemad rotovormimise abil vormitavad materjalid on PVC plastisoolid, polüetüleen (PE), polüpropüleen (PP), akrüülnitriil-butadieen-stüreen (ABS) ja löögikindel polüstüreen (HIPS). PVC plastisooli korral on tegu pastadega, mis valatakse vormi. Temperatuuri tõusuga toimub PVC geelistumine ja jahtumisel materjali tardumine.

Vormimiseks doseeritakse vormi vajalik kogus materjali pulbri kujul või pastana. Vorm suletakse ja kuumutatakse seejärel ettenähtud temperatuurini. Samaaegselt pannakse vorm pöörlema ümber kahe ristioleva telje. Pöörlemine võib toimuda mõnel

juhul ka ümber ühe telje, kuid sel juhul kallutatakse või raputatakse vormi ka teises sihis. Kuuma vormipinnaga kontaktis plast sulab ja jaotub raskusjõu toimel ühtlase kihina vormi pinnal. Seejärel jahutatakse pöörlev vorm aeglaselt õhu või vee abil normaaltemperatuurini. Pärast plasti tardumist vorm avatakse ja õõnes plasttoode eemaldatakse vormist. Selle vormimismeetodi eeliseks on, et tootmisjääke tekib minimaalselt, sest vormi doseeritud materjal vormitakse täielikult tooteks. Massi vähendamiseks valmistatakse vormid sageli alumiiniumi valusulameist, suuremõõtmeliste toodete vormid aga terasplekist. Eriti detailirohke pinna korral kasutatakse nikkel-pindtega vorme. Tootmistsükkel on võrreldes teiste meetoditega mõnevõrra pikem, olles sageli 10 min või üle selle.



**Joonis 4.11.** Rotovormimine: a – vormi täitmine; b – pöörlemine ümber 2-telje; c – jahutamine; d – toote eemaldamine vormist

### Vahtmaterjalist toodete vormimine

Vahtplasttooted on oluline ja järjest laienev plasttoodete turu segment. Vahtplasttooteid iseloomustab kerge kaal, väike soojusjuhtivus (on hea soojusisolaator), hea löögienergia summutusvõime. Plastide vahustamiseks ja neist toodete vormimiseks lisatakse polümeerile vahtu tekitavat lisandit. Lisand gaasistub või sellest vabanevad gaasid vormimise ajal teataval temperatuuril. Plasti ruumala suureneb olenevalt lisandist 2...50 korda ja tulemusena on tavaliselt vahtplastist tooted tihedusega 32...640 kg/m<sup>3</sup>. Eristatakse avatud ja suletud pooridega vahtplastist. Avatud pooride



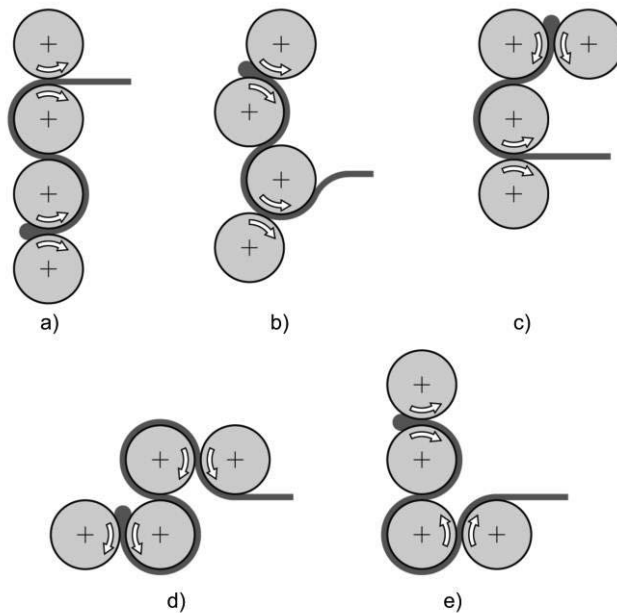
korral on plastis olevad gaasipoorid üksteisega ühenduses ja gaasid ning vedelikud saavad plastist teatavatel tingimustel läbi voolata. Suletud pooridega vahtplast on gaasidele ja vedelikele läbimatu. Vahtplastid võivad olla termoplastide või reaktoplastide baasil nii painduvad kui ka jäigad. Jäike vahtusid kasutatakse konstruktsioonimaterjali (sh sändviitmaterjalide täidisena), pakendimaterjali, mudelmaterjalina liivvormvalu gasifitseerumudelprotsessis (vt p 9.3.1, Joonis 9.31) ja gasifitseerumudeltäppisvalu (vt p 9.3.3. Täppisvalu). Pehmeid vahtusid kasutatakse peamiselt löögi- ja vibratsioonisummutust nõudvates rakendustes. Vahtplastist toodete vormimiseks kasutatakse üldjoontes eespool kirjeldatud meetodeid. Hoonete, rajatiste ja sõidukite soojustamisel kasutatava isolatsioonmaterjali materjalideks on reeglina kas EPS – **paisutatud polüstüreen** (*expanded polystyrene*) või XPS – **ekstrudeeritud polüstüreen** (*extruded polystyrene*), mis erinevad küll valmistusmeetodi poolest, kuid sarnanevad oma omadustelt. Õhemaid vahtmaterjalist lehtesid saab vormida termovormimise teel (tüüpiliseks tooteks näiteks munarestid). Vahustatud polüstüreenist graanuleid vormitakse pakenditeks ja toodeteks (näiteks ühekordsed kohvitopsid, taldrükud, gaasistuvad mudelid metallivalus). Vaht antakse vormi segamisagregaadi ja pihusti abil, milles polümeer ja vahulisand segatakse ja saavutatakse ettenähtud surve. Mõnikord on jäikuse, tugevuse, löögi-, soojus- või mürasummutuse eesmärgil vajalik, et tootel oleks tihe ja poorivaba väliskiht ja vahust täidis. Seda on võimalik saavutada sama tootmisoperatsiooni käigus, sest kokkupuutes külma vormipinnaga moodustub toote pinnale ilma poorideta nahkjass kiht, mille paksus võib olla kuni 2 mm. Kihilise ehitusega tooteid võib saada ka kombineerides plaste: vahttäidis pritsitakse vormi, milles on õõnes, osaliselt vormitud plastist toorik.

### **Teised plastide vormimismeetodid**

Õhukeste plastist kilede või lehtede valmistamiseks kasutatakse **kalandrimist** (*calendering*). Protsessi täpsem kirjeldus on p 9.2.5. Kalandrimine seisneb poolsulas olekus plasti töötlemises valtside abil. Kalandrid on valtsidega masin plasti, paberi, naha, riide või muu materjali pinna silumiseks, läike andmiseks või mustri sissepressimiseks. Plast juhitakse läbi ühe või enama valtsirullide paari, kusjuures rullid pöörlevad vastupidises suunas. Kalandrid võivad koosneda erinevast arvust ja paigutusega valtsidest. Levinumad kalandri skeemid on esitatud Joonisel 14.12 (I-, S-, F-, Z- ja L-skeem). Valtside eesmärgiks on ühtaegu materjali vormimine, transportimine ning pinnale tekstuuri andmine (pind võib olla sile, mustri või ornamendiga).

Termoplastist ekstrudeeritud toodete kuju muutmiseks kasutatakse **valtsimist** (*rolling*). Lisaks kuju muutmisele on valtsimise või tõmbamise eesmärgiks kristalsuse suurendamine või polümeeriahelate orienteerimine soovitud suunas.

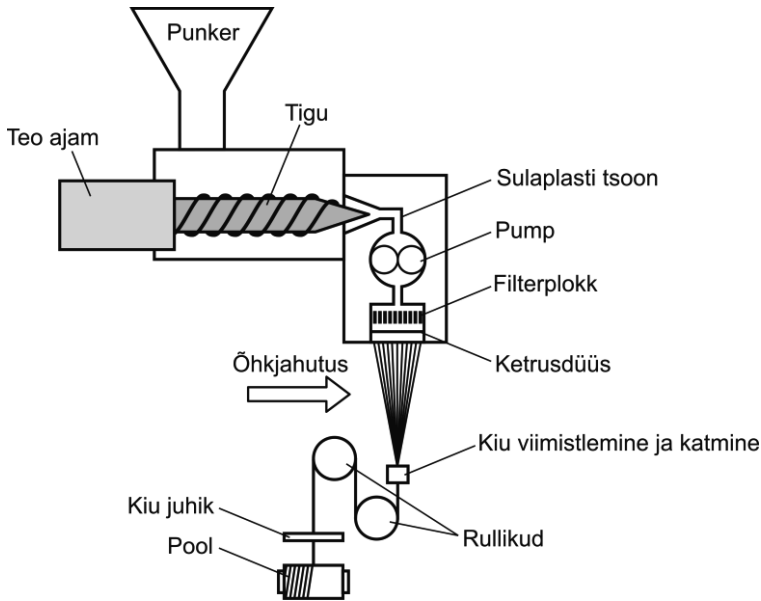
Kiudude tootmiseks kasutatakse **venitamist** ehk **tõmbamist** (*drawing*). **Filamente** (*filament*) (elementaarkiude) ja **kiude** (*fiber*) toodetakse **ketruse** (*spinning*) abil. Joonisel 14.13 kujutatud kiu ketrus kujutab endast modifitseeritud ekstrudeerimisprotsessi, milles sula plast pressitakse läbi paljude avadega **ketrusdüüsi** (*spinneret*), mida nimetatakse ka filjeeriks. Kiu formeerimine ehk ketrus on kiudude saamisprotsessi peamine osa. Sünteetiliste ja tehiskiudude saamise põhiseadmeks on ühe kuni mitmesaja avaga plaadikujuline filjeer. Protsess ise on ekstrusiooniprotsess, mille käigus sünteetilise polümeeri sula mass surutakse survega kuni 20 N/mm<sup>2</sup> läbi ketrusdüüsi avade. Polümeeri lahuste puhul ei kasutata ekstruderit, vaid hoopis lahusepumpa.



**Joonis 14.12.** Erinevad kalandrimisel kasutatavad valtside paigutuskeemid: a – I-skeem; b – S-skeem; c – F-skeem; d – Z-skeem; e – L-skeem

Tekib lõputu kiud. Eristama peab ekstrusiooni ja kiu formeerimise protsessi ning kiududest mehaanilisel teel valmistatava niidi tootmise protsessi, kuigi neid mõlemaid nimetatakse ketruseks. Filamente venitatakse eesmärgiga sirgestada neis olevaid makromolekule, mis märgatavalt tõstab kiudude tugevust ja vähendab venivust. Filamenti liikumiskiirus tema venitamisel on 300...6000 m/min. Enamik polümeerseid kiude, näiteks polüester-, polüamiid-, tselluloos- ja akrüülkiud leiavad kasutust tekstiilitööstuses. Üks võimalus paljudest filamentidest koosneva niidi või

lõnga saamiseks on kiu formeerimine koos samaaegse ketrusdüüsi pöörlemisega – nii saadakse niit, milles on kokku keerutatud suur hulk elementaarkiude.



Joonis 4.13. Kiudude sulaketrus

### 14.2.2. Plastide lõiketöötlemine

Plaste on võimalik freesida, saagida, puurida ja avasid keermestada sarnaselt metallidega. Kuna plastide omadused varieeruvad väga suurtes piirides, ei ole võimalik nende lõiketöötlemiseks anda soovitusi, mis kehtiksid kõikide plastide puhul. Kuna üldiselt on plastide soojusjuhtivus väike, jääb lõikeprotsessil eralduv soojus lõikepinna lähedasse materjali ning ei kandu lõiketsoonist ära eralduva laastu abil või haju töödeldavasse materjali. Termoplastid kipuvad lõiketöötlemisel pehmenema ja soojuslikult paisuma. Lisaks on sageli probleemiks voolav laast, mis takerdub lõikeinstrumendi ümbrusse. Lõiketöötlemise täpsust mõjutab tooriku elastne deformeerumine lõikejõudude tagajärjel, mis koos pehmenemisega kaasneva jäikuse langusega alandab töötlustäpsust. Reaktoplastide suurem jäikus ja vastupanu pehmenemisele võrreldes termoplastidega võimaldab lõiketöötlemisel saavutada suuremat täpsust.

Plastide madal soojusjuhtivus võib kaasa tuua ka probleeme tööriista püsivusega. Lõiketsoonis tõuseb tööriista temperatuur väga kõrgele ja tera kulub võrreldes metallide töötlemisega kiiremini, hoolimata sellest, et plasti kõvasus on oluliselt madalam. Kõvasulamterade püsivus on võrreldes kiirlõiketerasest lõiketeradega suurem, seda eriti juhul, kui lõikeoperatsioonide kestus on keskmise pikkusega ja

lõikekiirused on suured. Lõikevedelike kasutamine tõstab tööriista püsivust, kuid probleemiks võib olla töödeldava plasti pinna värvimuutus või paisumine. Lõikevedelikena kasutatakse valdavalt vesialuselisi emulsioone või vesiklaasi (naatrium-silikaat  $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$ ) lahjat lahust (vt samuti p 12.2.5. Lõiketöödeldavus).

Kujutäpsuse tagamiseks on tähtis lõikeinstrumendi õigeaegne teritus. Avade puurimisel annab parima tulemuse **sirgsoonpuur** (*straight-flute drill*) või tavalise spiraalpuuri ümberteritamisel selliselt, et lõikenurk on null (*zero-rake angle*). Freesimisel ja saagimisel valitakse lõikekiirus tavaliselt küllaltki suur, et parandada jahutust, etteandekiirus seevastu mõõdukas, et vältida lõikeinstrumendi ummistamist eralduva laastu poolt.

Alternatiivina mehaanilisele lõiketöötlemisele võib kasutada laserlõikust. Laserlõikusel aurustatakse lõiketsoonis materjal, lõiked on suure täpsusega ja lõikamisel ei eraldu jäätmeid laastuna. Lasertöötlemise abil saab töödelda üliväikese läbimõõduga avasid (nagu näiteks aerosoolpudeli difuusori ava). Klaaskiuga armeeritud plastide ja laminaatide töötlemisel laserlõikusega on eeliseks see, et välditakse lasertöötlemisel tervistkahjustava peentolmu teket, mis on probleemiks nende materjalide lõiketöötlemisel.

### 14.2.3. Viimistlus ja koosteoperatsioonid

Plastide üheks eeliseks on see, et nende värvitoon on kogu materjali paksuses ühtlane ning vormimisel saadud pind ei vaja täiendavat viimistlemist. Mõnikord on siiski plastist toodete pinda vaja viimistleda ehk dekoreerida. Selle all mõeldakse kaunistamist näiteks klepppiltidega ehk kleepsudega, värvimist, kuumstantsimist, trükkimist ja lamineerimist. Peale selle kasutatakse metalliseerimist. **Tampotrükki** (*tampography*) tehakse tampotrükimasinaga, mis korjab pehme kummitampooniga kirjavormi pealt värvi üles ja pressib selle tootele.

**Ofsettrükki** (*offset printing*) tehakse kahe värvirulliga, millest üks kannab värvi teisele, kujunditega rullile, ning see kannab kujundi tootele. Tindiprinter trükkib värvi toote pinnale tillukeste tilkadena, moodustades täpselt ettenähtud kujundeid. Printimine toimub kiiresti ja mustreid on kerge muuta.

Plastide liitmiseks kasutatakse eelkõige keevitust ja liimimist. Termoplastide keevitus on suhteliselt lihtne. Kleepitamiseks võidakse kasutada kuuma gaasileeki või ultraheli (vt p 11.5. Plastide keevitus). Plastide liimimist käsitletakse p 11.7. Liimimine. Kuna plastidel on võrreldes metallidega madalam elastusmoodul, saab plastdetailide puhul kasutada nn **plõksliidet** (*snap-fit*). Plõksliiteid kasutatakse kruvide, neetide ja liimi asemel. Sel juhul on detailid valmistatud spetsiaalselt plõksliite jaoks. Plõksliide fikseerub siis, kui detail on korrektselt vormitud. Plõksliite kvaliteet oleneb kokku-

pandavate detailide täpsusest ja elastsusest. Tingituna plastide suhteliselt madalast kõvadusest on võimalik plastdetailide ühendamiseks kasutada isepuurivad kruve.

#### **14.2.4. Plasttoodete projekteerimise iseärasused**

Kõikide tootmisoperatsioonide peamine eesmärk on tagada toode või detaili valmistamine vastavuses ettenähtud kvaliteedikriteeriumitega, vajalikul hulgal ja soovitud tootlikkusega. Tootmisele eelneb terve rida ettevalmistavaid tegevusi, millest üks olulisemaid on materjalide valik. Plastide kasutamine konstruktsioonimaterjalina on enamasti põhjendatud mõne plastile iseloomuliku omadusega: väikese tiheduse, korrosioonikindluse, väikese soojus- ja elektrijuhtivuse, tehnoloogilisuse (lihtsa tootmistehnoloogia) või plastile iseloomuliku värvitooni tõttu. Paraku tuleb lisaks neile positiivsetele omadustele silmas pidada ka teatavaid piiranguid, sest plastide tugevus ja jäikus on võrreldes metallidega palju kordi väiksem, neil on suur soojuspaisumine, roome mehaanilise koormuse (pinge) toimel, pehmenemine ja süttimine kõrgetel temperatuuridel, tagasihoidlik mõõtmepüsivus, värvuse ja omaduste muutumine aja möödudes ning kiirguse (sh päikesekiirguse) toimel.

Plastide peamised omadused on esitatud 6. peatükis (p 6.2. Plastid). Inseneri jaoks on oluline teada, et mingi konkreetse materjali omadused on määratud teatavates katsetingimustes. Plastid on koormamise kiiruse suhtes väga tundlikud. Standardsetes katsetingimustes määratud plasti tugevusomadused võivad teistes tingimustes saadud tulemustest erineda koguni mitmeid kordi, kui koormamise kiirust on alandatud 10 või 100 korda. Sama kehtib ka vastupidi: suurendades koormamise kiirust võib plasti tugevus olla 2...3 korda suurem. Plastide mehaanilised omadused on väga tundlikud temperatuurimuutuse suhtes: temperatuuri tõusul sulamis- ja pehmenemispiirkonda võib tugevus ja jäikus suhteliselt kitsas temperatuurivahemikus alaneda kordades. Plasti valikul peab olema väga täpne ettekujutus tootele mõjuvatest mehaanilistest koormustest, koormuse iseloomust (staatiline, dünaamiline, tsükliline jne), mõjuvatest temperatuuridest ja keskkonnatingimustest.

Teiseks oluliseks materjali valikut mõjutavaks teguriks on toote geomeetria sobilikuma tootmistehnoloogia leidmine. Paljudest võimalikest sobilikuma valimine eeldab nende eeliste ja puuduste täpset tundmist ja hoolikat analüüsi. Kvaliteetse toote saamiseks on vaja tunda ka selle tehnoloogiaga seotud peensusi. Vaatleme näiteks vormimisoperatsiooni, milles sulas või poolsulas olekus plast pressitakse vormipessa ja lastakse seal kõveneda. Vormi täielikuks täitumiseks tuleb doseerida materjal täpselt õiges koguses ja kujundada toitekanalid selliselt, et vorm täituks laitmatult. Vormis olev õhk tuleb juhtida vormist selle täitumisel välja nii, et tootesse ei jääks poore ega tühikuid. Plasti tardumisel ja edasisel jahtumisel toimub mahukahanemine ja tuleb tagada, et selle ebahütlus ei põhjustaks defekte (kahanemisingettest tingitud kõverdumist või isegi purunemist). Toote jahutamisel või tardumisel peavad

soojuslikud nähtused kulgema kontrollitud viisil. Lisaks peab mõtlema läbi meetodid, mille abil toode eemaldatakse vormist. Lõpptoote välimus, sh pinnaviimistlus ja mehaanilised omadused ning hind olenevad sellest, kuidas on õnnestunud kujundatud konstruktiivsed ja tehnoloogilised lahendused ja kas need on õigesti juurutatud. Toote lõppomadusi mõjutab suurel määral sulaplasi temperatuur, plasti voolamise suund, survevalul kasutatud pressimissurve, võimalik plasti termiline degradatsioon ja jahtumiskiirus vormis.

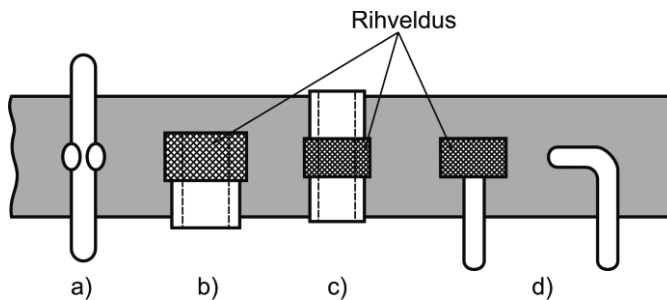
Kõikide vormitud toodete kuju puhul on oluline vältida järske üleminekuid: tuleb kasutada faase ja ümardusraadiusi ning tagada sulaplasi ühtlane voolamine vormis. Järsud üleminekud (seinapaksuse muutus, teravad nurgad, sooned jms) on mitteoovitavad ka seetõttu, et need kujutavad endast pingekontsentraatoreid. Sujuvad raadiused ja üleminekud alandavad vormide hinda (lihtsustavad valmistamist) ja pikendavad vormide püsivust. Raadius 0,25...0,40 mm on vähemärgatav, kuid vormi serva või nurga püsivuse seisukohalt ülioluline. Elektrotehnilistes toodetes ja seadistes on teravate nurkade olemasolu mittesoovitatav veel teisel põhjusel: tekkiv elektrilise pinge gradient võib kaasa tuua detaili purunemise.

Plastdetaili seinapaksus on tähtis veel seepärast, et plasti tardumiseks või kõvenemiseks vajalik aeg on määratud suurima seinapaksusega detaili osaga. Üldjuhul on soovitatav valida seinapaksused kogu toote ulatuses võimalikult ligilähedased, sest ebaühtlase tardumise ja jahtumise tulemuseks on sageli mehaanilised pinged detailis ja detaili kõverdumine. Samas peavad valitud seinapaksused täitma minimaalselt vajalikud tugevus- ja jäikusnõuded. Tugevusarvutustes võetakse arvesse mõjuvaid koorusi, konkreetse plasti omadusi ja töölusmeetodit. Survevalatud detailide puhul on minimaalne detaili seinapaksus väikeste detailide korral 1,25 mm, keskmise suurusega detailide korral 2,0 mm ja suuremate detailide korral 3,5 mm. Detaili nurkades tuleks vältida materjali paksenemist, sest sinna võivad koguneda gaasitühimikud, võib esineda mittetäielik kõvenemine või alguse saada praod. Kui detaili nurkades on vaja suuremat jäikust või tugevust, kasutatakse selleks tugevus- ja jäikusribisid. Majanduslikult tasuva tootmise eelduseks on toodete piisav kujutäpsus. Suurimaks vormi eralduspinnaga paralleelse pinna lubatavaks hälbeks peetakse 0,08 mm. Eralduspinnaga ristiasetsevate pindade maksimaalne lubatav hälve on kuni 0,25 mm.

Kuna kasutatakse korduvkasutusvorme, tuleb tähelepanu pöörata ka detaili vormist eemaldamisele. Metallvormi projekteerimisel tuleb tagada, et vorm oleks lihtsalt avatav ja suletav. Nähakse ette vajaliku suurusega kalded detaili pindadel, et tagada detaili vormist eemaldamise lihtsus. Toote välispinnal tuleks võimalusel vältida sügavaid sooni, sest need raskendavad tunduvalt toote eemaldamist vormist (kui ei kasutata mitmeosalist lahtivõetavat vormi). Sel juhul muutub vorm tunduvalt keerukamaks ja kallimaks, ühtlasi suurenevad vormi hoolduskulud ja pikeneb tsüklaeg.

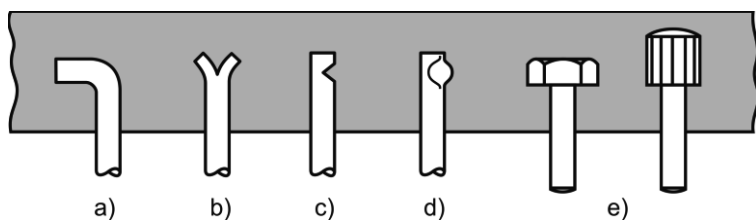
## Sisetükid

Plastidega koos kasutatakse küllaltki sageli sissevormitavaid detaile ehk **sisetükke** (*inserts*). Sisetükid on tavaliselt terasest või messingist. Survevalu või mõne muu vormimismeetodiga on keeruline vormida plastidetaili keermestatud avasid. Plastidetaili sisse keermestatud ava töötlemine nõuab eraldi tötlusoperatsiooni. Mõlemal juhul on keermesliite tugevus plasti puhul suhteliselt väike. Seepärast ongi otstarbekas detaili vormida metallist sisetükk, millesse on vajalikud avad/keermed juba varasemalt töödeldud. Metallist sisetükki kasutatakse eriti siis, kui eeldatakse, et keermesliidet tuleb koostus suhteliselt sageli avada ning kui liitele mõjuvad suured mehaanilised koormused. Joonisel 14.14 on kujutatud mõned tüüpilised plasti sisse vormitud metallist sisetükid.



**Joonis 14.14.** Tüüpilised sisetükid: a – kahepoolne montaažitapp; b – umbne keermestatud ava; c – läbiv keermestatud ava; d – kaks eri tüüpi kinnitusega ühepoolset montaažitappi

Sisetükk peab olema projekteeritud viisil, et see suudaks vastu võtta mõjuvad väände-, tõmbe- ja nihkepingsed. Sageli töödeldakse sisetükki sooned või rihveldatakse selle pind, et pakkuda piisava tugevusega mehaanilist liidet. Keskmise või jämeda rihveldusega sisetükk kannab hästi väändekoormust, kuid suudab taluda vaid mõõdukaid teljesuunalisi jõudusid. Ringsoontega sisetükk kannab hästi tõmbe- ja survejõudusid, kuid ei oma vastupanu väändemomendile. Pikisoontega sisetükk seevastu suudab taluda suuri pöördemomente, kuid ei sobi teljesuunaliste koormuste korral. Sisetüki pea võidakse paremaks kinnitamiseks lõhestada, painutada või varustada erisuunaliste soontega. Kinnitamiseks sobivad ka asümmeetrilised või mittesilindrilised pead. Mõned enam levinud sisetükkide kinnitused on esitatud Joonisel 14.15.



**Joonis 14.15.** Erinevad võimalused metallist sisetükkide ankurdamiseks plasti sisse: a – pea painutamine; b – lõhestamine; c – soonimine; d – muljumine; e – erinevad pöörd-sümmeetrilised pead

Juhul kui sisetükk on keermestatud (kasutatakse näiteks koostus detailide kinnitamiseks), siis on soovitatav, et sisetüki baaspind ulatuks plastist pisut välja. Vastasel korral võivad sisetükis tekkida ebasoovitavad teljesuunalised pinged mutri pingutamisel. Kui sisetüki eesmärgiks on hõlbustada koostamist (sõrm või tapp detailide juhtimiseks koostus täpselt ettenähtud asendisse), siis peab sisetükk paiknema pinnaga tasa. Alati peab sisetüki ümber olema piisavalt plasti, et vastu võtta selle kaudu detailile mõjuv koormus: vähim plasti paksus või kaugus detaili servast peaks olema vähemalt pool sisetüki läbimõõdust.

### **Pinnaviimistlusega seotud projekteerimispõhimõtted**

Plasttoodete puhul on sageli väga tähtis laitmatu pinnaviimistlus. Sobiv pinnaviimistlus saadakse üldiselt vormimisoperatsiooni käigus ja vajalik on vaid minimaalne järeltöötlus.

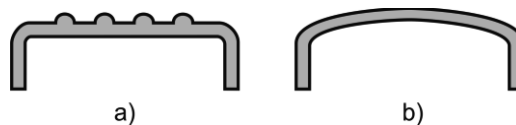
Plastdetailide järeltöötlamine algab sageli lõikamise ja ääre viimistlusega (kraadi eemaldamisega). Kraat tuleb eemaldada nii detaili välisilme kui mõõtmete täpsuse pärast. Seda operatsiooni nimetatakse **kraatimiseks** (trimming). Peale kraadi võib vormist väljavõetavate detailide küljes olla mitmesuguse kujuga hargnevaid moodustisi. Enamasti on tegemist valukanaleid täitnud materjaliga, mis tuleb ära lõigata ilma detailile märgatavat jälge jätmata.

Dekoreerimine on kraatimise kõrval teine oluline järeltöötlemisviis. Survevaludetaili pinnale kirjade või piltide saamiseks on üks võimalus jäljendi söövitamine vormi pinnale. Söövitatud jäljendi abil saadakse tootele kujutised, mis ulatuvad kuni 0,01 mm toote pinnast välja. Kui soovitakse sügavamat jäljendit (kõrgemat reljeefi) tuleb kasutada graveerimist, mis tõstab vormi hinda. Süvisreljeefe peaks võimaluselurvevalutootes vältima, sest selleks on vaja vormi reljeefset pinda ja see tõstab märkimisväärselt vormi maksumust. Üheks võimaluseks on kujundada kõik süviskirjad ühte detaili piirkonda ning näha vaid selles piirkonnas ette vormi pinnal vajalik töötlusvaru.



Plasttooted tuleks projekteerida selliselt, et mehaanilise järeltöötamise vajadus oleks minimaalne. Eriti tähtis on see nende pindade puhul, mis jäävad valmistootes tarbijale nähtavaks. Peab arvesse võtma, et enamik plaste sisaldab lisaks polümeerile pulbrilisi või kiulisi täiteaineid. Vormitud toodete välispinnal on alati polümeerikiht (kasvõi imeõhukese kilena) ja täiteaine osakesed ei ulatu pinnale. See polümeerikiht annabki detailile omase värvuse või läike. Pinna mehaanilise töötlemise tulemusena paljastatakse välispinnale täiteaine osakesed ja pinna optilisi omadusi (värvus, läige) ei ole võimalik enam taastada. Töödeldud kohast on võimalik ka vee adsorptsioon tootesse.

Kuna plasti elastsusmoodul on suhteliselt madal, on soovitatav plasttoodete projekteerimisel vältida suuri tasapinnalisi osasid. Jäikuse suurendamiseks on võimalik kasutada ribisid või ette näha teatav kumerusega pind (Joonis 14.16).



**Joonis 14.16.** Suurte tasapindsete plastpindade jäikust saab suurendada (a) ribisid või (b) pinna kumerust kasutades

Lisaks võivad tekkida plasti voolamisjäljed, mis tasapindsetel osadel on eriti selgelt märgatavad. Siledatel tasapindadel torkavad hästi silma ka toote kasutamisel tekkivad kriimustused. Välispinnal olevad ribid on seega kahe eesmärgiga: tõsta toote jäikust ja peita kasutuse käigus tekkivaid kriimustusi. Esteetilistel kaalutlustel võidakse välispinnal kasutada väga mitmesugust tekstuuri (sooned, mummud, jäljendid, muster jne).

Juhul kui survevalutootesse projekteeritakse avad, mis hiljem keermestatakse või millesse keeratakse isepuurivad kruvid, on vajalik, et avad projekteeritaks piisava faasiga. Vastasel korral on raskendatud keermestamine või on oht kildude eraldumiseks ava servast keermestamisel. Avad läbimõõduga alla 6,0 mm vormitakse tavaliselt ilma keermeta; keermestatakse hiljem eraldi operatsiooniga. Juhul kui keermeläbimõõt on üle 6,0 mm, on soovitatav kasutada sisetükki või keere vormida. Viimane variant ei ole siiski üldjuhul majanduslikult otstarbekas, sest tsükliäeg pikeneb tunduvalt toote vormist eemaldamise keerukuse tõttu.

### 14.2.5. Kummi ja elastomeeride töötlemine

Kummi ja elastomeere saab vormida väga mitmete tehnoloogiate abil. Suhteliselt õhukeseseinalisi tooteid, millel on ühtlane seinapaksus, nagu näiteks kummikud, kindad jms valmistatakse **sukeldamise** (*dipping*) meetodil. Esmalt valmistatakse metallist mudel. Mudel sukeldatakse korduvalt vedelasse kummisegusse või kompaundi (valmistatud naturaalse kummi, lateksi, neopreeni või silikooni baasil). Iga sissekastmisega jääb vormi pinnale õhuke kiht vedelat kummisegu, mis paljude

tsükli tagajärjel kasvab ettenähtud paksusega kihiks. Vulkaniseerimine viiakse läbi tavaliselt kuuma auru abil, misjärel eemaldatakse toode vormilt.

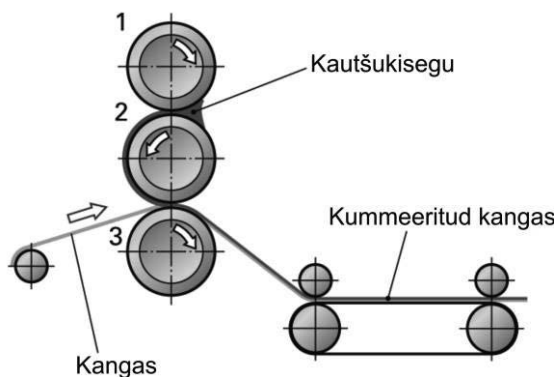
Sukeldamist saab kiirendada elektrostaatilise välja abil. Lateksiosakestele antakse negatiivne laeng ja vormile või mudelile positiivne laeng. Välja tekitamiseks võib kasutada vooluallikat või spetsiaalset pinnet, millest vabanevad positiivsed ioonid lahusesse kastmisel. Laetud osakestele mõjuvad jõud sunnivad elastomeeri osakesi liikuma vormi pinnale ja selle meetodiga on võimalik suurem elastomeeri kihi kasvukiirus võrreldes tavaprotsessiga. **Elektrostaatilise sadestamisega** (*electrostatic deposition*) saab paljusid tooteid valmistada üheainsa sukeldamisega.

Juhul kui tooted on suurema seinapaksuse või keerukama kujuga, valmistatakse kummist, täiteainest, antioksidandist, kiirendajast ja pigmentidest kompaund. Homogeense segu saamiseks kasutatakse tavaliselt spetsiaalset segamisseadet, mida nimetatakse **kompaundriks** (*compounder*). Eeltöötleses kasutatavatest perioodilise toimega segamisseadmetest on levinuim ja efektiivseim nn *Branbury* segur. Segatavad ained surutakse kambrisse, kus pöörlevad segamispead tekitavad samaaegselt sulamassi venitus- kui ka nihkedeformatsioone. Selline segamine on eriti efektiivne tahkete aglomeraatide disperseerimiseks (hajutamiseks) sulapolümeeri maatriksisse. Seetõttu kasutataksegi *Branbury* segurit peamiselt tahma segamiseks kummiga enne selle vulkaniseerimist. Kummist toodetele kuju andmiseks kasutatakse põhimõtteliselt samu tehnoloogiaid, mida kirjeldati eespool plastide korral. Levinud on valamine (survevalu), valupressimine, survevormimine ja spetsiaalsed võtted vahttoodete saamiseks. Uretaanist ja silikoonist detaile saab valmistada vabavalu teel.

Kummist ja elastomeerist lehttoodete saamiseks kasutatakse **kalandrit** (*calender*), nagu on näidatud Joonisel 14.17. Ettekuumutatud kompaund antakse pöörlevate valtsirullide vahelisse pilusse ja saaduseks on 0,3...1 mm paksune lehtmaterjal.

Kalandrid võivad olla kolme- või nelja rulliga ning neid kasutatakse sageli kanga katmiseks kummimassiga (või ka kummimassi tugevdamiseks koortiga) ehk **kummeerimiseks** (*rubbering*). Kolme rulliga kalandri abil saab ühe läbimiga katta kanga ühe külje kummiga. Nelja rulliga kalandri abil saab ühe läbimiga katta kummikihiga kanga mõlemad küljed. Kummiga impregneeritud kangaid valmistatakse veel sukeldusmeetodi abil, pihustades või kandes jaotuspeaga kummiemulsiooni kangale ja eemaldades seejärel lahusti. Kummeerimisel pöörleb kummimassi kandevaltsirull (2) valtsirullist (3) umbes 10 % suurema kiirusega (Joonis 14.17).

Eraldi meetodiks on **skimmimine** (*skimming*), mis kujutab endast kummeerimise üht eriliiki selle erinevusega, et valtsirullid pöörlevad võrdse kiirusega. Skimmimisel on kummikompaund lahustatud orgaanilises lahustis ning spetsiaalse tera (*Doctor blade*) abil eemaldatakse üleliigne kompaund kummeeritavalt kangalt.



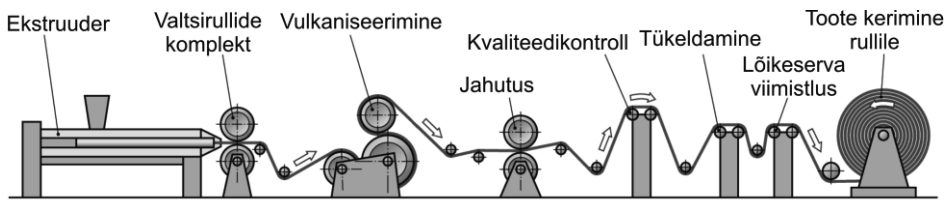
**Joonis 14.17.** Kanga kummeerimine kalandri abil

**Kalandrimise** (*calendering*) abil saadud kummikihiga pinnatud tooted on üldiselt pooltooted: neid kasutatakse sõidukite rehvide, konveierilintide ja kiilrihmade jms valmistamiseks, kusjuures vulkaniseerimine toimub tavaliselt toote vormimisel.

Kummitooteid, nagu näiteks aiakastmisvoolikud, torud, kummist profiiltooted jms saadakse ekstrusiooni abil. Elastomeeri kompaundi ekstrudeerimine toimub sarnaselt plastide jaotises kirjeldatule (vt p 14.2.1. Plasttoodete vormimine).

Kummitoodete valmistamise juures on oluliseks ja kriitilise tähtsusega operatsiooniks **vulkaniseerimine** (*vulcanization*). Selle tulemusel saavutab kummi vajaliku jäikuse ja tugevuse, säilitades talle omase elastsuse. Peamiseks ristsidemete moodustajaks on väävel (küllastamata ahelaga polümeeride, näiteks silikoonide jaoks teised ühendid, näiteks erinevad peroksiidid), mis segatakse kompaundi (vt p 6.3. Elastomeerid).

Vormimisel hoitakse vormi ettenähtud aja jooksul kõrgemal temperatuuril. Olenevalt kummisegust on temperatuur tavaliselt vahemikus 140...200 °C. Üldreeglina lüheneb temperatuurivahemikus 140...170 °C vulkaniseerimiseks vajalik aeg kaks korda, kui temperatuuri tõsta 10 °C võrra. Silikoonkummi korral on temperatuur umbes 200 °C, vulkaniseerimise aeg 6...16 h. Vulkaniseeritakse üldjuhul kuumalt (siis kasutatakse sidememoodustajana peamiselt väävlit), kuid olemas on ka külmvulkaniseerimisprotsess (lahustina kasutatakse kergbenssiini ja sidememoodustajana S<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>). Vulkaniseeritakse pärast toote vormimisoperatsiooni. Saritootmises kuumutatakse tooteid autoklaavis auru- või õhukeskkonnas. Pidevtootmisel (profiiltoodete vulkaniseerimine) kasutatakse kuuma õhu tunnelit või kuumutatavaid rulle. Joonisel 14.18 on näiteks elastomeerse profiiltoote pidevtootmise liini põhimõtteskeem.



Joonis 14.18. Elastomeerse profiiltoote pidevtootmise liini põhimõtteskeem

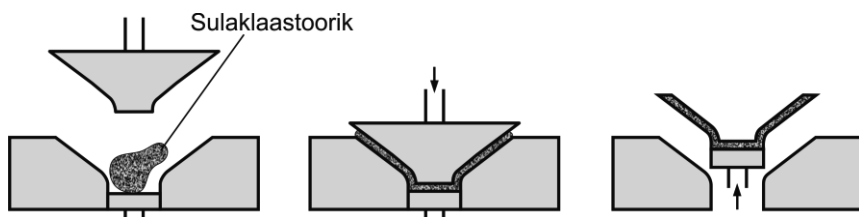
## 14.3. KERAAMIKA TEHNOLOOGIA

Keraamiliste materjalide valmistusmeetodid jagunevad kahte rühma lähtuvalt töödeldavate materjalide omadustest. **Klaase** (*glasses*) saab töödelda **viskooses olekus** (*viscous state*). **Kristalsele keraamikale** (*crystalline ceramics*), eelkõige tehnokraamikale, on omane haprus ning nendest toodete saamiseks pressitakse keraamilisest materjalist esmalt pulbertoorikud, mida kuivatatakse ning milles pulbriosakeste vaheline side saavutatakse kas keemilise reaktsiooni, vitrifikatsiooni (vedelmaterjaliga immutus) või tardfaaspaagutuse abil.

### 14.3.1. Klaasitoodete tehnoloogia

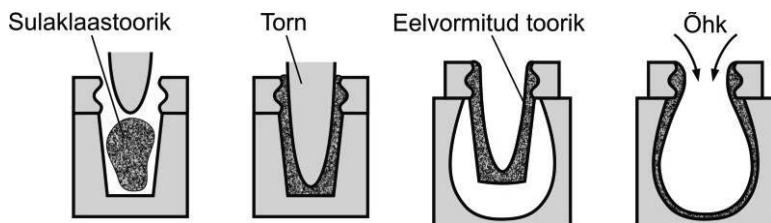
Klaasi vormitakse üldjuhul kõrgel temperatuuril, kus sulaklaasi viskoossust saab muuta. Enamik tehnoloogilisi operatsioone viiakse läbi temperatuurivahemikus 1000...1200 °C. Lehtklaas ja klaasiriba toodetakse ekstrusiooni abil, milles sulaklaasi mass pressitakse läbi kitsa suulise vesijahutusega valtsirullide vahele, või sulatina vanni pealmise kihina, tuntud **floatklaasina** (*float glass*). Klaasist kujutooteid (näiteks suuremaid läätsesid) saab valmistada valumeetodil: klaasist detail valatakse otse valuvormi. Selle meetodi puhul jälgitakse täpselt detaili jahtumiskiirust nii sulaku kui ka tardolekus. Üldjuhul jahutatakse detail maha nii aeglaselt kui võimalik, vältides või vähemalt piirates selle abil sisepingete teket. Klaasist detaile saab valada rotovormimise abil, ühtlase ristlõikega klaasist profiiltooteid ekstrudeeritakse.

Joonisel 14.19 on kujutatud klaasist detaili vormimine survevormimise meetodil. Vormipesa moodustavad vastava kujuga metallvormi ülemine ja alumine pool, mille abil antakse sulaklaasile vastav kuju.



**Joonis 14.19.** Sulaklaasist toote vormimine survevormimise abil

Meetod sarnaneb metalli kuumvormstantsimisega suletud vormis. Nii valmistatakse näiteks klaasist taldrikuid ja küpsetuspanne. Iidsetest aegadest on tuntud klaasipuhumine ehk puhumisvormimine. Nii valmistatakse tavaliselt õhukeseseinalisi õõnestooteid (purgid, pudelid, mahutid). Puhumisvormimisel (Joonisel 14.20) vormitakse templi abil esmalt õõnes **sulaklaastoorik** (*gob*), mis venitatakse suruõhu abil seejärel vormipesa kujuliseks.



**Joonis 14.20.** Õhukeseseinalisi klaasist tooteid saadakse puhumismeetodil. Klaasidetaili toorik vormitakse esmalt vormis

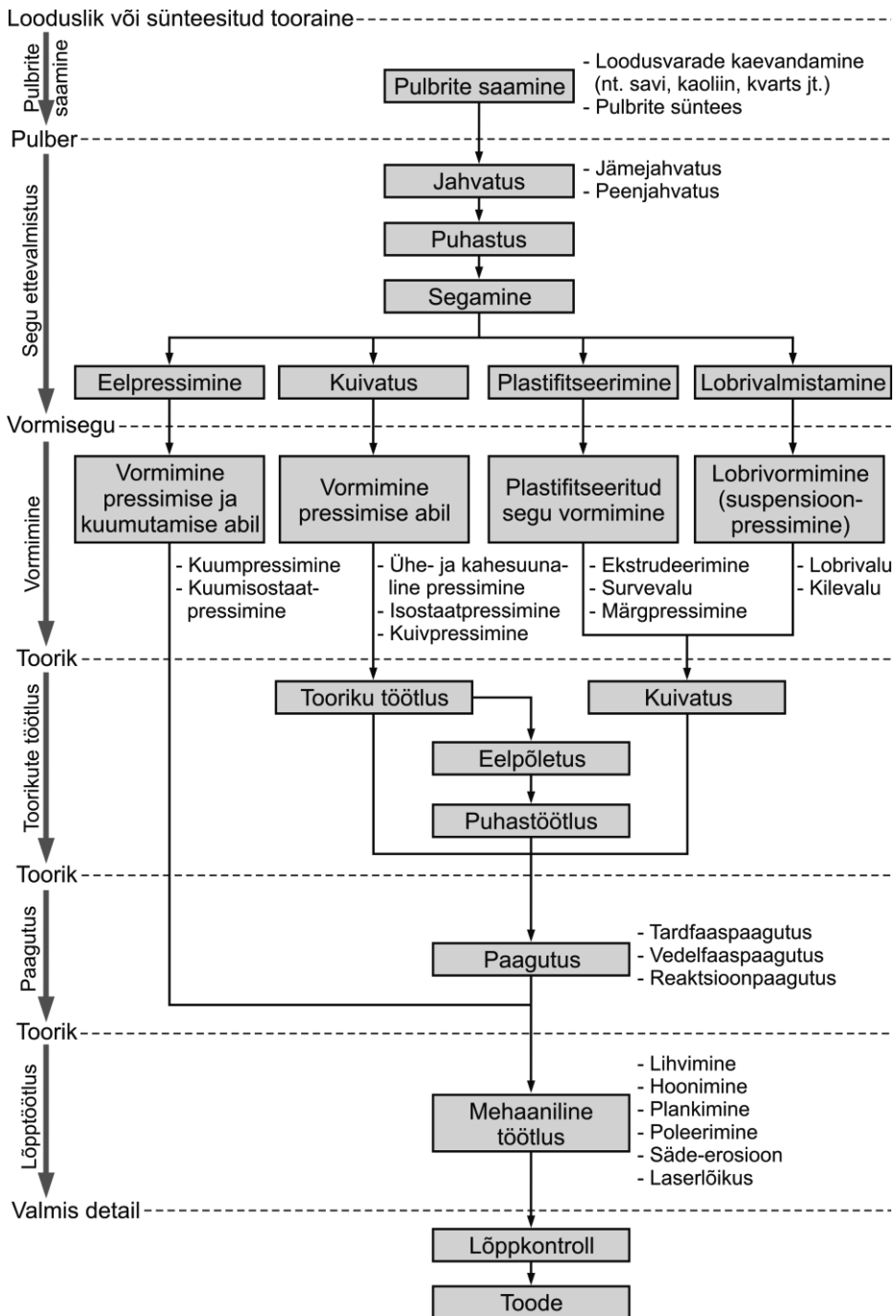
Tänapäeval kasutatakse väga erinevates rakendustes klaaskiudu: soojusisolatsioonimaterjalina, õhu- ja vedelikufiltrina, heliisolatsioonimaterjalina, polümeerkomposiitides armatuurina, erinevate kangaste ja tekstiiltoodete valmistamiseks, valgusoptilistes kaablites jne. Kui lühikesed kiud ja nende juhuslik asetused on aktsepteeritavad, saab kiudusid valmistada sulaklaasi valu abil pöörlevasse trumlisse, milles on palju väikeseid avasid (düüse). Pikki klaaskiude valmistatakse tavaliselt ekstruuderite abil ning kiud saadakse paljude avadega ketrusdüüside abil. Klaaskiudude pinnale kantakse erinevad pinnakatted, et nende pinda kaitsta ja alandada hõõrdetegurit (kasutatakse erinevaid määrdetegu- ja vahenditeid).

Klaastooteid tuleb tavaliselt vormimise järel termotöödelda. Kõige tavalisem töötlusviis on **lõõmutamine** (*annealing*), mille eesmärgiks on soovimatutest jääkpingetest vabanemine. Jääkpinged tekivad vormimisel ja sellele järgneval jahtumisel. Lõõmutamine on tavaliselt detailide kuumutamine temperatuurini umbes 500 °C, seisutamine ja järgnevalt jahutamine.

Soovitava suurusega survepinged klaasis tekitatakse **klaasi karastamise** (*glass tempering*) abil; ingliskeelne termin on mõnevõrra eksitav. Klaasi karastamise põhimõte on järgmine: klaas kuumutatakse temperatuurini, mis on kõrgem lõõmutus-temperatuurist ja seisutatakse sellel, kuni kogu ristlõike ulatuses on temperatuur ühtlustunud. Seejärel jahutatakse klaasi välispinnad järsult alla, kasutades selleks tavaliselt õhujugasid. Klaasi välispindadel toimub kiire jahtumise tagajärjel klaasi kahanemine ja kõrgemal temperatuuril olev klaasi osa muudab selle toimet kuju. Seejärel hakkab temperatuur klaasi ristlõikes ühtlustuma ning ka klaasi siseosa hakkab jahtudes kokku tõmbuma. Selleks ajaks on aga väliskihid juba kokku tõmbunud ja neisse tekivad massiivsema siseosa kahanemisel survepinged. Lõpptulemusena saadud toode – **karastatud klaas** (*tempered glass*) on võrreldes tavalise klaasiga tunduvalt tugevam ja purunemiskindlam. Selle põhjuseks on asjaolu, et purunemiseks vajalikud praod ei saa kasvada, kui väliskihis mõjuvad suured survepinged. Karastatud klaasi purustamisel puruneb see paljudeks väikesteks kildudeks, millega on võrreldes tavaklaasiga võimalus end tõsiselt vigastada palju väiksem.

Karastatud klaasi saab valmistada ka keemilise töötamise abil, mida nimetatakse ka **keemiliseks karastamiseks** (*chemical tempering*). Klaasi kuumutatakse sulasoola vannis (ammooniumnitraat  $\text{KNO}_3$ , naatriumnitraadis  $\text{NaNO}_2$  või kaaliumsulfaadis  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), mille tulemusena toimuv difusioon või ioonvahetusprotsess (suurema aatomraadiusega aatomid asendavad materjali väliskihis väiksema aatomraadiusega aatomeid) toob kaasa survepingete tekke väliskihis. Tulenevalt protsessi iseloomust saab keemilise karastuse abil võrreldes tavakarastusega töödelda keerukama kujuga tooteid.

Klaaskeraamilisi tooteid – materjale, mis koosnevad osalt kristalsest keraamikast ja osalt amorfsest klaasist, saadakse **devitrifikatsiooni** (*devitrification*) abil. Esmalt vormitakse klaasist detailid ja seejärel viiakse läbi spetsiifiline termotöötlus. Selle eesmärgiks on kristalse faasi keskmete teke ja kasvatamine, mis on stabiilsem ja vastab madalaima energiaga (tasakaalulise) olekule. Saadud kahefaasiline materjal on suurema tugevuse ja sitkusega ning väikese joonpaisumisteguriga. Tüüpilised klaaskeraamilised tooted on erinevad küpsetusnõud, kuumuskindlad köögitarvikud, keraamilised pliidiplaadid ja elektriseadmete detailid.



Joonis 14.21. Keraamilistest materjalidest toodete tootmis- ja töötlemisprotsessid

### 14.3.2. Tehnokeraamika tehnoloogia

Kristalset keraamikat, eelkõige tehnokeeraamikat iseloomustab suur kõvadus, haprus ja kõrge sulamistemperatuur. Tehnokeraamika valmistamiseks kasutatakse enamasti traditsioonilise pulbermetallurgia meetodit (vt p 10.4. Pulbermaterjali vormimine), millest tehnokeeraamika tehnoloogia erineb eelkõige pulbrite valmistamise, paagutamise ja täiendava töötlemise poolest. Heade füüsikalise-mehaaniliste omadustega tehnokeeraamika saamiseks on vajalikud puhtad (kontrollitava koostisega) peened pulbrid. Joonisel 14.21 on näidatud keraamiliste materjalide valmistamise põhiastmed.

#### Pulbrite saamine

Tehnokeeraamikas lähtematerjalina kasutatavaid rasksulavaid ühendeid, peale oksiidide ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ), looduses vabal kujul ei esine. Ka oksiidide tuleb eelnevalt töödelda, enne kui neid saab tehnokeeraamikas kasutada.

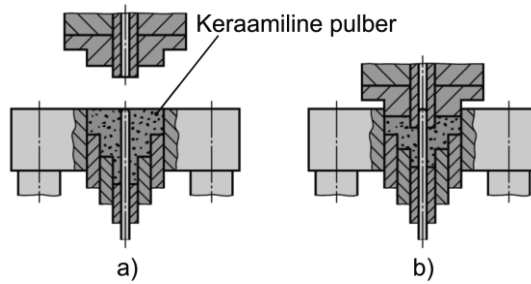
Pulbrite saamine seisneb rasksulava keemilise ühendi sünteesis ja vajaduse korral sünteesil saadud pulbri täiendavas mehaanilises peenestamises. Enam levinud keraamiliste pulbrite valmistamise meetodid on sadestamine soolalahustest, **sool-geelprotsess** (*sol-gel process*), aurufaasist kondenseerumine, laser- ja plasmakeemiline süntees, iselevikõrgtemperatuurisüntees. Kasutatakse ka jahvatamist kuul- ja vibroveskeis ning attriitoreis nii iseseisva valmistamisviisina kui ka mõne eelneva saamisviisi täiendusena. Igal saamisviisil on omad positiivsed ja negatiivsed küljed. Saamisviisi valikul lähtutakse keraamikale esitavatest nõuetest ja omahinnast (võrdle metallpulbrite saamisega p 10.2.1).

#### Vormimine

Keraamiliste pulbrite vormimiseks kasutatakse kõiki pulbertehnoloogias kasutatavaid vormimismeetodeid (vt p 10.4. Pulbermaterjali vormimine): pressimine, lobrivalu, pulbersurvevalu, ekstrudeerimine, kuumpressimine, kuumisostaatpressimine (HIP). Pressimine võib toimuda kuivalt või märjalt, normaaltemperatuuril või kuumalt.

**Pressimine** (*pressing*) (vt Joonis 14.22) on levinuim vormimise viise. Kuna keraamilised pulbrid on kõvad ja haprad, siis pressimise hõlbustamiseks ja pressise (tooriku) koospüsimiseks lisatakse enne pressimist plastifikaatoreid, mis kuumutamisel eemalduvad materjalist täielikult. Sellisteks plastifikaatoriteks on tavaliselt mitmesugused orgaanilised ained nagu parafiin, polüetüleenglükool, polüvinüülpiiritus jt.

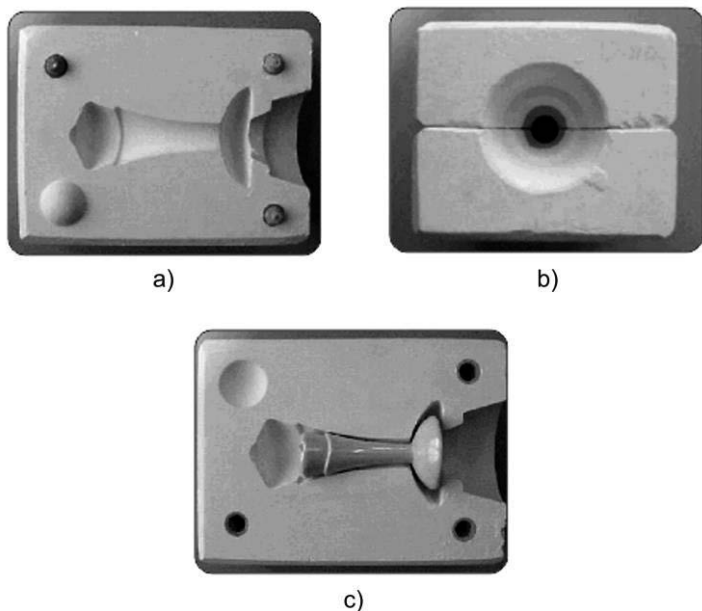




**Joonis 14.22.** Vormimine pressvormis: a – vormi täitmine; b – pressimine

**Pulbersurvevalu** ehk **injektsioonvormimine** (*powder injection molding*) on keraamiliste toodete saamise põhilisi viise; kasutatakse ka ekstrudeerimist. Sarnaselt metallide ja plastide survevalule saab ka keraamilisi materjale vormida survevalu meetodil. Keraamiline pulber segatakse polümeermaterjaliga (plastifikaatoriga) ning temperatuuril 125...150 °C pressitakse segu alumiiniumisulamist vormi survele 30...100 N/mm<sup>2</sup>. Olenevalt toote massist on umbes 30 s pärast võimalik toorik vormist eemaldada. Plastifikaatori eemaldamiseks kasutatakse termilist (väljasulatamine), keemilist (lahustamine) või katalüütilist meetodit, misjärel toorik paagutatakse. Nagu teiste pulbermetallurgiliste meetodite puhul, tuleb arvestada tooriku märkimisväärse kahanemisega paagutamisel. Survevalatud detailid on tavaliselt väikeste mõõtmetega: nende suurim nimimõõde ei ületa 100 mm, seinapaksus tavaliselt <6 mm, ja kujutäpsus kuni 1 %. Enamik pulbersurvevalatud detaile on oksiidkeraamikast (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>), aga ka ränikarbiidist (SiC) ja räninitriidist (SiN).

**Lobrivalu** (*slip casting*) (Joonis 14.23) on laialt kasutatav vormimise meetod. **Lobri** (*slip, slurry*) saadakse vajalikus koguses vedelikku pulbrisegule lisades, mis tagab lobri voolavuse vormi. Lobri valatakse poorsesse kipsist või keraamilisse vormi. Liigne vedelik imbub vormi pooridesse ja pärast kuivamist võetakse toorik vormist välja (vt Joonis 10.12). Protsessi kiirendamiseks saab lobri valada rõhu all, vormile rakendada vaakumit või tsentrifugaaljõude, mis aitavad kaasa lobris sisalduva vedeliku eraldumisele. Lobrivalu abil saab valmistada ka õhnestooteid. Sel juhul valatakse vormist välja üleliigne lobri, pärast seda kui vormi seinale on tekkinud piisavalt paks tahke keraamilise massi kiht. Protsess võimaldab vormida väga keerulise kujuga detaile. Protsessi puuduseks on väike tootlikkus ja tooriku suur poorsus ning sellest tulenevalt suur kahanemine paagutamisel, kuju moonutused ja madalad mehaanilised omadused. Lobrivalu abil toodetakse näiteks sanitaartehtnilisi esemeid, lauanõusid ja kemikaalitööstuses kasutatavaid keraamilisi tarvikuid.



**Joonis 14.23.** Lobrivalu etapid vasakult paremale: vormi pool, koostatud vormipooled, paagutatud toode vormis. *Fotod: Dynamic-Ceramic Ltd*

Lobrivalu üheks eriliigiks on kuumlobrivalu, kus pulbrisegu muutub kuumutamisel vedelaks (lobriks), kuna lisatud parafiin, polüvinüülpiiritus või vaha sulavad. Pärast valamist vorm jahtub ja tooriku saab vormist välja võtta.

**Kilevalu** (*tape casting, doctor-blade process*) korral valatakse alusele kindla paksusega õhuke lobrikiht. Lobris sisalduv vedelik aurustatakse ning tulemuseks on õhuke, plastne keraamiline lehttoorik, mis on väga sile ja ühtlase paksusega. Sellist kilet või teipi kasutatakse kihiliste keraamiliste elektroonikakomponentide ja kondensaatorite valmistamiseks.

Sideaineid sisaldavaid lobrisid ja neil põhinevaid valumeetodeid võidakse kasutada ka mööbli töötasapindade valamiseks või hambatäidistena. Kui sideaine on hea nakkuvusega, on selle abil võimalik katta keraamilise pindega torude siseõõsi: lobri pumbatakse läbi toru ja osa sellest kleepub toru sisepinnale.

Keraamiliste pinnete, kiudude ja monoliittoodete saamiseks on välja arendatud erinevad **sool-geel-meetodid** (*sol-gel process*). Meetod põhineb soolide (mis kujutavad endast lahuseid või kolloidse dispersiooniastmega süsteeme) kasutusel. Soolist moodustub molekulaarse polümerisatsiooniprotsessi tulemusena geel, mis seejärel kuivatatakse. Meetodi eelis on saaduse suur puhtus ja materjali homogeensus, madalam põletustemperatuur ja peenem tera. Puudusteks on lähtematerjali suhteliselt kõrge hind, suur kahanemine ja protsessi pikk kestus.

Tabelis 14.1 on esitatud enamik tähtsamaid keraamiliste materjalide vormimiseks kasutatavaid meetodeid.

**Tabel 14.1.** Kristalse keraamika valmistusmeetodid

Meetod	Lähtematerjal	Eelised, omadused	Puudused, piirangud
Ühe- või kahepoolne pressimine	Kuiv pulber	Madal hind, automatiseeritav	Piiratud suurusega ristlõige, tiheduse gradient
Isostaatpressimine	Kuiv pulber	Ühtlane tihedus, muutuva ristlõikega tooted, automatiseeritav	Pikk tsükliäeg, vähe detaile tsükli kohta
Lobrivalu	Lobri	Suured mõõtmed, keerukas kuju, suhteliselt odav vorm	Pikk tsükliäeg, tööjõumahukas
Pulbersurvevalu	Keraamika-plasti segu	Keeruka ristlõikega detailid, kiire, automatiseeritav, suured seeriad	Plastifikaator tuleb eemaldada, kallid vormid ja seadmed
Ekstrusioon	Keraamika-plasti segu	Suhteliselt odav, mitmesuguse kujuga tooted (erinevad ristlõiked, profiiltooted, pikad tooted)	Plastifikaator tuleb eemaldada, osakesed orienteeritud voolamise suunas
Savitehnoloogia	Savi, vesi ja lisandid	Lihne vormida, mitmesuguse suuruse ja kujuga tooted	Omadused olenevad kuivamise tingimustest

### Paagutamine ja põletamine

**Paagutamine** (*sintering*) on pulbertehnoloogia tähtsaim tehnoloogiline operatsioon, kuna sellest olenevad keraamika füüsikalise-mehaanilised omadused. Kaitsegaasi keskkonnata termilist töötlemist nimetatakse **põletamiseks** (*firing*).

Lobrivalu meetodil saadud toorikud tuleb enne paagutamist kuivatada. Kuivamine viiakse läbi rangelt kontrollitud tingimustes, et vältida soovimatuid deformatsioone ja pragude teket.

Põletamine või tardfaaspaagutamine tehakse temperatuuril  $0,5...0,9 T_s$ , K. Paagutusrežiim (aeg, temperatuur, keskkond jne) määrab materjali terasuuruse, pooride suuruse ja kuju.

Tehnokeraamika on raskesti paagutatav, kuna kovalentsete ja ionsete keemiliste sidemete tõttu on materjalide tihendamiseks vajalikud difusiooniprotsessid raskendatud. Seepärast kasutatakse tehnokeraamika paagutamiseks vähem normaalrõhul ehk rõhuta paagutust, mis on enam levinud metallipulbri toodete paagutamisel (vt p 10.5. Paagutus ja p 10.6. Kombineeritud konsolidatsiooniprotsessid). Rõhuta paagutus

sobib vähem vastutusrikaste detailide valmistamiseks, eelkõige protsessi odavuse tõttu. Tehnokeraamika valmistamiseks on enam kasutatavad järgmised paagutusviisid:

- aktiivpaagutus,
- reaktsioonpaagutus,
- kuumisostaatpressimine,
- survepaagutus,
- kuumpressimine,
- mikrolainepaagutus,
- laserpaagutus,
- plasmaaktiveeritud paagutus.

**Aktiivpaagutamine** (*activated sintering*) võimaldab saada suurema tihedusega keraamikat paagutamist aktiveerivate lisandite sisseviimise, ultradisperssete ja nanopulbrite jms kasutamise. Tehnokeraamikas kasutatakse lisandeid, mis kiirendavad paagutusprotsesse.

**Reaktsioonpaagutamine** (*reactive sintering*) on mitmekomponentse süsteemi tardfaaspaagutamine, millega kaasneb keemilise ühendi teke paagutamise käigus. Näiteks tekib peene Si pulbri kuumutamisel lämmastikku sisaldavas keskkonnas paagutuse käigus  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Reaktsioonpaagutuse teel on võimalik saada keeruka kujuga detaile (turbiinilabad, düüsid jne), mis ei vaja täiendavat mehaanilist töötlemist. Et reaktsioonpaagutus saaks toimuda, peab toorik olema poorne. Seepärast vormitakse detailid lobri- või pulbersurvevalu meetodil. Meetodi puuduseks on saadava keraamika suur poorsus (20...30 %) ja sellest tulenevalt madalad mehaanilised omadused ja kulumiskindlus. Protsessi eeliseks on mõõtmete muutumatus paagutuse käigus.

**Kuumisostaatpressimine** (*hot isostatic pressing, HIP*) on selline paagutusviis, kus samaaegselt kuumutamisele rakendatakse poorsuse likvideerimiseks isostaatilist survet. Selleks tihendatakse või pressitakse keraamilist pulbrit, suletakse hermeetiliselt õhukesest metallist (Mo või W) kapslisse, hermetiseeritakse ja paagutatakse isostaadis temperatuuril kuni 1900 °C ja rõhul kuni 400 MPa. Meetod võimaldab saada peaaegu poorideta keraamikat.

**Survepaagutamine** (*pressure sintering*) on eelnevast odavam poorideta keraamika saamise viis. Selle meetodi järgi pressised eelnevalt paagutatakse, nagu tavaliselt, kuni pooride sulgumiseni ja seejärel antakse ahju inertset gaasi (Ar,  $\text{N}_2$ ) rõhuga 6...15 MPa. Survepaagutust kasutatakse laialdaselt nitriidide ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ , AlN) valmistamiseks. Nende materjalide paagutamine  $\text{N}_2$  rõhu all välistab ka nitriidide lagunemise kõrgel temperatuuril. Kõrgtemperatuurse paagutuse eelis võrreldes tavapaagutusega on see, et kasutatakse vähem paagutuse stimulaatoreid, suurendades sellega keraamika kuumuskindlust. Survepaagutamisel ei saa likvideerida pindmisi defekte.

**Kuumpressimine** (*hot pressing*) on pulbrite pressimine temperatuuridel  $0,5 \dots 0,9 T_s$ , K survetel kuni 50 MPa. Tänu välisjõu lisamisele toimub keraamilise materjali tihenemine palju intensiivsemalt kui tavalise pressimise ja sellele järgneva paagutamisega. Kuumpressimine võimaldab saada praktiliselt poorideta materjale ka kõige halvemini paagutatavatest keraamilistest pulbritest. Sageli on see ainus meetod mitteporese keraamika saamiseks ( $B_4C$ , BN, SiC). Meetod võimaldab saada ainult lihtsa kujuga detaile ja vajab suurt hulka pressvorme, kuna pressvormi saab kasutada ainult üks kord.

Väga kiiresti on arenemas **laserpaagutus** (*laser sintering*). See sobib keraamilisest materjalist prototüüpide ja väikesarjade tootmiseks. Materjal paagutatakse või sulatatakse kokku kihikaupa. Lihtsama ja odavama tehnoloogilise lahenduse korral on keraamilised pulbrid kaetud väga õhukese termoplastse polümeerse sideainega. Laser paagutab või sulatab kokku polümeersideaine, mis seob keraamilisi osakesi. Pärast lasertöötlust toimub edasine töötlemine tavapärasel viisil: eelkuumutamine plastifikaatori väljapõletamiseks ja paagutamine tihenduseni 55...65 % teoreetilisest tihedusest. Kui kasutatakse isostaatilist pressimist enne paagutust, saavutatakse 90...99 % teoreetilisest tihedusest.

### **Täiendav töötlemine**

Sageli pole vormimise ja sellele järgneva paagutamisega võimalik saada vajaliku kuju ja täpsusega ning siledusega tooteid. Seepärast tuleb tehnokeraamikat mõnikord täiendavalt töödelda. Suure kõvaduse ja hapruse tõttu on tehnokeraamika raskesti töödeldav ja seetõttu töömahukas ning kallis, moodustades keeruliste detailide puhul kuni 80 % detaili maksumusest. Praegu kasutatakse tehnokeraamika töötlemiseks mitmeid meetodeid. Need on mehaanilised (abrasiiv- ja abrasiivjugatöötlus), keemilised (söövitamine), termilised (elektroerosioontöötlemine), (laserikiirega töötlemine, elektronikiirega töötlemine, iononkiirega töötlemine) (vt p 12.11. Mittetraditsioonilised töötlusmeetodid).

## **14.4. KOMPOSIITIDE VALMISTAMINE**

Seitsmendas peatükis anti ülevaade komposiitmaterjalide omadustest, sh juhiti tähelepanu võimalusele, et neid materjale saab projekteerida viisil, et maksimaalselt avalduksid just konkreetse kasutuskohas soovitud omadused. Suhteliselt lühikese aja jooksul on mitmes valdkonnas komposiitide kasutus plahvatuslikult laienenud. Tuleb märkida, et materjali kasutus on võimalik vaid juhul, kui materjale (tooteid) suudetakse valmistada nõutava kuju, vastuvõetava hinna ja piisava tootlikkusega. Mitmed komposiitmaterjalidest toodete valmistamiseks kasutatavad tehnoloogiad on madala tootlikkusega ja nõuavad palju käsitsitööd. Lisaks on puuduseks ka see, et komposiitmaterjalidest toodete omadused varieeruvad suhteliselt suurtes piirides ning

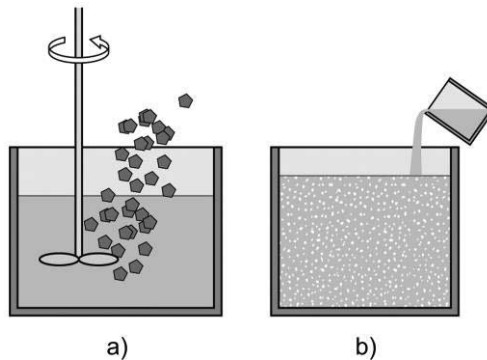
kvaliteedikontrolli (sh mittepurustava kontrolli) meetodid ei ole juurutatavad niisama lihtsalt kui näiteks metallide puhul.

Kuna komposiitmaterjalid jaotatakse lähtuvalt nende koostisest ja armatuuri kujust pulber-, kiud- ja kihtarmeeritud komposiitideks (laminaatkomposiitideks), käsitletakse edaspidi nende valmistusmeetodeid samast jaotusest lähtuvalt.

#### 14.4.1. Pulberarmeeritud komposiitide valmistamine

Pulberarmeeritud komposiidid sisaldavad enamasti diskreetseid, peeneid või isegi ülipeeneid pulbrilisel kujul olevaid armeerivaid osakesi, mis on ühtlaselt jaotatud sitkes polümeerses või metalses maatriksis. Võrreldes kiudarmeeritud komposiitidega on nende valmistustehnoloogia üldjuhul mõnevõrra lihtsam ning nad on tavaliselt isotroopsed – nende omadused ei olene koormamise suunast. Armeerivad osakesed disperseeritakse (segatakse) maatriksisse kas maatriksi sulaolekus, vedelik-tahkesuspensioonis (lobrisse) või tardolekus pulbrite kujul (vt p 10.3. Pulbrite ettevalmistus vormimiseks). Tavaliselt järgneb sellele kas valamine või vormimine pulbermetallurgiale omaselt pressvormis. Neid tehnoloogiaid on käsitletud eespool ning siinkohal neid ei korrata.

Joonisel 14.24 on kujutatud pulberarmeeritud metallmaatrikskomposiidi saamine. Tavaliselt jaotatakse armeeriv faas sulametallis (Joonis 14.24a) või immutatakse sulametalliga eelnevalt vormitud armatuurist koosnev poorne pulbertoorik (Joonis 14.24b).



**Joonis 14.24.** Metallmaatrikskomposiidi valmistamine: a – pulbrilise armatuuri segamine sulametallis; b – eelnevalt vormitud armatuurist tooriku immutamine sulametalliga

Uuemate arengutena võib välja tuua pulberkomposiitide valmistamise, kasutades armatuuri disperseerimist kõrgviskoossesse lobrisse. Need lobrid kujutavad ennast pooltahkeid segusid, mis on segamisel viskoosselt voolavad, kuid seisvatena säilitavad oma kuju.

#### 14.4.2. Kiudarmeeritud komposiitide valmistamine

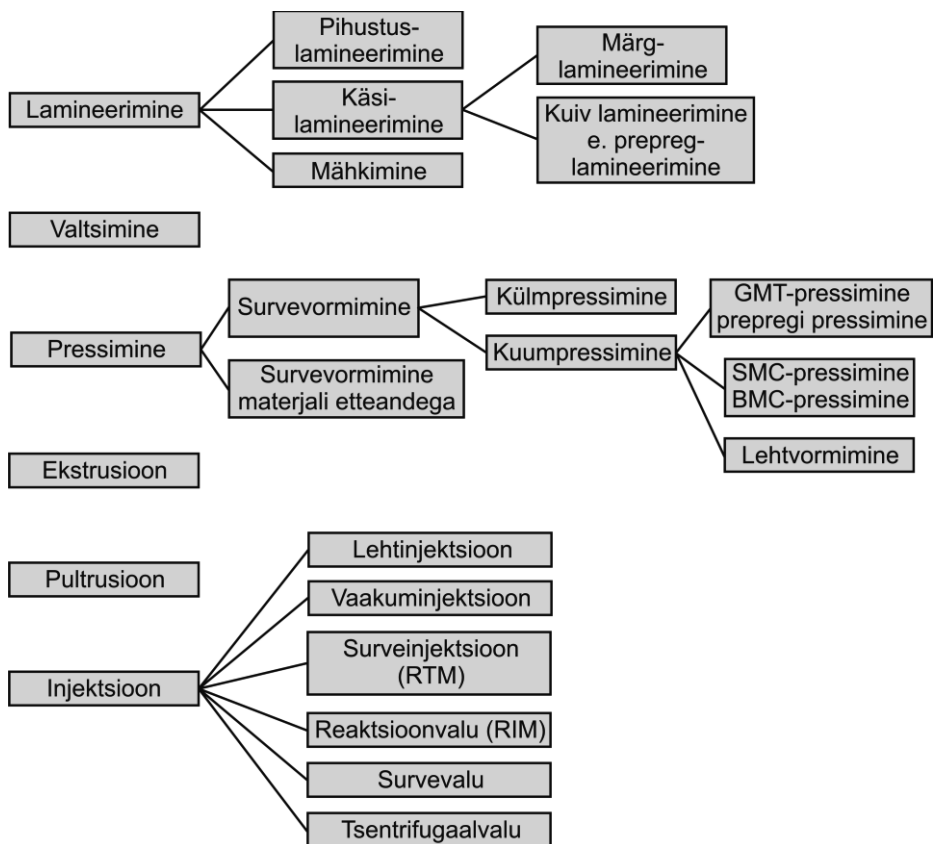
Kiudarmeeritud komposiitides moodustavad armatuur ja maatriks materjalisüsteemi, milles on sobivalt kombineeritud mõlema materjali head omadused. Saadud materjalil on omadused, mida ei ole kumbalgi faasil eraldi võttes. Kiuline armatuur annab materjalile suure tugevuse ja jäikuse. Maatriks toimib sideainena, kannab kiududel üle mõjuvad mehaanilised pinged, annab materjalile sitkuse, kaitseb hapraid kiude mehaaniliste vigastuste ja muude kahjulike keskkonnamõjude eest.

Kiudarmeeritud komposiitide saamiseks on välja töötatud suur hulk erinevaid valmistustehnoloogiaid. Nende oluliseks erinevuseks on lõpptoote omaduste erinevus: kiudude suund ja paigutus maatriksis, pidevkiudude pikkus, lõpptoote geomeetria. Lühikesed kiud võivad paikneda maatriksis kas mingis konkreetses eelissuunas või juhuslikult.

Pidevkiude võidakse kasutada eraldi, armeerides plasti vaid ühes suunas (näiteks varbmaterjal), mähkides kiude või sellest valmistatud teipi vastavale vormile (mida kutsutakse torniks) või kududes kiudusid kangaks, võrguks või võrkpunutiseks. Selles osas käsitleme kiudude ja kiutoodete tehnoloogiat, pinde baasil polümeerkomposiitidest pooltoodete ning lõpptoodete tehnoloogiad (pultrusioon, mähkimine, punumine).

Mõned plastkomposiitide valmistusmeetodid ei erine oluliselt tehnoloogiatest, mida kirjeldati eespool plastide valmistusmeetodite juures: pressimine, valupressimine, survevalu, ekstrusioon, rotovormimine ja termovormimine. Teised tehnoloogiad kujutavad endast baasmeetodite modifikatsiooni – reaktsioonvalu ja **surveinjektsioonvormimist** (*resin transfer molding, RTM*) (vt p 14.4.3 Injektsioonvormimine). Mitmed meetodid on siiski spetsiifilised ainult plastkomposiitidele: käsitsivormimine, pihustusvormimine, vaakumkotis vormimine, autoklaavis vormimine, mähkimine ja pultrusioon. Joonisel 14.25 on antud plastkomposiitide valmistusmeetodite liigitus.

Nii nagu teistegi komposiitide puhul, toimub plastkomposiitide valmistamine samaaegselt konkreetse detaili valmistamisega. See asjaolu teeb komposiitmaterjalid, vaatamata suurele töömahukusele, konkurentsivõimeliseks metallisulamitest toodetega.



**Joonis 14.25.** Plastkomposiitide valmistusmeetodid

Tavaline plastkomposiidi tehnoloogia koosneb järgmistest operatsioonidest:

- armatuuri ettevalmistamine,
- polümeerse sideaine ettevalmistamine,
- armatuuri immutamine polümeeriga,
- pooltoodete valmistamine,
- detaili valmistamine pooltootest,
- detaili tihendamine, kõvendamine ja termotöötlemine,
- mehaaniline töötlemine,
- kontroll.

### **Kiud ja kiutooted**

Plastkomposiitides kasutatakse mitmeid erinevaid kiude. Levinuimad on klaas-, grafiit-, erinevad polümeer- (sh ka aramiid-), metallsed ning basaltkiud. Metallkiudusid, klaasi ja polümeerkiude toodetakse tõmbamise ja ekstrusiooni meetodil. Boor-, grafiit- ja keraamilised kiud (näiteks SiC) on liiga haprad ning nende tootmine



venituse abil ei ole nende hapruse tõttu võimalik. Boorkiudu toodetakse keemilise sadestamise meetodil (CVD-meetodil), sadestades boori volframikiust südamikule. Grafiitkiudu toodetakse orgaanilise kiu karboniseerimise (lagundamise) ja grafitiseerimise meetodil. Lisaks eelnimetatutele kasutatakse ka looduslikke kiude: lina, kanepit, sisalit jt.

Pidevkiudusid kasutatakse peamiselt armatuurina keerutatud **lõnga** (*yarn*), **kiukimpude** (*tows*) või nõõri kujul. Kiud ise on valmistatud paljudest peentest pikkadest kiududest ehk filamentidest. Kius kasutatavate filamentide hulk võib olla mõnekümnest kuni mitmete tuhandeteni. Üksikuid pidevkiudusid ehk monofilamente kasutatakse polümeerkomposiitides vähesel määral. Sellisteks kiududeks on näiteks boor- ja ränikarbiidmonofilamendid.

Kiukimbud ja lõngad on tavaliselt keerutamata või vähesel määral keerutatud. Sellist keerudeta või väheste keerdudega kimpu nimetatakse **rovinguks** ehk **heideks** (*roving*). Erandi moodustavad pidevast klaaskiust keerutatud või kedratud lõngad, mida kasutatakse klaaskiudkangaste valmistamiseks. Kokku saab keerutada ka erinevaid kiumaterjale või lõnga kujul olevat termoplasti ja armatuurkiudu; sel juhul saadakse armatuuri ja maatriksit sisaldav pooltoode.

Plastide armeerimiseks kasutatavad kangad on tavaliselt kahemõõtmelised ning nad moodustuvad kahest, teineteise suhtes risti asetsevast kiudude tasandist, kusjuures kiud on omavahel põimitud vastavalt kasutatud kudumisviisile (**sidusele** e. **niidistusele**). Kanga kiud on kindla suunaga (kuni 95% kiududest on orienteeritud). Kanga pindtihedus (mass pindalaühiku kohta) oleneb kasutusotstarbest. Klaaskiudkangad on tavaliselt erimassiga 25...6000 g/m<sup>2</sup>, klaaskiudrovingust kangad 400...900 g/m<sup>2</sup>, aramiidkiududest kangad 60...320 g/m<sup>2</sup>.

Levinuim klaaskiudarmatuuri kasutusvorm on matt. Armatuurina kasutatavad klaaskiudmatid on enamasti lõigatud kiududest pulber- või emulsioonseotud. Selliste mattide erimass on 300...750 g/m<sup>2</sup>, kuid saadaval on ka kergemaid ja raskemaid matte. Tüüpiliselt on kiudude pikkus on umbes 15...50 mm. Emulsioonmatt kujutab endast pehmendatud polüvinüülatsetaadi emulsiooniga seotud klaaskiudmatti, pulbermattides on kiud ühendatud polüesterpulbri abil.

Armatuuri ettevalmistamine kiudarmatuuri korral tähendab kiudude pinna töötlemist polümeersideainega märgumise parandamiseks. Kuna kiudude valmistamisel kattuvad nad sageli määrdeainetega, siis tuleb see lahustiga maha pesta ja pinnata kiud adhesiooni parandava sideainega. Seda operatsiooni nimetatakse **apreerimiseks** (*dressing*).

## Polümeerkomposiididest pooltoodete valmistamise tehnoloogia

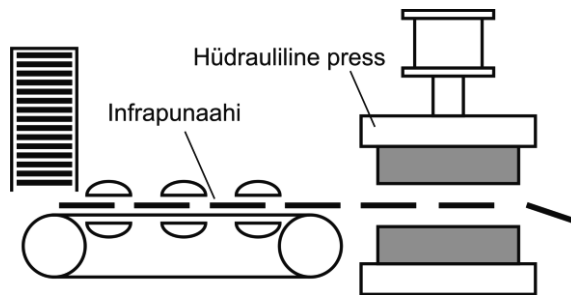
Kiudude ja maatriksi tulemuslikuks ühendamiseks üheks materjaliks (komposiitmaterjaliks) on välja töötatud terve hulk tehnoloogiaid. Kui maatriksi materjali saab viia sulaolekusse ilma, et selleks vajalik temperatuur avaldaks kahjustavat toimet kiududele, on võimalik valumeetod. Kiudarmeeritud plastide saamisel saab vedelas olekus plast kiudude vahele kas kapillaarjõudude, vaakumimmutuse või survevalumeetodi abil. Modifitseeritud tsentrifugaalvalu korral juhitakse vaik pöörleva vormi keskosas ja tsentrifugaaljõudude toimel jaotub see ühtlaselt vormiseinale. Veel ühe alternatiivina juhitakse kiud läbi vaigu või sulaplasi vanni ja vormitakse seejärel enne plasti tardumist.

Sideainele ehk maatriksile tuleb anda enne kasutamist vajalik viskoossus. Reaktoplastide puhul saavutatakse see sobivate lahustite abil, lisades vajaduse korral kõvendeid, värvaineid, plastifikaatoreid jne. Kuna suurem osa lahusteid on kergsüttivad, toksilised ja võivad omada kantserogeenset (vähki tekitavat) toimet, siis on sideaine ettevalmistamisel oluline rangelt täita **materjali ohutuskaartidel** (*material safety datasheet, MSDS*) esitatud ohutusjuhiseid. Lisanditega sideaine üks tähtsamaid omadusi on aeg, mille kestel säilib vajalik viskoossus. See oleneb lahusti lendumise ja sideaine kõvenemise ajast. Aeglaselt lenduvad lahustid pikendavad aega, mille vältel vaik on kasutatav. Polümeerisatsioonireaktsiooni kiirust mõjutab oluliselt töökeskkonna temperatuur ja õhuniiskus.

Plastkomposiidi komponentide (maatriksi ja armatuuri) ühendamiseks kasutatakse kahte meetodit – kuiva ja märja. Kuiva meetodi korral valmistatakse plastkomposiit eelimpregneeritud materjalist – **prepregist** (*prepreg*), mis kujutab endast varasema tehnoloogilise protsessi käigus sideainega immutatud ja seejärel osaliselt polümeriseeritud pooltoodet. Kuival meetodil on märja meetodiga võrreldes mitmeid eeliseid – näiteks saab kasutada polümeerseid sideaineid, mis ei pea komposiidi valmistamise momendil olema vedelas olekus. Märja meetodi korral segatakse reaktoplasti komponendid (vaik ja kõvendi või katalüsaator) vahetult tootmisoperatsiooni eel. Tootmiskeskonnas on võrreldes märja meetodiga tunduvalt puhtam, oluliselt vähem on kahjulikke lenduvaid orgaanilisi ühendeid. Prepregide puuduseks on nende suhteliselt kõrgem hind, aegumine kasutustähtaja möödumisel ja kindlad nõuded nende säilituskeskkonnale (tavaliselt säilitatakse jahedas, et vältida soovimatut kõvenemist). Tavaliselt valmistatakse prepreg selleks spetsialiseerunud ettevõttes; toodet valmistavas ettevõttes saadakse kuiva tehnoloogiaga tunduvalt kvaliteetsemad detaile kui märja tehnoloogiaga.

Termoplaste armeeritakse pidevkiududest valmistatud mattidega, aga ka lühikeste kiududega. Materjal on plaatide kujul ja armatuur võib olla koguseliselt ja kvaliteedilt väga erinev. Kõige tavalisem armeeritud termoplast on polüpropüleen. Plast võib olla lehtmaterjalina või pulbriline. Tüüpiline termoplastist maatriksiga pooltoode on

**klaaskiudmatiga armeeritud termoplast** (*Glas Mat Thermoplastic*, GMT), mida kasutatakse laialdaselt autotööstuses. Klaaskiudmatiga armeeritud termoplasti saamiseks võidakse kasutada mitmeid eri meetodeid. Levinuim viis on armeeritud termoplasti prepregi valmistamine pidevprotsessina, kus sulplast ekstrudeeritakse läbi pilu suulise kahe pidevkiust armatuurikihi vahele. Saadud kolmekihilisele pakstile liidetakse välimisteks kihtidena veel samast plastist kiled ja pakett suunatakse tihendamiseks läbi rullide. Seal toimub armatuuri impregneerimine termoplastist maatriksiga rõhu ja temperatuuri toimel (polüpropüleenil korral 200...210 °C). Hiljem tükeldatakse saadud pakett soovitud mõõtmetega prepregplaatideks. Eelkirjeldatud termoplastist maatriksiga prepregi vormimine tooteks erineb mõnevõrra tavapärasest kuumpressimisest. Joonisel 14.26 on klaaskiudmatiga armeeritud termoplasti vormimise põhimõtteskeem. Klaaskiudmatiga armeeritud termoplastist toorik kuumutatakse üle polümeermaatriksi sulamistemperatuuri, paigutatakse mittekuumutatavasse vormi ja vormitakse suure kiirusega suuri surveid kasutades tooteks. Tootel lastakse vormis jahtuda, kuni teda on võimalik kahjustamata vormist eemaldada.



**Joonis 14.26.** Klaaskiudmatiga armeeritud termoplastist lehtede vormimine

**Tahke vormikompaund** (*Bulk Molding Compound*, BMC) kujutab endast taigna-sarnast reaktoplasti massi, mis sisaldab armatuuri ja täiteaineid ning mille kõvenemine toimub vormimisoperatsiooni käigus. Kiudude pikkus on tavaliselt vahemikus 12...50 mm. Saadud materjali tõmbetugevus on vahemikus 35...70 N/mm<sup>2</sup>. Kuna kompaund on vormitav kuumpressimise abil, kujutab sellisest vormikompaundist saadud komposiitmaterjal alternatiivi lehtvormimise abil saadud metallist toodetele, eriti kui nõutav on kerge kaal, korrosioonikindlus ja sama värvitoon kogu toote mahus. Võimalikuks ebasoovitavaks kaasnähtuseks on kiudude kalduvus orienteeruda vormis materjali voolamise suunas. See teeb toote omadused raskesti ennustatavaks ja kontrollitavaks.

Juhul kui vormikompaundi lehe paksuseks on vähem kui 50 mm, siis kutsutakse seda kompaundi **paksuks vormikompaundiks** (*Thick Molding Compound*, TMC). See

sobib põhimõtteliselt asendada nii leht- kui ka tahket vormikompaundi, kuid on lehtvormikompaundist suurema täiteaine sisalduse ja odavama hinnaga.

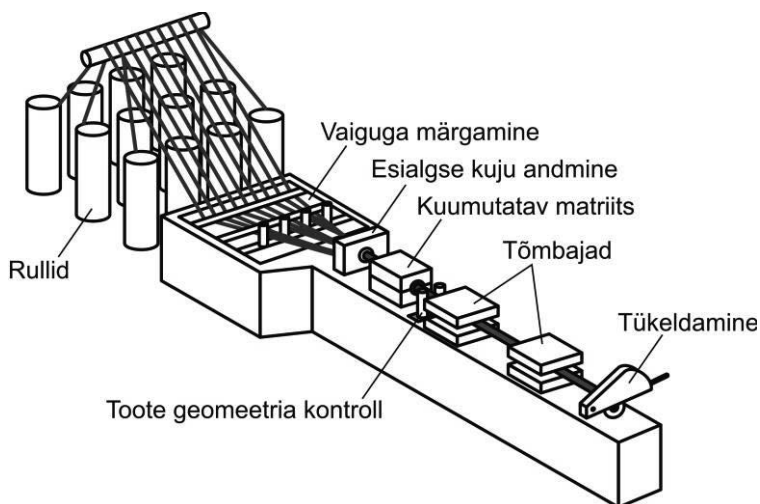
**Lehtvormikompaund** (*Sheet Molding Compound, SMC*) kujutab endast mõne millimeetri paksust termoreaktiivvaigul põhinevat painduvat lehttoorikut, mis sisaldab armatuuri ja täiteaineid. Kiudude pikkus on tavaliselt vahemikus 2... 12 mm. Vormikompaundidest toodete vormimiseks asetatakse vajalik kogus materjali vormi, antakse sellele vormi sulgemisega soovitud kuju ja kõvendatakse see etteantud temperatuuril. Vajalik rõhk kuumpressimisel on toote kujust olenevalt lehtvormikompaundi puhul 5...10 N/mm<sup>2</sup>, tahke vormikompaundi puhul 10...15 N/mm<sup>2</sup>.

### **Kiudarmeeritud komposiitidest lõpptoodete vormimine**

Komposiitmaterjalidest lõpptoodete saamiseks on välja arendatud terve hulk erinevaid meetodeid. Enamik neist on esitatud Joonisel 14.25. Mitmed plastkomposiitide tehnoloogiad kujutavad endast puhaste maatriksmaterjalide (metallide või polümeeri) täiendatud või kohandatud variante. Nende hulgas vaid plastkomposiitidele loodud tehnoloogiaks on **pultrusioon** (*pultrusion*), mis kujutab endast profiilide ja torude valmistamiseks kasutatavat pidevprotsessi. Protsess on hästi automatiseeritav. Tootlikkus võib olla kuni mitmed meetrid minutis (on tavaliselt vahemikus 0,5...2,0 m/min). Joonisel 14.27 on kujutatud pultrusiooniseadme peamised osad ja toimimise põhimõte. Pultrusiooniprotsess seisneb maatriksiga immutatud lõpmata pikkade armatuurikiudude tõmbamises läbi kuumutatava matriitsi. Matriits annab profiiltootele kuju ja selles toimub vaigu kõvenemine. Matriitsi lõpposas või sellest väljumisel vajadusel detaili jahutatakse. Valmistatav toode peab olema vähemalt sel määral kõvenenud, et pidada vastu tõmbejõule, mida rakendab tõmbemehhanism. Peale tõmbemehhanismi tükeldatakse profiil soovitud pikkusega tükkideks.

Tüüpilisteks pultrusioonitoodeteks on suusakepid, golfikeppide varred, seadmete jäikusribid, masinaosad ja elektrotehnikas kasutatavad isoleerivad profiilid.

Pultrusiooniprotsessi abil on võimalik toota ka kõverprofiile (näiteks lehtvedrusid). Selleks kasutatakse kaheosalist matriitsi, mille üks pool on statsionaarne ja teine liikuv. Esimeses matriitsi osas toimub esmane vormimine, teises antakse enne polümeeri lõplikku kuju veel tootele soovitud kuju ja kõverus.

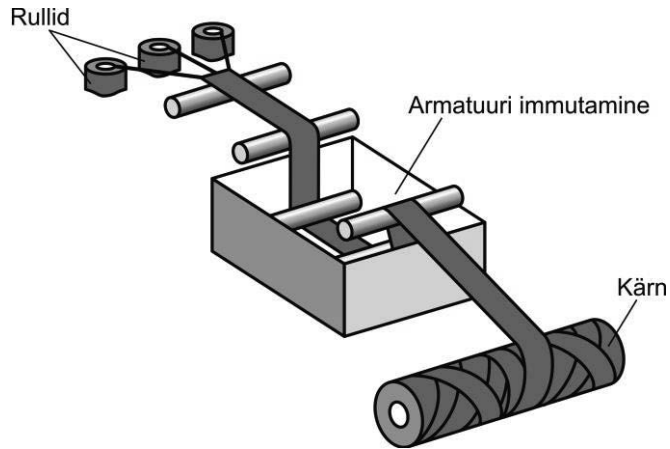


**Joonis 14.27.** Pultrusiooniseade

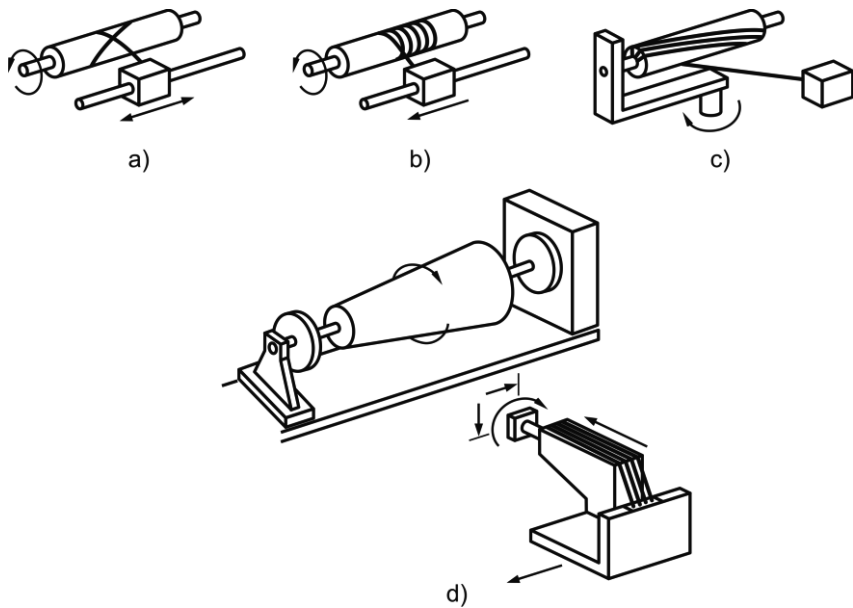
### Kiudude ja lintide mähkimine

**Mähkimine** (*winding*) on komposiitmaterjali valmistustehnoloogia, kus kasutatakse avatud vormi ja mille tulemusena saadakse valdavalt silindriline või kooniline kooriktoode. Kiudude mähkimiseks immutatakse need eelnevalt vaiguga ja juhitakse pöörlevale vormile (kärnile) (Joonis 14.28). Kui toote seinapaksus on piisav, lastakse laminaadil kõveneda kärnil või toimetatakse koos kärniga kõvendusahju. Kärn eemaldatakse pärast laminaadi kõvenemist. Mähkimisnurk on määratud juhiku suhtelise liikumise ja kärni pöörlemiskiiruse suhtega. Mähitavate kiukimpude arv määrab lindi laiuse; tavaliselt on see piisav selleks, et katta vormi pind ühtlase kihiga ühe kärni pöörde jooksul. Joonisel 14.26 näidatud mähkimisskeem sobib ka torude tootmiseks.

Kui mähkimisprotsessi vabadusastmeid lisada, sobib meetod üsna keerukate detailide valmistamiseks. Joonisel 14.29 on näidatud põhilised mähkimisskeemid ja kuueteljeline mähkimispink. Koos vabadusastmete arvu kasvuga muutub loomulikult keerukamaks ka protsessi juhtimine. Mähkimisskeemi optimeerimiseks ja pingi juhtimiseks kasutatakse spetsiaalset tarkvara.



**Joonis 14.28.** Mähkimisprotsessi põhimõtteskeem



**Joonis 14.29.** Mähkimisskeemid: a – spiraalmähkimine; b – ringmähkimine; c – polaar-  
mähkimine; d – kueteljeline mähkimispink

Mähkimisseade peab tagama kiudude ühtlase pinguse mähkimise ajal. Hinnatakse ka mähkimispea liikumise täpsust ja liikumise korratavust eri kihtidele, pööretel tekkiva materjalikao suurust (torude otsad) ja kärniga manipuleerimise lihtsust. Armatuuri

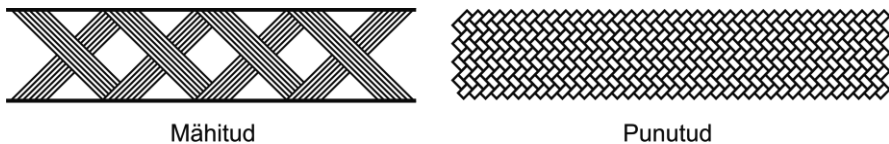
immutamiseks on erinevaid süsteeme, mis määravad kokkuvõttes mähkimise kiiruse. Tehnilises mõttes ei ole mähitava detaili mõõtmetele ülempiiri. Suurimad vertikaalmähkimispinkides (karuselltüüpi) valmistatavad torud on läbimõõduga 6...7 m. Valmistatud on ka 20 m läbimõõduga torusid. Mähkimispingid võivad olla ka pidevtoimelised. Sellisel juhul on torn valmistatud pidevast teraslindist.

Mähkimise abil valmistatakse kõige enam mahuteid ja torusid. Levinud on erinevad polüestervaigud. Eirakendustes kasutatakse ka epoksü- ja fenoolvaikusid. Mähkimise korral on vaik suhteliselt madala viskoossusega, et tagada piisavalt tõhusat immutust ja piisavalt pikka töötlemisaega. Pikk vaigu töötlemisaeg eeldab toote kõvendamist kõrgemal temperatuuril ahjus. Selleks võidakse kasutada spetsiaalseid kiirgureid või ahjusid, millesse paigutatakse toode koos torniga.

Mähkimine sobib ka keerukama kujuga toodete valmistamiseks. Toote kuju peab olema selline, et on võimalik tagada kiu pinge kogu mähkimise tsükli jooksul. Selle järel on võimalik tootele lõplik kuju anda näiteks kuumpressimise abil.

## Punumine

**Punumine** (*braiding*) on õigupoolest armatuuri töötlemisviis, nagu seda on armatuurkanga kudumine. Kiudude või kiukimpude punumisel saadakse kahe- või kolmemõõtmelised armatuurvõrgud. Mähitud ja punutud struktuuri erinevus ilmneb Jooniselt 14.30.



**Joonis 14.30.** Mähitud ja punutud armatuur

Punumise abil võidakse valmistada 3D sarruseid näiteks I-talade, tugevdatud paneelide, konsoolsete talade, autokerede vms valmistamiseks.

Punutud toode võidakse saada nii kuivast armatuurist kui ka prepregist. Kuivade armatuurikiudude immutamine punumisseadmes on komplitseeritud, seepärast toimub immutus eri etapina surveinjektsioon- või pressimismeetodil.

Punutud toote armatuur võib olla 2- või 3-mõõtmeline. Sellise armatuuri eelised ilmnevad eeskätt löökkoormuse tingimustes, milles üksteisest üle ja möödakulgevad armatuurikiud tõhusalt summutavad löögienergiat ja takistavad pragude levikut. Kolmemõõtmelise armatuuri eelised ilmnevad ka kvaasistaatilises koormusolukorras, kus armatuuri võime koormust kanda on tunduvalt parem võrreldes kahemõõtmelise

armatuurisüsteemiga. Üldreeglina leiab 3-mõõtmeline armatuur kasutust rakendustes, milles on oluline vastupanu löökoormusele ja pinnaga risti mõjuvatele jõududele.

### 14.4.3. Laminaatkomposiitide valmistamine

#### Lamineerimisprotsessid

Laminaatkomposiitidena käsitletakse kõiki kihilise ehitusega materjale, sh ka pindeid ning bimetalseid materjale. Selliste materjalide valmistamine seisneb enamasti erinevate materjalikihtide liitmises ühtseks tervikuks.

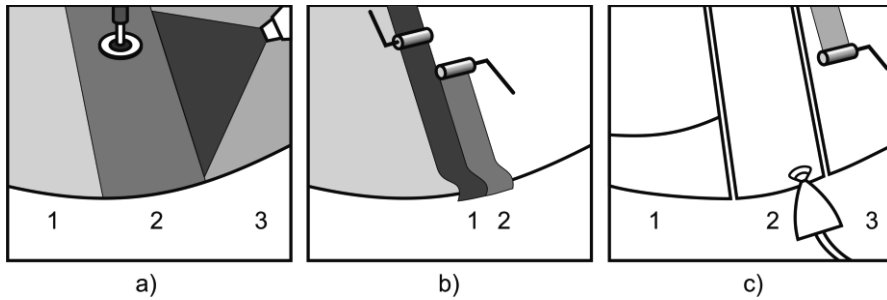
**Lamineerimiseks** (*lamination*) nimetatakse komposiitmaterjalide valmistamise meetodit, milles komposiitmaterjalist toode või toote kiht saadakse üksikute kanga-, prepregi-, mati- või lindi asetamisel üksteisele (sageli selliselt, et kiudude suund on eelmisest kihi kiudude suunast erinev) kuni soovitud paksusmõõtme saavutamiseni ja järgnevas sideaine kõvendamises surve ja kuumutamise kaasabil. Lamineerimismeetodite hulka kuuluvad käsilamineerimine, pihustuslamineerimine ja mähkimine (sisaldab palju erinevaid meetodeid) (vt ka Joonis 14.25). **Laminaat** (*laminat*) saadakse kasutades lahtist vormi (mudelit või kärni) või kahepoolset vormi. Kõvenemine võib toimuda ilma välise surveta, kuid suurema tiheduse saavutamiseks võidakse kasutada ka ala- või ülerõhku. Käsilamineerimine jaguneb märg- ja kuivlamineerimiseks. Märglamineerimise korral impregneeritakse armatuur vedela vaiguga. Kuivlamineerimise korral kasutatakse eelimpregneeritud pooltooteid ehk preprege.

Lamineeritud materjalid või -tooted võivad olla nii tasapinsed või ruumilised kooriktooted kui ka torud, vardad või profiiltooted.

**Märglamineerimise** (*wet lay-up, wet lamination*) korral asetatakse armatuur kihiti vormi käsitsi ja kasutades käsitööriistu. Armatuur immutatakse vaiguga ja rullitakse tasaseks, püüdes eemaldada õhku armatuurikihtide vahelt. Vaik levitatakse spaatli, pintslit või rulli abil, mõnikord ka pihustades. Olenevalt armatuuri liigist ja töötavast immutatakse armatuur vaiguga kas ühelt poolt või mõlemalt poolt. Polüestervaigu korral kasutatakse õhumullide eemaldamiseks rulli, epoksüvaigu korral võidakse kasutada ka pintslit. Parim tulemus saadakse, kui õhk eemaldatakse pärast iga kihi asetamist. Joonisel 14.31 on näidatud märglamineerimise tööetapid.

Märglamineerimise korral mõjutavad toote kvaliteeti nii välised tegurid kui ka lamineerija meisterlikkus ja täpsus. Lamineerimisel tuleb kasutada õiget kogust vaiku – liiga väike vaigusisaldus toob kaasa poorsuse ja kihtidevahelise nihketugevuse alanemise, see omakorda mõjutab laminaadi tugevust ja ilmastikukindlust. Liiga suure vaigukoguse kasutamine on asjatu, sest see mõjutab negatiivselt toote kaalu ja suurendab vaigu kulu. Sagedasemateks laminaadidefektideks on ebaühtlane paksus ja vaigu valgumijäljed.





- |                           |  |                      |
|---------------------------|--|----------------------|
| 1. Vormi poleerimine      | 1. Armatuuri asetamine ja vaiguga immutamine | 1. Toote eemaldamine |
| 2. Vormivahaga töötlemine | 2. Õhu eemaldamine rulli abil                | 2. Viimistlemine     |
| 3. Dekooriga katmine      |  | 3. Pinna värvimine   |

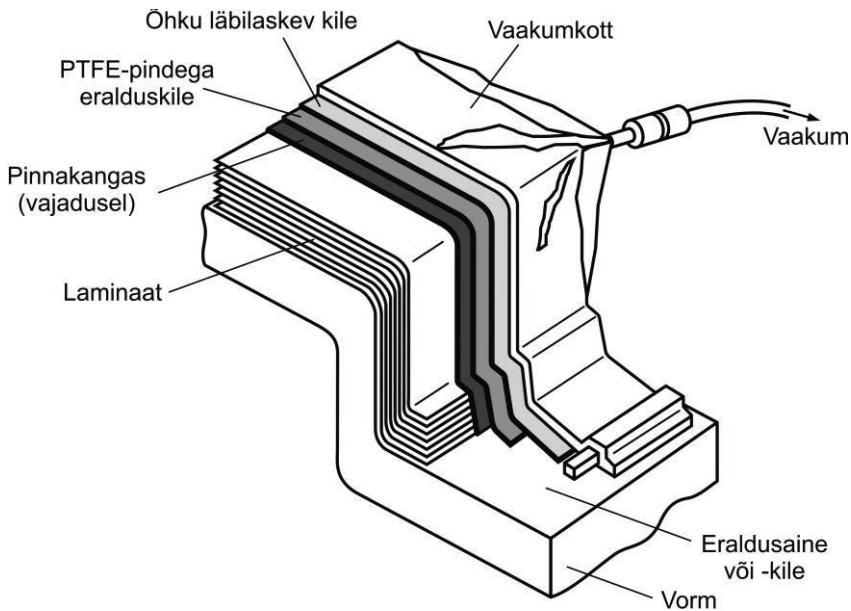
**Joonis 14.31.** Märqlamineerimise põhilised tööetapid: a – vormi ettevalmistus; b – laminaadi vormimine; c – toote eemaldamine ja viimistlus

Reaktoplastide kõvenemisreaktsioon on eksotermiline. Tekkiv soojushulk ja maksimaalne temperatuur olenevad mõlemad lamineeritava kihi paksusest. Ülekuumeneamise vältimiseks vormitakse paksud laminaadid etapiviisiliselt. Olenevalt kasutatud vaigu tüübist ja kõvendist on suurimaks korraga lamineeritava kihi paksuseks 4...20 mm.

Märqlamineerimise abil saadud toode võib vabalt kõveneda vormis. Laminaadi tiheduse suurendamiseks kasutatakse vajadusel välisrõhku. Selleks võidakse kasutada elastset membraani (kilet, kotti) ja ala- või ülerõhku.

Vaakumi abil saab tihendada käsilamineerimisel saadud komposiite (vaakumi abil eemaldatakse liigne vaigumass ja toode tihendatakse õhusurve toimele). Vaakumkoti kasutamine käsilamineerimisel on tuntud **vaakuminfusioonina** (*vacuum infusion*). Sel juhul laotakse armeerivad elemendid ja täidis vormi kuivalt ja vaakumi toimele nad küllastatakse vaigumassiga (vt Joonis 14.32).

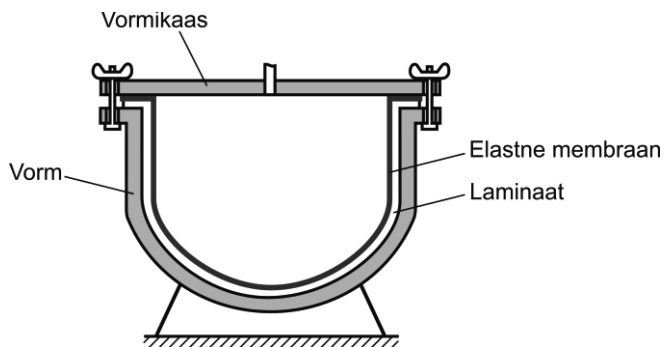
Vaakumkoti abil saadud komposiitmaterjali armatuurisisaldus on suurem ning poorsus väiksem võrreldes vabalt kõveneva laminaadiga. Eriti sobiv on vaakumkoti kasutamine kihtide lamineerimisel kärgplaadile. Täitematerjal (kärg- või vahtplaat) võidakse liimida lamineerimisvaiku kasutades kihtide vahele protsessi käigus või eraldi, juba kõvenenud laminaadi pinnale. Joonisel 14.32 on kujutatud vaakumkoti kasutamine laminaadi tihendamise eesmärgil.



**Joonis 14.32.** Vaakumkoti kasutamine käsilamineerimisel

Vaakumkotti kasutatakse rohkem epoksüvaigul põhinevate laminaatide valmistamisel kuna tavalistest polüestervaikudest eralduv stüreen kipub antud rõhul (400...500 hPa) toatemperatuuril juba keema. Vaakumkotti kasutatakse enam suurte ja tasapindsete toodete valmistamiseks. Kõvenemine toimub olenevalt kasutatavast vaigusüsteemist suhteliselt aeglaselt. Vaakumkotiga vormimise korral võidakse kasutada samu vorme mis tavalisel käsilamineerimisel.

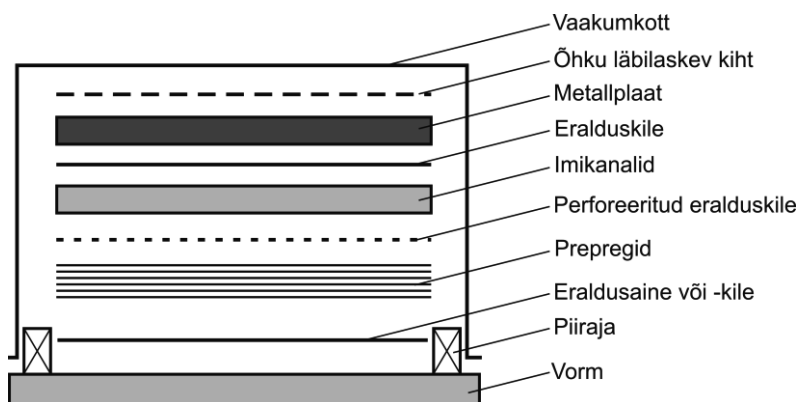
Joonisel 14.33 on kujutatud ülerõhu kasutamise põhimõtte märglamineerimisel. Vorm toimib sel juhul surveadmena ja seetõttu on juba pisut suurematel rõhkudel vajalik väga jäik vormikonstruktsioon. Teisalt võidakse kasutada tunduvalt suuremaid rõhkusid kui vaakumkotiga vormimisel ja ei ole piirangut polüestervaikude kasutamisele. Toote omadused on vaakum- ja survekotiga vormimisel sarnased. Tootmisprotsessi võidakse kiirendada kuumutades vormi auruga ette. Tingituna vormile seatud jäikus- ja tugevusnõuetest on survekotiga lamineerimisel majanduslikult otstarbekas toota väikese ja keskmiste mõõtmetega tooteid.



**Joonis 14.33.** Ülerõhu kasutamine märglamineerimisel

**Kuivlamineerimisel** ehk **prepreg-lamineerimisel** (*dry lay-up*) kasutatakse prepregi, mis on kilesse või kahe kile vahele pakituna. Kile eemaldatakse vahetult enne või pärast prepregi mõõdulõikamist. Prepregi kihid asetatakse vormi soovitud järjekorras ja suunas. Kihid rullitakse üksteise külge kinni võimalikult tihedalt, vältides õhumullide jäämist kihtide vahele. Kui lamineeritakse väikese ümarusraadiusega kohti, kasutatakse laminaadi vormitavuse parandamiseks kuuma õhu fööni. Paksude prepreg-laminaatide korral sooritatakse vahepealne tihendamine vaakumkoti abil umbes 5 kihi asetamise järel.

Lamineeritud prepreg-toorik paigutatakse vaakumkotti kõvenema. Tavaliselt viiakse kõvendamine läbi **autoklaavis** (*autoclave*) ehk kuumutatavas surveanumas. Kõvendamisviisi nimetatakse autoklaavkõvendamiseks. Joonisel 14.34 on tavalise autoklaavkõvendamise tarvikud, kui tooraineks on prepreg. Joonisel kujutatud juhul on prepregis üleliigset vaiku, mis imetakse protsessi käigus spetsiaalsesse kogujasse. Tänapäeval kasutatakse enam nn *no-flow*-süsteeme, millest vaigu eemaldamine protsessi käigus ei ole vajalik.



**Joonis 14.34.** Autoklaavkõvendamise tarvikud ja nende asetus vaakumkotis

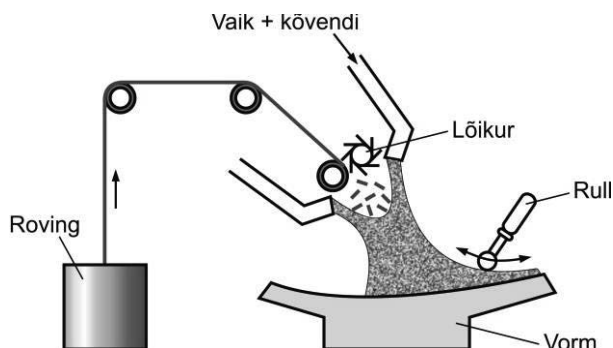
Autoklaavis läbiviidud kõvendamise abil püütakse minimeerida õhumullide olemasolu – poorsust. Püüeldakse võimalikult suure armatuurisisalduse poole, mis tüüpiliselt ulatub kuni 60 % mahu järgi. Samas tehakse laminaadi järelkõvendamine. Imemiskanalite arv, rõhk, temperatuur ja aeg on reguleeritavad parameetrid.

Prepreg-laminaatide valmistamiseks on olemas spetsiaalsed lamineerimismasinad, mis töötavad mitmeteljelise töötlemiskeskusega sarnasel põhimõttel. Lõikeinstrumendi asemel on manipulaatori otsas agregaat, mis jaotab prepreg-lindi vormi pinnale soovitud nurga all, tihendab selle ja lõikab soovitud mõõtu. Selline seade võib lamineerida nii termoplastist kui ka reaktoplastist prepreg-laminaate. Selline seade sobib eeskätt tasaste ja mõõduka kumerusega toodete lamineerimiseks.

Prepreg-lamineerimine (kuivlamineerimine) koos kõvendamisega autoklaavis on eeskätt kasutusel vastutusrikkamate konstruktsioonielementide valmistamiseks, näiteks lennukitööstuse vajadusi silmas pidades. Eesmärgiks on suuregabariidiliste toodete valmistamine suure tugevusega materjalist, toodete ühtlase kvaliteedi tagamine.

**Kiudlamineerimine** (*fiber placement, fiber layup*) on kiumähkimise ja lintlamineerimisprotsessi ühendamisest saadud tehnoloogia. See on automatiseeritud meetod, milles prepregi kimp või kimpudest moodustatud lint mähitakse vormi soovitud kohta ettenähtud suunas. Sel viisil võidakse mähkida ka kumeraid ja nõgusaid pindu, sest lamineerimisprotsessis puudub vajadus pideva kiu pingutamise järgi. Selliseid aplikaatoreid kasutatakse eeskätt lennukites kasutatavate suuremõõtmeliste detailide (tiivad, kereosad) lamineerimiseks. Sellised kiu- ja lintlamineerimise seadmed on tehniliselt ja tarkvaraliselt keerukad ja seepärast väga kallid.

**Pihustuslamineerimise** (*spray lay-up*) korral pihustatakse üheaegselt armatuur ja vaik spetsiaalse püstoli abil vormi pinnale. Roving (heie) hakitakse püstolile kinnitatud lõikeseadmes soovitud pikkusega kiududeks. Püstolis vaik ja kiud segunevad ja paisatakse püstoli suulisest koos vormi pinnale (vt Joonis 14.35).



Joonis 14.35. Pihustuslamineerimine

Pihustatud laminaadikihid tihendatakse rullimise abil, samaaegselt püütakse eemaldada õhumullid. Soovi korral võidakse pihustatud laminaadikihtide vahele paigutada erinevaid armeerivaid kangaid, täiteainet (näiteks kärgmaterjali). Laminaat kõvendatakse tavaliselt toatemperatuuril või veidi kõrgemal temperatuuril. Pinnal võidakse kasutada dekoori, värvi või termoplastist viimistluskihti.

Pihustusseadme põhiosadeks on vaigu- ja kõvendipumbad, kiulõikur ja segamispea. Roving tükeldatakse aplikaatoris kahe rulli vahel. Üks rull on kummikattega ja teisele on kinnitatud teatava vahega lõiketera. Rovingut veetakse edasi ja tükeldatakse samade rullide abil.

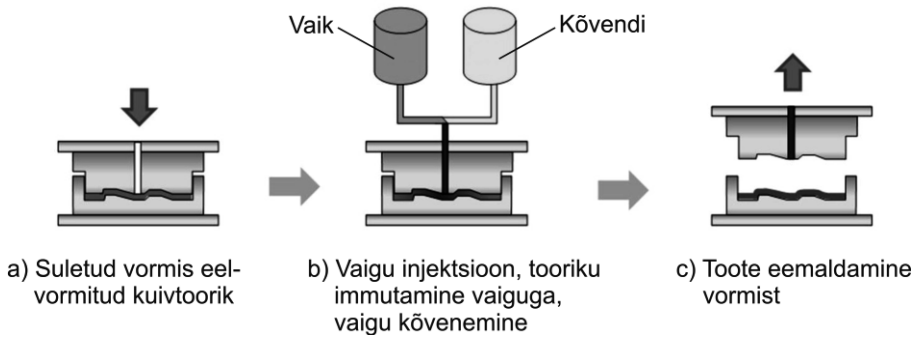
Vaik ja kõvendi segatakse segamispeas või pärast suulisest väljumist (väline segamine). Segamiseks võidakse kasutada õhku või siis pihustatakse kõvendi ja vaik koos ja nad segunevad õhus.

Meetod sobib eelkõige mitte eriti vastutusrikaste toodete valmistamiseks. Töötervishoiunõuded eeldavad head ventilatsiooni ja tõhusate isikukaitsevahendite kasutamist. Pihustuspüstolit juhib reeglina operaator käsitsi. Töö kvaliteet ja ühtlus olenevad paljuski töötaja kutseoskustest. Inimliku faktori elimineerimiseks on viimasel ajal hakatud enam kasutama robot- või automaatpihustusseadmeid. Tulemusena saavutatakse ühtlasem toote kvaliteet ning töö võidakse sooritada isoleeritud kambris.

### **Injektsioonvormimine**

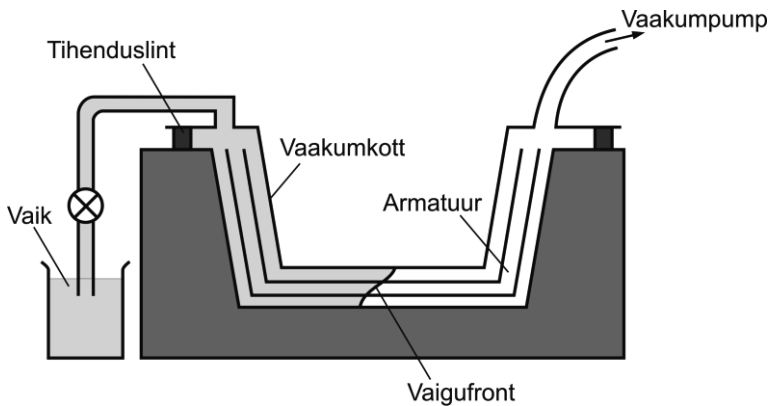
Injektsioonimeetodi korral surutakse vedel vaik vormi ning impregneeritakse sinna varem paigutatud kuiv armatuurikiud või -võrk. Vaigu vormi toimetamiseks kasutatakse üle- või alarõhku. Vaik võib vormis olla ka pooltootesse (armatuurikihtide vahele) asetatud kile kujul. Sellisel juhul viiakse vaik esmalt voolavasse olekusse ja lõpptulemusena impregneeritakse armatuur.

**Surveinjektsioonvormimise** (*Resin Transfer Molding, RTM*) korral paigutatakse armeerivad elemendid vormi, vorm suletakse ja seejärel surutakse vormi vaigumass. Vajadusel võidakse kasutada ka vaakumit. Kui injektsioonietapp on lõppenud, toode kõvendatakse, eemaldatakse vormist ja viimistletakse. Protsess on esitatud Joonisel 14.36. Injektsioonimeetodil on kaks teisendit. Traditsioonilisel injektsioonimeetodil saadava toote armatuurisisaldus on suhteliselt madal ning injektsiooniprotsess on kiire. Teisalt on vastutusrikaste toodete puhul vajalik saavutada võimalikult suur armatuurisisaldus.



**Joonis 14.36.** Injektsioonimeetodi põhimõte

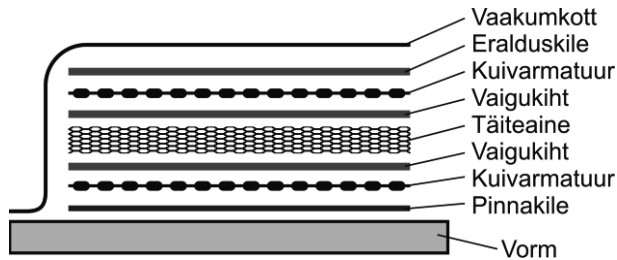
**Vaakuminjektsioonvormimine** (*Vacuum Injection Molding, VIM*) korral kasutatakse lahtist vormi. Teine vormipool on asendatud vaakumkotiga või elastse membraaniga. Baasmeetodi korral immutatakse armatuur vaiguga vaakumi abil. Protsessi võidakse kiirendada, kasutades ülerõhku toitesüsteemis. Selleks, et protsess toimiks, peab ülerõhk olema absoluutväärtuselt väiksem süsteemi teises osas mõjuvast alarõhust. Vaigu liikumise kiiruse tõstmiseks võidakse kasutada spetsiaalsete toitekanalitega kihte komposiidis, erikujulisi armatuurikihte, kihtlaminaatkonstruktsioonides ka vahe- ehk täitekihi perforimist. Vaigu transpordi soodustamiseks kasutatakse spetsiaalseid võrkusid. Levinud on ka spetsiaalsed kangad, mille disain võimaldab madala viskoossusega vaigul hõlpsasti kangas voolata.



**Joonis 14.37.** Vaakuminjektsioonvormimine

Joonisel 14.37 on esitatud vaakuminjektsiooni meetodi põhimõte. Kui soovitakse, et toote mõlemad pooled oleks siledad või kui tooteseeria suurus on selleks piisav, võidakse vaakumkott asendada spetsiaalse elastse kummimembraaniga, millesse on kohe sisse ehitatud vaigujaotussüsteem ja kinnitatud vormi serva tihendid.

**Membraaninfusiooni** (*Resin Film Infusion, RFI*) (Joonis 14.38) korral on maatriksimaterjal kile kujul ühe kihina vormi pinnal või kihiti kuivade armatuurikihtide vahel. Vaik on poolkõvenenud olekus; enne injeksiooni viiakse ta kuumutamise abil voolavasse olekusse. Vaigu liikumine toimub peamiselt toote paksussuunas, st suhteliselt väikeses ulatuses, mis ongi meetodi peamine eelis.



**Joonis 14.38.** Membraaninjeksioon

Injektsioonimeetodid on võrreldes käsilamineerimisega kiiremad ja saadud toodete kvaliteet on ühtlasem. Tegu on suletud protsessidega, mistõttu lenduvad ühendid ei satu töökokkonda. Armatuuri asetamine vormi on lihtne, sest seda käsitletakse kuivalt. Armeerivad kihid seotakse üksteisega vajadusel täiendavalt kas mehaaniliselt või liimi abil. Vaakuminjektsioon- ja membraaninjeksioonimeetodite eeliseks on ka odavamate lahtiste vormide kasutamine.

## 14.5. KORDAMISKÜSIMUSED

1. Mille poolest erinevad plastide, keraamika ja komposiitmaterjalide valmistamiseks kasutatavad meetodid metallide töötlemismeetoditest? Miks?
2. Mille poolest erineb reaktoplasti töötlemistehnoloogia termoplasti omast?
3. Kuidas valmistatakse plastist paksu lehtmaterjali, õhukest lehtmaterjali, toru?
4. Millised plaste töödeldakse tavaliselt puhumisvormimise meetodil? Miks on vajalik jahutus?
5. Kui suure plastist toote seeria puhul on otstarbekas kasutada pressimist?
6. Milline on tüüpiline plasti pressvormi temperatuur? Mis materjalist on valmistatud pressvorm?
7. Mille poolest erinevad pressimine, valupressimine ja survevalamine?
8. Mis on valupressimise eelised ja puudused?
9. Külmpressimine on võrreldes teiste plasti vormimise meetoditega majanduslikult otstarbekas. Mis on meetodi piirangud?
10. Mis on levinuim meetod plasti suurseriatootmises termoplastsete toodete vormimiseks?
11. Kui pikk on tavaliselt plasti survevalu tsükli aeg?

12. Mida kujutab endast *Branbury* segur?
13. Mis on reaktsioonvalu eelised ja puudused?
14. Kuidas toimub kile tootmine ekstrusioonimeetodil?
15. Kirjeldage termovormimise protsessi. Milliseid materjale vormitakse sel meetodil?
16. Milliseid tooteid valmistatakse rotovormimise meetodil?
17. Mis erinevus on avatud ja suletud poorsusega vahtudel?
18. Kus kasutatakse elastseid vahtusid? Kus kasutatakse jäikasad vahtusid?
19. Mis otstarve on kalandril ja milliseid tooteid saadakse selle abil?
20. Nimetage erinevaid kiudude ketrusmeetodeid ja tooge välja eelised ja puudused.
21. Milliseid plastide omadusi tuleb silmas pida nende lõiketöötlemisel?
22. Tooge välja plastide positiivsed omadused tootmistehnoloogia seisukohast.
23. Mida peab arvestama plastide mehaanilisel katsetamisel?
24. Miks peaks plastist toote seinapaksus olema võimalikult ühtlane?
25. Mis on sisetüki kasutamise eesmärk? Miks ei võiks plasttootes avasid keer-  
mestada?
26. Kuidas tagatakse metallist sisetüki fikseerimine plasttootes?
27. Mis seadet kasutatakse elastomeeri või kompaundi töötlemiseks lehekujuliseks?
28. Millises tootmisetapis toimub kummitoote vulkaniseerimine?
29. Nimetage kaks olulisemat keraamiliste materjalide rühma ja tooge välja erine-  
vused nende valmistustehnoloogias.
30. Mis on levinuimad klaasi (klaastoote) valmistamise tehnoloogiad?
31. Kuidas saadakse klaaskiude?
32. Kas termotöötlemise abil saab muuta klaasi omadusi?
33. Kirjeldage lühidalt tehnokeraamika valmistustehnoloogiat.
34. Mille poolest erinevad kile- ja lobrivalu?
35. Mis on keraamika põletamise ja/või paagutamise eesmärk?
36. Kuidas toimub keraamiliste materjalide mehaaniline töötlemine?
37. Milles seisneb käsilamineerimise meetod komposiitmaterjalide valmistamisel?
38. Mis on prepreg ja millised on prepregide kasutamise eelised?
39. Milliseid kiutooteid oskate nimetada?
40. Kirjeldage mähkimismeetodit. Milliseid tooteid on otstarbekas valmistada selle  
meetodi abil?
41. Mida kujutab endast pultrusioonimeetod?



## Soovitatav kirjandus

1. DeCarmo's *Materials and Processes in Manufacturing*, International Student Version, Eleventh Edition, 2013, John Wiley ja Sons, Inc., 512 p.
2. Mikell P. Groover. *Principles of Modern Manufacturing*, Fourth Edition, 2011, John Wiley ja Sons Inc., 1002 p.
3. P. Kulu, *Metalliõpetus*, 2005, TTÜ kirjastus, 290 lk.
4. J. Kübarsepp, P. Kulu, *Materjalitehnika seletav sõnaraamat (eesti-inglise-vene)*, 2013, TTÜ kirjastus, 438 lk. + inglise-eesti ja vene-eesti registrid.
5. *Mehaanikainseneri käsiraamat* (üldtoimetaja P. Kulu), 2012, TTÜ kirjastus, 492 lk.
6. P. Christjanson, *Polümeeriteadus*, 2008, TTÜ kirjastus, 279 lk.
7. O. Loog, H. Timotheus, J. Järv, *Orgaanilised polümeerid*, 2012, Tartu Ülikooli kirjastus, 278 lk.

# Aineregister

## A

Abitaganurk	315
Abitagatahk	314
Abrasiivketas	371,374,379
Abrasiivlint	370,385
Abrasiivlinttöötlus	385,411
Abrasiivmaterjal	329,371,380
Abrasiivtöötlus	300,370,386
Absoluutne pigistus	27
Adhesiivliitmine	212,278
Agglomeratsioon	187
Ahendamine, ahendus	88
Ahi	
induktsioon ~	165
kaar ~	165
kaudtoimekaar ~	165
kaudtoimeleek ~	164
kiirgus ~	164
otsetoimekaar ~	165
otsetoimeleek ~	164
šaht ~	163
tiigel ~	164
Alasi	52,54,62
Anodeerimine	420
Antifriktioonpulbermaterjal	204
Antioch-protsess	150
Apreteerimine	477
Arvuhtimisega treikeskus	346
Arvuhtimispink	307
Arvuhtimissüsteem	306
Atomisatsioon	431
Augustus, augustamine	41,50
Augutorn	50
Aurrasvatus	413
Aursadestus	429
füüsikaline ~	429
keemiline ~	431
Autoklaav	487
Avalõikus, avalõikamine	67,82,83
Avardamine	88,348,350
Avardi	350

## B

Bluum	35,71
Bluuming	29,35

## C

Chvorinovi reegel	111,115
CNC-pink	307
CNC-treikeskus	346

## D

Defekt	
joon ~	15
pidevus ~	174
pinna ~	15,35,174
punkt ~	15
ruum ~	15,20,24
valu ~	107,160,174
Deformatsiooniseisund	14,15
Deformatsioonisoojus	18
Deformatsioonitakistus	16,19
Deformeerimistsoon	44,46
Dekarbonisatsioon	20
Devitrifikatsioon	466
Difusioon	196
hetero ~	198
oma ~	198
Dislokatsioon	15,16
Dresseerimine	34,37
Dupleksprotsess	170
Dünaamiline	
rekristallisatsioon	19

## E

Eemaletõukejõud	310,311
Eksotermiline	448
Ekstrudeerimisnõel,	
ekstrudeerimistorn	41
ekstrudeerimistempel	39
Ekstrudeerimine,	
Ekstrusioon	13,39,438
hüdrostaat ~	41,76
ko ~	440
lindimeetodil	440
plasti	438
pulbri	194
Ekstrusioonjääk	40
Ekstrusioonkonteiner	39
Ekstruuis	40,42,43
Elastne järelmõju	85,91,98
Elastomeer	461
Elektrikontaktpulbermaterjal	206
Elektroerosioontöötlus	395
maht ~	396,402
traat ~	397, 402
Elektrokeemiline kidaemaldus	394
Elektrolüütsadestus	182,184
Elektropoleerimine	412
Emailimine	416
Esipind	304,314

Eraldusaine	134	kolmespindiline	360
Eraldusoperatsioonid	80,82	konsool ~	358
Eraldustasand	59,120,125	konsoolita ~	359
Eripind	187	kopeer ~	360
Esinurk	301,304,315	laiuniversaal ~	359
Esipukk	341	piki ~	360
Esitahk	304,314	simpleks ~	360
Esitsenter	342	tripleks ~	360
Ettenihe	302,305,338	universaal ~	359
Ettenihkejõud	310	vertikaal ~	358
Ettenihkekast	341	ühespindiline	360
Ettenihkekiirus	338,350,357		
<b>F</b>		<b>G</b>	
Filament	454	Gaasiläbilaskvus	117,133
Filjeer, ketrusdüüs	454	Gaasistuvmudelprotsess	142,143
Fotograafilise meetod	400	Gaasjootmine	276
Fraktsioon, ois	131,186	Gaasipoorsus	108,122,155
Fraktsioonimine	188	Gaaslõikur	291
Frees	353	Gaasuhtmine	108,116
kruvihammas ~	323	Giljotiinkäärid	81,82
kruvihammassilinder ~	322	Grafitisatsioon	169
kuju ~	354	Granuleerimine	189
laup ~	356	Granulomeetriaanalüüs	186
ots ~	356	Granulomeetiline koostis	130
silinder ~	322	Gravitatsioonitegur	157
sõrm ~	356		
tigu ~	369	<b>H</b>	
tigumoodul ~	369	Haardekaar	26
Freesimine	303,353	Haardenurk	26
hamba ~	367	Haavelpuhastus	146
kaasa ~	355	Haavliheitur	146
keemiline	401	Hambaettenihe	357
keerme ~	365	Hambalõikus tigufreesiga	369
kontuur ~	356	Hambarullimine	39
kopeer ~	354	Hambatõukamine	368
laup ~	303,355	Hambatõukepink	368
ots ~	356	Hambatõukur	368
perifeer ~	303,353	Hammasarataste pindsilumine	370
profiil ~	356	Hapesöövitus	413
päri ~	354	Hapnikupiik	292
silinder ~	303,353,354	Haprus	371
soone ~	356	kuuma ~	17
tasa ~	354	sini ~	17
tasku ~	356	Heie	477
vastu ~	354	Hoon	386
Freespink	353	Hoonimine	386
arvuhtimisega	360	Hoonimisluis	386
dupleks ~	360	Horisontaalpainutusmasin	98
horisontaal ~	358	Hõõrdejõud	21,26,40
kahespindiline	360	Hõõrdetegur	18,23,26
		Hõõrdkulumine	378

Hõõrdumine	21,27,41	ahi ~	276
haarde ~	23	infrapuna ~	277
kontakt ~	22	jootel ~	277
Hõõrits	350	gaas ~	276
Hõõritsemine	350	kondensatsioon ~	278
Hööveldus	360	kontakt ~	276
piki ~	360,361	kõvajoodis ~	269
püst ~	360,361	laine ~	277
rist ~	360,361	lohistus ~	277
Höövelpink		paagutus ~	199
piki ~	362	pehmejoodis ~	269
püst ~	361	sukeldus ~	276
rist ~	362	takistus ~	276
<b>I</b>		Jugapuhastus	146
Immutus	204	Jugatöötlus	390,410
Impulss-stantsimine	62	Juhtsammas	64,94
Impulsslehtvormimine	88,101	Jämendus, jämendamine	49,50,76
Infiltrant	204	Jämetilksiire	239
Infiltratsioon	204	Järeleandvus	119,131-134
Infusioon		<b>K</b>	
vaakum ~	485	Kaasaveduk	342
membraan ~	491	Kaasaveopadrin	342
Injektsioonvormimine	489	Kahanemine	111-113
leht ~	476	joon ~	167,170
surve ~	475,489	tard ~	112,119
vaakum ~	490	tardumisaegne	112
Inokulaator	110,166	tardumiseel ~	111,113
Iseavanev keermestuspea	365	tardumisjärgne	112
<b>J</b>		tardumis ~	112,113
Jadasälkamine	84	vedel ~	111,113
Jahutus		Kahanemisjoonlaud	123
juga ~	313	Kahanemisvaru	123
kõrgsurve ~	313	Kaitsekeskkond	20
udu ~	313	Kaitsekihi eemaldus	400
Jahutus-määrdevedelik	30,306,312	Kalander	462
Jahvatus	181	Kalandrimine	453,463
Joode	269	Kalestumine	17,45,74
Joodetavus	275	Kalestumistegur	17
Joodis	269	Kalibreerimine	45,202,439
amorfne	274	Kalibreerimistsoon	44,46
iseräbustuv	273	Kaliiber	28
kõva ~	273	valtsi ~	28
pehme ~	273	venitus ~	28
Jootekoost	269	eel ~	28,36
Jootel	277	lõpp ~	28,36
Jootepilu	273	pigistus ~	28,36
Jooteräbusti	273,275	Kaliibrimine	36
Jootetõlvik	277	Kalle	
Jootmine	212,269	stantsi ~	60,67
		valu ~	120

Kammlõikepink	363	käsi ~	216
Kammlõikus	323,363	käsikaar ~	229,234
hammaste	368	külm ~	260
sise ~	364	laserhübrid ~	251
välis ~	364	laserikiir ~	251
Kapsel	200	löökkontakt ~	259
Kapseldamine	201	MAG-	237
Kapslitustamine	201	MIG-	237
Karastamine		MIG/MAG-	237
klaasi	466	mikroplasma ~	244
keemiline	466	otshõrd ~	263
Karbonüül	182,184	plahvatus ~	264
Karbonüülide lagundamine	182	plasma ~	243
Katastroofkulumistsoon	333,378	projektsioonkontakt ~	256
Keemiline graveerimine	401	punktkontakt ~	255
Keemiline segamine	189	põkk-kontakt ~	257
Keemiline taandamine	182,183	reljeefkontakt ~	256
Keemiline väljalõikus	401	räbu ~	252
Keermeklupp	365	räbustikaar ~	240
Keermepuur	350,366	sula ~	214
lahtivõetav	366	sulamatu elektroodiga kaar~	229
Keermerullimine	76	sulatuspõkk-kontakt ~	258
Keermestus	364	sulava elektroodiga kaar ~	229
keermepuur ~	350,366	takistus ~	253
üksservilõikur ~	339,364	takistuspõkk-kontakt ~	258
Keeviskonstruktsioon	212	tardfaas ~	213
Keeviskoost	212	termiit ~	249
Keevisliide	218	TIG-	242
Keevispunkt	253	täidistraat ~	240
Keevisvann	214	ultraheli ~	265
Keevismetall	214	valts ~	261
Keevitatavus	226,227	vastakkaar ~	244
Keevitus	212	Keevitusalaldi	232
difusioon ~	265	Keevitusasend	221
ekstrusioon ~	267	Keevitusdefekt	282
elekterkaarpeale ~	427	Keevitusdeformatsioon	224
elekter-räbu ~	252	Keevituse ajagraafik	253
elektronikiir ~	250	Keevituse soojussisestus	234
elektrood ~	234	Keevitusgeneraator	232
gaas ~	245	Keevitusinverter	232
hapnik-atsetüleen ~	245	Keevitusjäähõrde	224
hõrd ~	261	Keevitusliimliitmise	280
implantaat ~	268	Keevituspõleti	248
infrapunakiirgus ~	268	Keevitustrafo	232
joonkontakt ~	257	Keraamika	
joote ~	277	tehno ~	468
kaar ~	229	kristalne	464
kaitsegaas ~	237	Keragrafiitmalm	166-169
kontakt ~	253	Kermis	200-205,328
kuumgaas ~	267	Kessoon	143
kuumplaat ~	266	Ketaskäärid	82

Kiirlõiketeras	325	Kujumuuteoperatsioon	80
Kiirus		Kujutegur	185
deformatsiooni ~	17,25,65	Kulumine	
deformeerimis ~	17,21,62	abrasioon ~	331
moone ~	17,18	adhesioon ~	332
pealesadestus ~	218	difusioon ~	332
Kiiruskast	341	esitahul	330
Kilepuhumine	440	lohk ~	330
Kinnisliide	212,269	tagatahul	330
Kips	150	Kulumiskindlus	47, 333
Kiud		Kulumisriba	330
ketrus ~	454	Kummlehtvormimine	98
pidev ~	475	Kummeerimine	462
Klaas	464	Kuubiline boornitriid	330
float ~	464	Kuumkõvadus	324
karastatud	466	Kuumkõvendus	134
Kobestus, kobestamine	135	Kuumpunkt	114,115,120
Koekstrusioon	440	Kuumpressimine	200,445,473
Kohtjämendus, kohtjämendamine	49,66,76	Kuumsurvetõõtlusvahemik	19
Kokill	109,152	Kuumsinkimine	421
Kokkusulamatus	283	Kuumutuskaev	35
Koks	163	Kuumvalukanal	444
Kollektor	126	Kõvaanodeerimine	421
Kollerregisti, koller	135	Kõvakroomimine	420
Kompaktmaterjal	200,209	Kõvasulam	201,205,326
Kompaund	436	Kõvenemine	133,143,150
vormi ~	446,479,480	Käigukruvi, veokruvi	341,364
Kompensaator	111,114,126	Käiguvõll	341
Komposiit[materjal]		Kärn	122
keraamikamaatriks ~	200	Kärnieemaldus	145
metallmaatriks ~	201,472	Kärnimasin	137
Konsolidatsioon	195,200	Kärnipesa	144
Koonussüvisti	350	Kärnitugi	144
Koorikvorm	146,147,438	Kärnivärv	134
Koorimine	306	Kärnkast	124
Kooskõlaliikumine	302	Kärnmärk	122,125
Kopeerimeetod	363,367,396	Külgpilu	396
Kopeertempel	73	Külmjämendus,	
Kopp		külmjämendamine	74,76
kallutatav	144	Külmjämendusmasin	76
pöörd ~	144,145	Külmkõvendus	134
sifoon ~	144		
stopper ~	144,145	<b>L</b>	
valu ~	144	Laast	
Kraadilõikamine	58,59	astmeline	309
Kraadisoon	55,58	element ~	309
Kraat	56,61	murde ~	308
Kraatimine	460	pidev ~	308
Kristallisatsioonivahemik	110,113,114	terikukasvajaga voolav ~	308
Kuivtugevus	132	voolav ~	308
Kujuhälve	174,407	Laastu paksenemine	307

Laastueraldusprotsess	300	Lihvketta teritus	379
Laastumurdik	308,318	Lihvlint	385
Laastusoon	319	Lihvpink	
Lahtilõikeplaan	82	horisontaaltasa ~	381
Lahutustasand	59,120,125	roome ~	385
Laminaat	484	vertikaaltasa ~	382
Lamineerimine	484	ümar ~	383
kiud ~	488	Liide	
kuiv ~	487	joote ~	271,283
märg ~	484	katte ~	218,219,280
pihustus ~	488	keevis ~	218,221
prepreg ~	487	liim ~	278-280
Leek		nurk ~	218,219
gaasi ~	245	ots ~	218,219
normaal ~	247	plõks ~	456
oksüdeeriv	247	põkk ~	218,220,280
taandav	247	serv ~	218
Lehtmaterjal (plast)	450	T-	218,219
Lehtmetail, plekk	32,33,37	vastak ~	218
Lehtvormimine	79	Liim	
elektrohüdro ~	102	hermetiseeriv	281
elektromagnet ~	102	konstruktsioon ~	280
impulss ~	101	mittekonstruktsioon ~	281
kumm ~	98	Liimimine	278
kõrgenergeetiline impulss ~	101	Liimliide, liimis	278-280
plahvatus ~	101	Liimvaik	280
vasar ~	95	Liitmisprotsess	211
vedelik ~	98,99	Liivvorm	121,132
üliplastne	100,101	Likvatsioon	111
Lihvimine		Lobri	194,469
elektrokeemiline	394	Lubjakivi	163
hammasrataste	370	Lõikamis-koorimismeetod	400
keerme ~	366	Lõikejõud	310
kooriv	377	Lõikekiirus	302,305
kopeer ~	382	Lõikeliikumine	302,305
lint ~	385	Lõikepink	306
ots ~	380	Lõikeplaat	317,321
perifeer ~	380	Lõikerežiim	305,333
rist ~	383	Lõikeserv	314,315
roome ~	384	Lõikeserva kaldenurk	315
sise ~	382	Lõikeservanurk	316
süva ~	385	Lõikesügavus	305
tasa ~	380	Lõiketöödeldavus	335
tsentriteta	384	Lõiketöötlus	301
ümar ~	382	elektronkiir ~	399
Lihvimistegur	379	kuiv ~	314
Lihvimisvedelik	380	laserikiir ~	398
Lihvketas	371	mittetraditsiooniline	300,388
Lihvketta kõvadusaste	373	tava ~	300
Lihvketta rihtimine	379	ultraheli ~	389
Lihvketta struktuur	373	Lõikevedelik	30,306,312

Lõikevõimsus	311
Lõikur, lõikeriist	304
abrasiiv ~	370
hammaslatt ~	369
hammasratas ~	368
hulkserv ~	304
kamm ~	363
keerme ~	365
mitmikserv ~	304
üksserv ~	304
Lõikuri püsivusaeg	332
Lõikus, lõikamine	
abrasiivjuga ~	392
abrasiiv-veejuga ~	391
ava ~	82,83
elektronkiir ~	294
eraldus ~	290
gaas ~	290
gaas-laser ~	294
eraldus ~	290
hapnik ~	290
hapnik-atsetüleen ~	290
hapnik-laser ~	294
hapnikpiik ~	292
hapnikrübusti ~	292
kaar ~	292
kamm ~	363
ketaskäär ~	81
laser ~	294
lasersublimatsioon ~	294
maha ~	81,82,339
metallektroodkaar ~	292
metallpulberhapnik ~	292
pinna ~	290
plasma ~	293
plasti	455
sirglõiketera ~	81
sisse ~	82,84
süsielektroodkaar ~	293
termo ~	289
veejuga ~	390
välja ~	82,98
ära ~	82,84
Lõng	477
Lõppkujulähedane	25
Lõõmutamine (klaasi)	465
Läbikesevitamatus	283
Löögienergia	53,54
Löögikasutegur	54
Lühikaarsiire	239
Lünnett	343

## M

Malm	
grafiit ~	165
hall ~	166,169
keragrafiit ~	166,167
kompaktgrafiit ~	167,168
kõrgtugev	166
legeer ~	169
liblegrafiit ~	166,167
süntees ~	169
temper ~	168,169
valge ~	165,168,169
valgendatud	169
vermikulaargrafiit ~	167
Masin	
diafragmapress ~	137
horisontaalstantsimis ~	57,66,69
kokillivalu ~	153
kuumkambersurvevalu~	155
külmkambersurvevalu ~	154
press ~	137
pöördpainutus ~	98
radiaalstantsimis ~	71
rappe-press ~	138
rappe ~	137
rullpainutus ~	77,78,98
segupuhur-kärni ~	138
rotatsioonstantsimis ~	70
survevalu ~	154,155
vormi ~	137
Metallikogur	122,126
Metallilõikepink	306
Metallitamine	422
Metallvorm	151,152,160
Mikrotöötlus	402
Mikrosõel	186
Mittepidevtöötlus	12
Mittepurustav kontroll	283
Mittetäitumine	283
Modifikaator	110,166
Moonekiirus	17,18
Mudel	
gaasistuv	142,149
kordkasutus ~	121
korduvkasutus ~	121
poolitatav	123,136
püsi ~	121
tervik ~	123,136
Mudelikomplekt	122,125
Mudelplaat	123,136
Mudeliplakk	148



Mudelisegu	133	Peenestus	181
Mustamine	418	Perforeerimine	83
Mähkimine	481	Pidevtoetus	12
Märgtugevus	132	Pihustus, pihustamine	181,182
Märgumine	198,204,269	detonatsioon ~	425
<b>N</b>		dünaamiline külmgas ~	424
Naatriumsilikaat	133,143	gaas ~	182,183
Nihketasand	307	kaar ~	425,426
Normaalkulumistsoon	333,378	kiirleek ~	423,427
<b>O</b>		leek ~	423
Offsetrõkk	456	plasma ~	426,427
Ohutuskart	478	sulametalli	182
Osaliselt tardunud piirkond	110	tavaleek ~	423
Osis, fraktsioon	131,186	termo ~	422
Osiseline koostis	130	tsentrifugaal ~	182,183
Ortogaallõikemudel	307	vesi ~	182,183
<b>P</b>		Pihustuskaar	239
Paagutatud polükristalne teemant	329	Pihustussiire	239
Paagutus, paagutamine	195,471	Piirdeaine	134
aktiiv ~	199,472	Pikihööveldus	360
mikrolaine ~	199	Pikitükeldus	81
plasmaaktiveeritud	201,472	Piklikkus	185
reaktsioon ~	199,472	Pindamine	417
surve ~	201,472	aursadestus ~	429
tardfaas ~	197	elektrolüüt ~	419
vedelfaas ~	197,198	elektrokeemiline	417,419
laser ~	473	füüsikaline aursadestus ~	328,425,429
Paagutusjootmine	199	galvaan ~	419,420
Paagutuskarastus	199	ioon ~	430,431
Padrun		keemiline aursadestus ~	328,425,431
isetsentreeruv	343,344	keevitus ~	427
kaasaveo ~	342	kuumsukel ~	417,421
kolmepakiline	343	mehaaniline	433
neljapakiline	343	pihustus ~	422
tsang ~	343,344	pulbermetallurgia ~	433
Painutus, painutamine	77,84,98	sulatus ~	212,216,427
rull ~	77	termo ~	422
surve ~	77	trummel ~	433
tõmbe ~	77	vooluta	418
venitus ~	77,85,90	Pinded	
Pakettlõikus	292	email ~	416
Patenteerimine, patentimine	46	fosfaat ~	418
Pealejootmine	429	kromaat ~	418
Pealevalgumine	283	mittemetalsed	418
Pealesulatus		pihustus ~	423
elektronkiir ~	428	värv ~	414,416
laserikiir ~	428	Pindkalestus	79
plasmakaar ~	427	Pindkalestushaaveldus	79
		Pindsilumine	79
		Pindtugevdamine	34,37
		Pingeseisund, pingus	12,14,42

Pinn	52,54,70	horisontaalpainutus ~	98
sisselõikega	49,50	hõõrdkruvi ~	52,64
tasand ~	49	hüdro ~	52,54,63
vorm ~	50,51	kahesambaline	97
Pinnaenergia	195	kaheliuguriline	87,96
Pinnakaredus	408,409	konveier ~	97,98
Pinnapuhastus		kruvi ~	52,55,64
keemiline	412	mehaaniline	96
mehaaniline	410	mitmeliuguriline	96,97
Pinool	341	painutus ~	77,98
Plaanseib	343	portaal ~	97
Plakeerimine	433	põlv ~	96,97
Plankimine	387	revolver ~	97
hammasrataste	370	vänt ~	52,63,96
Plankimispasta	387	väntkang ~	97
Plankur	387	üheliuguriline	96
Plastisool	437	ühesambaline	97
Plekk, lehtmets	32,33,37	Press-seib	40,43
dresseeritud	33	Pressimine	190,468
kuumvalts ~	33	hüdrostaat~	192
külmvalts ~	33	hüdrostaatvorm ~	76
lõõmutatud	33,34	isostaat ~	192
must ~	33	kahepoolne	191
pindtugevdatud	33	kahesuuna ~	191
pooltugevdatud, poolkõva	33	kombineeritud vorm ~	74
täistugevdatud, täiskõva	33	kopeer ~	73
valge ~	33	kuum ~	200,445,473
veerandtugevdatud, veerandkõva	33	kuumisostaat ~	200,472
Poleerimine	386,388,411	külm ~	448
Poleerpasta	388	külmisostaat ~	192
Polüstüreen		külmvorm ~	74,77
paisutatud	453	otsevorm ~	74
ekstrudeeritud	453	pärivorm ~	74
Poolpuhas töötlus	306	vastuvorm ~	74
Pooltardolek	160,202	vibro ~	191
Poorsus		vorm ~	74
gaasi~	108,155,156	välja ~	190
kahanemis ~	113,114,156	ühepoolne	191
ava ~	204	ühesuuna ~	191
Pragu	119	ühetelgne	206
korduvkuumus ~	227	üle ~	203
kristallumis ~	119	Pressis	188,190
kuum ~	119,175,228	Pressitavus	188
külm ~	119,175,227	Profiil	32,34,43
lamell ~	227	pained ~	32,35
mikro ~	80,83	periood ~	34
vesinik ~	227	plast ~	439
Prepreg	478	õõnes ~	40,43,45
Press		Profiilmetall	12,32,40
C-kerega	97	Protsessilõõmutus	20,45,87
ekstsentrisk ~	63,96,97	Puhastus	82,84,412

haavel ~	146	Püstkanal	122,125,126
juga ~	146		
keemiline	412	<b>R</b>	
lahusti ~	412	Radiaaljõud	310,311
leelis ~	412	Rafineerimine	172,173
trummel ~	146	Reaktsioonvalu	448
ultraheli ~	413	Revolverpea	345,347
Puhumisvormimine	440	Ribitamine	91
Pulber	181-186	Rihtimisabinõu	379
alamikroonne	185	Rihveldamine	340,459
nano ~	185	Ristkelk, ristsuport	341
sfääriline	186,187	Roving	477
täislegeer ~	183	Rullumismeetod	367,368
ülipeen ~	185	Räbu	106,163,252
Pulberlaagrimaterjal	204	Räbupüüdel	122,126,128
Pulbermaterjal	178,196,204	Räbusti	163,230,240
Pulbermaterjali vormimine	190,200	Räbutühik, räbusuletis	118
Pulbermetallurgia	178,205		
Pulbertehnoloogia	179,209	<b>S</b>	
Pulbertoode, pulberdetail	178	Sadestus, sadestamine	
Pulbri varisemisnurk	187	elektrolüüt ~	182,184
Pulbri voolavus, pulbri voole	187	elektrostaatilise	462
Pulbrimääre	188,189	Sammakristallide tsoon	111
Pultrusioon	480	Savi	131,133
Punumine	483	bentoniit ~	131
Purustuskatse	283,284	kaoliin ~	131
Puur		polümineraalne	131
keerd ~	319	vormi ~	130,131
keerme ~	350,366	Segamine	181,188,189
lame ~	321	Segisti	
lapik ~	321	kaksikkoonus ~	189
püssi ~	321	koller ~	135
sirgsoon ~	320,456	laba ~	189
spiraal ~	319	tigu ~	189
Puurimine	339,348	trummel ~	189
keerme ~	366	Segregatsioon	111
tsentri ~	349,350	Segu	
Puurpink	351	anorgaaniliste sideainetega	133
laua ~	351	kuumkövenev	134
mitmespindiline	353	kärni ~	130,132,134
radiaal ~	352	külmkövenev	134
vertikaal ~	352	orgaaniliste sideainetega	134
Puurpea	351	pulbri ~	189
Puurvõll	347	täite ~	133
Põhjakoks	163	vormi ~	132,133
Põletamine	471	Seguheitur, segupaiskur	139
Põletatud kips	150	Segupuhur	138
Püsiliide	212,269	Sepakirves	51
Püsivpingega vooluallikas	231	Sepatorn	50
Püsivusaeg	312,332	Sepavaltsimine	69
Püsivvooluga vooluallikas	231	Sepis	48

Sepistus, sepistamine		külmvorm ~	73,74
käsi ~	48	leht ~	79,95,101
masin ~	48	orbitaal ~	72
press ~	48,54	press ~	63
vasar ~	48,52,55	pulbertooriku kuum~	203,209
Sideaine	133,189,194	radiaal ~	70,71
Sidepind	61	reljeef ~	91
Sideserv	319	rotatsioon ~	70
Sidus,niidistus	477	silelöike ~	81,83
Siidtrükk	400	soevorm ~	73
Silindersüvisti	350	täppislöike ~	81,83
Sinirabedus, sinihaprus	17	vorm ~	13,55,58
Sirgestamine	93	väljasuruv külm ~	74
Sisekraat	61	üliplastne	65
Sisetükk	447,459	Stantsiplokk	64,94
Sisendtsoon	44,46	Stantsis	55,59-61
Sisselöige	283	leht ~	34,91
Sisselöikus	82,84	täppis ~	65
Sissetöötlustsoon	333,378	Sukeldamine	461
Skimmimine	462	Suletis	174
Släab	35,36	liiva ~	175
Släabling	29,35	räbu ~	118,175
Soojuskindlus	371	Superfiniš	388
Sool-geel protsess	468,470	Supordipöll	341
Sooneraud	50	Suport	341
Soonimine	50	Surveinfiltratsioon	204
Sordimetall	32,36,43	Surverõngas	87
Spindel	341	Survetöötlus	
Spindlikast	341	isoterm ~	19
Stants		kuum ~	12,19
avalöike ~	58,93	külm ~	12,20,45
jadoime ~	93,94	soe ~	12,19,21
järjestiktoime ~	93,95	Survevalu	
koostoime ~	93,95	metallide	154
kraadilöike ~	56,58	plastide	441,442
liittoime ~	93	pulber ~	193
paine ~	93	reaktsioon ~	448
sügavtõmbe ~	93	~ vorm	154,444,445
vasara ~	55,56,58	~ masin	442-444
väljalöike ~	93,95	Survevormimine	445
äralöike ~	56	Suline	439
Stantsikaldenurk	60	Suundtardumine	115
Stantsikalle	60,64,67	Sõelanalüüs	131
Stantsimine		Sõeltrükk	400
horisontaal ~	66,69	Sälkamine	82,84
impulss ~	62	Söövitus	400
isotermvorm ~	65	Sügavtõmbamine	86
kraadiga vorm ~	55,56	õhend ~	87
kraadita vorm ~	56	õneskeha	87
kuumstants ~	63,65	Sügavtõmbetegur	87
kuumvorm ~	58,65,73	Süsihappegaasprotsess	143

Süsinikekvivalent	228	pulber ~	180,190,202
Süsiniku väljapõlemine	20	riba ~	37,38
Süvistus, süvistamine	349,350	sepistus ~	48
<b>Š</b>		sulaklaas ~	465
Šahtahi	163	valts ~	35
Šeiver	369	vormi ~	440
Šeiverdus	369	Torn	344
Šerardatsioon	433	augu ~	50
<b>T</b>		ekstrudeerimis ~	41
Taganurk	304,315	tervik ~	344
Tagapind	304,314	ketas ~	344
Tagapukk	341	koonus ~	344
Tagatahk	304,314	tsang ~	344
Tagatsenter	342	sepa ~	50
Tagi	37,48	sisetrei ~	347
Tagipurusti	37	frees ~	358
Tagitustamine	36	Toru	
Tampotrükk	456	keerdõmblus ~	34,38
Tandemvaltspink	29,30	keevis ~	34,37
Tampotrükk	456	paksuseinaline	34
Tardumisvahemik	110,114	pikiõmblus ~	34
Taylori valem	334	õhukeseseinaline	34
Teemant	329	õmbluseta	34,37
Tekstuur	23,24	Torurullimine	37
kiud ~	23,24,31	Torurullimispink	37
kristallograafia ~	23,24,31	Traat	46
riba ~	24,31	patenteeritud	46
Temmimine	78	pehme ~	46
Temperdamine	168	täistugevdatud, täiskõva	46
Teradevaheline libisemine	25	valts ~	33
Terahoidik	341	Traavers	358
Terainhibiitor, terapeenendaja	110	Treiautomaat	345
Teralisus	371-374	Treimine	302,337
Terapiir	15,17,19	faasi ~	339
Terik	304,314	kontuur ~	339
Terikukasvaja	309	koonuse	339
Teritusabinõu	379	kopeer ~	339
Teritusluisk	379	kuju ~	339
Termomõju tsoon	221	ots ~	339
Termoplast	439	silinderpinna	339
klaaskiudmatiga armeeritud	479	sise ~	337,339,347
Tihedus	188	soone ~	340
Tihendatavus	188,189	Treipink	341-342
Tinatamine	277,422	automaat ~	345
Toitekanal	122,126,128	instrumentaal ~	345
Toorik		karusellsise ~	347
hülss ~	37	kiirlõike ~	345
leht ~	36,37	mitmespindiline varb ~	346
plast ~	440	poolautomaat ~	346
		revolver ~	345,347
		sise ~	347,348

tööriista ~	345	ultraheli ~	389
universaal ~	345	veejuga ~	390
universaalautomaat ~	346	vibratsioon ~	411
vertikaalrevolver ~	345	viimistlus ~	306
vertikaalsise ~	347	voolabrasiiv ~	392
ühespindiline varb ~	346	Töötluskeskus	306
Treitoriku maksimumläbimõõt	342	Töötlusvaru	60,121,306
Trummeldamine	146,410	Tühik	15
Trummelpuhastus	146	gaasi ~	116,170,174
Tsenter		kahanemis ~	112,113
esi ~	342,344	liiva ~	174
liikumatu	343	Tükeldus, tükeldamine	13,51,81
pöörd ~	343		
taga ~	342,344	<b>U</b>	
Tsentrite kõrgus	342	Ultrahelipuhastus	413
Tugevnemistegur	17	Universaaltreiautomaat	346
Tõmbamine	13,44,454		
kinnistorn ~	45	<b>V</b>	
liikuvtorn ~	45	Vaakumdegasatsioon	108
rotatsioon ~	91	Vaakumaurustus	430
sügav ~	86	Vaakumsulatus	107
tornita	45	Vagranka	163
ujutorn ~	45	Vagu	
venitus ~	90	eel ~	57
õhendsügav ~	87,88	ettevalmistus ~	57,58
Tõmbematriits, tõmbesilm	46	lõpp ~	57,58
Tõmbepink	47	muljumis ~	57
Tõmbesilm	44,46	must ~	57
Tõukamine, püsthööveldus	360,361	painutus ~	57,58
Tõukepink, püsthöövelpink	361	puhas ~	57
Tõusukanal	122,126	rullimis ~	57,58
Tõusupea	126	stantsi ~	55,56,59
Täistihematerjal	200,209	venitus ~	57,58
Täppisstantsis	65	Vaguvalts	28
Tööriistateritus	377	Vahtplast	452
Tööriistavao sisselõikus	356,394	Vajakvalu	174
Töötlus		Valand	120,125
abrasiivjuga ~	389,391,392	Valandi järeltöötus	145
abrasiivveejuga ~	389,391	Valandi väljalöömine	145
fotokeemiline	401,402	Valtsid	27-30
elektrokeemiline	393,402	Valtside kaliibrimine	36
elektronkiirlõike ~	399	Valtsimine	13,26,453
keemiline	400,402	kald ~	27,28
kiirviimistlus ~	328	kontrollitav	39
kooriv ~	306	kruvi ~	27,28
laserikiirlõike ~	398	kuum ~	27,31,39
mittepidev ~	12	külm ~	27,31
mittetraditsiooniline	300,388	piki ~	27
pidev ~	12	plasti	453
poolpuhas ~	306	pulbri	194,195
siluv ~	306	risti ~	27

rõnga ~	39	Valukauss	125,127
sepa ~	69	Valukiirus	106
torn-toru ~	37	Valukollektor	126
õõne ~	37	Valupea	111,114,126
Valtsmetall	30,32-35	Valuplokk	30,49
Valtspink	28-30	Valupressimine	447
Valtsprofileerimine	38	Valusõlm	442
Valtstool, valtsraam	28-30	Valutemperatuur	107,110
Valtstraat	33	Valuvormi konstant	111
Valtsivagu	28	Varbtreiautomaat	345
Valu	437	Varrukas	440
gaasistuvmudel ~	142,143	Vasar	
gaasistuvmudeltäppis ~	148,149	auru ~	52,53
hapniksurve ~	156	friksioon~	52,53
keraamikavorm ~	148,150	hõõrd ~	52,53
kile~	470	lihttoime ~	53,63
kipsvorm ~	148,150	liittoime ~	53,63
kokill ~	107,151	pneumo ~	53,62
koorik ~	107,146	sepistus ~	52,54,62
kordkasutusvorm ~	106,121	stantsimis~	53,59,61,63
korduvkasutusvorm ~	107,151	vastulöögi ~	52,62,63
lahustuvmudeltäppis ~	148	Vasarapea	53,62
liivvorm ~	107,121	Vedelvoolavus	108
lobri ~	193,194,469	Venitus,venitamine	49,454
madalsurve ~	153	piki ~	49,50
pidev ~	159	ring ~	50
plasti	437	risti ~	50
poolkorduvkasutusvorm ~	107,151	Venitusmähkimine	90
poolpidev ~	159	Venitusprofileerimine	90
poolpüsivorm ~	107,151	Venitussirgestus	93
pooltard ~	160	Venitustõmbamine	90
press ~	160	Venitusvormimine	90
pulbersurve ~	193,469	Ventilatsioon	151
püsivorm ~	107,151	Ventilatsioonikanal	122,152
reaktsioon~	448,475	Veokruvi, käigukruvi	341,364
reaktsioonsurve ~	448	Veovõll, veokruvi	341
rotatsioon~	451	Vermimine	78
sulavmudeltäppis ~	148,149	Vesiklaas	133,143
surve ~	107,154	Viimistlusrullimine	79
transfeer~	447	Visuaalkontroll	284
tsentrifugaal ~	107,156	Vitriifikatsioon, klaasistumine	466
tsentrifuug ~	157	Vooder, vooderdis	153
täppis ~	107,148	Voolavus, voole	187
täppisvalandi~	148	Voolavusmõõtur, voolemõõtur	187
vaakum ~	153	Vooluallika tunnusjoon	230
vaakumsurve ~	156	Vorm	
väljavalamis ~	153	kuiv ~	133,143
Valudrossel	126	märg ~	133,143
Valukaevend	143	pindkuivatatud valu ~	143
Valukanalite süsteem	122,125-130	survevalu ~	154,160
kuum~	444	valu ~	121, 122

Vormihoidik	140	Väljapõletus	196
Vormijahuti	115	Väljatõukaja	444,446
Vormiliiv	130	Väljundtsoon	44,46
Vormimasin	137,140	Värvimine	414
impulss ~	139	elektrostaatiline	415
press ~	137	pihustus ~	415
rappe ~	137	pulber ~	415
Vormimaterjal	130	sukel ~	414
Vormimine		Väänamine	50,51
elektrohüdroleht ~	102	Õ	
elektromagnetleht ~	102	Õgvendus, õgvendamine	93
impulssleht ~	101	Õmblus	
injektsioon ~	193,489	joote ~	269
käsi ~	136	keevis ~	214,218,219
leht ~	79,98,100	Ä	
maht ~	25	Äralõikus,äralõikamine	58,82,84
masin ~	136	Ääristus,ääristamine	89
mehaaniline termo ~	100,101,451	Ü	
pihustus ~	202	Ülekuumutusaste	108
plahvatusleht ~	101,102	Üterullimine	37
pneumo ~	100,101	Üterullimispink	37
puhumis ~	440	Üliplastne lehtvormimine	100,101
põrand ~	143	Üliplastne sulam	100
rotatsioon ~	91,92	Üliplastsus	24,100
roto ~	451		
surveinjektsioon ~	475,489		
termo ~	100,450		
transfeer ~	447		
vaakum ~	141,451		
vaakuminjektsioon ~	490		
vahttoote	452		
vasarleht ~	95		
vedelikleht ~	98,99		
venitus ~	90,454		
virn ~	141		
vormkasti	139		
vormkasteemaldusega	139		
vormkastita	140		
üliplastne leht ~	100,101		
Vormimistempel, vormimispaak	77,90,91		
Vormisegu regenererimine	135		
Vormivärv	134		
Vormkast	122,124		
Vulkaniseerimine	463		
Võrdtelgkristallide tsoon	111		
Väljalõikamine, väljalõikus	82,98		
jägita	82		
keemiline	401		
Väljalõikeplaan, lahtilõikeplaan	82		
Väljalöödavus	133		
Väljalöömisrest	145		