



1918

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TARTU KOLLEDŽ

LEHTMETALLI TÖÖSTUSLIKUD LÕIKUSTEHNoloogIAD

INDUSTRIAL CUTTING TECHNOLOGIES OF SHEET METAL

NTS 01 17

Magistritöö
materjalide taaskasutuse erialal

Üliõpilane: **Hedvig Vaht**

Juhendaja: **Jüri Resev**

Tartu 2017

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.
Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite
tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt
pärinevad andmed on viidatud.

..... (töö autori allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood:

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

..... (juhendaja allkiri ja kuupäev)

Kaitmisele lubatud: (kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: (allkiri)

ABSTRACT

Vaht, H. Industrial cutting technologies of sheet metal, Master's Thesis, 3 copies, Tartu, 2017, 61 pages, 22 figures, 25 tables, format A4, in Estonian language.

This research is compiled for comparing main industrial technologies to cut sheet metal. The author of this paper compared laser cutting, stamping and waterjet cutting by testing specimen. Two different thicknesses of stainless and carbon steel were chosen to analyze surface roughness, cutting speed, hardness and the quality of the cut edge. The results were within the acceptable limits. Pros and cons of each technology were outlined. Given results can be used to produce details of similar dimensions.

Keywords: stainless steel, carbon steel, stamping, laser cutting, waterjet cutting, surface roughness, hardness, cutting speed, cut edge.

SISUKORD

SISSEJUHATUS

TÄHISED JA LÜHENDID

1.	SISSEJUHATAV OSA.....	9
1.1	Töö eesmärk ja ülesanded.....	9
1.2	Katsekeha projekteerimise algülesanne.....	10
1.2.1	Katsekeha parameetrid ja materjalide valik.....	11
1.3	Materjalide tehnoloogilised omadused.....	12
1.3.1	Happekindla terase keemilis-füüsikalised parameetrid.....	12
1.3.2	Süsinikterase keemilis-füüsikalised parameetrid.....	13
1.4	Metallide töödeldavus.....	15
1.4.1	Teraste survetöötlemine.....	15
1.4.2	Terase termotöötlemine.....	17
1.4.3	Karastamine.....	18
1.4.4	Löömutamine.....	19
1.5	Kõvaduse määramine.....	20
1.5.1	Rockwelli kõvadus.....	20
1.5.2	Brinelli kõvadus.....	21
1.5.3	Vickersi kõvadus.....	22
2	TEHNOLOOGILINE OSA.....	24
2.1	Stantsimine.....	24
2.2	Vesilõikus.....	28
2.3	Laserlõikus.....	30
2.4	Tehnoloogiate võrdlus.....	34
2.5	Tehnoloogilised eeldused ja vajalikud eelprotsessid lõiketöötlemiseks.....	35
2.6	Töötlemise kestus.....	37

3	KATSELINE OSA	38
3.1	Katsekehade laserlõikus	38
3.2	Katsekehade vesilõikus.....	42
3.3	Katsekehade stantsimine.....	45
3.4	Kõvaduse määramine	48
4	KATSETULEMUSTE ANALÜÜS	50
4.1	Pinnakaredus.....	50
4.2	Lõikuskiirus	51
4.3	Lõikeserva kvaliteet.....	53

KOKKUVÕTE

KASUTATUD KIRJANDUS

LISAD

LISA 1 Katsekeha joonis

SISSEJUHATUS

Käesolevas magistritöös on uuritud kolme enamlevinud tööstuslikku tehnoloogiat roostevaba- ja süsinikterasest lehtmetsalli lõikamiseks ning teraste termo- ja mehaanilist survetöötlemist üldiselt. Kirjeldatud on mõlema materjali füüsikalisi-keemilisi omadusi ning terase mehaanilist surve- ja termotöödeldavust.

Teema valik põhineb masinaehituse ja kogu kaasaegse metallitööstuse kiirel arengul, mille tõttu on vajalik anda rakenduslikku informatsiooni teraste töötlemisest ning erinevate lõikustehnoloogiate võimalustest lehtmetsalist detailide efektiivseks tootmiseks. Olulisteks teguriteks võib pidada teostatava lõikuse kvaliteeti, ajalist kulu ning töömahtu, millest sõltub tootmise efektiivsus.

Uurimuses kirjeldatakse roostevaba- ja süsinikterase omadusi ja lõiketöötlemise võimalusi stantsimisel, laser- ja vesilõikusel. Erinevuste analüüsimiseks ja järelduste tegemiseks projekteeriti katsekeha, mis lõigati kahest erineva paksusega süsinikterasest ja roostevaba lehtmetsalist. Katsekeha töötlemine koosnes lisaks väliskontuuri lõikusele ka ümarate ja nelinurksete avade ning nurgaraadiuste lõikamisest.

Kokku analüüsiti kümme katsekeha. Teostati lõikeserva pinnakareduse mõõtmised, võrreldi detailide lõikekiirust, kontrolliti materjalide kõvadust ning analüüsiti lõpliku serva kvaliteeti visuaalselt. Töö tulemusi saab kasutada sarnase keemilise koostise ja parameetritega detailide lõikuseks vajalike tehnoloogiate valimiseks.

Varem teostatud sarnased eestikeelsed uurimustööd pärinevad peamiselt Nõukogude Liidu ajast, seega pole põhjalikumalt kirjeldatud uudsemaid tööstuslikke ning automatiseeritud viise lehtmetsalist detailide lõikuseks. Paljud samal teemal põhinevad uurimustööd on inglise või vene keeles, seega on tekkinud vajadus eestikeelse ülevaate andmisest tehnoloogiate valikul.

Magistritöös kasutatud materjalid ja uuritud tehnoloogilised võtted on seotud materjalide taaskasutuse ja ettevõtte juhtimise erialal õpitud insener- tehniliste valdkondadega. Uurimuses kirjeldatud analüüsi ja kogutud andmeid võib kasutada sarnasel erialal õppiv tudeng tutvustava materjalina või juhendina suundumaks erialasele tööle metallitööstusettevõttes. Arvutustes on kasutatud metallile kui materjalile iseloomulikke füüsikalisi parameetreid ja keemilist koostist, mis on kontrollitavad ka leheformaatide sertifikaatidelt.

TÄHISED JA LÜHENDID

- A -jälje pindala (mm^2)
- AISI -Ameerika Raua ja Terasi Instituut (ingl American Iron and Steel Institute)
- CAD -tarkvarasüsteem (ingl Computer - Aided Design)
- CAM -tarkvarasüsteem (ingl Computer - Aided Manufacturing)
- CNC -arvprogrammjuhtimine (ingl Computer Numerical Control)
- D -kuuli läbimõõt (mm)
- d -tekkinud jälje läbimõõt (mm)
- dwg -digitaalse joonise failiformaat
- dxf -digitaalse joonise failiformaat
- E -elastsusmoodul (GPa)
- F -stantsimiseks vajaminev jõud (N)
- F_0 -eeljõud (N)
- F_1 -indentorile rakendatav jõud (N)
- F_k -rakendatav jõud (N)
- F_{lmax} -maksimaalne löikejõud löikestantsimisel (N)
- G -jäikusmoodul (GPa)
- h -indentori tekitatud jälje sügavus materjalis (mm).
- HB -kõvadus Brinelli skaalal
- HRA -kõvadus Rockwelli A - skaala järgi
- HRB -kõvadus Rockwelli B - skaala järgi
- HRC -kõvadus Rockwelli C - skaala järgi
- HV -kõvadus Vickersi skaalal
- L -katsekeha külje pikkus (mm)
- L_1 -katsekeha kontuuri kogupikkus (m)

L_h	-katsekeha nelinurkse ava pikkus (mm)
l_{avad}	-avade ümbermõõtude summa (mm)
n	-katsete arv (tk)
N	-skaalale iseloomulik konstant
n_d	-detailide arv (tk)
r	-välisnurga pikkus (mm)
R_a	-pinnakaredus (μm)
R_l	-materjali löiketugevus (N/mm^2)
R_M	-materjali tõmbetugevus (N/mm^2)
R_m	-tõmbetugevus (MPa)
$R_{p0,2}$	-voolavuspiir (MPa)
s	-materjali paksus (mm)
T_a	-abiaeg (s)
t_m	-töötlemiseks kuluv aeg (s)
T_m	-masinaaeg (s)
t_s	-sulamistemperatuur ($^{\circ}\text{C}$)
v	-lõikuskiirus (m/s)
δ_0	-katsekeha ümara ava pikkus (mm)
ρ	-tihedus (kg/m^3)
α	-püramiidi tahkudevaheline nurk Vickersi meetodi korral
Δ	-skaalajaotis
$\sum R_a$	-pinnakareduse katsete tulemuste summa (μm)

1. SISSEJUHATAV OSA

1.1 Töö eesmärk ja ülesanded

Materjalide taaskasutuse ja ettevõtte juhtimise erialapraktika ja tootmispraktika teostamine metallitööstusettevõtetes tekitab vajaduse andmaks ülevaade kaht erinevat marki metalli töötlemisvõimalustest modernses tootmiskeskkonnas. Otsustati keskenduda lõiketöölusele ning tehnoloogiliste erinevuste võrdlemiseks projekteeriti katsekeha. Lõigatud katsekehadele teostati pinnakareduse ja kõvaduse mõõtmised ning analüüsiti lõikeserva suhtelist kvaliteeti visuaalselt, tuginedes kogutud informatsioonile.

Antud uurimistöö aluseks oli koguda andmeid katsekehade lõikuselt ja leida informatsiooni võrdlemaks süsinik ja roostevaba happekindla terase omadusi ning töödeldavust. Peamine eesmärk on lõiketöödeldavuse võrdlemine tänapäeva metallitööstuses kasutatavate tehnoloogiate abil, leidmaks parim lahendus projekteeritud katsekehaga sarnaste parameetritega detailide kvaliteetseks lõikuseks. Uurimistöö kaudseks eesmärgiks oli lühikese juhendmaterjali koostamine mehaanika- ja metallieriala tudengitele, tutvustamaks enim kasutatavaid tehnoloogiaid metallitööstuses, võttes aluseks ka valitud materjalide omadused ning käitumise töötlemisel.

Valitud lõikusviisideks olid stantsimine, laserlõikus ja vesilõikus.

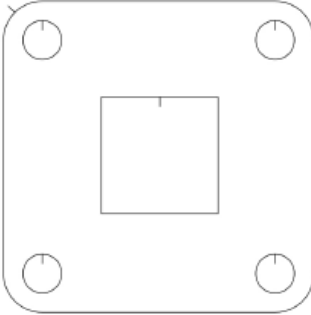
Töö ülesanded:

1. Tutvuda lõiketööluse ja metallide erialakirjandusega
2. Projekteerida sobilike parameetritega katsekeha.
3. Kirjeldada valitud materjalide tehnoloogilisi parameetrid ja töödeldavust
4. Kirjeldada lõikustehnoloogiate eripärasid
5. Katsekehade lõikamine ja vajalike mõõtmiste teostamine
6. Saadud tulemuste analüüs

1.2 Katsekeha projekteerimise algülesanne

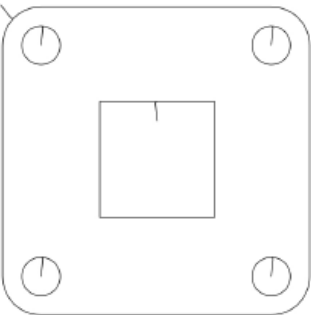
Projekteerida sobilike parameetritega katsekeha laserlõikuse, stantsimise ja vesilõikuse võrdlemiseks, kusjuures arvestada ringavade ja teravnurkade vajalikkusega, Joonis 1. Võrrelda kaht erinevate omadustega materjali: süsinikterast ja roostevaba terast. Valida materjaliformaatide paksusteks 3,00 ja 10,00 mm, võrdlemaks lõikuskiiruse sõltuvust lehe paksusest.

Sheets				
Dimension X	Dimension Y	Weigth	Number	Article info
1500,00 mm	3000,00 mm	106,650 kg	1	

Parts				
	Part number	1		
	Name	P Joonis 1.4404 3,0mm	Debi / Credi	1 / 1
	Description		Dimension X	160,00 mm
	Info1		Dimension Y	160,00 mm
	Info2		Area eff.	0,02040 m ²
	Info3		Weigth	0,48348 kg
	Order info			
	Cutting time	00:00:08	Non-prod. times	00:00:00

Joonis 1. AISI316 3,0 mm katsekeha mudel laserlõikusprogrammis

Sheets				
Dimension X	Dimension Y	Weigth	Number	Article info
1500,00 mm	3000,00 mm	355,500 kg	1	

Parts				
	Part number	1		
	Name	P Joonis 1.4404 10,0mm	Debi / Credi	1 / 1
	Description		Dimension X	160,00 mm
	Info1		Dimension Y	160,00 mm
	Info2		Area eff.	0,02040 m ²
	Info3		Weigth	1,61160 kg
	Order info			
	Cutting time	00:00:54	Non-prod. times	00:00:00

Joonis 2. AISI316 10,0 mm katsekeha mudel laserlõikusprogrammis

1.2.1 Katsekeha parameetrid ja materjalide valik

Katsekeha on projekteeritud parameetritega, mis võimaldavad kirjeldada kõigi kolme valitud lõikustehnoloogia erinevusi. Lõigatud detailide näitel saab iseloomustada nurga raadiuste, teravnurkade ja ümarate avade lõikust nii stantsimise, vesi- kui laserlõikuse abil. Olulisteks näitajateks on ka lõigatud serva suhteline kvaliteet, lõikuse kiirus, materjali kõvadus ja pinnakareduse R_a väärtused.

Katsekeha kontuuride pikkused, Tabel 1, on mõõdetud detaili mudelilt, Joonis 2:

Tabel 1. Katsekeha kontuuride pikkused

Kontuur	Pikkus (mm)
Ümar ava (δ_0)	62,83
Välisnurga pikkus (r)	31,42
Külje pikkus (L)	605,66
Nelinurkne ava (L_h)	240,00

Valitud lehtmaterjali paksusteks on 3,0 ja 10,0 mm, et võrrelda lõikustehnoloogiate erinevusi katsekeha paksuse muutumisel. Materjali paksuse suurenedes kasvab ka lehtmaterjali lõikusaeg, mille põhjal saab arvutada kogu ajalise kulu detailide tootmiseks.

Valitud materjalideks on tööstuses peamiselt kasutatav süsinikteras S355MC ja roostevaba happekindel teras AISI316. Materjalid erinevad üksteisest nii keemiliste elementide sisalduse, füüsikaliste omaduste, kui kasutusala poolest.

Teras S355MC on konstruktsioonteras, milles sümbol „S“ viitab konstruktsioonterase peasisemisele, 355 on terase voolepiir detaili minimaalse paksuse korral, tähis „M“ viitab termomehaanilisele valtsile ja tähis „C“ viitab külmtöötlemisele. [1, lk 124]

Teras AISI 316 ehk materjal tunnusnumbriga 1.4404 on happekindel roostevaba teras, milles number „1“ viitab teraste põhigrupile, numbriline kombinatsioon „44“ viitab roostevabale legerterasele ja numbrigrupp „04“ on terase järjekorranumber vastavas terase klassis. [1, lk 121]

1.3 Materjalide tehnoloogilised omadused

1.3.1 Happekindla terase keemilis-füüsikalised parameetrid

Terase AISI 316, legeritavate elementide sisaldus materjalis Tabel 2, on roostevaba austeniitne terase liik. Vajalike keemiliste, füüsikaliste, mehaaniliste ja magnetiliste omaduste saamiseks on materjali struktuuri sulatatud mitmeid nn legerivaid elemente.

Molübdeen lisab materjalile korrosiooni- ja happekindlust, muutes sellega metalli vastupidavaks sooladele. Seepärast on AISI 316 laialdaselt kasutatav materjal nii toiduainetööstuses kui ka niiskes keskkonnas. Korrosioonikindlust aitab suurendada ka roostevaba materjali kõrge 16 - 18% kroomisisaldus võrreldes süsinikterastega, mis sisaldavad ainult kuni 10% kroomi.

Tabel 2. Legerivate elementide sisaldus AISI 316-s [2]

Element	Vähim sisaldus (%)	Suurim sisaldus (%)
C	-	0,08
Cr	16,50	18,00
Mn	-	2,00
Mo	2,00	3,00
Ni	10,00	14,00
P	-	0,045
S	-	0,03
Si	-	1,00

Kroom reageerib kokkupuutel õhuhapnikuga, moodustades õhukese läbipaistva passiveeriva oksiidikihi, mis kaitseb materjali korrodeerumise eest. Oksiidikihi lõhkumisel või kahjustamisel näiteks kriimustamise tagajärjel regenereerib see end uuesti.

Passiveeriv kiht tekib, kui kroomi sisaldus materjali kogumassist on suurem kui 10,5% kuid vajalik on ka piisav õhuhapniku olemasolu reaktsiooni toimumise eeldusena.

Materjali füüsikalised parameetrid:

1. Jäikusmoodul $G = 86 \text{ GPa}$
2. Elastsusmoodul $E = 193 \text{ GPa}$ [3]
3. Voolavuspiir $R_{p0,2} = 415 \text{ MPa}$
4. Tihedus $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$
5. Kõvadus 95 HRB
6. Tõmbetugevus $R_m = 530 - 730 \text{ MPa}$
7. Sulamistemperatuur $t_s = 1371 - 1399 \text{ }^\circ\text{C}$ [2, 4]

1.3.2 Süsinikterase keemilis-füüsikalised parameetrid

Terased S355MC, keemiliste elementide sisaldus materjalis, Tabel 3, on termomehaaniliselt valtsitud materjal, mis on parendatud siledapinnalise struktuuriga ning seetõttu sobib kasutamiseks tööstuslikus laserlõikuses. Materjal on ka heade painutusomadustega, ei toimu suuri pingevabastusi painde rakendamisel.

Teras S355MC ei sobi kasutamiseks pideva kõrge temperatuuriga ($+300 \text{ }^\circ\text{C}$) kohtades, sest pideva kuumuse tagajärjel hakkab materjal kaotama oma mehaanilist tugevust. Metall on kõrge löögitugevusega ning hea keevitatavusega [5, lk 17], seepärast leiab see laialdast rakendatavust ehitussektoris ja konstruktsioonterasena.[6]

Süsinikteras on hea kandevõimega, see omadus aitab vähendada valmistatavate detailide kulutusi massile, seetõttu saab seda materjali efektiivselt kasutada autotööstustes, kraanade valmistamiseks, pinnasetöö- ja ehitusmasinate konstruktsioonelementides.[6]

Tabel 3. Keemiliste elementide sisaldus materjalis [7]

Element	Vähim sisaldus (%)	Suurim sisaldus (%)
Al	0,015	-
C	-	0,12
Mn	-	1,50
Nb	-	0,09
P	-	0,025
S	-	0,02
Si	0,01	0,05
Ti	-	0,15
V	0,12	0,20

Süsiniku sisalduse suurenemine materjali koostises suureneb kõvadus ja väheneb plastsus, mis muudab selle termilise töötlemise keerulisemaks. Mida rohkem fosforit süsinikterasest leidub, seda rabedamaks see muutub külmas olekus. Terase termilise töötlemise muudab keerulisemaks ka struktuuris leiduv väävel.

Materjali füüsikalised parameetrid:

1. Jäikusmoodul $G = 80 \text{ GPa}$
2. Elastsusmoodul $E = 200 \text{ GPa}$ [7]
3. Voolavuspää $R_{p0,2} = 355 \text{ MPa}$
4. Tihedus $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$
5. Kõvadus 335 HB
6. Tõmbetugevus $R_m = 450 - 550 \text{ MPa}$
7. Sulamistemperatuur $t_s = 1370 - 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ [8, 9]

1.4 Metallide töödeldavus

1.4.1 Teraste survetöötlemine

Terase survetöötamise üks liike, mehaaniline lõikus, on tehnoloogiline protsess, mille tulemuseks on materjali jaotumine kahte või mitmesse osasse. Protsesse saab liigitada nii töötlusrežiimi, kinemaatika kui ka tööriistale iseloomulike parameetrite põhjal.

Metallid on kristalse struktuuriga ning kristallvõre moodustavate aatomite vahel on üksteist tasakaalustavad jõud. Survetöötlemisel mõjutatakse kristalses struktuuris olevate aatomite tasakaalu sinna rakendatava jõuga, tekitades dislokatsioone. Kuna tasakaal aatomite vahel on rikutud, siis hakkavad aatomid võres ümber paigutuma, et taastada endist tasakaaluolekut. Tekivad plastsed deformatsioonid, mis põhjustavad muutusi nii materjali omadustes kui ka struktuuris.

Struktuuriliste muutuste põhjuseks on peamiselt metalliterade kuju ja mõõtmete muutumine. Iga üksiku tera muutuse võivad põhjustada erineva suurusega mõjuvad jõud või ebaühtlaselt mõjuv pinge. Üldise seaduspärasuse järgi toimub deformatsioon alati väikseima takistuse poole.[10, lk 270]

Survetöötamise eeliseks on seadmete suur tootlikkus ja lõikusprotsessi automatiseerimise võimalus, mille juures kasutatakse materjali maksimaalselt ära ning saab toota täpsete tolerantsidega seeriatooteid.

Metalli omaduste muutus väljendub peamiselt materjali tugevnemises ehk kalesumises. Kalesumisele on iseloomulik kõvaduse suurenemine, kõrgem volavuspiir ja plastilisuse vähenemine, kusjuures kõvadus võib võrreldes deformeerumata metalli põhimassiga muutuda kuni neljakordseks.

Suurema kulumiskindluse ja vastupidavuse juures põhjustab kalesumine aga ka materjali rabeduse suurenemist, mistõttu on see vähem vastupidavam löögijõule ning võib kergemini puruneda.

Lisaks mehaaniliste omaduste muutumisele tekivad muutused ka materjali omadustes:

1. Suureneb elektritakistus
2. Vastupanu korrodeerumisele väheneb
3. Tõmbel tihedus väheneb
4. Ferromagnetiliste materjalide magnetilised omadused muutuvad[11, lk 54]

Anisotroopsuse tekitavad maksimaalse peadeformatsiooni sihis venitatud materjaliterad, mis paiknevad metallilises struktuuris. Mida plastilisem ja pehmem metall on, seda rohkem see kalestub. Seega võib survetöötlemisel tekkinud kalestumine mõjutada oluliselt detaili töövoimet ja käitumist edaspidisel töötlemisel, näiteks painutamisel või lihvimisel.[12, lk 64 - 65]

Metallide deformeerumisel osa deformatsioonienergiast talletub materjali. Selle põhjuseks on terapiiride kasv ja täiendavate dislokatsioonide moodustumine. Kui deformatsioonid on materjalis aset leidnud ning polükristalset metalli kuumutada üle rekristallatsioonitemperatuuri, siis püüab materjal füüsika seaduste alusel võtta madalaima energiaga oleku ehk moodustuvad uued kristallid. Selle põhjuseks on uute kristallisatsioonikeskmete teke ja nende kasv.

Kirjeldatud protsessi nimetatakse rekristallatsiooniks, mille temperatuur sõltub eelnevast deformatsioonist. Mida kõrgem on eelnevalt aset leidnud deformatsiooni aste, seda madalam on rekristallatsioonitemperatuur.

Külmsurvetöötlus viiakse läbi rekristalliooni- ja toatemperatuuri vahel. Mida kõrgem on temperatuur, seda väiksema töötlemisvõimsusega saavutatakse külmtootlusega vastavad materjali mehaanilised omadused. Kui metalli deformeerida plastselt allpool määratud rekristallatsioonitemperatuuri, on tegemist külmtöötlusega. Taolist töötlusviisi kasutatakse metallide ja nende sulamite tugevuse tõstmiseks.

Rekristalliseerival lõõmutamisel ehk struktuuri kuumutamisel taastub aga esialgne kristallstruktuur ning kaasneb plastsuse kasv.

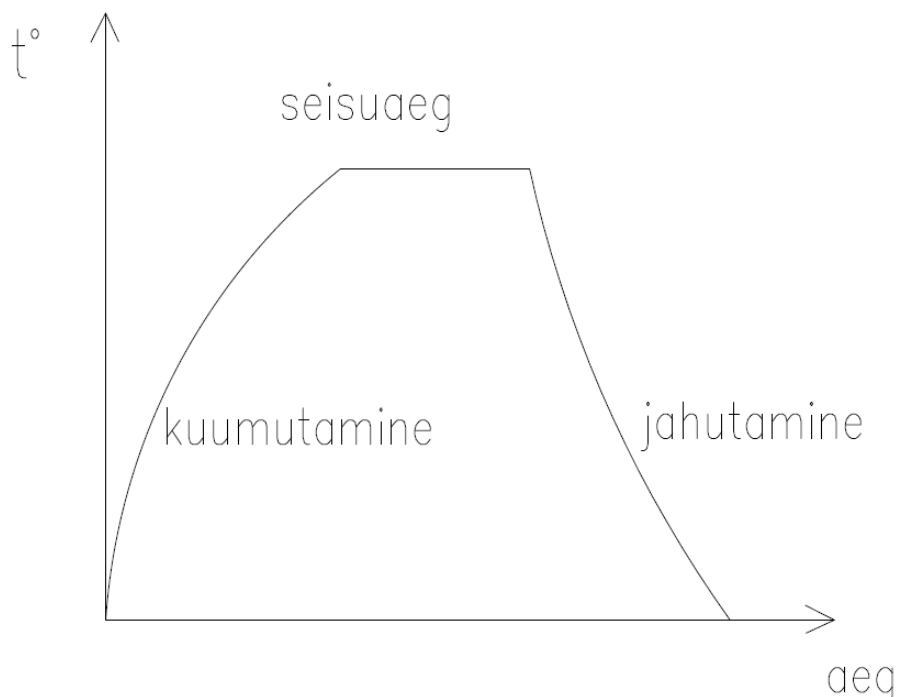
Kui metalle ja nende sulameid deformeerida rekristallatsioonitemperatuurist kõrgemal temperatuuril, siis on see protsess kuumsurvetöötlemine. Rekristallatsiooniprotsess ja deformatsioon võivad leida aset samaaegselt, sellisel juhul leiavad aset suured deformatsioonid ning lõpptulemusena pole metall kalestunud.[11, lk 56]

1.4.2 Terase termotöötlemine

Termika on üks tähtsamaid tehnoloogilisi protsesse teraste töötlemisel. Termotöötluste eesmärgiks on materjali struktuuri muutmine saamaks vajalikke mehaanilisi omadusi. Materjali toorikute termiline töötlemine aitab ühtlustada teraste struktuuri, vähendada sisepingeid ja kõvadust. Taoline termotöötlus on aluseks lehtmetailist toorikute kõveraks tõmbumise vältimiseks ning pragude ja ebavajalike deformatsioonide kõrvaldamiseks materjalist.

Makropinged võivad tekkida kalestumisest plastsel töötlemisel. Termopingete esinemise põhjuseks on temperatuuride erinevused detaili eri osade vahel, mõnikord ka näiteks keevisõmbluste kiire ja ebakorrapärane jahtumine. Faasimuutuste tagajärjel tekivad terases faasipinged. Sisepinged avaldavad mõju nii materjalile kui ka toodetavatele detailidele, seetõttu on oluline nende vältimine kasutades selleks termotöötlust.[11, lk 93]

Terase termotöötlus põhineb peamiselt kolmel etapil, Joonis 3. Esiteks kuumutatakse materjali üle selle kriitiliste temperatuuride ehk faasipiiride, seejärel hoitakse vajalikku temperatuuri kuni struktuurimuutuste tekkeni. Kolmandaks toimub materjali jahutamine, kusjuures jahutamise kiirusest sõltub, kas faasimuutused toimuvad täielikult, osaliselt või ei toimu üldse. Vastavalt eelkirjeldatule eristatakse kaht peamist terase termotöötluste protsessi: lõõmutamine ja karastamine.[11, lk 9]



Joonis 3. Terase termotöötlus

1.4.3 Karastamine

Karastamiseks nimetatakse termotöötuse operatsiooni, mille eesmärgiks on tekitada materjali struktuuris muutusi, mille tulemusena tugevus suureneb. Teraste puhul kasutatakse tava- ehk täiskarastust, mille puhul protsess koosneb terase kuumutamisest, seisutamisest ehk teatud kindla temperatuuri hoidmisest, et tagada kogu materjali ulatuses homogeense struktuuri teke ning aeglasest kontrollitud jahutamisest.[11, lk 104]

Karastamist kasutatakse peamiselt kulumisele alluvate detailide, näiteks juhtpinnad, pressvormid ja nende detailide tootmiseks kasutatavate materjaliformaatide omaduste muutmiseks. Sobilikuks osutuvad terased, mille süsinikusisaldus on suurem kui 0,3%.

Seega antud uurimustöös käsitletavad süsinik- ja happekindel roostevaba teras pole karastamiseks sobilikud oma vähese süsinikusisalduse pärast. Teraseid, mida on enne lõiketöötlemist termotöötlemisel karastatud nimetatakse eriterasteks.[1, lk 172]

Olenevalt teraselt nõutavatest omadustest, koostisest ning toodetavate detailide mõõtmetest tuleb hoolikalt valida karastus- ning jahutustemperatuurid. Mida suurem on terase süsinikusisaldus, seda suurem on materjali mahu muutus faasimuutusel ning seda suurem on selletõttu oht võimalike deformatsioonide, pragude ja pingete tekkimiseks materjalis ehk seda hoolikamalt tuleks valida jahutustemperatuuri.[11, lk 108]

Karastamisega kaasnevad detailides sisepinged, mis liigitatakse päritolu alusel kahte suuremasse rühma: termopinged ehk esimest liiki sisepinged ja faasipinged ehk teist liiki sisepinged.

Termopinged on ristlõike eri osade erinevast jahtumisest tulenevad tsonaalsed sisepinged. Termopinged sõltuvad nii materjali jahtumise kiirusest kui ebahürtlusest ehk temperatuurigradiendi kõikumisest töötuse ajal. Mida suurem on gradient ristlõike ja detaili osade vahel, seda suuremad on esimest liiki sisepinged.

Faasipinged on metallitera sisemuses või üksteisega kõrvuti paiknevate metalliosakeste vahel tekkivate faasimahtude muutustest tekkivad sisepinged. Pinged on seda suuremad, mida suurem on töödeldava metalli süsinikusisaldus ja mida suuremad on sellest tingitud faasimuutused terase struktuuris. Seega teist liiki sisepinged ei sõltu karastamisel kasutatava jahutusprotsessi kiirusest vaid eelkõige faaside mahtude erinevusest.[11, lk 108]

1.4.4 Lõõmutamine

Lõõmutus ehk lõõmutamine on üldiselt esmane termotöötlemise viis, mille peamiseks eesmärgiks on materjali struktuuri ettevalmistamine kas karastamiseks või lõiketöötlemiseks ning, et kõrvaldada kuumtöötlusele eelnenud operatsioonide defekte. Lõõmutamisel kuumutatakse materjali seni kuni hakkavad aset leidma muutused terase struktuuris ning sellele järgneb aeglane ja kontrollitud jahutamine ahjus.

Sageli võib lõõmutamine olla nii esmane kui lõplik terase termotöötlusviis, kui selle protsessiga on saavutatud juba vajalikud terase mehaanilised omadused. Lõõmutamise eesmärgiks on terase struktuuri ümberkristalliseerimine ja sisepingete kotamine, millega saavutatakse vajalikud materjali omadused. Peamised lõõmutusviisid on difusioon-, täis-, ja madallõõmutus.

Difusioon- ehk homogeniseerivat lõõmutust kasutatakse legeerterastest valandite ja valuplokkide struktuuri ja keemilise koostise stabiliseerimiseks. Teraseid kuumutatakse temperatuurini 1000 – 1100°C ning seisutusaeg jääb vahemikku 10 – 20 h.

Sellise kuumuse juures suureneb keemiliste elementide aatomite difusioonkiirus ning toimub osakeste ümberpaigutumine suurema kontsentratsiooniga aladelt väiksema kontsentratsiooniga kohtadesse ehk leiavad aset difusioonprotsessid. Homogeniseeriva lõõmutuse tagajärjel muutub terase struktuur jämedateralisemaks ning väheneb erinevus terade koostises.[11, lk 91]

Täis- ehk tavalõõmutuse eesmärgiks teraste termotöötluses on sepiste ja valandite struktuuri peenendamine ning sisepingete kaotamine. Peamiselt kasutatakse taolist viisi kõrgsüsinikteraste kõvaduse vähendamiseks, plastuse suurendamiseks ja lõiketöödeldavuse parandamiseks.[11, lk 92]

Madallõõmutusega vähendatakse metalli kõvadust ning suurendatakse plastust madalatel temperatuuridel, tavaliselt 500 – 650 °C. Seejärel toimub terase aeglane kontrollitud jahutamine ahjus. Madalad temperatuurid on vajalikud termopingete tekkimise vältimiseks terase struktuuris.[11, lk 94]

1.5 Kõvaduse määramine

1.5.1 Rockwelli kõvadus

Kõvaduskatsega määratakse materjali vastupanuvõime plastsele deformatsioonile. Katse käigus surutakse materjali pinda indentor ehk suurema kõvadusega keha. Indentori poolt tekitatud jälg on kõvaduse määramise aluseks.

Indenteerimisel surutakse vähedeformeeruvast materjalist kuuli, koonuse või püramiidi kujuline keha katsetatavasse materjali. Mida pehmema materjaliga on tegu, seda suurem on tekkinud jälg, mille alusel kõvadust määrata.[13]

Rockwelli kõvaduse meetodiga surutakse katsetatavasse materjali kas teraskuul läbimõõduga 1/16“ või teemantkoonus läbimõõduga 1/8“ ja tipunurgaga 120°. Indentori surumiseks kasutatakse eeljõudu $F_0 = 10 \text{ kgf}$ (98 N) või $F_0 = 3 \text{ kgf}$ (29,4 N), ning sellega fikseeritakse vajalik kuuli asend. Hiljem koormatakse indentorit lisajõuga, kus summaarne jõud F_k jääb vahemikku 15 kgf (147,1 N) kuni 150 kgf (1471 N).

Sõltuvalt testitavast materjalist kasutatatakse kolme erinevat skaalat:

Rockwelli A - skaala puhul tähistatakse kõvadust tähe kombinatsiooniga HRA, indentoriks koonus, kasutatav jõud F_k 590 N ning testitava materjali klassiks on kõvasulamid. Rockwelli B - skaalat kasutatatakse iseloomustamiseks süsinikteraste kõvadust, tähiseks HRB, indentorina kasutatatakse kuuli jõuga F_k 980 N. Karastatud teraste kõvadust iseloomustab Rockwelli C - skaala tähistusega HRC. Materjali surutav indentor on koonus, kasutatav jõud F_k 1471 N.

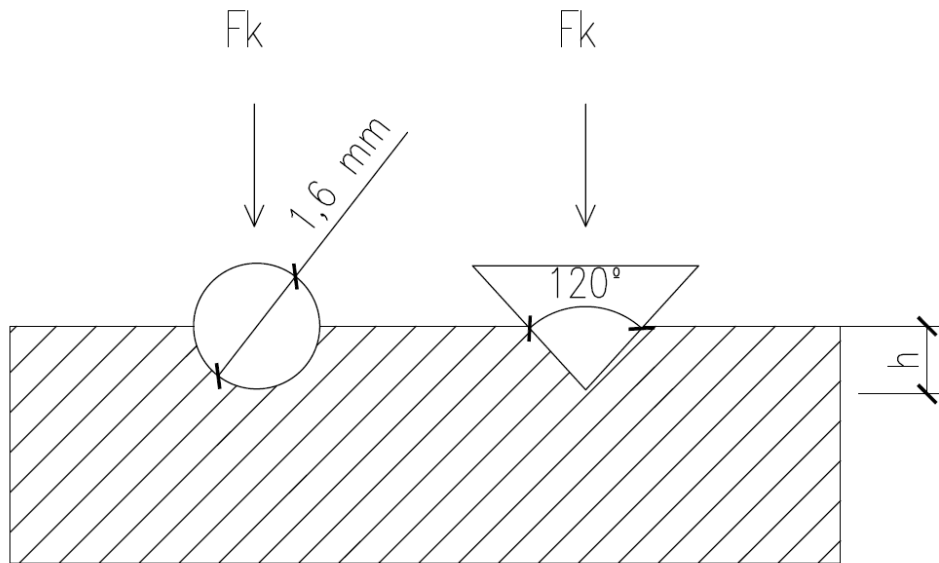
Kõvadust iseloomustab indentori materjali tungimise sügavus, leitakse valemiga:

$$HR = N - \frac{h}{\Delta}, \quad (1)$$

kus N – skaalale iseloomulik konstant (A ja C skaala järgi $N = 100$ ja B skaala järgi $N = 130$)

Δ – skaalajaotis

h – indentori tekitatud jälje sügavus materjalis mm.[11, lk 26]



Joonis 4. Rockwelli kõvaduskatse skeem

1.5.2 Brinelli kõvadus

Brinelli meetodi puhul surutakse testitavasse materjali kõvasulamkuul, mille läbimõõt on vahemikus 1 – 10 mm ja kasutatava jõu suurus 9,8 – 29420 N (1 – 3000 kgf). Kõvadus avaldatakse valemi abil:

$$HB = \text{const} \frac{F_1}{A} = 0,102 \cdot \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (2)$$

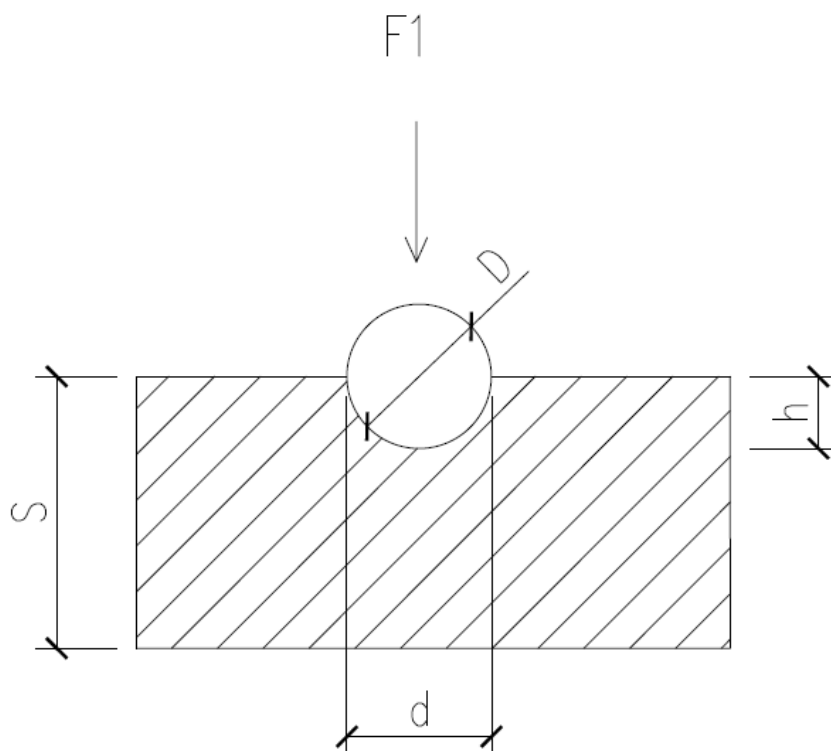
kus F_1 – rakendatav jõud N

D – kuuli läbimõõt mm

d – tekkinud jälje läbimõõt mm

A – jälje pindala mm^2

Brinelli kõvaduse tähiseks on HB ning see määratakse kuulile mõjuva jõu ja tekkiva jälje suhtena, kus jälje läbimõõt d mõõdetakse mikroskoobi abil kahes ristisuunas täpsusega 0,1 mm ning arvutatakse selle keskmine väärtus.



Joonis 5. Brinelli kõvaduskatse skeem [14]

1.5.3 Vickersi kõvadus

Vickersi kõvaduse määramise meetodit nimetatakse ka mikrokõvaduse määramise katsemeetodiks. Testimisel surutakse katsekehasse teemantpüramiid, mis tekitab vajaliku jälje. See sobib peamiselt õhemate materjalide kõvaduse määramiseks, kuid võimaldab testida nii pehmeid kui ka kõvemaid sulameid.

Lisaks metallide katsetamisele saab selle meetodiga katsetada ka muid materjale, näiteks komposiite ja keraamilisi materjale. Testimine eeldab katsekehade ettevalmistamist ning vajaliku rakendatava jõu määramist sõltuvalt materjali tüübist ja paksusest.

Mikrokõvadusel rakendatavad jõud varieeruvad vahemikus mõnest grammist ühe kuni mitme kilogrammini. Makrokatsete korral võivad püramiidile rakendatavad jõud ulatuda rohkem kui 30 kilogrammini.[15]

Katse käigus surutakse materjali neljatahuline püramiid, mille tahkudevaheline tipunurk on 136° , tavakatsetuse korral kasutatakse jõudu $4,9 - 980 \text{ N}$ ($5 - 100 \text{ kgf}$), mikrokõvaduse korral $0,098 - 1,95 \text{ N}$ ($0,001 - 0,2 \text{ kgf}$).

Kõvaduse arvutamiseks kasutatakse valemit:

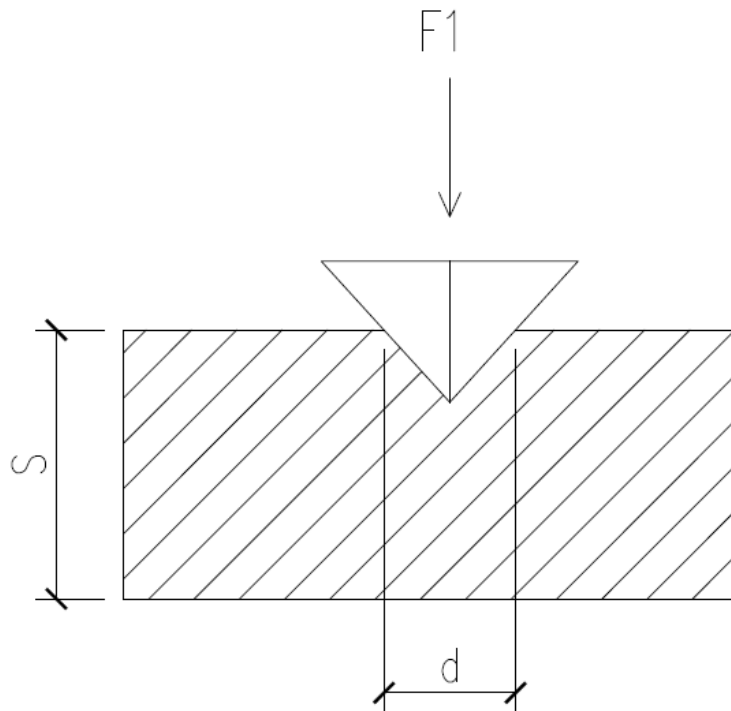
$$HV = \frac{F_1}{A} = \frac{2F_1}{d^2} \sin \frac{\alpha}{2} = 0,1981 \frac{F_1}{d^2}, \quad (3)$$

kus F_1 – rakendatav jõud N

d – tekkinud jälje läbimõõt mm

A – jälje pindala mm^2

α – püramiidi tahkudevaheline nurk 136° [11, lk 27 - 28]



Joonis 6. Vickersi kõvaduskatse skeem

Tänapäeval on lisaks eelpool kirjeldatud meetoditele kasutusel ka portatiivsed seadmed kõvaduse mõõtmiseks. Kaasaskantavaid seadmeid kasutatakse juhul, kui on vaja katsetada suurt hulka detaile või metallilehti ning seda võimalikult väikese ajakuluga.

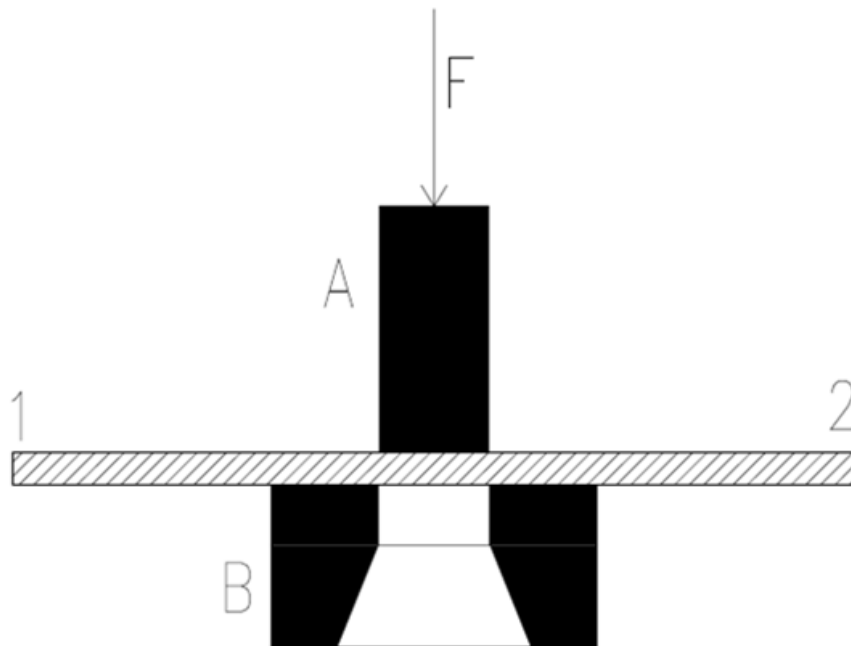
2 TEHNOLOOGILINE OSA

2.1 Stantsimine

Üheks lehtmaterjali survetötluse liigiks on lõikamine templiga ehk lehtmaterjali lõikestantsimine. Stantsi liikuvaks osaks on tempel, mis surutakse lõikamisel paigalasetsevasse ossa ehk matriitsi.

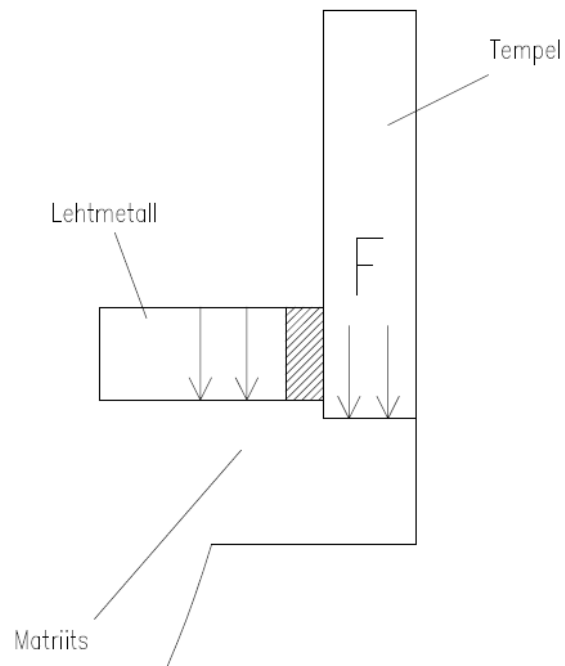
Lõike kujunemist iseloomustab, Joonis 7, kus jõu F mõjul surutakse töödeldavasse lehtmaterjali tempel A, mis tekitab templi ja matriitsi B lõikeservi ühendavas materjali pinnas 1 - 2 nihkepunged, mille tagajärjel toimub lõikamine. Templi välisserva ja matriitsi siseserva vahele jäetakse tavaliselt 1,0 - 3,0 mm lõtk, et soodustada lõike toimumist.[16, lk 46 - 47].

Lõikestantsimise puhul on templi ja matriitsi vaheline optimaalne ühepoolne lõtk ligikaudu 5 - 10% lehtmaterjali paksusest. Taolise vahega saavutatakse lõikevöö kõrguseks 10 - 30% materjali paksusest.[17, lk 221]



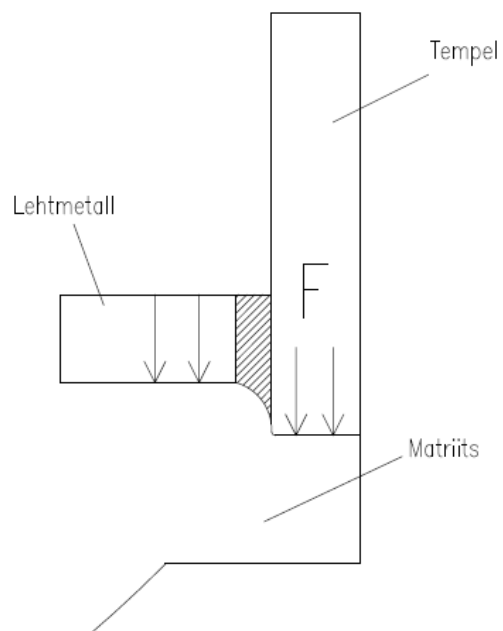
Joonis 7. Lõikestantsimise skeem

Templi lehttoorikusse surumisel toimub materjali elastne painutamine, kus materjali pinged ei ületa elastsuspiiri, Joonis 8.



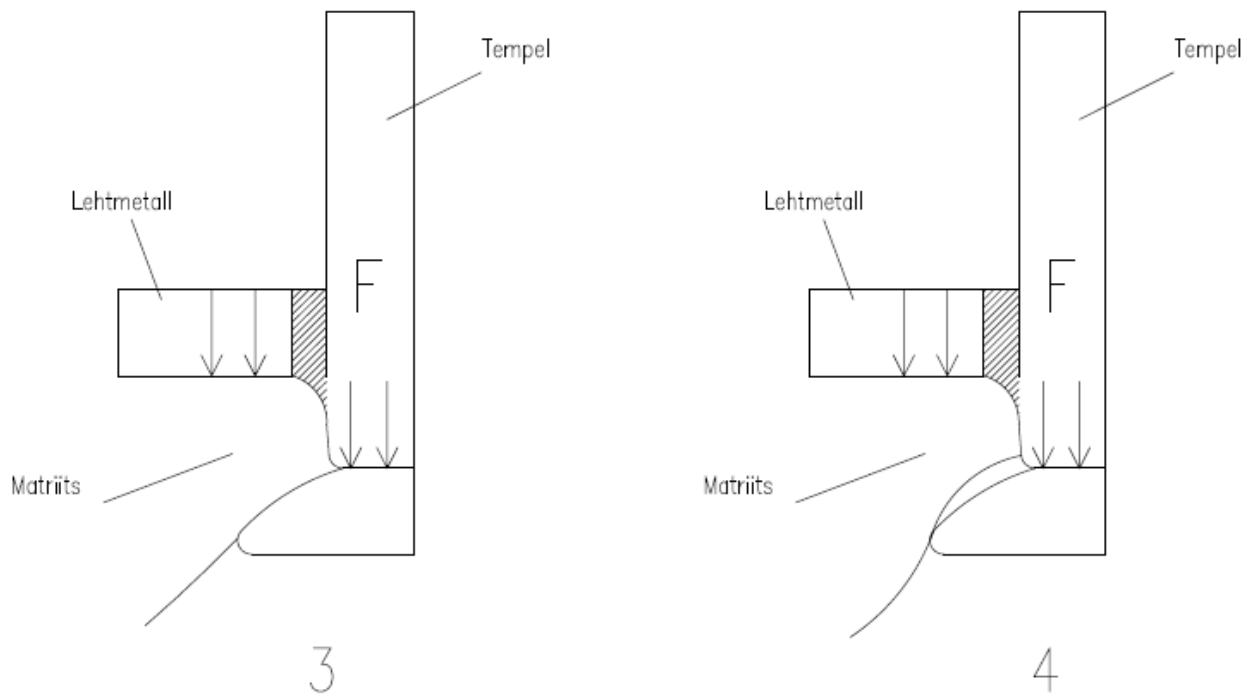
Joonis 8. Lõikestantsimise esimene faas

Templi edasisel sisenemisel materjali toimub süvenemine mitte kogu templi otspinnaga vaid teatud vöö väärtuses, Joonis 9.



Joonis 9. Lõikestantsimise teine faas

Ristisuunas toimub materjali venitamine, pikisuunas surutakse materjal liikumise suunas kokku. Tekib plastne deformatsioon ja metall kalestub. Templi edasisel süvendamisel metalli hakkab plastiliselt ammendumata. Kolmandas faasis tekivad matriitsi lõikeservade ees praod ning templi edasisel liikumisel tekivad praod (Joonis 10, 3) ka templi lõikeservade ees, mille tagajärjel surutakse väljalõigatud detail matriitsi (Joonis 10, 4).[16, lk 46 - 47].



Joonis 10. Lõikestantsimise kolmas ja neljas faas

Stantsimise jaoks vajalik jõud suureneb materjali paksuse suurenedes või mida laiema diameetriga avasid on vaja lõigata. Kuni 7,0 mm läbimõõduga avad saab lõigata maksimaalselt 2,0 mm paksusesse materjali käsistantsiga. Tööstuslikus keskkonnas kasutatakse aga peamiselt servoelektriliste jõuülekannetega stantse või vanemat tüüpi hüdraulilisi stantsmehhanisme.

Lõikestantsid jagunevad oma lõikeprotsesside poolest:

1. Üksikoperatsiooniline lõikestants, kus detaili väliskontuur ja avad lõigatakse eri stantsides
2. Järjestikutoimeline lõikestants, kus kontuurid ja avad lõigatakse järjestikuliste operatsioonidena
3. Koostoimeline lõikestants, kus nii kontuurid kui avad lõigatakse korraga.

Suure hulga erineva kuju ja ava läbimõõtudega väikeste detailide seeriatootmiseks on otstarbekam kasutada CNC - töötlemiskeskusi kallihinnaliste ja eraldi teostatavate operatsioonidega lõikestantside asemel. CNC -keskused kasutavad detailide kontuure moodustavate sirg- ja kõverjoonte kopeerimist, mille järgi toimub toodete stantsimine universaalsete tööriistakomplektidega.[17, lk 226]

Stantsitava materjali ökonoomne kasutus ja jääkide minimaalne teke sõltub, kui ratsionaalselt on detailid lehele paigutatud. Materjali hind moostab stantsimise tehnoloogia juures 40 -65% toodetavate detailide omahinnast. Asetuse määramisel tuleb arvestada presside õige kasutuse, materjali hinna ja stantsimise tootlikkusega.[18, lk 15]

Stantsimise eeliseks võrreldes teiste lõikustehnoloogiatega on kiire ja täpne lõikus ning puhas lõikeserv. Saab lõigata keerulise kuid jäiga konstruktsiooniga tooteid, mis tuleneb lehtmaterjali kõrgest elastsusmoodulist ja voolavuspiirist. Materjalikulu on minimaalne, sest lehte saab matriitsi ja templi suhtes kergelt ümber paigutada.[17, lk 218]

Peamiseks puuduseks on tööriistade valmistamise kallidus ning kulumine otsese kontakti tõttu stantsimisprotsessis. Templid ning matriitsid peavad vastu pidama suurtele dünaamilistele koormustele, seetõttu kasutatakse nende valmistamiseks kõrgekvaliteedilisi kiirlõiketeraseid või külmstantsiteraseid. Need on tavalistest terastest kallimad oma kuumakindluse, tugevuse ja pikema kasutusaja tõttu.[19, lk 54 - 57]

Kiirlõiketerased on karbiididega tugevdatud ning sisaldavad oma keemilises koostises üle 0,6% süsinikku. Kõvadus väljastusolekus jääb neil terastel 270 HB ja karastatult 560 HRC juurde. Samuti leiavad kiirlõiketerased lisaks stantsides kasutamisele laialdast kasutust ka keermelõikurite, spiraalpuuride, saelehtede ja freeslõiketerade tootmises.[11, lk 172-173]

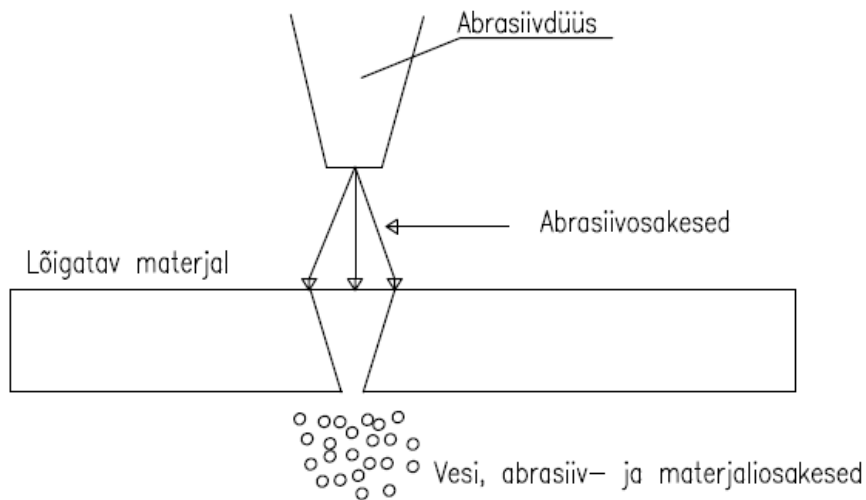
Külmstantside valmistamiseks kasutatakse ka kõrge kroomisisaldusega teraseid. Need tööriistaterased sisaldavad üldjuhul 1,2 - 2,3% süsinikku ja 12% kroomi. Oma struktuuri poolest on sellise kroomisisaldusega tööriistaterased ligilähedased kiirlõiketerastele.

Kõrge karbiidide sisaldus (13 - 20%) tagab suure kulumiskindluse ja soojuskindluse. Molübdeen ja vanaadium soodustavad tööriistateraste peeneteralise struktuuri säilimist, mis on oluline terase tugevuse säilitamiseks. Kõik eelnevalt nimetatud omadused on olulised stantside valmistamise ja töökindluse säilitamise jaoks.[11, lk 171]

2.2 Vesilõikus

Vesilõikus on lõikusprotsess, mis kasutab lõike tekitamiseks kõrgsurvel vett ja abrasiivosakesi. Hüdraulilise pumba abil survestatakse vesilõikuspingis kasutuses olev vesi maksimaalselt 300 – 650 MPa surveni ning suunatakse läbi torustiku düüsi. Düüsi diameeter jääb vahemikku 0,1 - 0,4 mm.

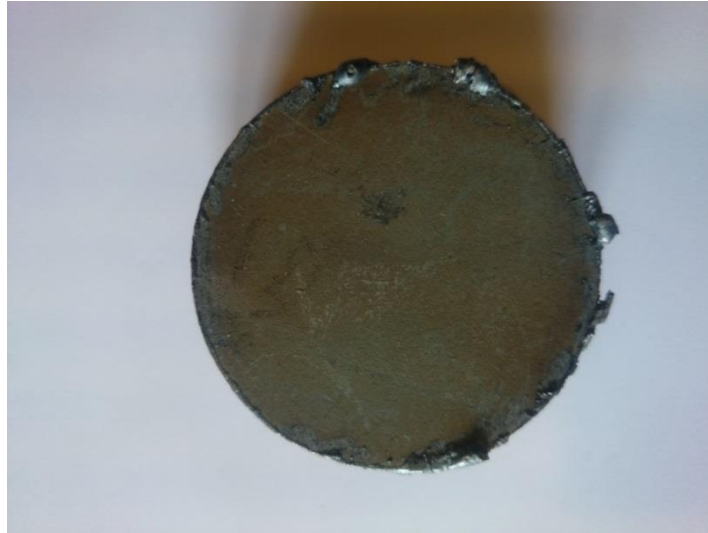
Tänapäevases tööstuses on vesilõikuspinkides kasutusel kaht tüüpi pumbad: lineaarne intensiivpump ja otseülekandega pöördpump. Mõlema hüdraulilise pumbaga tekitatakse sõltuvalt masina maksimaalsele vajadusele düüsi juhitud vee surve, millega saab materjali lõigata ehk veejõu rõhk peab ületama lõigatava materjali survetugevust. Selle meetodi juures võib eristada kaht etappi: materjali eraldamine ja edasine väljakandmine. Eraldamine toimub kas kohalike pingete muutuste tulemusel või erosiooni ja lõhenemise toimele. Veejõu tekitatud mikropraod metallis võimaldavad sealt eemaldada materjaliosakesi, mille tagajärjel tekib lõige.[20]



Joonis 11. Vesi abrasiivlõikus

Mida paksem on lõigatav materjal ja suurem kiirus, seda enam hakkab lõikejuga kaarduma. Selle tõttu peab teravamate lõikenurkade korral lõikekiirust aeglustama, et tagada vajalikke tolerantse. Tavalised metalli pinnakareduse R_a väärtused abrasiiviga lõikusel jäävad vahemikku 2,0 - 6,5 μm . [17, lk 229]

Erinevalt laserlõikusest on vesilõikus protsess, kus ei toimu materjali termilist kuumutamist ning seetõttu on lõikeserv puhas ja põletustevaba ning puudub järeltöötuse ehk metalli servalt kraatide eemaldamise vajadus, Joonis 12. Samuti ei teki ega eraldu keskkonnale kahjulikke mürgiseid gaase olles sellega loodussõbralik lõikusmeetod.



Joonis 12. Lõikusel tekkivad kraadid detaili servas

Vesilõikus sobib peale metallide lõikuse ka näiteks kummi, komposiitmaterjalide, naha, klaasi, puidu ja ka tuleohtlike materjalide lõikamiseks. Karastatud terase või tavapärasest tugevamate materjalide, näiteks roostevaba AISI316, lõikuseks lisatakse veele abrasiivosakestena liiva, oliviini, kranaati või korundit. Osakeste diameeter jääb sõltuvalt lõigatava materjali paksusest vahemikku 0,06 - 0,4 mm.[21]

Lõikuse toimumisel saavutavad vesi ja abrasiivmaterjalid üle kahekordse helikiiruse. Lõikejoa läbimõõt on sõltuvalt materjalist tavaliselt 0,2 mm tolerantsi piirides. Seega materjali kasutus on maksimaalselt efektiivne ja tekib minimaalselt utiilmaterjali.

Veega lõikamise eeliseks võrreldes stantsimise ja lasertehnoloogiaga on võime lõigata kuni 100 mm paksust terast ning kuni 270 mm paksuseid komposiitmaterjale. Üheks eeliseks laserlõikuse ja stantsimise ees on võimalus asetada mitu leheformaati üksteise peale ja lõigata neid korraga vastavalt masina maksimaalsele võimekusele kusjuures seadistus on kõigile materjalitüüpidele sama.[17, lk 229; 20; 21]

Vesilõikuse puuduseks on kvaliteetse lõikuse vajaduse puhul aeglane lõikuskiirus, võrreldes laserlõikusega on veega lõikamine umbes neli korda aeglasem. Lõikuse kiirus ja täpsus määravad ka töökulu, seetõttu on vesilõikus kallis tööprotsess.

2.3 Laserlõikus

Laserlõikus on metallide lõiketöötlusviis, milles lõige tekitatakse kontsentreeritud energiakiire ehk laseriga. Laserkiires sisalduv kiirusenergia neeldub lõigatavas materjalis ja muundub soojusenergiaks ning abigaas puhub tekkinud sulametalli ära, tekitades lõike. Soovitud lõige saadakse liigutades laserkiirt mööda detaili kontuuri.

Laser on tööstusettevõtetes kasutatav universaalne tööriist, millega saab lõigata kõiki materjale. Lõikejoa läbimõõt jääb sõltuvalt materjali liigist ja metallilehe paksusest vahemikku 0,1 – 0,2 mm. Teraste puhul jääb kiire energiatihedus vahemikku $10^7 - 10^8 \text{ W/cm}^2$, kusjuures ei leidu ühtki teist viisi kontsentreerida sellist energia hulka nii väikesele pindalaühikule.

Abigaasi funktsiooniks on kiire poolt sulatatud metalli eemale puhumine lõike kontuurilt ning kaitsta samal ajal läätse ja düüsi sulametalli poolt tekitatavate võimalike kahjustuste eest. Selleks kasutatakse kas lämmastikku, hapnikku, süsihappegaasi või argooni.

Abigaasi kulu sõltub mitmetest erinevatest parameetritest:

1. Düüsi läbimõõt
2. Abigaasi tüüp (endo- või eksotermiline)
3. Gaasi rõhk
4. Lõigatav materjal ja selle paksus

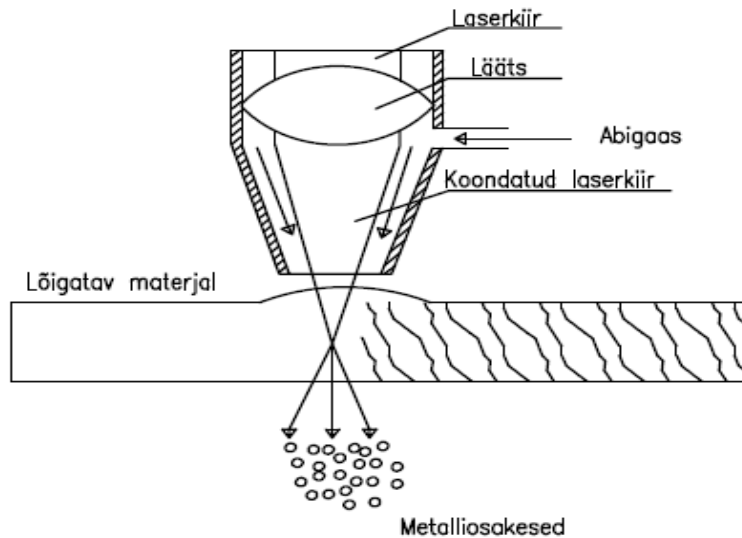
Sõltuvalt töödeldavast materjalist ja abigaasi kasutamisest eristatakse kolme erinevat laserlõikusviisi:

1. Sublimatsioonlõikus
2. Fusioonlõikus
3. Lõikamine gaasileegiga

Sublimatsioonlõikus kujutab endast detailide lõikust tahke metalli osakeste eraldamise ehk sublimatsiooni teel. Selle saavutamiseks reguleeritakse süsteemis läätse abil energiakiire kontsentratsiooni ja fookust selliselt, et metall ei sulaks vaid puhutakse ära abigaasi abil.

Abigaasidena kasutatakse kas argooni või lämmastikku, vältimaks võimalikku lõikeserva oksüdatsiooni. See võimaldab tekitada puhta ja sujuva lõike, kuna lõikeserva ei sulatata ning ei teki ka sulametalli pritsmeid.

Fusioonlõikuse põhimõte seisneb materjali kuumutamises ja sulametalli ära puhumises inertgaasi abil.



Joonis 13. Laserlõikus

Kuna inertgaasid on madala reaktsiooni võimega, siis on fusioonlõikus sublimatsioonlõikusest oluliselt aeglasem ning kasutatakse ka vähem energiat. Sellist lõikustehnoloogiat kasutatakse paksemate ja tugevamate metallide ning sulamite lõikuseks.

Gaaslõikuse puhul kasutatakse inertgaasi asemel aktiivgaase, peamiselt hapnikku. Materjal kuumutatakse laserkiire abil üle süttimistemperatuuri, kuniks eralduvat kuumust saab kasutada lõikusprotsessis, milles hapnik aitab kuumuse abil metalli sulatada. Sulametall puhutakse abigaasina kasutatava hapniku joaga lehtmatali all paiknevate ribide suunas.[22]

Teraste S355MC ja AISI 316 laserlõikuseks kasutatakse peamiselt fusioon- ja gaaslõikust. Hapnikuga lõigatakse põhiliselt madalsüsinik- ja madallegerteraseid kuna need materjalid reageerivad oma keemilise koostise tõttu hapnikuga. Eksotermilise gaasi, hapniku, kasutamine võimaldab kogu lõikeprotsessile anda lisaks laserkiire enda poolt genereeritavale kuumusele juurde kuni 50% lisavõimsust.[23]

Lõike kvaliteet sõltub nii rakendatava gaasi rõhust kui ka gaasi omadustest ning kvaliteedist. Õhukese, kuni 3,0 mm paksusega lehtmatali puhul on otstarbekas kasutada gaasi rõhku

0,5 MPa, kuni 10 mm paksuste materjalide puhul vähendatakse rõhku 0,1 MPa-ni ning alates 10,0 mm vähendatakse rõhku alla 0,1 MPa. Süsinikterased, mille lehe paksus on suurem kui 16,0 mm, on paremini lõigatavad hapnikuga, lõikejoo läbimõõt jääb kuni 0,1 mm pikkuseks.

Roostevaba teras ei reageeri hapnikuga nii kergelt kui süsinikterased materjalid sisalduva nikli tõttu. Nikkel mõjutab laserkiire energiaülekannet selliselt, et lõike kiirust tuleb aeglustada.[22]

Paksemate ehk alates 8,0 mm paksuse roostevaba lehtmaterjali puhul tekitab aeglane laserlõikus kraase, ehk sulameterjali räbu. Kraadi eemaldamine nõuab aga vastavate tööriistadega lisatööd pärast laserlõikuse lõpetamist.

Laserlõikustehnoloogia võimaldab lõigata kuni 20,0 mm paksust konstruktsioon-, mittelegeer- ja legeerterast. Sama kehtib ka kroomnikkelteraste kohta, kuid maksimaalne lehtmaterjali paksus alumiiniumi ja selle sulamite lõikuseks on 10,0 mm.[11, lk 369]

Laserid leiavad metallitööstuses aina enam rakendust just oma universaalse kasutusvõimaluse poolest. Sama tööriistaga on võimalik lõigata nii metalli, puitu, riidet, nahka kui ka komposiitmaterjale. Laserlõikustehnoloogia on paindlik ning seetõttu leiab laialdast rakendamist seeriatoodete või ka ainult prototüüpide tootmiseks. Kuigi tööstuslikud laserid on kallid, on nad pika kasutusajaga tööriistad kontaktivaba tehnoloogia tõttu.[17, lk 228]

Abigaaside eelised ja puudused

Einevate metallide ja materjali paksuste puhul on lõikusaja kokkuhoiu tõttu vajalik valida õige abigaas, et vähendada ka võimaliku järeltöötamise vajalikkust.

Järgnevalt on välja toodud kolme eelpool käsitletud abigaasi eelised ja puudused:

Lämmastik N₂ :

1. Lõikus toimub kõrge rõhu juures 0,6 – 1,5 MPa.
2. Kulukas, kuna lõikus on kõrgel rõhul ja gaasi kulub palju.
3. Materjali paksus piiratud, võrreldes hapnikuga saab lõigata kuni 50% vähem lehepaksust.
4. Roostevaba terase puhul kvaliteetne lõikeserv.
5. Lõikeserv oksiidivaba.

Suruõhk:

1. Madalsüsinik- ja roostevaba terase puhul materjali paksus piiratud, lõikus raskendatud alates lehe paksusest 10,0 mm.
2. Lõikuse kvaliteet parem pehmemate metallide, näiteks alumiiniumi puhul.
3. Võimalik paremini lõigata ka mittemetalseid materjale, näiteks puitu ja komposiitmaterjale.
4. Roostevaba terase halb lõikekvaliteet võrreldes lämmastikuga lõikusel.
5. Lõikuseks kasutatakse kõrget rõhku 0,7 – 0,8 MPa.

Hapnik O₂ :

1. Roostevaba terase ja alumiiniumi lõikusel tekib lõikusel kõva kraat, mida on vaja hiljem lisatööna eemaldada.
2. Võimaldab võrreldes lämmastiku ja suruõhuga lõigata paremini paksemaid materjale, kuni 20,0 mm.
3. Madalsüsinikteraste puhul gaasi rõhk madal 0,05 – 1,5 MPa.
4. Roostevaba terase ja alumiiniumi puhul saab lõikuseks kasutada madalamat rõhku kui lämmastiku korral, 0,4 – 0,6 MPa
5. Lõikeserv oksüdeerub kiiresti, ning hilisemate töötlusprotsesside jaoks vajab see järeltöötlust.[23 lk 127]

2.4 Tehnoloogiate võrdlus

Tabel 4. Valitud lõikustehnoloogiate võrdlus [17 lk 229, 24]

	Tehnoloogia		
	Laserlõikus	Vesi-abrasiivlõikus	Stantsimine
Materjali liik	Kõik homogeensed	Kõik	Metallid
Paksus max. (teras, mm)	30,00	100,00	4,00/6,00
Termomõjupiirkonna laius, mm	0,05	0,00	0,01
Lõikeserva suhteline kvaliteet	Täisnurkne, sile	Täisnurkne, sile	Täisnurkne, sile
Lõikeserva pinnakaredus R_a , μm	1 kuni 10	2 kuni 6,5	1 kuni 3,8
Lõigatava ava min. diameeter, mm	0,5	>1,5	>1,5
Suhteline energiakulu	Väike	Väike	Väike
Suhtelised investeeringud	1	1	1
Suhteline tootlikkus	Suur	Keskmine/väike	Keskmine

2.5 Tehnoloogilised eeldused ja vajalikud eelprotsessid lõiketöötlemiseks

Stantsimise, vesi- ja laserlõikusega detailide lõikamise eelduseks on täpne tehniline joonis ja vajalike lõikusparameetrite arvutus. Tööstusettevõtted, mis pakuvad vesi- ja laserlõikust ning stantsimist vajavad digitaalsed „dxf“ või “dwg“ formaadis tootejooniseid.

Joonistel näidatakse detaili väliskontuurid, avade ja nurgaraadiuste asukohad ning vajalikud mõõtmed. Tänapäevaste lõikusprogrammidega saab vastavalt digitaalsele joonisele laserlõikust tootmisprogrammis simuleerida ning arvutada vastavate mudelite põhjal materjalikulu ning lõikusaega. Stantsimise puhul on tehnilise joonise täpsus vajalik ka lõikusrakise ehitamiseks ning lõikuseks vajalike arvutuste teostamiseks.

Tootejoonised on CAD - keskkonnas, millele antakse CAM - keskkonnas tehnoloogiline lisainformatsioon ja genereeritakse juhtprogramm. Praegused tehnoloogiapaketid võimaldavad 3D - objekte vaadelda mistahes positsioonis, see aitab ennetada ja ette näha detailide tootmises tekkivaid võimalikke probleeme.

Detailijoonis peab sisaldama kogu vajalikku informatsiooni detaili valmistamiseks. Selleks võib olla kas üldkehtiv või spetsiaalselt konkreetsele lõikusseadmele kohandatud joonis. Detailijoonis koostatakse koostu kõigile osadele erandiks lehtmaterjalist täisnurga all lõigatavad või tükeldatavad detailid, mille kohta esitatakse koostejoonise tükitabelis vajalikud andmed.

Oluline on ära märkida materjal, detaili mõõtmed, sortiment, tolerantsid ning pinnatöödeldavuse vajadus või vajalik pinnakaredus. Tiitelnurgas antakse edasi ka võimalikud ja üldiselt kehtivad piirhälbed. [17 lk 130]

Koostejoonis genereeritakse üldiselt CAD - projekteerimise süsteemidest. See peab sisaldama toote vaateid ja lõikeid, millelt oleks näha koostisosad, nende omavaheline seos ning ühenduselemendid. Joonisele võib paigutada koostamist hõlbustavaid või tööpõhimõtet selgitavaid 3D - mudeleid.

Mõõtmeid peab olema piisavalt, et oleks võimalik alamkoostude põhjal lõplik toode koostada ning seda mõõtmete põhjal kontrollida. Tuleb esitada ka töödeldavate pindade kvaliteet, pindade kuju ning asendit lubavad piirhälbed. [17 lk 129]

CAM - programmiga avatakse CAD - programmis ettevamistatud tööfail. Järgneb töötlemise imiteerimine ja vajadusel lõikuse simuleerimine, et tuvastada võimalikud probleemid lõikusel. Samuti kirjutatakse selles programmis masinkoodid. Programm sobib kasutamiseks nii

eraldiseisva tööjaamana kui ka osana serveri keskkonnast, kuhu on eelnevalt laetud kõik kasutatavad materjalid kui ka vajalikud lõikusparameetrid.

Lisaks korrektsele joonisele ja vajalikele kalkulatsioonidele on oluline ka materjali ja töökeskuste ettevalmistamine lõikuseks. Enne töötlemist tuleb puhastada lõikuspingid varasema töö käigus tekkinud jääkmaterjalist ja metallipurust. Laserlõikusel on oluline kontrollida ka materjali paigal hoidvate ribide puhtust, et mitte rikkuda pinki installeeritavat leheformaati. [19, lk 29-30]

Materjali laadimisel lõikuspinki tuleb jälgida ohutusnõudeid ning vältida võimalikku materjali kahjustamist. Tänapäevases tööstuses kasutatakse materjali installeerimiseks laadureid ja pneumotõstukeid. Materjal ladustatakse tehaste sise- või väliladuses.

Välilaos tohib hoiustada ainult neid materjale, mis on ilmastikukindlad ning ei saa niiskuskahjustusi ning hakka selle tagajärjel roostetama. Enne välilaost materjali lõikuspingi toimetamist on soovitatav sõltuvalt materjalitüübist hoida leheformaate sisetingimustes, et ühtlustada välis- ja sisetemperatuuridest tulenevaid erinevusi

2.6 Töötlemise kestus

Kvaliteetse detaili valmistamise puhul on oluline lõiketöötlemiseks kuluv aeg. Mida väiksem on ajakulu, seda efektiivsem on tootmisprotsess. Selle eesmärgi saavutamisele on aidanud kaasa automaatpinkide täiustamine ja arendamine. Arvutiga juhitud lõikeprotsessid on võimaldanud kordades vähendada lõiketöötlemiseks kuluvat aega seejuures kvaliteedis järeleandmisi tegemata.

Operaatorite juhitud automaatpingid omavad suuri eeliseid toodete seeriatootmises, milleks on enne lõpliku tootmise minemist vaja läbi töötada ja katsetada erinevaid variante detailile lühima lõikusaja leidmiseks.

Arvutuste tegemiseks tuleb arvestada nii masina tööaja kui ka erinevate abiaegadega. [12, lk 35] Laser- ja vesilõikuse puhul kulub osa tööajast lõikuspeade liigutamiseks ühelt lõikuspositsioonilt teisele. Masinaaeg on seega parameeter, mille jooksul töökeskus sooritab erinevaid protsesse detaili lõikuseks.

Abiaegade alla võib liigitada kulu proovidetaili lõikuseks, kvaliteedinäitajate kontrollimiseks, detaili mõõtmise, lõikuspingi seadistamise ja ka materjali ettevalmistamise ja laadimise aja. Samas, mida suurem on toodetava partii suurus, seda väiksem on abiaeg T_a .

Detaili töötlemisaega võib arvutada seosega:

$$t_m = \frac{T_m + T_a}{n_d} \text{ [s]} \quad (4)$$

kus t_m – töötlemiseks kuluv aeg

T_m – masinaaeg

T_a – abiaeg

n_d – detailide arv

Detailide efektiivse töötlemisaja arvutamiseks kasutatakse valemit[23]:

$$t_{ef} = \frac{T_m}{n_d} \text{ [s]} \quad (5)$$

3 KATSELINE OSA

3.1 Katsekehade laserlõikus

Katsekehad lõigati 6 kW võimsusega laseriga Bysprint Fiber 6000 tootjalt ByStronic. Lõikuseks kasutati lehtmaterjali formaate 3 x 1500 x 3000 mm ja 10 x 1500 x 3000 mm. Laserlõikuse liigiks valiti O₂ gaasilõikus.

Kõigi katsete puhul kasutati sama tootja partii leheformaate.

Tabel 5. Leheformaatide massid materjali sertifikaatidelt

Materjal	Paksus (mm)	Lehe mass (kg)
AISI316	3,00	106,65
AISI316	10,00	355,50
S355MC	3,00	108,00
S355MC	10,00	360,00

Katsekeha materjalide keemiline koostis on toodud Tabel 6, andmed saadud tootjapoolsete materjalide sertifikaatidelt:

Tabel 6. Materjalide keemiline koostis

Element	Keemiliste elementide sisaldus katsekehade materjalides (%)			
	S355MC (3,0 mm)	S355MC(10,0 mm)	AISI 316 (3,0 mm)	AISI316 (10,0 mm)
C	0,0590	0,0560	0,0200	0,0150
Cr	0,0200	0,0200	17,1000	16,5200
Mn	0,5900	0,8100	0,9300	1,3380
Mo	0,0000	0,0000	2,0400	2,0200
Ni	0,0400	0,0400	10,1000	10,0050
P	0,0008	0,0130	0,0330	0,0310
S	0,0020	0,0030	0,0010	0,0010
Si	0,0100	0,0200	0,4700	0,3290

Järgnevad andmed, Tabel 7, on saadud laserlõikusprogrammist, millega simuleeriti mõlema materjali ja materjali paksuse puhul laserlõikust, ning mille põhjal valiti sobivad parameetrid katsekehade lõikuseks:

Tabel 7. Laserlõikuse andmed

Materjal	Paksus (mm)	Detaili mass (kg)	Kogu lõikusaeg t_m (s)	Detaili lõikusaeg T_m (s)
AISI316	3,00	0,484	107,00	8,00
AISI316	10,00	1,612	288,00	54,00
S355MC	3,00	0,489	123,00	12,00
S355MC	10,00	1,632	254,00	43,00

Abiaegade väärtused on leitud valemi 4 abil:

$$T_a = t_m - T_m \text{ [s]}$$

Abiaeg roostevaba 3,0 mm katsekeha korral:

$$T_a = 107 - 8 = 99 \text{ [s]}$$

Abiaeg roostevaba 10,0 mm katsekeha korral:

$$T_a = 288 - 54 = 234 \text{ [s]}$$

Abiaeg süsinikterasest 3,0 mm katsekeha korral:

$$T_a = 123 - 12 = 111 \text{ [s]}$$

Abiaeg süsinikterasest 10,0 mm katsekeha korral:

$$T_a = 254 - 43 = 211 \text{ [s]}$$

Tulemustest järeldub, et mida suurem on detaili lõikuseks kulunud masinaaeg T_m , seda suurem on abiaeg T_a .

Laserlõikuse kogu lõikusaeg t_m sisaldab nii saadud abiaegu T_a kui ka mainaegu T_m ehk laserpea liikumisaega üle detaili erinevate lõikuskontuuride (avad, nurgaraadiused, väliskontuur) ning mikroühenduste ehk sisselõigete tegemiseks kulunud aega.

Detailide efektiivne töötlemisaeg t_{ef} on antud katsekehade puhul võrdne masinaajaga T_m kuna lõigati iga materjali paksuse puhul üks katsekeha, ehk $n_d=1$.

Detaili mudelilt mõõdetud kontuuri kogupikkus $L_1= 1,097$ m.

Laserlõikuse kiirus detaili lõikuseks on arvatav valemiga:

$$v = \frac{L_1}{T_m} \text{ [m/s]} \quad (6)$$

Järgnevalt on toodud nelja katsekeha lõikuseks kulunud ajad, Tabel 8, kusjuures on arvestatud ainult detaili lõikuseks kulunud aega T_m :

Tabel 8. Katsekehade laserlõikuseks kulunud ajad erinevate materjali paksuste korral

Materjal	Paksus (mm)	Detaili lõikusaeg T_m (s)	Kiirus v (m/s)
AISI316	3,00	8,00	0,14
AISI316	10,00	54,00	0,02
S355MC	3,00	12,00	0,09
S355MC	10,00	43,00	0,03

Lõigatud serva pinnakaredust mõõdeti seadmega profilomeeter Mitutoyo SURF-TESTSJ-210 Tester 178-560-01DC. Seadme mõõtevahemikuks $360 \mu\text{m}$ ($-200 \mu\text{m}$ kuni $+360 \mu\text{m}$) ja täpsus $\pm 0,02 \mu\text{m}$.

Mõõtmised teostati kõigile katsekehadele vahetult pärast lõiketöötlust, et vältida katsekehade kriimustada saamist või maha kukkumist. Andmed saadi mõõtes iga lõigatud külje kolme punkti, millest võeti hiljem aritmeetiline keskmine, saamaks teada katsekeha pinnakaredust.

Mõõtmisel saadud tulemused on toodud Tabel 9:

Tabel 9. Pinnakareduse mõõdetud väärtused laserlõikuse korral

Materjal	AISI 316		S355 MC	
Paksus (mm)	3,00	10,00	3,00	10,00
Pinnakaredused Ra (µm)	4,86	6,79	5,02	7,20
	4,78	6,82	4,82	7,08
	4,76	6,88	4,87	7,00
	4,6	6,9	4,89	6,98
	4,69	7,01	5,03	6,93
	4,70	7,09	5,00	6,99
	4,80	6,93	4,93	7,02
	4,80	6,93	4,89	7,11
	4,81	6,77	5,1	7,09
	4,85	7,2	4,88	6,99
	4,73	7,06	4,93	6,89
	4,81	6,93	5,06	7,32

Katsekehade pinnakaredus R_a on leitud valemiga:

$$Ra = \frac{\sum R_a}{n} \quad (7)$$

kus $\sum R_a$ – katsete tulemuste summa µm

n - katsete arv

Pinnakareduse arvatatud väärtused on toodud Tabel 10:

Tabel 10. Pinnakareduse arvatatud väärtused laserlõikuse korral

Materjal	AISI 316		S355MC	
Paksus (mm)	3,00	10,00	3,00	10,00
Pinnakaredus R_a (µm)	4,77	6,94	4,95	7,05

3.2 Katsekehade vesilõikus

Katsekehade lõikuseks kasutati vesilõikuspinkki Flow Mach 500 maksimaalse töösurvega 500 MPa.



Joonis 14. Flow Mach 500 vesilõikuspink

Vesilõikuse tüübiks valiti vesi abrasiivtehnoloogia, seega lisati düüsi suunatavale veele liivaosakesi. Roostevaba happekindla terase lõikuseks valiti surve 0,5 MPa ja süsinikterase lõikuseks 1,0 MPa. Õigete rõhkude valimiseks simuleeriti lõikus enne töö algust vesilõikusprogrammis, mis arvutas materjali formaatide ja lehe paksuste põhjal vajalikud lõikusparameetrid, mida rakendada.

Lõikuseks kasutatavad ja eelnevalt materjali riulis ladustatud leheformaadid installeeriti pinki pneumotõstukiga. Materjal laetakse vesilõikusvanni pealtlaadimisega, seetõttu võtab lehe vahetus rohkem aega, kui laserlõikuse puhul, kus toimub lehe pinki laadimine automaatselt masina tagant lõikusribidele laadimise põhimõttel.

Lõikuse ajakulu on võetud lõikuspingi programmi simulatsiooni kalkulatsioonidest.

Tabel 11. Vesilõikuse andmed

Materjal	Paksus (mm)	Detaili mass (kg)	Kogu lõikusaeg t_m (s)	Detaili lõikusaeg T_m (s)
AISI316	3,00	0,484	407,00	53,00
AISI316	10,00	1,612	778,00	166,00
S355MC	3,00	0,489	462,00	72,00
S355MC	10,00	1,632	737,00	145,00

Abiaegade väärtused on leitud valemi 4 abil:

$$T_a = t_m - T_m \text{ [s]}$$

Abiaeg roostevaba 3,0 mm katsekeha korral:

$$T_a = 407 - 53 = 354 \text{ [s]}$$

Abiaeg roostevaba 10,0 mm katsekeha korral:

$$T_a = 778 - 166 = 612 \text{ [s]}$$

Abiaeg süsinikterasest 3,0 mm katsekeha korral:

$$T_a = 462 - 72 = 390 \text{ [s]}$$

Abiaeg süsinikterasest 10,0 mm katsekeha korral:

$$T_a = 737 - 145 = 592 \text{ [s]}$$

Saadud tulemustest järeldub, et mida paksem on lõigatud detail, seda suurem on töötlemiseks kulunud abiaeg. Vesi abrasiivlõikuse puhul kulus 10,0 mm leheformaatide pinki installeerimiseks ka rohkem aega pealtlaadimise tõttu.

Vesilõikuse kiirus detailide lõikamiseks on arvatav valemiga 6, tulemused toodud Tabel 12, kusjuures on arvestatud ainult detaili lõikuseks kulunud masinaaega T_m :

Tabel 12. Katsekehade vesilõikuseks kulunud ajad erinevate materjali paksuste korral

Materjal	Paksus (mm)	Detaili lõikusaeg T_m (s)	Kiirus v (m/s)
AISI316	3,00	53,00	0,021
AISI316	10,00	166,00	0,007
S355MC	3,00	72,00	0,015
S355MC	10,00	145,00	0,008

Lõigatud serva karedust mõõdeti seadmega profilomeeter Mitutoyo SURF-TESTSJ-210.

Mõõtmise tulemused on toodud Tabel 13:

Tabel 13. Pinnakareduse mõõdetud väärtused vesilõikuse korral

Materjal	AISI 316		S355MC	
Paksus (mm)	3,00	10,00	3,00	10,00
Pinnakaredused R_a (μm)	3,86	5,78	4,01	6,01
	3,93	6,82	4,82	6,27
	3,79	5,88	4,88	6,20
	3,60	5,78	5,01	5,98
	4,00	5,01	4,99	5,89
	3,98	5,98	4,20	5,88
	3,93	6,01	4,39	6,11
	3,99	6,01	4,98	6,10
	4,01	5,89	4,72	5,98
	4,00	6,1	4,98	5,78
	3,87	6,09	4,36	5,69
	4,01	5,99	4,39	6,23

Saadud andmete põhjal leiti valemi 7 abil iga katsekeha pinnakaredus, tulemused on toodud Tabel 14:

Tabel 14. Pinnakareduse arvutatud väärtused vesilõikuse korral

Materjal	AISI 316		S355MC	
Paksus (mm)	3,00	10,00	3,00	10,00
Pinnakaredus R_a (μm)	3,91	5,95	4,64	6,01

3.3 Katsekehade stantsimine

Katsekehad lõigati järjestikulise stantsiga, millega esmalt lõigati detaili väliskontuur ning seejärel stantsiti katsekeha avad. Stantsi seadistamiseks leiti maksimaalne vajalik lõikejõud.

Maksimaalne lõikejõud väliskontuuri lõikestantsimisel:

$$F_{lmax} = L \cdot s \cdot R_l \text{ [N]}, \quad (8)$$

kus L - lõikekontuuri pikkus mm

s - materjali paksus mm

R_l - materjali lõiketugevus N/mm^2

Matriitsi ja templi vahelise lõtku optimaalse väärtuse korral arvestatakse materjali lõiketugevus:

$$R_l = 0,8 \cdot R_M \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad (9)$$

kus R_M - materjali tõmbetugevus N/mm^2 [17, lk 220]

Katsekeha mudelilt mõõdetud väliskontuuri pikkus $l_s = 0,606 \text{ m} = 606 \text{ mm}$. Avade ümbermõõtude summa $l_{avad} = 0,491 \text{ m} = 491 \text{ mm}$.

Kuna 10,0 mm materjal on lõikestantsimiseks liiga paks materjal, on stantsimise katses võrreldus ainult 3,0 mm süsinikterase ja happekindla roostevaba terase lõikamist.

S355MC 3,0 mm materjali lõiketugevus on:

$$R_l = 0,8 \cdot 504 = 403,2 \text{ [N/mm}^2\text{]},$$

kus $R_M = 504 \text{ N/mm}^2$ on võetud materjali sertifikaadilt

Maksimaalne lõikejõud väliskontuuri jaoks süsinikterasest katsekeha korral:

$$F_{lmax} = 606 \cdot 3 \cdot 403,2 = 733,02 \text{ [kN]}$$

Maksimaalne lõikejõud avade lõikestantsimiseks süsinikterase korral:

$$F_{lmax2} = 491 \cdot 3 \cdot 403,2 = 593,9 \text{ [kN]}$$

AISI 316 3,0 mm materjali lõiketugevus on:

$$R_l = 0,8 \cdot 611 = 488,8 \text{ [N/mm}^2\text{]},$$

kus $R_M = 611 \text{ N/mm}^2$ on võetud materjali sertifikaadilt.

Maksimaalne löikejõud väliskontuuri jaoks roostevaba terasest katsekeha korral:

$$F_{lmax3} = 606 \cdot 3 \cdot 488,8 = 888,64 \text{ [kN]}$$

Maksimaalne löikejõud avade löikestantsimiseks roostevaba happekindla terase korral:

$$F_{lmax4} = 491 \cdot 3 \cdot 488,8 = 720 \text{ [kN]}$$

Arvutustest järeldub, et roostevaba terase löikestantsimiseks vajaminev maksimaalne löikejõud on suurem kui süsinikterasest katsekeha lõikamiseks.

$$888,64 > 733,02 \text{ [kN]}$$

Stantsimiseks kulunud aeg mõõdeti stopperiga, kuna puudus võimalus automaatselt mõõta lõikuseks kulunud aega süsteemi kaudu. Stopper käivitati stantsi sisselülitamise hetkest kogu lõikusaja mõõtmiseks. Detaili lõikuseks kulunud aja mõõtmiseks käivitati stopper alates templi liikuma hakkamisest. Mõõteseadmena kasutati stoprit Fastime 1 täpsusega $\pm 0,01$ sek.

Kogu lõikusaeg t_m sisaldab stantsi seadistuseks ja positsioneerimiseks kulunud aega. Detaili lõikusaeg on esitatud väliskontuuri ja avade stantsimisele kulunud aja summana.

Katsetulemused on toodud Tabel 15:

Tabel 15. Andmed katsekehade stantsimise korral

Materjal	Paksus (mm)	Detaili mass (kg)	Kogu lõikusaeg t_m (s)	Detaili lõikusaeg T_m (s)
AISI316	3,00	0,484	493,00	6,00
S355MC	3,00	0,487	369,00	5,00

Abiaegade väärtused on leitud valemi 4 abil:

$$T_a = t_m - T_m \text{ [s]}$$

Abiaeg roostevaba 3,0 mm katsekeha korral:

$$T_a = 493 - 6 = 487 \text{ [s]}$$

Abiaeg süsinikterasest 3,0 mm katsekeha korral:

$$T_a = 369 - 5 = 364 \text{ [s]}$$

T_a väärtused stantsimise puhul sisaldasid nii masina seadistamiseks kui positsioneerimiseks kulunud aega.

Järjestikulise stantsimise kiirus detailide lõikamiseks on arvatav valemiga 6, tulemused toodud Tabel 16:

Tabel 16. Katsekehade stantsimiseks kulunud ajad 3,0 mm materjali paksuse korral

Materjal	Paksus (mm)	Detaili lõikusaeg T_m (s)	Kiirus v (m/s)
AISI316	3,00	6,00	0,183
S355MC	3,00	5,00	0,219

Katsekehade pinnakareduse mõõtmistulemused on toodud Tabel 17:

Tabel 17. Pinnakareduse mõõdetud väärtused stantsimise korral

Materjal	AISI 316	S355MC
Paksus (mm)	3,00	3,00
Pinnakaredused R_a (μm)	2,78	2,98
	2,68	2,89
	2,73	2,88
	2,68	2,79
	2,69	2,78
	2,70	2,80
	2,71	2,81
	2,70	2,79
	2,71	2,73
	2,69	2,88
	2,74	2,91
	2,76	2,98

Saadud andmete põhjal leiti valemi 4 abil iga katsekeha pinnakaredus, tulemused on toodud Tabel 18:

Tabel 18. Pinnakareduse arvatatud väärtused stantsimise korral

Materjal	AISI 316	S355MC
Paksus (mm)	3,00	3,00
Pinnakaredus R_a (μm)	2,71	2,85

3.4 Kõvaduse määramine

Kõvaduse mõõtmiseks kasutati seadet THX 281. Katseseade võimaldab kuvada tulemusi nii Vickersi, Rockwelli kui Brinelli skaalal. Mõõtetäpsuseks $\pm 0,1$ HRC. Mõõtmised viidi läbi kahel 3,0 mm paksusega katsekehal ning laserlõigatud ja vesi abrasiivlõigatud 10,0 mm paksustel katsekehadel. Mõõtmisi ei viidud läbi kõigil kümnel katsekehal kuna eeldati standardile vastavust ning mittevastavusele oleks viidanud esimeste mõõdetud tulemuste ebakõla.



Joonis 15. Kõvaduse mõõteseadet THX 281 [25]

Igal katsekehal mõõdeti kõvadust kolmes vabalt valitud punktis ning lõpliku kõvaduse saamiseks leiti tulemuste aritmeetiline keskmine valemiga:

$$HRB = \frac{n_1 + n_2 + n_3}{3}, \quad (10)$$

kus n_i – igal katsel saadud kõvaduse väärtus

$i = 1 \dots 3$ – katse number

Katsete eesmärgiks on kontrollida kasutatud materjalide kõvadusi ning võrrelda neid lubatud kõvadustega.

Stantsitud katsekeha AISI316 3,0 mm katsetulemused:

1. Katse nr 1 tulemus 94,8 HRB
2. Katse nr 2 tulemus 95,0 HRB
3. Katse nr 3 tulemus 95,3 HRB

$$HRB = \frac{94,8 + 95 + 95,3}{3} = 95,03$$

Laserlõigatud katsekeha AISI316 10,0 mm katsetulemused:

Katse nr 1 tulemus 95,1 HRB

Katse nr 2 tulemus 94,9 HRB

Katse nr 3 tulemus 95,1 HRB

$$HRB = \frac{95,1 + 94,9 + 95,1}{3} = 95,03$$

Stantsitud katsekeha S355MC 3,0 mm katsetulemused:

1. Katse nr 1 tulemus 108,9 HRB

2. Katse nr 2 tulemus 109,1 HRB

3. Katse nr 3 tulemus 109,0 HRB

$$HRB = \frac{108,9 + 109,1 + 109,0}{3} = 109,0$$

Vesi abrasiiviga lõigatud katsekeha S355MC 10,0 mm katsetulemused:

Katse nr 1 tulemus 109,0 HRB

Katse nr 2 tulemus 109,1 HRB

Katse nr 3 tulemus 109,1 HRB

$$HRB = \frac{109,0 + 109,1 + 109,1}{3} = 109,07$$

Roostevaba terase kõvadus infolehe järgi peab olema vähemalt HRB 95. Katsekehade mõõdetud kõvadused ja saadud tulemused jäävad lubatud piiridesse.[3]

$$HRB 95,03 \geq HRB 95,0$$

Süsinikterase S355MC kõvadus infolehe järgi peab olema vähemalt HB 335. Rockwelli B - skaalal vastab Brinelli kõvadusele HB 335 väärtus HRB 109. Võrreldes saadud tulemusi lubatud väärtusega, saame, et katsetatud materjalide kõvadused vastavad standardile.

$$HRB 109 = HRB 109$$

$$HRB 109,07 \geq HRB 109$$

4 KATSETULEMUSTE ANALÜÜS

4.1 Pinnakaredus

Katsete tulemusena lõigati kolmes metallitöölusettevõttes kokku kümme erinevat katsekeha. Saadud andmete põhjal võrreldi nii süsinik kui roostevaba happekindla terase erinevate lehepaksuste korral detali lõikuseks kulunud aega T_m , pinnakaredust R_a kui ka serva kvaliteeti visuaalse kontrollina.

Tabelis, Valitud lõikustehnoloogiate võrdlus, on toodud laser-, vesilõikuse ja stantsimise korral lubatud pinnakareduste väärtused.

Järgnevalt on võrreldud saadud katsete tulemusi lubatud väärtustega:

Tabel 19. Pinnakareduse võrdlus laserlõikuse puhul

Tehnoloogia	Laserlõikus			
	AISI 316		S355MC	
Materjal				
Paksus (mm)	3,00	10,00	3,00	10,00
Lubatud pinnakaredus R_a (μm)	1-10	1-10	1-10	1-10
Saadud pinnakaredus R_a (μm)	4,77	6,94	4,95	7,05

Tulemustest järeldub, et katsekehadelt mõõdetud pinnakaredused jäävad lubatud piiridesse. Suurim R_a väärtus mõõdeti 10,0 mm süsinikterase ja vähim 3,0 mm happekindla roostevaba terase korral.

Tabel 20. Pinnakareduse võrdlus vesilõikuse puhul

Tehnoloogia	Vesi abrasiivlõikus			
	AISI 316		S355MC	
Materjal				
Paksus (mm)	3,00	10,00	3,00	10,00
Lubatud pinnakaredus R_a (μm)	2-6,5	2-6,5	2-6,5	2-6,5
Saadud pinnakaredus R_a (μm)	3,91	5,95	4,64	6,01

Vesilõikusel saadud tulemustest selgub, et katsekehade pinnakaredused on lubatud piirväärtustes. Suurim pinnakaredus mõõdeti S355MC 10,0 mm katsekehalt ja vähim happekindla roostevaba terase 3,0 mm katsekeha korral.

Tabel 21. Pinnakareduse võrdlus stantsimise puhul

Tehnoloogia	Stantsimine	
Materjal	AISI 316	S355MC
Paksus (mm)	3,00	3,00
Lubatud pinnakaredus R_a (μm)	1-3,8	1-3,8
Saadud pinnakaredus R_a (μm)	2,71	2,85

Stantsimisel on saadud suurim pinnakaredus süsinikterase S355MC korral ja vähim roostevaba terase korral. Saadud väärtused jäävad lubatud vahemikesse.

Pinnakareduse üldine analüüs näitab, et väärtused on suurimad süsinikterase S355MC 10,0 mm paksuse korral ja väikseimad roostevaba happekindla terase AISI 316 korral. Laserlõikusel on R_a mõõdetud väärtused võrreldes stantsimise ja vesi abrasiivlõikusega suurimad, seega võib järeldada, et selle lõikustehnoloogia puhul on lõikeserv kõige karedam.

4.2 Lõikuskiirus

Järgnevalt on toodud katsekehade lõikuskiirused:

Tabel 22. Stantsitud katsekehade lõikuskiirused

Tehnoloogia	Stantsimine	
Materjal	AISI 316	S355MC
Paksus (mm)	3,00	3,00
Lõikuskiirus v (m/s)	0,183	0,219

Tabel 23. Laserlõigatud katsekehade lõikuskiirused

Tehnoloogia	Laserlõikus			
Materjal	AISI 316	AISI 316	S355MC	S355MC
Paksus (mm)	3,00	10,00	3,00	10,00
Lõikuskiirus v (m/s)	0,140	0,020	0,090	0,030

Tabel 24. Vesi abrasiivlõigatud katsekehade lõikuskiirused

Tehnoloogia	Vesi abrasiivlõikus			
Materjal	AISI 316	AISI 316	S355MC	S355MC
Paksus (mm)	3,00	10,00	3,00	10,00
Lõikuskiirus v (m/s)	0,021	0,007	0,015	0,008

Katsekehade lõikuskiiruse tulemustest järeldub, et kõige kiirem tehnoloogia õhema ehk 3,0 mm materjali lõiketöötlemiseks on stantsimine. 10,0 mm materjali lõikus oli aeglaseim vesilõikuse korral ja efektiivseim laserlõikuse puhul.

Tabel 25. Abiaegade väärtused

Materjal	Paksus (mm)	T _a stantsimisel(s)	T _a vesilõikusel(s)	T _a laserlõikusel(s)
AISI316	3,00	487,00	354,00	99
AISI316	10,00	-	612,00	234
S355MC	3,00	364,00	390,00	111
S355MC	10,00	-	592,00	211

Kuna lõikuskiiruse puhul arvestati masinaaega T_m, siis on oluline võrrelda ka saadud abiaegu. Tulemustest selgub, et laserlõikusel on abiaegade väärtused väikseimad ning vesilõikusel suurimad. Stantsimisel kulus kõige rohkem aega stantsi seadistamiseks vastavalt materjali formaadile ja paksusele.

Laserlõikuse puhul on tegemist poolautomaatse süsteemiga, milles materjal tuleb pinki tõstuki abil ise installeerida, kuid lehe liigutamine lõikepositsioonile toimub automaatselt süsteemi kaudu.

Kui üksikute detailide tootmiseks on oluline pigem lõikeserva kvaliteet kui ajaline kulu, siis on 1,0 - 3,0 mm paksuste katsekehade ja detailide tootmiseks otstarbekas valida seega stantsimistehnoloogia.

Seeriatootmise puhul võib järeldada, et on odavam valida kas laserlõikus või vesilõikus, kuna seadmete ettevalmistuseks kuluv abiaeg T_a jaotub detailide vahel ära ning kulub vähem aega lõiketöötlemiseks.

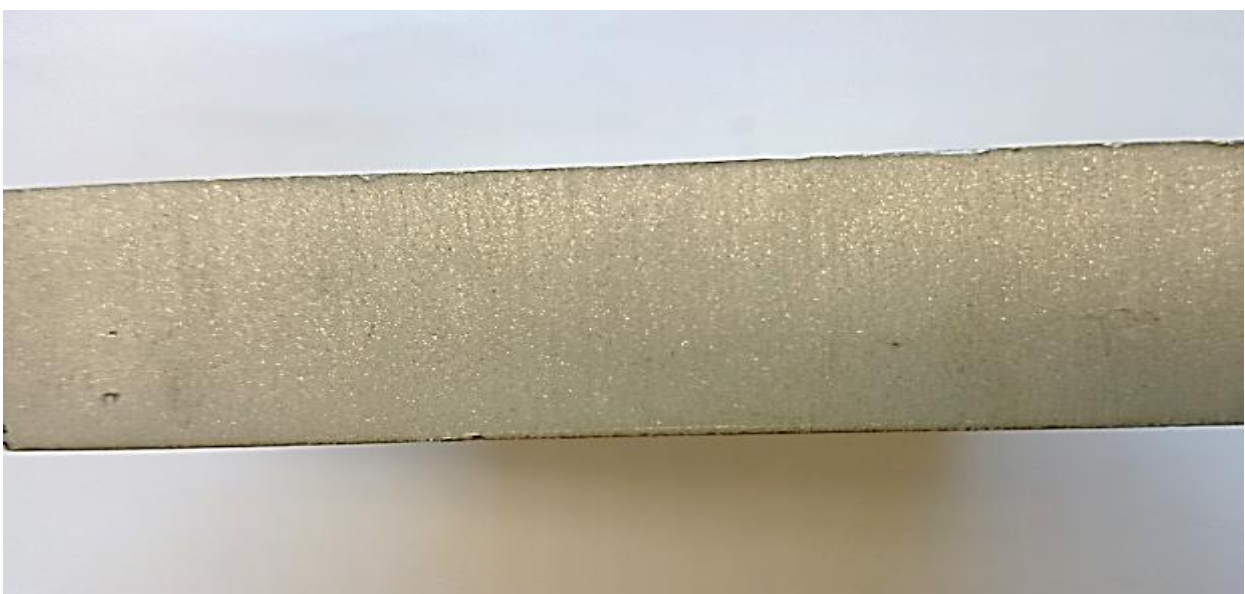
4.3 Lõikeserva kvaliteet

Lõikeserva kvaliteeti hinnati visuaalselt, aluseks võeti teorias toodud R_a väärtused ning lõikuskiirused. Pinnakareduse R_a tulemuste ja analüüsi põhjal võib eeldada, et laserlõigatud detailide lõikeserv on kõige ebakvaliteetsem. Järgnevalt toodud fotodel on näha katsekehadena lõigatud detailide servi.

Roostevaba terasest 10,0 mm katsekehad:



Joonis 16. Happekindla AISI316 10,0 mm katsekeha lõikeserv laserlõikuse korral



Joonis 17. Happekindla AISI316 10,0 mm katsekeha lõikeserv vesilõikuse korral

Visuaalne lõikeserva analüüs kinnitab pinnakareduse analüüsil saadud tulemusi. Happekindla 10,0 mm paksuse terase lõikeserva kvaliteet on parem vesi - abrasiivtehnoloogiaga töötlemise korral: $R_a 5,95 \mu\text{m} < 6,94 \mu\text{m}$.

Roostevaba terasest 3,0 mm katsekehad:



Joonis 18. Laserlõigatud AISI316 3,0mm katsekeha lõikeserv



Joonis 19. Stantsitud AISI316 3,0 mm katsekeha lõikeserv



Joonis 20. Vesi – abrasiiv tehnoloogiaga AISI316 3,0 mm katsekeha lõikeserv

Visuaalne analüüs näitab, et laseriga lõigatud detail vajaks hilisemat järeltöötlust, kuna hapnikuga lõikus on tekitanud kareda serva. Stantsitud ning vesi abrasiivlõigatud serval võib märgata mõningaid täkkeid, kuid üldine kvaliteet on parem kui laserlõikuse puhul.

Süsinikterasest 10,0 mm katsekehad:



Joonis 21. Laserlõigatud S355MC 10,0 mm katsekeha



Joonis 22. Vesi-abrasiiv lõigatud S355MC 10,0 mm katsekeha

Süsinikterasest 10,0 mm katsekehade lõikuse puhul võib järeldada, et kvaliteetsem tulemus on vesi – abrasiiviga lõigatud detail. Laserlõikusel on lõikeserva kuumutamisel tekkinud materjali pinnale põletusjäljed, detail vajab järeltöötlust. Pind on siledam vesilõikuse korral, esineb üksikuid täkkeid ja kriime.

KOKKUVÕTE

Antud uurimustöös uuriti kolme tänapäeva metallitööstuses enim kasutatavat lehtmetsalli lõikustehnoloogiat: stantsimist, laserlõikust ning vesi - abrasiivlõikust. Projekteeriti katsekeha, mis lõigati 3,0 mm ja 10,0 mm paksusest happekindlast roostevaba ja süsinikterasest. Kokku katsetati kümmet erinevat katsekeha. Pärast lõiketöötlemist mõõdeti lõikeserva pinnakaredust ja kõvadust. Mõõdeti lõikuskiirust ja teostati serva kvaliteedi visuaalne analüüs.

Katsetulemuste põhjal võib väita, et:

1. Suurimad pinnakareduse R_a väärtused tekkisid laserlõikusel, tulemused jäid kirjanduses toodud lubatud vahemikesse.
2. Terasest S355MC ja paksusega 10,0 mm oli R_a väärtus suurim 7,05 μm .
3. Õhukese, kuni 3,0 mm metallilehest detailide lõikuseks on kiireim viis stantsimistehnoloogia.
4. Paksema materjali puhul on lõikusajad väiksemad laserlõikuse korral ja suuremad vesi – abrasiivtehnoloogiaga lõikusel, kuid sõltuvalt kiirusest on pinnakareduse väärtused paremad aeglasema töötamise korral.
5. Happekindla 10,0 mm katsekeha laserlõikuse puhul tekkisid suuremad kraadid kui süsinikterase korral.
6. Seeriatoodangu puhul jaotub abiaegade ja masinaegade väärtus iga detaili kohta paremini ära kui näiteks stantsimise puhul, seega on seeriatootmiseks otstarbekas valida laserlõikustehnoloogia.

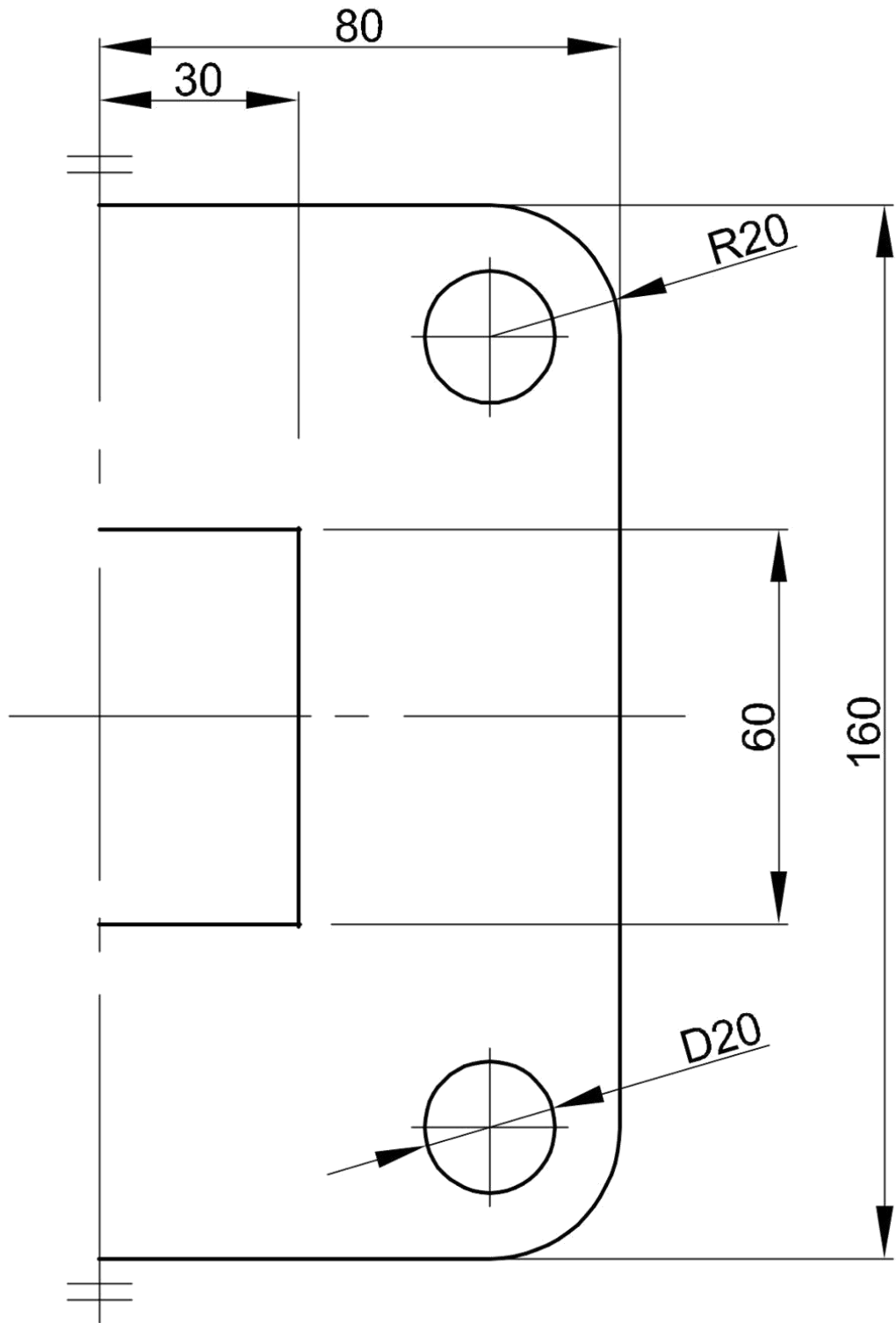
Saadud tulemusi võib kasutada uurimuseks projekteeritud katsekehaga sarnaste detailide tootmiseks sobiliku tehnoloogia valikul.

KASUTATUD KIRJANDUS


1. Mehaanikainseneri käsiraamat / Tallinna Tehnikaülikooli mehaanikateaduskond, üldtoimetaja P. Kulu. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2012.
2. Happekindla terase AISI 316 kasutusala, keemiliste elementide sisaldus.[WWW] <http://www.gstyle.com/en/download/WhyStainlessSteel.pdf> (19.02.2017)
3. Happekindla terase AISI 316 tehnilised parameetrid. [WWW] <http://www.gstyle.com/en/download/AISI316.pdf> (22.02.2017)
4. Happekindla terase AISI 316 füüsikalised parameetrid.[WWW] http://www.nationwidestainless.co.uk/materials/316_316l_stainless_steel/(22.02.2017)
5. Terased ja Malmid Vene, Saksa, Soome, Rootsi standardid (markeering, koostis, omadused) vastavus / koostanud professor P. Kulu, Tallinn, 1993.
6. Süsinikterase S355MC kasutusala.[WWW] <http://www.metricmetal.com/products/Grade%20Descriptions/355MC%20.php> (27.02.2017)
7. Keemiliste elementide sisaldus süsinikterases.[WWW] http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=206 (27.02.2017)
8. Süsinikterase tehnilised parameetrid.[WWW] http://www.tatasteeleurope.com/static_files/Downloads/General%20Industry%20Strip%20Products/English/Tata%20Steel%20-%20YMPRESS%20LASER%20S355MC%20-%20data%20sheet%20EN.pdf (27.02.2017)
9. Süsinikterase tehnilised andmed.[WWW] <http://www.steelss.com/Carbon-steel/s355mc.html> (27.02.2017)
10. Энциклопедического справочника Машиностроения/ академик Чудаков, Е. А. Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1974.
11. Materjalitehnika: Tehnomaterjalid / Kulu, P., Kübarsepp, J., Laansoo, A., Veinthal, R., Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2015.
12. Metallide lõikamine / Aršinov, V., Aleksejev, G., Tallinn: Eesti Riiklik Kirjastus, 1962.
13. Rockwelli kõvaduskatse.[WWW] <http://hardnesstesters.com/Applications/Rockwell-Hardness-Testing.aspx> (29.04.2017)

14. Brinelli kõvaduskatse.[WWW](<http://hardnesstesters.com/Applications/Brinell-Hardness-Testing.aspx>) (29.04.2017)
15. Vickersi kõvaduskatse.[WWW](<http://hardnesstesters.com/Applications/Vickers-Hardness-Testing.aspx>) (29.04.2017)
16. Lõike- ja survetöötlusriistad/ Hõbemägi, A., Jaanson, A., Levin, B. Tallinn: Valgus, 1987.
17. Uuenduslik tootmine / toimetaja J. Riives, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
18. Instrumendikonstruktori käsiraamat : külmstantsimine / Eesti NSV Rahvamajanduse Nõukogu, Tehnilise Informatsiooni Büroo ; U. Elvak, P. Kaasik, M. Kesa... [jt.].Tartu: H. Heidemanni nimeline trükikoda, 1962.
19. Crowood Metalworking Guides: Sheet Metal Work / Dr Bowman, M. Wiltshire: The Crowood Press, 2014.
20. Vesi abrasiivlõikus.[WWW] (<http://www.flowwaterjet.com/Learn/Comparative-Cutting.aspx#range>) (02.02.2017)
21. Vesilõikus.[WWW] (<http://fineststeel.ee/teenused/vesiloikus>) (03.03.2017)
22. Research On Surface Roughness By Laser Cut, Radovanovic, M. [WWW] <http://www.om.ugal.ro/AnnalsFasc8Tribology/pdf/2006/13-Annals2006-Radovanovic.pdf>. (08.03.2017)
23. Laser Cutting: Guide for Manufacturing, Society of Manufacturing Engineers, Caristan, L.C. Dearborn, Michigan, 2003.
24. Surface roughness measurement after stamp testing. [WWW] https://www.researchgate.net/figure/267594557_fig3_Figure-7-Average-roughness-contact-resistance-variations-along-10000-micro-stamping-for. (01.02.2017)
25. Kõvaduse mõõtmiseks kasutatud katseseade. [WWW] <https://www.leebhardnesstesters.com/image/cache/data/tmt/thx281/THX281-440-transparent-700x700.png> (06.05.2017)

LISAD



Kasutada teraseid AISI316 ja S355MC
 Materjali paksused valda $s_1=3,0$ mm ja $s_2=10,0$ mm
 Kraade ja pritsmeid enne pinnakareduse mõõtmisi mitte eemaldada
 Kontrollida pinnakaredust vastavalt tabelile 4

 1918 TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL TARTU KOLLEDŽ	Töö pealkiri: Lehtmetalli tööstuslikud lõikustehnoloogiad			
	Koostaja: Hedvig Vaht	Töö liik: Magistritöö		
Juhendaja: Jüri Resev	Joonis: LISA 1			
Säästva tehnoloogia õppetool	Fail: Katsekeha_TTÜ_TK	Mõõtkava: 1:1	Kuupäev: 02.04.2017	Joonise nr: 1