



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

ROOSTEVABATERASTE LASERKEEVITUSE PARAMEETRITE MÕJU KEEVISE OMADUSTELE

THE EFFECT OF LASER WELDING PARAMETERS ON STAINLESS STEEL WELDS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Robert Ladva

Üliõpilaskood:: 211667MATM

Juhendaja: Mart Kolnes, teadur

Juhendaja: Märt Kolnes, teadur

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad,

kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"22" mai 2023

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Robert Ladva

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Roostevabateraste laserkeevituse parameetrite mõju keevise omadustele”,

mille juhendajad on Mart Kolnes ja Märt Kolnes,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

22.05.2023

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

TalTech Instituudi nimetus
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Robert Ladva, 211667MATM
Õppekava, peeriala: MATM, Tootarendus ja tootmistehnika
Juhendaja(d): Teadur, Mart Kolnes, 6203361
Teadur, Märt Kolnes, 6203361

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Roostevabateraste laserkeevituse parameetrite mõju keevise omadustele
(inglise keeles) The effect of laser welding parameters on stainless steel welds

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida laserkeevitust ning roostevaba materjalide tausta.
2. Katsekehade loomine ning katsete läbi viimine.
3. Katsete analüüsi tegemine ning parameetrite võrdlemine.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Katsekehade valmistamine Laserline OÜ-s	27.03.2023
2.	Katsete läbi viimine TalTechis	07.04.2023
3.	Katsetulemuste vormistamine ning katseandmete analüüs	01.05.2023
4.	Töö vormistamine lõplikuks variandiks	15.05.2023

Töö keel: Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "22" mai 2023a

Üliõpilane: Robert Ladva ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Teadur, Mart Kolnes ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: Teadur, Märt Kolnes ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: Professor Martin Eerme ".....".....20.....a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	7
Lühendite ja tähiste loetelu	8
1. SISSEJUHATUS	9
2. LASERTÖÖTLEMINE	10
2.1 Laserkeevitus	10
2.1.1 Laserkeevituse eelised traditsiooniliste keevituste ees	11
2.1.2 Laserkeevituse puudused	11
2.1.3 Keevitusmeetodid.....	12
2.1.4 Ketaslaseri tööpõhimõte.....	13
2.1.5 Keevitusparameetrid	15
2.1.6 Soojussisestus.....	15
2.1.7 Kaitsegaas	16
2.2 Programmid	17
2.2.1 Väljastatavad koodid.....	17
2.3 Kasutatav masinapark.....	17
3. MATERJALID	20
3.1 Korrosioon terastes	20
3.1.1 Elektrokeemiline korrosioon.....	21
3.2 Legeeritud terased.....	21
3.3 Roostevabad terased	23
3.3.1 Austeniitsed terased	23
3.3.2 Ferriitsed terased	25
3.4 Katses uuritavad näitajad.....	27
3.4.1 Vastupidavus tõmbele	28
3.4.2 Vastupidavus paindele	28
3.4.3 Korrosioonikindluse hindamine	29
4. KATSED JA ANALÜÜS	30
4.1 Katsekehade loomine.....	30
4.1.1 Keevitusrakis.....	31
4.1.2 Keevitusprogramm arvutis	33
4.1.3 Keevitusprogramm robotis.....	34

4.1.4 Keevitusenergia kasutatud võimsustega	36
4.2 Keevislihid ning nende analüüs	36
4.2.1 Keevislihi järelalus.....	42
4.3 Korrosioonikatsed.....	42
4.3.1 Korrosioonikatsete tulemused.....	44
4.3.2 Korrosioonikatse ülevaade	49
4.4 Tõmbekatse.....	49
4.4.1 Tõmbekatse tulemused.....	49
4.5 Paindekatsed	51
4.5.1 Paindekatsed tulemused	51
4.6 Järeldused parameetritele	51
KOKKUVÕTE	53
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	56
LISAD	59

EESSÕNA

Magistritöö teema sõnastati firma Laserline OÜ algatusel ning töö viidi läbi koostöös TalTech Mehaanika ja metroloogia katselaboriga. Katseplaatide laserkeevitus ning laserlõikus toimus Laserline OÜ-s ning katsekehad loodi Taltechis.

Soovin tänada kõiki, kes aitasid lõputööd läbi viia, sealhulgas ettevõtte kollektiivi ning Mehaanika ja metroloogia katselabori kollektiivi, kes aitasid ning juhendasid katsete tegemisel. Suured tänud juhendajatele Mart Kolnesele ning Märt Kolnesele, kes aitasid katsete formuleerimise ning läbi viimisega.

Võtmesõnad: Laserkeevitus, roostevaba teras, põkkõmblus, magistritöö

Lühendite ja tähiste loetelu

AISI – Ameerika raua ja terase instituut (*American Iron and Steel Institute*)

TMT/HAZ – Termomõju tsoon (*Heat affected zone*)

δ_0 – materjali voolepiir

R_m – maksimaalne tõmbetugevus

LBW – laserkiirkeevitus (*Laserbeam welding*)

Nd:YAG – neodüüm-ütrium-alumiinium-granaat (*neodymium-doped yttrium aluminum garnet*)

PREN – Täppkorrosiooni kindluse ekvivalent (*Pitting resistance equivalent number*)

MIG – traatkeevitus inertgaasi keskkonnas (*Metal inert gas*)

MAG – traatkeevitus aktiivgaasi keskkonnas (*Metal active gas*)

TIG – sulamatu elektrodiga elekterkaarkeevitus kaitsegaasi keskkonnas (*Tungsten inert gas*)

MMA - elektrodkeevitus (*Manual metal arc*)

U – kaare pinge

I – keevituse vool

V - keevituskiirus

k – keevitusprotsessi termiline kasutegur

STEP – levinud 3D-mudeli formaat (*Standard for the Exchange of Product Data*)

LIN – lineaarne liikumine

PTP – (*Point to point*) punktist punkti liikumine

δ_{max} – materjali maksimaalne tõmbetugevus

EVS – Eesti standard

EVS-EN – Eesti standardiks ülesvõetud Euroopa standard

ISO – Rahvusvahelise Standardorganisatsiooni lühend

1. SISSEJUHATUS

Antud magistri lõputöös uuritakse laserkeevituse ning selle erinevate parameetrite mõju roostevabadele sulamitele. Autor kasutab töös järgnevaid sulameid:

- X5CrNi18-10
- X5CrNiMo17-12-2
- X6Cr17

Eeltoodud nimetused on Eesti standardile vastav, kuid üldiselt tuntakse neid üle maailma levinud lühenditega AISI 304, AISI 316 ning AISI 430.

Laserkiirkeevitus on sulakeevituse liik, kus kasutades olemasolevaid materjale, sulatatakse üks detail teisega kokku. Kuigi keevitus seisneb selles, et täitematerjali ei ole vaja, saab seda lisada kasutades keevitustraati. Ilma täitematerjalita on vaja kontaktpinda, täitematerjaliga saab kuni 1 millimeetri suuruse vahe kinni sulatada. On võimalik ka suurema vahe kokku sulatus, kuid see hõlmab mitmekordset keevitust. Laserkiirkeevitus on kiirelt arenev tehnoloogia, mis on tänu madalale järeltöötamise vajadusele säästlikum alternatiiv tavakeevitusmeetoditele. Töös kasutatud keevituses kasutatakse laseri allikana ketaslaserit ning kaitsegaasina argooni.

Töös kasutatud katseplaadid lõigati Laserline OÜ laserlõikuspingsis ning keevitati laserkeevitus robotiga autori poolt. Katsekehad lõigati Taltechis ning katsed viidi läbi mehaanika ja metroloogia katselaboris.

Töö koosneb kolmest peatükist:

- Lasertöötamise ülevaade, kus tutvustatakse laserkeevitust lähemalt.
- Töös kasutatavate materjalide tutvustus.
- Katsed ja analüüs, kus autor kirjeldab tehtud katseid ning nende tulemusi.

Käesolev lõputöö on koostatud ning vormistatud vastavalt Tallinna Tehnikaülikooli Inseneriteaduskonna lõputööde malli ning lõputööde nõudeid silmas pidades. [1], [2]

2. LASERTÖÖTLEMINE

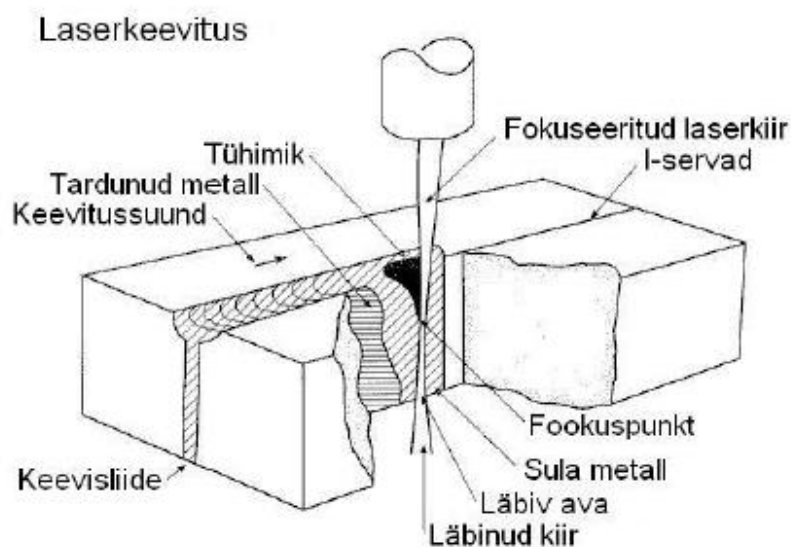
Laserkeevitust ning laserlõikust saab liigitada lasertöötlemise alla. Materjali lasertöötlemine põhineb kontsentreeritud ja võimendatud laserkiire soojuslikul toimel. Valguskiire allikana kasutatakse optilist kvantgeneraatorit ehk laserit. Sõna laser tuleneb inglise keelsest akronüümist – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. [3]

2.1 Laserkeevitus

Keevitamiseks nimetatakse kahe või enama detaili omavahelist liitmist. Keevisliide saavutatakse kuumutamise või surve abil, mille tulemusena tekib liitekohas ühtne kristallvõre. Keevitamise eesmärgiks on saavutada keevises mehaanilised omadused, mis on vähemalt samaväärsed põhimetalli omadustega ehk keevis ei tohi olla nõrgem ülejäänud detaili osadest.

Sulakeevitus ehk *fusion welding* on keevitus, kus liiteosa koosneb kahe detaili omavahelisest kokku sulatatud osast. Sellist liidet saab teha nii koos kui ka ilma täitematerjalita.

Laserkiirkeevitus ehk laserkeevitus on sulakeevitus, kus soojusallikana kasutatakse suure võimsusega laserit. Laseri diameeter on väga väike ning tänu sellele on keevitus suure energiasisestusega. Laseri täpi diameeter võib olla minimaalselt 0,2 mm. Tänu sellele on võimalik teha sügavaid läbisulatuskeevitusi.



Joonis 2.1 Läbisulatuskeevitus [3]

Selle tulemusena on võimalik luua sügavaid ja kitsaid liiteid. Üldiselt on sügavuse ja laiuse suhe vahemikus 4:1 kuni 10:1. Laserkiirkeevitus ehk LBW on tänapäeva tööstuses väga levinud, tänu erinevate parameetrite muutmisele ning võimsatele laseritele, saab seda kasutada suure amplituuda puhul. Võimalik on keevitada väga õhukesi materjale, mida käsitsi on ülimalt keeruline keevitada, näiteks sulamid mille lehe paksus on alla 0,5 mm. Samuti keevitatakse paksu materjale, sest laseri võimsus võib ulatuda kuni 100 kW-ni. Lisaks pole laserkeevitusel suuri piiranguid materjalide puhul, kokku saab sulatada metalle, polümeere, plaste jne. [4]

2.1.1 Laserkeevituse eelised traditsiooniliste keevituste ees

- Tänu minimaalsele soojussisestusele on TMT ning keevitusdeformatsioonid tunduvalt väiksemad.
- Suurem tootlikus.
- Keevituskiirused võivad ulatuda alates 2,5 m/min kuni 80 m/min.
- Kuna puudub täitematerjali vajadus, on võimalus keevitada suurt variatsiooni materjale, sealhulgas ka komposiite ja plaste.
- Keevitusõmbluse kõrged tugevusomadused.
- Järel-töötuse vajalikkuse puudumine.
- Eeltöötuse vajaduse puudumine – ei ole vaja faase ette teha.
- Keevitusel on vähem pritsmeid ning hea kokku sulamine.
- Väiksem oht pooride tekkeks.

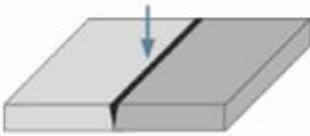
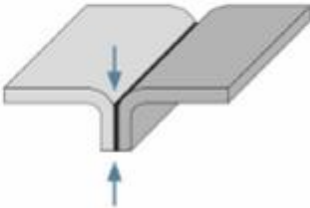
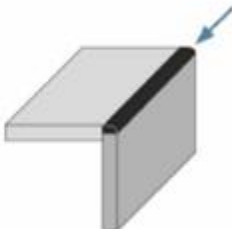
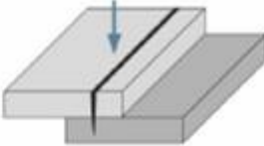
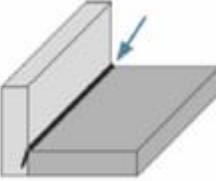
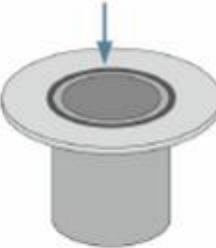
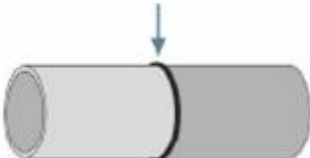
[3]–[5]

2.1.2 Laserkeevituse puudused

- Väga kõrged nõuded toote koostamise täpsusel ja positsioneerimisel.
- Kõrge ülesseadmise kulu ja aeg (masstootmine tuleb siiski soodsam).
- Limiteeritud paksus.
- Kallid seadmed.
- Laserkiir on ohtlik silmadele ja nahale.
- Alumiiniumi keevitamine on keeruline, materjali peegeldus on suur ning seega ei omanda alumiinium kogu laseri võimsust.

[3], [4]

2.1.3 Keevitusmeetodid

Liite tüüp		Sobivad keevitus protsessid
Põkkliide		<ul style="list-style-type: none"> ▪ FusionLine ▪ Läbisulatus keevitus ▪ Sulatus keevitus
Painutatud äärtega keevis		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Läbisulatus keevitus
Väline nurkliide		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fusionline ▪ Sulatus keevitus
Katteliide		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Läbisulatus keevitus
Sisemine nurkliide		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fusionline ▪ Läbisulatus keevitus
Üheteljeline ringkeevis		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Läbisulatus keevitus
Radiaalne ringkeevis		<ul style="list-style-type: none"> ▪ FusionLine ▪ Läbisulatus keevitus

Joonis 2.2 Liite tüübid [6]

Joonisel 2.2 on välja toodud keevisliidete põhitüübid – kõiki neid liiteid saab teha nii täitematerjaliga kui ka ilma. Antud töös käsitleb autor ilma täitematerjalita keevitust. Ilma täitematerjalita saab parima tulemuse kasutades põkk- ja nurkliiteid. Nurkliites on vaja luua ligi 70% ülekate ning mõlema puhul peab olema tagatud detailide vahelise õhupilu puudumine. Vastasel juhul võib laser kahe detaili vahelise pilu suuremaks sulatada. Nurkkeevitusel on ka kaks erinevat varianti, saab sulatada üle ulatuva materjali teise detaili külge, sel kombel jääb nurka raadius. Nii peab keevitama ligikaudu 45 kraadise nurga all. Teine variant on pinnaga risti keevitades suunata kiir täpselt detailide vahele, sedasi tekib sarnane õmblus, mis põkk-keevituses.

Käesolevas töös kasutati liitetüübina põkk-liidet ehk *buttjoint*-i. Sellist keevist kasutades saab autor kõik tööks vajalikud katsed läbi viia.

2.1.4 Ketaslaseri tööpõhimõte

Laseri tekitamiseks kasutatakse järgnevaid laseri tüüpe:

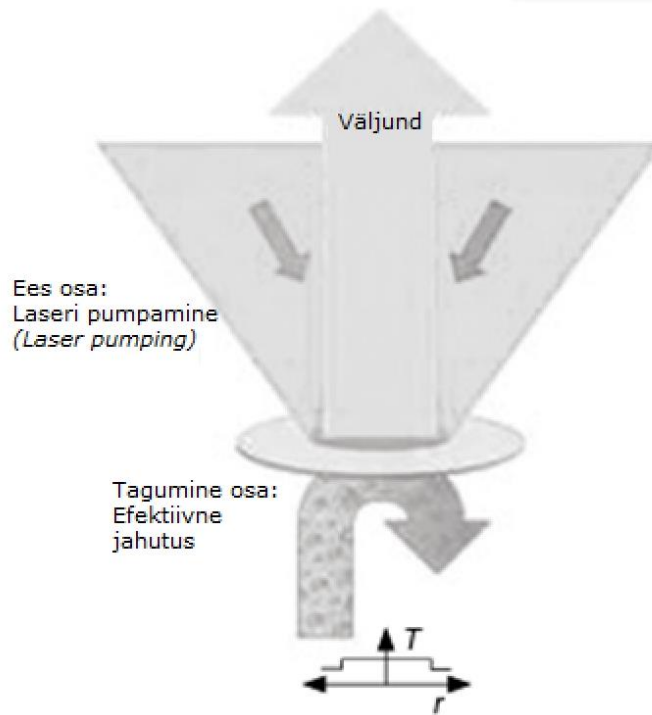
- CO₂ laser
- Nd:YAG laser
- Laser diood
- Ketaslaser
- Fiiber laser

Vaid CO₂ laser on gaaslaser, Nd:YAG on tahkislaser. Need kaks on vanemad tehnoloogiad ning peamiseks erinevuseks uuemate tüüpidega on madalam efektiivsus. Kui Nd:YAG laseri kasuteguriks peetakse ligi 4%, siis moodsamad ketas- ning fiiberlaser töötavad ligi 25% kasuteguri lähedal, vahe on 6-kordne.

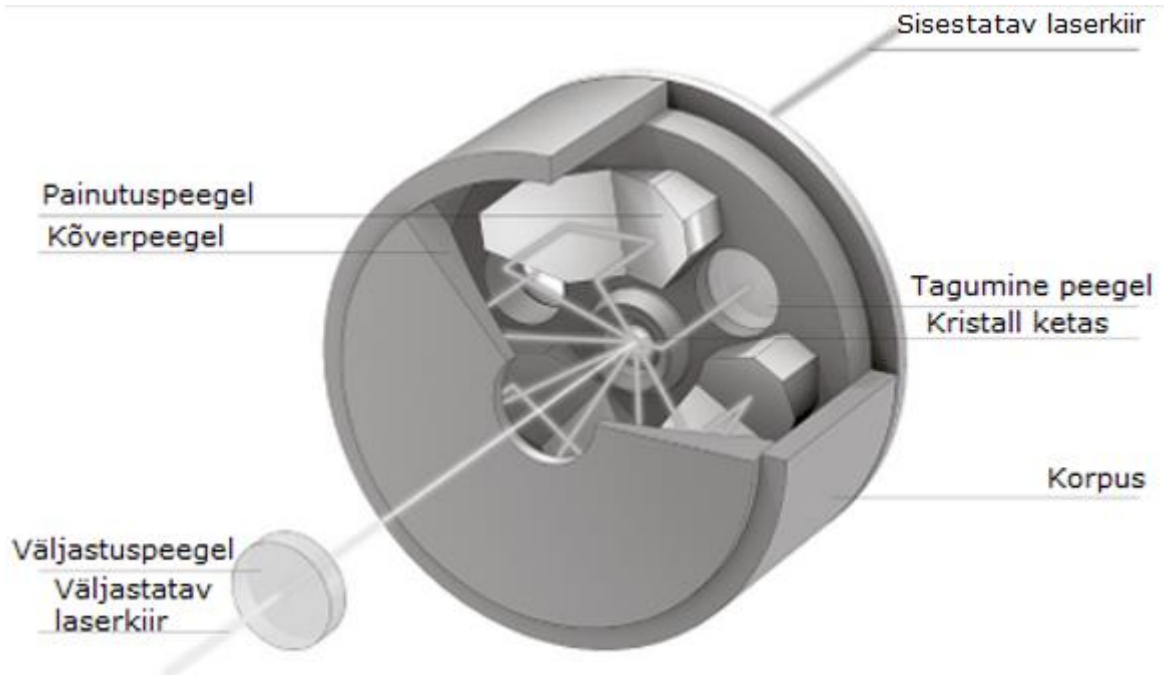
Ketaslaser

Antud töös tehakse katsed ketaslaseriga, see on edasiarendus Nd:YAG laserist. Enne kasutati aktiivosana kristallist võlli, mis oli suhteliselt suur ning paraboolse temperatuuri profiiliga – keskelt kuumem ja väljast jahedam. Lisaks oli sellel ka madal laserkiire kvaliteet ning väljalaskevõimsus. See probleem lahendati õhukese ketta kasutamisega. Ketta paksuseks on ligi 0.2 mm ning diameetriks 15 mm, see on asetatud jahutusradiaatori peale. Niimoodi kuumus hajub ning ei koonu ühte kohta, tulemuseks on hea kvaliteediga kiir ning saavutatakse maksimaalne võimsus. Jahutatud tagumisel osal on peegeldav pind (*reflecting surface*), mis peegeldab kiire ning sisestatud valguse (*Laser pumping*). Ketaslaserit võimendatakse efektiivsete diodide abil. Koonlaserkiire (*pump laser beam*) diameeter fokuseeritakse mõne millimeetri suuruseks ning

suunatakse ketta peale. Ketta väikese paksuse tõttu omandab see ainult murdosa kiirgusest ning ülejäänud peegeldub tagasi. Korpus (*Cavity*), kus kiir liigub, on täidetud peeglitega, mille hulgas on ka paraboolse kujuga kõverpeegel. Kiirt peegeldatakse mitu korda ketta peal ning lõpuks väljastatakse see läbi ava, mis asub paraboolse peegli keskel. Sealt liigub see korpusest väljas asuvale väljastuspeeglile. [7]

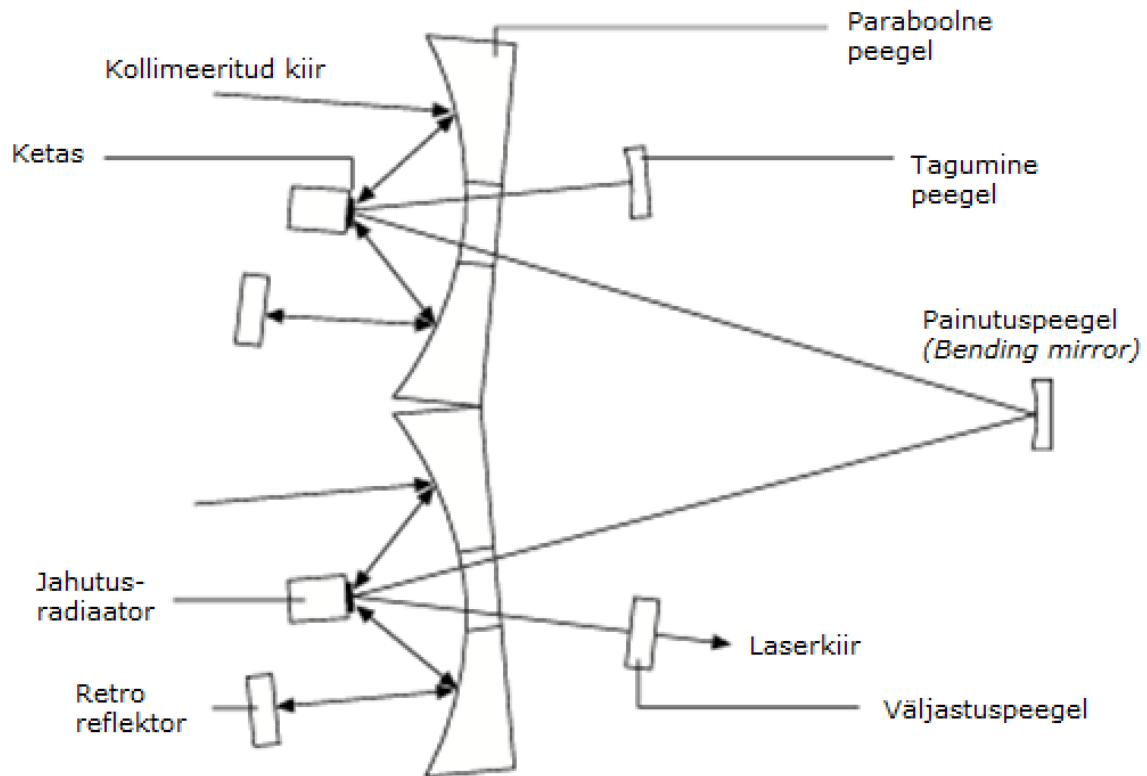


Joonis 2.3 Ketaslaseri tööpõhimõte [7]



Joonis 2.4 Ketaslaseri korpuse ehitus [7]

Selleks, et suurendada laseri võimsust, saab ketaslasereid kombineerida. Kasutades peegleid, suunatakse kiired ühest korpusest teise, viimane korpus on sama, mis kujutatud joonisel 2.3, ülejäänud skeemi kujutatakse joonisel 2.4.



Joonis 2.5 Mitme laseri kombineerimine [7]

2.1.5 Keevitusparameetrid

Peamised keevitusparameetrid, mida laserkeevituses muudetakse, on järgnevad:

- Võimsus F (W)
- Keevituskiirus v (m/s)
- Fookuspunkt (mm)

Lisaks saab muuta veel järgnevaid parameetreid, mis on vähem tähtsamad, kuid siiski mõjutavad keevise kvaliteeti:

- Kaitsegaasi kogus (l/min)
- *Crossjet* – suruõhk, mis kaitseb keevitusroboti pead pritsmete eest (l/min)
- Pulsi kestvuse aeg (ms)
- Pulsi sagedus (Hz)

2.1.6 Soojussisestus

Üheks tähtsamaks parameetriks on keevisõmbuse pikkusühiku kohta sisestatud energiahulk ehk soojussisestus. Vastavalt standardile EVS-EN 1011-1:2009 [8]

$$Q_e = \frac{k \times U \times l}{v} \times 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \quad (2.1)$$

Kus:

- U – kaare pinge V;
- I – keevituse vool A;
- v – keevituskiirus mm/s;
- k – keevitusprotsessi termiline kasutegur, erinevatel keevitusprotsessidel kasutatakse järgmisi väärtusi:
MMA – 111; $k = 0,85$
MIG/MAG – 131/135; $k = 0,85$
TIG – 141; $k = 0,6$
Keevitus rübustis – 121; $k = 1,0$

[3]

Laserkeevitusele kindlat termilist kasutegurit paraku ei ole, seega selline valem ei sobi. Küll aga on valemist tuletatud levinud parameeter keevitusenergia, mis väljendatakse samuti kJ/mm, valemiks on:

$$E = \frac{60 \times U \times I}{1000 \times v} \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \quad (2.2)$$

Parameetreid U ja I laserkeevituses ei kasutata, kuid kasutades valemit:

$$N = U * I \quad (2.3)$$

Kus N – võimsus W

Saame valemi 2.2 lugeja asendada valemiga 2.3:

$$E = \frac{60 \times N}{1000 \times v} \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \quad (2.4)$$

- N – keevituse võimsus W;
- v – keevituskiirus mm/min.

Keevitusenergia on soojussisestuse arvutamine, kui termiline kasutegur on 1.

2.1.7 Kaitsegaas

Selleks, et vältida keevitatud pinna oksüdeerimist, kasutatakse keevituses kaitsegaasi. Kaitsegaasi valikul peab arvestama, mis materjaliga on tegu. Näiteks on alumiiniumi MIG keevitusel kasutusel inertgaas – Ar või Ar ja He segu. Süsinikteraste puhul on MAG keevitusel kasutusel kas CO₂ või Ar (80 %) + CO₂. Keevitades roostevaba terast kasutatakse Ar-ni, kuhu on lisatud kuni 2 % CO₂. [9]

Roostevabaterase keevituses on soovituslik lasta kaitsegaasi lisaks ka keevituse toimumisajale eelneval ning järgneval perioodil. Kuid antud töös nõuaks see robotkeevituse puhul keerulist rakist.

Autori gaasi valik tulenes Laserline OÜ-s kasutatavast gaasist, milleks oli argoon. See täidab ka eelpool välja toodud kriteeriumid.

2.2 Programmid

Töös kasutab autor peamiselt kahte programmi. Esimese programmi, TruTops Boost, abil luuakse algne rakise mudel ning koostatakse lõikefail. Lõikusele järgneva keevituse jaoks loob autor simulatsiooni ning koodiread, kasutades programmi TruTops Weld. Programmis loodud punktid peab autor käsitsi siiski üle kontrollima keevitusrobotis, nii tagatakse keevituse õige pikkus, asukoht ning fookuspunkt. Samuti peab jälgima, et ei ole ühtegi kokkupõrget rakisega.

2.2.1 Väljastatavad koodid

Laserlõikus toimub kasutades LST faili. LST on sisuliselt tekstifail, kus on välja toodud milliste parameetritega pink lõikab ning NC programmi liikumised ja koordinaadid.

Keevitusfail koosneb kahest osast: SRC ning DAT failidest. Kuigi robotisse sisestatakse kaks faili, loetakse neid siiski ühe koodina. Liikumised, mida antud töös autor kasutas on järgnevad:

- LIN on lineaarne liikumine ühest punktist teise, robot liigub sirgelt. Seda kasutab autor keevituses, sest on vaja sirget keevist. Simulatsioon ja reaalne elu ühtivad sellist liikumist kasutades.
- PTP on „*Point to point*“ liikumine, siin on tähtis alg- ja lõpp-punkt, see kuidas robot liigub, otsustab programm ise, vaadates milline on kõige optimaalsem liikumine. Need punktid võivad simulatsioonis ja reaalses elus olla väga erinevad, seetõttu peab operaator enne programmi jooksumist kõik punktid rahuliku kiirusega läbi käima.

Lisaks on käsklused „*Laser on*“, „*Laser off*“, need aktiveerivad ja deaktiveerivad laseri.

2.3 Kasutatav masinapark

Katsetoorik lõigati ning keevitati laseriga kasutades järgnevat masinaparki:

Laserlõikus tehti laserlõikuspingil TruLaser 5030 8kW Fiber. Selle maksimaalne toorik, mida lõigata saab on 3000x1500.

Laserkeevitus tehti kasutades masinat TruLaser Weld 5000, mille manipulaatoriks oli KUKA robot KR 30 HA ning laseriks oli TruDisk 4001.

Tabel 2.1 KR 30 HA spetsifikatsioonid

Telgede arv	6
Kandevõime	30 kg
Ulatus	2033 mm
Korratavus	0,05 mm

Tabel 2.2 TruDisk 4001 spetsifikatsioonid

Laseri võimsus	4000 W
Võimsuse keskmine püsivus 8h jooksul konstantsel ümbritseval temperatuuril	+/- 0,5%
Võimsuse maksimaalne püsivus 8h jooksul konstantsel ümbritseval temperatuuril	+/- 1%
Muudetav võimsuse vahe	80 – 4000 W
Lainepikkus	100 µm



Joonis 2.6 Trulaser Weld 5000

3. MATERJALID

Laseriga saab keevitada enamus materjale, mida saab keevitada ka teisi sulameetodeid kasutades, kuid näiteks alumiinium ja vask on oma peegeldava pinna tõttu raskesti keevitatavad. Vase peegelduvus on nii suur, et seda kasutatakse peeglina CO₂ laserites. Üldiselt lähtutakse reeglist – mida madalam on materjali soojusjuhtivus või mida kõrgem on selle elektritakistus, seda suurem on tõenäosus, et see suudab neelata laseri kiirt. Lisaks on üldiselt levinud keevitatavad terased ja roostevabad terased ideaalsed ka laserkeevituseks. [10]

Selleks, et saaks uurida laserkeevituse mõju sulami roostekindlusele, peab uurima roostekindlaid materjale, sest kasutades üldlevinumat terast S355MCD, läheb nii keevis kui ka materjal rooste. Kuumtsingitud DX51D+Z275 on saanud korrosioonikindlaks pealmise kaitsekihiga. Seega, kui seda keevitada, põleb tsingi kiht maha ning alles jääb mitte korrosioonikindel teras. Antud juhul keevise ümbert materjal ei korrodeeru, kuid keevis ise korrodeerub.

Seega on ainsaks variandiks keevitada roostevaba terast, autor otsustas juhendajatega arutades, et uuritakse kolme erinevat terast. Valik tehti autori kogemuse põhjal, milliseid sulameid kasutatakse enim tema töövaldkonnas:

- AISI 304 ehk EN 1.4301 ehk X5CrNi18-10
- AISI 316 ehk EN 1.4401 ehk X5CrNiMo17-12-2
- AISI 430 ehk EN 1.4016 ehk X6Cr17

3.1 Korrosioon terastes

Raud ja teras moodustavad ligi 90% maailmas toodetud metallidest, enamus sellest on madalsüsinikterased. Madalsüsinikterast on masinatööstuses kõige mugavam kasutada selle mehhaaniliste omaduste ja madala hinna tõttu. Paraku on neil üks suur negatiivne omadus, korrosioon. [11]

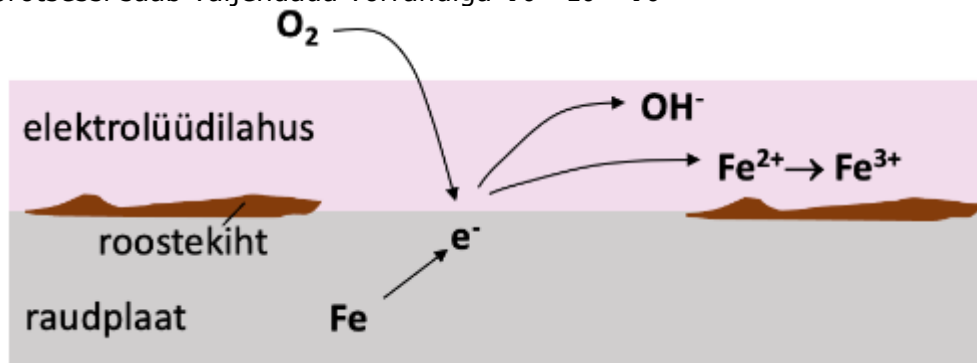
Korrosiooniks nimetatakse metalli või selle sulami ja keskkonna vahelist reaktsiooni, mille tulemusena metall hävineb. Eristatakse kahte korrosiooni liiki. On keemiline korrosioon ning elektrokeemiline korrosioon. Samuti jaguneb korrosioon vastavalt selle tekkimise asukoha järgi. On üldine korrosioon, kus metalli korrodeerumine toimub ühtlaselt kogu pinna ulatuses ning teiseks on lokaalne ehk paikne korrosioon. Paikse puhul ei ole korrosioon ühtlane ning seda peetakse ohtlikumaks, sest alati ei pruugi avastada korrosiooni enne mehhanismi purunemist, kui korrosioon tekib kohta mis

visuaalselt nähtav pole. Antud töös tegeleb autor elektrokeemilise ning paikse korrosiooniga. [12]

3.1.1 Elektrokeemiline korrosioon

Antud töö üks osadest on uurida keevitusjärgset korrosiooni, täpsemalt elektrokeemilist korrosiooni. Elektrokeemiliseks korrosiooniks nimetatakse korrosiooni, mis toimub vett sisaldavas keskkonnas ja sulaelektrolüütides. Selle põhjustavad anoodi- ja katodiprotsessid ehk elektrokeemilised reaktsioonid metalli ja elektrolüüdilahuse kokkupuutepinnal. Just elektrokeemiline korrosioon on see, mis põhjustab metallide hävinemist merevees, sulasoolades, niiskes õhus, hapete, aluste ja soolade lahustes ning pinnases uitvoolude osavõtul. Elektrokeemiline korrosioon tekib, kui korrodeeruva metalli pinnale kondenseerub niiskus, kus lahustub omakorda õhuhapnik. Üldiselt saab niiskusest elektrolüüd, milles sisalduvad gaasid H_2O , CO_2 , SO_2 ning sool $NaCl$. Terasestruktuur koosneb ferriidist, tsementiidist ning grafiidist. Neil kõigil on erinev elektripotentsiaal ning seetõttu on ka terase pind elektrokeemiliselt ebaühtlane. Tekkivates mikrogalvaanipaarides Fe-C, Fe- Fe_3C jt on anoodiks raud. [12]

Seda protsessi saab väljendada võrrandiga $Fe - 2e \rightarrow Fe^{2+}$



Joonis 3.1 Rauda elektrokeemiline korrosioon neutraalses lahuses [13]

3.2 Legeeritud terased

Teraseks nimetatakse raua ja süsiniku sulamit, mille süsinikusisaldus on kuni 2,14%. Sellest edasi nimetatakse sulamit malmiks (tavaliselt kuni 4% C). Peale süsiniku on terastes alati teisi lisandeid, mis on sinna sattunud sulami saamise käigus, või on sinna sihilikult lisatud. [12]

Legeerelemendid on spetsiaalselt sulamisse lisatud elemendid, millega muudetakse terase omadusi. Eristatakse kolme erinevat terase tüüpi:

- Madalalt legeeritud – lisandeid kuni 2,5%
- Keskmiselt legeeritud – lisandeid 2,5% – 5%

- Kõrgelt legeeritud – lisandeid üle 5%

[12]

Elemendid mõjutavad terase omadusi erinevalt. Autor toob välja 3 elementi, mida on töös kasutatavates terastes üle 2%.

Kroom

Roostevaba terase kõige tähtsam ning suurima osakaaluga legeerelemendiks on kroom. Just see annab roostevabadele sulamitele korrosioonikindluse ning läikiva halli värvuse. Kui kroomi osakesed reageerivad hapnikuga, tekib kroom-oksiid ning see takistab raua oksüdeerumast. Kui pealmist pinda kriimustatakse, taastub koheselt uus kaitsekiht. Korrosioonikindlus kasvab terastes siis, kui kroomi osakaal ületab 10,5%. Keskmiselt on kroomi sulamites 18% lähedal. [14]

Kroom suurendab järgnevaid sulami omadusi:

- Tõmbetugevus
- Korrosioonikindlus
- Kõrgtemperatuuri tugevus
- Kulumiskindlus

[15]

Nikkel

Kui kroom on metall, mis teeb roostevaba terase korrosioonikindlaks, siis nikkel on element, mis muudab selle sulami väga mitmekülgseks. Lisades niklit vähemalt 5%, säilib toatemperatuuril austeniitstruktuur, mis on kujutatud joonisel 3.2. Lisaks nikli algele roostekindlusele parandab see mitmeid omadusi:

- Keevitatavus – pärast kuumtöötlemisest tingitud terakasvu tõttu ei ole sulam hapruse aldis ning keevistel on suurepärase löögi- ja paindevastupidavuse omadused.
- Vormitavus – nikkel vähendab kalestumist ning sulamites väheneb külmpirgude tekke oht.
- Sitkus – tänu austeniitsele kristallvõrele on sulamid sitked ka suurtes miinuskraadides (ka -270°C).
- Vastupidavus kõrgetel temperatuuridel – sulamid on roome suhtes vastupidavamad ning 300°C juures tõenäosus hapruse tekkele väheneb.

[16]

Molübdeen

Molübdeen on kolmas legeerelement, mida autor lähemalt tutvustab. Seda lisatakse vähem kui niklit ja kroomi. Molübdeeni lisatakse kuni 8%, kuid üldiselt on see vahemikus 2-4%. Metallilise mõju sulamile on järgnev:

- Suureneb korrosioonikindlus kloriidlahustes (merevees)
- Kuigi mehaanilised omadused toatemperatuuril on samad, on molübdeeni kõrge sulamistemperatuuri tõttu järgnevad omadused kõrgetel temperatuuridel paremad:
 - Tugevus
 - Kõvadus
 - Vastupidavus roomele

Molübdeeni on mitmeid erinevaid omadusi, mida see sulamile annab, kasutatakse enamjaolt siiski seda korrosioonikindluse tõstmiseks. Täppkorrosioonikindust (PREN) arvutatakse valemiga

$$PREN = \%Cr + 3,3 * \%Mo + 16 * \%N \quad (3.1)$$

Valemist 3.1 on näha, et molübdeen on 3,3 korda efektiivsem kui kroom täppkorrosiooni ära hoidmisel. [17], [18]

3.3 Roostevabad terased

Elektrokeemilise korrosiooni takistamiseks kasutatakse legeerelemente, mis suurendavad sulami elektrokeemilist potentsiaali. Kõige suuremat mõju avaldab elektrokeemilisele potentsiaalile kroom. Antud töös vaadatakse kroomterast ning kroomnikkelteraseid. Struktuuri poolest jagunevad need järgnevalt:

- Austeniitne
- Ferriitne
- Martensiitne

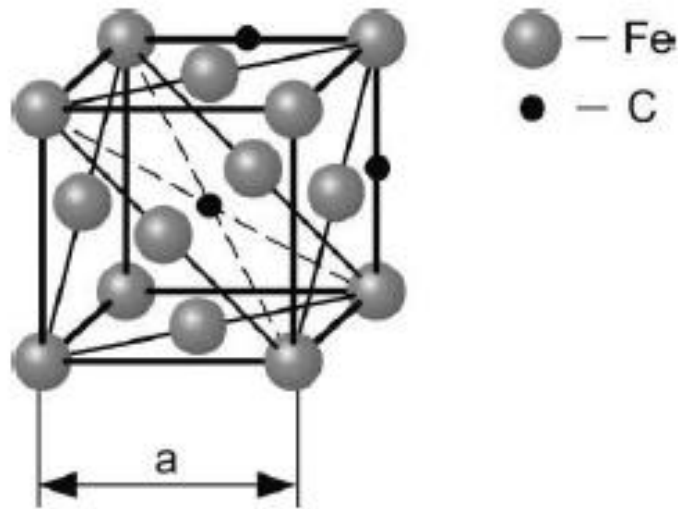
Antud töös käsitletakse, tulenevalt materjalide valikust, ferriitse ning austeniitse struktuuriga materjale.

3.3.1 Austeniitsed terased

Kõige levinum roostevaba teras on austeniitne teras, moodustades ligi 65% kõikidest kasutatavatest roostevabadest terastest. Austeniitsetes terastes on peamisteks legeerelementideks kroom ja nikkel. [11]

Austeniit on raua ja süsiniku sisendustardlahus. γ -raua tahkkesendatud kuupvõre aatomitevahelistesse tühikutesse on asetatud süsiniku aatomid. Võrreldes ruumkesendatud kuupvõrega on sellel suuremad tühikute mõõtmed ning sellest tuleneb

süsiniku palju suurem lahustuvus. Austeniit on hästi deformeeritav nii kuumalt kui külmalt ning sitke. Lisaks on see mittemagnetiline. Kõvadus on sellel suurem kui ferriidil. [12]



Joonis 3.2 Austeniidi kristallvõre [12]

Austeniit teras on üldiselt hästi keevitav. TIG/MIG/MAG keevituses keevitatakse seda väikese soojussisestusega – 0,5-1,5 kJ/mm. [5]

Austeniidi tekkele aitavad kaasa järgnevad elemendid:

- Nikkel
- Lämmastik
- Süsinik
- Mangaan
- Vask

[19]

AISI 304

AISI 304 on enim levinud roostevaba lehtteras, sellel on hea korrosioonikindlus ning sobib erinevatel kasutusaladel oma hea vormitavuse ning keevitavuse tõttu. Üldiselt kasutatakse AISI 304 asemel ka madala süsiniku sisaldusega ehk AISI 304L (EN 1.4307/X2CrNi18-9). Üldised mehaanilised omadused on neil samad, kuid madala süsinikusisaldusega teras on parem keevitada. Võrreldes süsinikterastega on sellel ligi 50% suurem soojuspaisumine ning madalam soojusjuhtivus, seetõttu on sulamil suuremad deformatsioonid ning kahanemispinged. AISI 304L keevituse omadused on väga head, kuid pärast keevitust on soovituslik detaili happega puhastada ning passiveerida. Tegemist on kroomnikkelterasega.

Üldiselt kasutatakse AISI 304L:

- Toidu- ja joogitööstuse seadmetes
- Keemia- ja farmaatsiatööstuse seadmetes
- Soojusvahetites
- Mahutites ja anumates
- Torudes
- Äärikutes ja ventiilides

[20], [21]

AISI 316

AISI 316 nimetatakse ka happekindlaks margiks, nimelt on sellel suurepärase korrosioonikindlus. AISI 304 ei pea vastu aluselistes ning happelistes keskkondades, AISI 316 suudab vastu pidada ka orgaaniliste ja lahjendatud mineraalsete hapete keskkonnas. Üldiselt kasutatakse AISI 316 asemel ka madala süsinikusaldusega ehk AISI 316L (EN 1.4407/X2CrNiMo17-12-2). Üldised mehaanilised omadused on neil samad, kuid madala süsinikuga terast on parem keevitada. AISI 316L keevituse omadused on väga head, kuid pärast keevitust on soovituslik detaili happega puhastada ning passiveerida. Tegemist on kroomnikkelterasega.

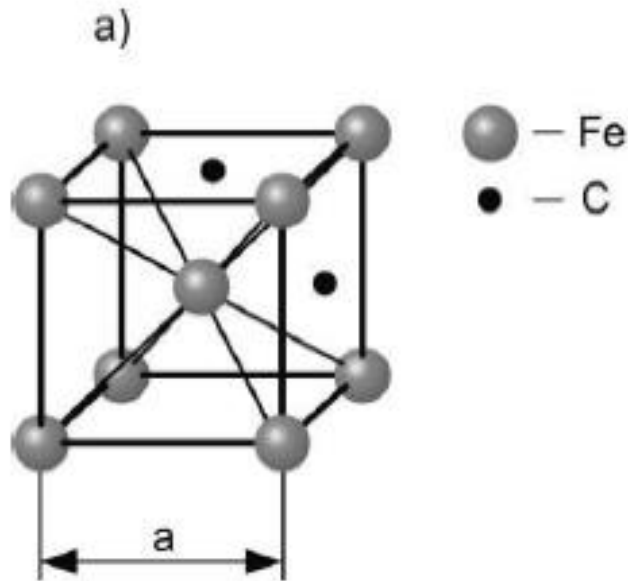
Üldiselt kasutatakse AISI 316L:

- Toidu- ja joogitööstuse seadmetes
- Farmaatsiatööstuse seadmetes
- Tekstiilitööstuses
- Keemia- ja petrokeemiatööstuse seadmetes
- Meditsiiniseadmetes
- Paberitööstuses
- Äärikutes ja ventiilides

[22], [23]

3.3.2 Ferriitsed terased

Ferriit on sisendustardlahus, mis moodustub kui α -raua ruumkesendatud kuupvõre tühikutesse paigutatakse süsinikuaatomid. Kuigi tehakse vahet kõrgtemperatuurse ja madaltemperatuurse ferriidi vahel, tegeleb autor antud töös ainult madaltemperatuurse ferriidiga. Lahuse tühikute mõõtmed on palju väiksemad süsinikuaatomite läbimõõdust, seetõttu on süsiniku lahustuvus α -rauas äärmiselt väike. Ferriit on hea deformeeritavusega ning sitke, külmdformeerides see kalestub, mistõttu kasvab kõvadus. [12]



Joonis 3.3 Ferriidi kristallvõre [12]

Ferriitersed on raskesti keevitatavad, samuti pärast protsessi kaotab sulam löögisitkust ja korrosioonikindlust.

[5]

Ferriidi tekkele aitavad kaasa:

- Raud
- Kroom
- Molübdeen
- Räni

[19]

AISI 430

AISI 430 on odavam alternatiiv AISI 304 sulamile. Sellel on hea korrosioonikindlus magevees ning kergelt aluselises/happelises keskkonnas. Hea vormitavuse tõttu on see on üks enim levinud mitte karastatav ferriitne teras. AISI 430 on kolmest võrreldavast sulamist kõrgeim voolepiir δ_0 , kuid madalaim maksimaalne tõmbetugevus R_m . AISI 430 on keevitatav, kuid kindlate piirangutega. Jahtudes vähemalt 900°C-lt suureneb oht teravahelise korrosioonile. Samuti terade suurenemise ning martensiidi tekkimise tõttu muutub keevis ning TMT hapramaks. Tegemist on kroomterasega.

Üldiselt kasutatakse AISI 430 sisetingimustes, näiteks:

- Köögivarustuses
- Kodutarvikutes

- Kraanikaussides
- Äärikutest ja ventiilides
- Liftides

[24], [25]

Tabel 3.1 Elementide võrdlus

Sulam	AISI 304	AISI 316	AISI 430
Element	Osakaal % (Sulgudes on välja toodud madala süsinikusisaldusega terased)		
Kroom (Cr)	18 – 20	16 – 18	16 – 18
Nikkel (Ni)	8,0 – 10,5 (12)	10 – 14	0 – 0,75
Molübdeen (Mo)	-	2,0 – 3,0	-
Mangaan (Mn)	0 – 2,0	0 – 2,0	0 – 1,0
Räni (Si)	0 – 0,75	0 – 0,75	0 – 1,0
Lämmastik (N)	0 – 0,1	0 – 0,1	-
Süsinik (C)	0 – 0,080 (0,030)	0 – 0,080 (0,045)	0 – 0,12
Fosfor (P)	0 – 0,045	0 – 0,045 (0,030)	0-0,040
Väävel (S)	0 – 0,030	0 – 0,030	0-0,030
Raud (Fe)	(65) 66,5 – 74	62 – 72	79,1 – 84

[20], [22], [24], [26], [27]

Tabelis 3.1 on näha, et kõigil on krooni sisaldus sarnane, erinevus seisneb leegerelementides nikkel ja molübdeen. Nikkel on see, mis muudab 300 seeriad austeniitseteks ning molübdeen tõstab korrosioonikindlust happelistes keskkondades. Ka süsiniku protsent võib olla terases AISI 430 suurim. Nikli puudumine ja süsiniku suurem osakaal ongi põhjused, miks AISI 430-l on madalam R_m võrreldes AISI 316L ja AISI 304L ning ka halvem keevitatavus.

3.4 Katses uuritavad näitajad

Materjali mehaanilised omadused näitavad selle vastupanu deformeerimisele ja purunemisele. Peamisteks omadusteks, millega töös kokku puututakse on:

Tugevus ehk materjali võime taluda koormust ilma purunemiseta. Seda väljendatakse järgnevate tugevusnäitajatega:

- Tõmbetugevus
- Survetugevus
- Voolepiir tõmbel
- Voolepiir survele jm.

Plastsus ehk materjali võime purunemata muuta temale rakendatud väliskoormuse mõjul kuju ning seejärel ka säilitada uus antud kuju peale koormuse lakkamist. Näitajateks on:

- Katkevenivus

- Katkeahenemine

Hapruseks nimetatakse materjali purunemist tühise deformatsiooni korral. Selle vastandiks on sitkus.

Lõputöö raames viiakse läbi mitmeid katseid Laserline OÜ ning TalTech koostöös loodud katsekehadega. Uuritakse järgnevaid näitajaid:

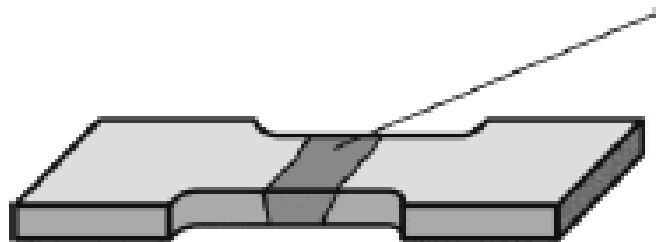
- Tõmbetugevus
- Vastupidavus paindele
- Korrosioonikindlus

Lisaks neile teeb autor igast keemisest lihvi (kokku 9), mida hiljem mikroskoobi all uuritakse.

3.4.1 Vastupidavus tõmbele

Tõmbetugevus näitab maksimaalset koormust, mida metall talub enne selle katkemist. Lisaks maksimaalsele tõmbetugevusele uuritakse ka voolepiiri. Tõmbetugevust uuritakse tõmbekatsega. Pikliku katsekeha tõmmatakse klambritega laiali. Selle katsega on näha sulami δ_0 ning ka δ_{max} . Katsekeha on sarnane joonis 3.3 peal välja toodud kujutisega.

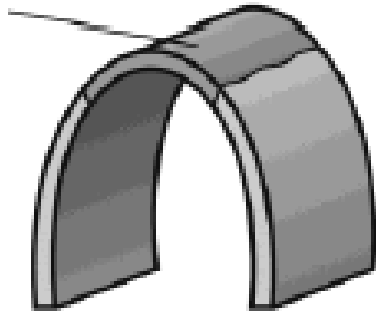
Tõmbetugevust määratakse rõhu ühikuga, töös uuritavaid väärtusi väljendatakse MPa-des.



Joonis 3.4 Tõmbeteimik [7]

3.4.2 Vastupidavus paindele

Paindekatses kujutab endas katsekeha painutamist kolme punkti abil. Allpool on 2 paigal seisvat punkti ning ülevalt pressitakse vastavale katsekeha paksusele ette nähtud ümara latiga peale, tekib joonisel 3.4 välja toodud katsekeha.



Joonis 3.5 paindekatsekeha [9]

Katse käigus tekkivad praod annavad infot pragude või väga hapra mikrostruktuuri tekkest TMT-s.

3.4.3 Korrosioonikindluse hindamine

Korrosioonikindlust hinnatakse kolme katsega, esimese katsena asetatakse katsekehad 72ks tunniks 3.5% soolalahusesse, teiseks on uued katsekehad 30 päeva 3,5% soolalahuses ning kolmas katse on aurukambris 72 tundi 5% soolalahusega pihustades. Korrosioonikindlust hinnatakse visuaalselt.

4. KATSED JA ANALÜÜS

Töö püstitust luues arutas autor koos juhendajatega, mida erinevat saaks uurida laserkeevituse juures. Kuna autor töötab igapäevaselt laserkeevitusega, lähtuti ka töö praktilisusest. Tänu väiksema TMT-le peaks pärast keevitust roostevaba teras teoreetiliselt säilitama oma korrosioonikindluse. Just seda otsustati katsetega uurida, kuna autori töövaldkonnas on erinevaid roostevaba teraseid, uuritakse kolme erinevat sulamit. Lisaks vaadati veel erinevaid omadusi, mida TalTech-i laboris saab katsetega uurida. Kui oli paigas, mida uuritakse, otsustati katsekehade suurused.

4.1 Katsekehade loomine

Katsekeha tooriku paksuse valis autor lähtudes sellest, mis oli töö juures saadav ning mille kasutamine on levinud. Valimiks oli 0,5-5 mm paksusega terased, just selles piirkonnas keevitustega oli autor enim kokku puutunud. Lõpuks otsustati minna keskmist teed ning valiti 2 mm paksus.

Nüüd oli vaja otsustada katseplaadi laius ning pikkus – katsekeha, mis tõmbeteimi vahele läheb, peab olema 120 mm pikk, seega sai katsetoorikuks valitud detaili pikkuseks 60 mm. Laiuse valik tehti järgneva arutelu põhjal.

Algselt oli autoril plaan teha ühest katsetoorikust järgnevad katsed:

- 2 x ristitõmme
- 2 x ristitõmme pärast korrosiooni
- 4 x ristipaine
- 2 x makrolihv
- 6 x korrosioonikatse

Lisaks neile on vastavalt standardile EVS-EN 10002-1 ette nähtud, et algusest ja lõpust lõigatakse 25 mm pikk osa ära, tingituna sellest, et keevise algustes ja lõppudes võib olla enim defekte. Seega sai autor arvutades sellise tulemuse:

$$4 \times 15 + 4 \times 20 + 2 \times 15 + 6 \times 20 + 2 \times 25 = 340 \text{ mm}$$

Ümardades üles otsustas autor kasutada katseplaatidena detaile mõõtudega 60x350x2. Kokku lõi autor töö jaoks igast sulamist minimaalselt 6 plaati. Algne katseplaat on välja toodud joonis 4.1 peal.



Joonis 4.1 Katseplaat [Autori foto]

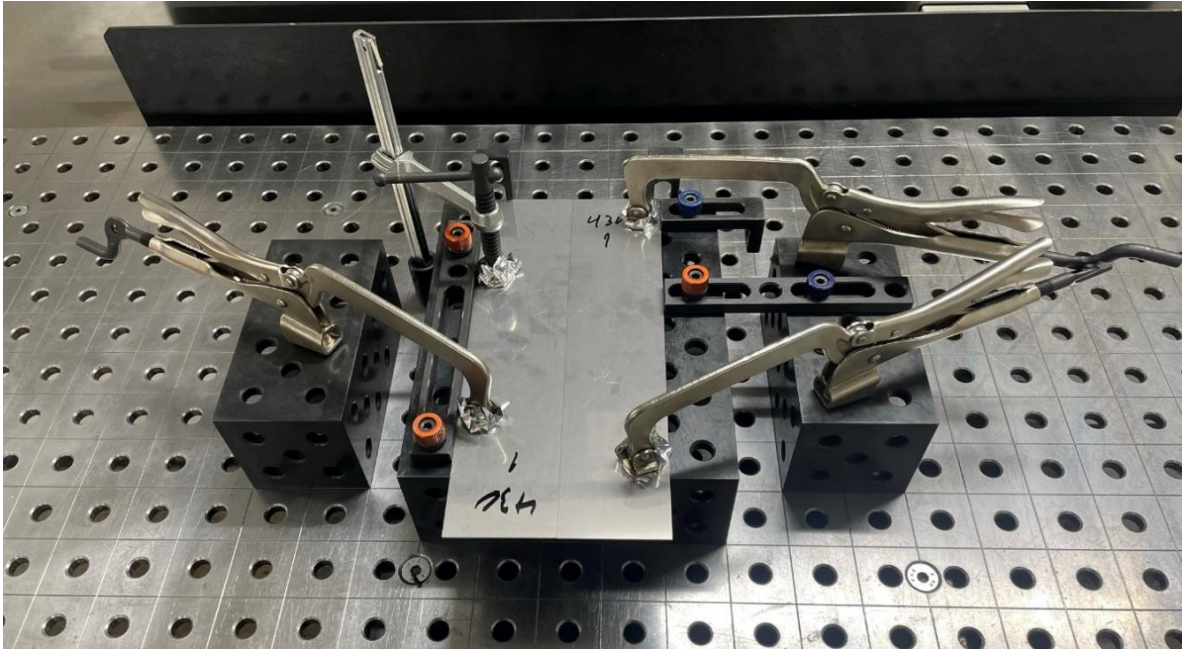
Plaadid lõigati kasutades TruFiber 5030.

4.1.1 Keevitusrakis

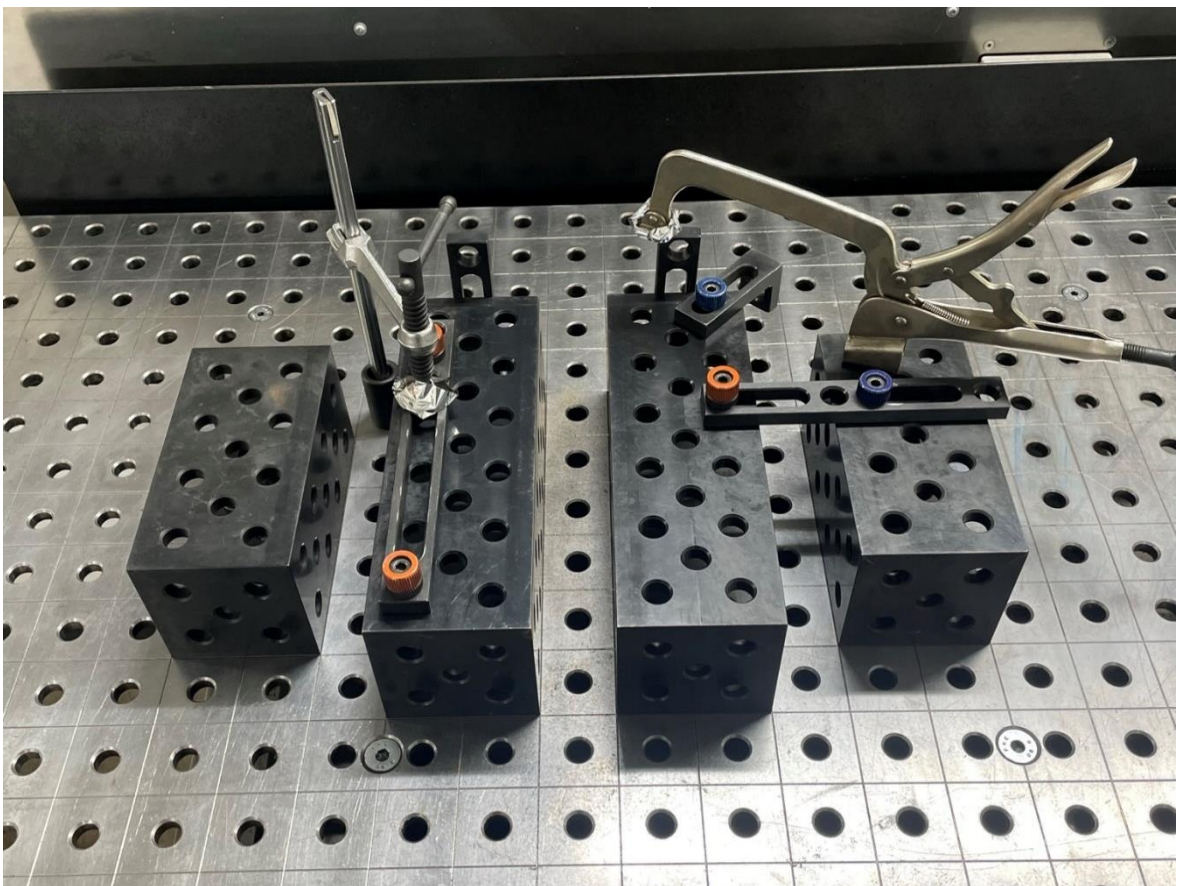
Järgnes keevitusrakise loomine. Autor pani paika kaks klotsi, millele plaadid toetasid ning seejärel hakkas lisama kinnitusi. Lähtudes rakise mugavast kasutusest, kuid aja kokkuhoidmiseks vältides üledimensioneerimist, asetaski klotsid vastavalt roboti mugavale liikumisalale. Roboti liikumiseks arvas autor, et läheb vaid 6 salvestatud punkti, 3 punkti kuni keevise alguseni, keevise lõpp-punkt ning eemaldumiseks veel 2. Nii keevise ees kui taga pidi olema vaba, et ei saaks olla kokkupõrkeid.

Kui rakis oli päriselt valmis, tegi autor kasutades TruTops Boost tarkvara 3D mudeli. TruTops Boost põhineb Spaceclaim modelleerimise tarkvaral. Sellega loodi lihtne STEP mudel, mis järgnevalt viidi keevitusroboti tarkvarasse üle.

Arvuti mudel tehti selleks, et ei hoitaks keevitusrobotit hõivatuna. Keevitusrobotil on 3 lauda, kus saab keevitada – DKP laud, millel on 2 pöördtelge ning pöördlaud, millel on kaks poolt. Seega sai autor rakist koostada samaaegselt, kui pingis käis keevitus. Sedasi minimeeris autor masina *downtime*-i ehk seisuaega.

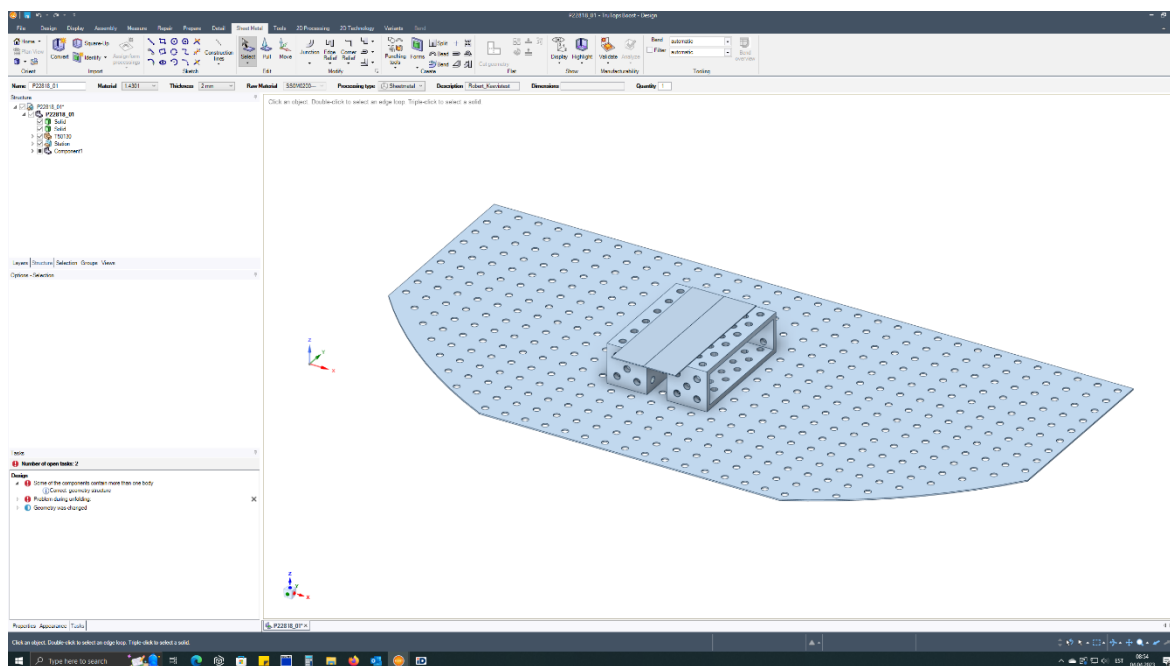


Joonis 4.2 Keevitusrakis [Autori foto]



Joonis 4.3 Keevitusrakis ilma detailita [Autori foto]

Rakise järgi tegi autor, kasutades TruTops Boost (programm on loodud Spaceclaim-i alusel), mudeli STEP faili ning selle põhjal loodi arvutis keevitusprogramm. Rakise koostamiseks loodud mudeli joonis on lisade all.

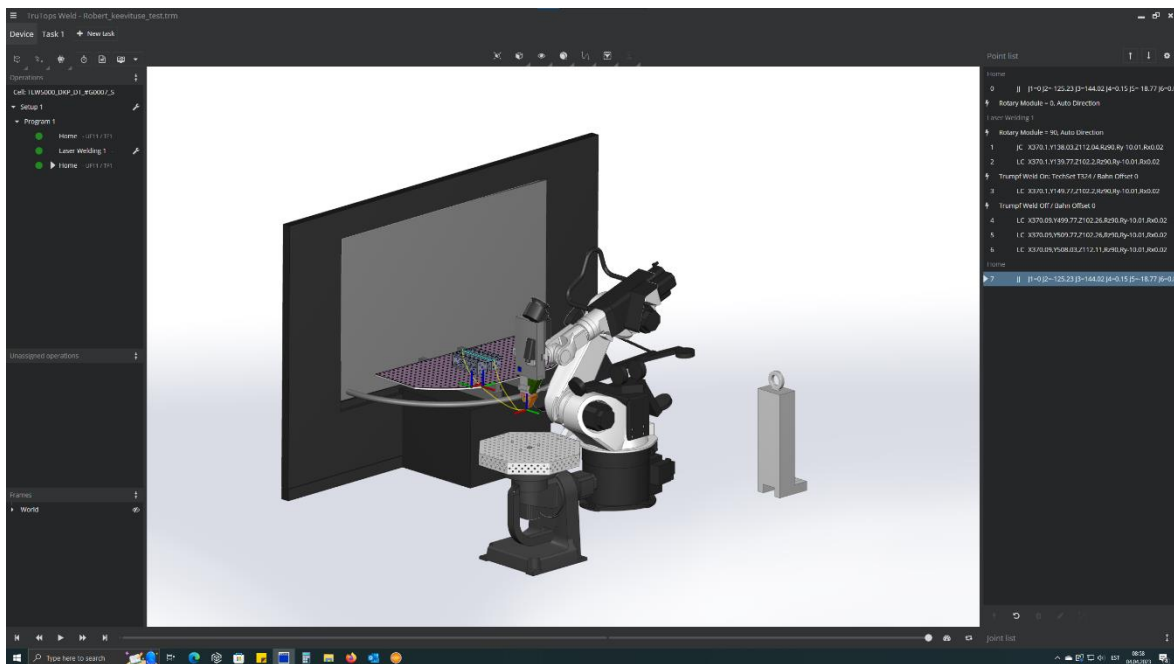


Joonis 4.4 TruTops Boosti mudel [Autori kuvatõmmis]

4.1.2 Keevitusprogramm arvutis

Kui mudel oli valmis järgnes roboti koodi kirjutamine, kasutades roboti tootja poolt loodud tarkvara. STEP mudel oli vaja tuua õigetele koordinaatidele roboti mudelis, kui see oli paigas, oli vaja lisada keevis. Keevisel märkis autor suuna, pöördmoduli (*rotary module*) asukoha ning keevitusnurga. Keevitusnurgaks peab olema minimaalselt 8 kraadi, nii ei pörka laser tagasi keevitusrobotisse. Vastasel juhul kahjustuks roboti pea ning kaoks töövõime.

Programm simuleeris läbi kõik roboti liikumised. Nii sai autor olla kindel, et roboti kaablid ei ole keevitades ebasobivas asendis. Olles veendunud programmi õigsuses, laadis autor sobiva koodi roboti serverisse üles.



Joonis 4.5 Keevitusprogramm [Autori kuvatõmmis]

4.1.3 Keevitusprogramm robotis

Töö autori poolt kasutataval robotil on 3 opereerimise režiimi:

T1 – selles režiimis saab roboti operaator muuta roboti punkte. Maksimaalseks kiiruseks on 250 mm/s. Siin kontrollitakse kõik punktid üle samm sammu haaval ning kui need on paigas, jooksutatakse programm aeglaselt läbi. Robot ilma surnumehe lülitita ei liigu. T2 – see režiim on ette nähtud programmide testimiseks, kiirused on samad, mis on roboti koodis märgitud. Kasutades seda opereerimise režiimi saab operaator olla kindel, et reaalseste kiirustega ei toimu kokkupõrkeid. Siin saab aktiveerida ka laserit, kuid roboti liikumiseks on surnumehe lüliti veel vajalik.

EXT – (*External Automatic*), see režiim tuleb kasutusele kui programm on töökindel. Asetades õiges mõõdus detailid õigesti rakisesse, peaks keevis iga kord välja tulema. KUKA roboti pulti selles režiimis ei pea käsitlema. Sellist režiimi kasutatakse vaid siis, kui T2 kasutades on programm korduvalt välja tulnud.

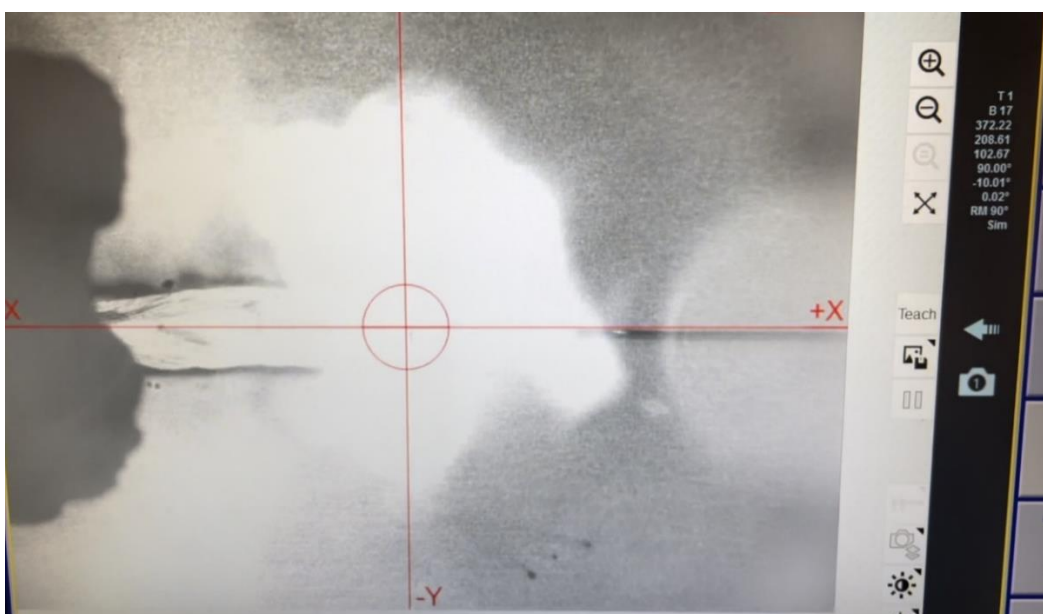
Esmalt, kui autor oli üle kandud programmi serverist robotisse, kasutas ta T1 režiimi. Sellele järgnes T2 režiimi läbijooks ning lõpuks valiti sobivad parameetrid ja keevitati EXT režiimis.

Parameetrite valikus lähtus autor keevitusrobotis olemas olnud valikust. 2 mm paksuse 1.4301 materjalile põkk-keevisele oli ette nähtud kindel keevitusparameeter. Autor otsustas selle võtta esimeseks parameetriks, teine oli 20% suurem võimsus ning kolmandaks oli 20% väiksem võimsus. Keevituse fookuspunkt ning keevituskiirus jäid kõigi üheksa keevituse jaoks samaks. Keevitusparameetrid on välja toodud tabelis 4.1.

Tabel 4.1 Keevitusparameetrid

	Võimsus (W)	Fookus (mm)	Keevituskiirus (m/s)
1	1500	-3	0,033
2	1800	-3	0,033
3	1200	-3	0,033

Seejärel tehti 9 keevitust, katsetooriku keevituse pilti on näha joonisel 4.6 ning lõpptulemus on näha joonisel 4.7.



Joonis 4.6 Kuvatõmmis kaamera pildist keevituse ajal [Autori foto]



Joonis 4.7 Kokku keevitatud katseplaat [Autori foto]

Katsekehad tähistati numbritega 1 kuni 9 – täpsustus on välja toodud tabelis 4.2.

Tabel 4.2 Katsekehade tähistamine

Number	Materjal	Võimsus
1	AISI 430	1500 W
2	AISI 430	1800 W
3	AISI 430	1200 W
4	AISI 316L	1500 W
5	AISI 316L	1800 W
6	AISI 316L	1200 W
7	AISI 304L	1800 W
8	AISI 304L	1500 W
9	AISI 304L	1200 W

Numbrid 7 ja 8 läksid tähistades vahetusse, analüüsi osas täpsustab autor täpselt millega tegu on.

4.1.4 Keevituseenergia kasutatud võimsustega

Kasutades peatükis 2.1.6 välja toodud valemit 2.4 saame arvutada kolme parameetri keevitusenergiad.

$$E_1 = \frac{1500 \text{ W}}{1000 \times 33 \frac{\text{mm}}{\text{s}}} = \frac{1 \text{ kJ}}{22 \text{ mm}} = 0,0(45) \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \quad (4.1)$$

$$E_2 = \frac{1800 \text{ W}}{1000 \times 33 \frac{\text{mm}}{\text{s}}} = \frac{3 \text{ kJ}}{55 \text{ mm}} = 0,0(54) \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \quad (4.2)$$

$$E_3 = \frac{1200 \text{ W}}{1000 \times 33 \frac{\text{mm}}{\text{s}}} = \frac{2 \text{ kJ}}{55 \text{ mm}} = 0,0(36) \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \quad (4.3)$$

Võrreldes TIG/MIG/MAG keevituses kasutatava soovitusliku soojusenergiaga on see üle 10 korra väiksem. Antud kalkulatsioonide põhjal on näha miks LBW põhjustab väiksemaid termopingeid ja -paineid.

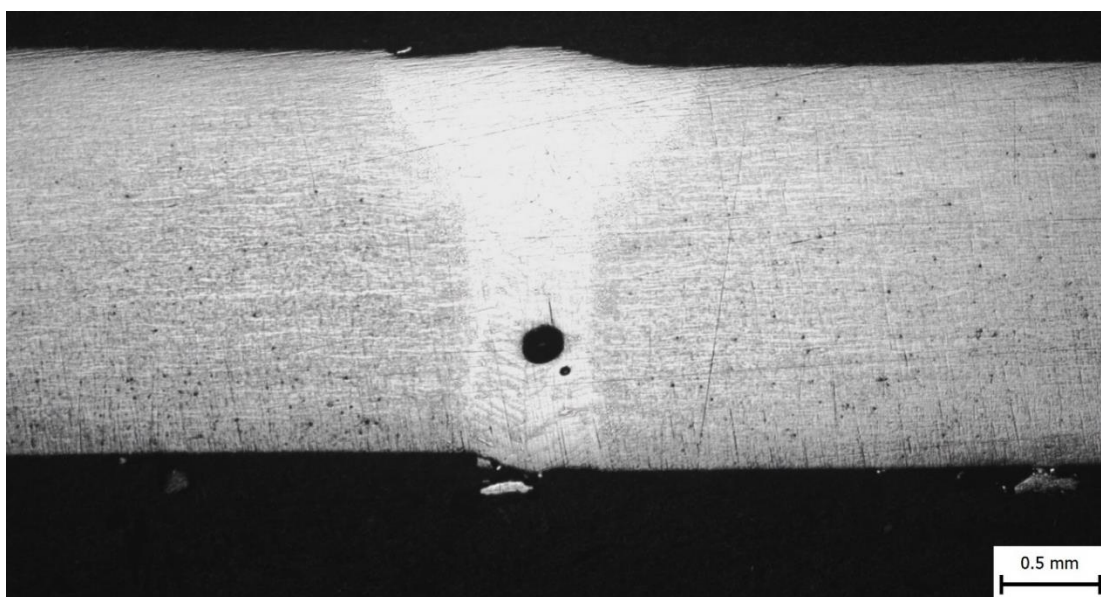
4.2 Keevislihvid ning nende analüüs

Selleks, et uurida keevise kvaliteeti ning selle sügavust, tehakse keevislihve. Kuna autor kasutas 2 mm paksust lehte on vaja lisada materjalile tuge, et see püsti püsiks. Tehti kolm klotsi, iga klots oli erineva materjali jaoks ning seejärel lihviti ning poleeriti katsekehad sobivaks. Lisati hapet, et keevis oleks nähtav ning lõpptulemused on näha joonistel 4.9 – 4.17. Hiljem uuriti lihve mikroskoobi all. Lihvid on kujutatud joonisel 4.8.



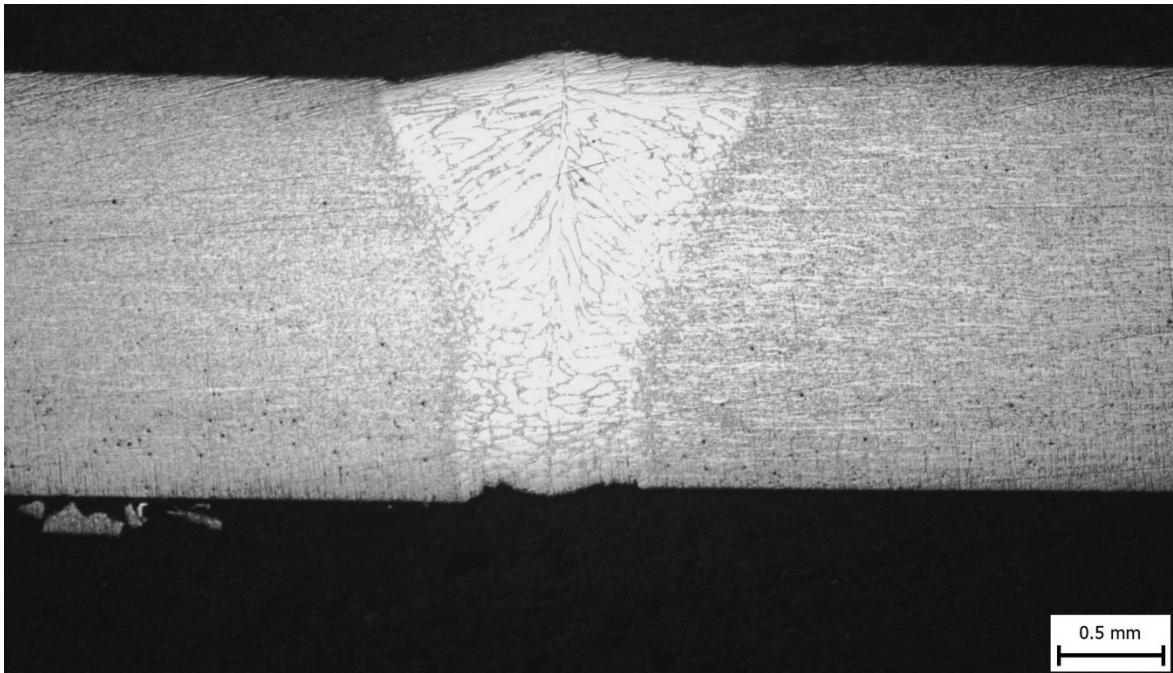
Joonis 4.8 Keevislihvid [Autori foto]

AISI 430 1500W – selle parameetriga keevitatud keevisõmbeluse makrostruktuur on kujutatud joonisel 4.9. Seal on näha üks 0,2 mm diameetriga poor ning üks alla 0,1 mm diameetriga. Kuid vaatamata sellele on täielik läbikeevitus. On tekkinud suhteliselt suureteraline struktuur. Nii üleval kui all on suhteliselt ühtlane üleminek, ei ole teravaid nurki. Keevitusparameeter on sobiv selle materjali keevitamiseks.



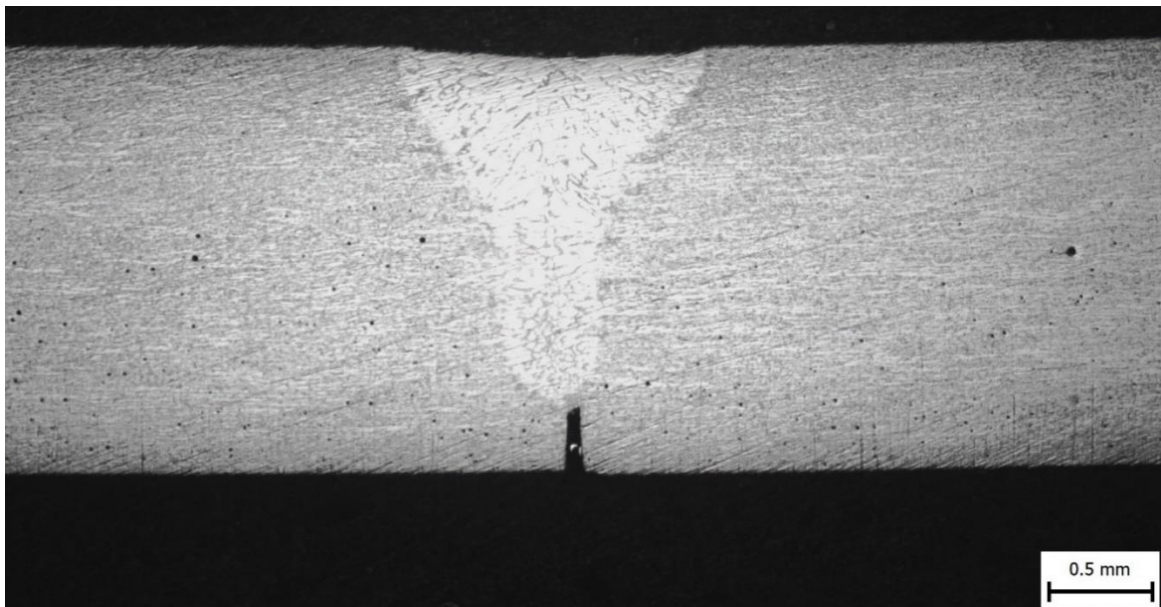
Joonis 4.9 Keevisõmbeluse makrostruktuur, katsekeha 1 [Autori foto]

AISI 430 1800W – selle parameetri keevisõmbeluse makrostruktuur on kujutatud joonisel 4.10. Tekkinud on suured terad ning sulanud on palju suurem osa kui katsekeha nr 1 peal. Allpool on näha et sulamine ei ole ühtlane ja on tekkinud teravad üleminekud. Keevitusparameeter on selle materjali keevitamiseks liiga suure võimsusega.



Joonis 4.10 Keevisõmbeluse makrostruktuur, katsekeha 2 [Autori foto]

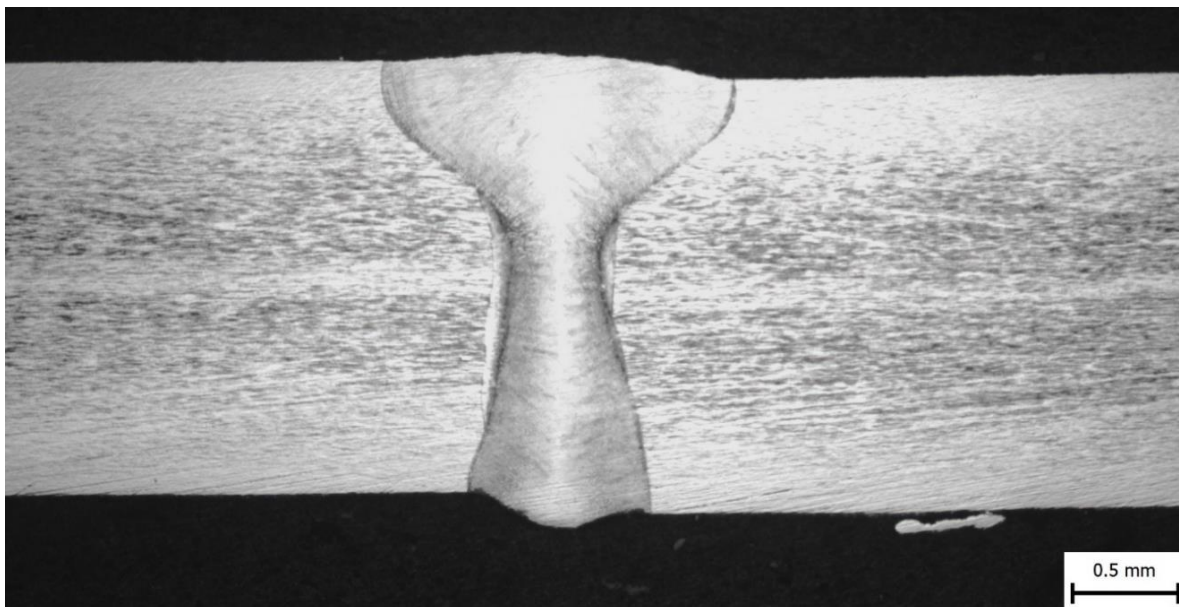
AISI 430 1200W – selle parameetri keeviseõmbeluse makrostruktuur on kujutatud joonisel 4.11. Terad on väiksemad, kui teistel AISI 430 keevistel, kuid ei ole täielikku läbikeevitust, ligi 1/5 on jäänud sulamata. Ülemine osa on väga ühtlaselt sulanud. Keevitusparameetri võimsus on antud materjali keevitamiseks liiga madal.



Joonis 4.11 Keevisõmbeluse makrostruktuur, katsekeha 3 [Autori foto]

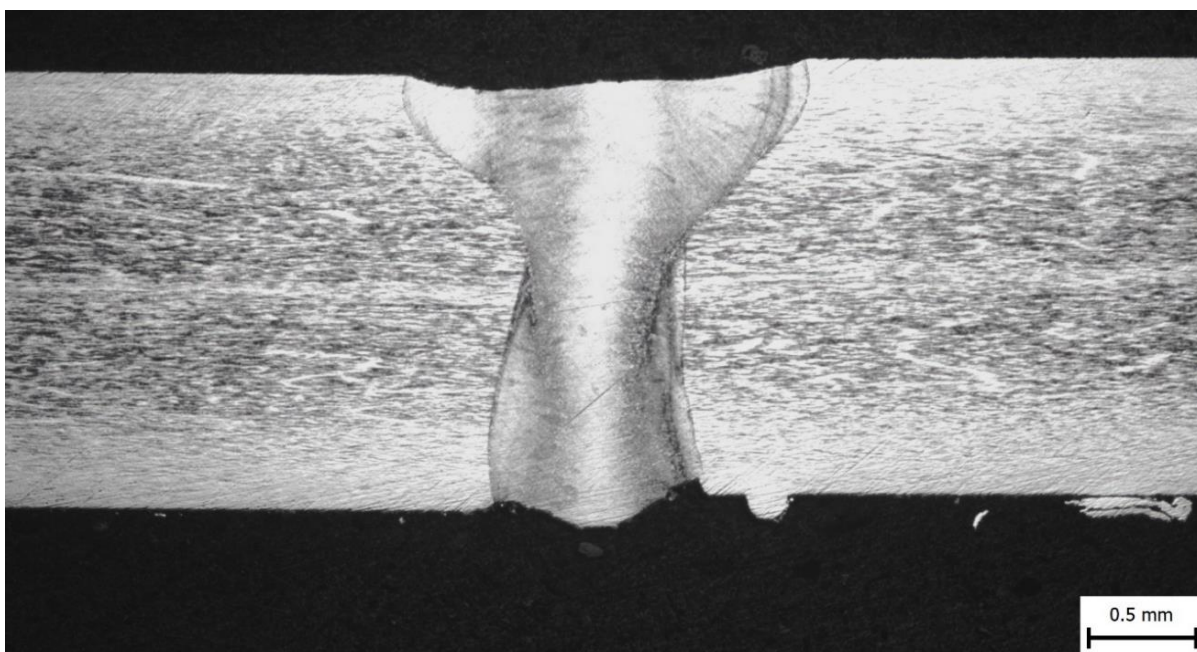
AISI 316L 1500W – selle parameetri keeviseõmbeluse makrostruktuur on kujutatud joonisel 4.12. Keevise struktuur on peeneteraline. Keevis on võrreldes AISI 430-ga palju

peenem. Sulamine on pealpool ühtlane, all on moodustunud väike tilga kujuline moodustis, kuid üleminek on samuti ühtlane. Keevise ristlõige ei ole enam kolmnurkse ega trapetsi kujuga, vaid moodustunud on liivakella kuju. Keevitusparameeter on sobiv selle materjali keevitamiseks.



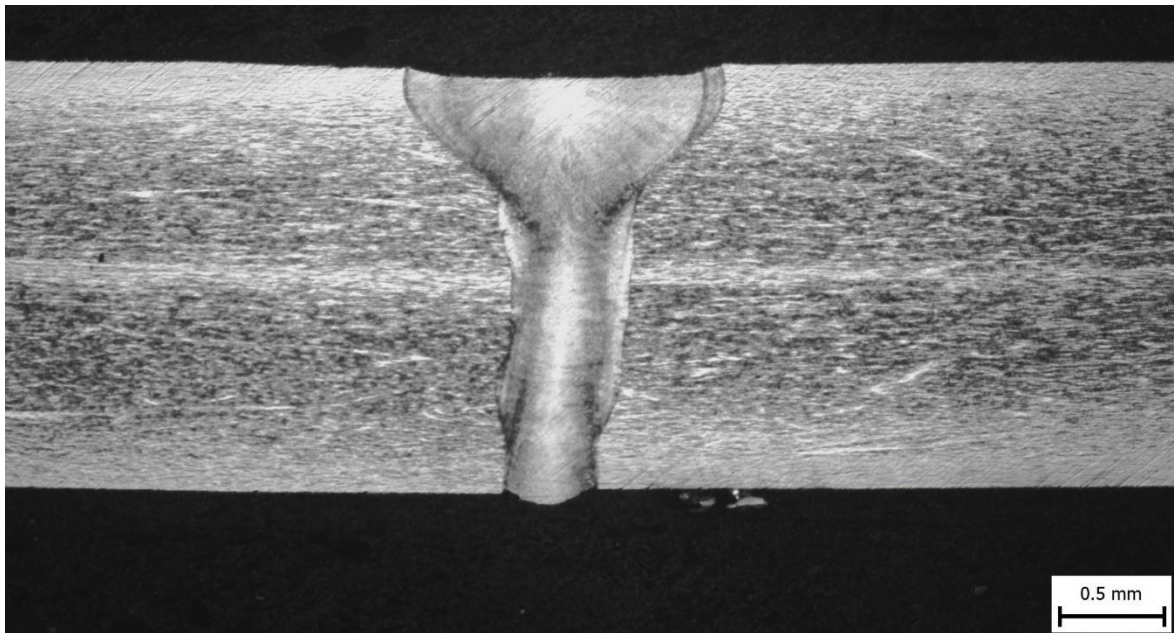
Joonis 4.12 Keevisõmbluse makrostruktuur, katsekeha 4 [Autori foto]

AISI 316L 1800W – antud keevise makrolihv on kujutatud joonisel 4.13. Sulanud osa on jäme ning terad väikesed. Sulamine on tekitanud kraatri üles ning teravad üleminekud alla. Tekkinud on suur tilk ning kraatrid. Kasutatud parameeter on liiga suure võimsusega.



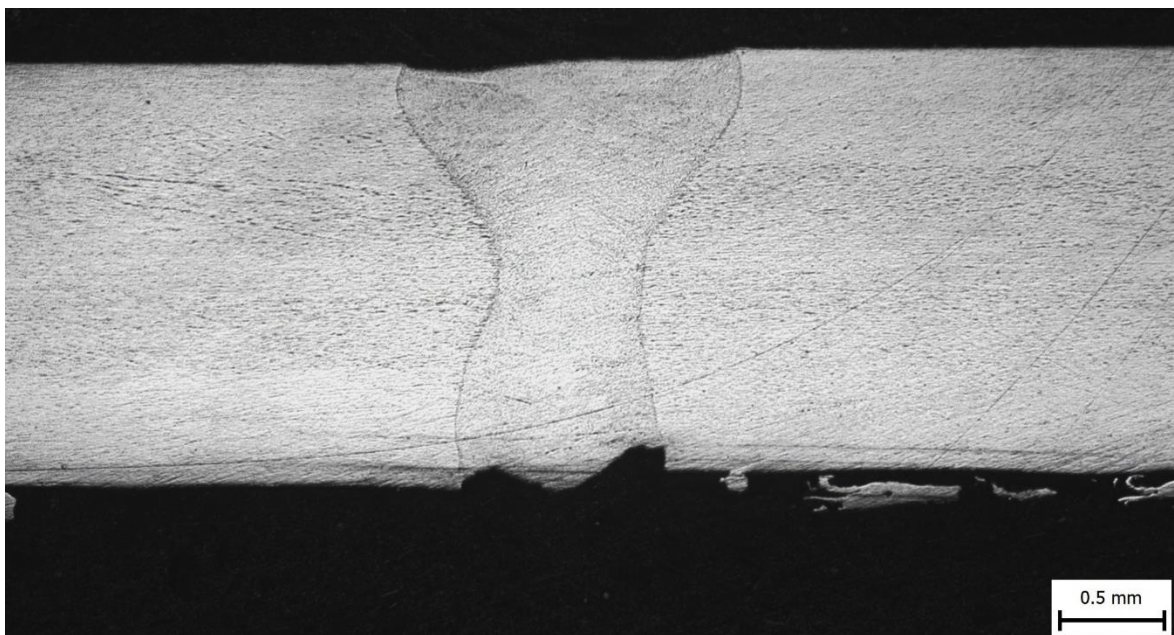
Joonis 4.13 Keevisõmbluse makrostruktuur, katsekeha 5 [Autori foto]

AISI 316L 1200W – antud keevise makrolihv on kujutatud joonisel 4.14. Tekkinud on peeneteraline struktuur. Pealmine pool on ühtlase üleminekuga, all on tekkinud väikesed nurgad. Keevitusparameeter on sobiv.



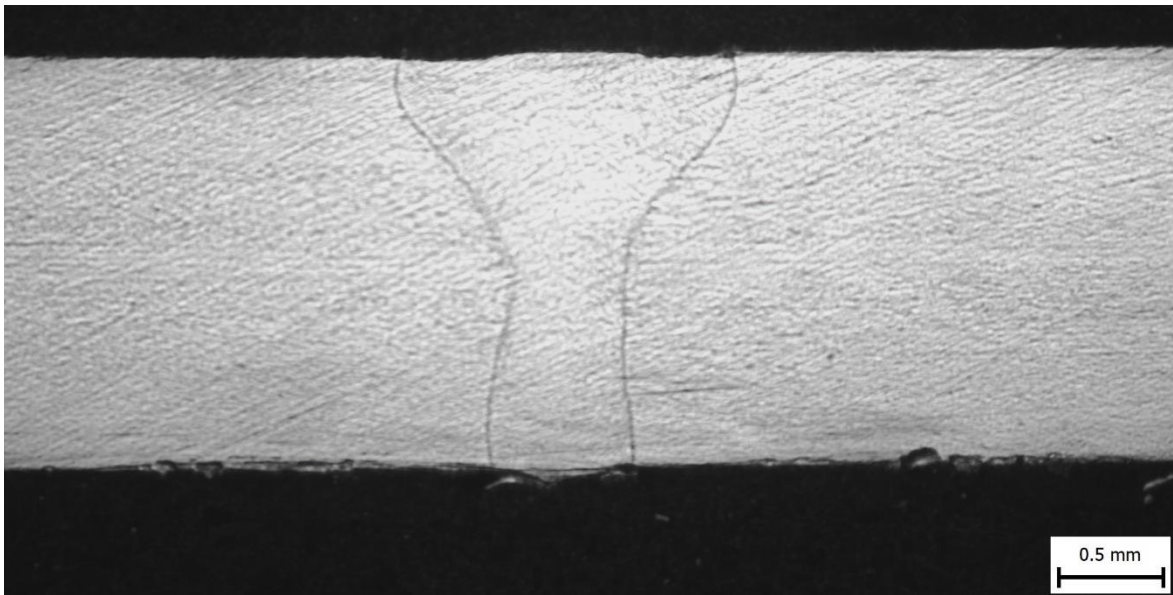
Joonis 4.14 Keevisõmbluse makrostruktuur, katsekeha 6 [Autori foto]

AISI 304L 1800W - antud keevise makrolihv on kujutatud joonisel 4.15. Alumisel osal on tekkinud suured kraatrid, näha on ligi 90° üleminekut. Tekkinud on peeneteraline struktuur. Kasutatud võimsus on liiga suur.



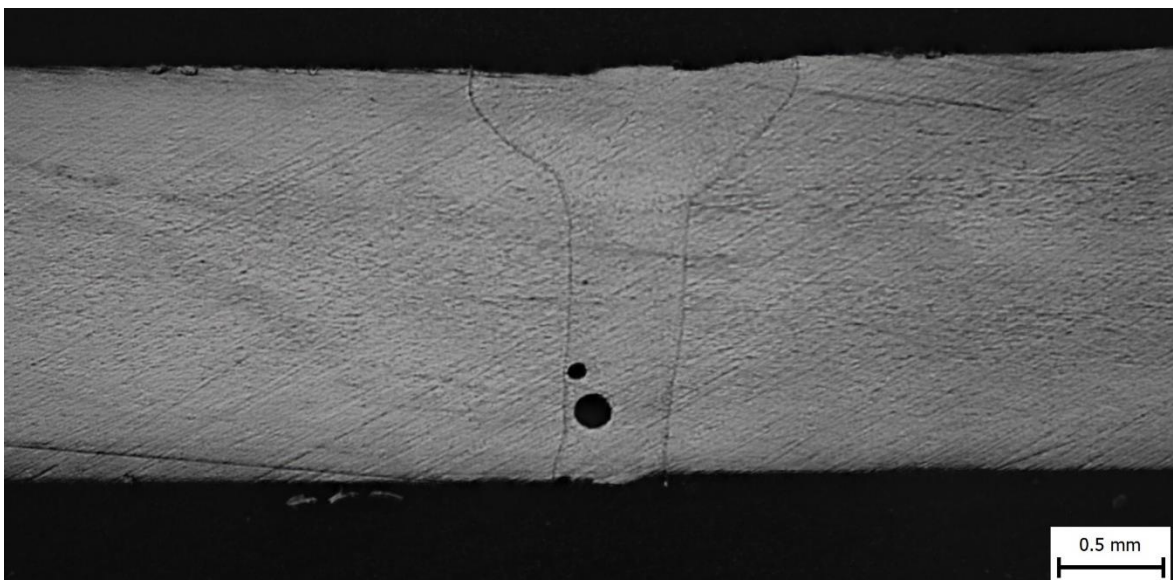
Joonis 4.15 Keevisõmbluse makrostruktuur, katsekeha 7 [Autori foto]

AISI 304L 1500W - antud võimsusega keevise makrolihv on kujutatud joonisel 4.16. Üleminek on nii all kui üleval väga sujuv. Keevis on ühtlane ning struktuur peeneteraline. Kasutatud parameeter on sobiv.



Joonis 4.16 Keevisõmbuluse makrostruktuur, katsekeha 8 [Autori foto]

AISI 304L 1200W - selle parameetriga keevise makrolihv on kujutatud joonisel 4.17. On tekkinud poorid, mille asukoht on sarnane mis AISI 430-l 1500 W juures. Üleminek on all ning üleval ühtlane. Parameeter on sobiv.



Joonis 4.17 Keevisõmbuluse makrostruktuur katsekeha 9 [Autori foto]

4.2.1 Keevislihvi järelendus

Parimaks võimsuseks AISI 430 puhul on makrolihvidel põhinedes 1500 W, poori tekkimine on tõenäoliselt olnud juhuslik. AISI 316L ning 304L sobivad nii 1200 W kui ka 1500 W, milline parameeter teisest parem on, selgub järgnevate katsetega.

4.3 Korrosioonikatsed

Kokku viidi läbi 3 erinevat katset korrosiooni testimiseks:

- Katse 1 – 72 h 3,5% soolahuses.
- Katse 2 – 72 h soolpihustuskambris.
- Katse 3 – 30 päeva 3,5% soolalahuses.

Esimeseks oli katsekehade 72 h 3,5% soolalahuse uputusmeetodil. Kõik detailid olid eraldatud vaheseinaga, seega üksteist nad mõjutada ei saanud. Katse on näidatud joonisel 4.18.



Joonis 4.18 Katse 1 [Autori foto]

Teiseks oli katsekehade 72 h soolpihustus korrosiooni test, kus auruks oli 5% soolalahus. Kamber on välja toodud joonisel 4.19 peal.



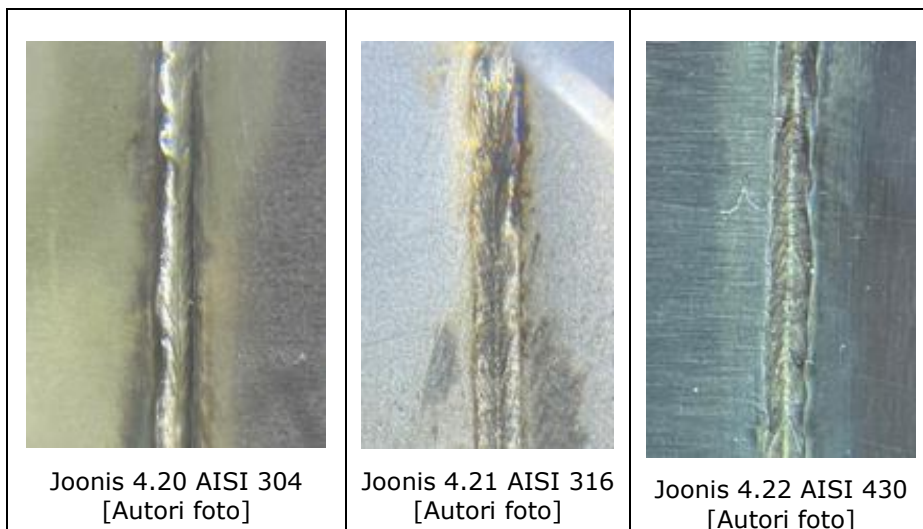
Joonis 4.19 Katse 2 [Autori foto]

Kolmas katse seisnes katsekehade 30 päeva 3,5% soolalahuses viibimises. Iga katsekeha oli eraldi anumus.

Soola protsent valiti lähtudes levinud keskkonnast, kõige rohkem puutuvad roostevabad terased kokku just soolaveega. Nimelt keskmine soolasisaldus ookeanides ongi 3,5% ehk 35g NaCl-i 1L kohta. 5% valiti, et saaks katsetada tulemust veel karmimates tingimustes. Suurendatult on keevised välja toodud joonistel 4.20 – 4.22. Kõikide keeviste suurenduste välja toomist ei pidanud autor vajalikuks, sest need olid väga sarnased. [28]

Tabelis 4.3 on välja toodud keeviste suurendatud lähivaated, joonistelt on näha, et kõik on sarnase välimusega. Keevituspiirkond on väike ning värvus ei ole muutunud, juurde on tulnud läige. Ka TMT ei ole silmnähtav. Tavakeevitus meetoditega võrreldes ei ole tekkinud roostevaba keevitusele kohast sinet, mis üldiselt näitab korrosioonikindluse nõrgenemist.

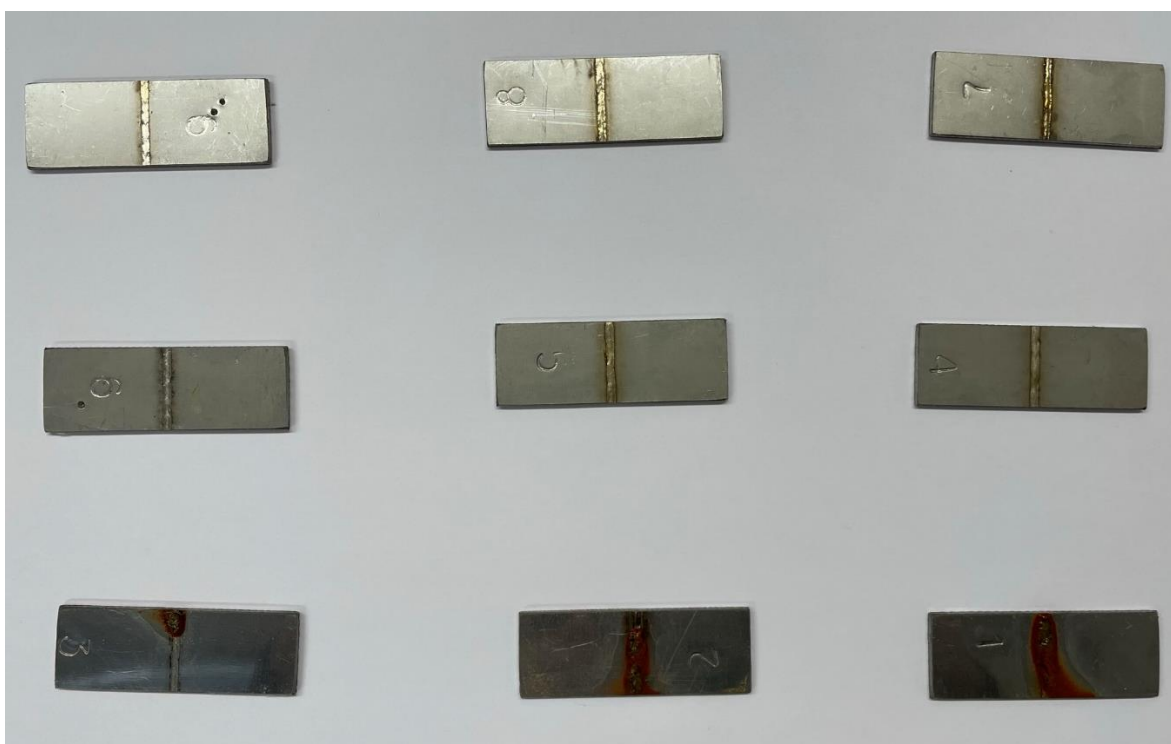
Tabel 4.3 Keeviste lähivaated



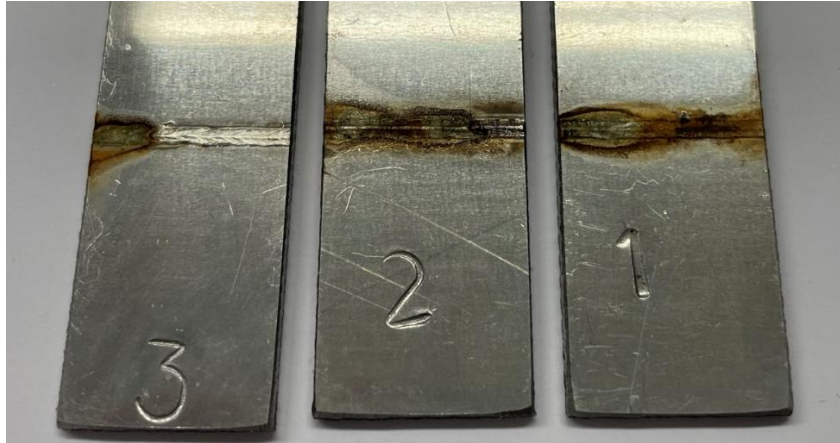
4.3.1 Korrosioonikatsete tulemused

72h 3,5% NaCl lahuses

Selle katse tulemused on kujutatud joonistel 4.23 ning 4.24.



Joonis 4.23 Katsekehad pärast 72h 3,5% soolalahuses [Autori foto]

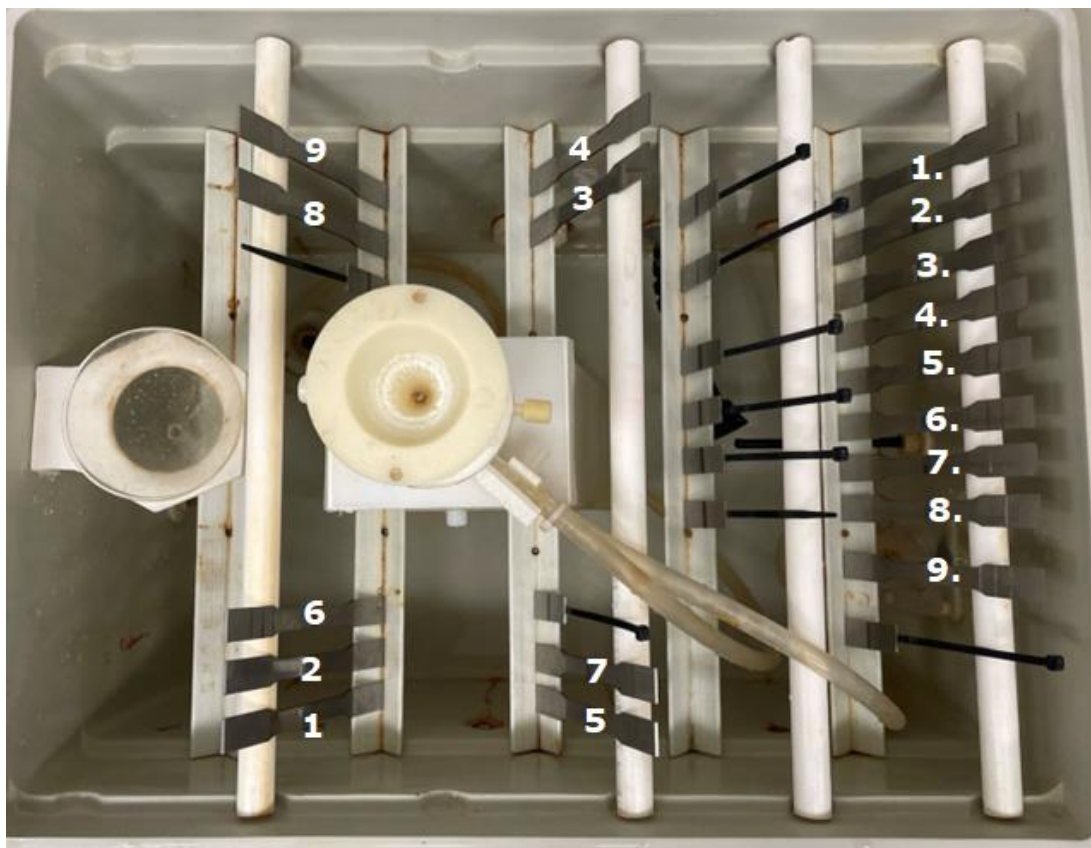


Joonis 4.24 AISI 430 pärast katset [Autori foto]

Nagu joonistel on näha, siis AISI 304L ning AISI 316L peal ei ole korrodeerumist näha, küll aga on seda AISI 430 peal. Katsekeha nr 3 ei ole täielikult korrodeerunud, selle võis põhjustada väiksem laseri võimsus, mis omakorda põhjustas väiksema soojussisestuse tõttu kroomoksiidi püsimumist suuremal määral.

72h aurukambris 5% NaCl-i kasutades

Kuna aurukambris pihustus ei pruugi olla ühtlane, kasutas autor iga keevise kohta kahte katsekeha ning asetas nad erinevatesse kohtadesse. Asetus on näha joonisel 4.25.



Joonis 4.25 Detailide asetus aurukambris [Autori foto]

Punktiga märgitud numbrid tähistavad joonisel 4.27 punktiga märgitud detaile. Ilma punktita katsekehad on kujutatud joonisel 4.26.



Joonis 4.26 Katsekehad 1-9 [Autori foto]



Joonis 4.27 Katsekehad 1.-9. [Autori foto]

Seda, et AISI 430 korrodeerub sai autor eeldada ka eelmise katse põhjal, kuid nüüd on ka AISI 304, mis keevitati võimusega 1800 W, veidi korrodeerunud. Tulemust on näha joonisel 4.27 ning suurendatud variant joonisel 4.28. Kuna katsekehad lõigati kasutades traaterosiooni mõjutas see löikepinda ning servad olid ühtlaselt korrodeerunud.

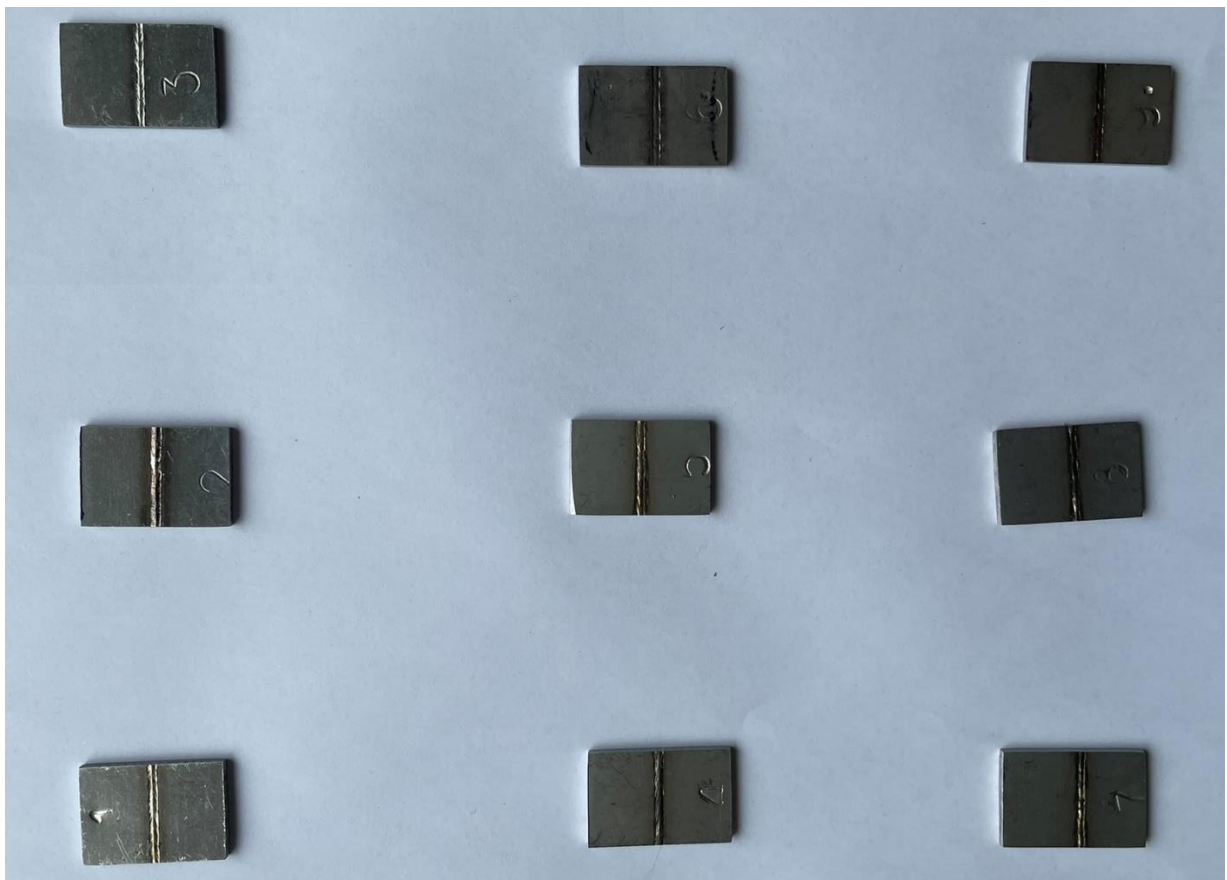


Joonis 4.28 suurendatud AISI 304L 1800W [Autori foto]

Kasutades madalamat võimsust ei tekkinud AISI 300 seeria sulamite katsekehadel korrosiooni. Seega, kui tähtis ei ole läbikeevitus, sobiks ka see parameeter.

30 päeva 3,5% NaCl lahuses

Joonisel 4.29 on välja toodud millised olid katsekehad enne lahuses uputamist ning 4.30 – 4.32 on pärast katsetamist.



Joonis 4.29 Enne 30 päeva soolalahust [Autori foto]



Joonis 4.30 AISI 430 katse lõpus [Autori foto]



Joonis 4.31 AISI 316L katse lõpus [Autori foto]



Joonis 4.32 AISI 304L katse lõpus [Autori foto]

Tulemus on väga sarnane 72 h soolalahuse katsega. AISI 304L ning AISI 316L jäid samasuguseks, kuid AISI 430 on nüüd ühtlaselt korrosioonikihi kaetud, katsekehal nr 3 on korrosioon väiksem kui nr 1 ja 2 katsekehal. See võib olla tingitud madalast soojussisestusest.

4.3.2 Korrosioonikatse ülevaade

Kõikide korrosioonikatsete tulemusena korrodeerus alati AISI 430. AISI 304L tulemusi oli visuaalselt keeruline hinnata, keevituse ääred muutusid enamuse katsekehadel veidi tumedamaks, kuid korrosiooni seal otseselt näha ei olnud ning keevise väikese suuruse tõttu ei saa teha sellele keemilist analüüsi. Küll aga oli 12-st ühel tekkinud õrn korrosiooni kiht. Seda, kas see oli seotud ainult võimsusega, lõikejäljest tekkinud korrosiooni või mingi muu teguriga, on praeguste katsetega keeruline järeldada. Kuid tundub loogiline et suurim võimsus kahjustas korrosioonikindlust suuremal määral. AISI 316 oli ainus, kus korrosiooni ei olnud ühelgi katsekehal terve keevise ulatuses, kuid aurukambris oli 1 detail, millel oli ääre värvus pruunim kui enne. Seega saab järeldada, et korrosioonikindlus väheneb mingil määral, kuid siiski on see parem kui traditsiooniliste keevitusmeetoditega. Kui tegemist on vähem vaenuliku keskkonnaga, ei ole passiverimist praeguste katsete põhjal vaja. Kuid selleks, et kindel olla, peab siiski teiste keeviste ning parameetrite puhul tegema täiendavaid katseid. Täpsemalt aurukatseid, sest seal oli AISI 304L ning AISI 316L selgemini mõjutatud. Katsetatavaks parameetriks soovitab autor 1500 W fookusega -3 mm ning kiiruseks 0,033m/s.

4.4 Tõmbekatse

Tõmbekatsed viidi läbi TalTechi mehaanika ja metroloogia katselaboris 03.04.2023 vastavalt standardile EVS-EN ISO 4136:2012. kasutades kondikujulist katsekeha. Iga parameetri ja materjaliga tehti kaks katset, seega kokku tehti 18 tõmbekatset. Tulemused on välja toodud tabelis 4.4 [29]

4.4.1 Tõmbekatse tulemused

Tabel 4.4 Tõmbekatse tulemused

Katsekeha nr	Katsekeha täpsustus	F _m (kN)	R _m (MPa)	Purunemise koht
1	1-1	11,9	596,8	Põhimaterjal
2	1-2	11,9	595,8	Põhimaterjal
3	2-1	11,6	579,4	Keevis
4	2-2	11,8	589,6	Põhimaterjal
5	3-1	11,9	595,3	Keevis
6	3-2	11,8	540,0	Keevis
7	4-1	15,1	755,9	TMT
8	4-2	15,1	756,3	Põhimaterjal
9	5-1	14,4	718,4	Keevis
10	5-2	14,7	737,4	Keevis
11	6-1	14,9	747,3	Keevis
12	6-2	15,1	754,1	Keevis
13	7-1	15,4	768,1	Põhimaterjal
14	7-2	15,3	763,8	Keevis
15	8-1	14,7	734,9	Keevis
16	8-2	15,0	749,2	Keevis

Tabel 4.4 Tõmbekatse tulemused

17	9-1	15,1	755,8	Põhimaterjal
18	9-2	15,1	757,4	Põhimaterjal

Tabel 4.4 järg

Hea keevise märgiks peetakse seda, kui puruneb põhimaterjal. Katsetulemuste põhjal saab autor väita, et laserkeevitusega saab tagada piisava õmbluse tugevuse, kui kasutada õigeid parameetreid. Vaadates maksimaalseid jõude, mis tõmbasid katsekeha puruks, on näha, et on ka muid tegureid mis mõjutavad. 15,1 kN juures purunes katsekeha nr 9 põhimaterjali juures, kuid nr 7 (1500 W) purunes esimene kord põhimaterjal 15,3 kN juures ning keevis 15,4 kN juures. Selle põhjuseks võib olla keevisdefekt. Purunemiste näited on välja toodud joonistel 4.33 ning graafikud on lisade all.



Joonis 4.33 Tõmbekatsete erinevad tulemused [Autori foto]

4.5 Paindekatse

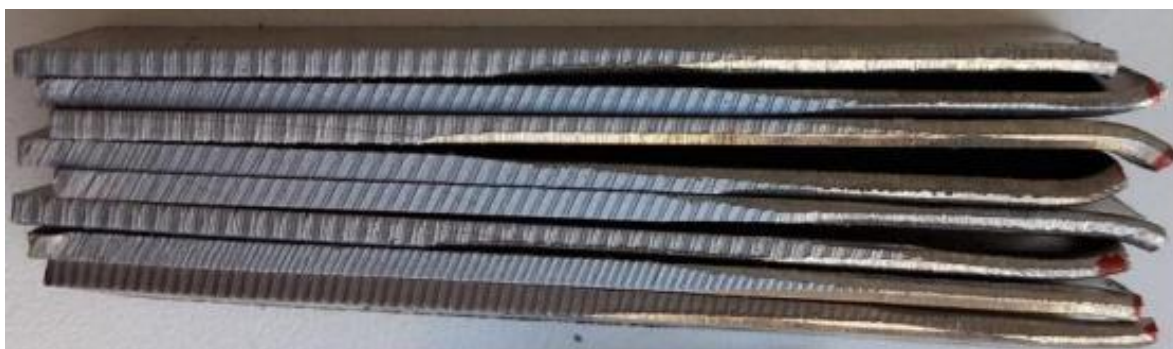
Paindekatseid tehti iga materjali ja parameetri juures 4. Kaks katset tehti nii, et keevitatud pool on üleval ning 2 katset selliselt, et keevis asus all pool. Test põhineb standardil EN ISO 5173:2010. [30]

4.5.1 Paindekatse tulemused

Purunemine toimus ainult AISI 430 puhul, kasutades võimsuseid 1800 W ning 1200 W. Ülejäänud kordadel ei tekkinud ka pragusid ning keevised olid piisavalt tugevad. Purunenud katsekehade keevised olid haprad, keevitades 1200 W juures ei olnud ka läbikleepimist, ka see aitas kaasa purunemisele. 1800 W juures võis toimuda liigne karastumine, mille tulemusena oli keevis ning TMT haprad. Katses olnud detailide kaks tulemust on välja toodud joonisel 4.34 ning 4.35. Katsete testraportid on lisade all.



Joonis 4.34 Näidis vabalt valitud katsekehadest, mis ei purunenud [Autori foto]



Joonis 4.35 Näidis vabalt valitud purunenud katsekehadest [Autori foto]

4.6 Järeldused parameetritele

Arvesse võttes kõikide katsete tulemusi, oli parimaks LBW võimsuseks 2 mm paksuse uuritavate roostevabade teraste jaoks 1500 W. Antud parameetriga läbis vähemalt 1 katsekeha iga materjali esindaja testi edukalt. AISI 304L puhul sobib ka 1200 W, tõmbekatses purunes põhimaterjal ning paindekatstes ei tekkinud pragu. Lisaks oli korrosioonikindluse säilimine võrreldes teiste võimsustega parem. Selleks, et olla täiesti

kindel korrosioonikindluses, on vaja teha põhjalikum pihustuskambri test, kasutades rohkem kaitsekehasid.

KOKKUVÕTE

Autori magistritöö eesmärgiks oli katsetada ning analüüsida, kuidas mõjutavad laserkeevituse parameetrid valitud roostevabade teraste omadusi. Katsetati kolme roostevaba sulami nelja erinevat omadust. Töö koostati koostöös Laserline OÜ-ga.

Töö esimeses pooles tutvustati laserkeevitust lähemalt, mis on selle eelised ja puudused. Toodi välja laserkeevituse erinevad keemisõmblused ning keevitusenergia arvutus, milleks oli soojussisestus, kus keevitusprotsessi termiline kasutegur on 1. Madala soojussisestuse tõttu eeldas autor korrosioonikindluse suuremat säilivust. Tutvustati katseplaatide tootmiseks kasutatavaid masinaid ning toodi välja töös kasutatava laserkeevituspingi ketaslaseri tööpõhimõte.

Sellele järgnes materjalide valik. Kuna laserkeevituse soojussisestus on ligi 10 korda väiksem kui MIG, MAG ning TIG keevituses, otsustas autor uurida ka keevituse mõju korrosioonile. Et seda saaks teha, valiti materjalideks austeniitsed roostevabad terased AISI 304L, AISI 316L ning ferriitne roostevaba teras AISI 430. Autor tõi välja, mis erinevused võrreldavates terastes on, sealhulgas nende koostis ning kasutusvaldkonnad.

Teooria osale järgnesid katsetused. Kasutades laserlõikuspinki TruLaser 5030 8kW Fiber lõigati 2 millimeetri paksused katseplaadid valitud materjalidest gabariitidega 80 x 350. Seejärel koostati keevituspingi laual keevirakis Laserline OÜ-s olemasolevatest osadest ning kasutades TruTops Boost tarkvara loodi mudelist STEP. See viidi omakorda keevitusroboti tarkvara TruTops Weld-i, kus simuleeriti läbi keevitus programm. Keevituspunktid kontrolliti robotis üle ning saadi katsetoorik, millest lõigati sobivad katsekehad. Keevituses kasutati kolme eri võimsust – 1200 W, 1500 W ning 1800 W.

Valmistatud katsekehadega tehti paindekatse, tõmbekatse, keevise makrolihv ning korrosioonikatsed.

Tõmbekatses selgus, et parim keevitusparameeter oli 1500 W, selle parameetriga talus katsekeha suurimat jõudu ning purunemine toimus põhimaterjalis. Paindekatse tulemusena purunes vaid AISI 430 katsekehad, kus keevitus ei olnud 1500 W, kõik teised katsed olid sama tulemusega, keevis ei purunenud ning pragusid ei tekkinud. Keevise makrolihve hinnati visuaalselt, parima tulemuse andis taas 1500 W, kuid lisaks sobis 1200 W AISI 304L ning AISI 316L puhul, AISI 430-l ei toimunud täieliku läbikeevitust. 1800 W oli kõikide lihvide puhul liiga suur võimsus.

Korrosioonikatseid tehti kokku kolm, esimeseks uputati kaitsekehasid 72 tundi 3,5 protsendilises soolalahuses. Teiseks kasutati soolpihustuskambrit, kus katsekehad viibisid samuti 72 tundi 5 protsendilises soolalahuseauru käes ning kolmandaks oli katsekehade uputamine 3,5 protsendilises soollahuses 30 päeva. Igas katses tekkis AISI 430 katsekehade peale korrosioon, vaatamata kasutatud võimsusest. Kuigi kõige madalama võimsuse puhul oli tekkinud kõige vähem korrosiooni. 1800 W juures tekkis soolpihustuskambri katses AISI 304L keevise peale õrn korrosioonikiht. AISI 316L juures oli keevis veidi tuhmunud, kuid korrosiooni sinna ei tekkinud. Kõige parem tulemus oli 1200 W juures AISI 304L ning AISI 316L.

Kõikide katsete puhul sai autor veenduda laserkeevituse piisavas tugevuses ning suures osas korrosioonikindluse säilimisest.

Kuna ainus korrosioonikatse, kus AISI 304L puhul muutus toimus, oli soolpihustuskatse võib tulevikus seda katset rohkemate katsekehadega korrata. Kambris toimuva ebahühtlase pihustuse tõttu saaks, kasutades rohkem detaile, selgema ülevaate kuidas ja kas korrosioon tekib. Seda katset võib teha nii AISI 304L kui ka AISI 316L sulameid kasutades.

SUMMARY

The aim of this master's thesis was to analyse how different parameters of laser welding affect the mechanical properties of stainless steel. This thesis was made in cooperation with Laserline OÜ.

The first part consists of introduction to laser welding and its pros and cons. Author brought out different types of laser welding and the calculation of heat injection. Because of low heat injection the author had a hypothesis that the welds corrosion resistance will be preserved. There was also introduction of the machines, which were used in this thesis and the working principle of disk lasers.

That was followed by choosing the material, which were welded and studied. Three materials were chosen, austenitic AISI 316L and AISI 304L and ferritic AISI 430.

The theoretical part was followed by tests and analysis. Using TruLaser 5030 Fiber, the author cut the necessary parts from 2 mm thick metal sheets. Welds were made using TruLaser Weld 5000 laser welding robot. Programs were made using the machines producer's software. Three different welding parameters were used. 1200 W, 1500 W and 1800 W.

The following tests were performed – macro etch test, tensile test, bend test and corrosion test.

The result of the tensile test was that the best parameter for chosen material was 1500 W, it could take the necessary stress – the break happened on the material. Bend test was passed by all except AISI 430 1200 W and 1800 W, which broke. The others did not have cracks. From macros the author saw that the best parameter was 1500 W once again, but for AISI 304L and AISI 316L 1200 W was also acceptable. Three corrosion tests were performed, firstly the test objects were submerged in 3,5% saltwater solution for 72 h, second test was in a salt spray chamber while spraying 5% solution for 72 h. Last test was for 30 days in 3,5% saltwater solution. The results were as follows, AISI 430 corroded every time, but when using less power, the corrosion was less apparent. AISI 316L did not have any corrosion and AISI 304L had some corrosion on one part from spray chamber.

All the tests confirmed that laser welding for these materials provides sufficient results. However, to continue the tests the author recommends that using 1200 W and 1500 W welding, the salt spray chamber test is repeated with more objects for more conclusive results.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „Inseneriteaduskonna kirjalike tööde mall“.
- [2] „Inseneriteaduskonna lõputööde nõuded_2021_03“.
- [3] A. Laansoo ja T. Eikholm, *Keevitustehnoloogia*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2011.
- [4] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, ja K. S. V. Sekar, *Manufacturing engineering and technology*, 7th ed. in SI units. Always learning. Singapore [etc.]: Pearson, 2014.
- [5] J. Kübarsepp, L. Valdma, P. Kulu, A. Laansoo, J. Pirso, ja Tallinna Tehnikaülikool, Toim, *Metalliõpetus ja metallide tehnoloogia. II, 2: Metallide tehnoloogia*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2001.
- [6] „D1025en.pdf“.
- [7] S. Katayama, Toim, *Handbook of laser welding technologies*. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials, no. no. 41. Philadelphia, PA: Woodhead Pub, 2013.
- [8] „EVS-EN 1011-1:2009“, *EVS*. Keevitamine. Soovitused metalsete materjalide keevitamiseks. Osa 1: Üldjuhised kaarkeevituseks
- [9] P. Kulu, J. Kübarsepp, A. Laansoo, R. Veinthal, ja T. Eikholm, Toim, *Materjalitehnika: õpik kõrgkoolidele. II: Konstruksioonimaterjalide tehnoloogia*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2015.
- [10] C. Dawes, *Laser welding : a practical guide*. Cambridge, England : Abington Publishing, 1992. Vaadatud: 20. aprill 2023. [Online]. Available at: <http://archive.org/details/laserweldingprac0000dawe>
- [11] V. Cicek, *Corrosion engineering*. Beverly, Massachusetts ; Hoboken, New Jersey: ScrivenerPublishing : Wiley, 2014.
- [12] P. Kulu, J. Kübarsepp, A. Laansoo, R. Veinthal, ja T. Eikholm, Toim, *Materjalitehnika: õpik kõrgkoolidele. I: Tehnomaterjalid*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2015.
- [13] 4.9. *Metallide korrosioon*. Vaadatud: 29. aprill 2023. [Online]. Available at: <https://sisu.ut.ee/huvitavkeemia/book/49-metallide-korrosioon>
- [14] „What is stainless steel and why is it so essential“, *ICDA - International Chromium Development Association*. <https://www.icdacr.com/applications/stainless-steel/> (vaadatud 21. aprill 2023).

- [15] R. Gomeringer *et al.*, Toim, *Mehaanikainseneri käsiraamat*, 2. vlj. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2022.
- [16] „Stainless steel: The role of nickel“. <https://nickelinstitute.org/> (vaadatud 8. aprill 2023).
- [17] „Stainless Grades and Properties, Stainless steel architecture, stainless swimming pool design, stainless water piping“. <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/steel-grades.php> (vaadatud 21. aprill 2023).
- [18] P.-J. Cunaat, „Alloying Elements in Stainless Steel and Other Chromium-Containing Alloys“, 2004.
- [19] „Metallurgy of Mo in Stainless Steel“. <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/metallurgy-of-molybdenum-in-stainless-steel.php> (vaadatud 8. aprill 2023).
- [20] „AISI 304L (S30403) Stainless Steel :: MakeItFrom.com“. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/AISI-304L-S30403-Stainless-Steel> (vaadatud 6. aprill 2023).
- [21] „Core 304L/4307 EN 1.4307, ASTM TYPE 304L / UNS S30403 stainless steel grade details“. <https://secure.outokumpu.com/steelfinder/properties/GradeDetail.aspx?OTKBrandNameID=00114&Category=Core> (vaadatud 27. aprill 2023).
- [22] „AISI 316L (S31603) Stainless Steel :: MakeItFrom.com“. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/AISI-316L-S31603-Stainless-Steel> (vaadatud 6. aprill 2023).
- [23] „Supra 316L/4404 EN 1.4404, ASTM TYPE 316L / UNS S31603 stainless steel grade details“. <https://secure.outokumpu.com/steelfinder/properties/GradeDetail.aspx?OTKBrandNameID=00602&Category=Supra> (vaadatud 27. aprill 2023).
- [24] „AISI 430 (S43000) Stainless Steel :: MakeItFrom.com“. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/AISI-430-S43000-Stainless-Steel> (vaadatud 6. aprill 2023).
- [25] „Moda 430/4016 EN 1.4016, ASTM TYPE 430 / UNS S43000 stainless steel grade details“. <https://secure.outokumpu.com/steelfinder/properties/GradeDetail.aspx?OTKBrandNameID=00403&Category=Moda> (vaadatud 27. aprill 2023).

- [26] „AISI 304 (S30400) Stainless Steel :: MakeItFrom.com“.
<https://www.makeitfrom.com/material-properties/AISI-304-S30400-Stainless-Steel>
(vaadatud 6. aprill 2023).
- [27] „AISI 316 (S31600) Stainless Steel :: MakeItFrom.com“.
<https://www.makeitfrom.com/material-properties/AISI-316-S31600-Stainless-Steel>
(vaadatud 6. aprill 2023).
- [28] „Why is the ocean salty? | U.S. Geological Survey“.
<https://www.usgs.gov/faqs/why-ocean-salty> (vaadatud 6. mai 2023).
- [29] „ISO 4136:2012“, *EVS*. Destructive tests on welds in metallic materials --
Transverse tensile test
- [30] „EVS-EN ISO 5173:2010“, *EVS*. Metalsete materjalide keevisõmbluste purustav
katsetamine. Paindekatse

Lisa 1. Tõmbekatsete protokollid

Laboratory of Mechanical testing and Metrology of Taltech

Sample description

Dogbone lo=75 mm AISI 430

Method description

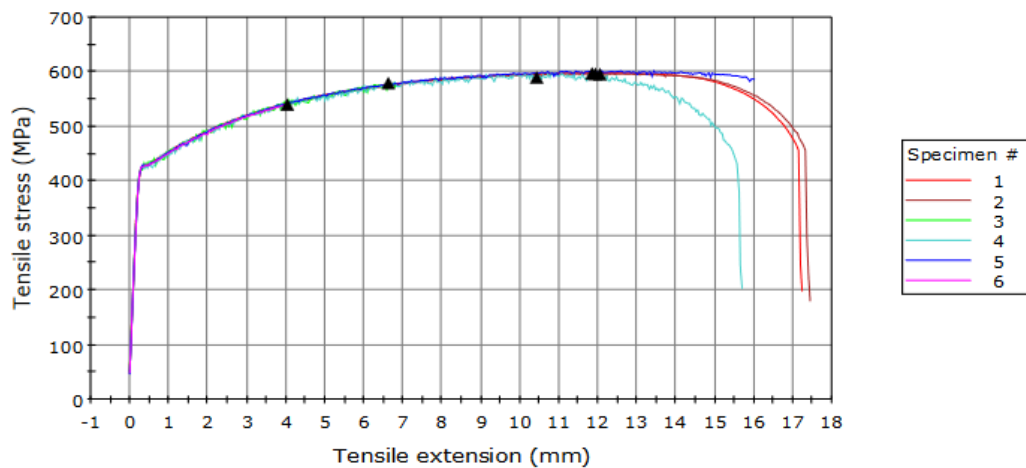
EN ISO 4136:2012 Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test.

Shape - RECTANGULAR

Testing parameters

Operator	T. Märtson
Test method	EVS-EN ISO 4136:2012
Method name	Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test
Test machine	Instron 8516
Load cell	Load cell +-100 kN
Dimensions measuring device	Caliper TESA nr.7H 1261 01
Sample description	Flat dogbone sample
Test program	EN_ISO_4136_2012 WELD_Transverse tensile test_RECTANGULAR_V22
Notes	-

Tensile Test



Test results

	Specimen identification	Fm (kN)	Rm (MPa)	Width (mm)	Thickness (mm)	Notes	Fracture location
1	1-1	11.9	596.8	10.0	2.0	-	Parent material
2	1-2	11.9	595.8	10.0	2.0	-	Parent material
3	2-1	11.6	579.4	10.0	2.0	-	Weld
4	2-2	11.8	589.6	10.0	2.0	-	Parent material
5	3-1	11.9	595.3	10.0	2.0	-	Weld
6	3-2	10.8	540.0	10.0	2.0	-	Weld
Average		11.7	582.8	10.0	2.0		
STDEV		0.4	22.0	0.0	0.0		

Sample file name: KP 177-23 AISI 430.is_metal

Laboratory of Mechanical testing and Metrology of Taltech

Sample description

Dogbone lo=75 mm AISI 316

Method description

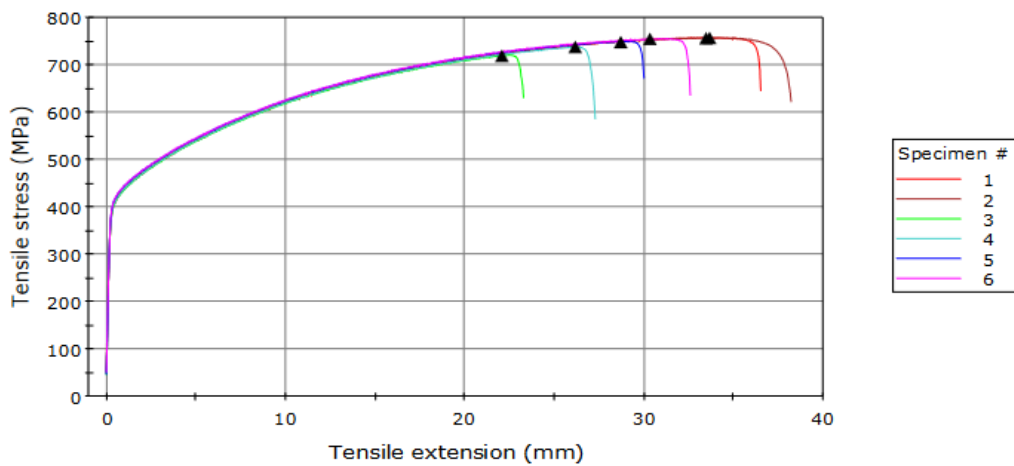
EN ISO 4136:2012 Destructive tests on welds in metallic materials -Transverse tensile test.

Shape - RECTANGULAR

Testing parameters

Operator	T. Märtson
Test method	EVS-EN ISO 4136:2012
Method name	Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test
Test machine	Instron 8516
Load cell	Load cell +-100 kN
Dimensions measuring device	Caliper TESA nr.7H 1261 01
Sample description	Flat dogbone sample
Test program	EN_ISO_4136_2012 WELD_Transverse tensile test_RECTANGULAR_V22
Notes	-

Tensile Test



Test results

	Specimen identification	Fm (kN)	Rm (MPa)	Width (mm)	Thickness (mm)	Notes	Fracture location
1	4-1	15.1	755.9	10.0	2.0	-	HAZ
2	4-2	15.1	756.3	10.0	2.0	-	Parent material
3	5-1	14.4	718.4	10.0	2.0	-	Weld
4	5-2	14.7	737.4	10.0	2.0	-	Weld
5	6-1	14.9	747.3	10.0	2.0	-	Weld
6	6-2	15.1	754.1	10.0	2.0	-	Weld
Average		14.9	744.9	10.0	2.0		
STDEV		0.3	14.8	0.0	0.0		

Sample file name: KP 177-23 AISI 316.is_metal

Laboratory of Mechanical testing and Metrology of Taltech

Sample description

Dogbone lo=75 mm AISI 304

Method description

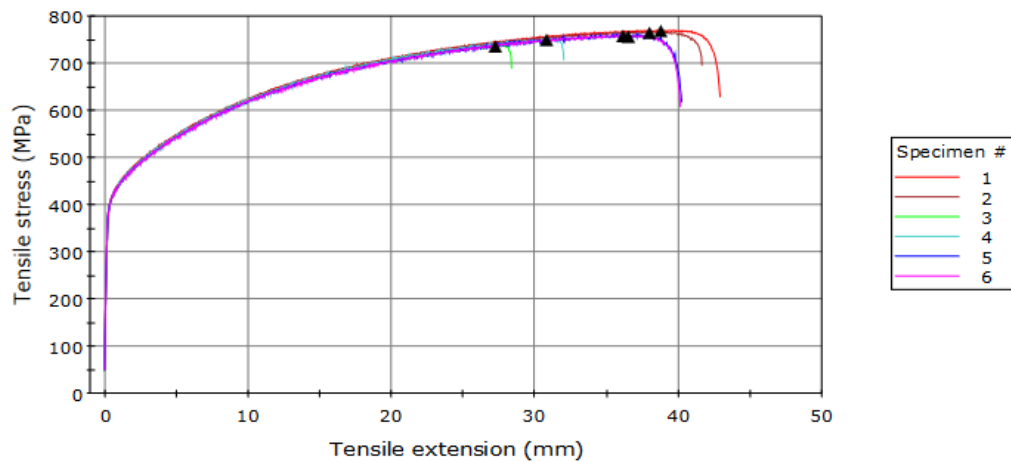
EN ISO 4136:2012 Destructive tests on welds in metallic materials -Transverse tensile test.

Shape - RECTANGULAR

Testing parameters

Operator	T. Märtson
Test method	EVS-EN ISO 4136:2012
Method name	Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test
Test machine	Instron 8516
Load cell	Load cell +-100 kN
Dimensions measuring device	Caliper TESA nr.7H 1261 01
Sample description	Flat dogbone sample
Test program	EN_ISO_4136_2012 WELD_Transverse tensile test_RECTANGULAR_V22
Notes	-

Tensile Test



Test results

	Specimen identification	Fm (kN)	Rm (MPa)	Width (mm)	Thickness (mm)	Notes	Fracture location
1	7-1	15.4	768.1	10.0	2.0	-	Parent material
2	7-2	15.3	763.8	10.0	2.0	-	Weld
3	8-1	14.7	734.9	10.0	2.0	-	Weld
4	8-2	15.0	749.2	10.0	2.0	-	Weld
5	9-1	15.1	755.8	10.0	2.0	-	Parent material
6	9-2	15.1	757.4	10.0	2.0	-	Parent material
Average		15.1	754.9	10.0	2.0		
STDEV		0.2	11.8	0.0	0.0		

Sample file name: KP 177-23 AISI 304.is_metal

Lisa 2. Paindekatsete protokollid



Test Report No:	177-23-1	Date of issue:	13.04.2023
Customer:	Laserline OÜ		
Customer address:	Loovälja tee 5, 75401, Kiili		
Assignment:	Testing of weld according to standard EN ISO 9606-1.		
Received samples and data provided by customer:	Material: t=2 mm		

Bend test

Date of testing:	01.04.2023
Test operator:	T. Märtson
Test method:	Bend test (EN ISO 5173:2010)
Notes:	-
Specimen:	1

Bend test results

Identification of test specimens	Test piece Dimensions, mm		Former diameter, mm	Distance between rollers, mm	Bend angle, °	Remark
	Thickness	Width				
FB-1	2	17	10	15	180	No crack
FB-2	2	17	10	15	180	No crack
RB-1	2	17	10	15	180	No crack
RB-2	2	17	10	15	180	No crack



Photo of tested specimens

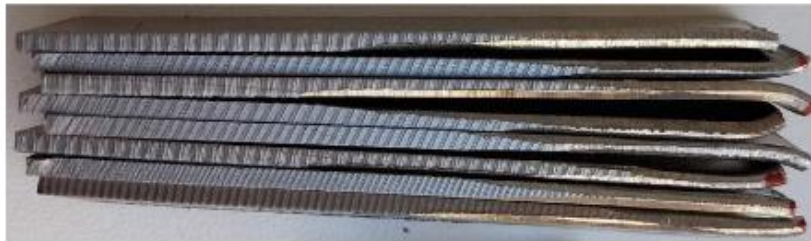
<p>Given report shall not be produced except in full without written approval of the laboratory.</p> <p>Sampling is done by customer. Given results apply only for tested specimens.</p>	<p>Laboratory of Mechanical Testing and Metrology Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn, Estonia +372 620 3342 mlab@taltech.ee mlab.taltech.ee/en</p>	<p>Approved by</p>  <p>PhD Mart Kolnes</p>
--	--	--

Bend test

Date of testing:	01.04.2023
Test operator:	T. Märtson
Test method:	Bend test (EN ISO 5173:2010)
Notes:	-
Specimen:	2

Bend test results

Identification of test specimens	Test piece Dimensions, mm		Former diameter, mm	Distance between rollers, mm	Bend angle, °	Remark
	Thickness	Width				
FB-1	2	17	10	15	180	Break at weld
FB-2	2	18	10	15	180	Break at weld
RB-1	2	17	10	15	180	Break at weld
RB-2	2	17	10	15	180	Break at weld

**Bend test**

Date of testing:	01.04.2023
Test operator:	T. Märtson
Test method:	Bend test (EN ISO 5173:2010)
Notes:	-
Specimen:	3

Bend test results

Identification of test specimens	Test piece Dimensions, mm		Former diameter, mm	Distance between rollers, mm	Bend angle, °	Remark
	Thickness	Width				
FB-1	2	17	10	15	180	Break at weld
FB-2	2	17	10	15	180	Break at weld
RB-1	2	17	10	15	180	Break at weld
RB-2	2	17	10	15	180	Break at weld

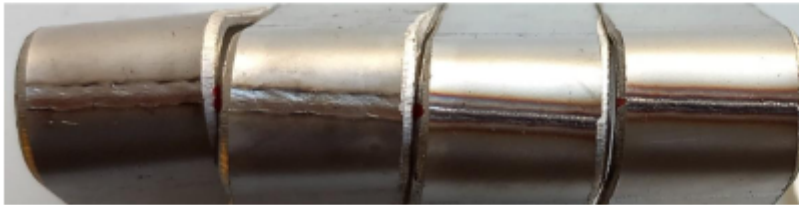


Bend test

Date of testing:	01.04.2023
Test operator:	T. Märtson
Test method:	Bend test (EN ISO 5173:2010)
Notes:	-
Specimen:	4

Bend test results

Identification of test specimens	Test piece		Former diameter, mm	Distance between rollers, mm	Bend angle, °	Remark
	Dimensions, mm					
	Thickness	Width				
FB-1	2	17	10	15	180	No crack
FB-2	2	17	10	15	180	No crack
RB-1	2	18	10	15	180	No crack
RB-2	2	17	10	15	180	No crack

**Bend test**

Date of testing:	01.04.2023
Test operator:	T. Märtson
Test method:	Bend test (EN ISO 5173:2010)
Notes:	-
Specimen:	5

Bend test results

Identification of test specimens	Test piece		Former diameter, mm	Distance between rollers, mm	Bend angle, °	Remark
	Dimensions, mm					
	Thickness	Width				
FB-1	2	17	10	15	180	No crack
FB-2	2	17	10	15	180	No crack
RB-1	2	17	10	15	180	No crack
RB-2	2	17	10	15	180	No crack



Bend test

Date of testing:	01.04.2023
Test operator:	T. Mårtson
Test method:	Bend test (EN ISO 5173:2010)
Notes:	-
Specimen:	6

Bend test results

Identification of test specimens	Test piece Dimensions, mm		Former diameter, mm	Distance between rollers, mm	Bend angle, °	Remark
	Thickness	Width				
FB-1	2	17	10	15	180	No crack
FB-2	2	17	10	15	180	No crack
RB-1	2	17	10	15	180	No crack
RB-2	2	17	10	15	180	No crack



Report No 176-23

Bend test

Date of testing:	01.04.2023
Test operator:	T. Mårtson
Test method:	Bend test (EN ISO 5173:2010)
Notes:	-
Specimen:	7

Bend test results

Identification of test specimens	Test piece Dimensions, mm		Former diameter, mm	Distance between rollers, mm	Bend angle, °	Remark
	Thickness	Width				
FB-1	2	18	10	15	180	No crack
FB-2	2	18	10	15	180	No crack
RB-1	2	18	10	15	180	No crack
RB-2	2	17	10	15	180	No crack

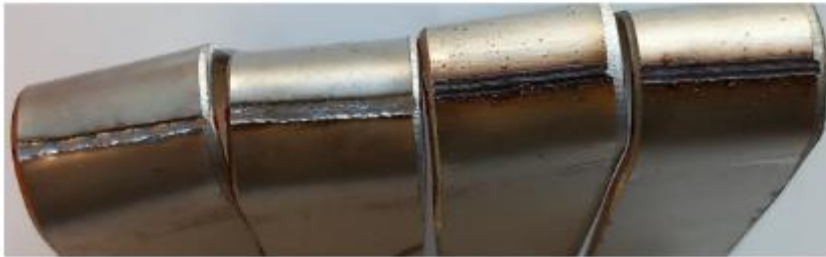


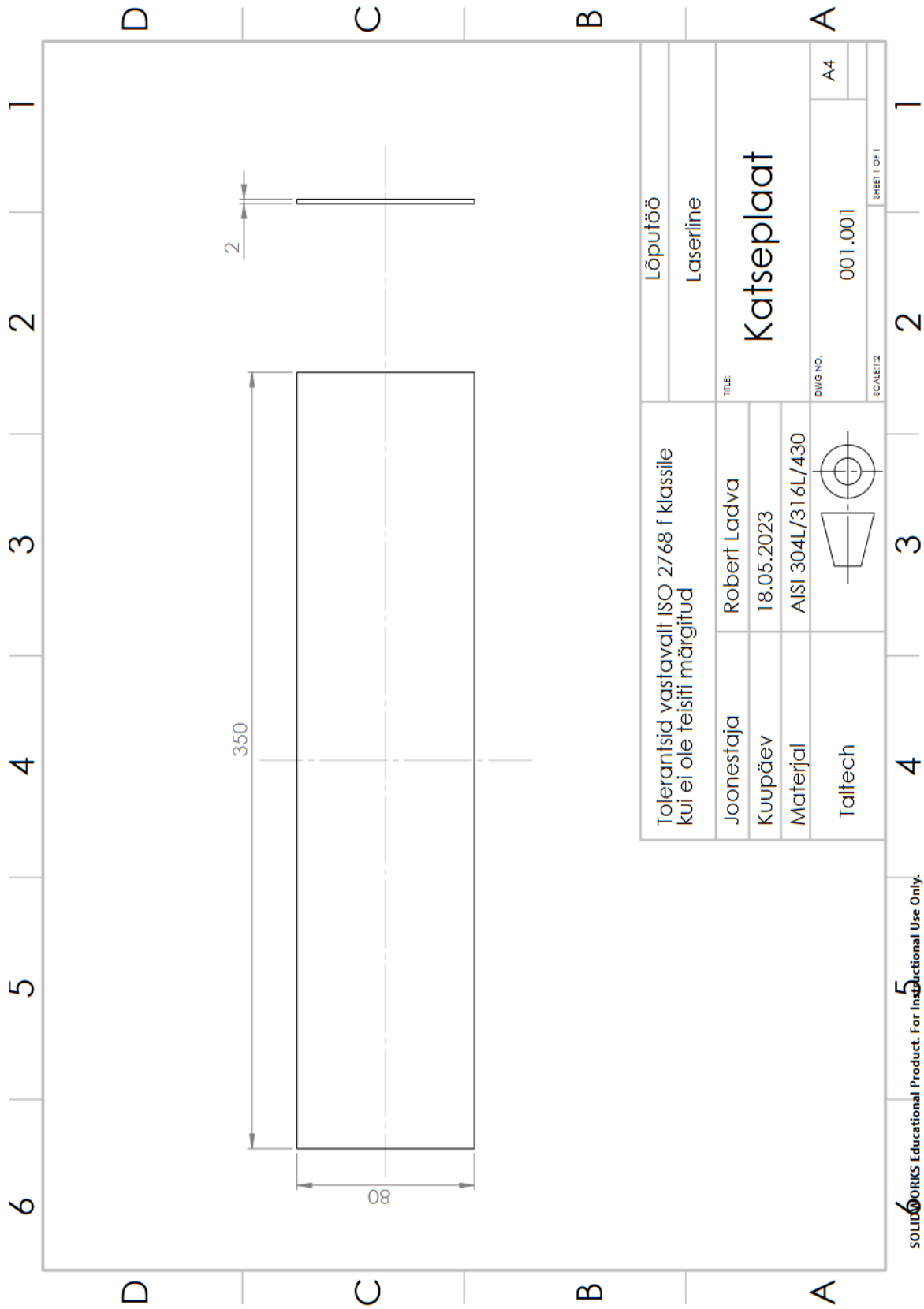
Bend test

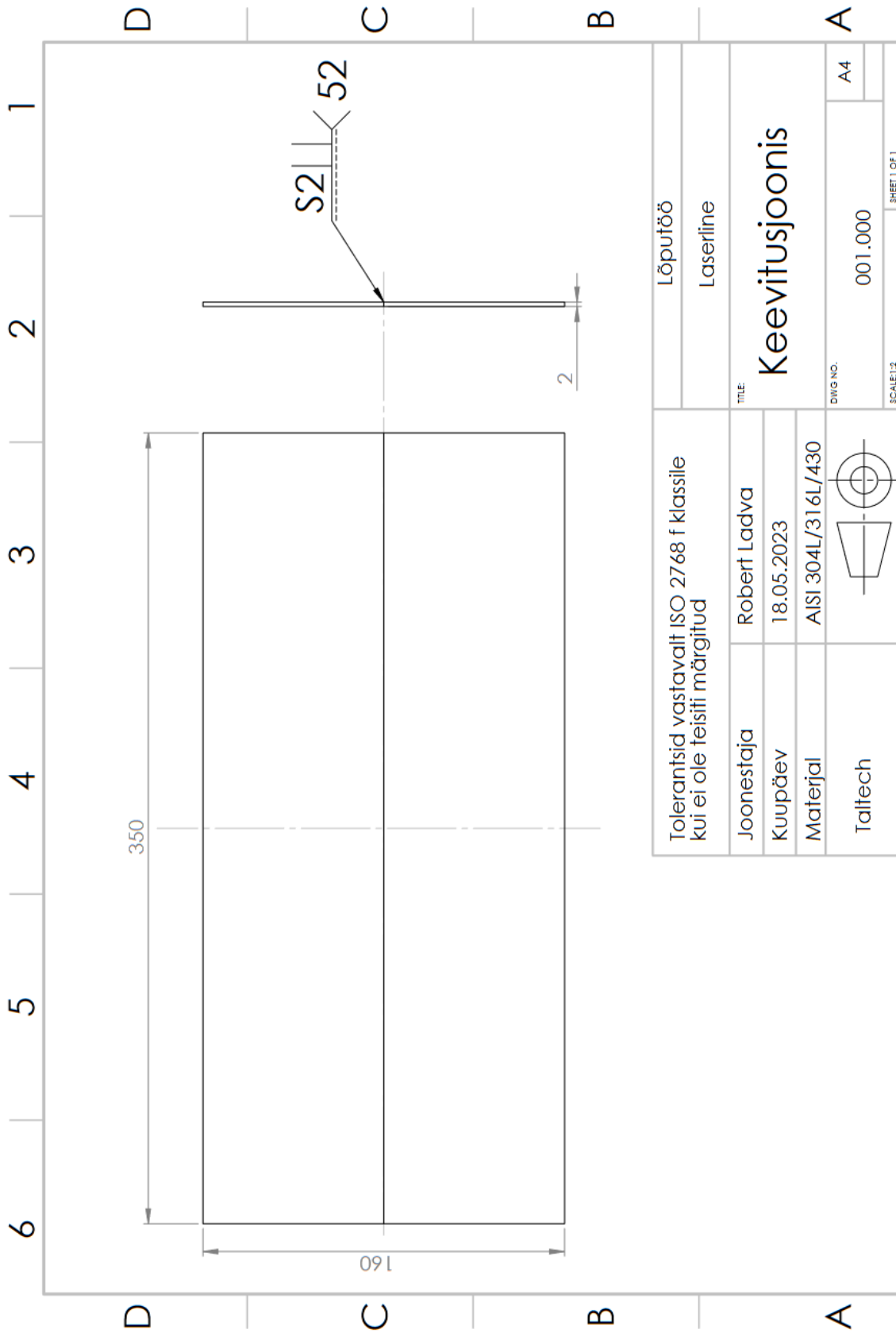
Date of testing:	01.04.2023
Test operator:	T. Märtson
Test method:	Bend test (EN ISO 5173:2010)
Notes:	-
Specimen:	8

Bend test results

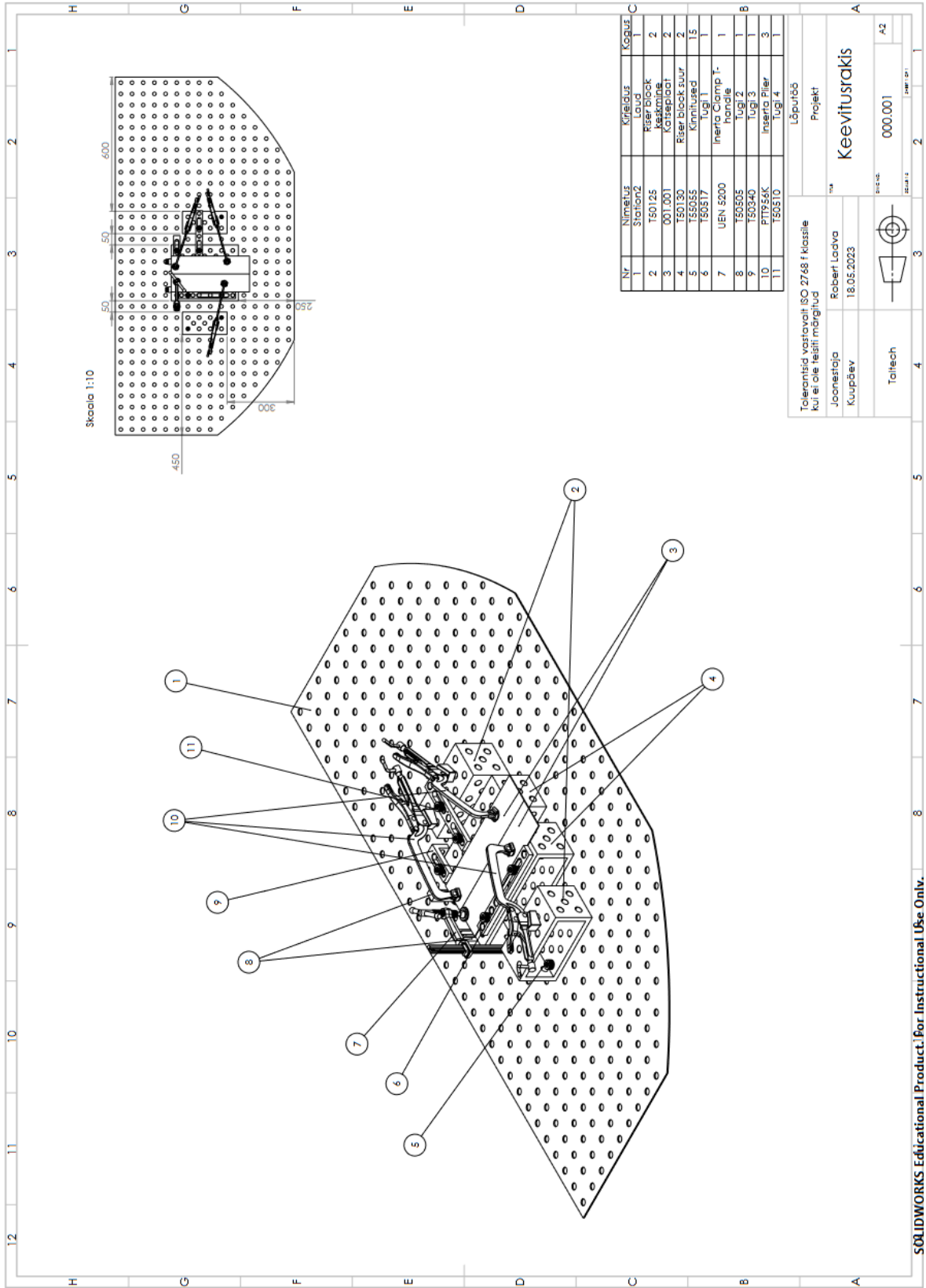
Identification of test specimens	Test piece Dimensions, mm		Former diameter, mm	Distance between rollers, mm	Bend angle, °	Remark
	Thickness	Width				
FB-1	2	17	10	15	180	No crack
FB-2	2	17	10	15	180	No crack
RB-1	2	17	10	15	180	No crack
RB-2	2	17	10	15	180	No crack







Tolerantsid vastavalt ISO 2768 f klassile kui ei ole teisiti märgitud		Lõputöö Laserline	
Joonestaja Robert Ladva	TITLE: Keevitusjoonis		
Kuupäev 18.05.2023	DWG NO. 001.000	A4	
Materjal AISI 304L/316L/430	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1	
Taltech			



Skala 1:10

Nr	Nimetus	Kirjeldus	Kogus
1	Station2	Laud	1
2	T50125	Riser block	2
3	001.001	Katseplaat	2
4	T50130	Riser block suur	2
5	T55055	Kinnitused	15
6	T50317	Tugi 1	1
7	UEN 5200	Inertia Clamp 1. handle	1
8	T50305	Tugi 2	1
9	T50340	Tugi 3	1
10	PTT956K	Inertia Piler	3
11	T50310	Tugi 4	1

Tolerantsid vastavalt ISO 2768 f klassile
kui ei ole teisiti märgitud

Robert Loova
KuupBev
18.05.2023

000.001

000.001

A2

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.