



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Materjalitehnika instituut
Metallide tehnoloogia õppetool

MTT70LT

Anneli Luts

**ALUMIINIUMSULAMI ALSI10MG SELEKTIIVNE
LASERSULATUS KERGEKAALULISTE DETAILIDE
VALMISTAMISEKS**

Autor taotleb
tehnikateaduse magistri
akadeemilist kraadi

Tallinn
2016

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”.....201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

“.....”.....201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... eriala/õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”.....201... a.

..... allkiri

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

2016. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Anneli Luts, 142040
Õppekava: MATM02/11
Eriala: Mehhanotehnika
Juhendaja: Lauri Kollo, vanemteadur
Konsultandid: –

MAGISTRITÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Alumiiniumsulami AlSi10Mg selektiivne lasersulatus kergekaaluliste detailide valmistamiseks

(inglise keeles) Selective laser melting of aluminium alloy AlSi10Mg for lightweight components

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1	Kirjanduse ülevaade. Teemakohaste materjalidega tutvumine.	1.11.2015
2	Katsete läbiviimine. Tulemuste analüüs. Parameetrite valimine.	1.02.2016
3	Detailide disaini optimeerimine. Detailide tootmine.	5.03.2016
4	Seletuskirja valmimine	15.05.2016

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid

Alumiiniumsulamist AlSi10Mg funktsionaalsete detailide tootmise võimaluse väljatöötamine selektiivse lasersulatus tehnoloogia jaoks. Tootmise omahinna arvutamine.

Töö keel: eesti keel

Kaitsemistaotlus esitada hiljemalt 16.05.2016

Töö esitamise tähtaeg 20.05.2016

Üliõpilane Anneli Luts /allkiri/ kuupäev.....
Juhendaja Lauri Kollo /allkiri/ kuupäev.....

SISUKORD

Magistritöö ülesanne	2
Sisukord.....	3
Eessõna.....	6
SISSEJUHATUS.....	7
1. ÜLDINE INFORMATSIOON	11
1.1 Pulbripõhine kihtlisandustehnoloogia	11
1.2 Metallide selektiivne lasersulatus.....	14
1.2.1 Substraat ja toestamine.....	15
1.2.2 Olulised aspektid	16
1.3 Seade Realizer SLM 50.....	19
1.4 SLM protsessiparameetrid.....	20
1.4.1 Parameetrite kategoriseerimine	21
1.4.1 Kõrge tiheduse saavutamine.....	21
1.5 Alumiiniumsulamite selektiivne lasersulatus	23
1.5.1. Sulami AlSi10Mg lühituvustus	23
1.5.2 Materjali tihedus.....	25
1.5.3 Oksüdeerumine ja tootmisatmosfäär	28
1.5.4 Mehaanilised omadused	29
1.5.5 Pinnakaredus	29
1.5.6 Alumiiniumsulamite ja puhta alumiiniumi võrdlus	30
1.6 Formula Student	30
1.7 Kvadrokopter ELIX-XL	31
2. EKSPERIMENTAALNE OSA.....	33
2.1 Katsete läbiviimise ja katsetulemuste mõõtmise meetoodika.....	33
2.1.1 Katsete planeerimine	34
2.1.2 Tiheduse määramine	34
2.1.3 Tõmbeomaduste määramine	35
2.1.4 Kõvaduse määramine	35
2.1.5 Pinnakareduse määramine.....	36
2.1.6 Kuumisostaatpressimine.....	36
2.1.7 Lähtematerjal.....	36

2.2	Protsessiparameetrite mõju tihedusele	37
2.2.1	Esialgsete parameetrite leidmine.....	37
2.2.2	Lämmastik- ja argoonkeskkonna võrdlus	41
2.2.3	Regressioonanalüüs.....	41
2.2.4	Kihi paksuse mõju suhtelisele tihedusele.....	45
2.2.5	Laseri võimsuse mõju tihedusele	48
2.2.6	Topeltskannimine	49
2.3	Omadused tõmbeolukorras.....	51
2.3.1	Tõmbekatsed	51
2.3.2	Järeltöötluseta katsekehad	52
2.3.3	Järeltöödeldud katsekehad.....	56
2.4	Pinnakaredus	58
2.4.1	Fookuskauguse muutmine.....	61
2.5	Järeldused	62
3.	TOODETE VALMISTAMINE.....	64
3.1	Stabilisaatorvarda kinnitusdetailid	65
3.1.1	Stabilisaatorvarras	65
3.1.2	Kinnitusdetailid	66
3.1.3	Kinnitusdetailide tootmine	67
3.2	Kvadrokopteri kaameramooduli hoidik	70
3.2.1	Hoidiku esialgne disain	70
3.2.2	Hoidiku disaini muutmine.....	72
3.3	Omahind	79
3.3.1	Omahinna arvutuse metoodika selgitus.....	79
3.3.2	Omahinna arvutus	81
	KOKKUVÕTE.....	88
	SUMMARY	90
	KASUTATUD KIRJANDUS	93
	LISAD	98
	Lisa 1. SLM sisend- ja väljundparameetrid	99
	Lisa 2. Skannimisstrateegiad ja nende mõju poorsusele	101
	Lisa 3. DoE katseplaan (1)	103
	Lisa 4. DoE katseplaan (2)	104
	Lisa 5. Tõmbeteimikute tootmisparameetrid	105

Lisa 6. Tõmbekatsekehade kõvadus.....	106
Lisa 7. Pinnakareduste tabelid.....	107

EESSÕNA

Käesolevas magistritöös töötatakse välja alumiiniumsulamist AlSi10Mg detailide valmistamise võimalus TTÜ materjalitehnika instituudi selektiivse lasersulatuse seadmel. Töö teostamise vajadus lähtus *ELI OÜ* ja *Formula Student* projekti vajadusest toota keeruka geomeetriaga kõrgtugevaid kergekaalulisi detaile. Katsed ja mõõtmised viidi läbi peamiselt TTÜ pulbermetallurgia laboratooriumis ning TTÜ mehaanika ja metroloogia katselaboratooriumis. Töö teema pakkus välja vanemteadur Lauri Kollo. Autor soovib tänada TTÜ doktorante Marek Jõelet'e, Yaroslav Holovenko't ja Kaspar Kallip'it katsetega seotud nõuannete ja abi eest. Suurim tänuavaldus Lauri Kollo'le asjaliku juhendamise ja suunamise eest töö koostamisel.

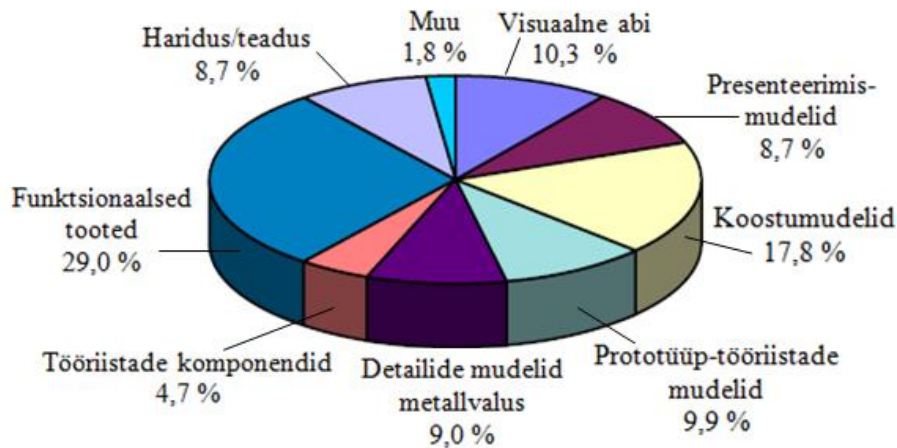
SISSEJUHATUS

Käesoleva magistritöö eesmärk on saada ülevaade protsessiparameetritest, millega toota sulamist AlSi10Mg detaile kasutades selektiivse lasersulatus (SLM – *selective laser melting*) tehnoloogiat ning rakendada tulemusi funktsionaalsete detailide tootmiseks. Töö temaatika lähtub vajadusest pakkuda valmistustehnoloogia kõrgtugevate kergekaaluliste detailide valmistamiseks. Otsesteks töö tulemuste kasutajateks on *Formula Student*, kellele valmistatakse stabilisaatorvarda kinnitusdetailid 2016. aasta autovormeli jaoks ning *ELI OÜ*, kellele valmistatakse kvadrokooperi kaameramooduli hoidik. ABS-plastist (akrüülnitriil-butadieen-stüreen) valmistatud drooni kaameramooduli hoidik disainitakse ümber selliselt, et toota seda AlSi10Mg sulamist, pidades silmas esialgse kaalu säilitamist. Protsessiparameetrite valimisel on peamine tähelepanu materjali kõrge tiheduse saavutamisel. SLM on üks kihtlisandustehnoloogia (AM - *additive manufacturing*) liikidest. AM on üldnimetus tootmistehnoloogiate kogumile, mis kasutavad toote loomiseks materjali kihthaaval lisamist. Materjali eemaldavate tehnoloogiatega võrreldes tekivad uudsed võimalused toodete geomeetria, prototüüpimise kiiruse ja materjalide osas.

AM tehnoloogia põhimõtetele rajanevaid kontseptsioone uuriti juba 50 aastat tagasi ning esimesed kommertslikud tootmiseseadmed ja -tehnoloogiad olid saadaval 1980ndatel aastatel. Märkimisväärselt aktuaalseks on valdkond muutunud viimase kümnendi jooksul, näidates aina suuremat turuosa kasvu. Aastal 1995 oli AM turu maht 262 miljonit eurot, aastaks 2014 oli see 4,1 miljardit eurot. See on toimunud erinevate asjaolude mõjul. AM seadmeid on arendatud, mistõttu need on produktiivsemad ning praagi hulk on väiksem. Aegunud on varasemad valdkonna patendid. AM tehnoloogia erinevaid vorme on juurde tekkinud, mistõttu on võimalik kasutada rohkem materjale ning toota laiemas valikus tooteid. Seeläbi on tehnoloogia potentsiaalsete otstarvete arv suurenenud. Võrreldes paarikümne aasta taguse ajaga on tänapäeval rohkem kohandatavaid tooteid või tootedetaile, mida on vaja väikses koguses. AM tehnoloogia eelis väljendub konventsionaalsete tootmistehnoloogiate ees kõige paremini just väikse tootmiskoguse ja kompleksse kujuga detailide puhul. Ühe maailma juhtiva konsultatsiooni- ja juhtimisteenuse pakkuja *AT Kearny* analüüsi kohaselt on aastaks 2020 kihtlisandustehnoloogia turu maht kasvanud vähemalt 17 miljardi dollarini.

AM tehnoloogiat kasutatakse erinevates valdkondades. Vastavalt 2015. aastal tööstus- ja tehnoloogiaettevõtetes läbi viidud uuringule kasutatakse AM tehnoloogiat funktsionaalsete

detailide tootmiseks rohkem kui prototüüpimise jaoks (Wohlers et al., 2015). Siiski on AM oluline abivahend ka prototüüpide valmistamisel. Olulised kasutuskohad on veel valuvormide ja erinevate tööriistade ning rakiste valmistamine.



Sele S1.1. AM tehnoloogia kasutusvaldkonnad. Allikas: (Wohlers, 2015)

Lisaks kasutatakse AM tehnoloogiat biokudedest organite, meditsiiniseadmete, keskkonnatehnikatoodete, ravimite ja muu tootmiseks. Uuritakse tehnoloogia kasutamise võimalusi hoonete ehituses ja toiduainete tootmises.

AM tehnoloogia seisneb detaili valmistamises kihthaaval. Iga kiht on õhuke ristlõige detailist. Info detaili geomeetria kohta tuleb detaili kolmemõõtmelisest raalprojekteeritud (*3D CAD*) ning *.STL* formaati konverteeritud mudelist. AM protsessi sisu oleneb vaadeldavast AM tehnoloogia liigist. Liigid erinevad peamiselt kasutatavate materjalide, kihtide loomise meetodi ja kihtide omavahelise ühendamise meetodi poolest. AM tehnoloogia on võimalik liigitada järgmiselt (Gibson et al., 2010):

- fotopolümeerisatsioon (*photopolymerization*)
- pulbripõhine tehnoloogia (*powder bed fusion*)
- ekstrusioon (*extrusion*)
- printmine (*printing*)
- lamineerimine (*sheet lamination*)
- depositsioonitehnoloogia (*beam deposition*)
- otsetootmine (*direct write technology*)

Fotopolümerisatsioon puhul kasutatakse lähtematerjalidena vedelaid fotopolümeere ja vaikusid, mis pannakse tarduma kasutades gammakiirgust, röntgenkiirgust, elektronikiirgust või kõige sagedamini ultraviolettkiirgust. **Pulbripõhise** tehnoloogia puhul on materjalivalik mitmekesine, võimalik on toota polümeerist, metallist, keraamilisi ja komposiitmaterjalist tooteid. Kasutatakse soojusenergiat laser- või elektronikiire näol, millega materjal paagutatakse või sulatatakse. Erandiks on keraamika puhul kasutatav keemilistel reaktsioonidel põhinev meetod, milles kutsutakse soojuse mõjul esile keemilised reaktsioonid lähtematerjalide vahel. **Ekstrusiooni** puhul on lähtematerjalideks polümeerid. Konstantse väärtusega survet kasutades liigutatakse pooltardunud olekus materjal läbi düüsi. Toode tekib materjali tardumisel pärast düüsisist väljumist. Materjali olekut kontrollitakse peamiselt temperatuuri abil. On uuritud ka keraamiliste materjalide kasutamise võimalust (Jafari et al., 2000) ekstrusioonis. **Printimise** tehnoloogia all mõistetakse kihtlisandustehnoloogia meetodit, kus üldjuhul on lähtematerjaliks pulbri kujul polümeer, mille ühendamiseks kasutatakse sideainet. **Lamineerimisel** kasutatakse rullist tulevat lehtmaterjali. Sobib teoreetiliselt iga materjal, mida on võimalik lehe kujule viia. Näiteks paber, polümeerid, metallid. Kõige rohkem kasutatakse siiski paberit. Enamasti seotakse kihid liimiga. Olenevalt materjalist on võimalik ka soojusenergia, ultrahelikiirguse või lihtsalt klambrite abil ühendamine. Ristlõiked lõigatakse välja laseri või noaga. **Depositsiooni** tehnoloogia viitab meetodile, kus toote loomiseks pulbri või traadi kujul materjali jooksvalt ette antakse ja laser- või elektronikiire abil sulatatakse. Sel viisil toodetakse peamiselt metallidest tooteid. **Otsetootmine** on laiemas mõistes igasugune tootmine, kus ilma traditsiooniliste tööriistadeta toodetakse kolmedimensioonilisi kompleksseid detaile. Kuna selle mõiste alla sobituvad pea kõik AM tehnoloogia liigid, siis kihtlisandustehnoloogiaalases terminoloogias mõistetakse otsetootmise all AM tehnoloogia kasutamist väga väikeste, kuni 5 mm dimensiooniga toodete jaoks.

Eelnev kirjeldus materjalide ja meetodite osas ei ole ammendav, kuid välja on toodud peamised variandid. Käesolev töö keskendub selektiivsele lasersulatusele, mis on üks pulbripõhise AM tehnoloogia liik. Töö käigus uuritakse milliseid parameetreid on otstarbekas protsessis kasutada, et toota detaile alumiiniumsulamist AlSi10Mg. Peaesmärgiks on luua võimalus funktsionaalsete lõpptoodetes kasutatavate detailide valmistamiseks. Uuritavatest omadustest pannakse eelkõige rõhku saavutatavale tihedusele ja tugevusomadustele tõmbeolukorras.

Töö esimeses osas tutvustatakse pulbripõhist AM tehnoloogiat, kasutatavat seadet ja materjali. Tehakse ülevaade valdkonna teadusartiklitest, keskendudes põhjalikumalt alumiiniumi sulamitega seonduvale. Teises osas käsitletakse töös teostatud eksperimente. Antakse ülevaade kasutatud metoodikast tutvustades mõõdetavaid omadusi, mõõtmisviise, kasutatud tarkvarasid. Samas osas sisaldub töö raames läbi viidud eksperimentide põhjalik kirjeldus koos tulemuste analüüsiga. Töö kolmandas osas keskendutakse OÜ ELI toodetava kvadrokooperi kaameramooduli hoidikule, millele luuakse uus, plastilt alumiiniumile üle minemiseks sobiv disain ja *Formula Student* 2016. aasta autovormeli stabilisaatorvarda kinnitusdetailide tootmisele. Spetsifitseeritakse tootmise täpne meetod ja tehakse omahinna arvutus. Kolmandale osale järgneb töö kokkuvõte, kus esitatakse ülevaade töös teostatust ja ettepanekud edasiste uuringute jaoks.

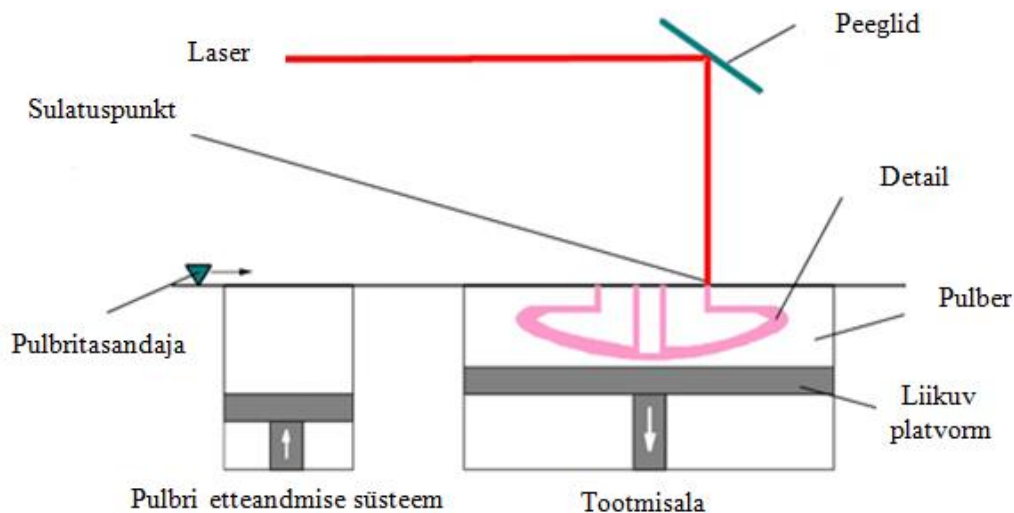
1. ÜLDINE INFORMATSIOON

Käesolevas peatükis on pulbripõhise AM tehnoloogia lühitutvustus. Lähemalt kirjeldatakse magistritöös uuritud tehnoloogiat, SLM'i. Antakse ülevaade SLM protsessiparameetritest, töös rakendatud seadmest *Realizer SLM 50* ja sulamist AlSi10Mg. Tutvustatakse põgusalt *ELI OÜ* mehitamata lennuseadet - kvadrokooperit *ELIX-XL* ning *Formula Student* vormeliehituse projekti.

1.1 Pulbripõhine kihtlisandustehnoloogia

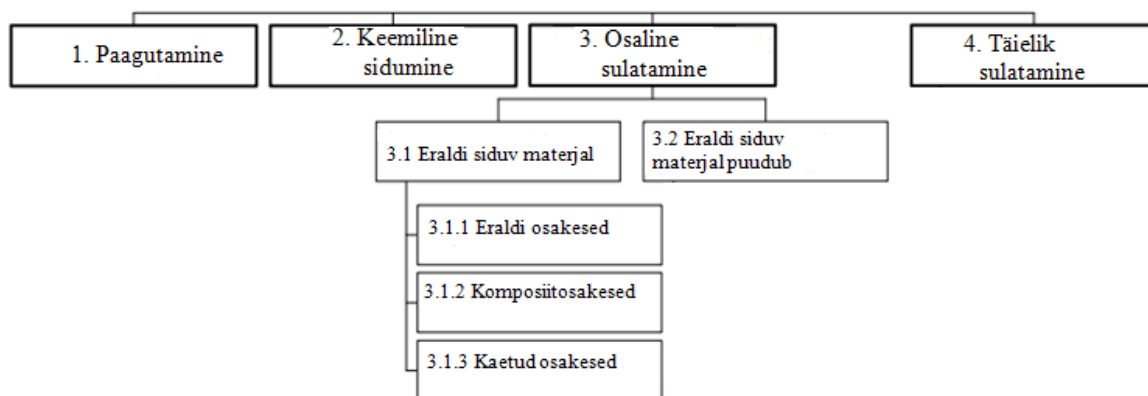
Pulbripõhine AM tehnoloogia (*powder bed fusion*) on üks esimesi kommertslikku kasutusse tulnud ja täna enimkasutatavaid AM tehnoloogiaid. See seisneb pulbri kujul oleva lähtematerjali osakeste laser- või elektronkiirega kokkusulatamises või -paagutamises. Taoliste seadmete peamised osad on pulbri etteandmise süsteem, platvorm toodetava detaili jaoks, pulbrikihi lisamise ja tasandamise süsteem, laser- või elektronkiir ja nende liigutamise süsteem.

Selel 1.1 on kujutatud tehnoloogia põhimõtteline skeem. Pulbri etteandmise süsteem lisab tootmiskambrisse pulbrit, mille pulbritasandaja substraadile ehk tootmisplatvormile tasandab. Olles saavutanud substraadil ühtlase paksusega, üldjuhul 20 – 100 µm pulbrikihi, skannib laser- või elektronkiir pulbrikihile toodetava detaili ristlõike. Seejärel laskub platvorm protsessi alguses määratud kihipaksuse võrra madalamale, pulbritasandaja kannab platvormile ühtlase kihi pulbrit ja tsükkel kordub uuesti järgmise ristlõikega. Protsess kestab seni, kuni detail on valmis.



Sele 1.1. Pulbripõhise AM tehnoloogia põhimõtteline skeem. Allikas: *Standard VDI 3404*

Protsessi täpsem sisu oleneb tehnoloogia tüübist. Üks võimalus pulbripõhise tehnoloogia jaotamiseks on esitatud seel 1.2.



Sele 1.2. Pulbripõhise AM tehnoloogia jagunemine. *Kohandatud allikast: (Kruth et al., 2005)*

Paagutamist teostatakse temperatuuridel $T_S/2$ kuni T_S , kus T_S on materjali sulamistemperatuur (Kruth et al., 2005). Paagutamise mehhanismiks on difusioon - pulbriosakesed ühinevad pinna vaba energia vähendamiseks. Protsessis on võimalik kasutada paljusid erinevaid materjale. Mida väiksemad on pulbriosakesed, seda efektiivsemalt toimub paakumine ja kvaliteetsem on toode.

Keemilist sidumist on kasutatud keraamiliste detailide moodustamiseks. Näiteks ränikarbiidi skannimisel laseriga jagunevad mõned ränikarbiidi molekulid räniks ja süsinikuks. Räni

moodustab omakorda hapnikuga reageerides ränidioksiidi, mis jääb siduvaks aineks lagunemata ränikarbiidi molekulide vahel (Klocke et al., 1997).

Osalisel sulatamisel toodetakse üldjuhul mitmest materjalist koosnevaid detaile. Üks materjal on madalama sulamistemperatuuriga ning moodustab tootmisel vedela faasi, mis tardumisel seob kõrgema sulamistemperatuuriga struktuurmaterjali. Lähtematerjaliks võib olla erinevate pulbrite segu. Sel juhul on struktuurseks materjaliks enamasti metall või keraamiline materjal ja siduvaks materjaliks metall. Siduva materjali osakesed peavad olema väiksemad, et soodustada selle sulamist (Karapatis, 2002). Üldjuhul vajavad tooted järeltöötlust poorsuse vähendamiseks, enamasti kuumisostaarpressimise abil. Lähtematerjal võib olla ka komposiidi kujul, mis võib anda detaili madalama poorsuse ja pinnakareduse, kuid segatud pulbrite kasutamine on sageli lihtsam ja odavam. Kasutatakse ka kaetud pulbriosakesi, kus prinditava materjali osakesed on kaetud siduva materjaliga. See kindlustab, et soojus kandub laserilt eelkõige siduvasse materjali, mis vähendab võimalust, et struktuurmaterjal sulab (Kruth et al., 2003). Pulbriosakesteks on üldjuhul polümeeriga kaetud metall. Näiteks kaetakse vasepulbri osakesed polüamiidiga valmistamiseks survevaluvorme. Need vormid on kergesti töödeldavad, taluvad kõrgeid temperatuure ja on hea soojusjuhtivusega.

Osalise sulatamise mõiste alla kuuluvad ka süsteemid kus kasutatakse ühtainsat materjali, kuid kõiki selle osakesi ei sulatata täielikult. Taoline meetod kiirendab tootmisprotsessi, kui maksimaalse võimaliku tiheduse saavutamine pole oluline. Lähtudes materjalist ja pulbriosakeste suurusest on võimalik leida edasiantava energia kogus, mille juures osakesed sulavad ainult soovitud määral (Karapatis, 2002).

Täielikul sulatamisel on eesmärgiks sulatada pulbriosakesed nii, et saavutatakse toote võimalikult suur tihedus. Sel viisil toodetakse nii polümeer- kui ka metalltooteid. Kaks peamist kasutusel olevat tehnoloogiat on SLM ja elektronkiirsulatus (EBM – *electron beam melting*). Neil on mitmeid erinevusi, samas kasutatakse mõlemat tehnoloogiat ulatuslikult. Laserkiire kasutamisel on oluline valguse neelduvus materjalis, elektronkiire kasutamisel elektrijuhtivus. Seetõttu kasutatakse elektronkiirt metallide puhul, laserkiirt metallide ja polümeeride puhul. Elektronkiire kasutamine peab toimuma vaakumis, sest gaasiosakesed oleks takistuseks elektronide liikumisele. Lasersulatusel on tootmiskambris inertgaas, üldjuhul argoon või lämmastik. Elektronkiir liigub kiiremini tänu elektromagnetilisele

juhtsüsteemile, laserkiir aeglasemalt seda juhtivate galvanomeetrite tõttu. Tabelis 1.1 on kokkuvõte SLM ja EBM peamistest erinevustest.

Tabel 1.1. EBM ja SLM võrdlus. Allikas: (Gibson et al., 2010)

Karakteristik	EBM	SLM
Soojusallikas	Elektronkiir	Laser
Atmosfäär	Vaakum	Intertgaas
Skannimise juhtimine	Kallutusmähis	Galvanomeetrid
Energia üleandmine	Elektrijuhtivusest sõltuv	Valguse neelduvusest sõltuv
Pulbri eelsoojendus	Elektronkiirega	Infrapunasoojendiga
Skannimiskiirus	Väga kiire, magnetväljaga juhitud	Galvanomeetri inertsiiga piiratud
Energiakulu	Keskmine	Kõrge
Pinnakaredus	Keskmine/suur	Väike/keskmine
Resolutsioon	Keskmine	Suur
Materjalid	Metallid	Metallid, polümeerid, keraamika

1.2 Metallide selektiivne lasersulatus

Metallide SLM sai alguse 1995. aastal Saksamaal, Fraunhoferi Lasertechnologia Instituudis. Täna kasutatakse tehnoloogiat peamiselt kompleksse geomeetriaga toodete ja väikeste tootmiskahtude puhul, kus traditsiooniliste tehnoloogiatega seotud kulud on võrreldes SLM'iga suuremad. Samuti kasutatakse seda juhul, kui teistsugusel viisil ei ole võimalik vajalikku toodet valmistada, näiteks mõned meditsiinilised tooted.

Tehnoloogia algusaegadel kasutati energia edasikandmiseks Nd:YAG (*neodymium-doped yttrium aluminium garnet*) lasereid. Tänapäevaks on enamikes SLM seadmetes fiiberlaserid. Fiiberoptiliste kiudude eelis Nd:YAG kristallide ees on nende paindumus, kompaktsus, madalam hind, kvaliteetsem laserkiir.

Metallide SLM'i füüsikaliseks sisuks on laserkiirguse neeldumine ja soojuse ülekandmine materjalile, materjali faasimuutus, sulamaterjali voolamine, materjali aurustumine, materjali tardumine. Substraadil oleva metallpulbri tihedus on ligikaudu 55 % materjali teoreetilisest tihedusest (Das, 2003). Kui laserkiir jõuab pulbri pinnale, toimub tiheduse kasv läbi materjali paakumise. Seejärel jõuab materjal sulamistemperatuurini, neelab laserkiirest latentse soojuse

ning sulab. Soojusjuhtivuse mõjul toimub soojusülekanne sulamaterjalist substraati ja ümbritsevasse pulbrisse ning soojuskiirguse ja konvektsiooni mõjul ümbritsevasse keskkonda detaili kohal. Laserkiire edasiliikumisel hakkab sulatatud piirkond jahtumise mõjul tarduma. Vedelas faasis oleva metalli ümber on osaliselt sulanud metalliga termomõju tsoon (HAZ – *heat affected zone*). Sulametalli aatomid positsioneeruvad tardumisel HAZ piirkonna terastruktuuri järgi. Kuna iga kihi skannimisel sulab osaliselt ka sellele eelnenud kiht, võib toimuda epitaksiaalne tera kasv (Vilaro, 2012). Eelmise kihi sulatamine aitab detaili ristlõikepinnalt eemaldada ka saaste ja oksiidid.

SLM protsessi tulemuse määravad mitmed parameetrid, näiteks laseri võimsus, skannimise kiirus, sulatusriidade vahekaugus, kihi paksus. Täpsem ülevaade parameetritest on jaotises 1.4. SLM'is sobivad kasutamiseks paljud metallid ja sulamid. Samas on tootmisparameetrite paljususe tõttu raske hinnata nende koosmõju uuele materjalile, eriti SLM'ile omases kiire lokaalse sulamise ja tardumise keskkonnas. Iga konkreetse materjali käitumine sõltub selle keemilisest koostisest, optilistest, termodünaamilistest ja reoloogilistest omadustest. Seetõttu määratakse sobivad parameetrid peaaegu alati eksperimentaalsel teel (Yadroitsev, 2010). Kuna taoline meetod on väga aeganõudev ja kulukas, proovitakse leida viise materjali käitumise ennustamiseks ka ilma ulatuslikke eksperimente läbi viimata (Gong, 2014).

1.2.1 Substraat ja toestamine

Metalldetaili tootmisel kinnitatakse see alati tugede abil substraadile. Toed valmistatakse samast materjalist ja samal viisil nagu detail ise – sulatades laseriga pulbri teatud regioonid. Toed on vajalikud laserkiire poolt tekitatud soojuse ärajuhtimiseks toodetavast detailist ning sisepingetest tekkivate deformatsioonide vältimiseks. Toestatakse kogu detaili alumist pinda ning pigem horisontaalselt asetsevad osasid. Üldreegli järgi tuleb osa toestada, kui see moodustab detaili vertikaalse teljega vähemalt 45° nurga ehk asetseb rohkem horisontaalselt, kui vertikaalselt. Tugede moodustamiseks kasutatakse üldjuhul teistsuguseid parameetreid, kui detaili enda jaoks. Seda seetõttu, et toed peavad olema võimalikult lihtsasti eemaldatavad. Sobiva toestuse mudeli genereerib SLM seadmete puhul tarkvara, kuid seadme operaator peab seda kontrollima ning vajadusel modifitseerima. Tugede vajadus piirab metallide SLM'i puhul geomeetria kompleksuse võimalusi. Seel 1.3 on kujutatud SLM tehnoloogia abil valmistatud detail pingstruktuuri (*tensintegral structure*) jaoks koos selles sisalduvate

tugedega. Ka ei ole tugede olemasolu tõttu alati võimalik tootmisplatvormil ruumi maksimaalses ulatuses ära kasutada.



Sele 1.3. Detail pingstruktuuri jaoks. Detaili ülemises osas on näha tugistruktuuri, sest ilma selleta ei oleks võimalik toota horisontaalset osa. *Allikas: (Galjaard et al., 2014)*

Substraat reeglina soojendatakse, et vähendada SLM protsessis detailidel esinevaid temperatuurigradiende. Ettekuumutusel on tõestatud defekte vähendav mõju SLM tehnoloogiaga valmistatud metalltoodetes (Cloots, 2013).

1.2.2 Olulised aspektid

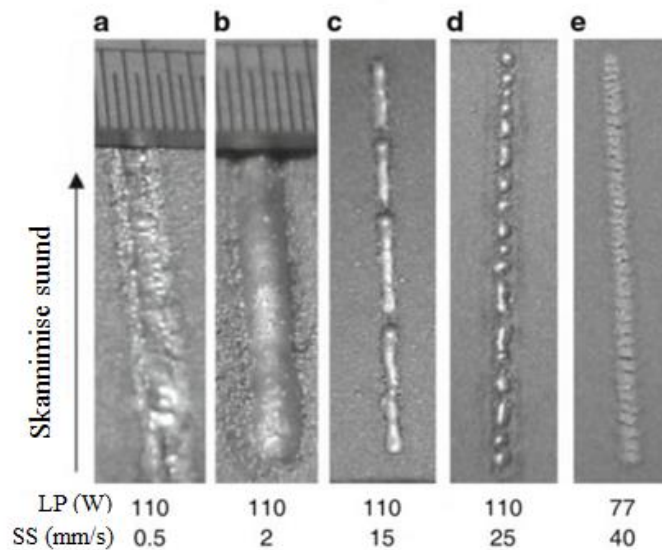
Metallide omadused, näiteks hea soojusjuhtivus, kalduvus oksüdeerumisele ja valguse vähene neeldumine muudavad nende kasutamise SLM protsessis keerukaks. Arvestada tuleb mitmete väljakutsetega.

Pulbrite käsitlemine

Metallipulbrid võivad olla ohtlikud. Pulbreid tuleb käsitleda ja hoiustada vastavalt nõuetele ning kasutada isikukaitsevahendeid, et vähendada terviseriske. Ettevaatlik tuleb olla tootmistsükli lõppemisel tootmiskambrit avades ja substraati eemaldades. Kõrgele temperatuurile viidud pulbri puhul on soodustatud kiire oksüdeerumine, mis halvemal juhul võib lõppeda plahvatusena. Pulbri nõuetekohane käsitlemine omab kriitilist mõju ka lõpptoote kvaliteedile. Lähtematerjalis tekkinud oksiidid soodustavad pooride teket detailis.

Oksüdeerumine ja piiskade teke

Metallidel on kalduvus tootmiskambris oksüdeeruda. Eriti märkimisväärne on see tendents alumiiniumdetailide puhul, millega seotud aspekte käsitletakse täpsemalt jaotises 1.5. Kui detaili ristlõikele moodustub oksiidikiht, takistab see ristlõike korralikku märgumist järgmise sulatatava kihiga. See soodustab ümarate piiskade teket (*balling*) (Das, 2003). Taolised piisad mõjuvad toote kvaliteedile negatiivselt. Detaili pinnale tardumisel raskendavad need järgmise kihi korralikku kinnitumist, põhjustades poore ja ebatäpsusi geometrias. Selel 1.4 on näide M2 kiirlõiketerase pulbri selektiivsest lasersulatamisest erinevate protsessiparameetrite juures, millel on näha kalduvust piiskade moodustamisele.



Sele 1.4. Ümarate piiskade teke SLM'il. Allikas: (Hauser et al., 2005)

Kõrge energiavajadus

Metallid vajavad SLM'is polümeeridega võrreldes suuremaid energiahulkasid. Seda nii kõrgema sulamistemperatuuri ja -soojuse kui ka näiteks protsessi jooksul tekkivate oksiidide kõrvaldamiseks. Valguse võrdlemisi madala neelduvuse tõttu metallides ei kasutata efektiivselt ära kogu laserkiirega edastatavat soojusenergiat. Vajaliku energiahulga üleandmiseks peab laseri koguvõimsus olema suhteliselt suur. Olenevalt seadmest ja materjalist võib piisava energiahulga edasiandmiseks sobivate tootmisparameetritega kaasneda pikk tootmisaeg. Kuna täna moodustab metallide SLM tehnoloogias suure osa kulust seadme amortisatsioon, on see probleemiks nii teenusepakkujale/seadme omanikule kui ka detaili tellijale, kes vajab lühemat tarneaega.

Aurustumine

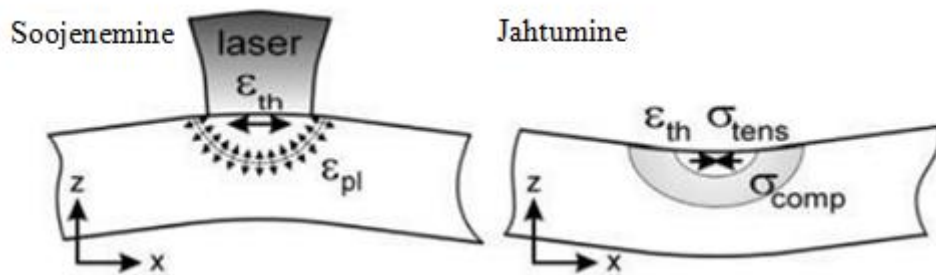
Kõrge temperatuuri tõttu võib sulametall aurustuda. Aurustumise nähtust metallide SLM tehnoloogias on vähe uuritud. Leides eksperimentaalsel teel optimaalsed protsessiparameetrid kindlale materjalile, ei peaks aurustumine probleemiks olema – seda peaks toimuma piisavalt vähe, et mitte probleeme põhjustada. Andes edasi liiga suuri energiahulkasid võib aurustumine soodustada pooride teket detailis (Bartolo et al., 2013). Laserkeevituse protsessis on täheldatud, et aurustunud metall segab laserkiire neeldumist, halvendades protsessi kvaliteeti (Purtonen et al., 2014). Metallide selektiivse laserpaagutuse (SLS – *selective laser sintering*) puhul on vaakumkeskkonnas läbiviidavate protsesside puhul täheldatud sulamite komponentide olulist aurustumist (Das, 2003). Aurustunud materjali kondenseerumisel laseriaknale vähendab see laseri täpsust ja kvaliteeti. Samuti võib komponentide väljaaurustumisel liigselt muutuda sulami keemiline koostis.

Protsessi korratavus

Detaili sulametallist ristlõike kõrge temperatuuri tõttu kuumeneb ka ristlõike ümber olev pulber. Ristlõike ümbruses olev pulber võib hakata paakuma detaili külge. See põhjustab detaili mõõtmete kasvu ja ebatäpset geometriat. Laserkiire liikumisel detaili äärde sulatab laserkiir mingis raadiuses pulbrit, mis tegelikult detaili küljes olema ei peaks. Probleemi saab leevendada detaili mõõtmete vähendamiseks. Seadmetel on üldjuhul ka *hatch offset* funktsioon, kuhu sisestada eelnevalt katseliselt kindlaks tehtud dimensiooniline hälve ja sulatusread kohendatakse nii, et lõpptulemuseks oleks soovitud dimensioonidega toode.

Temperatuurigradiendid ja pinged

SLM protsessi käigus esinevad detailis kõrged temperatuurigradiendid, mistõttu tekivad jääkpinged. Pinged tekivad lokaalse paisumise ja kokkutõmbumise tõttu. Mida kõrgem on detail, seda suuremad on üldjuhul jääkpinged, kuid see oleneb ka detaili geometriast. Metallil soojendamisel laseriga hakkab see paisuma ning paisuva osa ümbruses tekivad survepinged. Kui need ületavad materjali voolavuspääri, surutakse ülemine kiht plastselt kokku. Jahtumisel tõmbub paisunud osa kokku, moodustab paindenurga alumise metallikihi suunas (vaata sele 1.5 „Jahtumine“) ning tekitab seal survepingeid, samas kui jahtuvas osas endas tekivad tõmbepinged. Taolist pingete tekkimise mehhanismi nimetatakse temperatuurigradiendi mehhanismiks (TGM – *temperature gradient mechanism*), sest on põhjustatud kõrge lokaalse temperatuurigradiendi poolt (Mercelis et al., 2006). Selle jaoks ei pea materjal sulama, kuid taoline pingete tekkimise mehhanism leiab aset ka SLM'i puhul. TGM on kujutatud selel 1.5.



Sele 1.5. Temperatuurigradiendi mehhanismi (TGM) skeem. Allikas: (Merçelis et al., 2006)

Jääkpinged detailis võivad põhjustada deformatsioone ja probleeme detaili hilisemas töös, näiteks enneaegne purunemine. Jääkpingeid on võimalik vähendada termotöötlusega ja substraadi ettekuumutusega, vähesemal määral ka substraadi geomeetria muutmisega, toestamise süsteemi reguleerimisega, skannimisstrateegiaga.

1.3 Seade Realizer SLM 50

Töös kasutatud seade on *Realizer GmbH* poolt tarnitud *Realizer SLM 50*. Selle substraat on ringikujuline ning võimalik on valmistada kuni 70 mm diameetriga ja 80 mm kõrguseid tooteid. *Realizer SLM 50* seadet on eelkõige turundatud kui abivahendit hambakroonide, breketite, ehete ning muude väikeste detailide valmistamiseks, kuid sobib kasutamiseks ka teiste metalldetailide jaoks. Seel 1.6 on pilt seadmdest, tabelis 1.2 on esitatud seadme peamised näitajad. Opereerimiseks ja tootmisprotsessi haldamiseks *Realizer SLM 50* seadmel kasutatakse *Realizer GmbH* tarkvara *ROperator*. 3D mudelite ettevalmistamiseks, tootmisparameetrite määramiseks ning tugede genereerimiseks sama tootja tarkvara *RDesigner*.



Sele 1.6. Selektiivse lasersulatuse seade *Realizer SLM 50*. Allikas: www.realizer.com

Tabel 1.2. *Realizer SLM 50* parameetrid

Kihi paksus	20 - 50 μm
Laseri tüüp	Fiiberlaser
Laseri võimsus	6 - 120 W
Elektritoide	16 A, 230 V
Võimsus	1 kW
Gaasitarve	ca 30 l/h
Mõõtmed	500 mm x 800 mm x 700 mm
Mass	100 kg

1.4 SLM protsessiparameetrid

SLM tehnoloogias on lõpptoote kvaliteeti mõjutavaid sisend- ja väljundparameetreid hinnanguliselt üle 50. Seetõttu on protsessis asetleidvate nähtuste füüsikalise olemuse ja põhjuste väljaselgitamine ning optimaalsete protsessiparameetrite terviklik määramine suur väljakutse (Spears et al., 2016). Parameetrid on omavahel tugevalt seotud. Üksikute parameetrite muutmine võib protsessi oluliselt muuta. Näiteks lähtepulbri suurem pakketihedus soodustab tootmiskambris soojusjuhtivust, vähendades detailis sisepeingeid, deformatsioone ja poorsust, kuid ühtlasi väheneb tihedamas piirkonnas laseri poolt edasiantava energia neeldumine (Gusarov et al., 2005). Paljusid parameetreid korruga

optimeerida on keerukas, enamasti keskenduvad tööd vaid mõnedele, jättes ülejäänud konstantseks.

1.4.1 Parameetrite kategoriseerimine

2015. aastal avaldas Ameerika Ühendriikide Rahvuslik Standardite ja Tehnoloogia Instituut (NIST – *National Institute of Standards and Technology*) pulbripõhisest AM tehnoloogiast ülevaatliku raporti, keskendudes protsessiparameetrite mõõtmise ja protsessiohje vajaduste ning võimaluste väljaselgitamisele. Raportis on kontrollitavuse ja omavaheliste seoste seisukohalt välja toodud oluliste protsessi iseloomustavate sisend- ja väljundparameetrite loetelu, mis on tõlgitud kujul leitav käesoleva magistritöö lisast 1. See on üks viis parameetrite gruppidesse jaotamiseks. SLM protsessiga seotud sisendparameetreid on võimalik kategoriseerida ka järgmiselt (Gibson et al., 2010):

- laseriga seotud parameetrid, näiteks laseri võimsus, laserkiire diameeter, pulsi kestvus, pulsisagedus;
- skannimisega seotud parameetrid, näiteks skannimise kiirus, sulatusridade vahekaugus, skannimisstrateegia;
- pulbriga seotud parameetrid, näiteks osakeste kuju, osakeste suurus ja suuruse jaotus, pulbri pakketihedus, ühe pulbrikihi paksus, materjali omadused;
- temperatuuriga seotud parameetrid, näiteks pulbri temperatuur tootmiskambris, substraadi temperatuur, temperatuurijaotus tootmiskambris.

Käesoleva töö peamine eesmärk on protsessiparameetrid optimeerida selliselt, et toote tihedus ning mehaanilised omadused oleksid võimalikult kõrged.

1.4.1 Kõrge tiheduse saavutamine

Kuna eesmärk on vähendada detaili poorsust, käsitleti käesolevas töös peamisi poorsust otseselt mõjutavaid parameetreid. Nendeks on:

- laseri võimsus (*LP – laser power*);
- skannimise kiirus (*SS – scanning speed*);

- sulatusridade vahekaugus (HD – *hatching distance*);
- pulbrikihi ehk detaili ühe ristlõike paksus (LT – *layer thickness*).

Laserkiir ei kiirga energiat konstantselt, vaid teeb seda teatud vahemaa tagant teatud aja kestel diskreetsete tsüklitena. Seetõttu jaguneb skannimise kiirus SS omakorda:

- punktikauguseks (PD – *point distance*)
- ja sulatusajaks (ET – *exposure time*).

Punktikaugus on vahemaa, mille laserkiir läbib kahe sulatuse vahel. Sulatusaeg on aeg, mille jooksul laser kiirgab energiat pärast ühe punktikauguse läbimist. Skannimise kiirus arvutatakse jagades punktikaugus sulatusajaga:

$$SS = \frac{PD}{ET} , \quad (1.1)$$

kus SS – skannimise kiirus, mm/s

PD – punktikaugus, mm

ET – sulatusaeg, s

Seega on peamisi käesolevas töös vaadeldud tootmisparameetreid kokku viis. Lisaks viidi läbi eksperimendid muutes laseri fookuskaugust ja tootmiskambris olevat inertgaasikeskkonda.

Eelnimetatud parameetrid (LP , HD , LT , PD , ET) määravad suures osas konkreetsele lähtematerjalile konkreetsetes tootmiskeskkonnas üleantava energiahulga. Nendel baseerub energiatiheduse valem, mis näitab, kui palju energiat antakse teoreetiliselt edasi lähtematerjalile või juba osaliselt valminud detailile ning lähtematerjalile summaarselt ühe ruumalaühiku kohta. Energiatihedus arvutatakse valemiga:

$$E_A = \frac{LP}{SS \cdot HS \cdot LT} , \quad (1.2)$$

kus E_A – energiatihedus (tuntud ka Andrew numbrina), J/mm³

LP – laseri võimsus, W

SS – skannimise kiirus, mm/s

HD – sulatusridade vahekaugus, mm

LT – pulbrikihi paksus, mm

Antud mudel on lihtsustatud ning jätab arvesse võtmata arvukalt asjaolusid, näiteks valguse neelduvus materjalis, pulbri karakteristikud, substraadi ning tootmiskeskonna temperatuur, gaasikeskkond tootmiskambris ja muud. Samas on just parameetrite paljususe ja nende omavaheliste keerukate seoste tõttu osutunud energiatiheduse valem praktiliseks abivahendiks sobivate tootmisparameetrite määramisel (Gibson, 2010). Seda eelkõige olukordades, kus muud tingimused, eelkõige lähtematerjal ja kasutatav seade on fikseeritud. Energiatihedusel on tõendatud mõju detaili tihedusele ja seeläbi ka tugevusele (Kruth et al., 2010).

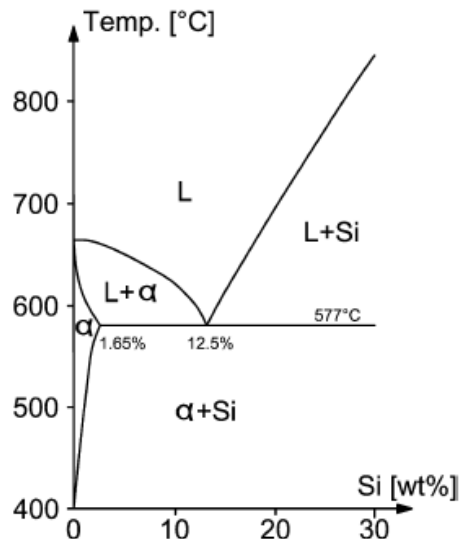
1.5 Alumiiniumsulamite selektiivne lasersulatus

SLM ja SLS kohta on viidud läbi uuringuid erinevate teadlaste poolt. Käesolevas peatükis on ülevaade tähelepanekutest eksperimentide kohta, mis on läbi viidud alumiiniumsulameid, eriti AlSi10Mg, kasutades. Kõigepealt tutvustatakse sulamit AlSi10Mg.

1.5.1. Sulami AlSi10Mg lühitutvustus

AlSi10Mg on valusulam, mida tüüpiliselt kasutatakse õhukeseseinaliste ja kompleksse geomeetriaga detailide puhul. Hea vedelvoolavus ning vähene kogukahanemine tardumisel tagavad selle hea valatavuse. Selektiivse lasersulatusega valmistatud AlSi10Mg detailide järeltöötlusena saab kasutada lõiketöötlust, keevitamist, traaterosiooni ja teisi tööstustehnoloogiaid. Populaarseks muudavad sulami veel hea korrosioonikindlus, võrdlemisi madal detailide kaal, kõrge tugevus ja kõvadus, hea soojusjuhtivus. AlSi10Mg on eutektikumilähedase koostisega sulam, Al – Si faasidiagramm on esitatud seel 1.7.

Räni ja magneesiumi lisamise kasulikkus alumiiniumile seisneb selles, et sulamis tekib valujärgsel termotöötlusel magneesiumsilikaat Mg_2Si , mis aitab kaasa kõrge tugevuse ja pinnakõvaduse saavutamisele. SLM'is kasutatava AlSi10Mg pulbri tüüpiline keemiline koostis on esitatud tabelis 1.3. See vastab standardile DIN EN 1706:2010.



Sele 1.7. Al-Si faasidiagramm. Allikas: (Kammer, 2009)

Tabel 1.3. SLM tehnoloogias kasutatava AlSi10Mg tüüpiline keemiline koostis. Elementide osakaal väljendatud protsentuaalse osana sulami massiühiku kogukaalust

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Al
9 - 10	≤ 0,55	≤ 0,05	≤ 0,45	0,20 - 0,45	≤ 0,05	≤ 0,10	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,15	Ülejäänu

Valamisel kasutatakse ka kõrgema rauasisaldusega (kuni 2 %) AlSi10Mg sulameid. Materjali tüüpilised valamisjärgsed omadused on esitatud tabelis 1.4. Sulami soojusjuhtivus on ligikaudu 113 W / m·K ning valguse neelduvus on alumiiniumile omaselt madal, tagasi peegeldub orienteeruvalt 90 % valgusest.

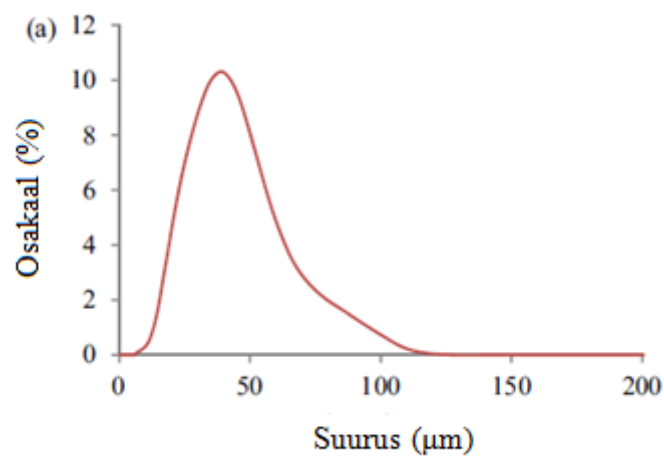
Tabel 1.4. AlSi10Mg tüüpilised valamisjärgsed omadused. Allikas: CMSE 2008-013 (CSIRO technical data sheets for heat treated aluminium high pressure die castings)

Omadus	Valatud	Valatud + T6 termotöötlus
Tõmbetugevus R_m	300 - 350 MPa	330 - 365 MPa
Voolavuspiir $R_{p0,2\%}$	160 - 185 MPa	285 - 330 MPa
Pikenemine ϵ	3 - 5 %	3,5 %
Elastsusmoodul E	71 Gpa	71 GPa
Kõvadus HV	95 - 105	130 - 133

SLM tehnoloogias kasutatava AlSi10Mg pulbriosakeste suurus jääb alla 100 µm. Üks Euroopa tuntumaid AM tehnoloogia seadmete ja materjalide tarnijaid EOS sätestab enda tootespetsifikatsioonis, et pulbriosakese maksimaalne suurus on 106 µm. Enamike osakeste

suurus pulbris jääb siiski alla 50 μm ja osakese keskmine suurus on 25 – 45 μm . Seel 1.8 on esitatud tüüpiline pulbriosakeste suuruse jaotus pulbris.

Mida sfäärilisemad ja siledama on pulbriosakesed, seda parem on pulbri voolavus tootmiskambris pulbri pealekandmisel ja tasandamisel ning ühtlasem pulbrikiht substraadil (Kempen et al., 2011). Ühtlasem pulbrikiht tagab toote parema kvaliteedi. Mida ebakorrapärasema kujuga on pulbriosakesed, seda suurem on nende välispindala suhe ruumalasse, mistõttu need ka oksüdeeruvad ruumalaühiku kohta rohkem.



Sele 1.8. Pulbriosakeste suuruse jaotumine AlSi10Mg pulbris. Allikas: (Aboulkhair et al., 2014)

1.5.2 Materjali tihedus

Energiatiheduse mõju poorsusele

Katsetuste tulemused näitavad, et mida suurem on (mingi piirini) tootmisel pulbrile edasiantav energiatihedus, seda kõrgem on toote suhteline tihedus (Olahanmi et al., 2015). Eksisteerivad piirid, millest kõrgemad energiatihedused lisakasu ei too või osutuvad kahjulikuks toote kvaliteedile. Eriti just alumiiniumi puhul on sageli ebapiisava materjalitiheduse saavutamise põhjuseks madal energiatihedus. AlSi12 sulamil on ühe uuringu kohaselt kriitiliseks punktiks 67 J/mm^3 . Sellest suuremate energiatiheduste kasutamisel poorsus tõusis (Ibid., 2015). Energiatiheduse väärtus ei oma käesoleval juhul praktilist otstarvet, sest energiatiheduse valemit saab kasutada vaid ühetaoliste tingimuste juures läbi viidud katsete võrdlemisel, kuid huvipakkuv on tähelepanek, et sellest kõrgemate

energiatiheduste juures kasvas detaili poorsus ümarate metallipiiskade tõttu. See leidis tõenäoliselt aset materjali pikendatud aja vältel vedelas faasis olemise tõttu (Olakanmi et al., 2011). Kriitilisest piirist madalamate energiatiheduste kasutamisel ei sulanud lähtematerjali pulbriosakesed piisavalt. Teisalt on katsetulemused AlSi10Mg sulami puhul näidanud, et piiskade teke toimub ka suuremate skannimise kiiruste ehk madalamate energiatiheduste juures, sest vedel sulam käitub kiire skannimise tõttu ebastabiilselt ning tekivad pritsmed, mis ümarate piiskadena tarduvad (Aboulkhair et al., 2014).

Vesinikust põhjustatud poorid

Väiksemaid ümaraid poore põhjustada võivat vesinikku tekitav alumiiniumi reaktsioon veeauruga on (Weingarten et al., 2015):

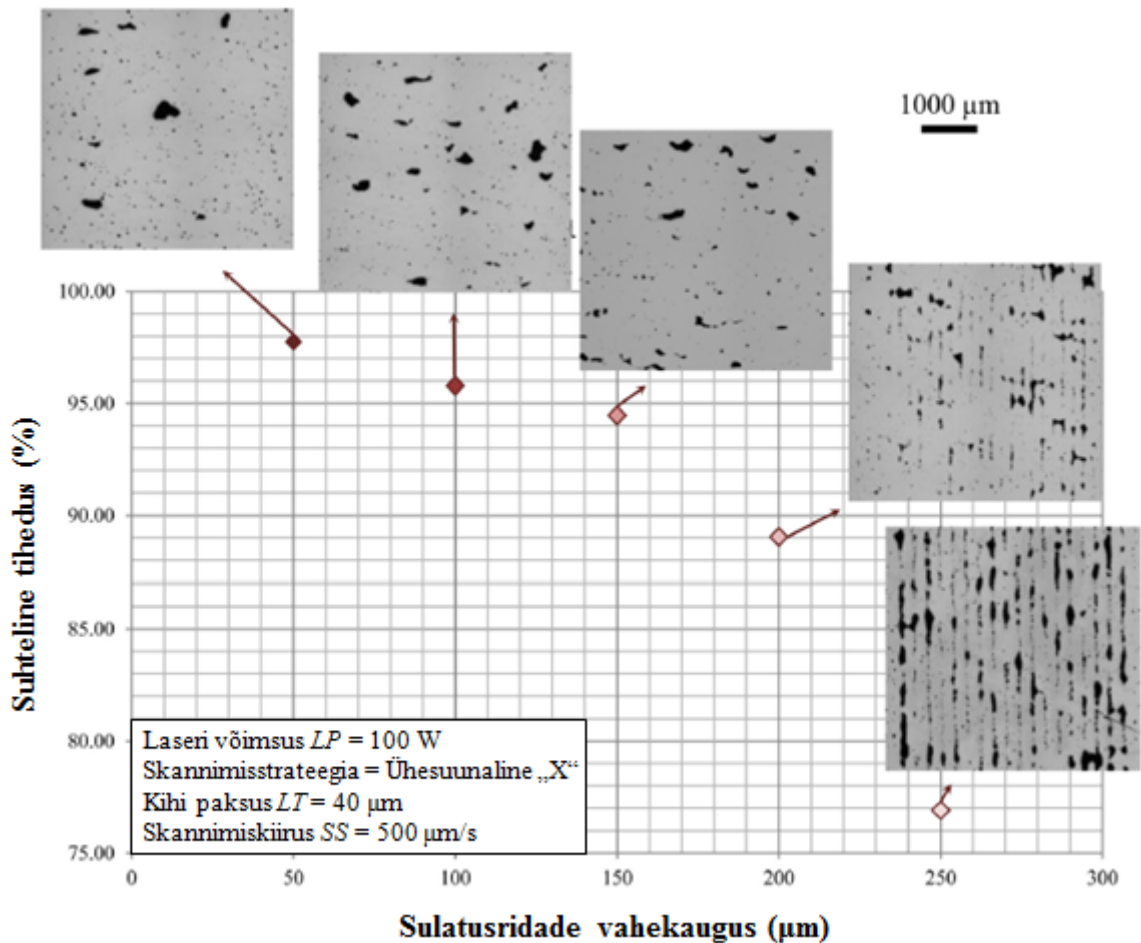


Seejärel laguneb kaheaatomiline molekul:



Poore on võimalik vähendada pulbri kuivatamisega (Ibid., 2015). AlSi10Mg puhul on pulbrit 200 °C juures kuivatades vähendatud poore 50 % võrra. Laseriga kuivatamisel skannitakse igat kihti enne täisvõimsuse kasutamist väga madala võimsusega laseriga. Soovituslik on 50 W, mis indutseerib ka pulbriosakeste vähese paakumise. Kasutades ühekordset skannimist võimsusega 910 W (Nd:YAG laser) ning eelskannimist 50 W ja lõplikku skannimist 910 W laseriga, on viimase variandi puhul vähendatud metallurgilisi poore mitmekordselt. Kahekordselt 910 W võimsusega skannimine poorsusele mõju ei avalda (Ibid., 2015).

Ka teises uuringus on erinevate skannimisstrateegiate kasutamise mõju hindamisel AlSi10Mg sulamile leitud, et parima tulemuse annab eelpaagutamisega skannimine (Aboulkhair et al., 2014). See tähendab, et igat kihti skannitakse kaks korda – esimene kord madalama võimsusega ehk eelpaagutades, teine kord täisvõimsusega. Skannimisstrateegiate kirjeldus ja saadavaid tulemusi iseloomustavad pildid on leitavad lisas 2. Käesolevas magistritöös piirduti iga ristlõike ühekordse ühesuunalise skannimisega, kuigi toodeti mõned katsekehad ka eelpaagutuse meetodil.



Sele 1.9. AlSi10Mg suhtelise tiheduse sõltuvus sulatusridade vahekaugusest. Allikas: (Aboulkhair et al., 2014)

Protsessiparameetrite valik

Käesoleva tööga sarnaseim uuring on läbi viidud Nottingham'i Ülikoolis (Aboulkhair et al., 2014). Lähtematerjalina kasutati AlSi10Mg pulbrit ja tootmiseseadmena *Realizer SLM 50* selektiivse lasersulatusüsteemi. Hoides ülejäänud parameetreid konstantsena, selgus, et sulatusridade vahekauguse *HD* maksimaalne väärtus võib olla 150 µm. Sellest suuremate väärtuste juures tekkisid piklikud skannimisesuunalised poorid, mille põhjuseks on pulbri ebapiisav sulamine kahe sulatusrea vahel. Selet 1.9 on näidatud antud katsetuse ülejäänud parameetrid ja katsedetaili suhtelise tiheduse sõltuvus sulatusridade vahekauguse *HD* väärtusest. *HD* väärtuste 50 µm ja 100 µm mõju tulemusele on sarnane. Eksperimentides, milles muudeti skannimise kiiruse *SS* väärtust 250 – 1000 mm/s vahel jättes ülejäänud parameetrid konstantseks, saavutati katsedetailile poorsusega 2 – 5 %. Madalama skannimise kiiruse juures domineerisid väiksed (diameeter < 100 µm), sfäärilise kujuga poorid, kõrgema skannimise kiiruse juures suuremad irregulaarse kujuga poorid ebapiisavast sulamisest või

liiga kiirest tardumisest, mis takistab pooride täitumist vedelas faasis sulamiga. Kihi paksus LT peab olema piisavalt madal, et tagada täielikku sulamist ja metallis olevate gaasimullide jõudmist pinnale. Samas tõuseb LT väärtust langetades tootmisaeg. LT ei tohiks olla väiksem, kui on enamike pulbriosakeste suurus.

Protsessiparameetrite seosed materjali tihedusega on keerukad. Ühe konkreetse parameetri mõju omadustele sõltub teiste parameetrite väärtusest. Seetõttu, kui puudub täielik sobivate sisendparameetrite loetelu konkreetse seadme ja konkreetse materjali jaoks, võib uuringuid lugedes leida häid suuniseid, kuid kindlalt toimivad parameetrid saab siiski vaid katsetades. Üks sobivamaid lähenemisi protsessiparameetrite optimeerimisele, eriti algusjärgus, kus puudub piisav ettekujutus sobivatest väärtustevahemikest, on statistilise katsete planeerimise (DoE - *Design of Experiment*) kasutamine (Read et al., 2014).

1.5.3 Oksüdeerumine ja tootmisatmosfäär

Alumiiniumsulamite kerge oksüdeerumise tõttu võib tootmiskambris olev hapnik langetada toote kvaliteeti. Detaili pinnale tekkiv oksiidikiht takistab märgumist järgmise sulametallikihiga. Tulemuseks on kihtide ebapiisav ühinemine, ümarate piiskade teke ja poorid (Wang et al., 2014). Oksiidid esinevad ka lähtematerjalis ning võivad jääda detaili sisse sulametalli pinna turbulentsse voolamise tõttu (Olahanmi et al, 2015). Detaili sisse jäävad oksiidikihid võivad hiljem olla pragude tekkimise põhjuseks. Alumiiniumi SLM'i tootmisatmosfääri valikut puudutavaid uuringuid on avaldatud vähe. Tootes SLM tehnoloogiat kasutades identsete sisendparameetritega katsedetailid lämmastikus ja argoonis, inertgaaside erinevat mõju detaili omadustele ei leitud (Wang et al., 2014). Saavutatud tihedus, kõvadus ja plastsus olid sarnased.

6061- Al_2O_3 alumiiniumkomposiidi paagutamisel vaakumis, argoonis ja lämmastikus on leitud, et argoon- ja vaakumkeskkondade vahel erinevust ei ole ning lämmastik annab poorseima tulemuse (Jha et al., 1988). Alumiiniumsulamite (mittekomposiidid) paagutamisel on lämmastiku kasutamine osutunud kasulikuks tänu alumiiniumnitriidi tekkele, mis vähendab pooridesisest rõhku ning soodustab pooride täitumist (Schaffer et al., 2006). SLM tehnoloogias kasutatakse nii argooni kui ka lämmastikku. Oksiidide teket alumiiniumi SLM tootmisel ei ole täielikult võimalik takistada. See on üks põhjustest, miks alumiiniumi puhul

tuleb kasutada võrdlemisi kõrgeid energiatihedusi – see aitab lõhkuda oksiidikihte. Oksiidide tekkimise mehhanismid SLM's on teema, mis vajab täiendavat uurimist.

1.5.4 Mehaanilised omadused

Rakendades AlSi10Mg sulami tootmisel parameetreid laseri võimsus $LP = 200$ W, skannimise kiirus $SS = 1400$ mm/s ja sulatusridade vahekaugus $HD = 105$ µmm on saavutatud detaili suhteline tihedus 98,5 %, tõmbetugevus ligikaudu 390 MPa, pikenemine 5,5 % ja kõvadus 127 HV (Kempen et al., 2011). XY (skannimise suund) ja Z (detaili vertikaaltelg) suundade puhul tõmbetugevused ei erinenud, kuid pikenemine oli Z suunas 2 % madalam. Z suuna puhul on detaili äärtes sulatusridade algustest ja lõppudest tulenevad poorid, mis suurte tõmbejõudude juures võivad olla pragude algallikaks.

Kasutades energiatihedust 60 J/mm³ ja laseri võimsust 175 W ning teisi parameetreid vastavalt kohandades, on AlSi10Mg puhul saavutatud tõmbetugevus 330 MPa voolavuspiiriga 250 MPa ja pikenemisega 1,4 % (Read et al., 2014). Leiti, et optimaalne energiatihedus on 60 J/mm³ ja detaili tõmbamisel Z ja XY suundades olulist erinevust tulemustes ei ole.

AlSi10Mg puhul saavutati kõvadusi kuni 140 – 150 HV kasutades lasereid võimsusega 500 – 900 W (Buchbinder et al., 2011). Käesolevas töös kasutatud laseri võimsus oli kuni 100 W. Üldiselt on optimaalsete SLM protsessiparameetrite juures toodetud alumiiniumdetailide kõvadus kõrgem valudetailide kõvadusest SLM tehnoloogias aset leidva kiire sulamise ja tardumise tõttu. Ka saavutatav tõmbetugevus on optimaalsete parameetrite korral parem valudetailide omast.

1.5.5 Pinnakaredus

Pinnakaredust mõjutavate parameetrite teemal on teadusartikleid suhteliselt vähe. Ühes uuringus on laseri võimsuste 170 – 200 W juures mõõdetud detailide pinnakareduseks 17 – 27 µm (R_a) (Kempen et al., 2011). Sarnased väärtused on mõõdetud ka teises, alumiiniumsulamite laserpaagutamist käsitlevas uuringus (Calignano et al., 2013). Võib järeldada, et SLM tehnoloogiaga toodetud detailide pinnakaredus on suurem konventsionaalsete tehnoloogiatega toodetud detailide omast ning SLM detailide pind vajab

järeltöötlust. On leitud, et kõige suurem mõju pinnakaredusele alumiiniumi tootmisel on skannimise kiirusel (Ibid., 2013). Kõrge võimsusega laserite kombineerimine suure skannimiskiirusega on aidanud saavutada madalamat pinnakaredust (Olahanmi et al., 2015).

1.5.6 Alumiiniumsulamite ja puhta alumiiniumi võrdlus

Võrreldes SLM tehnoloogias õhuga atomiseeritud puhta alumiiniumpulbri, inertgaasiga atomiseeritud puhta alumiiniumpulbri, veega atomiseeritud AlMg_{5,7} sulami, veega atomiseeritud AlMg₆ sulami ja inertgaasiga atomiseeritud AlSi₁₂ sulami kasutatavust, on uuringu tulemusel kahtlemata sobivaim AlSi₁₂ (Olahanmi et al., 2013). Erinevus tuleneb suuresti sellest, et atomiseeritud AlSi₁₂ pulbriosakesed on kõige sfäärilisemad. Teised pulbrid kalduvad irregulaarse kujuga osakeste tõttu rohkem oksüdeeruma ning vajavad sulamiseks suuremaid energiatihedusi. Räni lisamine alumiiniumile vähendab sulami viskoossust, tänu millele toimub parem märgumine. Magneesium omakorda vähendab vedelas faasis viibiva alumiiniumsulami pinnapingeid.

1.6 Formula Student

Töö ühe väljundina on eesmärk toota *Formula Student* projekti jaoks 2016. aasta vormeli stabilisaatorvarraste kinnitusdetailid. *Formula Student* on peamiselt tehnikateaduste erialade üliõpilastele suunatud tootarendusvõistlus. See seisneb vormelauto projekteerimises ja ehitamises ning sellega võistlemises. Igal aastal ehitatakse uus vormelauto ja võisteldakse sadade meeskondadega üle maailma. Võistlus seisneb lisaks erinevate rajakatsete läbiviimisele ka projekti turundusplaani, valmistuskulude ja vormeli tehnilise lahenduse hindamises. Eestis, Tallinna Tehnikaülikooli (TTÜ) ja Tallinna Tehnikakõrgkooli (TKTK) üliõpilaste koostöös ehitatud vormelid on läbi aastate saavutanud võistlustel kõrgeid kohti, jõudes esikümnesse või poodiumile.

2016. aasta TTÜ ja TKTK vormelautoga kaasnenud oluline muudatus võrreldes varasemate versioonidega on masina kaalu täiendav langetamine. Seda plaanitakse teha süsinikmonokoki, akupaki ja ülekandesüsteemi kaalude langetamise abil. Uudne on ka 3D-prinditud metallist detailide kasutamine. Vormel töötab nelja elektrimootori jõul, neist igaüks ühes rattarummus. Sõitmise ajal mõõdetakse jooksvalt rooliasendit, vormeli kiirust, iga ratta kiirust ja

gaasipedaali asendit. Nende andmete põhjal arvutab juhtsüsteem, kui palju jõudu on optimaalne ratastesse suunata. Käesoleva töö valmimise ajal oli 2016. aasta vormel veel ehitamisel. Selel 1.10 on näidatud selle mudel. Punastes ringides on käesoleva töö käigus valmistatud detailide asukohad.



Sele 1.10. 2016. aasta tudengivormeli mudel

1.7 Kvadrokooper ELIX-XL

ELIX-XL on *ELI OÜ* toodetav nelja rootoriga mehitamata lennuseade, mille peamine eesmärk on luua ja edastada kõrgekvaliteedilist foto- ja videomaterjali. Pilt *ELIX-XL*'st on esitatud selel 1.11. *ELIX-XL* on võimeline automaatselt maanduma ja õhku tõusma ning iseseisvalt toimima eeldefineeritud viisidel kindlates olukordades, mille tõttu on seda võimalik kasutada igapähele juba paaritunnise koolituse järel. Seadet on võimalik kiiresti kokkupakitud olekust õhku tõusuks ette valmistada tänu modulaarsele tööriistavaba koostamisega disainile. Komplekti kuulub kvadrokooperi juhtimiseks vajalik maapealne kontrolljaam (sele 1.11).

ELIX-XL on mõeldud peamiselt militaarülesannete täitmiseks (piirikontroll, lahingu jälgimine, kahjude hindamine), kuid sobib ka muuks kasutuseks (nt. fotograafia, looduse uurimine).

Kvadrokooperi üks osa on gürostabiliseeritud kaamera (sele 1.11 punases ringis). Kaamerat ümbritseb ABS-st kaamerakorpus, mida omakorda hoiab samast materjalist hoidik. Viimane on näha punases ringis oleva kera külgedel. Hoidiku suurema vastupidavuse saavutamiseks on otsustatud toota see alumiiniumsulamist.



Sele 1.11. Kvadrokopter *ELIX-XL* ja kontrolljaam

2. EKSPERIMENTAALNE OSA

Käesolevas peatükis käsitletakse protsessiparameetrite eksperimentaalset väljatöötamist AlSi10Mg sulami jaoks. Tutvustatakse katsete läbiviimise ja tulemuste mõõtmise meetodeid, analüüsitakse katsetulemusi ning tehakse järeldused.

2.1 Katsete läbiviimise ja katsetulemuste mõõtmise meetodika

Protsessiparameetrite sobivate väärtuste leidmiseks viidi läbi katseseeriad *Realizer SLM 50* selektiivse lasersulatuse seadmel. Läbi viidi 12 katseseeriat ning toodeti 200 katsekeha. Mitmed katsekehad oli võimalik hinnata visuaalselt, eelkõige siis, kui poorsus oli nähtavalt suurem varasemalt mõõdetud katsekehade omast. Teatud juhul ei olnud katsekehad piisavalt tihedad, et neid oleks võimalik ühes tükis substraadilt eemaldada ja mõõta.

Katseseeria tootmiseks vajalike tegevuste loetelu üldistatud kujul on:

1. 3D mudelite teisendamine *.STL* formaati, *.STL* failide laadimine *RDesigner* tarkvarasse
2. Detailide asendi määramine platvormil, tugede genereerimine, tootmisparameetrite määramine detailile ja tugele, mudelite kihtideks jagamine (kõik *RDesigner* tarkvaras)
3. Tootmiskambri eelmisest tootmistsüklist sinna jäänud pulbri eemaldamine
4. Tootmiskambri puhastamine. Kui eelnevas tootmistsüklist toodeti teistsugusest materjalist detaile, tuleb tootmiskamber puhastada eriti põhjalikult
5. AlSi10Mg pulbri lisamine tootmisseadmesse
6. *RDesigner* tarkvaras loodud töopaketi laadimine *ROperator* tarkvarasse, protsessi ettevalmistamine *ROperator* tarkvaras (substraadi soojendus, hapnikutaseme vähendamine tootmiskambris, substraadi lähtekõrguse määramine)
7. Protsessi käivitamine ja jälgimine *ROperator* tarkvara abil
8. Tootmisprotsessi eduka lõppemise korral substraadisoojenduse ja inertgaasi pealevoolu väljalülitamine, detailide jahtumine, substraadi (koos detailidega) eemaldamine tootmiskambrist
9. Detailide eemaldamine substraadilt

2.1.1 Katsete planeerimine

Esimesed kaks katseseeriat viidi läbi parameetritega, mis koostati vastavalt kasutatud kirjandusele, et leida orienteeruvad parameetrite väärtused, mille põhjal katseid jätkata. Seejärel rakendati katsete plaanimist kasutades tarkvara *Design-Expert 7.0*. Kasutati kolme faktorit ehk sisendparameetrit ja ühte vastust ehk väljundparameetrit, milleks oli detaili tihedus. Sisendparameetriteks olid punktikaugus *PD*, sulatusaeg *ET* ja sulatusriidade vahekaugus *HD* või *PD*, *ET* ja laseri võimsus *LP*. Kasutati *Central Composite* disaini ehk määrati iga sisendparameetri kohta üks potentsiaalselt sobiv väärtus, seejärel genereeriti selle ümber suuremaid ja väiksemaid väärtusi. Kolme sisendparameetri üksikväärtustest moodustunud kombinatsioonid määrati katseseeria detailide tootmisparameetriteks. Tekkinud katseplaani sisaldas ka ekstreemalseid parameetrite väärtusi, et vältida kitsas väärtuste piirkonnas opereerimisest tulenevat viga.

Pärast katsekehade tiheduse mõõtmist analüüsiti DoE tarkvara abil erinevate sisendparameetrite mõju tulemusele. Täiendav analüüs viidi läbi ka tarkvaraväliselt. Mõnel juhul kasutati sama katseplaani mitmekordselt ning varieeriti katseplaaniväliseid parameetreid, näiteks *LT*^d või intertgaasikeskkonda, et määrata varieeritava parameetri mõju tulemusele. Pärast tihedust maksimeerivate parameetrite leidmist kasutati neid tõmbekatsekehade valmistamiseks, et hinnata materjali omadusi tõmbeolukorras. Mõnedel tõmbekatsedetailidest mõõdeti täiendavalt täiendavalt ka tihedus. Lisaks hinnati pinnakaredust, kõvadust ja kuumisostaatpressimise mõju mehaanilistele omadustele.

2.1.2 Tiheduse määramine

Katsekehade tihedus määrati *ImageJ* pilditöötlustarkvara abil või *Archimedes*'e meetodil. Väiksemate, kuubiliste katsekehade mõõtmed on 5 x 5 x 5 mm ja neid on arvukalt, mistõttu on liialt aeganõudev need igalt küljelt lihvida *Archimedese* meetodi kasutamiseks (kordusmõõtmisel võib eelmisest korrast detaili pinnale jäänud vedelik põhjustada ebatäpsusi – eriti väga madalakaalulistel detailidel).

Kuubilised katsekehad lihviti substraadi küljes olevana või polümeervaiguga ühendatult *Struers Planopol-3* ja *Buehler Phoenix 4000* lihvmasinatel pealmselt küljelt. Lihvitud külgi

uuriti valgusmikroskoobiga *Zeiss Axiovert 25*. Tarkvara *Omnimet* abil tehti valgusmikroskoobipildist ülesvõtted, mida pilditöötlustarkvaraga analüüsisid määrati poorsus. *Archimedes* 'e meetodit kasutati tõmbekatsekehade tiheduste määramisel.

2.1.3 Tõmbeomaduste määramine

Katsekehade tõmbomadused määrati hüdraulilisel tõmbeseadmehel *Instron 8802*, mille tõmbejõud on kuni 250 kN. Tõmbediagrammilt määrati tõmbetugevuse, voolavuspiiri ja suhtelise piknemise väärtused. Tõmbetugevus on maksimaaljõule vastav mehaaniline pinge.

$$R_m = \frac{F_m}{S_o} \quad , \quad (2.1)$$

kus R_m - tõmbetugevus, MPa

F_m - maksimaaljõud, N

S_o – teimiku algristlõikepindala, mm²

Voolavuspiir on pinge, mille juures jääkpiknemine saavutab protsentides etteantud väärtuse, käesoleval juhul 0,2 %. Suhteline piknemine on teimiku piknemine protsentuaalselt oma esialgse pikkuse suhtes.

2.1.4 Kõvaduse määramine

Kõvadus määrati Vickers'i meetodil seadmehel *Zwick-Indtente 5030 SKV*. Meetod seisneb neljatahulise teemantpüramiidi surumises materjali sisse. Teemantpüramiidi surutakse jõuga 9,8 – 980 N ehk 1 – 100 kgf. Üldjuhul koormatakse mõõdetavat materjali 10 – 15 sekundi jooksul. Kõvadusarv määratakse püramiidile toimiva jõu ja teemantist materjali pinnale jäänud jälje pindala suhtega. Vickers'i kõvadusnumbri ühik on kgf/mm², kuid seda ei märgita. Käesolevas töös kasutati teemantpüramiidi materjali sisse surumiseks jõudu 10 kgf ehk 98 N (HV10) koormamise ajaga 10 sekundit.

2.1.5 Pinnakareduse määramine

Pinnakaredust hinnati *Bruker ContourGT* optilise profilomeetri abil. Tähelepanu pöörati R_a väärtusele ehk hälvete aritmeetilise keskmisele. Samuti hinnati pinnakareduste erinevust detailidel visuaalselt.

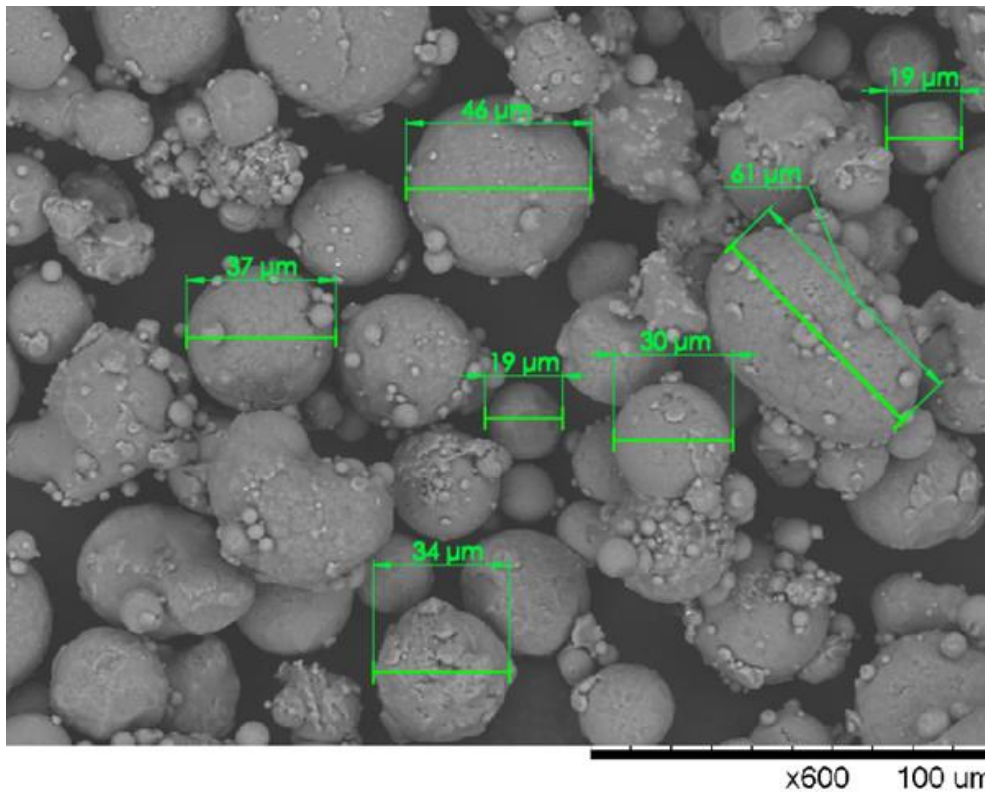
2.1.6 Kuumisostaatpressimine

Toodeti samade parameetritega tõmbeteimikute paarid ning paarist ühel teimikul rakendati järeltöötlusena kuumisostaatpressimist (HIP – *hot isostatic pressing*), seejärel võrreldi teimikute tõmbeomadusi. HIP töötlemisel rakendatakse detailile igast suunast ühtlaselt survet, hoides detaili samaaegselt kõrgel temperatuuril. HIP töötamise abil on võimalik vähendada poorsust ja leevendada jääkpingeid.

2.1.7 Lähtematerjal

Käesolevas töös lähtematerjalina kasutatava AlSi10Mg pulbri skanneeriva elektronmikroskoobiga (SEM – *scanning electron microscope*) tehtud ülevõtte on seel 2.1.

Kasutati *Hitachi TM-1000* SEM seadet. SEM ülevõttelt on näha, et kuigi esineb üksikuid ebakorrapärase kujuga pulbriosakesi, on osakesed üldjoontes sfäärilised. Pulbriosakeste küljes on märgatav hulk väikseid aglomeerunud pulbriosakeste kogumeid. Nii aglomeerunud osakesed kui ka ebakorrapärane kuju tekivad juba pulbri tootmisel atomiseerimise käigus.



Sele 2.1. Töös kasutatud AlSi10Mg SEM ülevõtte. Pulbriosakeste suurused hinnatud ligikaudselt lähtudes pildi mõõtkavast

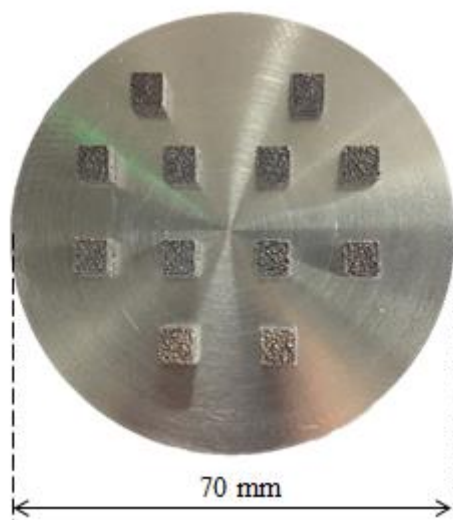
2.2 Protsessiparameetrite mõju tihedusele

2.2.1 Esialgsete parameetrite leidmine

Esimene katseseeria viidi läbi kahe energiatiheduse juures – 47 J/mm^3 ja 78 J/mm^3 . Mõlema energiatihedusega toodeti neli katsekeha. Laseri võimsus LP oli fikseeritud 70 W , kihi paksus LT 50 μm juures. Skannimise kiiruse SS väärtused olid mõlema energiatiheduse puhul erinevad. Sulatusridade vahekauguse HD väärtus oli 200 μm , kuid eksikombel määrati suurem väärtus ning sulatusread ei ühinenud omavahel. Peamiselt seetõttu ei formeerunud mõõdetavaid katsekehasid. Sulatusridade piirkonnas oli näha sulamata pulbrit. Sellest järeldati, et ka energiatihedus ja/või laseri võimsus võisid olla liiga madalad. Samuti vahetati terasest substraat järgmisteks katseseeriateks alumiiniumsubstraadi vastu.

Tabelis 2.1 on esitatud teise katseseeria sisendparameetrid ja tulemused. Teise katseseeria detailid õnnestusid (sele 2.2) ning *ImageJ* tarkvara abil mõõdeti nende tihedus. Tihedused jäid vahemikku $93,45 - 95,18 \%$ teoreetilisest, mis AlSi10Mg sulami puhul on $2,68 \text{ g/cm}^3$.

Parimad tulemused saavutati energiatihedusega üle 100 J/mm^3 . Samas on suhteliste tiheduste mõõdetud väärtuste standardhälvete keskmine väärtus ligikaudu 0,9 % ja kõrgeima ning madalaima tulemuse vahe vaid ligikaudu 1,7 %, mistõttu ei ole võimalik teha kindlaid järeldusi sisendparameetrite mõjust tulemusele.



Sele 2.2. Katseseeria number 2 detailid substraadil

Tabel 2.1. Katseseeria number 2 sisendparameetrid ja detailide tihedus

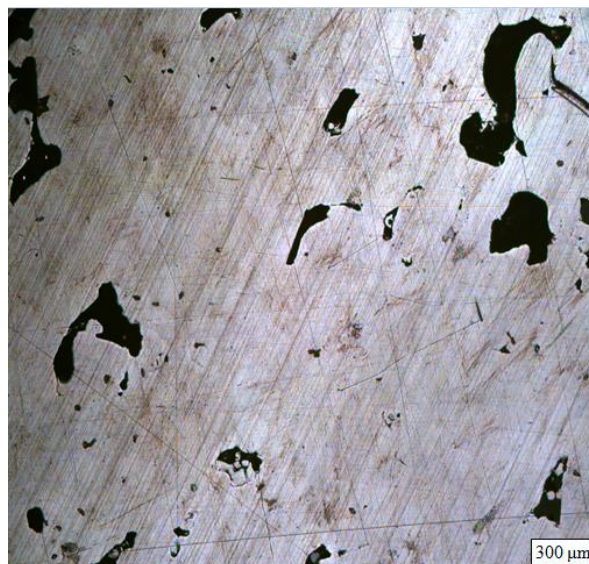
Nr	Tootmisparameetrid						Energiatihedus (J/mm^3)	Tihedus	
	<i>ET</i> (μs)	<i>PD</i> (μm)	<i>LP</i> (W)	<i>LT</i> (μm)	<i>HD</i> (μm)	<i>SS</i> (mm/s)		Keskmine (%)	Standard- hälve (%)
1	400	65	100	50	150	163	82	94,8	0,32
2	400	65	100	50	150	163	82		
3	400	75	100	50	150	188	71	93,5	1,77
4	400	75	100	50	150	188	71		
5	400	85	100	50	150	213	63	95,3	1,02
6	400	85	100	50	150	213	63		
7	600	65	100	50	150	108	123	94,2	0,03
8	600	65	100	50	150	108	123		
9	600	75	100	50	150	125	107	95,2	0,42
10	600	75	100	50	150	125	107		
11	600	85	100	50	150	142	94	93,7	1,26
12	600	85	100	50	150	142	94		

Teisel katseseerial õnnestusid ka madalama, $62,75 \text{ J/mm}^3$ ja $71,11 \text{ J/mm}^3$ energiatihedusega valmistatud detailid. Vahe tulemustes esimese katseseeriaga nende detailide puhul võis lisaks

vähendatud sulatusriidade vahekauguse *HD* väärtusele tekkida ka tõstetud laseri võimsuse *LP* väärtusest. Esimeses katseseerias kasutatud 70 W on tõenäoliselt alumiiniumsulami jaoks vähe. Peaaegu kõik varasemad uuringud alumiiniumi SLM-tootmisest on läbi viidud kõrgemate *LP* väärtuste juures kui 100 W.

93 – 95 % juurde jääv suhteline tihedus on siiski madal. Katsekehade uurimisel valgusmikroskoobiga on näha suuri poore, mille põhjuseks on lähtematerjali ebapiisav sulamine või liigkiire tardumine ilma, et tühimikud jõuaksid sulamaterjaliga täituda. Selel 2.3 on valgusmikroskoobi ülesvõtte teise katseseeria detailist.

Ainus viis energiatihedust suurendada ilma tootmisaega tõstmata on laseri võimsuse suurendamine. Kuna teises katseseerias kasutatud võimsus 100 W on lähedane *Realizer SLM 50* seadme maksimaalsele võimsusele, tähendab käesoleval juhul energiatiheduse tõstmine ka tootmisaja suurenemist. Seetõttu tuleb energiatihedust tõsta tasakaalukalt. Järgnevalt koostati DoE katseplaan, faktoriteks olid sulatusaeg *ET*, punktikaugus *PD* ja sulatusriidade vahekaugus *HD*. Katseplaani loomiseks sisestatud algväärtuste ülevaade on tabelis 2.2. Katseplaani genereerimisel lisati ka ekstremaalsed väärtused, mis on käesolevatest piirväärtustest väljaspool. Loodud katseplaan on käesoleva magistritöö lisa 3. Katseplaani energiatihedused on vahemikus $14 \text{ J/mm}^3 - 200 \text{ J/mm}^3$.

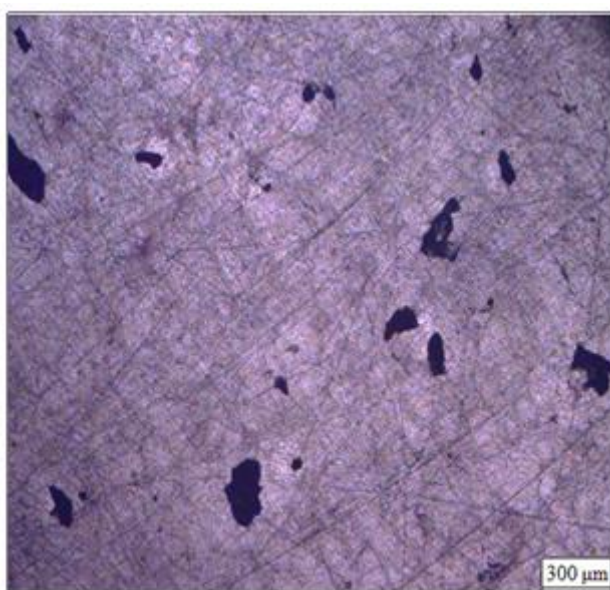


Sele 2.3. Katseseeria number 2, detail number 12

Tabel 2.2. DoE katseplaani algväärtused

Parameeter	Keskne väärtus	Piirväärtused	
		Min	Max
<i>ET</i> (μs)	400	200	600
<i>PD</i> (μm)	75	60	90
<i>HD</i> (μm)	125	100	150
<i>SS</i> (mm/s)	188	150	300
<i>LP</i> (W)	100 (fikseeritud)		
<i>LT</i> (μm)	50 (fikseeritud)		

Tulemustest ilmnes, et kõrgemaid suhtelisi tihedusi saavutati energiatihedusega üle 85 J/mm³. Katsekehade suhteline tihedus jäi vahemikku 77,3 – 97,5 %. Jättes välja 14 J/mm³ energiatihedusega valmistatud detaili, jäi see vahemikku 91,0 – 97,5 %. Paljude detailide suhtelise tiheduse väärtus erines vaid mõne kümnendiku protsendipunkti võrra, mis keskmiselt ligi 1 % mõõtmisveaga arvestades ei võimalda teha järeldusi kõige sobivamate parameetrite kombinatsioonide kohta. Jagades tulemuste kogumi suhtelise tiheduse järgi kaheks, paremad 50% (11 detaili) ja halvemad 50% (11 detaili), on esimese 11 detaili hulgas vaid üks detail, mis toodetud energiatihedusega alla 85 J/mm³, kusjuures 9 suurima tihedusega detaili hulgas ei ole ühtegi sellist. Viimase 11 detaili hulgas on selliseid detaile 6. Selel 2.4 on näidatud optilise mikroskoobi ülesvõtte ühest suurema tihedusega detailist. Viie kõrgeima suhtelise tihedusega katsedetaili tootmisparameetrid on lisas 3 tabeli ridadel 3, 9, 13, 18 ja 20.



Sele 2.4. Katseseeria number 3, detail number 9

2.2.2 Lämmastik- ja argoonkeskkonna võrdlus

Lisas 3 olevale katseplaanile tehti kordustootmine, asendades esialgse inertgaasi lämmastiku argooniga. Eesmärgiks oli uurida, kas muude tingimuste samaks jätmisel on argoonkeskkonnas toodetud detailide suhteline tihedus kõrgem. Lämmastik- ja argoonkeskkonnas toodetud katseseeriade tulemuste üldkokkuvõte on tabelis 2.3. Tabeli koostamiseks eemaldati tulemuste adekvaatsemaks esitamiseks mõlemast katseseeriast madalaima, 14 J/mm^3 energiatihedusega valmistatud katsekeha.

Tabel 2.3. Lämmastik- ja argoonkeskkonnas toodetud katseseeriade tulemuste kokkuvõte

Inertgaas	Suhteline tihedus (%)					
	Keskmine (kogu seeria)	Keskmine (5 parimat)	Kõrgeim	Standardhälve	Madalaim	Standardhälve
Lämmastik	94,9	97,6	97,5	0,71	91,00	0,45
Argoon	94,9	97,4	97,9	0,64	89,50	1,82

Võib järeldada, et lämmastikus ja argoonis toodetud katsekehade suhteline tihedus ei erine märkimisväärselt. Kogu katseseeria keskmine suhteline tihedus oli mõlemal katseseerial sama. Võrreldes tulemusi detailide lõikes, leiti, et lämmastikus valmistatud madalama tihedusega katsekehade tihedus langes argoonis täiendavalt. Käesolevate katseseeriade mõistes keskmiste ja kõrgemate tihedustega detailidel kahe intergaasi võrdluses reeglipärasest erinevust ei leitud. Erinevused jäid üldiselt alla ühe protsendipunkti ja olid mõlemasuunalised.

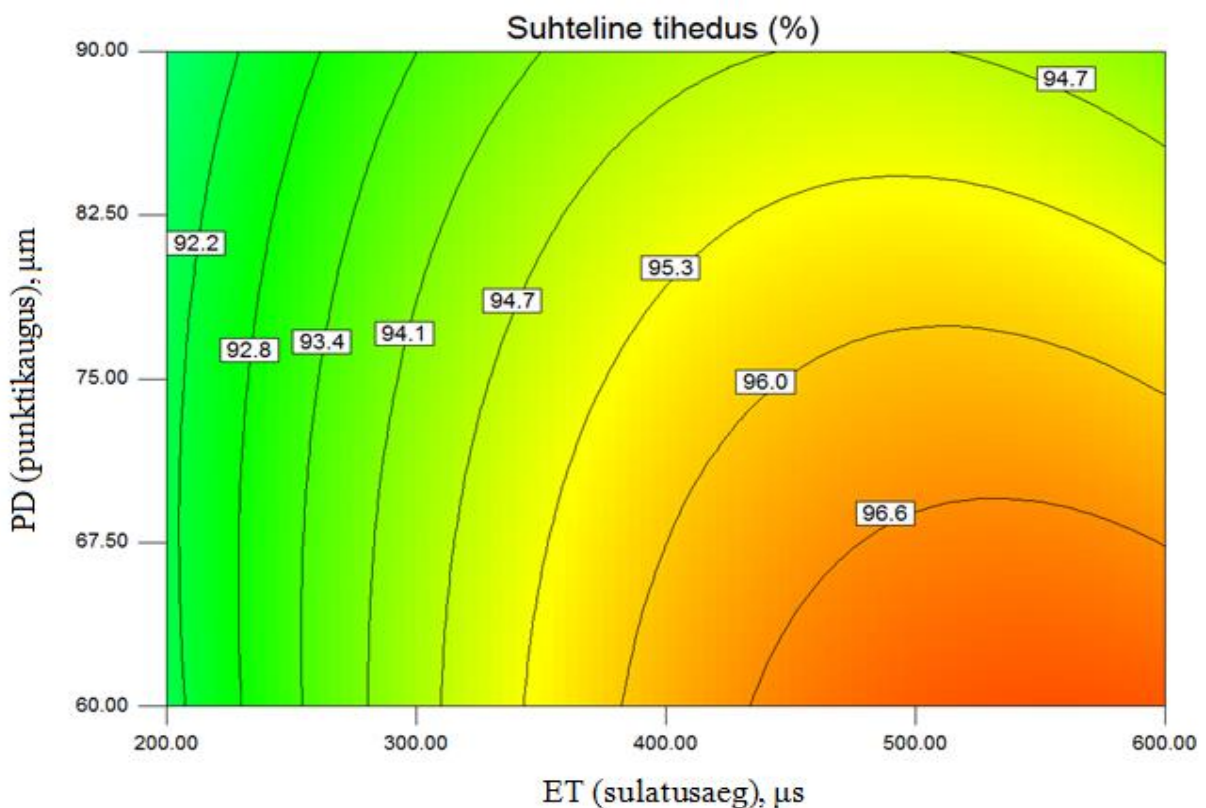
2.2.3 Regressioonanalüüs

Kuna katseseeriade (lämmastik ja argoon) vahel olulisi erinevusi ei leitud, ühendati need regressioonanalüüsi teostamiseks. Eesmärgiks on mõõtepunktide arvu suurendamine, et uurida katseplaani (lisa 3) sisendparameetrite seoseid tulemustega. Regressiooni abil modelleeritakse ühe või enama sisendparameetri mõju ühe sõltuva muutuja väärtusele. Käesoleval juhul on sisendparameetriteks DoE katseplaani faktorid, muutujaks katsekeha tihedus. Regressioonanalüüsi abil ennustatud sisendparameetrite kombinatsioonidele vastavad tulemuste väärtused on graafiliselt esitatud seledel 2.5 – 2.7. Punased alad tähistavad kõrgemate, rohelised alad madalamate tulemustega piirkondi. Graafikutel olevad kontuurid tähistavad ennustatavat tulemust vastavas sisendparameetrite väärtuste piirkonnas. Väärtus on

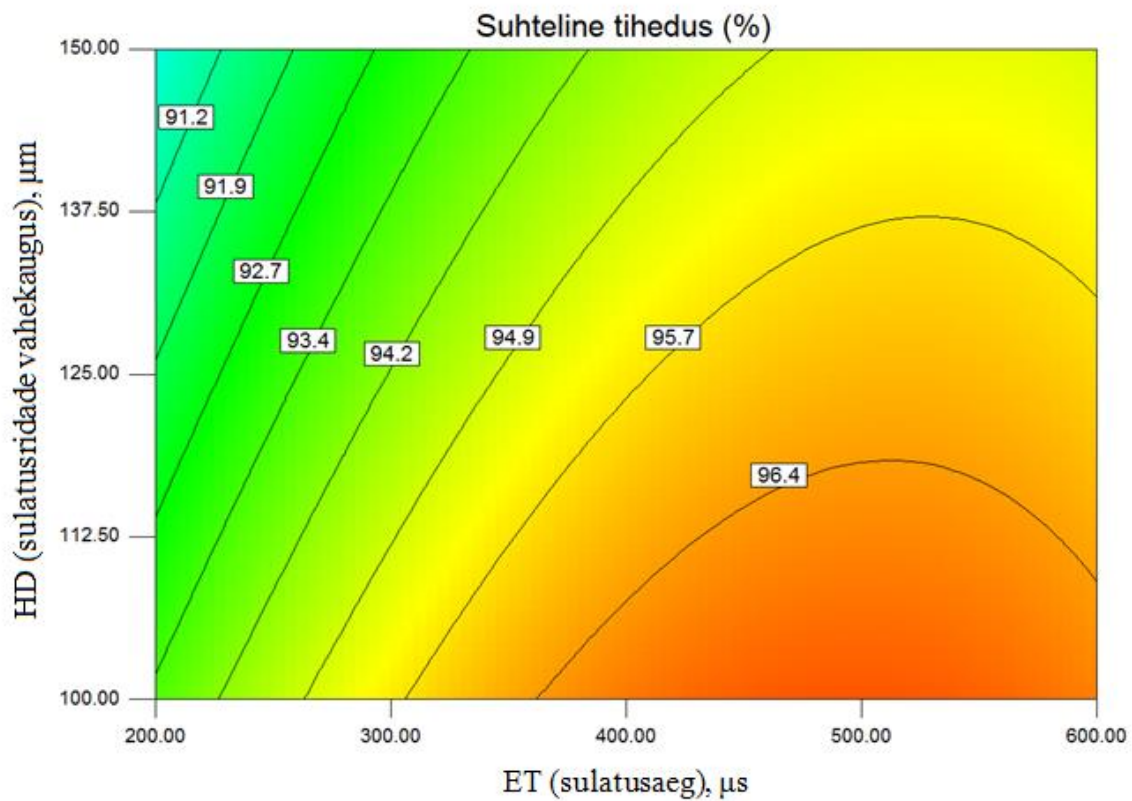
näidatud kontuuril oleva sildiga. Regressioonimudel ja visualisatsioonid on koostatud tarkvaras *Design-Expert 7.0*.

Regressioonimudeli determinatsioonikordaja R^2 väärtus on 0,73. Kohandatud determinatsioonikordaja $R^2_{\text{kohandatud}}$ väärtus on 0,64. Determinatsioonikordaja näitab, kui suur osa tulemuse summaarsest varieerumisest on seletatav regressioonimudeli seostega – käesoleval juhul 73 %. Kohandatud determinatsioonikordajas on determinatsioonikordaja väärtus kohandatud sisendparameetrite arvu ja valimi suurusega ning see on alati väiksem, kui determinatsioonikordaja ise. Soovitav on jälgida kohandatud determinatsioonikordajat.

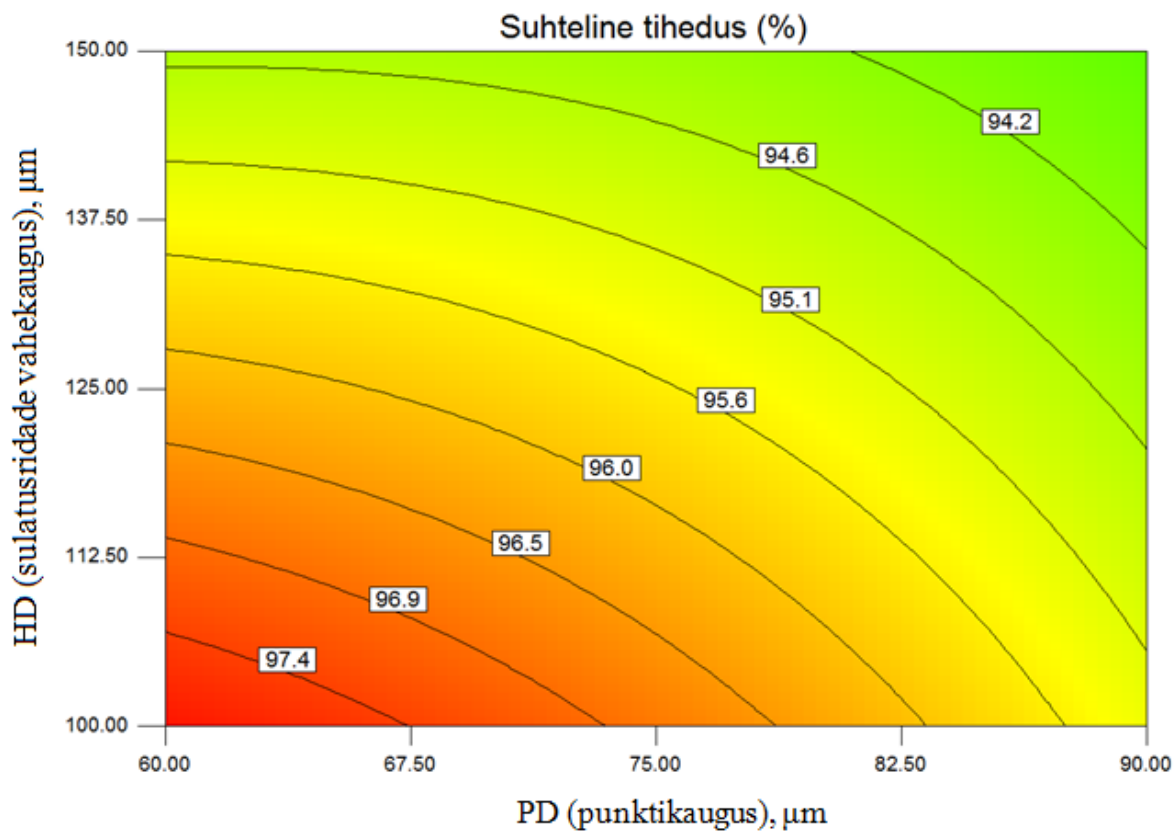
Graafikutelt on näha, et suhtelise tiheduse kõrgemad väärtused asuvad kõrgema *ET* (sulatusaeg), madalama *PD* (punktikaugus) ja madalama *HD* (sulatusriidade vahekaugus) piirkondades. Valemi 1.2 järgi tähendab sisendparameetrite eelkirjeldatud suundades muutmine energiatiheduse tõusu.



Sele 2.5. *ET* ja *PD* seos suhtelise tihedusega



Sele 2.6. *ET* ja *HD* seos suhtelise tihedusega



Sele 2.7. *PD* ja *HD* seos suhtelise tihedusega

Seledel 2.5 ja 2.6 võib täheldada *ET* väärtuse 500 – 550 μs juures ennustatava suhtelise tiheduse vähenemist. See on osaliselt vastukäiv energiatiheduse tõstmise loogikale. Samas on võimalik energiatihedust tõsta läbi teiste parameetrite muutmise, jättes *ET* väärtuse 500 – 550 μs piirkonda. *PD* ja *HD* väärtusi mõõdetakse pikkusühikutes ning nende vähendamine soodustab sulatatavate alade ülekattumist. *ET* on aga sulatusaeg ning ühe ala liiga pikaäagne sulatamine võib kaasa tuua probleeme, näiteks sulamaterjali piiskade teke katsekeha pinnal (*balling*).

Koostatud regressioonmudeli abil püüti ennustada sisendparameetrite väärtusi, mida kasutada katsedetailide suhtelise tiheduse maksimeerimiseks. Selle jaoks spetsifitseeriti sisendparameetrite limiitväärtused. Need on esitatud tabelis 2.4. Mudeli abil arvutatud sobivad sisendparameetrite väärtused on tabelis 2.5. Tulemuse oodatavaks väärtuseks määrati 98 – 100 %, maksimeerides 100 % poole.

Tabel 2.4. Suhtelist tihedust maksimeerivate sisendparameetrite leidmiseks spetsifitseeritud limiitväärtused

Parameeter	Limiitväärtused	
<i>PD</i> (μm)	60	90
<i>ET</i> (μs)	200	600
<i>HD</i> (μm)	85	150
Suhteline tihedus (%)	98	100

Tabel 2.5. Tihedust maksimeerivad parameetrid (arvutatud tarkvara *Design-Expert 7.0* abil)

Lahenduse nr	<i>PD</i> (μm)	<i>ET</i> (μs)	<i>HD</i> (μm)	Arvutuslik suhteline tihedus (%)
1	60	523	85,0	99,5
2	60	521	85,0	99,5
3	60	516	85,0	99,5
4	60	533	85,0	99,5
5	60	528	85,0	99,5
6	60	528	85,2	99,5
7	60	529	85,0	99,4
8	61	525	85,0	99,4
9	60	567	85,0	99,4
10	62	517	85,0	99,3
11	60	565	92,9	99,0

Tulemustest ilmneb, et käesolevate limiitväärtuste raames on võimalik suhtelist tihedust suurendada 99,5 protsendini. Tuleb meeles pidada, et tegu on matemaatilise arvutusega, mis ei pruugi füüsiliselt realiseeruda. Lahenduse *PD* ja *HD* väärtused võrduvad või on ligilähedased tabelis 2.4 määratud miinimumidega. *ET* väärtuse puhul ei pakutud maksimaalset 600 μs , vaid sellest veidi madalamat 516 – 564 μs .

2.2.4 Kihi paksuse mõju suhtelisele tihedusele

Senised katseseeriad on toodetud kihi paksuse (*LT*) 50 μm juures. Et hinnata *LT* mõju, vähendati see 35 mikromeetrini ja viidi läbi täiendav (kokku viies) katseseeria. Võrreldavuse säilitamiseks kasutati lisas 3 toodud katseplaani, katse viidi läbi argooni keskkonnas.

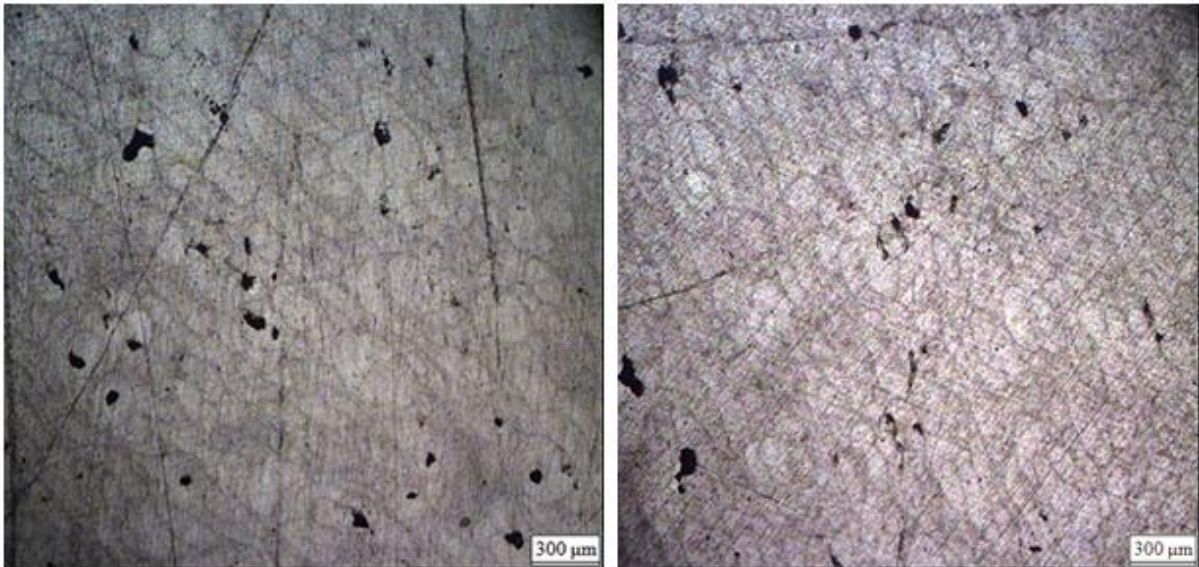
LT väärtusega 35 μm valmistatud katsekehade suhteline tihedus on märgatavalt kõrgem varasemate katseseeriade omast. Tabelis 2.6 on esitatud käesoleva katseseeria võrdlus kahe eelmisega. Võrreldavuse säilitamiseks jäetakse ka käesolevas katseseerias arvutamisel välja madalaima energiatihedusega toodetud detail.

Tabel 2.6. 3., 4. ja 5. katseseeria tulemuste võrdlus. Käesolev katseseeria on märgitud sinisega

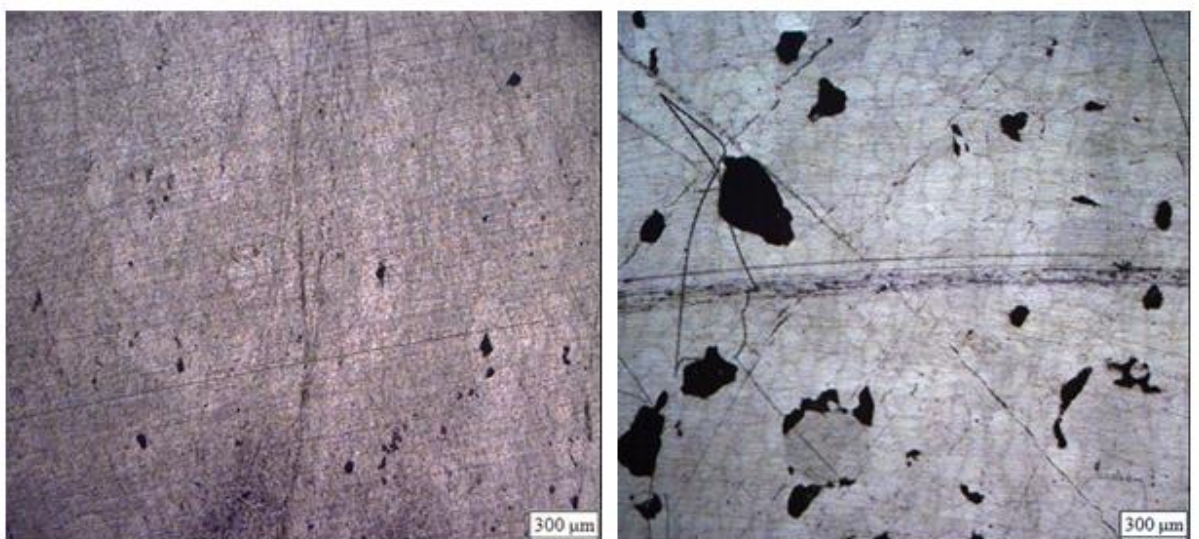
Katseseeria	Suhteline tihedus (%)					
	Keskmine (kogu seeria)	Keskmine (5 parimat)	Kõrgeim	Standardhälve	Madalaim	Standardhälve
3 (lämmastik, <i>LT</i> = 50 μm)	94,1	97,6	97,5	0,71	91,00	0,45
4 (argoon, <i>LT</i> = 50 μm)	94,5	97,4	97,9	0,64	89,50	1,82
5 (argoon, <i>LT</i> = 35 μm)	97,2	98,7	99,3	0,04	94,6	0,86

Väiksema kihi paksusega katseseerial tõusis suhteline tihedus võrreldes varasemate katseseeriatega enamikul katsekehadest. 22'st katsekehast mõõdeti madalam tihedus vaid kolmel, sealjuures jäid vahed alla ühe protsendipunkti. Suurema kihi paksusega katseseeriates mõõdeti katsekeha suhteliseks tiheduseks rohkem kui 97 % neljal (3. katseseeria) ja kuuel (4. katseseeria) katsekehal. Väiksema kihi paksusega katseseerias mõõdeti sama tulemus 15 katsekehal.

Suurema kihi paksusega katseseeriade detailidel on näha peamiselt suuri korrapäratu kujuga tõenäoliselt pulbri ebapiisavast sulamisest tekkinud poore. Madalama kihi paksusega katseseerias on mitmetel detailidel näha peamiselt väikseid (läbimõõt <math>< 100 \mu\text{m}</math>) ümaraid poore (seled 2.7 ja 2.8). Siiski on mõnedel katsekehadel näha suuremaid poore (sele 2.8 parempoolne pilt), millest võib järeldada, et ka LT väärtuse $35 \mu\text{m}$ juures on jätkuvalt oluline ülejäänud parameetritele sobivate väärtuste määramine.



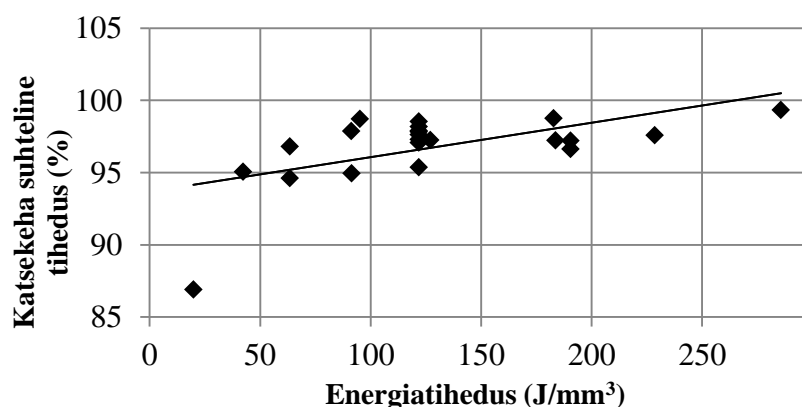
Sele 2.7. Madalama kihi paksusega valmistatud katsekehad (katseseeria nr 5, detailid nr 4 ja 8, $LT = 35 \mu\text{m}$)



Sele 2.8. Madalama kihi paksusega valmistatud katsekehad (katseseeria nr 5, detailid nr 17 ja 10, $LT = 35 \mu\text{m}$)

Madalama kihi paksuse juures sulatatakse korraka väiksemat pulbrihulka. See võimaldab tõenäoliselt lähtepulbri efektiivsemat sulatamist, mis omakorda vähendab poorsust. Samuti aitab väiksem kihi paksus tõenäoliselt kaasa paremale ühendusele kihtide vahel, sest sulatatakse rohkemal määral ka eelmist kihti. Kokkuvõttes on selgelt näha väiksema kihi paksuse väärtuse positiivne mõju katsekehade tihedusele.

Et hinnata, kuidas muutus kihi paksuse vähendamisega katseplaani sisendparameetrite *ET* (sulatusaeg), *PD* (punktikaugus) ja *HD* (sulatusridade vahekaugus) seos suhtelise tihedusega viidi vähendatud kihi paksusega katseseerial läbi regressioonanalüüs. R^2 väärtuseks saadi 0,75 ja $R^2_{\text{kohandatud}}$ väärtuseks 0,57, mis on jaotise 2.2.3 regressioonanalüüsi $R^2_{\text{kohandatud}}$ väärtusest madalam väiksema valimi tõttu. Regressioonimudeli kirjeldatavad seosed jäid üldjoontes samaks jaotise 2.2.3 omadega, mistõttu ei ole nende kohta eraldi graafikuid välja toodud. Eelistatud on kõrgem *ET* ning madalamad *PD* ja *HD* väärtused ehk suurem energiatihedus. Seda tendentsi on näha ka hajuvusdiagrammilt seel 2.9.



Sele 2.9. Hajuvusdiagramm lineaarse regressioonjoonega (koostatud vähendatud kihi paksusega katseseeria andmete põhjal)

Regressioonimudeli alusel leiti sisendparameetrite kombinatsioonid, mis matemaatiliselt maksimeerivad katsekeha tiheduse. Limiitväärtustena kasutati väärtusi, mis on tabelis 2.4. Kokku leiti lahendusi 23. Tabelis 2.7 on võrdluseks tabeliga 2.5 näidatud neist 11 esimest. Võrreldes tabeliga 2.5 on tulemused suhteliselt sarnased. Sulatusridade vahekauguse *HD* ja punktikauguse *PD* väärtused on võimalikult madalad ning sulatusaja *ET* väärtus veidi alla maksimaalse, käesoleval juhul 510 – 549 μs . Pakutud *ET* väärtused on madalamad kui tabelis 2.5, millest võib järeldada, et kihi paksuse vähendamisel võib teoreetiliselt vähendada *ET* väärtust, kuid seda väga vähesel määral.

Tabel 2.7. Tihedust maksimeerivad parameetrid (arvutatud tarkvara *Design-Expert 7.0* abil)

Lahenduse nr	<i>PD</i> (µm)	<i>ET</i> (µs)	<i>HD</i> (µm)	Arvutuslik suhteline tihedus (%)
1	60	515	85,0	99,9
2	60	517	85,0	99,9
3	60	513	85,0	99,9
4	60	510	85,0	99,9
5	60	506	85,0	99,9
6	60	527	85,0	99,9
7	60	529	85,0	99,9
8	60	519	85,0	99,9
9	60	534	85,0	99,9
10	60	543	85,0	99,9
11	60	549	85,0	99,9

2.2.5. Laseri võimsuse mõju tihedusele

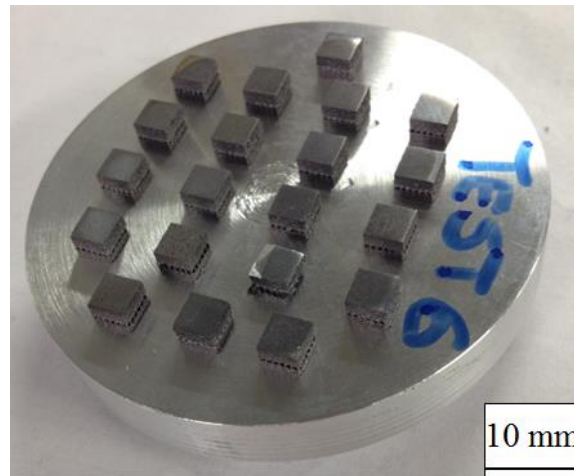
Laseri võimsuse (*LP*) mõju hindamiseks katsekehade tihedusele loodi uus katseplaan (esitatud lisa 4). Tabelis 2.8 on katseplaani koostamiseks määratud limiitväärtused. Kõikides katseeriates peale esimese on seni kasutatud *LP* väärtust 100 W. Esimeses katseeriates oli *LP* väärtus 70 W ning võis järeldada, et see oli madal. Samas oli katsetatud parameetrite kombinatsioonide arv väike ja esinesid muud tulemust negatiivselt mõjutada võivad asjaolud (liiga suur sulatusriidade vahekaugus, terasest substraadi kasutamine).

Tabel 2.8. Katseplaani (lisa 4) limiitväärtused

Parameeter	Keskne väärtus	Piirväärtused	
		Min	Max
<i>ET</i> (µs)	400	200	600
<i>PD</i> (µm)	75	60	90
<i>LP</i> (W)	66	36	96
<i>SS</i> (mm/s)	188	150	300
<i>HD</i> (µm)	100 (fikseeritud)		
<i>LT</i> (µm)	35 (fikseeritud)		

Käesoleva katseeria detailide keskmiseks suhteliseks tiheduseks on 92,2 %, mis on eelnevate katseeriatega võrreldes madal, kuigi katseeria toodeti madala kihi paksuse (35 µm) ja madala *HD* (sulatusriidade vahekaugus) väärtuse juures. *HD* väärtus oli fikseeritud 100 µm, eelnevates katseteseriates jäi *HD* väärtus vahemikku 100 – 150 µm. Viiel katsekehal

mõõdeti suhtelise tiheduse väärtuseks 97 % või rohkem, kuid need katsekehad olid toodetud kõrgemate laseri võimsuste juures (alates 84 W).



Sele 2.10. Kuuenda katseseeria detailid substraadil (pealmised küljed lihvitud)

Kõik detailid õnnestusid, kuid nende poorsus oli kõrge. Seega laseri võimsuse alandamiseks alla 100 W ei leitud vajadust. Seos detaili poorsuse ja kasutatud energiatiheduse vahel käesolevas katseseerias on analoogne seel 2.9 tooduga (kõrgemad energiatihedused annavad kõrgema detaili tiheduse).

2.2.6 Topeltskannimine

Toodeti kolm katsedetaili, millest igäühel rakendati kahekordset skannimist. Detailid toodeti koos kolmanda, neljanda ja viienda katsepartiiga. Kõik detailid toodeti katseplaani (lisa 3) keskse väärtuskombinatsiooniga, et oleks võimalikult palju korduvate parameetrite juures toodetud detaile, millega tulemusi võrrelda (katseplaani keskse väärtuskombinatsiooniga detaile on katseplaanis kõige rohkem). Topeltskannitud detailide tootmise sisendparameetrid ja mõõdetud suhtelised tihedused ning vastavates katseseeriates samade parameetrite juures toodetud ühekordselt skannitud detailide mõõdetud suhteliste tiheduste aritmeetilised keskmised on esitatud tabelis 2.9.

Tabel 2.9. Topeltskannitud katsedetailide võrdlus ühekordselt skannitud detailidega

Sisendparameetrid							Suhteline tihedus (%)		
<i>ET</i> (μ s)	<i>PD</i> (μ m)	<i>HD</i> (μ m)	<i>SS</i> (mm/s)	<i>LP</i> (W)	<i>LT</i> (μ m)	Inert- gaas	Topelt- skannitud	Topeltskannitud (standardhälve)	Keskmine ühekordsel skannimisel
400	75	125	188	48/100	50	N ₂	96,1	0,71	96,1
400	75	125	188	48/100	50	Ar	96,2	0,32	95,6
400	75	125	188	48/100	35	Ar	97,2	0,13	97,5

LP väärtus 48/100 tähendab, et esimene skannimine toimus laseri võimsusega 48 W ja teine 100 W. Topeltskannitud detailide tihedusi samade parameetritega toodetud ühekordselt skannitud detailide keskmistega võrreldes ühel juhul erinevus puudub, ülejäänud kahel juhul on erinevus vastassuunaline. Erinevus on kuni 0,6 %, mida võib antud juhul pidada väikseks. Ristlõigete topeltskannimine suurendab tootmisaega, mistõttu on seda mõistlik teha vaid juhul, kui see tagab oluliselt paremad omadused. Käesoleval juhul otsustati, et topeltskannimist ei kasutata.

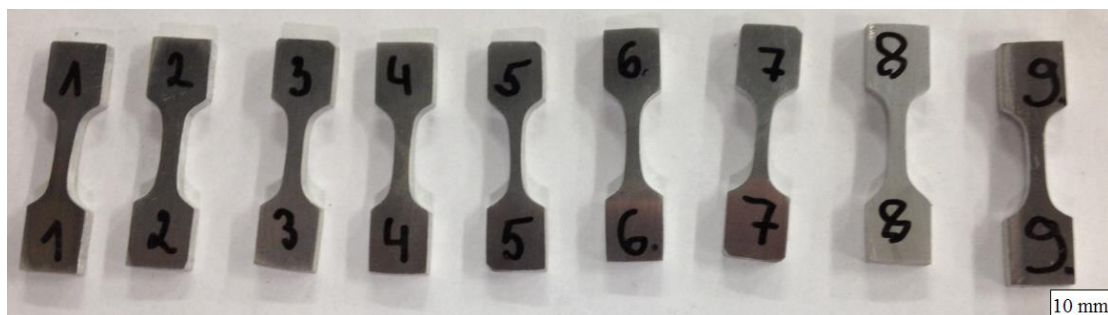
2.3 Omadused tõmbeolukorras

2.3.1 Tõmbekatsed

SLM seadmel valmistati tõmbekatsekehad ehk teimikud. Tõmbeteimil mõõdeti materjali tõmbetugevus, voolavuspiir ja pikenemine. Teimikud toodeti kolme partiina. Parameetrid valiti tuginedes töö eelnevatele osadele. Suurema osa teimikute jaoks määrati parameetrid, mida kasutades eeldati töö eelnevate katsete põhjal häid tulemusi. Üks teimikute paar (detailid nr 3 ja 4 tabelis 2.10) valmistati kõrgema skannimiskiirusega kui teised, et hinnata madalama energiatihedusega valmistatud katsekeha tõmbeomadusi ja kuumisostaatpressimise mõju sellele. Teimikuid tõmmati printimise (horisontaalses) suunas.



Sele 2.11. Lihvimata, eemaldamata tugeodega tõmbeteimik



Sele 2.12. Ettevalmistatud tõmbeteimikud enne tõmbekatset

Kokkuvõtte teimikute valmistamiseks kasutatud energiatihedustest ja inertgaasikeskkonnast, teostatud järeltötlustest ja tõmbekatsete tulemustest on tabelis 2.10. Lisas 5 on laiendatud teimikute tootmisparameetrite tabel, milles on näidatud kasutatud energiatihedust moodustavate parameetrite väärtused. Katsekeha number 14 jaoks tulemus puudub, sest detail purunes tõmbekatse alguses tõenäoliselt pinnadefektist alguse saanud prao tõttu.

Katsekehal number 1 puuduvad pikenemise andmed, sest mõõtmine ekstensiomeetriga ebaõnnestus.

Tabel 2.10. Tõmbeteimikute tootmistingimused, järeltöötlus ja tõmbekatsete tulemused

Partii nr	Katse-keha nr	Energia-tihedus (J/mm ³)	Inert-gaas	HIP	Tõmbetugevus R_m		Voolavuspiir $R_{p02\%}$		Pikenemine ε	
					Väärtus (MPa)	± MPa	Väärtus (MPa)	± MPa	Väärtus (%)	± %
1	1	297	Ar	500 °C/1h	151	3,5	90	2,1	-	-
	2	297	Ar		307	7,2	218	5,1	1,5	0,08
	3	75	Ar	500 °C/1h	153	3,6	95	2,2	6,3	0,09
	4	75	Ar		330	7,7	258	6,1	1,2	0,08
	5	254	Ar	500 °C/1h	153	3,6	91	2,1	6,6	0,09
	6	254	Ar		363	8,5	216	5,1	2,1	0,08
2	7	308	N ₂	350 °C/1h	249	5,8	137	3,2	6	0,09
	8	308	N ₂		437	10,3	278	6,5	2,5	0,08
	9	374	N ₂	350 °C/1h	243	5,7	141	3,3	5,3	0,08
	10	374	N ₂		463	10,9	301	7,1	2,5	0,08
	11	224	N ₂	350 °C/1h	238	5,6	136	3,2	5,8	0,09
	12	224	N ₂		456	10,7	285	6,7	2,3	0,08
	13	254	N ₂	350 °C/1h	242	5,7	137	3,2	5,5	0,09
	14	254	N ₂		-	-	-	-	-	-
3	15	179	N ₂		432	10,1	281	6,6	2,1	0,08
	16	167	N ₂	350 °C/1h	222	5,2	137	3,2	3,8	0,08
	17	167	N ₂		320	7,5	226	5,3	1,3	0,08
	18	133	N ₂	350 °C/1h	211	4,9	123	2,9	2,8	0,08
	19	133	N ₂		292	6,8	277	6,5	1,1	0,08

2.3.2 Järeltöötletud katsekehad

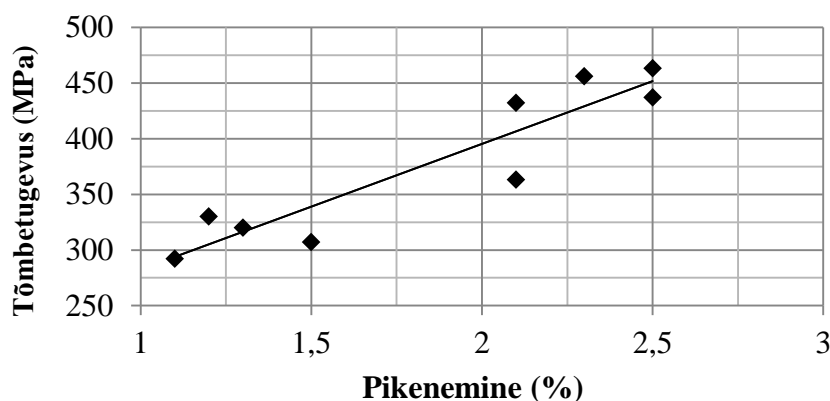
Järeltöötlemata katsekehade tõmbeomaduste kokkuvõte on tabelis 2.11. Võrreldes tulemusi valatud AlSi10Mg detailide omadustega (tabel 1.4) on mõõdetud tõmbetugevuse ja

voolavuspiiri väärtused sarnased või kõrgemad. Kõrge tõmbetugevus ja voolavuspiir tuleneb SLM protsessile omasest peeneteralise mikrostruktuuri tekkest. SLM detailide plastsus on käesolevate andmete järgi üldjoontes madalam AlSi10Mg valatud detailide omast.

Tabel 2.11. HIP töötluseta katsekehade tõmbeomaduste kokkuvõte

	Tõmbetugevus R_m (MPa)	Voolavuspiir $R_{p0.2\%}$ (MPa)	Pikenemine ϵ (%)
Keskmine	378	260	1,8
Min	292	216	1,1
Max	463	301	2,5

Plastsuse tõus on korrelatsioonis tugevuse suurenemisega (sele 2.13). Pikenemise suhteliselt madalaid väärtusi võib seostada defektide olemasoluga materjalis. Materjal on tugev, kuid tõmbamisel materjali sees olevast defektist (poor, oksiidi põhjustatud defekt) alguse saav pragu kasvab kiiresti ning viib purunemiseni. Alumiiniumsulamite SLM'il on saavutatud valudetailidega sarnaseid või seda ületavaid pikenemise väärtusi, kuid on esinenud ka tugevaid, kuid hapramaid alumiiniumisulameid (Read et al, 2014). Materjali purunemispinda uurides on leitud, et purunemine sai alguse pooridest või oksiidi tekkekohast, kus oli takistatud materjali piisav omavaheline ühendus.



Sele 2.13. Tõmbetugevuse ja pikenemise diagramm järeltöötluseta katsekehade jaoks lineaarse regressioonjoonega

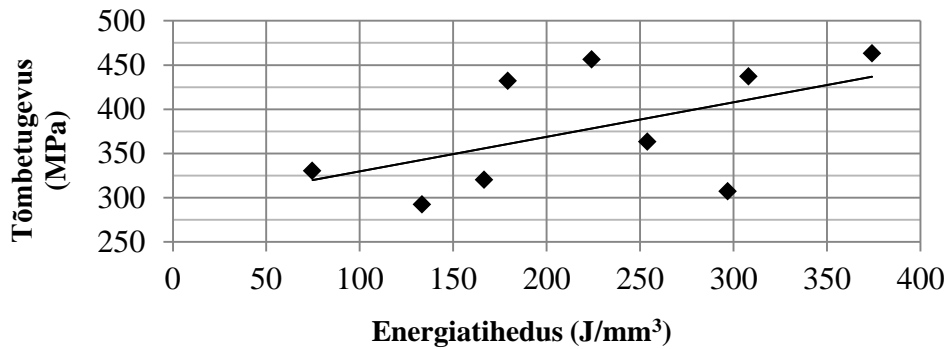
Valatud AlSi10Mg kõrgete mehaaniliste omaduste tekkele aitab kaasa termotöötusel sadestuv Mg_2Si faas. AlSi10Mg SLM detaile enamasti ei termotöödelda. SLM protsessi käigus tekkivat Mg_2Si faasi ei ole olulises koguses leitud (Kempen et al, 2012) ning head mehaanilised omadused on seostatud hoopis ühtlase ja tiheda Si faasi olemasoluga. SLM

detailid ning termotöödeldud valudetailid saavutavad omad kõrgeid omadused erinevatel viisidel. SLM detailide tugevdusmehhanisme ei ole veel põhjalikult uuritud.

2. partii (valmistatud lämmastikus) katsekehade tõmbeomadused on kõrgemad 1. partii (valmistatud argoonis) omadest. 2. partiis on katsekehi, mille tootmisparameetrid on sarnased 1. partii omadega, kui tõmbetugevuste vahe on suur. Kuna tootmisseedme standardmaterjal on teras, on pulbri etteandmissüsteem täidetud terasepulbriga. Alumiiniumi tootmiseks tuleb pulbrit lisada otse tootmiskambrisse. 1. partii valmistamise ajal pulber lõppes ning tuli avada tootmiskamber pulbri lisamiseks. Seel 2.11 oleva detaili keskosas (tugede pool) on näha joont, mis sellest tekkis. Joon oli keskmise tõmmatava osa ääres ja lihviti maha, kuid hapniku ligipääs katsekehadele ja pulbrile soodustas tõenäoliselt oksiidi teket ja langetas detaili omadusi. Samuti soodustas kõrgete tõmbeomaduste teket 2. partii puhul tõenäoliselt lämmastiku kasutamine inertgaasiga. Tootmisel moodustuvad nitriidid, mis tõstavad tugevusomadusi.

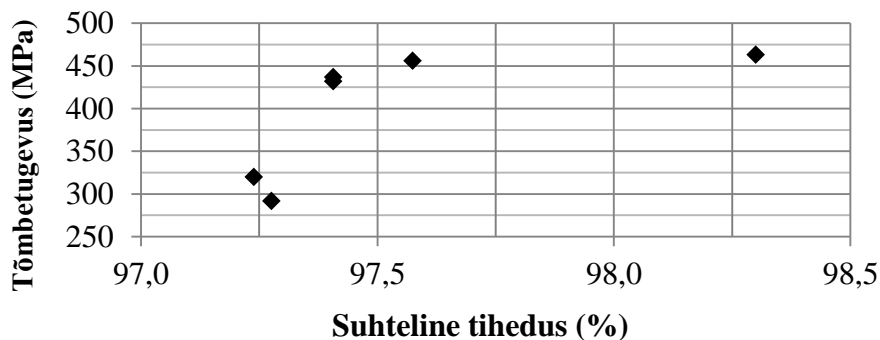
Võrreldes 1. ja 3. partiid on omadused vähesel määral kõrgemad 1. partiis. 3. partiis kasutatud energiatiheduse väärtused on madalamad. Eelnevatele katsetele tuginedes tähendab see kõrgemat poorsust. Kuna tõmbeomadused on sellele vaatamata ligilähedased 1. partii omadega, on eelis tõenäoliselt tekkinud lämmastiku kasutamisest tulenevatest nitriididest.

2. ja 3. partii on mõlemad valmistatud lämmastikus, kuid 2. partii tõmbeomadused on oluliselt kõrgemad. Selle põhjuseks on tõenäoliselt kõrgemate energiatiheduste kasutamine katsekehade valmistamisel. Kasutatud energiatiheduste ja vastavate tõmbetugevuste seost kirjeldav hajuvusdiagramm on seel 2.14. Näha on hajuvust, mis indikeerib, et peale energiatiheduse on kõrge tõmbetugevuse saavutamisel olulised ka parameetrid eraldi ja tootmistingimused, mida käsitleti kahes eelmises lõigus. Siiski eksisteerib trend, mille kohaselt kõrgem tõmbetugevus saavutatakse suurema energiatiheduse juures.



Sele 2.14. Energiaühenduse ja tõmbetugevuse hajuvusdiagramm lineaarse regressioonjoonega järeltöötluseta katsekehade jaoks

2. ja 3. partii katsekehade tihedused mõõdeti *Archimedes*'i meetodil. Koostati hajuvusdiagramm suhtelise tiheduse ja tõmbetugevuste seose iseloomustamiseks (sele 2.15). On näha, et kõrgema tihedusega detailide tõmbetugevused on üldjoontes paremad. Samas alates suhtelise tiheduse 97,4 % saavutamisest tõuseb tõmbetugevus väga vähesel määral – poorsuse täielik eemaldamine ei pruugi kõrgete tugevusomaduste saavutamiseks olla vajalik.



Sele 2.15. Suhtelise tiheduse ja tõmbetugevuse hajuvusdiagramm tõmbekatsekehade 2. ja 3. partii põhjal

Täiendavate seoste leidmiseks tuleb teostada lisakatsed. Väga ajamahuka tootmisprotsessi tõttu käesolevas töös rohkem teimikuid ei valmistatud. Olemasolevate andmete põhjal võib järeldada, et kõrgemad tõmbeomadused tagab suurema energiaühenduse kasutamine ja lämmastiku kasutamine inertgaasina.

Parimate mehaaniliste omadustega katsekeha (katsekeha nr 10 tabelis 2.10) on ühtlasi kõrgeima mõõdetud tihedusega: $2,65 \pm 0,023 \text{ g/cm}^3$. See on 98,7 % maksimaalsest. Katsekeha plastsust võib pidada rahuldavaks, tõmbetugevuse ja volavuspiiri väärtust väga heaks.

Tõmbetugevus ületab umbes 100 MPa võrra isegi termotöödeldud (T6) valudetailide oma, voolavuspiir on termotöödeldud (T6) valudetailide omaga võrreldav. DIN EN 1706 standardi kohaselt on AlSi10Mg valudetailide nõutav purunemiseelse pikenemise väärtus liivvalu puhul 2 % ja ja kokillvalu puhul 2,5 %, mis on detaili number 10 puhul saavutatud.

Mõõdeti ka katsekehade kõvadused, mõõtmistulemused on esitatud lisas 6. Katsekeha nr 10 kõvadus on 114 HV, mis on kõrgem AlSi10Mg valudetaili tüüpilisest kõvadusest (vaata tabel 1.4). Kõrgeim järeltöötluseta katsekehal mõõdetud kõvadus on 127 HV, mis on võrreldav termotöödeldud (T6) valudetaili kõvadusega.

Kõrgete mehaaniliste omadustega detaile on võimalik valmistada kõikide 2. partiis kasutatud parameetrite kombinatsioonidega. Käesolevas töös valmistatavate toodete jaoks valitakse järgmised parameetrid:

- sulatusaeg *ET*: 550 μ s
- punktikaugus *PD*: 60 μ m
- sulatusridade vahekaugus *HD*: 85 μ m
- kihi paksus *LT*: 35 μ m
- laseri võimsus *LP*: 100 W
- inertgaas: lämmastik

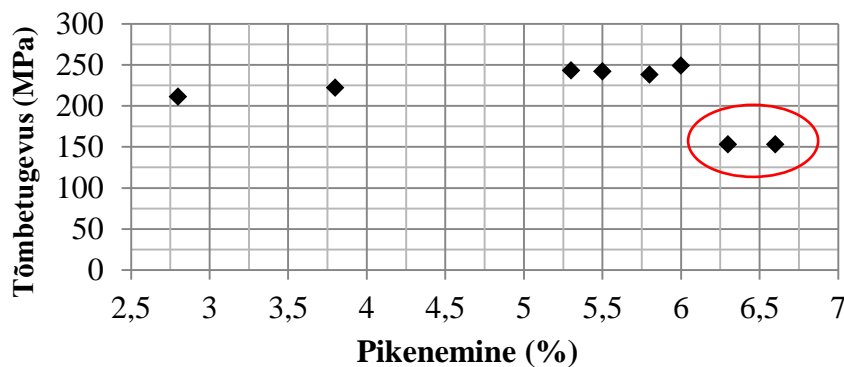
Need parameetrid vastavad tabelis 2.10 katsekeha number 10 tootmisparameetritele. Ainus erisus on, et sulatusridade vahekaugus *HD* väärtuse 70 μ m asemel kasutatakse 85 μ m. See võimaldab vähesel määral tõsta tootmise kiirust ning teiste 2. partii katsekehade näitel annab sellegipoolest eeldatavalt kõrged mehaanilised omadused.

2.3.3 Järeltöödeldud katsekehad

Osali tõmbekatsekehade rakendati järeltöötlusena HIP töötlust. Katsekehad, millel töötlust teostati ja töötluste parameetrid on näidatud tabelis 2.10. Tabeli 2.10 katsekehad on toodetud paaridena. Igast paarist ühel katsekehal rakendati järeltöötlust, et võrrelda tõmbeomadusi samade parameetrite juures valmistatud järeltöötluseta katsekehaga. Ainsana on dubleerimata katsekeha number 15.

1. partii on tugevuse langus suur – HIP töötluseta katsekehadega võrreldes langes HIP töödeldud katsekehadel see umbes kahekordselt. Kõrgel temperatuuril hoidmise mõjul toimub materjalis pingete vähenemine. Sõltuvalt temperatuurist ja sellel hoidmise ajast ka rekristalliseerumine ja terade kasv. Terade keskmine suurus tõuseb ja terapiiride kogupindala vähenevad, mistõttu suureneb materjali plastsus, kuid väheneb tugevus.

Alates 2. partiist rakendati madalamat HIP temperatuuri 350 °C. 2. ja 3. partii katsekehade tugevus on oluliselt kõrgem kui 1. partii (sele 2.16). Katsekehade plastsus on kõrgem (2. partii) või võrreldav (3. partii) valudetailide omaga. Nii 2. kui ka 3. partii katsekehade pikenemise väärtus suurenes HIP töötluseta detailidega võrreldes ligikaudu 60 %, samas 2. partii detailide tugevus vähenes ligikaudu 45 % ning 3. partii detailide tugevus vaid ligikaudu 30 %.



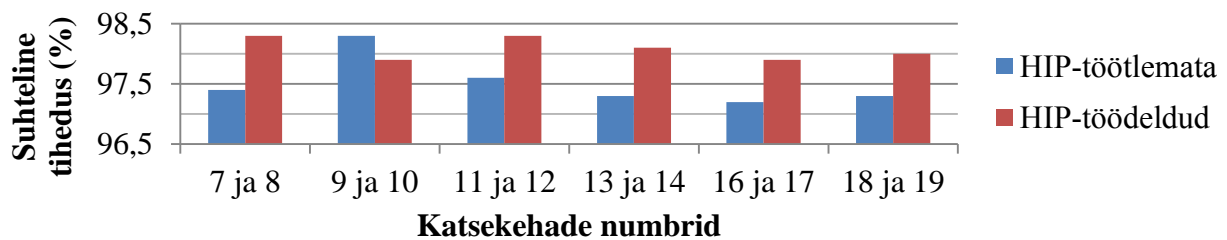
Sele 2.16. HIP töödeldud katsekehade tõmbeomadused. Punases ringis on kõrgemal temperatuuril töödeldud katsekehad (1. partii)

HIP töödeldud katsekehade kõvadused on suhteliselt madalad (vaata lisa 6). Madalaim mõõdetud kõvadus on 50 HV, kõrgeim 72 HV. See jääb alla valudetailide tüüpilisele kõvadusele.

Käesolevas töös rohkem järeltöötusi läbi ei viidud. Soovitatav on katsetada HIP töötlusel madalamaid temperatuure, et saavutada optimaalsem vahekord tugevuse ja plastsuse vahel. Kuna HIP töötlusel toimub tera kasv ja materjali mikrostruktuur on eeldatavasti sarnasem valumaterjali omale, võib positiivselt mõjuda ka täiendav T6 termotöötlus.

Selel 2.17 on näidatud võrdluses 2. ja 3. partii samade parameetrite juures toodetud katsekehadel mõõdetud suhtelised tihedused HIP töödeldud ja töötlemata katsekehade jaoks.

Detaili numbrid vastavad tabelile 2.10. On näha, et HIP töödeldud katsekehade suhteline tihedus on kõrgem.



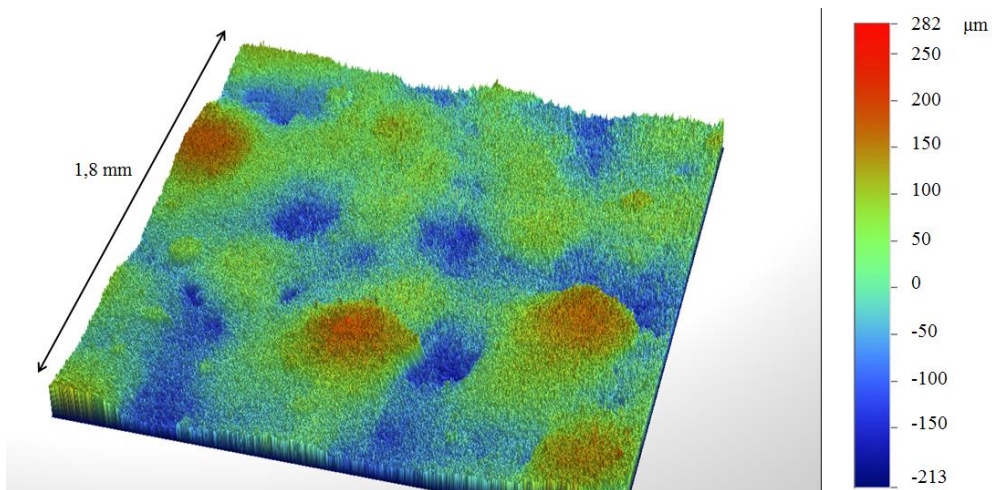
Sele 2.17. 2. ja 3. partii katsekehade suhtelised tihedused

Järeltöödeldud detailide suhteline tihedus on 0,7 - 0,9 % kõrgem samade parameetrite juures valmistatud järeltöötluseta detailide omast. Erandiks on detailid 9 ja 10, kus järeltöödeldud detaili tihedus on madalam. Käesolevate andmete põhjal võib oletada, et tegu võib olla mõõtmisveaga. Välistatud ei ole ka, et juba enne HIP töötlust oli detaili nr 10 tihedus madalam detaili nr 9 omast. Pärast HIP töötlust oli detailide pinnal näha väikseid lohkusid, mille kaudu väljus rõhu mõjul poorides olev gaas. Seega vähendab HIP töötlus pooride hulka materjalis ja pooridest alguse saavate defektide teket detailis.

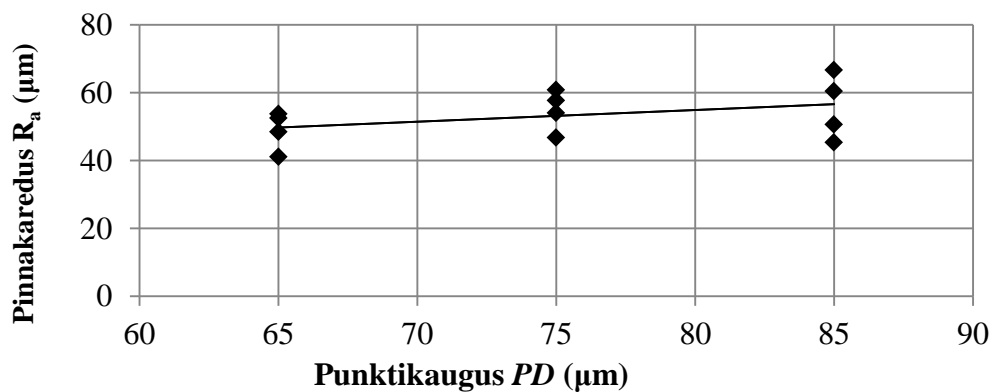
2.4 Pinnakaredus

Osal katseseeriade käigus toodetud detailidest mõõdeti pinnakaredused. Pinnakaredust jälgiti ka visuaalselt ja hinnati katsete käigus kvalitatiivselt. Optilise profilomeetri ja selle tarkvara abil arvutati pinnakaredus R_a ja visualiseeriti katsekehade pinnad.

Katseid alustades oli näha katsekehade kõrgem pinnakaredus võrdluses terasest prinditud detailidega. Mõõdeti kõikide teise katseseeria detailide pinnakaredused. Tulemused koos vastavate tootmisparameetritega on esitatud lisas 7. Mõõdetud pinnakareduste aritmeetiline keskmine oli 54 μm (R_a), minimaalne pinnakaredus 45 μm (R_a) ja maksimaalne 67 μm (R_a). Leiti vähene seos punktikauguse PD suurendamise ja pinnakareduse tõusmise vahel (sele 2.19).



Sele 2.18. Outilise profilomeetri abil graafiliselt visualiseeritud katsekeha pind



Sele 2.19. Pinnakareduse ja punktikauguse hajuvusdiagramm teise katseseeria andmete põhjal

Täiendavaid seoseid tootmisparameetrite ja pinnakareduse vahel ei leitud. Pinnakareduse seos punktikaugusega on seletatav sellega, et sulatades materjali lühemate vahemaade tagant on paremini tagatud sulatatavate alade omavaheline ülekate.

Detaile visuaalselt hinnates leiti, et sulatusriidade vahekauguse HD väärtus peaks olema soovitatavalt mitte üle $100 \mu\text{m}$. Kõrgete HD väärtuste korral on detaili pinnal nähtavad vaod sulatusriidade vahel. Teises katseseerias kasutatud HD väärtus $150 \mu\text{m}$ on autori hinnangul madala pinnakareduse saavutamiseks liiga kõrge. Alates viiendast katseseeriast langetati kihi paksuse LT väärtust ja oli näha pinnakareduse mõningat paranemist. Võib eeldada, et ka LT väärtuse vähendamine alandab pinnakaredust. Madalad HD ja LT väärtused loovad eelduse piisava ülekatte saavutamiseks sulatatavate alade vahel, elimineerides sulamata pulbrist tekitatud pooride negatiivse mõju pinnakaredusele.

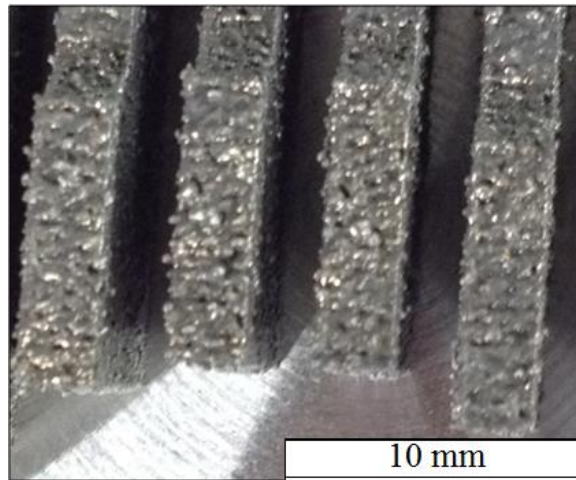
Lisaks mõõdeti tõmbekatsekehade 2. partii pinnakaredused. Selles partiis olevad detailid saavutasid kõrgeimad mehaanilised omadused. Mõõtmiste tulemused ja vastavad tootmisparameetrid on esitatud lisas 8. Mõõdetud pinnakareduste aritmeetiline keskmine oli $24 \mu\text{m}$ (R_a), minimaalne pinnakaredus $15 \mu\text{m}$ (R_a) ja maksimaalne $45 \mu\text{m}$ (R_a). Tulemuste hindamiseks kasutati hajuvusdiagramme. Konkreetseid seoseid pinnakareduse ja tootmisparameetrite vahel ei leitud. Üheks põhjuseks on tõenäoliselt üheksast katsekehast koosnev valim, milles sisaldus viis erinevat parameetrite kombinatsiooni. Seetõttu on raske hinnata ühe konkreetse sisendparameetri mõju pinnakaredusele. Samas on pinnakaredused madalamad teise katseseeria omadest. Võrreldes teise katseseeriaga toodeti käesolev tõmbekatsekehade partii madalamate *LT* ja *HD* väärtuste juures, mis tõenäoliselt soodustas kõrgema pinnakvaliteedi saavutamist.

AM tehnoloogia seadmete ja materjalide tarnija *EOS GmbH* sätestab, et *AlSi10Mg* puhul peaks pinnakaredus olema $6 - 10 \mu\text{m}$ (R_a). Teadusartiklite ülevaatest on näha, et detailide pinnakaredused on olnud sellised ($17 - 27 \mu\text{m}$ R_a), mille puhul on tõenäoliselt vajalik pinna järeltöötlus. Ka *EOS*'il on pinnakareduse kohta märkus, et tulemus on indikatiivne ja kehtib vaid sirgel pinnal ning sõltub tootmistingimustest ja detaili geomeetriast. Samuti on *EOS GmbH* tulemus määratud 200 W laseriga seadme näitel.

Käesoleva töö käigus oli visuaalse hinnangu põhjal märgata madalamat pinnakaredust kõrgemate skannimise kiiruste juures. Selle selgituseks võib olla, et aeglaselt skannides jääb materjal pikema aja vältel sulaolekusse ning tekivad sfäärilised piisad, mille tardumisel jääb pind ebahürtlane. Seel 2.20 on tõmbekatsekeha pind lähedaltvaates. Näha on mõningaid ümarate piiskade laadseid moodustisi pinnal. Piiskade teket võis täheldada ka tootmisel. Pulbritasandaja pühkis laiali detaili pinnale jäänud ebatasased tardunud materjaliosakesed, mida hiljem leiti kasutatud pulbri seest. Kõrgem skannimise kiirus tähendab aga madalamat energiatihedust. Et piisava materjali tiheduse saavutamiseks on vaja kõrgeid energiatihedusi, ei ole võimalik seda parema pinnakareduse huvides langetada.

Üheks lahenduseks osutus *Outer Boundary* funktsiooni kasutusele võtmine. *Outer Boundary* abil saab detaili välispindala skannida teistusuguste, käesoleval juhul kiiremate parameetritega, kui skannitakse detaili sisemust. Seeläbi jääb alles materjali kõrge tihedus, kuid pinnakaredus on madalam. *Outer Boundary* puhul on võimalik määrata, kui paks on

teistsuguste parameetritega skannitav välisosa. Mida paksem see on, seda madalam on detaili pinnakaredus, kuid tuleb arvestada, et samas langeb pinnakihi materjali tihedus.

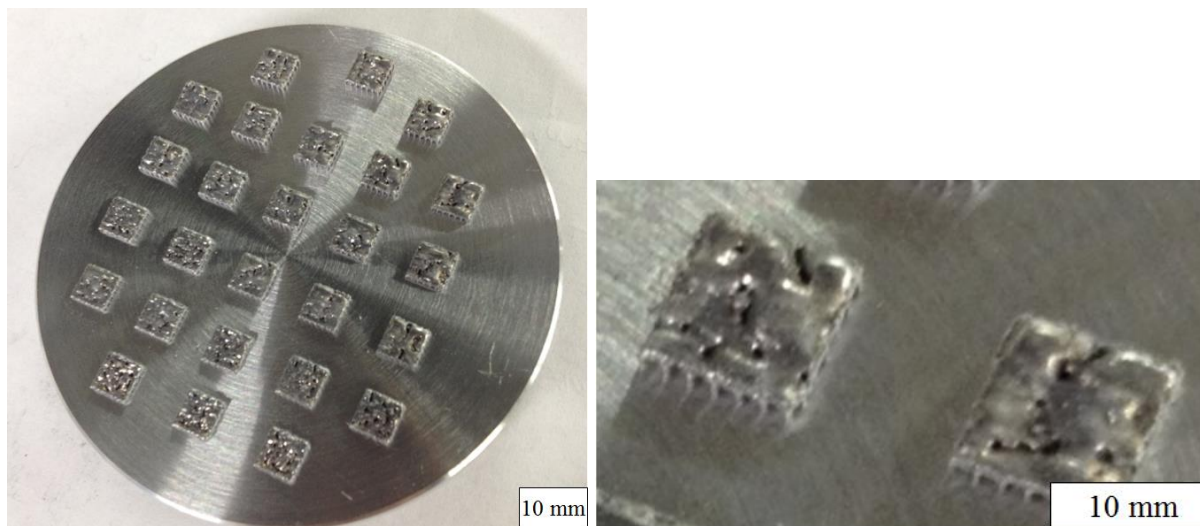


Sele 2.20. Tõmbeteimikud pealtvaates

2.4.1. Fookuskauguse muutmine

Kõik katseseeriad on toodetud laseri fookuskauguse 12,5 mm juures, mis on SLM seadmes seni vaikimisi kasutatud fookuskaugus. Et katsetada pinnakareduse parendamise võimalusi seadistati fookuskaugus 8,5 mm peale. Kuna puudus info fookuskauguse muutmise võimaliku mõju kohta, toodeti 26 detailist koosnev katseseeria, kus kasutati võimalikult erinevaid parameetrite kombinatsioone (sele 2.21). Fookuskauguse vähendamine vähendab laseritõpiga sulatatava ala suurust, mistõttu sama temperatuuri saavutamiseks on vaja vähem energiat. See tähendab, et saab kasutada madalamaid energiatihedusi kui suurema fookuskauguse puhul.

Väiksema fookuskaugusega toodetud katseseeria detailide pind oli erinev varasemalt toodetud katsekehade omast, kuid ei olnud hea. Pinnal puudus varem nähtud krobeline iseloom. Pind oli sile. Samas oli pind laineline ja selles esinesid väga suured defektid – kuni 2 mm pikkused avasid meenutavad poorid. Tootmise ajal oli näha, et materjali sulatamine toimub väga intensiivselt. Tõenäoliselt põhjustas liigintensiivne sulatamine materjali ebaühtlase makrostruktuuri. Materjal võis ka aurustuda.



Sele 2.21. Fookuskauguse 8,5 mm juures toodetud detailid

Suurendati kihi paksust ja kohandati tootmisparameetreid, et vähendada energiatihedust. Viidi läbi täiendav 26 detailiga katseseeria 8,5 mm fookuskauguse juures. Tulemuseks saadi 12,5 mm fookuskaugusega toodetud detailide krobelse pinnaga sarnanev pind. Visuaalse hinnangu põhjal ei olnud pinnakaredus madalam töös varemtoodetud katsekehade omast. Pinnakaredus mõõdeti optilise profilomeetriga. 26 detaili pinnakareduste keskmiseks väärtuseks osutus $61 \mu\text{m}$ (R_a), kõrgeim väärtus oli $108 \mu\text{m}$ (R_a) ja madalaim $36 \mu\text{m}$ (R_a). Pärast detailide lihvimist ilmnes, et lisaks on need poorsed, mistõttu olenemata pinnakareduse väärtusest neid kasutada ei saaks.

Viidi läbi kolmas 8,5 mm fookuskaugusega katseseeria 20 detailiga. Tootmisparameetrid kohandati vastavalt eelmise katseseeria tulemustele. Tulemus oli sarnane eelmise katseseeriaga. Kokku 72 fookuskauguse 8,5 mm juures toodetud detaili uurimisel leiti, et fookuskauguse muutmisega ei saavutatud madalamat pinnakaredust ega rahuldavat detaili tihedust. Fookuskauguse muutmise mõju materjali omadustele ning pinnakaredusele vajab põhjalikumat uurimist ja suuremas mahus katseid.

2.5 Järeldused

Läbi viidud uuringu ja katsetuste tulemusel leiti SLM valmistusparameetrid AlSi10Mg jaoks, millega on võimalik toota kõrge tiheduse ja mehaaniliste omadustega detaile. Parimate katsekehade tihedused olid 97 - 98 % teoreetilisest. Kui alumiiniumsulamite SLM tootmise uuringud on seni läbi viidud kõrgema võimsusega lasereid kasutades, siis käesolevas töös

selgus, et on võimalik toota kõrgete mehaaniliste omadustega detaile ka 100 W laseriga ilma ühte materjalikihti mitu korda skannimata.

Saavutati tõmbetugevus kuni 463 MPa voolavuspiiriga 301 MPa. Vastav pikenemise väärtus katsekehal on 2,5 %. Detailide tõmbetugevus ja voolavuspiir vastasid varemtehtud uuringute omale ja on paremad kui valudetailidel. Detailide plastsus oli hea, kuni 2,5 % pikenemist tõmbel, mis vastab AlSi10Mg valudetailide nõutud väärtusele DIN EN 1706 standardi kohaselt. Samas on varasemates uuringutes saavutatud paremat plastsust. Võib järeldada, et käesolevas töös välja töötatud parameetrite korral jääb detaili sisse piisavalt poore või oksiididefekte, mis soodustavad kiiret purunemist tõmbel. Tõenäoliselt on vähemalt osaliselt selle põhjuseks liiga madal laseri võimsus, mis ei kõrvalda tootmisel detaili pinnalt piisavalt okside.

Katsetades inertgaasina argooni ja lämmastikku, ei leitud oluliselt erinevat mõju katsekehade tihedusele. Samas leiti tõmbekatsetel, et kõrgemaid tugevusomadusi saavutati pigem lämmastikku kasutades. Ühtlasi on lämmastiku hind argooni omast ligikaudu kolm korda odavam. Eelnevat arvesse võttes tasub inertgaasina kasutada lämmastikku.

Üks edasist parendamist vajav asjaolu on tootmise kiirus. Valitud valmistusparameetrite puhul on skannimise kiiruseks 109 mm/s, mis on SLM protsessi puhul võrdlemisi aeglane kiirus. Jättes välja tootmisele eelnevad ja järgnevad seadistus- ja abitegevused, koosneb detaili tootmise aeg peamiselt kahest komponendist – ristlõigete skannimine ja pulbrikihtide lisamine. Käesoleva töö tulemuste põhjal saab väita, et tootmiskiirust ei saa tõsta kihi paksuse *LT* suurendamise arvelt. Suurema *LT* väärtuse kui 35 µm juures on ilmne katsekehade tiheduse langus kõikide parameetrite kombinatsioonide puhul. Tabelis 2.10 on näha, et katsekeha number 4 tõmbetugevus on enda partii lõikes suhteliselt hea (detail toodeti 1. partiis), kuigi kasutatud skannimise kiirus on oluliselt suurem (450 mm/s) partii ülejäänud katsekehade omast. 1. partii tõmbekatsekehade tugevused on 2. partiiga võrreldes madalad. Samas kuna 1. partiis saavutati sarnased tugevuste väärtused erinevate skannimise kiiruste juures, on soovitatav viia läbi täiendavad tugevuste mõõtmised suurendatud skannimise kiiruste juures.

Käesolevas töös saavutatud pinnakaredus on pigem kõrge. Üheks põhjuseks võib olla madal laseri võimsus. Nii varasemates uuringutes kui ka käesolevas töös on täheldatud, et

pinnakaredus on madalam kiiremal skannimisel. Kui laseri võimsus on madal, tuleb skannida piisava energia üleandmiseks aeglasemalt, mis viib ümarate piiskade tekkimiseni skannitud ristlõike pinnal. Üheks lahenduseks on detaili välispinna skannimine suurema kiirusega. Teiseks lahenduseks eelnevas lõigus kirjeldatud potentsiaalne skannimise kiiruse suurendamine kogu detailil, mis peaks ühtlasi vähendama pinnakaredust.

HIP töötlus suurendab detailide tihedust ja vähendab jääkpingeid. Oluliselt suurenes katsekehade plastsus, kuid väheneb tugevus. Käesolevas töös läbi viidud HIP töötluste tulemusena langes kõikide katsekehade tugevus alla 250 MPa. See on valatud AlSi10Mg tüüpilise tugevusega võrreldes suhteliselt madal. Optimaalsete plastuse ja tugevuse kombinatsioonide leidmiseks on vaja teostada lisauuringud. Soovitav on katsetada HIP töötlust madalamal temperatuuril kui 350 °C ning kaasata uuringutes ka termotöötlus.

3. TOODETE VALMISTAMINE

Käesolevas osas rakendatakse eelmises peatükis väljatöötatud parameetreid toodete valmistamiseks. Antakse põhjalikum ülevaade töö rakenduslike väljundite, *Formula Student* ja *ELIX-XL* kvadrokopteri detailidest ja tootmismeetodist. Luuakse uus disain kvadrokopteri kaameramooduli hoidikule vältimaks kaalu suurenemist üleminekul ABS'lt alumiiniumsulamile.

3.1 Stabilisaatorvarda kinnitusdetailid

Formula Student 2016. aasta projektis otsustati stabilisaatorvarda kinnitusdetailide tootmiseks kasutada metalli 3D-printimist (käesoleval juhul SLM'i) järgnevatel põhjustel:

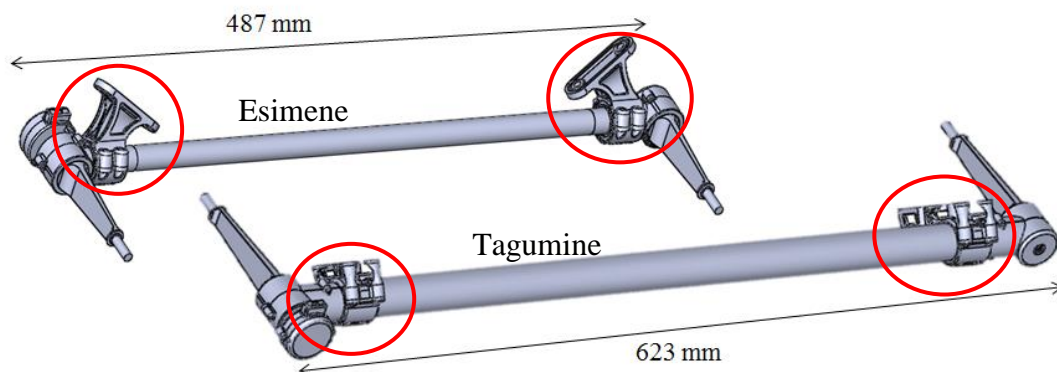
- Detailide kergem kaal. Printimine võimaldab alandada detailide kaalu, sest materjali saab eemaldada kohtadest, kus see freesimise puhul ei ole võimalik või on väga keeruline
- Tootmise aeg. Detailide väljafreesimisel oleks vaja erirakiseid, mis tulnuks toota eraldi ühekordseks kasutuseks. Detailid ise on keeruka geomeetriaga. Kuigi 3D-printimine ei ole kiire protsess, oleks eelmainitud aspektide tõttu ka freesimise läbiviimine olnud aeganõudev
- Tootmise lihtsus. Detailide keeruka kuju tõttu vajaks nende tootmine freespingil kolme või rohkemat paigutust. Varasema kogemuse põhjal oli oht praagi tekkeks ja suureks ajakuluks. 3D-printimisel ei ole vaja muretseda piisavalt pädeva freesija olemasolu pärast

3.1.1 Stabilisaatorvarras

Stabilisaatorvarras on auto vedrustuse osa, mille eesmärk on vähendada kurvides asetleidvat auto kere kaldumist. See paikneb auto pikiteljega risti ja on ühendatud auto kerega läbi liugpukside. Need võimaldavad vardal ümber oma telje pöörelda, mis on vajalik auto vedrustuse normaalseks toimimiseks sõites sirgel teel. Stabilisaatorvarda otsad on liigendite abil kinnitatud auto vedrustuse külge. Stabilisaatorvardaid on üldjuhul autol kaks, üks esiteljel

ja üks tagateljel. Need on silindrilise kujuga terasest vardad, mis sisaldavad kas U-kujulist osa või on sirged.

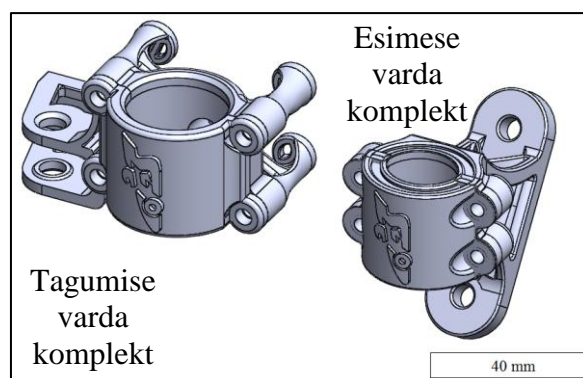
Kui auto sõidab sirgel teel, ei mõju stabilisaatorvardale väände jõudu. Kurvides mõjub auto välimistele ratastele suurem jõud. Vedrustust surutakse välimisel poolel kokku rohkem, kui sisemisel ja vardale hakkab mõjuma väände jõud. Jäik varras osutab väände vastu. Suurema koormuse all olevalt välimise poole vedrustuselt kandub stabilisaatorvarda kaudu jõud teisele poole. See takistab välimisel poolel vedrustuse liigset kokkusurumist ning saavutatakse auto mõlema poole kõrguste ühtlustumine. Mida jäigem on varras, seda rohkem jõudu on vaja, et saavutada auto pööramine ümber selle pikitelje. Stabilisaatorvarda jäikus sõltub peamiselt varda materjalist, läbimõõdust ja kujust. Võidusõiduautodes on varraste otstes sageli labad, mida pöörates on võimalik stabilisaatorvarda jäikust reguleerida (sele 3.1). Labad kinnituvad liigendiga auto vedrustuse külge.



Sele 3.1. *Formula Student* 2016. aasta vormelauto esimese ja tagumise stabilisaatorvarda koostud

3.1.2 Kinnitusdetailid

Käesoleva töö käigus toodetakse stabilisaatorvarrastele kaks kinnitusdetailide komplekti ette ja kaks taha (sele 3.1 punastes ringides). Iga komplekt koosneb kahest detailist – üks vormelauto külge kinnitamiseks ja teine eelmise detaili kinnitamiseks varda külge. Toodetavaid detaile on kokku kaheksa, erinevaid detaile kokku viis (esimese stabilisaatorvarda komplektid on identsed ning tagumise stabilisaatorvarda komplektidel on üks detail omavahel identne). Täiendav pilt komplektidest on esitatud seel 3.2.



Sele 3.2. Stabilisaatorvarda kinnitusdetailide komplektid

Autovormeli detailide projekteerimisel on kõige olulisem nende eritugevus ehk detailid peavad olema võimalikult kerged, aga piisavalt tugevad. Seetõttu on otsustatud stabilisaatorvarda kinnitusdetailid toota alumiiniumist, mis on kõrge eritugevusega metall. SLM tehnoloogia kasutamine võimaldab detailide kaalu täiendavalt alandada.

Arvutuste kohaselt jäävad kinnitusdetailides tekkivad pinged alla 100 MPa. Vastavalt 2. peatükis SLM-toodetud AlSi10Mg katsekehadel mõõdetud tugevusomaduste väärtustele on tehnoloogia ja materjal sobivad kinnitusdetailide tootmiseks. Käesolevas töös katsekehadel väsimuspiiri ei määratud. Uuritud AM teenusepakkujate (EOS, 3T RPD) spetsifikatsioonides on SLM-toodetud AlSi10Mg detailide väsimuspiiriks märgitud $97 \pm$ MPa. SLM-toodetud AlSi10Mg detailide väsimuspiiri käsitlevas teadusuuringus (Brandl et al., 2012) on leitud, et katsekehadel määratud väsimuspiiride väärtused ületasid valudetailide omasid, jäädes olenevalt detailist 90 – 140 MPa vahele.

3.1.3 Kinnitusdetailide tootmine

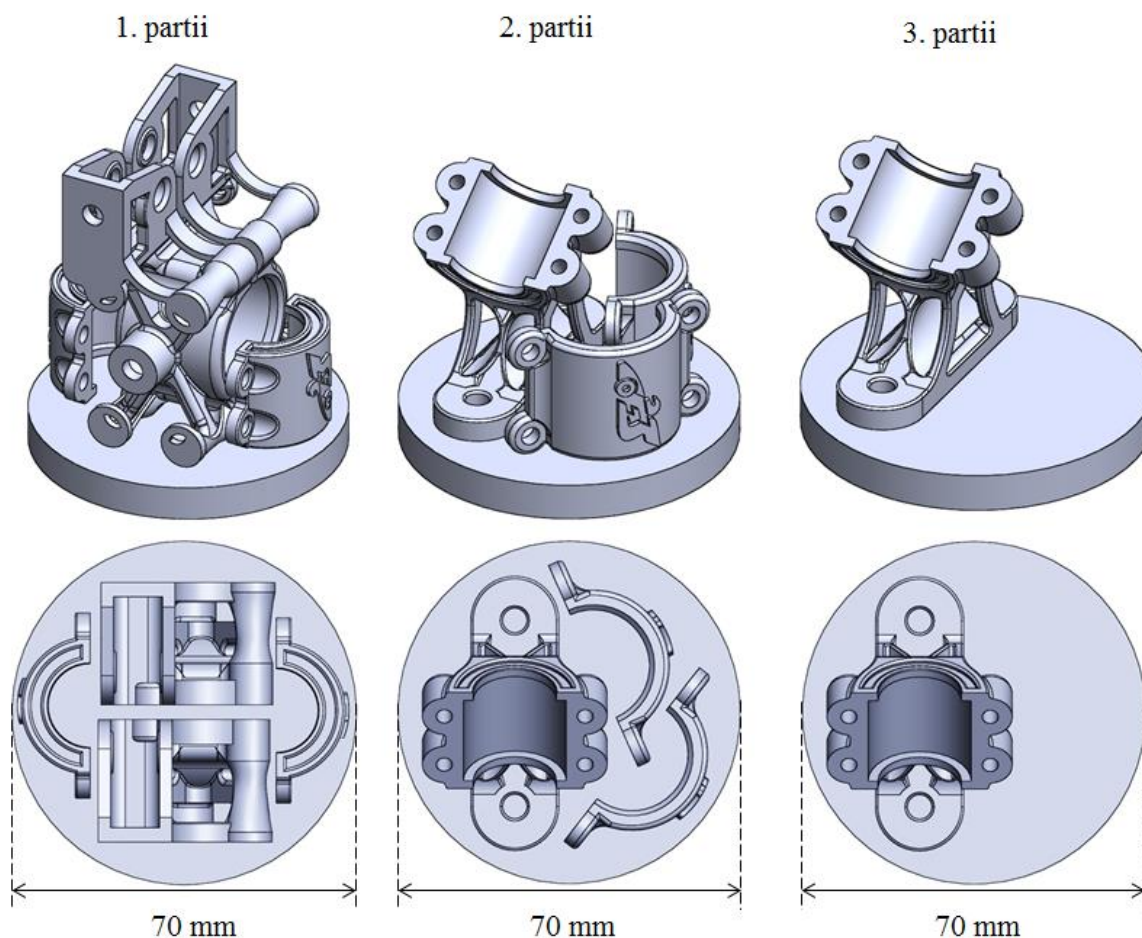
Alajaotises 2.1 on üldistatult kirjeldatud detaili SLM tootmisega kaasnevad põhitegevused. Lisaks seadme ettevalmistamisele, mudelite konverteerimisele .STL formaati ja laadimisele *RDesigner* tarkvarasse on enne tootmist oluline määrata detailide asend platvormil. See, millises asendis peaks detail olema, sõltub eesmärkidest ja detaili geometriast. Näiteks võib kiiremat tootmisaega võimaldava asendiga kaasneda tugede paiknemine piirkondades, kust neid on keeruline eemaldada. Kuna võimalikke geometriaid on palju ning eesmärgid tootmise kiiruse ja muude aspektide osas on erinevad, puudub universaalne juhend õige paigutuse saavutamiseks. Arvestada tuleb järgnevaid asjaolusid:

- Tootmise aega üks enim mõjutavaid komponente on kihtide arv. Üldjuhul on kihtide arvu vähendades võimalik oluliselt vähendada tootmise aega. Detail tuleks panna asendisse, mille juures ta on kõige „madalam“
- Detaili substraadi poole oleva osa külge tulevad alati toed. Tugede eemaldamine võib pinda kahjustada. Tuleks vältida kriitilise tähtsusega pindade ulatuslikku toestamist. Toote pinnakvaliteedi ja järeltötluse aja perspektiivist on kõige parem valida asend, mille puhul tugede hulk on minimaalne
- Toestada tuleb ka kõik detaili osad, mis moodustavad detaili vertikaalteljega vähemalt 45° nurga
- Substraadi pinna maksimaalne ära kasutamine. Tootes võimalikult palju detaile ühe partiina langevad üldjuhul tootmise aeg detaili kohta ja detailide omahind. Mitut detaili koos tootes on aga võimalus, et igat detaili ei saa paigutada toestamise mõttes kõige paremal viisil
- Käesolevas töös läbi viidud katsetuste alusel jääb detaili pealispind karedam, kui külgpinnad
- Käesolevas töös läbi viidud katsetuste alusel ei tasu detaili paigutada täiesti substraadi äärde. Äärel ei sulata laser pulbrit piisvalt. Kvaliteedi tagamiseks piisab 1 mm pikkuse vahe jätmisest äärega

Formula Student stabilisaatorvarda kinnitusdetailide paigutused substraadil on esitatud seel 3.3. Detailid toodetakse kolmes partiis. Partiid sisaldavad järgnevaid detaile:

- 1. partii: tagumise stabilisaatorvarda kaks suuremat kinnitusdetaili, esimese stabilisaatorvarda kaks väiksemat kinnitusdetaili
- 2. partii: tagumise stabilisaatorvarda kaks väiksemat kinnitusdetaili, esimese stabilisaatorvarda üks suur kinnitusdetail
- 3. partii: esimese stabilisaatorvarda üks suur kinnitusdetail

Esimeses kahes partiis oleks võimalik toota vähem detaile, sest 3. partii substraadil on vaba ruumi. Üldjuhul võimaldab substraadi maksimaalne täitmine vähendada tootmisaega ja tootmise omahinda (olenevalt detailide geomeetriast). Seetõttu on käesolevas töös näidatud detailide ruumisäästlik paigutus, mis võimaldab vajadusel toota lisadetaile 3. partiis.



Sele 3.3. Stabilisaatorvarda kinnitusdetailide paigutus substraadil

Väiksemad, poolringi kujulised detailid on asetatud külgedele, sest siis vajab toetamist vaid kitsas küljeriba. Kuna need toodetakse koos kõrgemate detailidega, ei ole oluline ka kõrguse minimeerimine. 1. partii suured detailid on asetatud kõrgena seetõttu, et „pikali“ asendis nad oma mõõtmete tõttu substraadile ei mahuks (ka mitte ükshaaval – substraadi läbimõõt on 70 mm, detaili pikkus üle selle). Samuti on „püstine“ asend ruumisäästlik. 2. partii ja 3. partii suur detail on asetatud näidatud viisil seetõttu, et toestatakse peamiselt alumine sirge pind ja säästetakse tugedest ülejäänud pindasid. Osaliselt toestatakse ka ülemine etteulatuv osa, mis moodustab vertikaalteljega 55° nurga. Taoline asend on ka ruumisäästlikum kui näiteks detaili külili asetamine. Selel 3.4 on esitatud fotod valmisdetailidest.



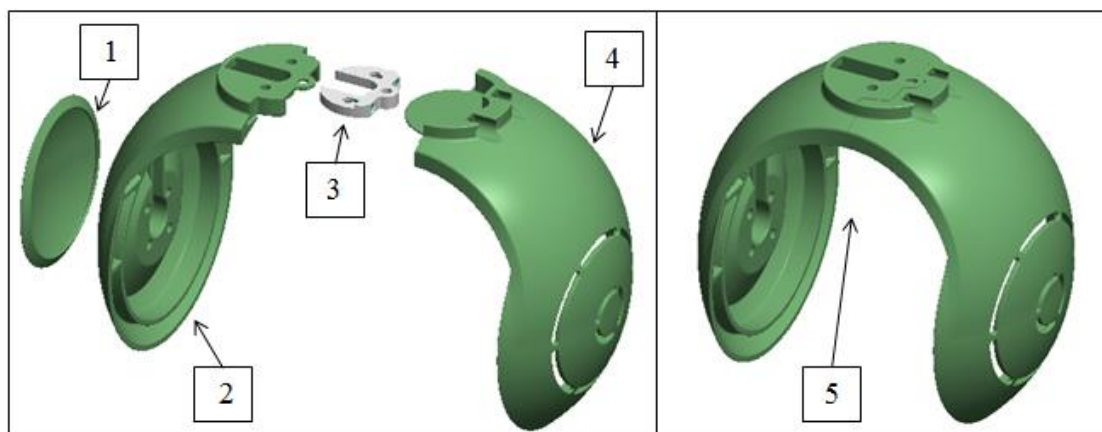
Sele 3.4. *Formula Student* stabilisaatorvarda kinnitusdetailid

3.2 Kvadrokooperi kaameramooduli hoidik

ELIX-XL kvadrokooperi kaameramooduli hoidikut (edaspidi „hoidik“) valmistatakse selle tootja *ELI OÜ* poolt ABS-plastist. Hoidikut valmistatakse FDM (*fusion deposition modelling*) tehnoloogiaga, mis on polümeerdetailide tootmiseks kasutatav AM tehnoloogia liik. Hoidiku detailid on keeruka geomeetriaga ja neid toodetakse väikestes kogustes. Hoidiku töökindlusega esineb probleeme, selle detailid on kasutamise käigus purunenud. Probleemi lahendamiseks on *ELI OÜ* otsustanud koostöös Tallinna Tehnikaülikooliga uurida kaameramooduli hoidiku valmistamise võimalikkust alumiiniumsulamist kasutades SLM tehnoloogiat.

3.2.1 Hoidiku esialgne disain

Hoidik koosneb neljast detailist. Hoidiku detailid eraldi ja koostuna on näidatud seel 3.5. Täiendav info detailide kohta on tabelis 3.1. Hoidik toetab kaameramoodulit, mille peamised osad on kaamera, seda ümbritsev korpus, väike mootor ja laager. Kaamerasilma peab saama liigutada kahel teljel. Seda teevad kaks mootorit – üks kaamerakorpusse ja hoidiku vahel ning teine üleval, hoidiku ja kvadrokooperi vahelises osas. Täiendavad pildid on esitatud seel 3.6.



Sele 3.5. Hoidiku detailid eraldi ja koostuna

Tabel 3.1. Hoidiku detailide kirjeldus. Detailide numbrid vastavalt selele 3.5

Detaili number	Kirjeldus	Gabariidid, ümardatud täisarvudeni (mm)
1	Kaas hoidiku poolele „A“. Hoidiku poolele „A“ kaameramooduli kinnitamiseks on vajalik väljastpoolt sisestada kruvid. Kaane lisamine säilitab ümara kuju	51 x 48 x 8
2	Hoidiku pool „A“, mis kinnitub detaili nr 3 abil kvadrokooperi külge	96 x 76 x 60
3	Kinnitusdetail hoidiku kinnitamiseks kvadrokooperi külge. Valmistatud alumiiniumist	24 x 22 x 4
4	Hoidiku pool „B“, millesse sisestatakse laager, millele toetub hoidiku sees olev kaameramoodul. Kinnitub poole „A“ külge	96 x 76 x 65
5	Hoidik, millesse kinnitub kaameramoodul ja mis ise kinnitub kvadrokooperi külge	103 x 96 x 76



Sele 3.6. ELIX-XL kaameramooduli hoidik ja kaameramoodul

Hoidiku (kolm plastdetaili ja üks alumiiniumdetail) kogukaal on 39,2 g. ABS-plasti tihedus on $1,05 \text{ g/cm}^3$, AlSi10Mg sulami tihedus $2,68 \text{ g/cm}^3$. Võttes arvesse hoidiku detailide gabariite ja kaalu tekib kaks väljakutset:

1. mõõtmete tõttu ei ole võimalik hoidiku kaht suuremat detaili *Realizer SLM 50* seadmel toota;
2. ABS-plastilt alumiiniumile üle minnes suureneb ligi kolmekordselt hoidiku kaal, mis ei ole kvadropteri aksepteeritav - tõuseb kvadropteri kaal ning hoidikut pöörava mootori poolt vajatava töö hulk.

Tulenevalt kaameramooduli fikseeritud geomeetriast on esimese probleemi lahendamine raskendatud. Otsustati keskenduda teise probleemi lahendamisele ehk hoidiku kaalu vähendamisele. Sel juhul saab *ELI OÜ* tellida hoidiku teiselt SLM-teenusepakkujalt või kvadropteri ülejäänud konstruktsiooni arvesse võttes kohendada see madalamaks, et Tallinna Tehnikaülikoolis valmistada prototüüp.

3.2.2 Hoidiku disaini muutmine

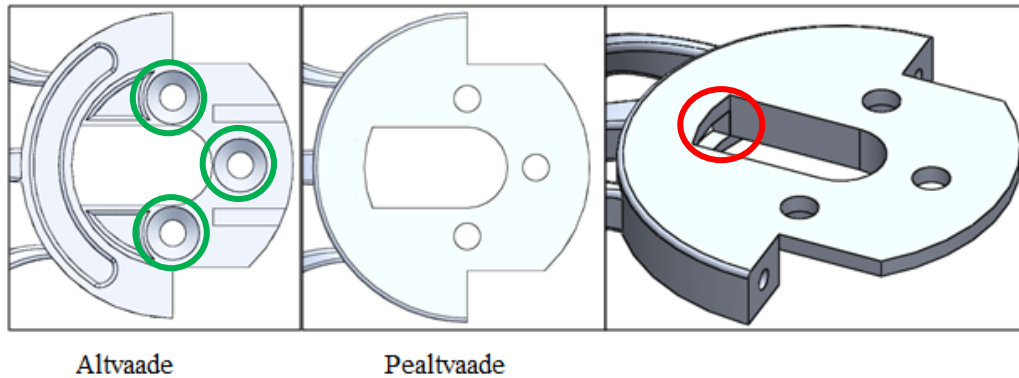
Hoidiku disaini muutmisel lähtuti järgmistest aspektidest:

- samale kujule ja samasse omavahelisse asendisse peavad jääma pinnad, mis on vajalikud ühildumiseks teiste kvadropteri osadega
- säilima peab hoidiku esialgne kaal
- hoidik peab olema vastupidav, kasutamisel mitte purunema

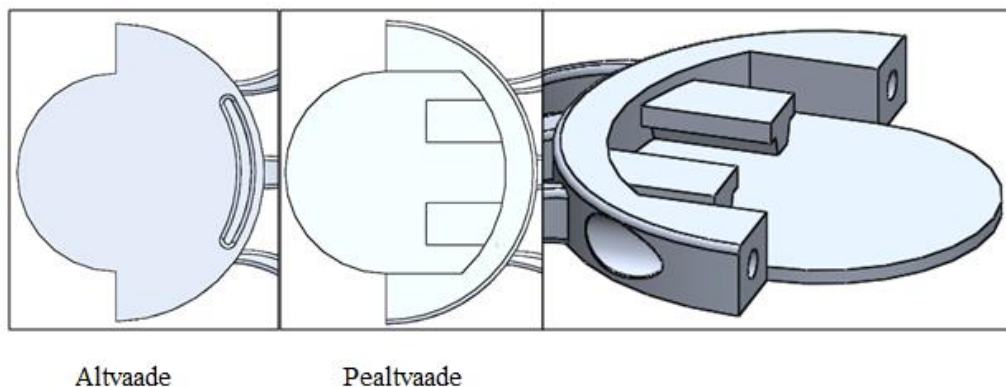
Kinnitusosa

Kuna kinnitusdetail (sele 3.5 detail number 3) on valmistatud alumiiniumist ja nüüd valmistatakse terve toode alumiiniumist, otsustati konstruktsiooni lihtsustamiseks kaotada eraldi kinnitusdetail. Avad kruvide jaoks, millega kinnitatakse hoidik kvadropteri külge, lisati korpuse poole „A“ kinnitusosale (sele 3.7). Lisati avad siinide jaoks ja ava juhtmete läbiviimiseks. Kaalu vähendamise eesmärgil eemaldati mitmest kohast materjali.

Poole „B“ kinnitusosa on seel 3.8. Alumises osas materjali eemaldamiseks tehtud sisselõike kuju kohendati vastavalt FEM (*finite element method*) analüüsi tulemustele. Lisati siinid. Nii „A“ kui ka „B“ poole kinnitusosadel on omavaheliseks kruvidega ühendamiseks vastavad avad.



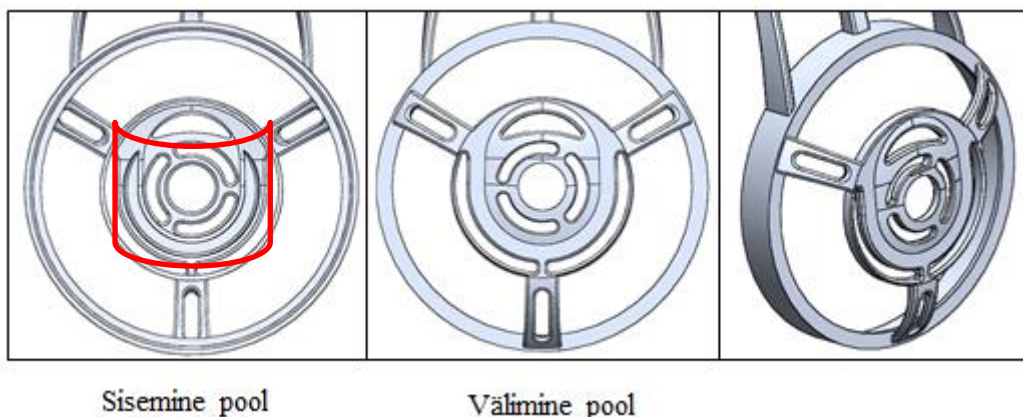
Sele 3.7. Hoidiku poole „A“ kinnitusosa integreerimine alumiiniumist kinnitusdetailiga. Punases ringis ava juhtmete läbiviimiseks, rohelistes ringides kinnitusdetailil olnud avad



Sele 3.8. Hoidiku poole „B“ kinnitusosa

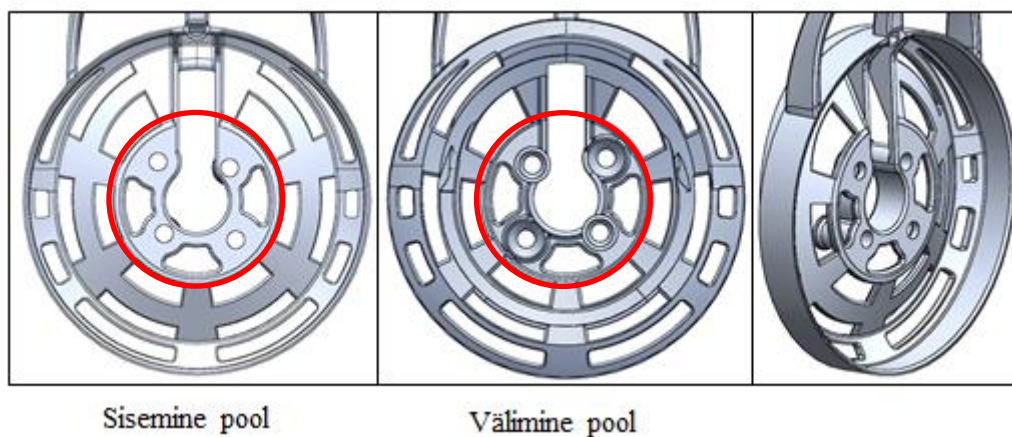
Kaameramoodulit toestav osa

Poole „B“ alumises, kaameramoodulit toestavas osas olid ainsateks vajalikeks pindadeks laagripesa ja U-kujuline liugpind (seel 3.9 punase joonega ümbritsetud) kaameramooduli otsa toestamiseks. Loodi need kaks osa ja ühendati kolme haaratsiga. Välimise, U-kujulist pinda sisaldava osa oleks saanud tungiva vajaduse korral ära jätta, kuid see aitab kaitsta ka kaameramoodulit ja annab hoidikule ümarama, esteetiliselt sobivama kuju.



Sele 3.9. Hoidiku poole „B“ kaameramoodulit toetava osa lahendus

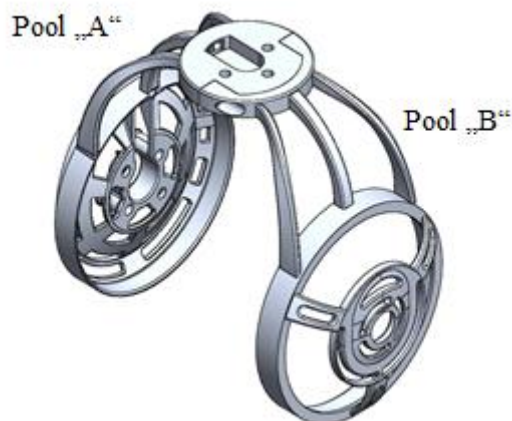
Hoidiku poolel „A“ on oluline avade olemasolu nelja kruvi jaoks ning toetuspind (punastes ringides seel 3.10). Ülejäänud osa lisati mootori ja kaameramooduli paremaks kaitsmiseks ning ühildumiseks kaamerakorpussega (kooniline pind keskosa ja servaosa vahel). Ühtlasi sarnaneb pool „A“ niimoodi rohkem pool „B“ laagripesale, luues sümmeetrilisema üldmulje. Detaili kaalu vähendamiseks muudeti see sõrestikulaadseks. Jäeti ära väljaspool varem asunud kaane kinnitus (kaant ei lisata).



Sele 3.10. Hoidiku poole „A“ alumise, kaameramoodulit toetava osa lahendus

Kinnitusosa ja kaameramoodulit toetava osa ühendus

Kuna kaamerat ümbritseb ümar korpus, ei ole otsest vajadust laia, kaamerakorpus katva ühendusosa järele (vaata sele 3.5). Ühendusosa peab olema minimalistlik ja kerge, kuid vastupidav. Lahenduseks valiti kolme haaratsiga ühendamine (sele 3.11).

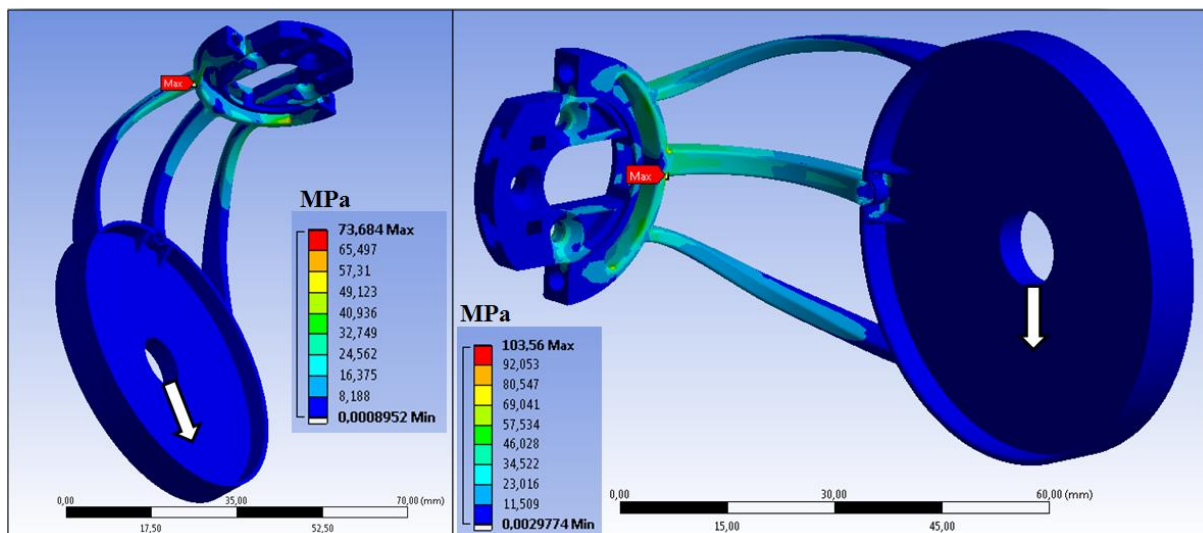


Sele 3.11 Hoidiku uus disain

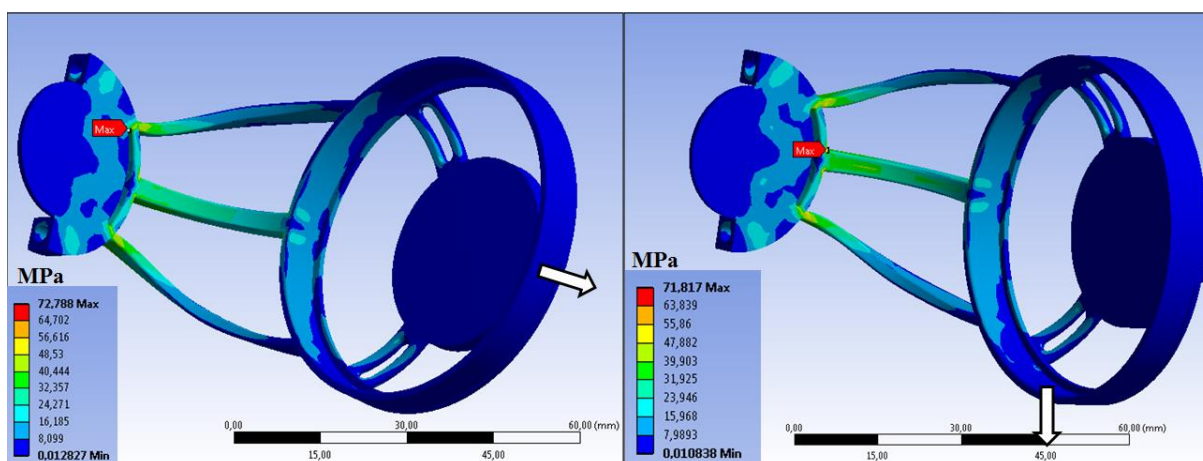
FEM analüüs

Hoidikus kasutamisel tekkiva pinge arvutamiseks viidi läbi staatiline FEM analüüs. FEM analüüse viidi läbi kogu konstruktsiooni muutmise vältel ning sealt saadud infot kasutati sisendina disaini muutmisel. Seledel 3.12 – 3.14 on esitatud lõpliku versiooni info.

Toestatava kaameramooduli mass on maksimaalselt 0,5 kg. See jaguneb omakorda hoidiku kahe poole vahel. Kuna koormuse jagunemine kahe poole vahel varieerub, tuleb arvestada hoidiku ühte poolt koormavaks massiks 0,5 kg. Varuteguriks valiti 3 ja seega arvestatakse, et kaamerahoidiku kumbki pool on koormatud 1,5 kilogrammiga. Detailid fikseeriti nende vastavatest kinnituskohtadest – detail „A“ kolme kinnitusosaga risti asetseva kruviga (kinnitus kvadrokopteri külge) ja detail „B“ kahe kinnitusosaga paralleelselt asetseva kruviga (kinnitus poole „A“ külge). Esimene test viidi läbi hoidiku tavapärase geomeetriaga. Arvutused olid mahukad, nõudes äärmiselt palju aega ja ressursi. Selgus, et suurimad pinged tekivad haaratsites. Seetõttu lihtsustati järgmiste analüüside tarbeks detailide alumise (kaameramoodulit toestava) osa geomeetriat.

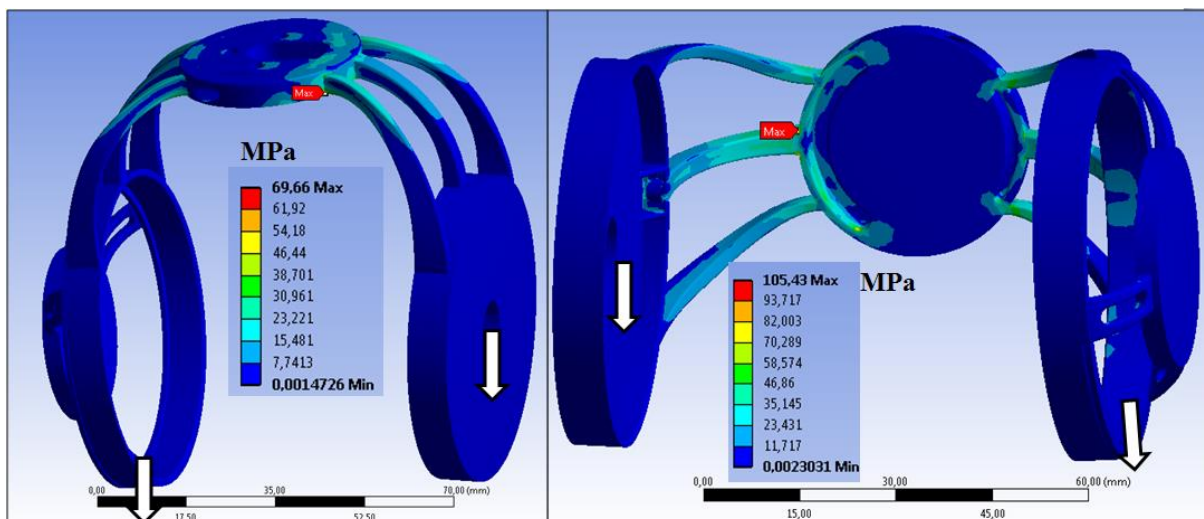


Sele 3.12. Ekvivalentpinged detailis „A“. Maksimaalse pinged piirkond näidatud punase sildiga, koormuse mõjumise suund näidatud valge noolega



Sele 3.13. Ekvivalentpinged detailis „B“. Maksimaalse pinged piirkond näidatud punase sildiga, koormuse mõjumise suund näidatud valge noolega

Detailide koostoimimise hindamiseks viidi seledel 3.12 ja 3.13 näidatud arvutused läbi ka koostu jaoks.



Sele 3.14. Ekvivalentpinged koostus. Maksimaalse pinged piirkond näidatud punase sildiga, koormuse mõjumise suund näidatud valgete nooltega

Kokkuvõte

Hoidiku konstruktsioon on oluliselt muutunud, kuid on säilitanud oma varasema funktsionaalsuse kaameramooduli toetajana. Tabelis 3.2 on üldkokkuvõtte uue hoidiku gabariitide ja massi kohta.

Tabel 3.2. Uue hoidiku gabariidid ja mass

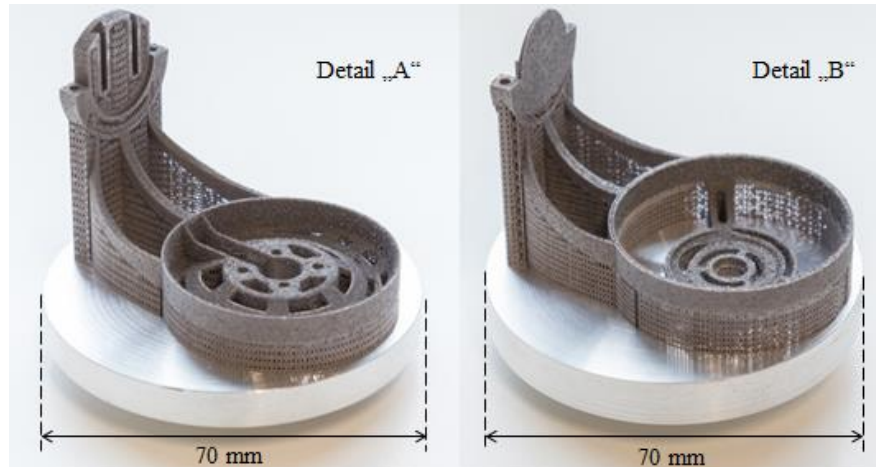
Nimetus	Gabariidid (mm), ümaratud kõrgema täisarvuni	Mass (g)
Detail "A"	87 x 52 x 60	20,1
Detail "B"	88 x 64 x 62	17,9
Koost	88 x 100 x 62	38,0

Detailide „A“ ja „B“ kõrguse tõttu ei ole neid jätkuvalt võimalik toota *Realizer SLM 50* seadmes. Samas on kõrgused vähenenud 96 millimeetrilt 87 ja 88 millimeetrini. Kuna antud töö käsitles vaid hoidikut, tehti nii, et see sobituks fikseeritud mõõtmetega kaameramooduli ümber. *ELI OÜ*1 on võimalus muuta kaameramooduli konstruktsiooni selliselt, et vähendada hoidiku detailide kõrgust täiendava 7 ja 8 mm võrra, misjärel on võimalik valmistada prototüübid seadmel *Realizer SLM 50* (detaili maksimaalne kõrgus 80 mm). Üks võimalus on lühendada haaratseid. Detailide pikkus ja laius on piisavalt madalad (seadme maksimum 70 mm).

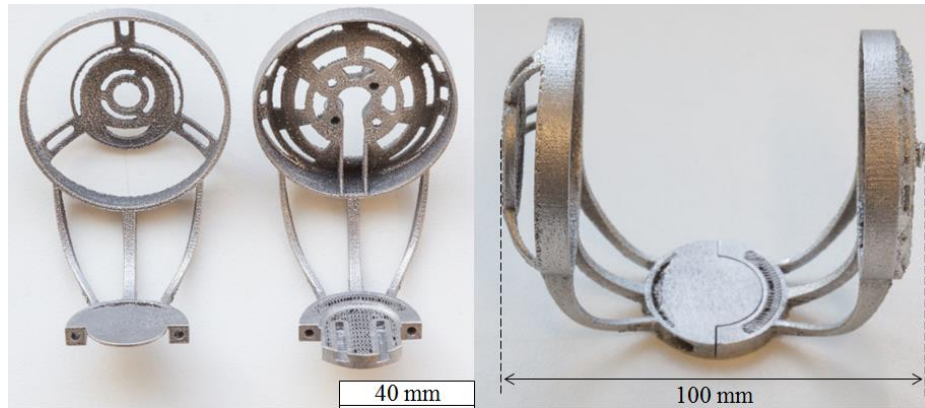
FEM analüüside põhjal võib eeldada, et uus hoidik on piisavalt tugev. Staatilise analüüsiga ei ole võimalik ette ennustada kõikvõimalikke kvadrokooperi lennul tekkivaid koormusolukordi. Kindlama tulemuse saamiseks tuleks läbi viia hulk lisaanalüüse. Kõige kindlama tagasiside detailide tööst saab katsetades neid praktikas. Samas on detailid konstrueeritud nii, et standardolukordades jäävad pinged maksimaalselt ligikaudu 100 MPa juurde. See on oluliselt alla SLM-toodetava AlSi10Mg sulami voolavuspiiri ja eeldatavalt väiksem või võrdne väsimuspiiriga. Seda varuteguri 3 juures. Asjaolu, et ABS-plasti tõmbetugevus on 40 MPa seletab osaliselt, miks hoidik varem purunes. Alumiiniumsulamile üle minnes saavutatakse oluline võit tugevusomadustes.

Uue hoidiku mass koostuna on 38 g. See on sarnane hoidiku esialgse massiga 39,2 g. Seega on saavutatud kaalu säilitamise eesmärk. Detailide arv koostus on vähendatud neljalt kahele.

SLM-seadmeh ei ole toodetud hoidiku lõplikku versiooni. Keeruka geometriaga ja võrdlemisi õhukese seinapaksusega osadega toote testvalmistamiseks printiti üks 30 % võrra vähendatud vahepealne versioon hoidiku detailidest. Pildid on esitatud seledel 3.15 ja 3.16.



Sele 3.15. Hoidiku detailid substraadil tugeodega



Sele 3.16. Hoidiku detailid pärast substraadilt eemaldamist ja koostuna

Detailide valmistamine oli edukas. Geomeetrilisi hälbeid ei täheldatud. Leiti, et detailide dimensioonid olid ligikaudu 100 – 200 μm suuremad nominaalväärtustest. Seda on võimalik edaspidi korrigeerida suurema *hatch offset* väärtuse kasutamisega.

3.3 Omahind

SLM tehnoloogia, nagu ka paljude muude tehnoloogiate puhul, on omahinda võimalik arvutada erinevatel viisidel. Tulemus sõltub arvutuse meetodikast. Iga omahinna arvutuse puhul tuleb selgitada, milliseid kulusid arvestati ja milliseid mitte, et arvutuse tulemust oleks võimalik õigesti tõlgendada.

3.3.1 Omahinna arvutuse meetodika selgitus

Käesolevas töös leitakse viie tootepartii tootmise omahinnad. Partiideks on kolm *Formula Student* detailide partiid (sele 3.3) ja kaks kvadrokooperi detailide näidispartiit (sele 3.15). Omahinna arvutuses arvestatakse vaid konkreetseid, võrdlemisi üheselt mõõdetavaid tootmisel tekkivaid kulusid ehk otseseid kulusid. Erandiks on tootmiseseadme amortisatsioonikulu, mida peetakse üldkuluks, kuid mis moodustab SLM puhul olulise osa toote omahinnast. Seetõttu on omahinna adekvaatsemaks esitamiseks ka seadme amortisatsioon arvesse võetud. Arvesse mittevõetavad kulud on:

- logistikakulud;
- praagist tulenevad kordustootmis-, järeltöötlus- ja kompensatsioonikulud;
- administratiivkulud ja organisatsiooni töötajate töötasud v.a tootmisoperaatori tasu;

- ruumide renditasu, hoone ülalpidamiskulud ja sisustusele tehtav kulu;
- lisa- ja järeltööstluste kulu, mis ei ole otseselt seotud SLM tootmisprotsessiga;
- CAD tarkvaras mudelite parandamise või loomise kulu;
- muud võimalikud üldkulud ja tootmisprotsessiga otseselt mitteseotud kulud.

Otseseid kulusid ja amortisatsiooni silmas pidades on mitmeid aspekte, mis oluliselt mõjutavad tulemust:

- Tooteühiku omahinna oluline komponent on tootmiseadme amortisatsioonikulu. Omahinna arvutuslik suurus sõltub sellest, kui pikaks hinnatakse seadme eluiga ja millised on ennustatavad hooldus- ja remondikulud seadme eluea jooksul.
- Materjalikulud tekib suur erinevus sõltuvalt sellest, kas pärast tootmistükli üle jäänud pulber utiliseeritakse või seda taaskasutatakse. Pulbri taaskasutamise puhul oleneb, mis on uue ja kasutatud pulbri vahekord.
- Kuna tootmistsükli aeg on suhteliselt pikk, on oluline kulukomponent operaatori tasu. Kulukomponendi suurus oleneb sellest, kas operaator arvestatakse kohalolevaks 100 % tootmisajast või tegeleb ta paralleelselt teiste töödega.
- SLM-toodetud detailide omahinna olulisim kulukäitur on tootmiseadme produktiivsus (Baumers et al., 2016). Produktiivsuse määravad suures plaanis kolm tegurit: ühel tootmistsükli seadme ettevalmistamiseks ja järeltegevusteks kuluv aeg, tootmiskiirus ja substraadi täituvus toodetega. Substraadi täituvus sõltub omakorda toodete geometriast ja tellimuste suurustest, mistõttu praktikas on see väga varieeruv.

Eelnevat arvesse võttes võib väita, et iga SLM partii omahind sõltub konkreetsetest toodetest, nende asendist ja kogusest. Isegi fikseeritud materjali ja seadme kombinatsiooni puhul võib omahind partii või toote ruumalaühiku kohta mitmekordselt erineda. Kuna käesolevas töös kasutatakse näitena viit erinevat partiid, on nende põhjal võimalik anda ligikaudne hinnang ka toote massiühiku keskmisele omahinnale.

3.3.2 Omahinna arvutus

Tootmisega seotud kulude hindamisel lähtutakse kahte liiki sisendandmetest – ajakulu ja materjalikulu. Iga partii (vaata tabel 3.3) jaoks hinnatakse aja- ja materjalikulu ning seejärel arvutatakse need rahaühikutesse, lähtudes sisendite (materjal, tööjõud, energia jm) ühikuhinnast.

Tabel 3.3. Omahinna arvutuses kasutatavate partiide numbrid ja kirjeldused

Partii nr	Partii kirjeldus
1	<i>Formula Student</i> detailid 1. partii
2	<i>Formula Student</i> detailid 2. partii
3	<i>Formula Student</i> detailid 3. partii
4	Kvadrokopteri <i>ELIX-XL</i> detail "A", vähendatud 30 %
5	Kvadrokopteri <i>ELIX-XL</i> detail "B", vähendatud 30 %

Materjalikulu

Igas partiis kulunud pulbri kogus on võimalik leida järgmise valemi põhjal:

$$m_{pulber} = (V_{detailid} + V_{detailid} \cdot k_{toed}) \cdot (1 + k_{pulber}) \cdot \rho_{pulber} \quad (3.1)$$

kus m_{pulber} – kulunud pulbri kogus, g

$V_{detailid}$ – substraadil olevate detailide koguruumala, cm³

k_{toed} – tugedele kuluva pulbri koefitsent, käesolevas töös 0,05

k_{pulber} – pulbrikao koefitsent, käesolevas töös 0,1

ρ_{pulber} – pulbri tihedus, käesolevas töös 2,68 g/cm³

Valem 3.1 tugineb eeldusele, et kogu pulber taaskasutatakse. Tugedele kuluva pulbri hulk on iga detaili puhul erinev. Käesolevas töös arvestatakse keskmiseks kuluks 5 % substraadil olevate detailide koguruumalast (k_{toed}). Pulbri taaskasutamisel tekivad kaod pulbri sõelumisel ja tootmiskambri kokkukogumisel. Seetõttu on kasutusel kaokoeffitsent k_{pulber} . Inertgaasi kulub kogemuse põhjal kulub ligikaudu üks balloon 15 partii jaoks ehk 0,07 ballooni ühe partii kohta. Materjalikulu kokkuvõtte partiide lõikes on tabelis 3.4.

Tabel 3.4. Materjalikulu partiide lõikes

Partii nr	$V_{detailid}$ (cm ³)	k_{toed}	k_{pulber}	ρ_{pulber} (g/cm ³)	m_{pulber} (g)	Gaasi kulu (balloon)
1	31,16	0,05	0,10	2,68	96,46	0,07
2	17,80	0,05	0,10	2,68	55,09	0,07
3	10,67	0,05	0,10	2,68	33,02	0,07
4	8,87	0,05	0,10	2,68	27,47	0,07
5	6,29	0,05	0,10	2,68	19,46	0,07

Ajakulu

Igale partiile kuluv aeg jaguneb kolmeks: tootmiseelsed tegevused, tootmise aeg, tootmisjärgsed tegevused. Kuna partiide tootmisaegu tootmise ajal ei mõõdetud, leitakse need arvutuslikult. Samal viisil on võimalik ennustada tootmisaegu tellimuste puhul.

Partii tootmisaeg koosneb kahest osast: pulbrikihtide lisamine ja pulbri sulatamine. Uue pulbrikihi lisamine võtab aega 9,5 sekundit. Pulbrikihtide lisamisele summaarselt kuluv aeg sõltub kihtide arvust, mis omakorda sõltub kõrgeima detaili kõrgusest koos tugeodega ja ühe kihi paksusest. Pulbri sulatamisele kuluvat aega leida on keerukam, sest tuleks leida iga ristlõike sulatamisele kulunud aeg. Ristlõikeid on tuhandeid ja nad on keerulise kujuga ning koosnevad sageli mitmest osast. Alternatiivselt on võimalik leida ühe ruumalaühiku, näiteks 1 cm³ materjali sulatamiseks kuluv aeg ja selle põhjal sulatusajad teistsuguse ruumalaga detailidele.

1 cm³ ruumalaga kuubi kujulise detaili sulatamiseks kuluv aeg (pulgrikihtide lisamist arvestamata) on võimalik leida valemiga:

$$T_{sulatusK} = 10 \div v_{skan} \cdot n_{rida} \cdot n_{kiht} \quad (3.2)$$

kus $T_{sulatusK}$ – summaarne sulatusaeg 1 cm³ ruumalaga kuubile, s

v_{skan} – skannimise kiirus, käesolevas töös 109,1 mm/s

n_{rida} – sulatusridade arv 1 cm servapikkusega ruudu jaoks

n_{kiht} – kihtide arv

n_{rida} väärtus 1 cm servapikkuse jaoks on käesolevas töös 117,647. Sulatusriidade vahekauguse HD väärtuse puhul 0,085 mm annab see skannitud ala kogupikkuseks 9,999995 mm ehk ligikaudu 10 mm. Otstarbekas on kasutada n_{rida} väärtusena murdarvu, sest täisarvuks ümardades ning teistsuguse ruumalaga kehadele üldistades tekiks viga. n_{kiht} leitakse kuubiku servapikkuse jagamisel kihi paksuse LT väärtusega ja vastuse suurema lähima täisarvuni ümardamisel. LT väärtus on käesolevas töös 0,035 mm. Seega n_{kiht} väärtus on 286.

$$n_{kiht} = 10 \div 0,035 = 285,71 \approx 286$$

$$T_{sulatusK} = 10 \div 109,100 \cdot 117,647 \cdot 286 = 3084,06 \text{ s} \approx 51,40 \text{ min}$$

Arvutades $T_{sulatusK}$ põhjal teistsuguse ruumalaga kehade sulatamiseks kuluvat aega ei ole vastus täpne, sest toodete geomeetriad on erinevad. Näiteks kui ristlõige koosneb rohkem kui ühest osast, kulub laserkiirel aega ühelt osalt teisele jõudmiseks. Kahel sama ruumalaga tootel võib summaarne sulatusaeg erineda. Kuna eelmainitud põhjustel tekivad erinevused ajakulus on siiski väga väike, ei arvestata seda käesolevas töös.

Tootmisoperaatori poolt teostatavad tootmiseelsed- ja järgsed tegevused koos hinnangulise keskmise ajakuluga:

- 1) Tegevused tarkvaraga (tootmiseelne): *RDesigner* tarkvarasse .*STL* mudelite laadimine, optimaalse mudelite paigutuse saavutamine substraadil, tootmisparameetrite sisestamine, tugede genereerimine ja kontrollimine, vajadusel muutmine – 20 minutit
- 2) Tegevused seadmega (tootmiseelne): seadme sisselülitamine ja kontroll, algseadistus (substraadi kõrguse reguleerimine, substraadisoojenduse ja inertgaasi pealevoolu sisselülitamine, fookuskauguse reguleerimine, pulbri etteandmissageduse ja koguse reguleerimine) – 10 minutit
- 3) Tegevused seadmega (tootmisjärgne): substraadisoojenduse ja inertgaasi pealevoolu väljalülitamine, kasutatud pulbri eemaldamine seadmest, seadme puhastamine, substraadi vahetamine – 25 minutit
- 4) Tegevused tootega (tootmisjärgne): toodete eemaldamine subtraadilt, tugede eemaldamine toodetelt, toodete puhastamine – 35 min (suur ajakulu tuleneb sellest, et keeruka kujuga toodetel võib tugede eemaldamine olla ajamahukas)

Operaatori tööaja sisse arvestatakse kõik neli punkti, seadme tööaja sisse arvestatakse punktid 2 ja 3. Tootmiseelsed- ja järgsed tegevused ning nendest tulenev ajakulu on samad kõikide partiide jaoks. Kokkuvõtte ajakulust partiide lõikes on tabelis 3.5. Eesmärk on leida seadme täielik tööaeg ja operaatori täielik ajakulu igale partiile. Tootmise ajal arvestatakse operaatori kohaloleku koefitsendiks 0,15 (tabelis 3.5 rida 15). Sulatamise ajale lisandub tugede sulatamise aeg. Tugede sulatamise koefitsent (osakaaluna kogu sulatamise ajast) on määratud igale partiile eraldi (tabelis 3.5 rida 10).

Omahind

Tabel 3.5. Seadme ja operaatori ajakulu partiide lõikes

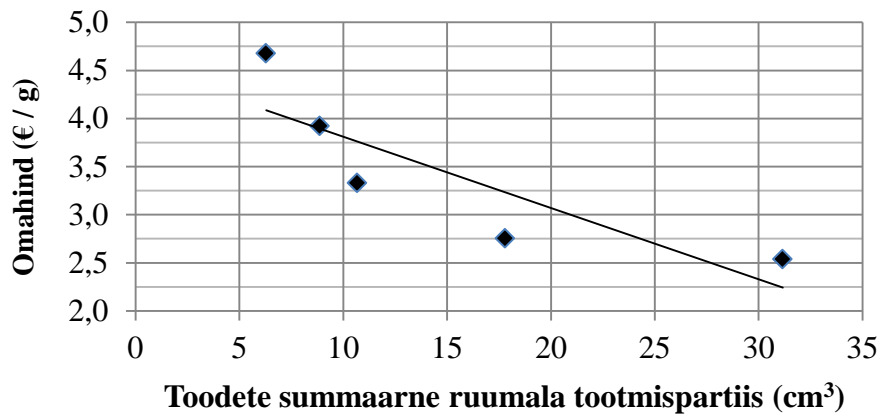
Nr	Suurus	Partii 1	Partii 2	Partii 3	Partii 4	Partii 5
1	Kihi paksus LT (mm)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
2	Kõrgeima detaili kõrgus (mm)	67,50	46,20	46,20	43,68	44,38
3	Tugedest lisanduv kõrgus (mm)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
4	Kogukõrgus (mm)	69,50	48,20	48,20	45,68	46,38
5	Kihtide arv	1986	1378	1378	1306	1326
6	Ühe kihi lisamise aeg (s)	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50
7	Kihtide lisamise aeg kokku (min)	314,45	218,18	218,18	206,78	209,95
8	1 cm ³ sulatamise aeg (min)	51,40	51,40	51,40	51,40	51,40
9	Detailide summaarne ruumala (cm ³)	31,16	17,80	10,67	8,87	6,29
10	Tugede sulatusaja koefitsent	0,03	0,02	0,02	0,08	0,08
11	Kokku sulatamisele kuluv aeg (min)	1649,77	933,00	559,32	492,57	349,04
12	Tootmiseelne ajakulu kokku (min)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
13	Tootmisäagne ajakulu kokku (min)	1964,2	1151,2	777,5	699,3	559,0
14	Tootmisjärgne ajakulu kokku (min)	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
15	Operaatori kohaloleku koefitsent (min)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
16	Seadme summaarne tööaeg (h)	33,32	19,77	13,54	12,24	9,90
17	Operaatori summaarne tööaeg (h)	6,41	4,38	3,44	3,25	2,90

Materjali- ja ajakulu andmete teisendamiseks rahaühikutesse on määratud sisendite hinnad. Operaatori igakuiseks brutotasuks on arvestatud ligikaudu 1300 eurot. Kõikide sisendite hinnad ja muud vajalikud andmed on esitatud tabelis 3.6. Kõikide sisendite hinnad peale seadme ostuhinna võivad muutuda ajas või vastavalt tarnijale.

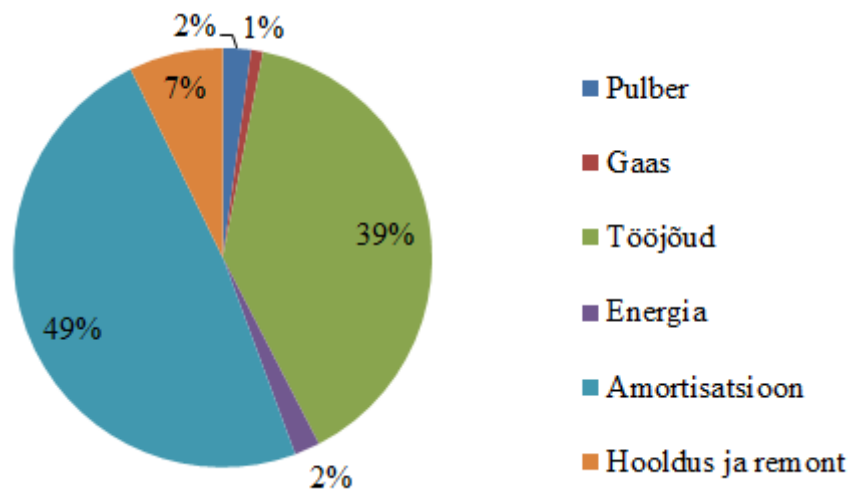
Tabel 3.6. Omahinnad ja sisendite hinnad partiide lõikes

	Partii 1	Partii 2	Partii 3	Partii 4	Partii 5	Keskmine
Pulbri kulu (g)	96,46	55,09	33,02	27,47	19,46	
Pulbri hind (€)	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	
Kulutused pulbrile (€)	5,31	3,03	1,82	1,51	1,07	2,55
Gaasi kulu (balloon)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	
Gaasi hind (€ / balloon)	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	
Kulutused gaasile (€)	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
Operaatori tööaeg (h)	6,41	4,38	3,44	3,25	2,90	
Operaatori tasu k.a maksud (€ / h)	11,30	11,30	11,30	11,30	11,30	
Kulutused tööjõule (€)	72,44	49,47	38,91	36,71	32,74	46,05
Seadme tööaeg (h)	33,32	19,77	13,54	12,24	9,90	
Tootmisseedme võimsus (kW)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Energia hind (€ / kWh)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	
Kulutused energiale (€)	4,33	2,57	1,76	1,59	1,29	2,31
Tootmisseedme maksumus (€)	150000	150000	150000	150000	150000	
Tootmisseedme eluiga (aasta)	10	10	10	10	10	
Tootmisseedme töötundide arv aastas	4700	4700	4700	4700	4700	
Amortisatsioonikulu (€ / h)	3,19	3,19	3,19	3,19	3,19	
Kulutused amortisatsioonile (€)	106,34	63,09	43,22	39,06	31,60	56,66
Hooldustööde aastane maksumus osakaaluna seadme ostuhinnast (%)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	
Hooldus- ja remondikulud (€ / h)	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	
Kulutused hooldusele ja remondile (€)	15,95	9,46	6,48	5,86	4,74	8,50
Toodete summaarne ruumala (cm ³)	31,16	17,80	10,67	8,87	6,29	
Tugede osa kulust (%)	3,00	2,00	2,00	8,00	8,00	
KULU KOKKU (€)	205,44	128,70	93,26	85,80	72,50	117,14
KULU (€ / cm³)	6,80	7,38	8,92	10,51	12,53	9,23
KULU (€ / g)	2,54	2,75	3,33	3,92	4,68	3,44

Keskmine omahind ühele grammile AlSi10Mg sulamist SLM-toodetud detailile on 3,44 €. Otstarbekas on arvestada madalaima hinnaga 2,54 € / g, sest tootmisala peaks olema igal ajal maksimaalselt toodetega hõivatud. Sele 3.17 iseloomustab ühe grammi toote omahinna sõltuvust tootmisala täituvusest toodetega. On näha, et suurem täituvus langetab massiühiku omahinda. Sele 3.18 iseloomustab erinevate kulukomponentide osakaalu omahinnas.



Sele 3.17. Tootmise omahinna sõltuvus substraadil olevate toodete koguruumalast lineaarse regressioonjoonega



Sele 3.18. Kulukomponentide osakaal omahinnast

Omahinna vähendamise võimalused

Suurimad kulukomponendid on tootmiseseadme amortisatsioon ja tööjõud. Nende kahe vähendamine annab suurima efekti omahinna vähenemises. Teoreetiliselt on võimalik vähendada ka teisi kulukomponente. Peamised võimalused on järgmised:

- Vähendada seadme tööaega (ühe partii jaoks) suurendades skannimise kiirust. Tõstes skannimise kiiruse kahekordseks, on käesoleva töö näidispartiide puhul on keskmine grammi hind 2,48 € ja madalaim grammi hind 1,60 €.
- Vähendada tööjõukulu. On kaks viisi: maksta madalamat töötasu või vähendada operaatori kohalolekukoefitsenti. Vähendades käesolevas töös kohaolekukoefitsendi 0,05 peale (operaator tegeleb 95 % tootmise ajast muude asjadega) on keskmine grammi hind 2,90 € ja madalaim grammi hind 2,08 €. Elimineerides käesolevast mudelist tööjõukulu komponendi on keskmine grammi hind 1,53 € ja madalaim grammi hind 0,97 €.
- Amortisatsioonikulule avaldab mõju see, kui pika ajaga plaanitakse seade amortiseerida ja mis on selle eeldatav töötundide arv aastas. Amortiseerides seadet 15 aasta jooksul ja planeerides eeldatavaks töötundide arvuks aastas 6000, langeb keskmine grammi hind 2,62 €'ni ja madalaim grammi hind 1,87 €'ni.
- Hankida soodsama hinnaga lähtepulbrit, gaasi ja energiat. Need komponendid avaldavad omahinnale vähe mõju.

Ülaltoodud meetmeid saab omavahel kombineerida. Olulisemad soovitusel on autori hinnangul skannimise kiiruse tõstmine ja operaatori töö efektiivne jagamine teiste organisatsioonis vajalike tegevuste vahel alandades tööjõukomponenti selektiivse lasersulatusse seadmel. Võttes arvesse ainult otseseid kulusid (elimineerides mudelist amortisatsiooni- ja hoolduskulu täielikult), on keskmiseks grammi hinnaks 1,60 € ja madalaimaks hinnaks 1,03 €.

KOKKUVÕTE

Magistritöös uuritakse alumiiniumsulami AlSi10Mg kasutamist selektiivse lasersulatuse protsessis. Töötatakse välja funktsionaalsete toodete valmistamist võimaldavad protsessiparameetrid. Töö teostati lähtudes kõrgtugevate kergekaaluliste kompleksse geomeetriaga detailide valmistamise vajadusest. Üks peamisi väljakutseid töös oli suhteliselt madala võimsusega laseriga seadme kasutamine.

Töö jaguneb sissejuhatavaks, eksperimentaalseks ja rakenduslikuks osaks. Sissejuhatavas osas tutvutakse pulbripõhise kihtlisandustehnoloogia ja selle alaliigi selektiivse lasersulatusega. Selgitatakse töös optimeeritavate protsessiparameetrite olemust. Koostatakse ülevaade valdkonna teadusartiklitest, keskendudes alumiiniumsulameid puudutavale. Selle tulemusel saadakse teadmised alumiiniumsulamite selektiivse lasersulatusega kaasnevate väljakutsete ja oluliste aspektide kohta. Ühtlasi antakse ülevaade *ELI OÜ* kvadrokooperist *ELIX-XL* ja *Formula Student* projektist, kes on käesoleva töö tulemuste kasutajad.

Eksperimentaalses osas valmistatakse katsekehad ja teostatakse nende mõõtmine eesmärgiga maksimeerida materjali tihedus ja mehaanilised omadused. Määratakse tihedus, omadused tõmbeolukorras, kõvadus, pinnakaredus. Kasutatakse statistilist katsete planeerimist ja regressioonanalüüsi sobivamate protsessiparameetrite kombinatsioonide leidmiseks. Lisaks hinnatakse pulbrikihi paksuse, inertgaasikeskkonna, laseri võimsuse, topeltskannimise meetodi kasutamise ja kuumisostaatpressimise mõju valmistatava materjali omadustele.

Leitakse, et kasutades laserit võimsusega 100 W on võimalik valmistada kõrge tiheduse ja mehaaniliste omadustega detaile. Parimate katsekehade tihedused on ligikaudu 97 – 98 % teoreetilisest. Katsekehade tõmbetugevused ulatusid 463 MPa'ni, mis on kõrgem termotöödeldud AlSi10Mg valudetailide tüüpilisest tugevusest. Ka katsekehade kõvadus on võrdluses valudetailidega sama hea või kõrgem. Saavutatud purunemiseelne pikenemine tõmbel on 2,5 %, mis on valudetailidega võrreldes pigem madal. Ilmnes ka, et kõrgemate mehaaniliste omaduste saavutamiseks tasub inertgaasina kasutada lämmastikku.

Kuumisostaatpressimist katsetati kahel erineval režiimil. Tõusis katsekehade tihedus ja plastsus, kuid vähenes tugevus. Pärast kuumisostaatpressimist jäi kõikide katsekehade

tugevus alla 250 MPa, mis on AlSi10Mg sulami puhul madal. Optimaalsete tugevuse ja plastsuse kombinatsioonide saavutamiseks on tarvilik läbi viia täiendavad uuringud sobivate kuumisostaatpressimise režiimide kohta, kaasates soovitatavalt ka termotöötluste.

Valmistatud katsekehade pinnakaredus on pigem kõrge. Teadusartiklite ülevaatest ilmneb, et see nähtus on selektiivses lasersulatuses puhul tavapärane. Käesolevas töös võib kõrget pinnakaredust soodustada ka suhteliselt madala võimsusega laser, mistõttu kasutatakse madalaid skannimise kiirusi, mis soodustavad ümarate piiskade (*balling*) moodustumist. Eksperimentide põhjal on kõrgeid mehaanilisi omadusi tagav skannimise kiirus kuni 109 mm/s. See on selektiivse lasersulatuses protsessi jaoks pigem madal. Samas näitavad katsetused, et kõrge materjali tiheduse tagab võrdlemisi suurte energiakoguste üleandmine skannimisel. Skannimise kiiruse tõstmine vähendab üleantavat energiakogust. Pinnakareduse parendamise ja skannimise kiiruse tõstmise võimaluste uurimiseks vähendatakse laseri fookuskaugust. Madalama fookuskauguse juures sulatatakse korraga väiksemat materjalikogust, mis teoreetiliselt võimaldab tõsta skannimise kiirust. Käesolevas töös ei saavutata sel viisil madalamat pinnakaredust ega rahuldavat detaili tihedust. Soovitatav on teostada täiendavad uuringud erinevaid fookuskaugusi kasutades.

Töö rakenduslikus osas valmistati stabilisaatorvarda kinnitusdetailid *Formula Student* 2016. aasta autovormeli jaoks ja disainiti ning valmistati näidis *ELI OÜ* kvadrokooperi *ELIX-XL* kaameramooduli hoidikust. Anti ülevaade olulistest aspektidest detailide tootmisel ja substraadile paigutamisel. Kaameramooduli hoidikule loodi ABS-plastilt alumiiniumile üleminekuks esialgset kaalu säilitav disain. Näidati disaini muutmise lähteülesanne ja kõik. FEM analüüsi abil veenduti lahenduse piisavas tugevuses ettenähtud funktsiooni täitmisel.

Arvutati kõikide rakenduslikus osas valmistatud tootepartiide omahinnad. Selgitati omahinna arvutuse meetodikat ja toodi välja olulised omahinda mõjutavad tegurid kihtlisandustehnoloogias. Partiide näitel määrati hinnanguline ühe grammi materjali printimise omahind. Leiti, et suurimad kulukomponendid on seadme amortisatsioonikulu ja tööjõukulu. Kuigi ühe massiühiku printimise omahind fikseeritud skannimise kiiruse juures ei sõltu ainult tootmisala täituvusest, ilmneb näidispartiide põhjal, et tootmisala täituvuse tõustes ühe massiühiku materjali printimise omahind langeb. Seetõttu on oluline tootmisala maksimaalse täitumise saavutamine.

SUMMARY

The focus of the thesis is the use of aluminium alloy AlSi10Mg in the selective laser melting process. The influence of process parameters on material properties is studied and suitable parameters for producing functional parts are proposed. The reason for carrying out the study is the need for fabrication of high-strength lightweight parts with complex geometries. One of the main challenges of the study is that the power of the laser in the used selective laser melting equipment is relatively low.

The thesis consists of an introductory subdivision, an experimental subdivision and a subdivision featuring the implementation of the study results for producing functional parts. In the introductory subdivision, the powder bed fusion, and one of its techniques, selective laser melting, are examined. The process parameters studied in the thesis are explained. A review of the current research carried out on selective laser melting of aluminium alloys is presented. As a result, knowledge of important challenges and aspects accompanying the selective laser melting of aluminium alloys is acquired. The objects of research result implementation – quadcopter of *ELI OÜ* and the *Formula Student* project – are introduced.

In the experimental subdivision, test specimens are fabricated and their properties are measured with the goal of maximizing density and mechanical properties of the material. Tensile strength, yield strength and maximum elongation are measured using tensile tests. Other measured properties are density, hardness, surface roughness. A statistical design of experiments and regression analysis are used for determining the most suitable combinations of process parameters. The influence of powder layer thickness, inert gas atmosphere, laser power, double scanning and hot isostatic pressing on the properties of fabricated specimens is observed.

Findings suggest that it is possible to produce high density parts with high mechanical properties using the laser power of 100 W. Relative density of the best specimens is approximately 97 % – 98 %. Tensile strength of the specimens reached 463 MPa which is higher than the tensile strength of cast and heat treated AlSi10Mg parts. Hardness was comparable with or higher than that of the cast parts made of AlSi10Mg. The maximum elongation reached 2.5 % which is rather low compared to cast parts. It was inferred that nitrogen is the preferred inert gas atmosphere to use for achieving high mechanical properties.

Two regimes of hot isostatic pressing were tested. Density and plasticity of specimens improved and tensile strength declined. The tensile strength of all specimens was under 250 MPa which is low for AlSi10Mg. Further studies regarding hot isostatic pressing regimes are needed for achievement of optimal combinations of strength and plasticity. Involving heat treatment in the studies should be considered.

Surface roughness of fabricated specimens was relatively high. It can be inferred from the literature review that high surface roughness is rather common in selective laser melted parts. Relatively low laser power is likely one of the reasons of a high surface roughness in the present study. Low scanning speeds are used in combination with a low laser power to achieve a sufficient level of energy density. According to experiments, 109 mm/s is the highest recommended scanning speed for fabrication of parts with high mechanical properties. This is a relatively low scanning speed in selective laser melting. Low scanning speeds can cause balling defects on the material surface which in turn lead to a high surface roughness. However, low scanning speeds provide a high energy density and the latter is needed for achieving high material density and high mechanical properties. The laser focus distance is decreased in order to study further opportunities for reducing surface roughness. Decreasing the laser focus distance decreases the area of the powder which is simultaneously melted by the laser beam. Therefore the same temperature is achieved using higher scanning speeds. In the present study, changing the focus distance does not result in a lower surface roughness nor in a sufficient material density. It is recommended to conduct further research using different focus distances.

As an implementation of the study results, anti-roll bar brackets for the *Formula Student* project are produced. Also, gimbal parts for an *ELI OÜ* quadcopter *ELIX-XL* are redesigned and prototype samples are produced. Important aspects about part fabrication and optimal positioning of parts on the substrate are presented. The gimbal parts were redesigned with the goal of maintaining the initial weight after the transition from ABS plastic to an aluminium alloy. New parts are tested using the finite element method analysis.

The cost of fabrication is calculated for all batches of functional parts and samples produced in the study (test specimens excluded). The method of cost calculation is explained and the aspects which significantly influence the cost of fabrication in additive manufacturing are pointed out. Based on the cost of different batches, the approximate fabrication cost for one gram of material is shown. It was inferred that the amortization and labor costs are the most

significant in the selective laser melting of AlSi10Mg. The findings also suggest that although the cost of one gram does not depend only on the utilization rate of the fabrication space within a batch, the cost of one gram declines by increasing space utilization. Therefore it is important to maximally utilize the fabrication area in each batch.

KASUTATUD KIRJANDUS

Aboulkhair, N. T., Everitt, N. M., Ashcroft, I., Tuck, C. (2014). Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 1 – 4, 77 – 86

AT Kearny (2015). 3D Printing: A Manufacturing Revolution

<https://www.atkearney.com/documents/10192/5992684/3D+Printing+A+Manufacturing+Revolution.pdf/bf8f5c00-69c4-4909-858a-423e3b94bba3> (15.02.2016)

Atzeni, E., Salmi, A. (2015). Study on unsupported overhangs of AlSi10Mg parts processed by Direct Metal Laser Sintering (DMLS). *Journal of Manufacturing Processes*, 20 (3), 500 – 506

Bartolo, P. J., Lemos, A. C., Pereira, A. M., Mateus, A. J., Ramos, C., Santos, C. D., Oliveira, D., Pinto, E., Craveiro, F., Bartolo, H. M., et al.,. *High Value Manufacturing : Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*. Boca Raton : CNC Press, 2013.

Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C., Hague, R. (2016). The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. *Technological Forecasting & Social Change*, 102, 193 - 201

Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V., Buchbinder, D. (2012). Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials and design*, 34, 159 - 169

Buchbinder, D., Schleifenbaum, H., Heidrich, S., Meiners, W., Bültmann, J. (2011). High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of aluminum parts. *Physics Procedia*, 12 (part A), 271 – 278

Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Iuliano, L., Fino, P. (2013). Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67 (9), 2743 – 2751

Cloots, M., Spierings, B. A., Wegener, K., (2013). Assessing new support minimizing strategies for the additive manufacturing technology SLM. International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference. Austin, Texas.

Das, S. (2003). Physical aspects of process control in selective laser sintering of metals. *Advanced Engineering Materials*, 5 (10), 701 – 711

ELI OÜ (2012). Multi-rootor ELIX-XL

<http://www.uav.ee/products/1/multirootor-elix-xl> (20.04.2016)

EOS GmbH (2014). AlSi10Mg Material Data Sheet

https://scrivito-public-cdn.s3-eu-west-1.amazonaws.com/eos/public/8837de942d78d3b3/4e099c3a857fdddca4be9d59fbb1cd74/EOS_Aluminium_AlSi10Mg_en.pdf (3.04.2016)

Formula Student (2016). Võistlus

<http://formulastudent.ee/voistlus> (24.04.2016)

Galjaard, S., Hofman, S., Ren, S. (2014). „New Opportunities to Optimize Structural Designs in Metal by Using Additive Manufacturing“ in *Advances in Architectural Geometry 2014*. Springer, 2015, 79 – 93

Gibson, I., Rosen, D.W., Straker, B. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. New York : Springer, 2010.

Gusarov, A. V., Kruth, J. P. (2005). Modelling of radiation transfer in metallic powders at laser treatment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48 (16), 3423 – 3434

Hauser, C., Childs, T. H. C., Badrossamy, M. (2005). Selective laser sintering (melting) of stainless and tool steel powders: Experiments and modelling. *Journal of Engineering Manufacture*, 219 (4), 339 – 357

Jafari, M. A., Han, W., Mohammadi, F., Safari, A., Danforth, S.C., Langrana, N. (2000). A novel system for fused deposition of advanced multiple ceramics. – *Rapid Prototyping Journal*, 6 (3), 161 – 175

Jha, A. K., Prasad, S. V., Upadhyaya, G.S. (1988). Effect of sintering atmosphere and alumina addition on properties of 6061 aluminium P/M alloy. *Powder Metallurgy International*, 20 (5), 18

Kammer, C., Drossel, G. *Aluminium-Taschenbuch*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 2009.

Karapatis, P. A sub-process approach of Selective Laser Sintering. (2002). PhD thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.

Kempen, K., Thijs, L., Yasa, E., Badrossamay, M., Verheecke., W., Kruth, J. P. (2011). Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, Texas.

Klocke, F., Wirtz, H. (1997). *Selective Laser Sintering of Ceramics*. Proceedings of the International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering.

Kruth, J. P., Bardossamay, M., Yasa, E., Deckers, J., Thijs, L., Humbeeck, J. (2010). Part and material properties in selective laser melting of metals. *16th International Symposium on Electromachining*. Shanghai, China.

Kruth, J. P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11 (1), 26 – 36

Kruth, J. P., Wang, X., Laoui, T., Froyen, L. (2003). Lasers and materials in Selective Laser Sintering. *The International Journal of Assembly Technology and Management*, 23 (4), 357 – 471

Mercelis, P., Kruth, J. P. (2006). Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 12 (5), 254 – 265

Olakanmi, E. O. Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al–Mg, and Al–Si powders: Effect of processing conditions and powder properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (8), 1387 – 1405

Olakanmi, E. O., Cochrane, R. F., Dalgarno, K. W. (2011). Densification mechanism and microstructural evolution in selective laser sintering of Al–12Si powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 211 (1), 113 – 121

Olakanmi, E. O., Cochrane, R. F., Dalgarno, K. W. (2015). A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*, 74, 401 – 477

Purtonen, T., Kalliosaari, A., Salminen, A. (2014). Monitoring and Adaptive Control of Laser Processes. *Physics Procedia*, 56, 1218 – 1231

Read, N., Wang, W., Essa, K., Attallah, M. M. (2015). Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials & Design*, 65, 417 – 424

Realizer GmbH (2016). SLM 50

<http://www.realizer.com/en/startseite/machinery-equipment/machinery-slm50-slm100-slm125-slm250-slm300/slm-50> (10.03.2016)

Schaffer, G. B., Hall, B. J., Bonner, S. J., Huo, S. H. and Sercombe, T. B. (2006). The effect of the atmosphere and the role of pore filling on the sintering of aluminium. *Acta Materialia*, 54 (1), 131 – 138

Spears, T. G., Gold, S. A. (2016). In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 5 (2)

Vilaro, T., Colin, C., Bartout, J. D., Naze, L., Sennour, M. (2012). Microstructural and mechanical approaches of the selective laser melting process applied to a nickel-base superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, 534, 446 – 451

Wang, X. J., Zhang, L. C., Fang, M. H., Sercombe T. B. (2014). The effect of atmosphere on the structure and properties of a selective laser melted Al-12Si alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 597, 370 – 375

Weingarten, C., Buchbinder, D., Pirch, N., Meiners, W., Wissenbach, K., Poprawe, R. (2015). Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg. *Journal of Materials Processing Technology*, 221, 112 – 120

Williams, J. D., Deckard, C. R. (1998). Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process. *Rapid Prototyping Journal*, 4 (2), 90 – 100

Wohlers, T. (2015). *3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*. Fort Collins: Wohlers Associates, Inc.

Yadroitsev, I. Smurov, I. (2010). Selective laser melting technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape. *Physics Procedia*, 5, 551 – 560

LISAD

Lisa 1. SLM sisend- ja väljundparameetrid

Tootmisprotsessis potentsiaalselt muutuvad parameetrid

1. *Laserkiire liikumine*: iseloomustab skannimise kiirust ja suunda
2. *Laseri võimsus*: iseloomustab laserkiire võimsust
3. *Laserkiire diameeter*: iseloomustab pulbrit skanniva laserkiire diameetrit
4. *Kihipaksuse variatsioon*: iseloomustab pulbrikihi või selle osade paksuse erinevust nominaalse kihipaksuse väärtusest
5. *Inertgaasi voog*: iseloomustab inertgaasi hulka ja liikumist tootmiskambris (laminaarne, transientne, turbulentne)
6. *Skannimise muster*: iseloomustab laserkiire liikumise põhimõtet detaili ristlõigetel

Tootmise alguses kindlaksmääratavad parameetrid

1. *Pulbriosakeste suuruse jaotumine*: iseloomustab erinevate suurustega pulbriosakeste koguste suhet pulbriosakeste summaarsesse kogusesse
2. *Kihipaksus*: iseloomustab pulbrikihtide paksust, millistest luuakse sammhaaval toodetav detail
3. *Pakketihedus*: iseloomustab substraadil oleva pulbri tihedust
4. *Soojusjuhtivus*: iseloomustab lähtematerjali soojusjuhtivust
5. *Peegelduvus*: iseloomustab lähtematerjalilt tagasipeegelduva laserkiirguse hulga suhet kogu laserkiirgusesse
6. *Substraat*: iseloomustab kasutatava substraadi kuju ja mõõtmeid

Sulatustsooni parameetrid

1. *Temperatuur*: iseloomustab sulatustsooni temperatuuri, eelkõige maksimaalset temperatuuri ja temperatuurigradienti
2. *Geomeetria*: iseloomustab sulatustsooni kuju ja mõõtmeid
3. *Atmosfäär sulatustsooni kohal*: iseloomustab materjali aurustumist ja/või spetsiifilist atmosfääri sulatustsooni vahetus läheduses

Sulatusrea parameetrid

1. *Geomeetrilised hälbed*: iseloomustab sulatusriidade paiknemise hälbeid. Hälbed tulenevad piiskade tekkest, sulamata materjalialadest jm

2. *Sulamata materjal*: iseloomustab sulamata materjali koguseid ja asukohti sulatusriidadel
3. *Kahanemine*: iseloomustab materjali kahanemist jahtumisel ja tardumisel sulatusreas
4. *Jääkpinged*: iseloomustab sulatusreas tekkivaid jääkpingeid
5. *Mikrostruktuur*: iseloomustab sulatusrea mikrostruktuuri, sh. terade suurust ja orientatsioone
6. *Tühimikud*: iseloomustab sulametalliga mittetäitunud piirkondade asukohta ja kuju sulatusriidades. Tühimikud tulenevad pooridest, pragudest, delamineerumisest

Ristlõikeparameetrid

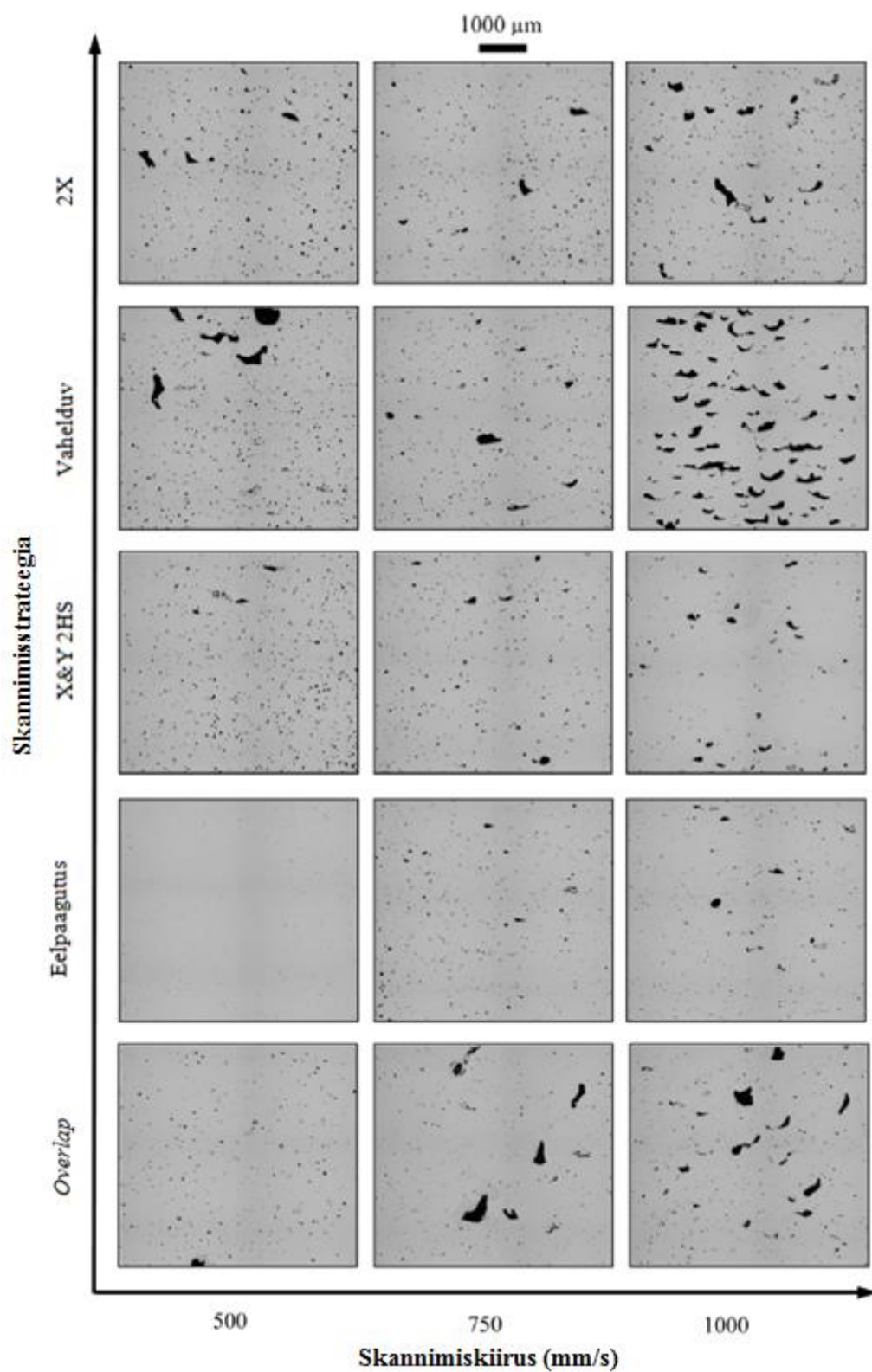
1. *Geomeetrilised irregulaarsused*: iseloomustab ristlõigete kõrvalekaldeid soovitud geomeetriast
2. *Jääkpinged*: iseloomustab pingete suurust ja levikut ristlõikes
3. *Sulamata lähtematerjal*: iseloomustab ristlõikes oleva sulamata lähtematerjali hulka ja asukohta
4. *Tühimikud*: iseloomustab sulametalliga mittetäitunud piirkondade asukohta ja kuju. Tühimikud tulenevad pooridest, pragudest, delamineerumisest
5. *Mikrostruktuur*: iseloomustab ristlõike kristallstruktuuri
6. *Defektid*: iseloomustab selliseid ristlõikes esinevaid defekte, mille tõttu ei ole võimalik protsessi jätkata ja liikuda järgmise ristlõike juurde. Näiteks oluline deformatsioon või delamineerumine

Toote parameetrid

1. *Geomeetiline hälve*: iseloomustab toote mõõtmete ja kuju vastavust nominaalsetele mõõtmetele ja kujule
2. *Mehaanilised omadused*: iseloomustab toote mehaanilisi omadusi - näiteks tugevus, kõvadus, plastsus, väsimustugevus
3. *Pinnakaredus*: iseloomustab toote pinna karedust
4. *Poorsus*: iseloomustab tootes olevate tühimike ja sulamata alade kogust
5. *Defektid*: iseloomustab defekte, mille tõttu ei ole toode rakendatav soovitud eesmärgil
6. *Jääkpinged*: iseloomustab tootes esinevaid jääkpingeid

Allikas: NISTIR 8036

Lisa 2. Skannimisstrateegiad ja nende mõju poorsusele



Sele L2.1. Skannimisstrateegiate mõju detaili poorsusele. Allikas: (Aboulkhair et al., 2014)

Skannimisstrateegiate selgitus (Aboulkhair et al., 2014)

- „X“: igat ristlõiget skannitakse ühe korra ühesuunaliste ridadena
- „2X“: sama mis „X“, kuid igat ristlõiget skannitakse kaks korda
- „Vahelduv“ (*alternating*): igat ristlõiget skannitakse ühe korra, kuid igal järgmisel ristlõikel on skannimise suund eelmise ristlõikega võrreldes pööratud 90° võrra
- „X&Y 2HS“: igat ristlõiget skannitakse kaks korda, iga skannimine on eelmisega võrreldes pööratud 90° võrra ja sama ristlõike puhul on mõlemad skannimised erineva *HD* ehk sulatusriidade vahekaugusega
- „Eelpaagutus“ (*pre-sinter*): igat ristlõiget skannitakse kaks korda, sealjuures esimesel korral poole võimsusega
- „Overlap“: igat ristlõiget skannitakse kaks korda, sealjuures on teine skannimine esimese suhtes poole *HD* väärtuse võrra nihutatud, et katta sulatusriidade vaheline ala

Lisa 3. DoE katseplaan (1)

Tabel L3.1. DoE peamine katseplaan

Nr	Faktorid			<i>LT</i> (μm)	<i>SS</i> (mm/s)	<i>LP</i> (W)	Energiatihedus (J/mm^3)
	<i>ET</i> (μs)	<i>PD</i> (μm)	<i>HD</i> (μm)				
1	200	60	100	50	300	100	67
2	200	90	100	50	450	100	44
3	600	60	100	50	100	100	200
4	600	90	100	50	150	100	133
5	200	60	150	50	300	100	44
6	200	90	150	50	450	100	30
7	600	60	150	50	100	100	133
8	600	90	150	50	150	100	89
9	400	50	125	50	125	100	128
10	400	100	125	50	250	100	64
11	65	75	125	50	1154	100	14
12	750	75	125	50	100	100	160
13	400	75	83	50	188	100	129
14	400	75	167	50	188	100	64
15	400	75	125	50	188	100	85
16	400	75	125	50	188	100	85
17	400	75	125	50	188	100	85
18	400	75	125	50	188	100	85
19	400	75	125	50	188	100	85
20	400	75	125	50	188	100	85

Lisa 4. DoE katseplaan (2)

Tabel L4.1. DoE katseplaan laseri võimsuse mõju hindamiseks

Nr	Faktorid			<i>LT</i> (μm)	<i>SS</i> (mm/s)	<i>HD</i> (μm)	Energiatihedus (J/mm ³)
	<i>ET</i> (μs)	<i>PD</i> (μm)	<i>LP</i> (W)				
1	200	60	48	35	300	100	95
2	200	90	48	35	450	100	63
3	600	60	48	35	100	100	286
4	600	90	48	35	150	100	190
5	200	60	84	35	300	100	95
6	200	90	84	35	450	100	63
7	600	60	84	35	100	100	286
8	600	90	84	35	150	100	190
9	400	50	66	35	124	100	230
10	400	100	66	35	251	100	114
11	64	75	66	35	1179	100	24
12	736	75	66	35	102	100	281
13	400	75	36	35	188	100	152
14	400	75	96	35	188	100	152
15	400	75	66	35	188	100	152
16	400	75	66	35	188	100	152
17	400	75	66	35	188	100	152
18	400	75	66	35	188	100	152
19	400	75	66	35	188	100	152
20	400	75	66	35	188	100	152

Lisa 5. Tömbeteimikute tootmisparameetrid

Tabel L5.1. Tömbeteimikute täpsustatud tootmisparameetrid

Partii nr	Katsekeha nr	<i>PD</i> (µm)	<i>ET</i> (µs)	<i>HD</i> (µm)	<i>LT</i> (µm)	<i>LP</i> (W)	<i>SS</i> (mm/s)	Energia- tihedus (J/mm ³)	Intert- gaas	HIP
1	1	60	530	85	35	100	113	297	Ar	500 °C/1h
1	2	60	530	85	35	100	113	297	Ar	-
1	3	90	200	85	35	100	450	75	Ar	500 °C/1h
1	4	90	200	85	35	100	450	75	Ar	-
1	5	75	400	60	35	100	188	254	Ar	500 °C/1h
1	6	75	400	60	35	100	188	254	Ar	-
2	7	60	550	85	35	100	109	308	N ₂	350 °C/1h
2	8	60	550	85	35	100	109	308	N ₂	-
2	9	60	550	70	35	100	109	374	N ₂	350 °C/1h
2	10	60	550	70	35	100	109	374	N ₂	-
2	11	90	600	85	35	100	150	224	N ₂	350 °C/1h
2	12	90	600	85	35	100	150	224	N ₂	-
2	13	75	400	60	35	100	188	254	N ₂	350 °C/1h
2	14	75	400	60	35	100	188	254	N ₂	-
2	15	75	400	85	35	100	188	179	N ₂	-
3	16	60	500	100	50	100	120	167	N ₂	350 °C/1h
3	17	60	500	100	50	100	120	167	N ₂	-
3	18	90	600	100	50	100	150	133	N ₂	350 °C/1h
3	19	90	600	100	50	100	150	133	N ₂	-

Lisa 6. Tõmbekatsekehade kõvadus

Tabel L6.1. Tõmbekatsekehade kõvadus

Katse-keha nr	Energia-tihedus (J/mm ³)	Intert-gaas	HIP	Kõvadus HV10	Standard-hälve
1	297	Ar	500 °C/1h	50	0,8
2	297	Ar	-	119	2,5
3	75	Ar	500 °C/1h	52	0,7
4	75	Ar	-	127	3,6
5	254	Ar	500 °C/1h	53	0,4
6	254	Ar	-	122	2,8
7	308	N ₂	350 °C/1h	72	0,2
8	308	N ₂	-	116	1,3
9	374	N ₂	350 °C/1h	71	0,6
10	374	N ₂	-	114	0,5
11	224	N ₂	350 °C/1h	72	2,6
12	224	N ₂	-	121	2,6
13	254	N ₂	350 °C/1h	69	4,5
14	254	N ₂	-	117	2,3
15	179	N ₂	-	115	2,9
16	167	N ₂	350 °C/1h	71	0,6
17	167	N ₂	-	108	4,3
18	133	N ₂	350 °C/1h	71	0,1
19	133	N ₂	-	110	3,9

Tabel L6.2. Kokkvõte mõõdetud kõvadusarvudest

	HIP töötlemata katsekehad (HV10)	HIP töödeldud katsekehad (HV10)
Keskmine	117	65
Min	108	50
Max	127	72

Lisa 7. Pinnakareduste tabelid

Tabel L7.1. Teise katseseeria detailide tootmisparameetrid ja mõõdetud pinnakaredus (R_a)

Katse- seeria	Nr	PD (μm)	ET (μs)	HD (μm)	LT (μm)	LP (W)	SS (mm/s)	Energia- tihedus (J/mm^3)	Intert- gaas	R_a (μm)
2	1	85	400	150	50	100	213	63	N ₂	66,7
2	2	75	600	150	50	100	125	107	N ₂	60,9
2	3	85	600	150	50	100	142	94	N ₂	60,5
2	4	75	600	150	50	100	125	107	N ₂	57,7
2	5	75	400	150	50	100	188	71	N ₂	54,0
2	6	65	400	150	50	100	163	82	N ₂	53,7
2	7	65	400	150	50	100	163	82	N ₂	52,5
2	8	85	600	150	50	100	142	94	N ₂	50,7
2	9	65	600	150	50	100	108	123	N ₂	48,5
2	10	75	400	150	50	100	188	71	N ₂	46,8
2	11	85	400	150	50	100	213	63	N ₂	45,4
2	12	65	600	150	50	100	108	123	N ₂	41,1

Tabel L7.2. Tõmbekatsekehade 2. partii detailide tootmisparameetrid ja mõõdetud pinnakaredus (R_a)

Partii nr	Katsekeha Nr	PD (μm)	ET (μs)	HD (μm)	LT (μm)	LP (W)	SS (mm/s)	Energia- tihedus (J/mm^3)	Intert- gaas	Fookus- kaugus (mm)	R_a (μm)
2	7	75	400	60	35	100	188	254	N ₂	12,5	45,0
2	8	75	400	85	35	100	188	179	N ₂	12,5	31,6
2	9	60	550	70	35	100	109	374	N ₂	12,5	26,7
2	10	60	550	85	35	100	109	308	N ₂	12,5	25,9
2	11	60	550	70	35	100	109	374	N ₂	12,5	19,0
2	12	75	400	60	35	100	188	254	N ₂	12,5	17,8
2	13	60	550	85	35	100	109	308	N ₂	12,5	16,3
2	14	90	600	85	35	100	150	224	N ₂	12,5	15,7
2	15	90	600	85	35	100	150	224	N ₂	12,5	14,8

Pinnakareduste väärtuste standardhälve puudub iga katsekeha ühekordse mõõtmise tõttu.