



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

MATERJALITEHNIKA INSTITUUT  
Metallide tehnoloogia õppetool

MTT70LT

**Kaspar Komissarov**

**WC-12Co kõvasulami valmistamine selektiivsel  
lasersulatusmeetodil**

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: Kaspar Komissarov, MATM 143761

Õppekava: MATM02/11

Eriala: Tootearendus ja tootmistehnika

Juhendaja: Vanemteadur Lauri Kollo

Konsultant: Marek Jõelet, insener, 5183959

### MAGISTRITÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) WC-12Co kõvasulami valmistamine selektiivsel lasersulatusmeetodil

(inglise keeles) WC-12Co Hardmetal Produced by Selective Laser Melting

### Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	ReaLizer SLM 50 seadmega tutvumine	01.02.2016
2.	H.C Starck WC-Co pulbri võrdlus, selekteeriva lasersulatus jaoks mõeldud pulbriga	05.03.2016
3.	Pulbri etteandemehhanismi arendus	15.04.2016
4.	Erinevate lasersulatus parameetrite katsetamine ja analüüs	30.04.2016
5.	Seletuskirja koostamine ning viimistlus	18.05.2016

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:** Tutvuda selekteeriva lasersulatusseadmega ning selgeks teha seadme tööpõhimõte, leida sobivad parameetrid volframkarbiid-koobalti selektiivseks lasersulatusseks.

### Täiendavad märkused ja nõuded: -

**Töö keel:** Eesti keel

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt 20.05.2016

**Töö esitamise tähtaeg**.....

**Üliõpilane** Kaspar Komissarov

/allkiri/ .....

kuupäev.....

**Juhendaja** Lauri Kollo

/allkiri/ .....

kuupäev.....

# SISUKORD

Magistritöö ülesanne.....	3
EESÕNA.....	6
Lühendite ja tähiste loetelu.....	7
1. SISSEJUHATUS.....	8
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	10
2.1 Kihtlisandustehnoloogia.....	10
2.1.1 3D mudeli konstrueerimine.....	11
2.1.2 STL fail.....	13
2.1.3 Kihtlisandustehnoloogia rakendamine.....	14
2.1.4 Detaili eemaldus ja järeltöötlus.....	15
2.1.5 Kihtlisandustehnoloogia meetodid.....	16
2.2 Kermised.....	16
2.2.1 WC-Co.....	17
2.2.2 Traditsiooniline kermiste tootmisviis.....	19
2.3 Ettevõtte „ReaLizer“.....	20
2.3.1 Selekteeriv lasersulatus.....	21
2.4 Printimiseks mõeldud pulbrite omadused.....	22
3. MEETODITE KIRJELDUS.....	24
3.1 ReaLizer SLM 50.....	24
3.1.1 Printimisparameetrid.....	26
3.1.2 Katsekehade kirjeldus.....	27
3.2 HC Starck WC-12Co pulbri omadused.....	28
3.2.1 Võrdlus printimiseks mõeldud pulbriga.....	29
3.3 Tiheduse mõõtmine.....	30
3.4 Lihvimismasin.....	31

3.5 Kõvaduse mõõtmine .....	32
3.6 Mikroskoobid.....	33
3.7 HIP ahi .....	33
3.8 Kasutatud tarkvarad .....	34
4. KATSETUSED.....	35
4.1 Pulbertehnoloogiat kasutades tehtud katsekeha.....	35
4.2 Lasersulatusparameetrite katseseeria number 1 .....	36
4.3 Lasersulatusparameetrite katseseeria number 2.....	42
4.4 Lasersulatusparameetrite katseseeria number 3.....	47
4.5 Lasersulatusparameetrite katseseeria number 4.....	53
4.6 Lasersulatusparameetrite katseseeria number 5 .....	57
4.7 Lasersulatusparameetrite katseseeria number 6.....	62
4.8 Lasersulatusparameetrite katseseeria number 7.....	69
4.9 Tulemuste võrdlus ja analüüs.....	73
5. SLM SEADME DETAILIDE MODIFITSEERIMINE.....	76
5.1 Tööplatvormi modifitseerimine .....	76
5.1.1 Platvormi nõuded .....	76
5.1.2 Modifitseeritud tööplatvorm .....	77
5.2 Pulbri etteandemehhanismi modifitseerimine.....	78
5.2.1 Pulbri etteandemehhanismi detailid ja tööpõhimõte.....	78
5.2.2 Etteandemehhanismi jala modifitseerimine .....	80
KOKKUVÕTE .....	83
SUMMARY .....	86
KASUTATUD KIRJANDUS.....	88
LISAD.....	91

## EESÕNA

Magistritöö teema on välja pakutud TTÜ mehaanikateaduskonna materjalitehnika instituudi doktorandi Marek Jõelege poolt. Teema osutus valituks suurest huvist 3D printimise ja kõvasulamite vastu. Magistritöö põhiline tegevus toimus TTÜ materjalitehnika instituudi pulbertehnoloogia laboris, kus teostati lasersulatused ja katsekehade analüüsimiseks vajalikud mõõtmised. Töö juhendajaks oli Mehaanikateaduskonna materjalitehnika instituudi metallide tehnoloogia õppetooli vanemteadur Lauri Kollo. Peamise panuse töö valmimisele andis kaasjuhendajana Marek Jõelegt.

Andmete kogumiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogust laenatud raamatuid ning materjalitehnika instituudist saadud materjali lisaks leiti palju informatsiooni avaldatud teadusartiklitest.

*Autor avaldab tänu Marek Jõelegele lõputöö teema väljapakumise, rea kasulike ettepanekute ja abi eest töö vormistamisel. Samuti soovib autor tänada juhendajat Lauri Kollot kasulike soovitude eest.*

## Lühendite ja tähiste loetelu

CAD - Raalprojekteerimine (*Computer Aided Design*)

Co - Koobalt

ET - Sulatusaeg,  $\mu$ s (*Expousure Time*)

Fe - Raud

HIP - Kõrgsurve paagutusahi (*Hot Isostatic Press*)

I - Voolutugevus, A

LEM - Lõplike elementide meetod

PD - Punktikaugus,  $\mu$ m (*Point Distance*)

SEM - Elektronmikroskoop (*Scanning Electron Microscope*)

SLM - Selektiivne lasersulatus (*Selective Laser Melting*)

STL - Stereolitograafia (*Stereolithography*)

TiC - Titaankarbiid

WC - Volframkarbiid

# 1. SISSEJUHATUS

Magistritöö teema valiti seoses autori suure huviga 3D printimise vastu. Erinevate võimaluste uurimise tulemusena selgus, et TTÜ on soetanud selekteriva lasersulatusseadme millega on võimalik valmistada erinevatest metallidest detaile. Tegemist on esimese SLM seadmega Eestis ning seetõttu nägi autor head võimalust nii antud seadme kui 3D printimisega lähemalt tutvust teha ning see ühtlasi enda lõputööks vormistada.

3D printimine on hetkel maailmas üha enam populaarsust koguv valdkond mille vastu on hakanud huvi tundma lisaks hobikasutajatele ka üha enam ettevõtted. Üheks valdkonna kiire arengu põhjuseks on võimalus pakkuda klientidele just nende jaoks kohandatud tooteid, kusjuures seda kiiresti ning suhteliselt soodsa hinnaga. Tegemist on tehnoloogiaga, mille abil on võimalik piltlikult öeldes teha arvutis valminud unistused reaalselt teoks. Tänu tehnoloogiale on võimalik valmistada töötavaid prototüüpe eritehnikat kasutamata.

Magistritöö peamiseks eesmärgiks on leida volfram-karbiid kermise selekterivaks lasersulatusseadme sobivad printimisparameetrid. Töö käigus tutvutakse kihtlisandustehnoloogia printsiipide ning erinevate kasutusel olevate tehnoloogiatega. Lisaks viiakse ennast kurssi kermiste hulka kuuluva WC-Co kõvasulamiga ning sellega kuidas nimetatud materjalist detaile valmistatakse. Õpitakse selgeks TTÜ-le kuuluva SLM 50 seadme tööpõhimõtte ning seadme ohutu kasutamine. Peamise eesmärgi täitmiseks tuleb analüüsida katsetusel kasutatava pulbri erinevusi printimiseks mõelduga ning need välja tuua. Lõpptulemusena materjalist printitud detailide mehaanilisi omadusi võrreldakse samast materjalist pulbertehnoloogiat kasutades valmistatud katsekeha omadega. Materjali mehaaniliste omaduste analüüsimiseks tehakse selgeks erinevate mõõteseadmete ohutu ja õige kasutamine. Magistritöö kõrvalülesandeks on leida võimalik lahendus SLM 50 seadme pulbri etteandemehhanismi modifitseerimiseks selliselt, et seadmes oleks võimalik kasutada standardile vastavaid kuluosasid. Uurimiseks valitud materjaliks on WC-12Co. Nimetatud kõvasulam osutus valituks, sest materjali kohta puuduvad SLM tehnoloogiat kasutades publitseeritud allikad. Hetkel kasutatakse kermisest toodete valmistamisel pulbertehnoloogiat, kus pulber pressitakse soovitud kujule ning paagutatakse seejärel kõrgel temperatuuril. Pulbertehnoloogia kasutamine seab valmistatavate detailide geomeetria piirangud. Piirangutest lähtuvalt nähakse võimalust materjalile välja pakkuda alternatiivset tootmisviisi, mis võimaldaks materjali laiaotstarbelisemalt kasutama hakata.



Magistritöö on jaotatud neljaks suuremaks osaks: kirjanduse ülevaade, meetodite kirjeldus, katsetused ja SLM seadme detailide modifitseerimine. Teemadesse on hõlmatud üldine kihtlisandustehnoloogia ülevaade. Kasutatavate meetodite ja seadmete tutvustus, katsete tulemused ning viimases peatükis tehakse ettepanek kahele vajadusest tulenevale SLM seadme modifitseerimise võimalusele.

Kirjandusülevaade on jaotatud neljaks osaks. Esimeses osa antakse ülevaate kihtlisandustehnoloogiast. Tutvustatakse tehnoloogia põhiprintsiipe ning peamised etappe, mis on vaja detaili valmistamiseks läbida. Teine osa keskendub kermiste ja pulbertehnoloogia tutvustamisele. Suurema fookuse all on volfram-karbiid kermis ning talle iseloomulikud omadused ja kasutusvaldkonnad. Kolmanda osa eesmärk on anda ülevaade ettevõttest „ReaLizer“. Teemapunktis on välja toodud ettevõtte lühiajalugu ja peamised tooted. Viimases punktis tuuakse välja selekteerivale lasersulatusele sobivate pulbrite peamised omadused.

Meetodite kirjeldus on jaotatud kaheksaks teemapunktiks. Esimeses tutvustatakse lõputöös kasutatavat SLM 50 seadet ning selle tööpõhimõtet. Lisaks tutvustatakse süsteemi muudetavaid parameetreid ja katsekehade geomeetriat. Teine osa on pühendatud kasutusel oleva pulbri uurimisele ning pulbri võrdlusele lasersulatuse standardmaterjalidega. Tuuakse välja sarnasused ja erinevused. Meetodite kirjelduse all tutvustatakse ka kõiki töös kasutatud seadmeid ja programme.

Teemapunkt „katsed“ on pühendatud materjali printimiseks sobivate parameetrite leidmisele. Teema on jaotatud üheksaks osaks, millest seitse käsitlevad katseprintimiste kirjeldamist. Viimastes on välja toodud igaks katseprintimiseks kasutatud parameetrid ning analüüsi tulemused. Eraldi osana kirjeldatakse teemapunktis pulbertehnoloogiat kasutades valmistatud katsekeha omadusi.

Magistritöö viimases osas antakse soovitusi SLM 50 seadme kahe detaili modifitseerimiseks. Esimese detaili arendus on vajaduse põhine ning on tingitud kasutusel oleva materjali (WC-Co) eripärast. Teise detaili modifitseerimine on seotud sooviga kasutada seadmes standardsemaid kulusi.

## 2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

### 2.1 Kihtlisandustehnoloogia

Kihtlisandustehnoloogia (*additive manufacturing*) pärineb aastast 1980, kui 1983. aastal Charles Hull leiutas stereolitograafia masina prototüübi [1]. Esimest korda näidati tehnoloogiat maailmale, aga alles neli aastat hiljem 1987. aastal, kui rahvale tutvustati masinat „SLA-1“ (Sele 2.1) ning komplektne süsteem müüdi aastal 1988. Charles Hull tuntud ka nimega Chuck Hull oli üks ettevõtte „3D Systems“ asutajatest. Algselt teati uut tehnoloogiat kiirprototüüpimise (*rapid prototyping*) nime all, sest tehnoloogia oli eelkõige mõeldud prototüüpide kiiremaks, tõhusamaks ja odavamaks valmistamiseks [1]. Chuck Hulli stereolitograafia masinat võib pidada alguseks uudsele tootmisviisile, mille sarnast maailmas eelnevalt poldud nähtud.

Tehnoloogia uudsus seisnes selles, et kui eelnevalt valmistati detaile kaasa arvatud prototüüpe üldjuhul materjali eemaldamise või liitmise teel (freesimine, treimine, keevitamine), siis kihtlisandusmeetod kasutab detaili valmistamiseks materjali lisamist. Protsessi käigus ehitatakse arvutis projekteeritud detailid kiht-kihi haaval. Olemas olid ka valamine ja vormimine, kuid kuna viimased vajavad detailide valmistamiseks vormide valmistamist ei peetud neid prototüüpide tegemisel parimateks lahendusteks. Kihtlisandustehnoloogiat kasutades on võimalik valmistada detaile peaaegu kõigist tänapäeval tuntud materjalidest. Eelnevalt nimetatud vanim tehnoloogia stereolitograafia, kasutab esemete valmistamiseks fotopolümeere ehk vedelikke, mis valguse mõjul tahkestuvad, kuid tänapäevaks võib lähteaine olla lisaks vedelale olekule ka tahke.

Kihtlisandustehnoloogiate üks levinumaid jaotamise viise ongi materjali algoleku järgi jaotamine. Eristatakse vedela, tahke ja pulbrilise algolekuga materjale ning vastavalt lähtematerjalile on olemas erinevad meetodid soovitud kujuga lõppdetaili saamiseks. Levinumad neist on: laserpaagutus, lasersulatus, pressimine ja ladustamine [2].



Sele 2.1 „SLA-1“ [3]

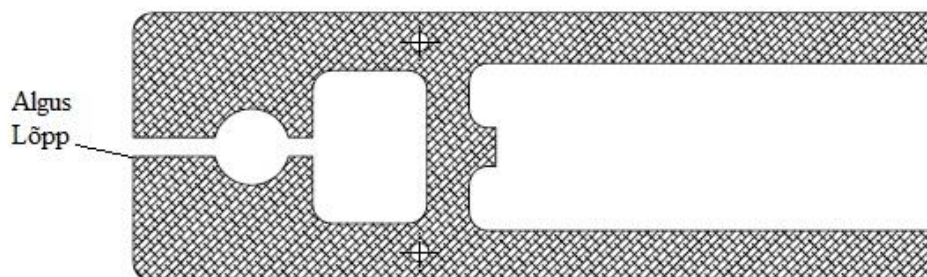
Kihtlisandusmeetodid ja protsessi lähtematerjalid võivad olla erinevad, kuid tehnoloogia põhiprintsiibid on kõigi meetodite ja materjalide puhul sarnased. Selleks, et ideest saaks reaalsus tuleb läbida 6 järjestikkust sammu [2]:

- 1) 3D mudeli konstrueerimine projekteerimistarkvara kasutades,
- 2) Virtuaalse mudeli konverteerimine STL failiks,
- 3) Mudeli jaotamine kihtideks,
- 4) Detaili valmistamine kihtlisandustehnoloogiat kasutades,
- 5) Detaili eemaldamine seadmest,
- 6) Detaili järeltöötlus, kui selleks on soov ja vajadus.

### 2.1.1 3D mudeli konstrueerimine

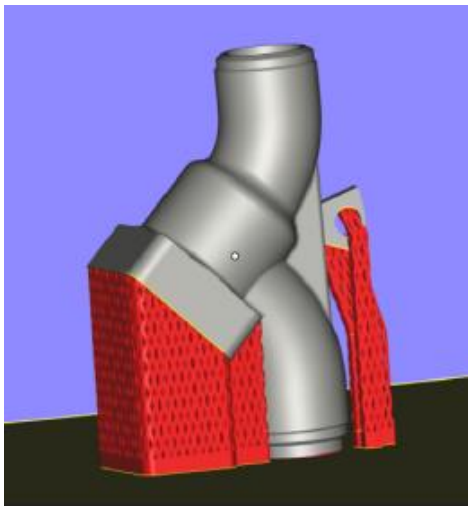
Kihtlisandustehnoloogia üheks ajamahukamaks protsessiks on detaili projekteerimine. Tänapäeval on projekteerimistarkvarad arenenud väga kaugele ning võimalik on luua igasuguse geomeetria ja suurusega esemeid. Lisaks sellele on võimalik erinevaid tarkvarasid kasutades teostada detailile parima võimaliku geomeetria leidmiseks väga palju erinevaid analüüse. Üheks populaarsemaks meetodiks detaili parima geomeetria ja materjali leidmiseks on lõplike elementide meetod (*LEM*). Projekteerimise piiriks on peamiselt kasutaja enda kujutlusvõime, kuid detailide printimisel esineb teatud piirangud, millega tuleb printimiseks mõeldud detaili projekteerimisel arvestada [2].

- 1) Mudelil peavad olema kindlad välimised ja sisemised kontuurid [2]. Detaili on võimalik printida juhul kui ristlõikel on suletud kontuurid ehk kontuuri alguspunkt ja lõpp-punkt peavad langema kokku (Sele 2.2). Freesimise puhul on võimalik toota ka avatud kontuuriga detaile [4].



Sele 2.2 Kindlate kontuuridega detail

- 2) Parima võimaliku lõpptulemuse saavutamiseks tuleb detailile lisada vastavalt vajadusele toed (Sele 2.3). Tugede arv ja kuju sõltub detaili geometriast ning suurusel, esialgsed toed aitab üldjuhul paika panna printeriga kaasa tulnud tarkvara. Parima tulemuse saamiseks tuleb igat tuge ning selle vajalikkust kindlasti analüüsida, seda eelkõige põhjusel, et tugede hilisem eemaldamine võib osutuda väga tülikaks protseduuriks. Teatud detaile on ilma tugedeta võimatu teostada.



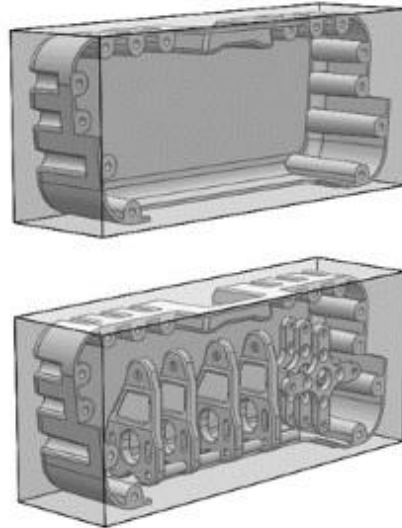
a)



b)

Sele 2.3 Toed: a) tugede valimine tarkvara kasutades, b) hambaproteeside toed [5]

- 3) Optimaalse koguse detailide printimiseks on tähtis ka nende paigutus töölaual. Detailid peavad olema paigutatud nii, et ühegi toote ehitamine ei segaks teist ning vedela ja pulbrilise lähtematerjali korral tuleks materjali efektiivsemaks kasutamiseks töölauale asetada võimalikult palju detaile (Sele 2.4). Parima võimaliku paigutuse jaoks on olemas erinevad tarkvarad, kuid tihti jõuab lahenduseni ka proovides ja loogilist mõtlemist kasutades. 3D printimisel on võimalik detaile printida ka suuremate objektide sisse, nii on võimalik kokku hoida raha ja aega.

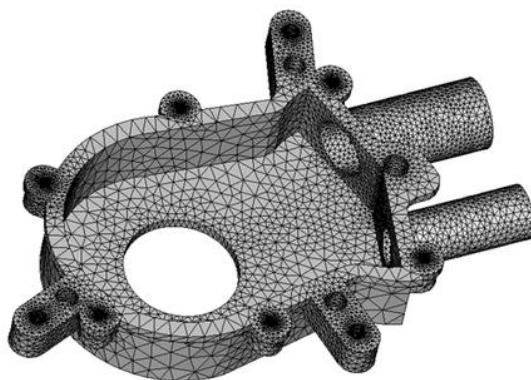


Sele 2.4 Seadme efektiivsemaks kasutamiseks on võimalik detaile printida ka üksteis sisse [6]

Mainitud kolm piirangut on peamised millega tuleks mudeli projekteerimisel arvestada, kuid kuna kõik kihtlisandustehnoloogiad on mingil määral erinevad, siis ka piirangud eri tehnoloogiate jaoks erinevad mingil määral. Näiteks ei pruugi anda toed, mis sobivad suurepäraselt tahkele lähtematerjalile sama tulemust vedela lähtematerjali korral.

### 2.1.2 STL fail

Projekteerimistarkvara abil valmistatud CAD mudel tuleb ümber konverteerida STL failiks, sest üldjuhul kihtlisandustehnoloogia tarkvarad teisi formaate lugeda ei oska. STL faili on välja töötanud ettevõtte nimega „3D Systems“, kes oli ka esimese kiirprototüüpimise seadme looja. Fail kasutab kolmemõõtmelise pinna geometria kujutamiseks omavahel seotud väikseid kolmnurki (Sele 2.5). Mudeli pind jaotatakse kas ruutmosaiigiks või loogiliselt jaotatud kolmnurkade seeriaks, kus iga kolmnurga tahk on kirjeldatud risti suunas ning 3 punkti esindavad kolmnurga tippusid [2]. Kolmnurkadest loodud andmete kogumit kasutab printimistarkvara detaili läbilõigete ehk kihtide loomiseks. CAD mudeli STL failiks konverteerimine on tänapäeva arvutiprogramme kasutades äärmiselt kiire ja lihtne ning programmid teevad seda automaatselt, kuid kindluse huvidest tuleks alati teostada kontroll kolmnurkade kuju ja suuruse optimeerimiseks.



Sele 2.5 STL fail [7]

### 2.1.3 Kihtlisandustehnoloogia rakendamine

STL fail avatakse kihtlisandustehnoloogia tarkvaras, kus tuleb paika panna printimiseks vajalikud parameetrid. Üheks esimeseks parameetriks on mudeli ristlõigete paksus, millest omakorda sõltub kihtide arv. Kihi paksus sõltub kasutatavast materjalist, tehnoloogiast ning sellest, kui täpset detaili soovitakse saada. Üldjuhul, mida väiksem on kihi paksus, seda täpsem on lõpptulemusena saadud detail, kuid ka printimiseks kuluv aeg on pikem. Olenevalt kasutusel olevast tehnoloogiast ning soovitatavast detaili kvaliteedist võib kihipaksus varieeruda 0,005-0,4 mm [2]. Mõned enamlevinud muudetavad parameetrid lisaks ristlõike paksusele on järgmised [2]:

- 1) X-Y koordinaatide suunaline kahanemine,
- 2) Z koordinaadi suunas kahanemine,
- 3) Detailide arv,
- 4) Printimiskiirus,
- 5) Temperatuur [2].

Muudetavad parameetrid sõltuvad kasutusel olevast tehnoloogiast, seetõttu erinevad need igal tehnoloogial. Detaili ehitus on enamuses printeritel täisautomaatne ning peale nupule vajutust tuleb vaid oodata kuni sünnib arvutimudelitest reaalne käega katsutav detail (Sele 2.6) [2].



a)



b)

Sele 2.6 Detaili valmimine: a) printimisprotsess, b) prinditud detailid [5]

#### 2.1.4 Detaili eemaldus ja järeltöötlus

Viimaseks sammuks kihtlisandustehnoloogiat kasutades on detailide töölaualt eemaldamine ning vajadusel järeltöötlemine. Järeltöötuse alla kuuluvad üldjuhul tugede eemaldus ja lihvimine, kuid soovi korral ka värvimine, lakkimine või teise pinnakatte pealekandmine (Sele 2.7). Järeltöötlus oleneb rakendatavast tehnoloogiast ning detaili kasutusvaldkonnast.



Sele 2.7 Detailide järeltöötlus - vasakul tugeodega detail ning paremal lõpliku töötuse saanud detail [8]

### 2.1.5 Kihtlisandustehnoloogia meetodid

Kihtlisandustehnoloogiaid on erinevaid, kuid nende tööpõhimõtted on üldjuhul suhteliselt sarnased. Olgu lähtematerjaliks vedelik, traat või pulber toimub detaili ülesehitus kiht-kihi haaval. Vedeliku puhul käiakse üle detaili ristlõige, mille tulemusena muutub ristlõige tahkeks, kusjuures muudetakse tahkeks ainult ristlõige, kihti jääb ümbritsema vedelik. Pulbrilise materjali korral sulatatakse pulber ülesse selekteerivalt nii, et sulatuse tulemusena saadakse soovitud detaili, mida ümbritseb pulber. Traadi korral sulatatakse lähtematerjal ülesse ning seejärel jaotatakse sulatatud materjal tööpinnale vastavalt detaili ristlõikele, antud meetodit kasutades ei teki kunagi materjali ülejääke, sest materjali kasutatakse vaid seal, kus detail reaalselt asub. Hetkel on maailmas laiemalt levinud seitse erineva tööpõhimõttega kihtlisandustehnoloogia tüüpi.

Seitse peamist kihtlisandustehnoloogia protsessi [9, 10]:

- 1) Stereolitograafia (*stereolithography*),
- 2) Pulbrivannis materjali selekteeriv sulatamine või paagutamine (*powder bed fusion*),
- 3) Kogu pinna kõvendamine (*solid ground curing*),
- 4) Laseriga puhasvormimine (*laser engineered net shaping*),
- 5) Sulatatud materjali sadestamisega modelleerimine (*fused deposition modeling*),
- 6) Jugatehnoloogia (*inkjets*),
- 7) Objekti kihtvalmistamine (*laminated object manufacturing*).

### 2.2 Kermised

Kermised on komposiitmaterjalid, mis koosnevad kõvadest ja habrastest rasksulava ühendi osakestest ning sideaine maatriksist. Viimased on üldjuhul plastilisest ja pehmest Fe-grupi metallist. Maatriksi ülesandeks on ümbritseda või siduda kõvasid osakesi omavahel. Rasksulavateks osakeseks on üldjuhul kas karbiidid, karbonitriidid või boriidid ning Fe-grupi metallidest kasutatakse kõige rohkem rauda, koobaltit või niklit. Reeglina valmistatakse kõik tooted kermistest kasutades pulbermetallurgiat.

Kermiste omadused sõltuvad mitmest faktorist, kuid eelkõige karbiidi ja sideaine vahekorra ning nende kõvadustest, nendevahelise piiri tugevusest ja struktuurist. Viimase all peetakse silmas poorsust, karbiiditerade suurust ja kuju, karbiiditerade ja sideaine jagunemist, mikropragusid ja võõraid lisandeid [11, 12].



Keemilise koostise järgi jaotakse kermised volframi baasil sulamiteks ehk kõvasulamiteks ja volframita sulamiteks ehk kermisteks [11, 12].

Volframi baasil kõvasulamid jaotatakse järgnevalt [11]:

- WC-Co sulamid,
- WC-TiC-Co sulamid,
- WC-TiC-TaC(NbC)-Co sulamid.

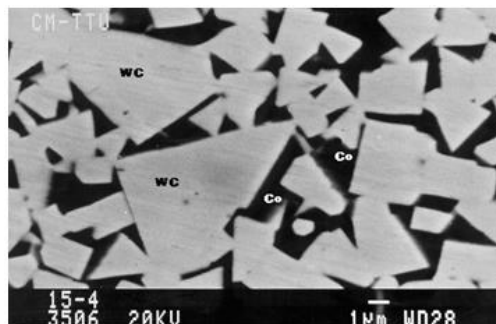
Volframita kermised jaotatakse [11]:

- TiC-NiMo kermised,
- TiC(CN)-NiMo kermised,
- TiC-teras kermised,
- Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni kermised .

Karbiididest on kõvasulameis kõige enam kasutusel volfram monokarbiid. Volframkarbiidil on suhteliselt suure plastisuse juures suur elastsusmoodul, mis viitab suurtele aatomivahelistele jõududele. Antud lõputöö raames tegeletaksegi volfram monokarbiidile baseeruvale kõvasulamidele.

### 2.2.1 WC-Co

WC-Co kõvasulamid töötati välja 1923. aastal ning materjal tõi kaasa revolutsiooni metallide lõiketööstuses, kuna tänu uudse materjali kasutuselevõtule kasvasid lõikekiirused treimisel kümneid kordi. Ka praegusel ajal valmistatakse ligi 96 % maailmas toodetavatest kermistest WC baasil. Selle põhjuseks võib pidada WC-Co kõvasulamite heade omaduste kombinatsiooni ehk suurt kulumiskindlust ja kõvadust koos rahuldava tugevuse ja plastisusega. WC-Co kõvasulamid koosnevad WC teradest ja koobalti baasil tardlahusest  $\gamma$ , mis sisaldab koobaltis lahustunud W ja C aatomeid (Sele 2.8) [11].



Sele 2.8 WC-Co kõvasulam [11]

Süsiniku liia korral tekib sulami struktuuri kolmas faas - grafiit. Grafiidil on väike tugevus ja sisuliselt võib vaba grafiidi kolooniaid lugeda poorideks, mis halvendavad kermise mehaanilisi omadusi ja kulumiskindlust [12].

Poorsus halvendab järsult kõiki kermiste mehaanilisi omadusi ja ka kulumiskindlust. Seepärast on kvaliteetsetel kermistel poorsus viidud miinimumini ja ei ületa 0,2 %. Karbiiditerade suuruse on kermistes vahemikus 0,2-10 µm. Reeglina karbiiditerade suuruse vähenedes kermiste kõvadus ja kulumiskindlus suurenevad, löögisitkus aga väheneb [12].

Kõvasulameid terasuurusega kuni 0,2 µm nimetatakse nanostruktuurseteks, 0,2-0,4 µm ultrapeenteks, 0,4-1,0 µm ülipeeneks, 1-1,5 µm peeneks, 1,5-3 µm keskmisteks ja 3 ja rohkem mikromeetrit jämedateralisteks [11]. Muutes kõvasulamis Co sisaldust, muutuvad materjali mehaanilised omadused väga laias vahemikus (Tabel 2.1).

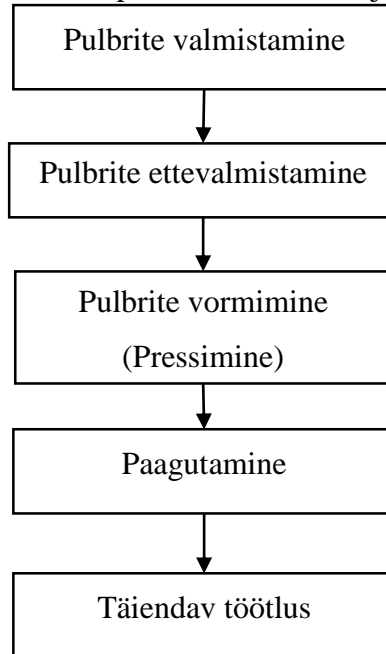
Tabel 3.1 WC-Co mehaanilised omadused sõltuvalt massi%-ist [11, 13]

WC, %	Co, %	Tihedus, g/cm <sup>3</sup>	Kõvadus, HV <sub>10</sub>	Paindetugevus, MPa
94	6	14,8	1410	1370
92	8	14,5	1390	1550
89	11	14,4	1240	2000
88	12	14,3	1235	2050
85	15	13,9	1190	2300
80	20	13,5	890	2600

Tabelist on näha, et mida suurem on koobalti sisaldus kõvasulamis, seda suurem on paindetugevus ja väiksem kõvadus. WC-Co kõvasulameid kasutatakse lõiketerade ja kulumiskindlate detailide valmistamiseks. Vähesel koobaltisisaldusega kermiseid (3-6 % Co) kasutatakse murduvat laastu andvate materjalide (malm, pronks, puit, plastmass) treimiseks. Keskmise Co sisaldusega (8-12 % Co) kermiseid kasutatakse väga rasketes treimistingimustes (löögiga kooriv treimine, keevi õmbluste treimine, pressvormid jne). Suure Co sisaldusega (15-20 % Co) kermiseid kasutatakse detailide valmistamiseks, mis töötavad löökkoormusel (lõike- ja survetöötlemise stantsid) [11]. Antud magistritöös kasutatakse kõvasulamit, milles koobalti sisaldus on 12 %, mehaaniliste omaduste tabelis on vastav rida täidetud rohelist värvi numbritega.

## 2.2.2 Traditsiooniline kermiste tootmisviis

Traditsiooniliselt valmistatakse kõvasulamist detaile kasutades pulbertehnoloogiat. Üldjuhul koosneb pulbritest detailide valmistamise tehnoloogia 3-5 järjestikusest operatsioonist (Sele 2.16). Tähtsamateks operatsioonideks on pulbrite vormimine ja paagutus.



Sele 2.9 Pulbermaterjalidest detailide valmistamine [12]

Esimeseks etapiks pulbermetallurgia juures on pulbrite valmistamine. Valmistamiseks on olemas palju erinevaid meetodeid, millest enamlevinud on: peenestamine, sulametalli pihustamine, oksiidide taandamine ja karbonüülide lagundamine. Sellest, millist meetodit kasutatakse sõltub saadud pulbri osakeste kuju, pulbri eripind, mikrokõvadus, koostis ja teised omadused [12].

Teiseks etapiks pulbermetallurgia tehnoloogia juures on pulbrite ettevalmistamine vormimiseks. Etapp on vajalik, et parandada pulbri vormitavust. Vormitavust on võimalik parandada määrdeainete ja/või plastifikaatorite lisamisega [12].

Kolmandaks sammuks on vormimine. Antud etapi juures antakse kujuta pulbrile kuju. Selleks kasutatakse kõvasulamite valmistamisel pressimist. Tulenevalt pressimise omapärasest ei ole antud meetodit kasutades võimalik valmistada näiteks: keermeid, pressimissuunaga risti olevaid avasid ja tagurpidi koonuseid [12].

Neljandaks sammuks on paagutamine. Antud operatsioon on pulbertehnoloogia juures üks tähtsamatest, sest sellest sõltuvad pulbermaterjali füüsikalised-mehaanilised omadused.

Paagutamine ise seisneb pressitud toote kuumutamises taandavas või kaitsvas keskkonnas etteantud temperatuurini, seisutamises sellel temperatuuril ning jahtumises. Suurimat mõju omadustele avaldab paagutustemperatuur ja paagutusaeg [12].

Viimaseks sammuks on paagutusahjust tulnud detailide täiendav töötlemine. Töötlus on vajalik, et anda tootele täpsus ja lõppkuju. Tavamaterjalidel (nt. teras) kasutatakse töötlemiseks traditsioonilisi töötlusmeetodeid: freesimist, lihvimist ja treimist. Kõvasulamite puhul kasutatakse täiendavaks töötlemiseks kas lihvimist või teritamist, kusjuures peamiselt töödeldakse kermisest detaile kasutades teemantkäiasid. Detailide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste tõstmiseks kasutatakse üldjuhul kas termotöötlus või isostaatilist kuumpressimist, viimase käigus eemaldatakse detailidelt võimalik poorsus [12].

### **2.3 Ettevõtte „ReaLizer“**

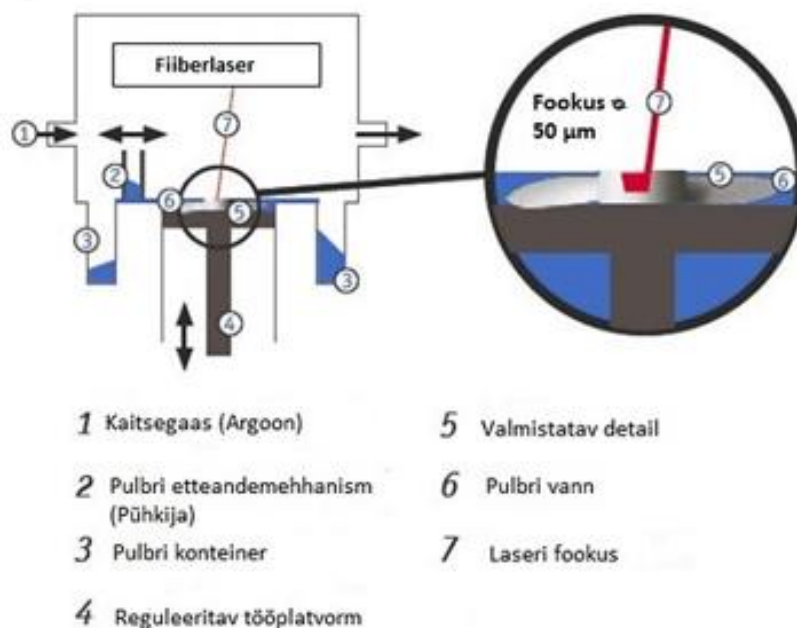
Ettevõtte „ReaLizer“ loodi aastal 1990, kui füüsikud Dr. Matthias Fockel ja Dr. Dieter Schwarz asutasid ettevõtte F&S, mida võib pidada üheks kiirprototüüpimisettevõtete pioneeriks. Aastal 1995 alustas ettevõtte selekteeriva lasersulatus tehnoloogia arendamist. Arenduse eesmärk oli välja töötada meetod metallide lasersulatusseks. Esimene töötav masin loodi aastaks 1999 ning aastal 2004 asutas Dr. Matthias Fockel firma nimega ReaLizer – ettevõtte, mis on täielikult keskendunud metallide selekteerivate lasersulatusseadmete arendusele ja tootmisele. ReaLizer on hetkel maailmas antud tehnoloogia juhtiv arendaja ja tootja ning omab antud valdkonnast kogemust juba rohkem kui 15 aastat [14].

Antud hetkeks on ettevõttel tootmises 5 erinevat lasersulatusseadme tüüpi:

- 1) SLM 50 - esimene seade mis loodi metallist detailide valmistamiseks [15],
- 2) SLM 100 - seade on loodud väikeste ja väga keerulise geomeetriaga detailide valmistamiseks [16],
- 3) SLM 125 - SLM 50-ne edasiarendus, võimalik valmistada suuremaid detaile, kui SLM 50-nega [17],
- 4) SLM 250 - seade on loodud sobima nii uurimustöödeks kui ka väikeseeria tootmiseks [18],
- 5) SLM 300i - seade on loodud sobima nii uurimustöödeks kui ka väikeseeria tootmiseks, ReaLizeri tootevaliku suurima tööpinnaga seade. Võimalik valmistada detaile suurusega kuni 300 x 300 x 300 mm [19].

### 2.3.1 Selekteeriv lasersulatus

Selekteeriv lasersulatus (*SLM*) on kihtlisandus tehnoloogia meetod, mille abil on võimalik luua erinevatest metallidest keerulisi detaile kasutades kolmemõõtmelist mudelit. SLMi puhul kasutatakse lähtematerjalina metalli pulbrit. Kihtlisandustehnoloogiatele omaselt luuakse detail kiht-kihi haaval. Detaili loomiseks jaotatakse väga õhuke kiht pulbrit tööpinnale, kus pulbrit selekteerivalt sulatatakse valitud alad kasutades fiiberlaserit. Olenevalt vajaminevast pinnakvaliteedist ja tootmiskiirusest saab kihi paksust valida. Üldjuhul kasutatakse kas 25  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$  ja suurte masinate puhul 100  $\mu\text{m}$  kihi paksust. SLM meetodi tööpõhimõtet on seletatud all oleval joonisel (Sele 2.10).



Sele 2.10 Selekteeriv lasersulatus [14]

Detaili valmistamine antud seadmes on järgmine: pulbri etteandemehhanism (2) kannab pulbri tööplatvormile (4), fiiberlaseriga sulatatakse valmistatava detaili ristlõige, sulatades pulbri osakesed tervikuks, seejärel langetatakse tööplatvormi (4) kihi paksuse võrra ning kantakse peale uus kiht pulbrit, ning sellele järgneb järjekordne ristlõike sulatus. Protsessi korratakse, kuni kõik ristlõiked on töödeldud ning detail on valmis. Selekteeriv lasersulatus toimub kaitsegaasi keskkonnas ning üldjuhul kasutatakse gaasina argooni, kuid teatud juhtudel võib kasutusel olla ka lämmastik [2].

Kõige otstarbekam on selekteerivat lasersulatust kasutada juhul, kui tootmises on keerulise geomeetriaga detail ning tootmiskaht on väike. Üldjuhul on antud meetodi kasutegur suurem, kui vaja on väike hulk detaile, mis on suure keerukusega ning mida on võimalik valmistada väikese materjalikuluga. Peamisteks tehnoloogia kasutusvaldkondadeks on [14]:

- 1) Hambaproteesid –täpselt selliseid hamba proteesid nagu individid vajab.
- 2) Liiklusvahendite detailid – saab luua töötavaid prototüüpe proovimaks uusi lahendusi nii auto, mootorratta kui ka lennutööstuses.
- 3) Tööriistad – erinevaid tööriistad, eelkõige on siin mõeldud valuvorme ning valuvormide detaile.
- 4) Proteesid – võimalik valmistada proteese vastavalt individile (jalg, käsi jne).
- 5) Ehted – tehnoloogia on leidnud laia kasutust ka ehte tööstuses.

Kõik nimetatud kasutusvaldkonnad eeldavad üldjuhul eritellimusega tootmist, kus toode peab vastama kindlatele kriteeriumitele. Peamisteks eeliseks valuvormimise, freesimise, treimise ning keevituse ees on selekteeriva lasersulatuse paindlikkus. Kui traditsioonilist valmistustehnoloogiat kasutades on üldjuhul vaja rakist, valuvormi või lõiketööriistu, siis selekteerival lasersulatusel saab sama kõrgete materjali mehaaniliste omadustega eseme vaid 3D mudeli olemasolul. Meetodi eelis kaob, kui valmistada tuleb suur hulk sarnaseid detaile, kuid üksikdetailide tootmiseks hetkel odavam, kiiremat ning tõhusamat meetodit on raske välja tuua [2].

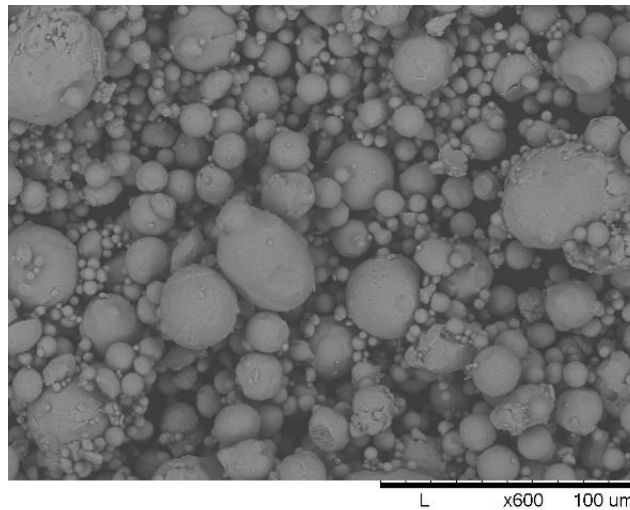
## **2.4 Printimiseks mõeldud pulbrite omadused**

Kuigi keemiliselt koostiselt on kihtlisandusmeetodite jaoks loodud pulbrid erinevad on neil kõigil sarnased omadused.

- 1) Pulbriosakeste sfääriline kuju (Sele 2.11) – sfäärilise kuju olemasolu on tähtis, et tagada osakeste hea voolavus ja kõrge pakketihedus [5, 20-22].
- 2) Osakeste suurus peaks olema alla 50  $\mu\text{m}$  või alla 150  $\mu\text{m}$  – pulbriosakeste suurus sõltub kasutusel olevast masinast ning sellest millise pinnakvaliteediga lõppdetaile soovitakse saada [20]. ReaLizer SLM 50 seadme puhul on soovituslikuks pulbriosakeste suuruseks 10 – 50  $\mu\text{m}$  [12].

- 3) Pulbriosakeste suuruste jaotus – mida suurema erinevusega on materjali pulbriosakesed seda keerulisem on leida printimiseks sobivaid parameetreid. Sellest kuidas eri suurusega osakesed jaotuvad sõltub detailide tootlikus, tihedus, mehaanilised omadused ja pinnakvaliteet [20].
- 4) Kontrollitud keemiline koostis ning väike poorsus – tähtis on täpselt teada, millest pulber koosneb, et leida parimad võimalikud parameetrid kvaliteetse lõpptoote valmistamiseks [5] [20]. Väikese poorsusega pulbritest on võimalik toota kvaliteetsemaid detaile.

Üldjuhul kasutatakse kihtlisandusmeetodi jaoks pulbrite valmistamiseks sulametalli või metallisulami pihustamise meetodit. Pihustamiseks kasutatakse kas gaasi-, vee- või plasmajuga.



Sele 2.11 Sfäärilise kujuga pulbriosakesed

### 3. MEETODITE KIRJELDUS

#### 3.1 ReaLizer SLM 50

Antud töös kasutati ReaLizeri seeriasse kuuluvate seadmete hulgast kõige väiksemat – SLM 50 lasersulatus masinat. SLM 50 seade on ReaLizeri esimene lasersulatusseade, mis on mõeldud metallist detailide valmistamiseks. Antud printeri abil on võimalik valmistada detaile diameetriga kuni 70 mm ning kõrgusega kuni 80 mm. Seadme väikse tootmismahu tõttu sobib SLM 50 ideaalselt väärismetallidest detailide valmistamiseks ehte või hambaravi valdkonnas ning tänu kompaktsetele mõõtmetele sobib hästi ka väiksemasse laborisse uurimustööde sooritamiseks. Lasersulatusseadmega on võimalik toota detaile paljudest erinevatest metalli pulbritest, tähtis on et pulbri osakeste suurus jääks 10 kuni 50  $\mu\text{m}$ . Seadme tehnilised näitajad on toodud all olevas tabelis (Tabel 3.1).

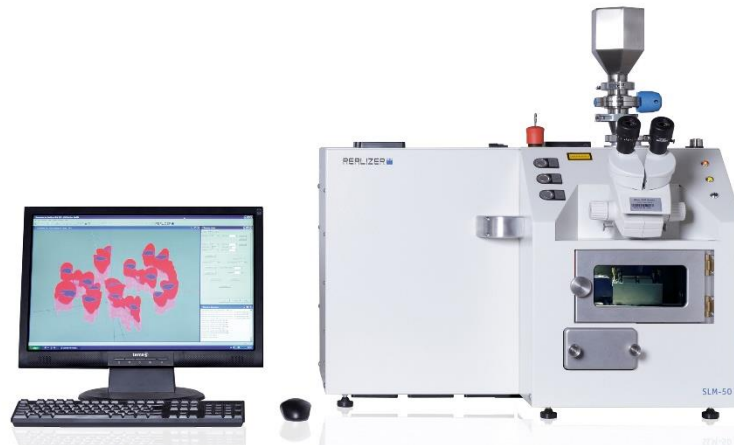
Tabel 3.1 SLM 50 tehnilised näitajad [12]

<b>Laseri tüüp</b>	Fiiberlaser 20-120 W
<b>Toiteallikas</b>	230 V / 16 A / 50 Hz
<b>Energiatarve</b>	1 kW
<b>Kaitsegaasi kulu</b>	5 l/h, max 20 l/h
<b>Mõõtmed</b>	W800 x D700 x H500 mm
<b>Mass</b>	100 kg
<b>Tarkvara</b>	ReaLizer Control Software
<b>Materjalid</b>	Ehitusteras, roostevaba teras 316 L, koobalkroom, kuld, hõbe, titaan, jne
<b>Ehitusala suurus</b>	Platvormi $\varnothing$ 70 mm, ehitatava detaili H kuni 80 mm
<b>Kihipaksus</b>	20-50 $\mu\text{m}$
<b>Pulbri osakeste suurus</b>	10-50 $\mu\text{m}$

Tehniliste näitajate tabelist on näha, et antud seade on väga kompaktsete mõõtmetega. Võrreldes SLM 50 printerit SLM 125-ega, siis viimase pikkus on 1600 mm, laius 800 mm ning kõrgus 1550 mm lisaks kaalub seade 450 kg. SLM 50 (Sele 3.1) vastavad andmed on järgmised: pikkus 800 mm, laius 700 mm ning kõrgus 500 mm, süsteemi kaal on ligikaudu 100 kg. Kõigil ReaLizer tootegruppi kuuluvatel seadmetel on kasutusel kvaliteetne fiiberlaser, SLM 50 seadmel on laseri võimsust võimalik muuta vahemikus 20 kuni 120 W.

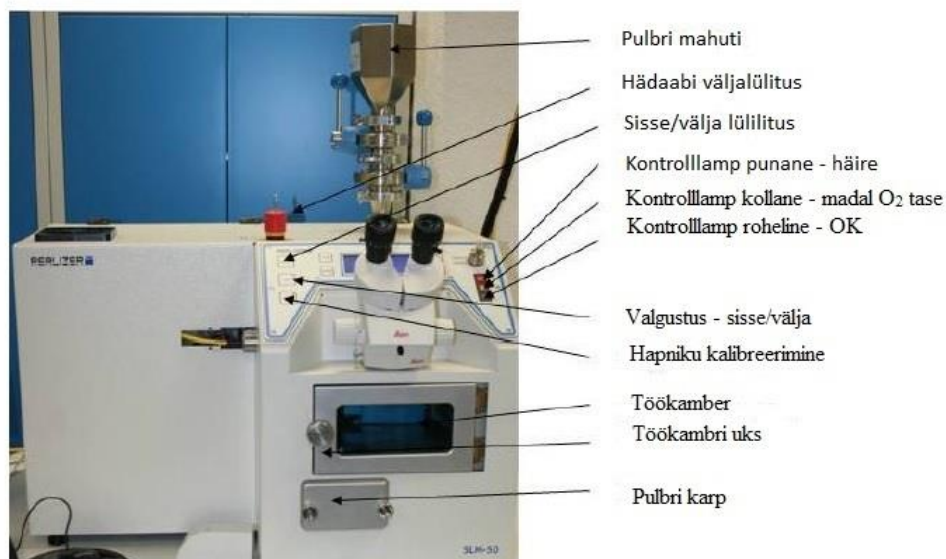


Tähtsamatest andmetest tuuakse välja ka kihipaksuste vahemiku, antud seadmega on võimalik valmistada detaile kihipaksustega alates 20  $\mu\text{m}$  ning lõpetades 50  $\mu\text{m}$  ning soovitatavaks pulbri osakeste suuruseks on 10 kuni 50  $\mu\text{m}$ .



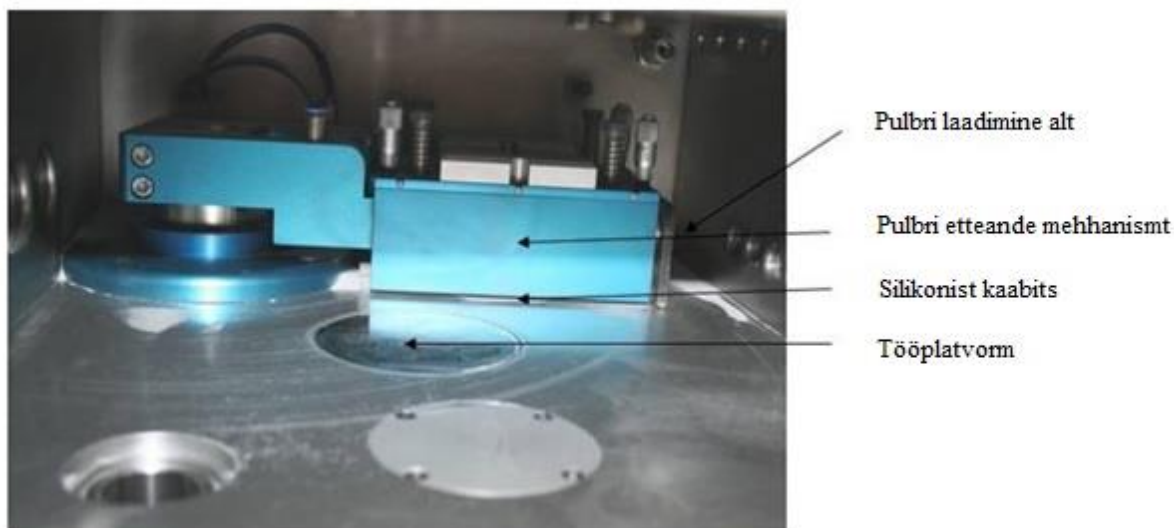
Sele 3.1 SLM 50 [23]

Antud seadme tähtsamad detailid ja lülitid on välja toodud all oleval joonisel (Sele 3.2) ning koostejoonis SLM 50 aparaadist on nähtav lisade hulgas (Lisa 3.1).



Sele 3.2 SLM 50 tähtsamad detailid ja lülitid [24]

All oleval pildil on toodud töökamber, millel on näidatud edukaks printimiseks vajaminevad detailid (Sele 3.3). Tähtsaim detail antud pildil on pulbri etteande mehhanism või lihtsamalt öeldes ka pühkija. Etteandemehhanism on pneumaatiliselt juhitud seade, mille peamine eesmärk on pulbri ühtlane jaotamine tööplatvormile. Detaili koostejoonis on toodud lisade hulgas (Lisa 3.2).



Sele 3.3 Töökambri tähtsamad detailid [24]

### 3.1.1 Printimisparameetrid

Õnnestunud printimise jaoks on vaja leida iga materjali puhul parimad võimalikud parameetrid, milliste juures on materjalil soovitud mehaanilised omadused ja aktsepteeritav pinnakvaliteet. Optimaalsete parameetrite leidmiseks on SLM 50 seadmel võimalik erinevates vahemikes muuta väga palju erinevaid faktoreid. Levinumad neist on: sulatusaeg, punktikaugus ja laseri võimsus, kuid võimalik on varieerida ka teisi parameetreid.

Sulatusaja mõõteühikuks on mikrosekund ( $\mu\text{s}$ ) ning parameeter näitab mitu mikrosekundit laser ühte punkti sulatab. Punktikauguse mõõteühikuks on mikromeeter ( $\mu\text{m}$ ) ning parameeter näitab kui suur on sulatatavate punktide omavaheline kaugus. Punktikauguse ja sulatusaja omavaheline suhe moodustab veel ühe parameetri, mida nimetakse skaneerimiskiiruseks. Skaneerimiskiiruse mõõtühikuks on meeter sekundis (m/s). Laseri võimsust on SLM 50 seadmel võimalik määrata voolutugevuse muutmisega, kusjuures pinge on 24 V. Seadme maksimaalne võimsus on 120 W ning sellele vastab voolutugevus 4 A. Pulbri eelsoojendus on antud masina puhul määratud tööaluse kuumutamise, kõvasulami puhul peaks antud temperatuur olema võimalikult suur, SLM 50 lasersulatusseade võimaldab tööalust eelsoojendada kuni temperatuurini 200 °C, kuna suuremat temperatuuri seade kasutada ei võimalda kasutatakse iga antud katse korral just seda temperatuuri. Sulatustäpi suurus on parameeter, millest sõltub kui suurt osa laser korraga sulatab. Sulatustäpi suurus on seotud laseri fookuskaugusega ning seda mõõdetakse millimeetrites. Peamiselt kasutatakse antud printimiseseadme puhul kolme fookuskaugust: 8,5 mm, 10,5 mm ja 12,5 mm. Tähtis on märkida,

et fookuskauguse 8,5 mm juures on sulatustäpp väikseim. Kihipaksuse mõõtühikuks on mikromeeter ( $\mu\text{m}$ ) ja kõigi antud katsetuste korral valiti kihi paksuseks 25  $\mu\text{m}$ . Viirutusvahe (*hatching space*) mõõtühikuks on millimeeter (mm) ja kõigi antud katsetuste korral valiti väärtuseks 0,1 mm. Energiatiheduse mõõtühikuks on  $\text{J}/\text{mm}^3$  ning seda arvutatakse järgneva valemiga [2]:

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t}, \quad (3.1)$$

kus, E - energiatihedus ( $\text{J}/\text{mm}^3$ ),

P - laseri võimus (W),

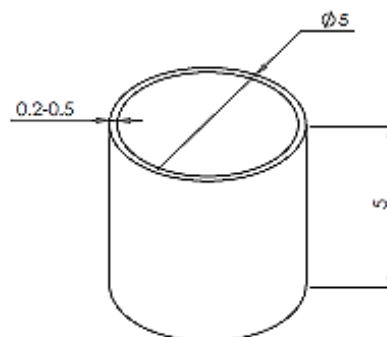
v - skaneerimiskiirus (mm/s),

h - viirutusvahe (mm),

t - kihipaksus (mm).

### 3.1.2 Katsekehade kirjeldus

Töö raames kasutatakse kolme erinevat katsekeha. Nendeks on kuup, risttahukas ja toru. Erinevaid detaile kasutatakse selleks, et näha kuidas katsekeha suuruste muutmine mõjub lõppobjekti omadustele. Erinevaid katsekehi hinnatakse omavahel: tiheduse, kõvaduse ja välise vaatluse järgi. Katsekehade tähistamiseks kasutatakse meetodit X-xx, kus X tähistab katseseeria numbrit ja xx katsekeha numbrit. Näiteks 1-08 puhul on tegemist 1. katseseeria katsekehaga number 8. Kõige suurem hulk katsekehi olid kuubiku kujulised. Risttahuka kujuliste katsekehade küljepikkusteks oli 7 mm ja kõrguseks 5 mm. Torukujulise katsekeha välisdiameetriks oli 5 mm ning seinapaksusteks olid 0,2, 0,3, 0,4 ja 0,5 mm (Sele 3.4).



Sele 3.4 Katsekeha toru – kõrgus 5 mm ning seinapaksused olid 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm ja 0,5 mm.

### 3.2 HC Starck WC-12Co pulbri omadused

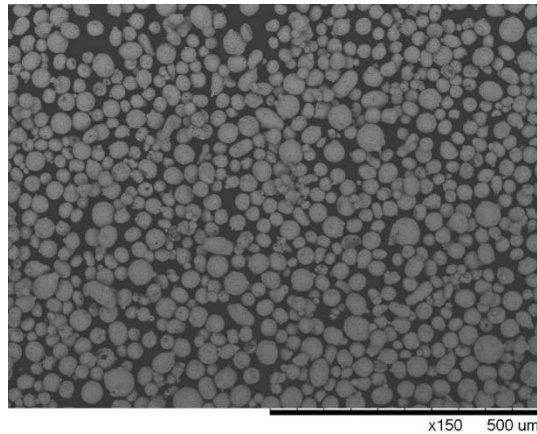
Antud töös kasutatakse metallipulbrina ettevõtte H.C Starck kõvasulamipulbrit. Pulbri nimetus on Amperit 519.074 ning pulber on mõeldud termopindamiseks [25]. Tegemist on volframkarbiid kõvasulamiga, milles on 12 kaalu% koobaltit (Tabel 3.2).

Tabel 3.2 H.C Starck Amper 519.074 keemiline koostis [25]

Nimetus	Sisaldus, %
Co	11,0-13,0
C	5,2-5,6
Fe	maksimaalselt 0,2
W	bilanss

Amperit 519 pulbril on muude lisandite hulk vähene, seetõttu öeldakse antud segu keemilise koostise kohta, et tegemist on pulbriga, mis koosneb 88 % volframkarbiidist ning 12 % koobaltist ehk lühidalt WC-12Co. Nime taga olev .074 näitab kuidas antud pulbris osakesed jaotuvad, nimelt on .074 viide sellele, et tegemist on pulbriga kus osakeste suurus jääb vahemikku 15-45 µm. Olemas on ka lõppliited .059 ( 5-30 µm ) ja .088 ( 20-53 µm ). Pulbri puistetihedus jääb vahemikku 4,7-5,2 g/cm<sup>3</sup> [25].

Antud pulbri segu on valmistatud kasutades agglomerimist (*agglomerated*) ning saadud pulber on seejärel paagutatud. Pulbri valmistamiseks pihustus kuivatatakse peen metallipulber koos orgaanilise sideainega ning seejärel pulber paagutatakse. Tulemusena saadakse sfääriline, poorne ühtlaselt jaotunud koostisosadega pulber (Sele 3.5) [26]. Antud pulbri peamine kasutusala on pindamine ning pulbrit kasutatakse näiteks ventilaatori ja kompressori labade, pumbatihendite ja teiste sarnaste seadmete juures. Katte omadustest tuuakse välja, et maksimaalseks töötemperatuuriks on 500 °C, materjalil on suur kulumiskindlus ja kõvadus kuid madal korrosiooni kindlus [26].



Sele 3.5 H.C Starck Amperit WC-12Co

### 3.2.1 Võrdlus printimiseks mõeldud pulbriga

Vaadates omadusi, mis peavad olema täidetud, et pulbrit oleks võimalik kasutada selekterivas lasersulatusseadmes siis neljast välja toodud omadusest on täidetud kolm.

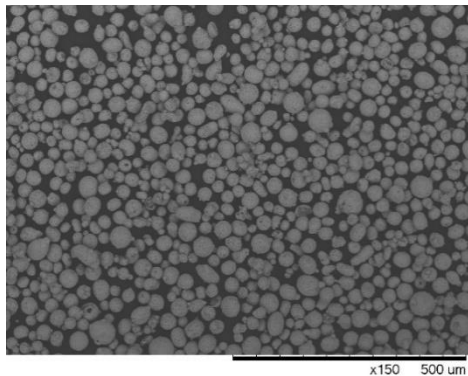
- 1) Pulbriosakeste sfääriline kuju - eeldus on täidetud.
- 2) Pulbriosakeste suurus alla 50  $\mu\text{m}$  - antud pulbri puhul 15-45  $\mu\text{m}$ .
- 3) Pulbriosakeste ühtlane jaotus - vaadates mikroskoobiga tehtud pilte ning toetudes tootja poolt lubatud omadustele on ka see täidetud.

Täidetud ei ole pulbri madala poorsuse nõue, mis tagaks hea kvaliteediga lõppdetailid. Võttes arvesse, et enamus kihtlisandustehnoloogia jaoks valmistatud pulbrid toodetakse kasutades pihustusmeetodit ning Amperit pulber on valmistatud kasutades aglomeerimist ning sellele järgnevat paagutust saab välja tuua erinevused mida kaks eri tootmismeetodit pulbritele annavad (Tabel 3.3).

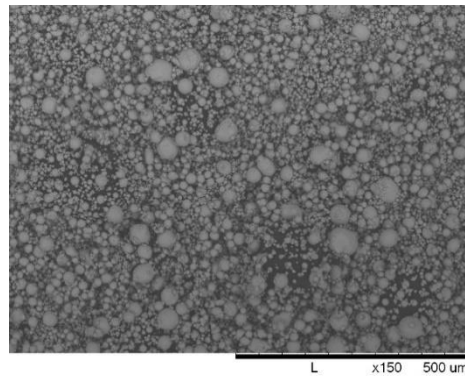
Tabel 3.3 Kuhjatud ning paagutatud ja gaasijoa abil pihustatud pulbrite erinevused [26]

Omadus	Kuhjatud ning paagutatud	Gaasijoa abil pihustatud
Sfäärilisus	Sfääriline	Sfääriline
Tihedus	Poorne	Tihe
Jaotus	Ühtlane jaotus	Ühtlane jaotus
Hapniku sisaldus	Kõrge hapnikusisaldus	Madal hapnikusisaldus

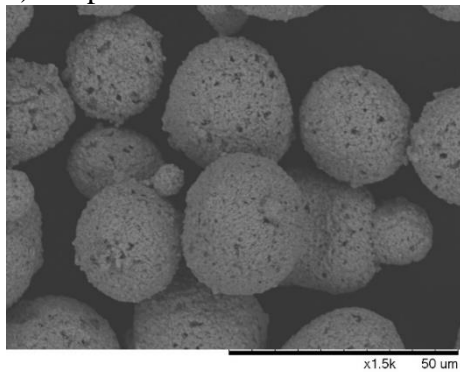
Selleks, et oleks parem võrrelda kahe eri meetodiga valmistatud pulbrit on tööle lisatud elektroonilise mikroskoobi abil tehtud pildid agglomeritud ja paagutatud pulbrist (Amperit 519) ja gaasijoa abil pihustatud pulbrist (316 L) (Sele 3.6). 150-ne kordse suurenduse juures ei ole kahe pulbri juures ühtegi silmaga nähtavat erinevust, kuid 1500 kordse suurenduse juures on näha, et Amperi pulbri osakestel on sees väikesed poorid, kuid teras 316 L pulbril need puuduvad.



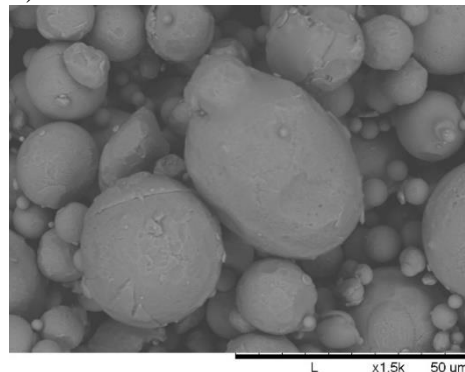
a) Amperit 519



b) 316 L



c) Amperit 519



d) 316 L

Sele 3.6 Prinditavate pulbrite võrdlus erinevate suurendustega: a) Amperit 519, x150; b) teras 316 L, x150; c) Amperit 519, x1500; d) teras 316 L, x1500

Põhjusel, et neljast otsitavast omadusest on antud pulbril täidetud kolm, võib loota materjali printimise õnnestumises SLM seadmes.

### 3.3 Tiheduse mõõtmine

Katsekehade tiheduse mõõtmiseks kasutati TTÜ seadet Mettler Toledo ME204 (Sele 3.7). Seade kasutab Archimedese meetod. Archimedese seadus ütleb, et vette asetatud kehale mõjub üleslükkejõud, mis on võrdne keha poolt välja tõrjutud vedeliku kaaluga. Selle seaduspärasusele toetudes kaalutakse seadme abil katsekeha nii õhus, kui vees ning saadakse katsekeha tiheduse arvvärtus. Kasutatav tiheduse arvvärtuse leidmise valem on järgmine [27]:

$$\rho = \frac{A}{A-B}(\rho_0 - \rho_L) + \rho_L, \quad (3.2)$$

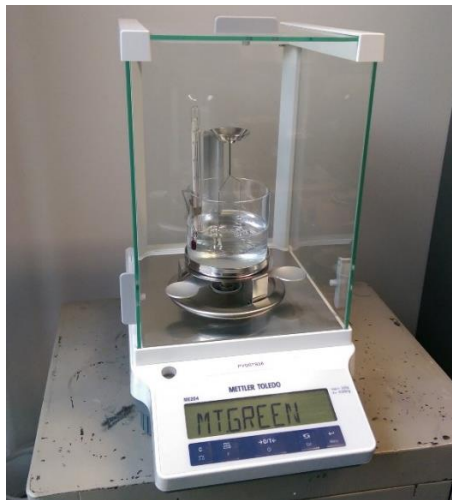
kus,  $\rho$  - tihedus ( $\text{g/cm}^3$ ),

A - katsekeha mass õhus (g),

B - katsekeha mass vedelikus (g),

$\rho_0$  - vedeliku tihedus ( $\text{g/cm}^3$ ),

$\rho_L$  - õhu tihedus ( $\text{g/cm}^3$ ).



Sele 3.7 Mettler Toledo ME204

Iga katsekeha mõõdeti 5 korda, seejärel eemaldati kõige suurem ja kõige väiksem tulem ning alles jäänud kolmest arvvärtusest võeti aritmeetiline keskmine. Saadud tulemusi võrreldakse kirjanduse poolt antud WC-12Co tihedusega ning arvutatakse mitu % sellest tihedusest katsekeha omab. WC-12Co tiheduseks on  $14,3 \text{ g/cm}^3$  [13].

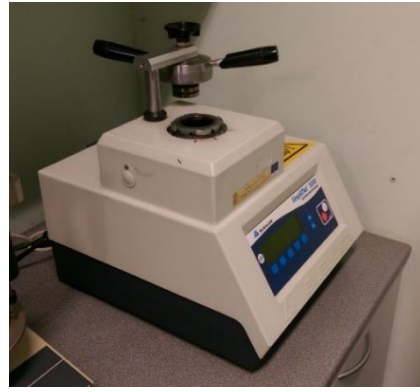
### 3.4 Lihvimismasin

Katsekehade töötlemiseks kasutati TTÜ lihvimisseadet Phoenix 4000 (Sele 3.8). Tegemist on lihvimismasinaga, mis on spetsiaalselt välja töötatud katsekehade lihvimiseks ning mille pöördeid on võimalik reguleerida vahemikus 50-600 p/min. Töö raames kasutati kolme erineva tera suurusega lihvimiskettaid  $125 \mu\text{m}$ ,  $9 \mu\text{m}$  ja  $3 \mu\text{m}$ . Lihvimise lihtsustamiseks ning efektiivsuse suurendamiseks pandi katsekehad plastiku sisse kasutades TTÜ seadet SimpliMet 3000 (Sele 3.8).



a)

Sele 3.8 a) Lihvimismasin Phoenix 4000; b) SimpliMet 3000



b)

### 3.5 Kõvaduse mõõtmine

Katsekehade kõvaduse mõõtmiseks kasutati TTÜ seadet Identec 5030KV (Sele 3.9), seadme koormuseks on 300 N. Kõvadust mõõdeti Vickersi skaalal [28]. Katset iseloomustav skeem on toodud all oleval pildil (Sele 3.10).



Sele 3.9 Identec 5030KV

Identorina on seadmel kasutusel teemant otsik, mis surutakse katsekehasse jõuga 300 N ning hoitakse koormust 10 sekundit. Tekkinud teljed mõõdetakse katse läbiviija poolt ja väärtus arvutatakse seadme arvuti abil.

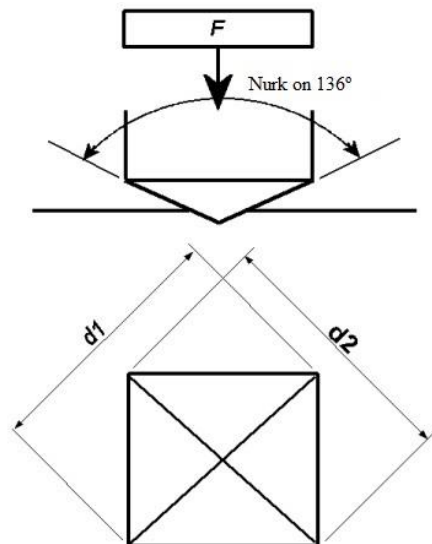
Vickersi meetodi arvutusvalem on järgmine [28]:

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 1,854 \frac{F}{d^2} , \quad (3.3)$$

kus,  $F$  - seadme poolt rakendatav koormus (N)

$d$  - jälje diagonaalide aritmeetiline keskmine (mm).





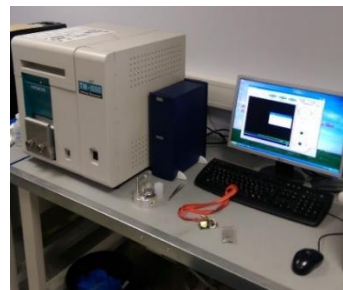
Sele 3.10 Vickersi kõvaduse mõõtmise skeem [28]

### 3.6 Mikroskoobid

Katsekehade ja pulbrite lähemaks uurimiseks kasutati kahte TTÜ mikroskoopi. Lähtepulbrite ja katsekehade uurimiseks kasutati optilist mikroskoopi Axiovert 25CA (Sele 3.11) ning mikrostruktuuri piltide tegemiseks elektronmikroskoopi (SEM) Hitachi TM-1000 (Sele 3.11).



a)



b)

Sele 3.11 a) Optiline mikroskoop Axiovert 25CA; b) elektronmikroskoop Hitachi TM-1000

### 3.7 HIP ahi

Katsekehade järelpaagutuse teostamiseks kasutati TTÜ HIP (*hot isostatic press*) ahju (AIP6-30H) (Sele 3.12). Ahjus toimub paagutus surve all ning taandavas keskkonnas (nt. argoon või lämmastik). Antud ahju maksimaalseks surveks on 2000 bar (200 MPa) ning maksimaalseks temperatuuriks 1700 °C. Katsekehade järelpaagutuse temperatuuriks oli 1400 °C ja rõhuks 30 bar (3 MPa).



Sele 3.12 American Isostatic Press

### **3.8 Kasutatud tarkvarad**

Töös kasutati mudelite ja jooniste tegemiseks SolidWorks 2014 tarkvara. Tegemist on kolmemõõtmelise raalprojekteerimis programmiga, mille arendajateks on „SolidWorks Corporation“ ning oma esimese toote väljastasid nad juba 1995 aastal. Katseplaane analüüsiti ja genereeriti toetudes Stat-Ease Design-Expert tarkvarale. Tegemist on tarkvaraga, mis on spetsiaalselt pühendatud eksperimentide paremaks haldamiseks. Programmiga on võimalik teha näiteks võrdluskatseid, optimeerimist, sõelumist ja kombineerimist. Tarkvaras olev kalkulaator aitab test maatriksi abil genereerida katseplaane vastavalt soovitud parameetritele. Töös kasutati sisenditena sulatusaega, punkti kaugust ja laseri võimsust ning väljundina saadud tihedusi.

## 4. KATSETUSED

Teemapunkt keskendub erinevate printimisparameetrite katsetamisele ning tulemuste analüüsile. Põhjusel, et kirjanduse andmed WC-Co printimiseks SLM seadmega puuduvad, võeti esimeste katsetuste aluseks sulami parameetrid, mis on juba välja töötatud. Antud juhul valiti tööriista terase parameetrid kuna antud materjal on SLM süsteemis kõige laialdasemalt kasutusel ning kõvasulami puhul sulatakse sideainet, milleks WC-Co puhul on koobalt. Koobalti sulamistemperatuur on 1495 °C ja raua sulamistemperatuur on 1539 °C [29]. Kahe metalli sulamistemperatuuride erinevus on 44 °C ning mõlemad materjalid liigitatakse kesksulavate metallide hulka.

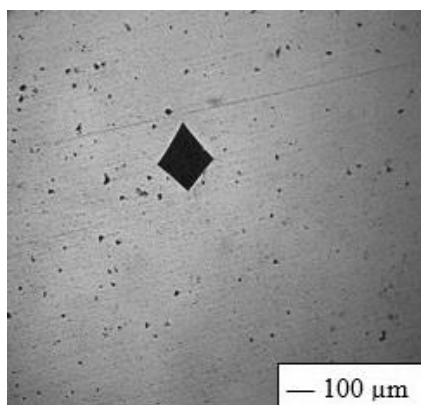
### 4.1 Pulbertehnoloogiat kasutades tehtud katsekeha

H.C Starck pulbrist tehti katsekeha kasutades pulbertehnoloogiat. Katsekeha oli risttahuka kujule pikkusega 45 mm, laiuseks 5 mm ja kõrguseks 5 mm. Traditsioonilisel meetodil valmistatud katsekeha on vajalik selleks, et võrrelda pulbertehnoloogia abil tehtud katsekeha omadusi selekterival lasersulatusel saadutega. Katsekeha mõõtetulemused on välja toodud järgnevas tabelis (Tabel 4.1).

Tabel 4.1 Pulbertehnoloogiat kasutades tehtud katsekeha omadused

Tihedus, g/cm <sup>3</sup>	Tihedus, %	Kõvadus, HV30
14,28 ±0,03	99,8	1349 ±25

Katsekeha mikrostruktuuri pilt on toodud all oleval pildil (Sele 4.1), kasutatud on 100 kordset suurendust.



Sele 4.1 Pulbertehnoloogiat kasutades tehtud katsekeha mikrostruktuur, suurendus x100

Töö eesmärgiks on selekterivat lasersulatusel kasutades saada paagutatud materjalile võimalikult ligilähedased omadused.

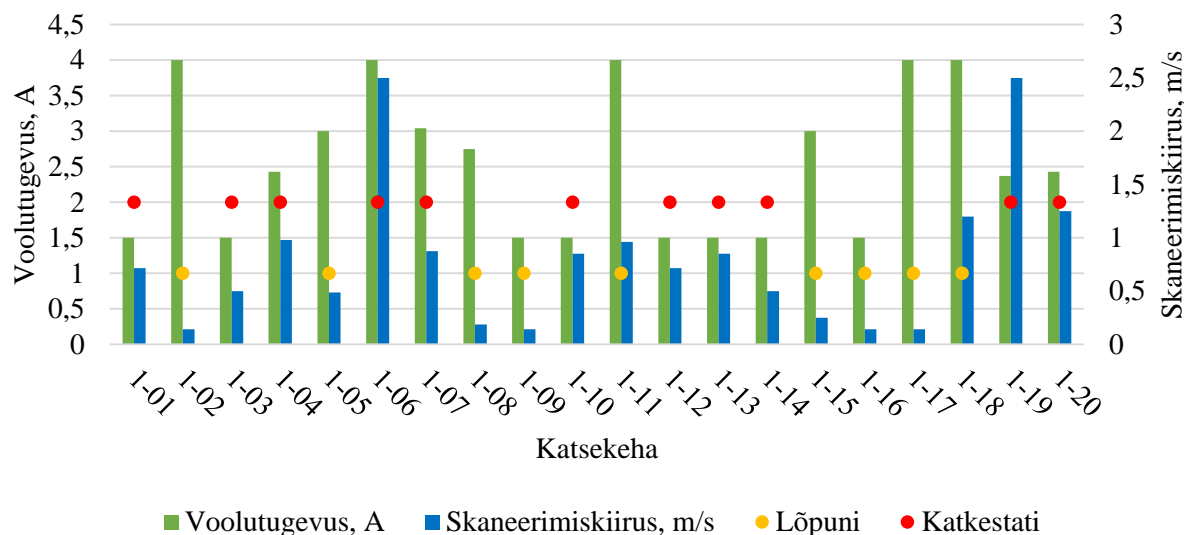
## 4.2 Lasersulatusparameetrite katseseeria number 1

Esimese katsetuse parameetrite valikul lähtuti terase printimisel kasutatavatest parameetritest, kus punktikaugeks on 40  $\mu\text{m}$  ja sulatusajaks 70  $\mu\text{s}$ . Parameetrite ümber genereeriti „Design expert“ tarkvara kasutades 20 erineva parameetriga kombinatsiooni. Esimese printimise fookuskauguseks valiti 12,5 mm ehk antud katsetuste käigus suurim sulatustäpi suurus, sama fookuskaugust kasutatakse ka tööriistaterase printimisel. All olevas tabelis (Tabel 4.2) on välja toodud proovitud parameetrite vahemikud. Kõik esimese katse parameetrid on välja toodud lisas (Lisa 4.1).

Tabel 4.2 Katseseeria nr. 1 parameetrite vahemikud

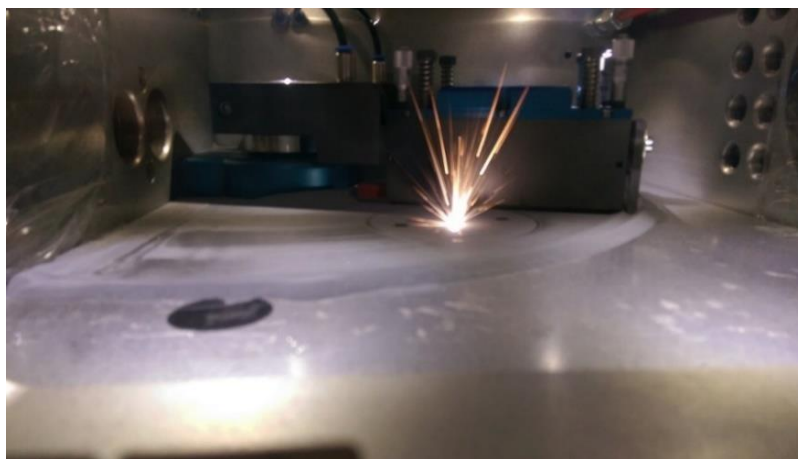
Parameeter	Vahemik
Punktikaugus, $\mu\text{m}$	10-50
Sulatusaeg, $\mu\text{s}$	20-70
Voolutugevus, A	1,5-4,0
Skaneerimiskiirus, m/s	0,14-2,50
Energiatihedus, $\text{J}/\text{mm}^3$	9-269
Fookuskaugus, mm	12,5
Kihi paksus, $\mu\text{m}$	25
Platvormi temperatuur, $^{\circ}\text{C}$	200
Keskkond	Argoon

Esialgset 20-nest katsekehast sai lõpuni teostada 9, mis teeb õnnestumise protsentuaalseks väärtuseks 45 %. Detailide printimise lõpetamise põhjuseks oli katsekehade kasvamine üle pulbri pinna, mis võib ära rikkuda teiste katsekehade printimise või halvemal juhul SLM seadme. Katkestatud katsekehade parameetreid vaadates võib väita, et fookuskauguse 12,5 mm juures ei anna tulemust madala voolutugevuse (1,5 A) ja suure skaneerimiskiiruse (0,2-2,5 m/s) kombinatsioon (Sele 4.2). Üleüldine tähelepanek oli, et skaneerimiskiirus üle 0,2 m/s ei anna head tulemust, kuna suure tõenäosusega tekib sellisel juhul materjali kasvamine, kuid siin oli ka väike erand, nimelt kui laseri võimsus oli maksimaalne andis ka suurem kiirus kui 0,2 m/s arvestatava tulemuse.



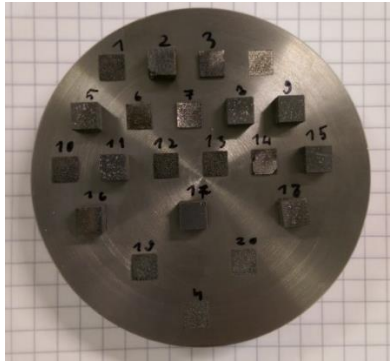
Sele 4.2 Katseseeria nr. 1 skaneerimiskiiruse, voolutugevuse ja lõpuni printimise omavaheline seos

Printimisprotsessi käigus täheldati, et teatud parameetrite kombinatsioonid kutsusid esile suures koguses sädemeid. Märkmete põhjal võib väita, et madal laserivõimsus ning väike skaneerimiskiirus tagavad vähese sädemete hulga ning suur võimsus ja väike skaneerimiskiirus tekitavad säraküünla efekti. Selet 4.3 on näha katsekeha 1-17 (number 1 näitab katseseeriat ja 17 katsekeha numbrit) teostatud printimist rohke sädemega.



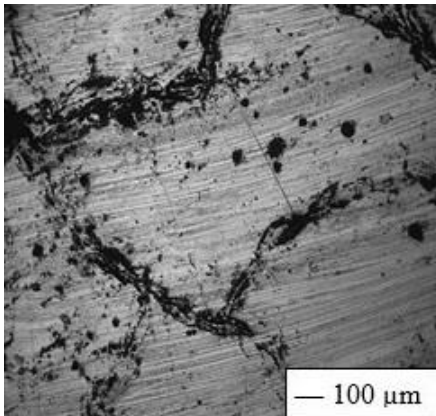
Sele 4.3 Katsekeha 1-17 lasersulatus

Katsetulemustele anti esialgne hinnang visuaalsel vaatlusel, selleks lihviti kuubikute ühte pinda. Lihvimise eesmärk oli detaili sisestruktuuri nägemine. Selet 4.4 on näidatud lihvitud katsekehad (Sele 4.4).

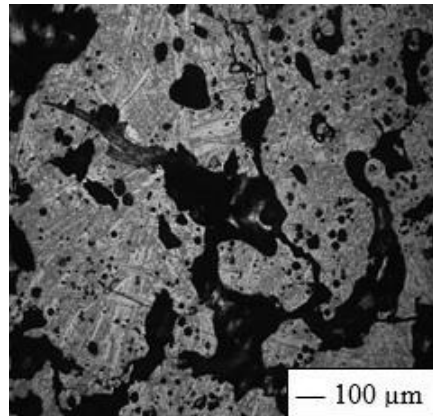


Sele 4.4 Katseseeria nr. 1 lihvitud katsekehad

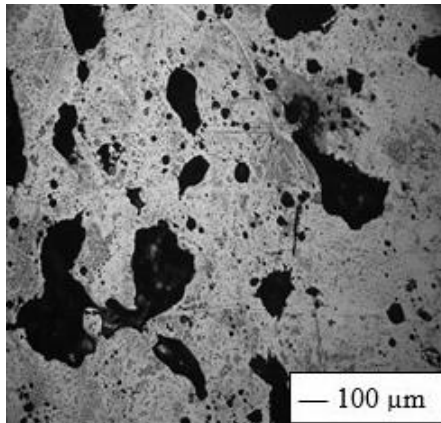
Välise vaatluse põhjal valiti parimateks katsekehad 1-02 (Sele 4.5-a) ja 1-17 (Sele 4.5-h). Katsekehade parameetrid olid samad (sulatusaeg 70  $\mu$ s, punktikaugus 10  $\mu$ m ja voolutugevus 4 A). Välist vaatlust teostati nii visuaalse vaatluse kui optilise mikroskoobi abil. Katsekehade mikrostruktuurid on toodud all oleval pildil (Sele 4.5). Piltide suurendus on x100 ning fotodelt on näha, et paljudel katsekehadel on läbiv poorsus. Katsekehadel 1-02 ja 1-17 on poorsus väiksem ning seetõttu valiti antud detailid ka parimateks. Kuigi poorid on nimetatud katsekehadel väiksemad on mikrostruktuurilt näha, et katsekehi läbivad praod. Suure tõenäosusega on pragude tekke põhjuseks suured sisepinged materjalis, mida võib põhjustada materjali kiire jahtumine. Materjal hakkab jahtuma kohe, kui laser on kihi ära sulatanud.



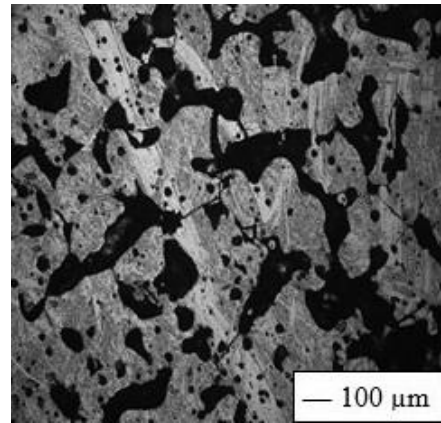
a) katsekeha 1-02



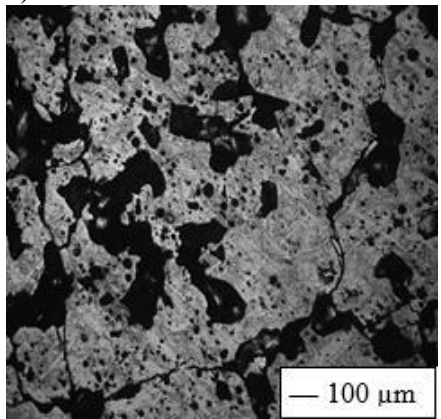
b) katsekeha 1-05



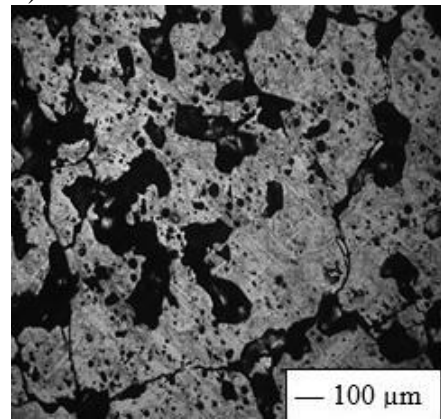
c) katsekeha 1-08



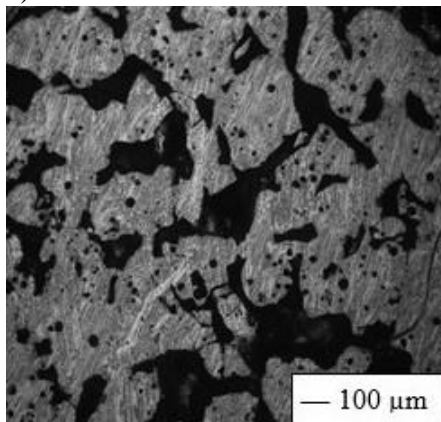
d) katsekeha 1-09



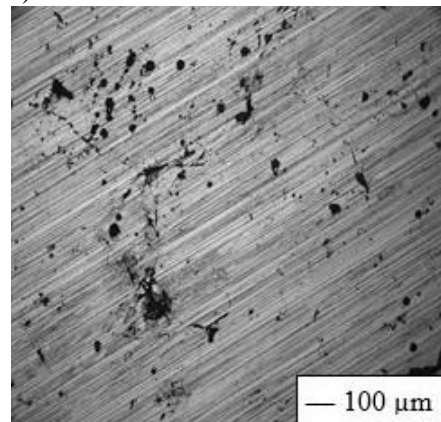
e) katsekeha 1-11



f) katsekeha 1-15



g) katsekeha 1-16



h) katsekeha 1-17

Sele 4.5 Katseseeria nr. 1 katsekehade mikrostruktuuride sõltuvus printimisparameetritest: a) PD = 10 μm, ET = 70 μs, I = 4 A; b) PD = 34 μm, ET = 70 μs, I = 3 A; c) PD = 13 μm, ET = 70 μs, I = 2,75 A; d) PD = 10 μm, ET = 70 μs, I = 1,5 A; e) PD = 50 μm, ET = 52 μs, I = 4 A; f) PD = 10 μm, ET = 40 μs, I = 3 A; g) PD = 10 μm, ET = 70 μs, I = 1,5 A; h) PD = 10 μm, ET = 70 μs, I = 4 A

Tiheduse ja kõvaduse mõõtetulemused on toodud all olevas tabelis (Tabel 4.3). Katsekehad, mille kõvadust pole märgitud oli kõvaduse mõõtmine raskendatud või võimatu - selle põhjuseks suur poorsus. Tabelist 4.3 on nähtav, et katsekehad 1-02 ja 1-17, mis välise vaatluse

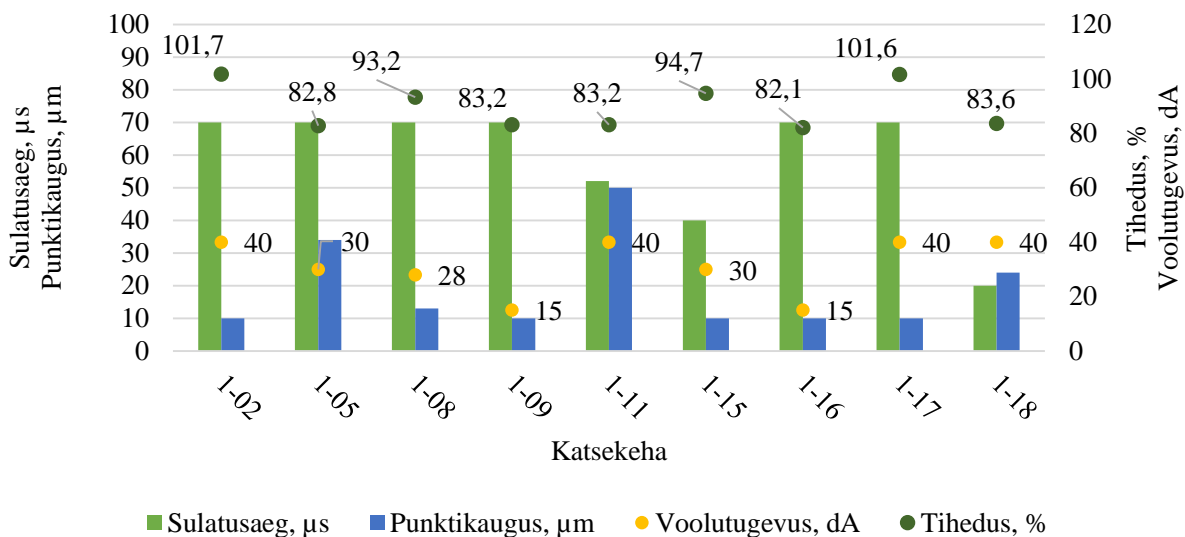
põhjal valiti parimateks annavad ka suurimad tihedused (102 %). Tiheduse kõrge väärtus viitab koobalti osakaalu vähenemisele materjalis, sest sideaine protsentuaalne vähenemine tõstab materjali tihedust. Selle põhjuseks on asjaolu, et volframkarbiidi tihedus on suurem kui koobaltil. Materjalide tihedused on vastavalt 15,7 g/cm<sup>3</sup> ja 8,9 g/cm<sup>3</sup> [11].

Tabel 4.3 Katseseeria nr. 1 katsekehade tihedused ja kõvadused

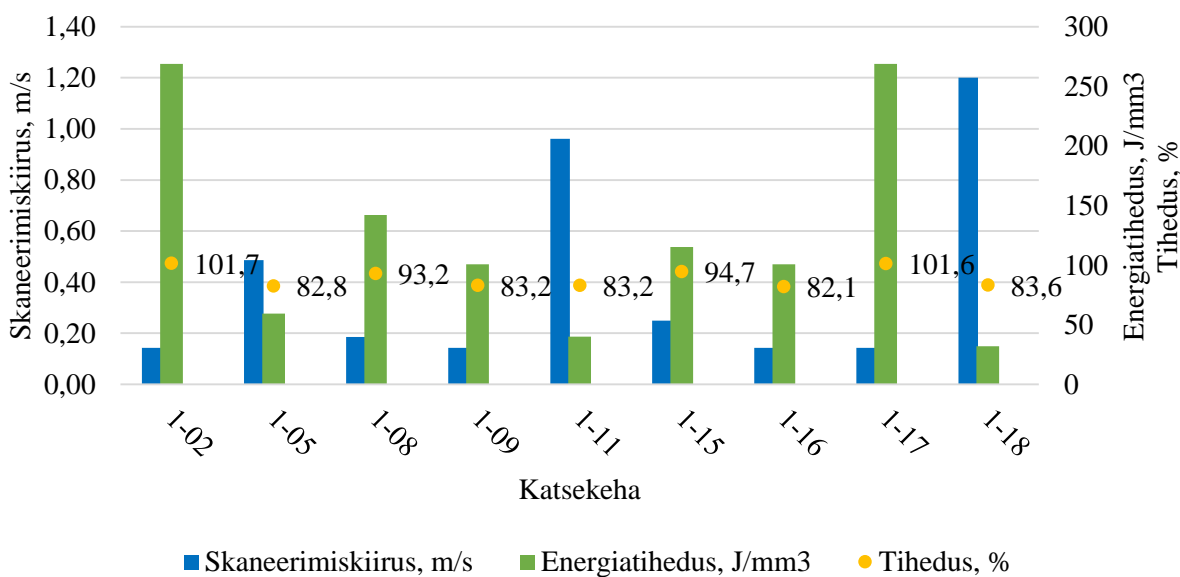
Katsekeha	Tihedus, g/cm <sup>3</sup>	Tihedus, %	Kõvadus, HV30
1-02	14,5 ±0,3	101,7	1188 ±25
1-05	11,8 ±0,1	82,8	
1-08	13,3 ±0,3	93,2	
1-09	11,9 ±0,1	83,2	
1-11	11,9 ±0,1	83,2	
1-15	13,5 ±0,1	94,7	1077 ±25
1-16	11,7 ±0,2	82,1	
1-17	14,5 ±0,1	101,6	1077 ±25
1-18	12,0 ±0,1	83,6	

Tiheduse põhjal andsid aktsepteeritavad tulemused ka katsekehad 1-08 ja 1-15. Katseseeria keskmiseks tiheduseks oli 89,6 %. Vaadeldes katsekehasid mille tihedused on üle 90 % võib välja tuua, et sulatusajaks oli kõigi puhul 70 µs, mis oli ka maksimaalne sulatusaeg antud katseseeria juures. Punktikaugus oli minimaalne ehk 10 µm (Sele 4.6). Parameetrite puhul erines vaid voolutugevus, mis varieerus vahemikus 1,5-4,0 A, kusjuures energiatihedus oli kõigil suurem kui 115 J/mm<sup>3</sup>. Tiheduse, energiatiheduse ja skaneerimiskiiruse vaheline seos on nähtav graafikul (Sele 4.7). Graafikult on selgelt näha, et suurema energiatiheduse ja väiksema skaneerimiskiiruse korral on tiheduse väärtused kõrgemad. Põhjusel, et katsekehad olid poorsed ei õnnestunud kõvadust mõõta kõigil katsekehadel, millest lähtuvalt ei ole võimalik kõvaduse põhjal esimese katsetuse katsekehi võrrelda. Mõõdetud katsekehade keskmine kõvadus oli HV30 1114 ning suurim kõvadus oli HV30 1188 , mõõdetud katsekehal 1-02.





Sele 4.6 Katseseeria nr. 1 sulatusaja, punktikauguse, voolutugevuse ja tiheduse omavaheline seos



Sele 4.7 Katseseeria nr. 1 energiatiheduse, skaneerimiskiiruse ja tiheduse omavaheline seos

Esimese katsetuse põhjal võib öelda, et antud materjali on võimalik lasersulatusseadmes SLM 50 kasutada. Esimeses katseseerias andis parima tulemuse maksimaalne sulatusaeg (70  $\mu$ s) maksimaalse voolutugevus (4 A) ja minimaalse punktikauguse (10  $\mu$ m) juures. Selett 4.7 on näha, et kõrge energiatihedus koos väikese skaneerimiskiirusega andis katsekehadele suurema tiheduse. Kõrge energiatihedus tähendab, et materjali sulatati väga suure intensiivsusega.

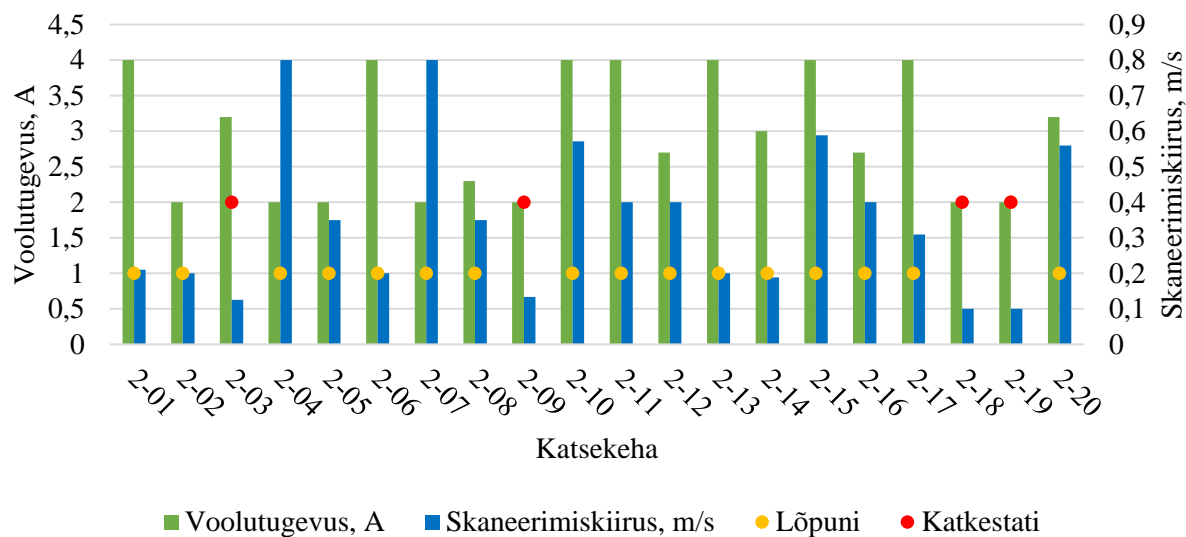
### 4.3 Lasersulatusparameetrite katseseeria number 2

Teise katsetuse fookuskaugus oli 8,5 mm ehk kasutati väikseimat sulatustäpi suurus. Katsetuse parameetrite valikul lähtuti eelkõige esimese katseseeria tulemustest. Tulemuste põhjal võis väita, et volframkarbiid-koobalti lasersulatuses tuleks kasutada suhteliselt pikka sulatusaega ning väikest punktikaugust. Järgmiseks katseks genereeriti sulatusajad vahemikus 50-100  $\mu$ s ning punktikaugused vahemikust 10-40  $\mu$ m. Voolutugevused valiti vahemikust 2-4 A (Tabel 4.4). Teises katseseerias oli kokku 20 katsekeha ning katsekehade parameetrid on näha lisas (Lisa 4.2).

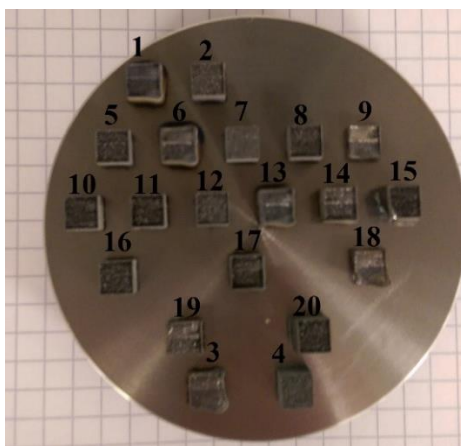
Tabel 4.4 Katseseeria nr. 2 parameetrite vahemikud

Parameeter	Vahemik
Punktikaugus, $\mu$ m	10-40
Sulatusaeg, $\mu$ s	50-100
Voolutugevus, A	2-4
Skaneerimiskiirus, m/s	0,1-0,8
Energiatihedus, J/mm <sup>3</sup>	24-246
Fookuskaugus, mm	8,5
Kihi paksus, $\mu$ m	25
Platvormi temperatuur, °C	200
Keskkond	Argoon

Esimese katseseeria puhul õnnestus 20-nest katsekehast lõpuni printida 9, teise katseseeria korral 16. Lõpuni teostamise protsentuaalseks väärtuseks teeb see 80 %. Katkestatud katsekehad olid väga madalate skaneerimiskiirustega (0,10-0,13 m/s) (Sele 4.8). Järgneval fotol on näha prinditud katsekehad peale üleliigse pulbri eemaldamist (Sele 4.9).

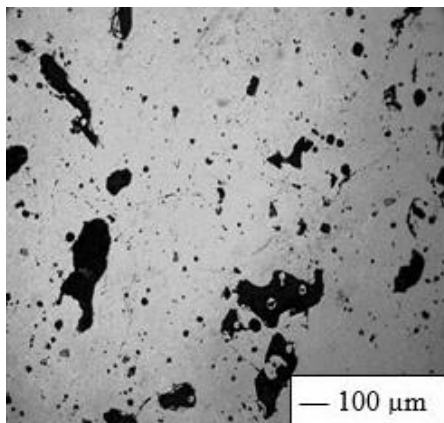


Sele 4.8 Katseseeria nr. 2 skaneerimiskiiruse, voolutugevuse ja lõpuni printimise omavaheline seos

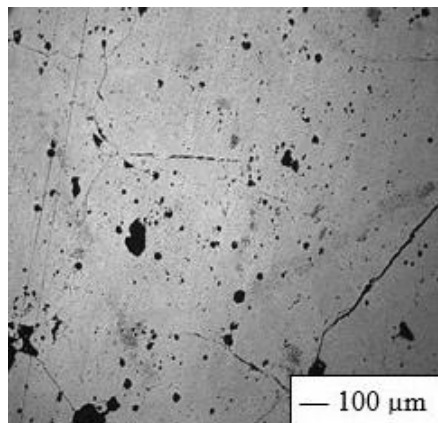


Sele 4.9 Katseseeria nr. 2 katsekehad

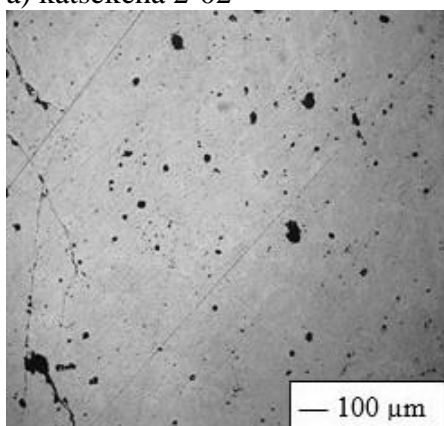
Esialgne hinnang katsekehadele anti visuaalsel vaatlusel, mille tulemusena valiti parimateks katsekehad 2-02, 2-11, 2-14 ja 2-17. Mikroskoobiga tehtud pildid nimetatud katsekehadele on toodud all oleval pildil (Sele 4.10).



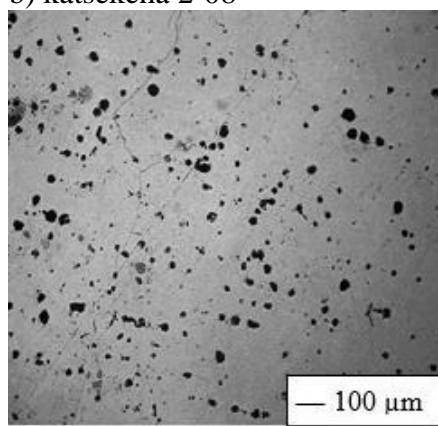
a) katsekeha 2-02



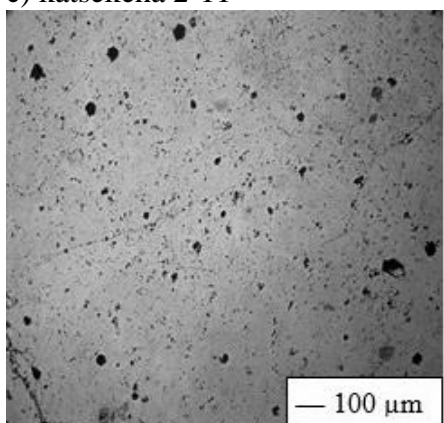
b) katsekeha 2-08



c) katsekeha 2-11



d) katsekeha 2-14



e) katsekeha 2-17

Sele 4.10 Katseseeria nr. 2 katsekehade mikrostruktuuride sõltuvus printimisparameetritest:

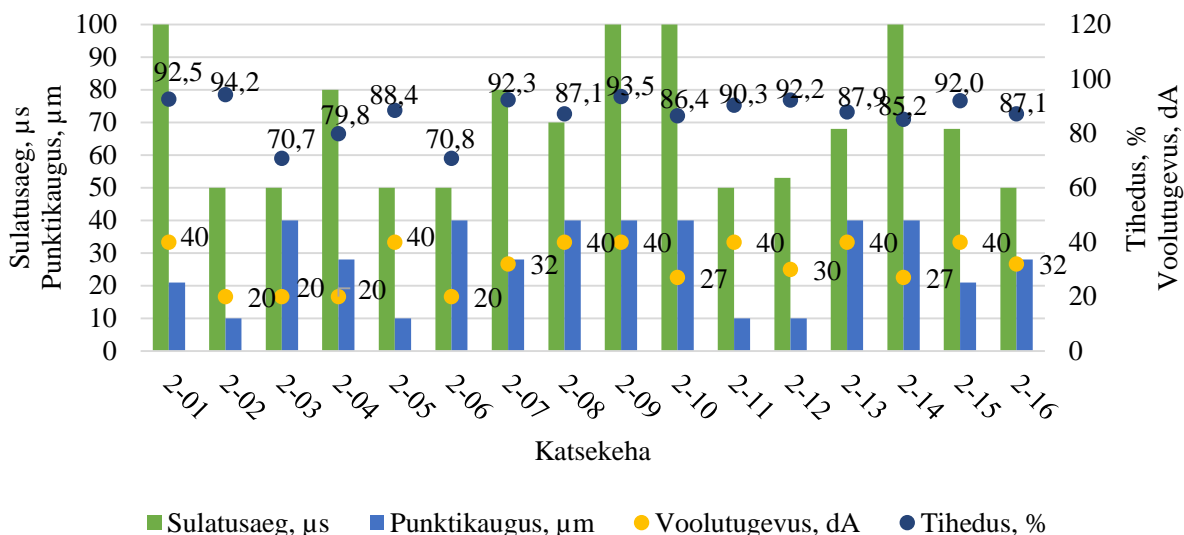
a) PD = 10 μm, ET = 50 μs, I = 2 A; b) PD = 28 μm, ET = 80 μs, I = 2,3 A; c) PD = 40 μm, ET = 100 μs, I = 4 A; d) PD = 10 μm, ET = 53 μs, I = 3 A; e) PD = 21 μm, ET = 68 μs, I = 4 A

Tiheduste ja kõvaduste mõõtetulemused on toodud all olevas tabelis (Tabel 4.5). Katsekehadel, mille kõvadust tabelis pole märgitud oli kõvaduse mõõtmine raskendatud või võimatu – põhjuseks suur poorsus.

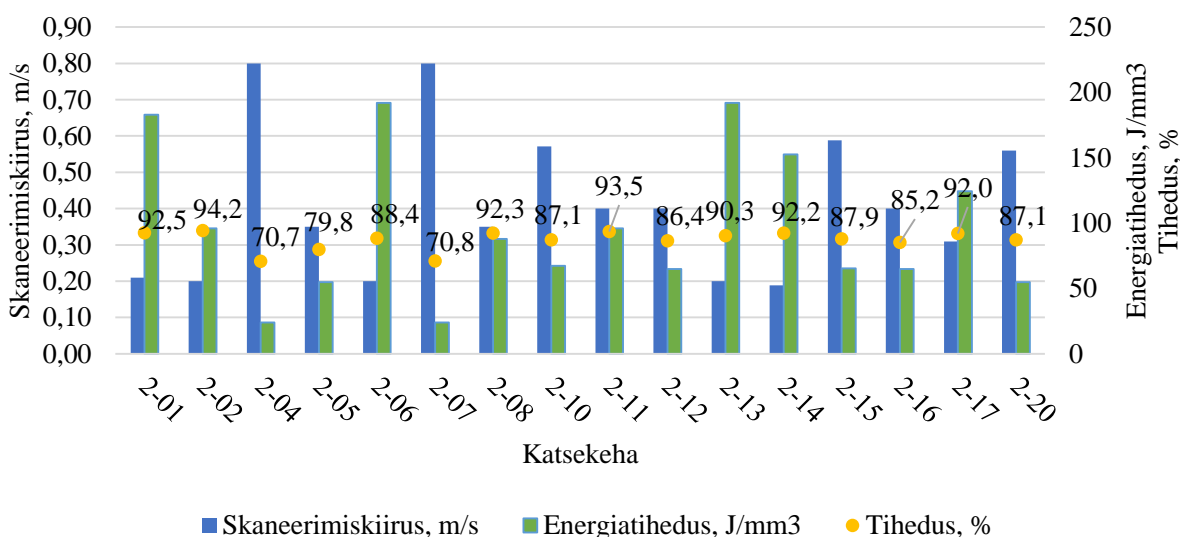
Tabel 4.5 Katseseeria nr. 2 tihedused ja kõvadused

Katsekeha	Tihedus, g/cm <sup>3</sup>	Tihedus, %	Kõvadus, HV30
2-01	13,2 ±0,1	92,5	
2-02	13,5 ±0,1	94,2	820 ±25
2-04	10,1 ±0,1	70,7	
2-05	11,4 ±0,1	79,8	
2-06	12,6 ±0,1	88,4	
2-07	10,1 ±0,1	70,8	
2-08	13,2 ±0,1	92,3	1063 ±25
2-10	12,5 ±0,1	87,1	
2-11	13,4 ±0,2	93,5	1031 ±25
2-12	12,4 ±0,1	86,4	
2-13	12,9 ±0,1	90,3	
2-14	13,2 ±0,1	92,2	1001 ±25
2-15	12,6 ±0,1	87,9	
2-16	12,2 ±0,1	85,2	
2-17	13,2 ±0,2	92,0	1049 ±25
2-20	12,5 ±0,2	87,1	

Tabelist 4.5 on nähtav, et visuaalsel vaatlusel välja valitud katsekehad annavad ka kõrgemad tiheduse väärtused. Kõrgeima tulemuse andis katsekeha 2-02, mille tihedus oli 94,2 % (sulatusaeg 100 µs, punktikaugus 40 µm, ning voolutugevus 4 A). Keskmiseks tiheduseks 2. katseseeria juures oli 86,9 %. Katsekehad mille tihedused olid üle 90 % olid teostatud järgnevate parameetrite vahemikega. Sulatusajad olid vahemikus 50-100 µs ning punktikaugused 10-40 µm. Välja saab tuua, et pika sulatusaja puhul töötas suurem punktikaugus ning lühema sulatusaja korral väiksem punktikaugus (Sele 4.11). Esimese katsega sarnaselt võis täheldada, et suur energiatihedus andis kõrgema tiheduse väärtusega katsekehad. Energiatiheduse, skaneerimiskiiruse ja tiheduse omavahelisest seosest (Sele 4.12) on näha, et suur energiatihedus annab katsekehadele suurema tiheduse, kusjuures seda nii madala kui keskmise skaneerimiskiiruse juures.



Sele 4.11 Katseseeria nr. 2 sulatusaja, punktikauguse, voolutugevuse, energiatiheduse ja tiheduse omavaheline seos



Sele 4.12 Katseseeria nr. 2 energiatiheduse, skaneerimiskiiruse ja tiheduse omavaheline seos

Kuna kõvadust ei õnnestunud mõõta kõigil katseskehadel, ei ole võimalik selle põhjal teise katsetuse katseskehi võrrelda. Mõõdetud katseskehade keskmine kõvadus oli HV30 995 ning suurim HV30 1063. Teise katsetuse põhjal on võimalik väita, et kasutades pikemat sulatusaega tuleb kasutada suuremat punktikaugust ning lühikese sulatusaja korral tuleks kasutada väiksemat punktikaugust. Jätkuvalt saadakse kõrgemad tulemused suurt energiatihedust kasutades (suure voolutugevuse ja madala skaneerimiskiiruse kombinatsioon).

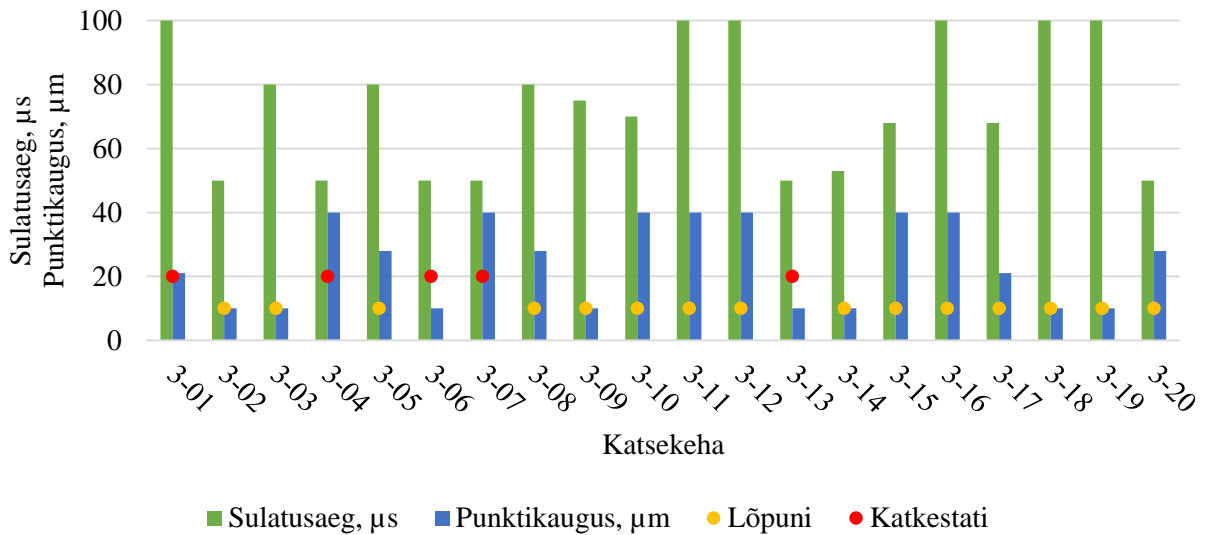
#### 4.4 Lasersulatusparameetrite katseseeria number 3

Kolmanda katseseeria printimiseks kasutati teise katseseeriaga samasid parameetreid (Lisa 4.3). Muudeti vaid laseri fookuskaugust (Tabel 4.6). Fookuskauguseks seati 10,5 mm ehk valiti keskmine sulatustäpi suurus. Kolmanda katseseeria käigus prinditi lõpuni 15 katsekeha, see annab õnnestumise protsendiks 75 %.

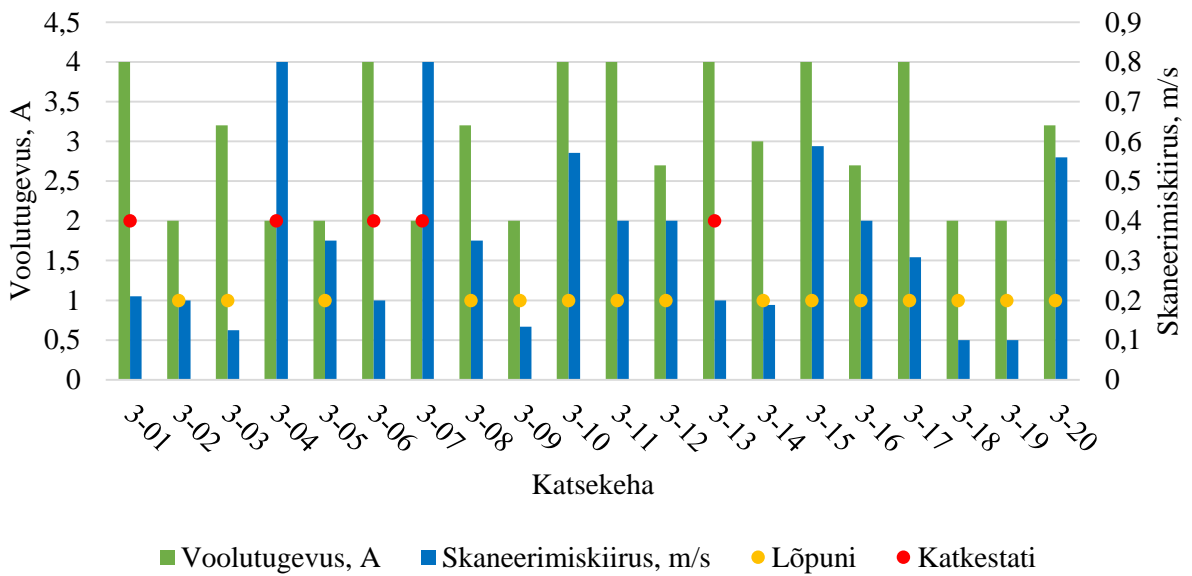
Tabel 4.6 Katseseeria nr. 3 parameetrite vahemikud

Parameeter	Vahemik
Punktikaugus, $\mu\text{m}$	10-40
Sulatusaeg, $\mu\text{s}$	50-100
Voolutugevus, A	2-4
Skaneerimiskiirus, m/s	0,1-0,8
Energiatihedus, $\text{J}/\text{mm}^3$	24-246
Fookuskaugus, mm	10,5
Kihi paksus, $\mu\text{m}$	25
Platvormi temperatuur, $^{\circ}\text{C}$	200
Keskkond	Argoon

Katkestatud katsekehade puhul kasutati kas maksimaalset (4 A) või minimaalselt (2 A) voolutugevust. Sulatusaja puhul oli neljal antud katsekehast tegemist minimaalse sulatusajaga (50  $\mu\text{s}$ ), katsekeha 3-01 juures oli kasutusel maksimaalne sulatusaeg (100  $\mu\text{s}$ ), kuid antud detaili korral oli kasutusel ka maksimaalne laseri võimsus (Sele 4.13). Lisaks saab välja tuua, et suur skaneerimiskiirus ei anna tulemust. Skaneerimiskiiruse ja voolutugevuse lõpuni printimise seos on välja toodud seel 4.14 (Sele 4.14).



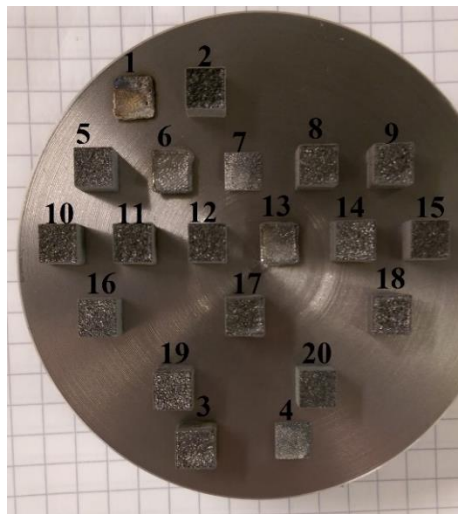
Sele 4.13 Katseseeria nr. 3 sulatusaja ja punktikauguse lõpuni printimise seos



Sele 4.14 Katseseeria nr. 3 skaneerimiskiiruse, voolutugevuse ja lõpuni printimise omavaheline seos

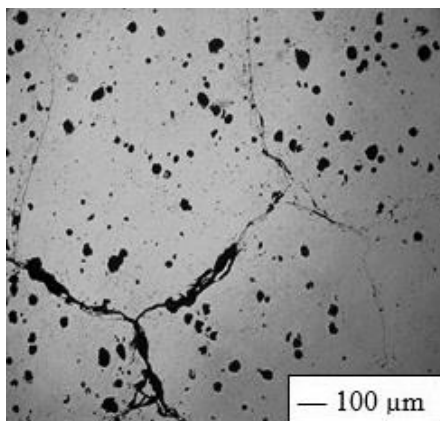


Alloleval fotol on näha prinditud katsekehad peale üleliigse pulbri eemaldamist (Sele 4.15).

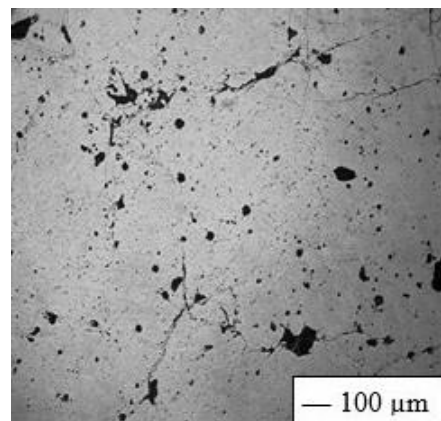


Sele 4.15 Katseseeria nr. 3 katsekehad

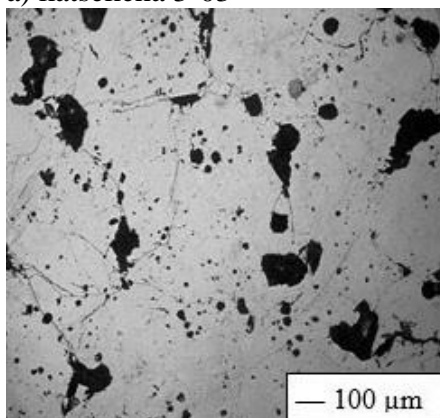
Esialgne hinnang katsekehadele anti visuaalsel vaatlusel. Vaatluse tulemusena valiti välja katsekehad 3-03, 3-14 ja 3-18. Mikrostruktuuride pildid plastikusse valatud katsekehdest on toodud seel 4.16.



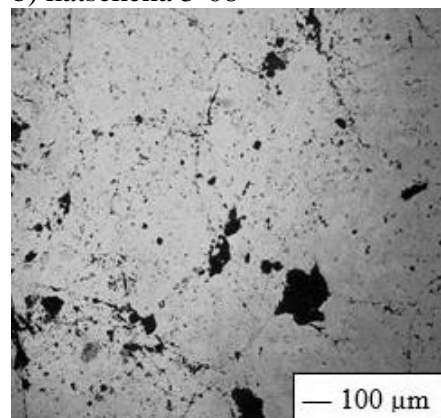
a) katsekeha 3-03



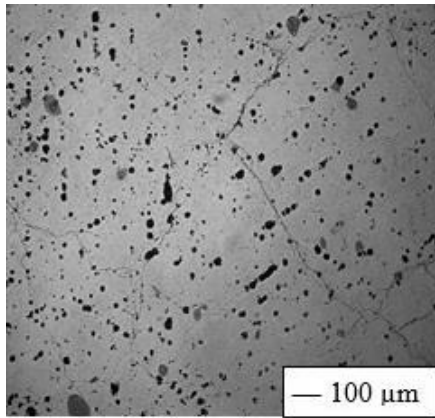
b) katsekeha 3-08



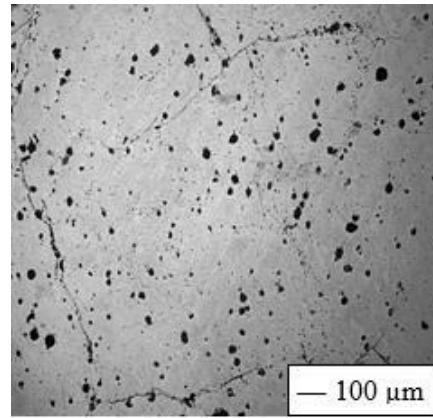
c) katsekeha 3-09



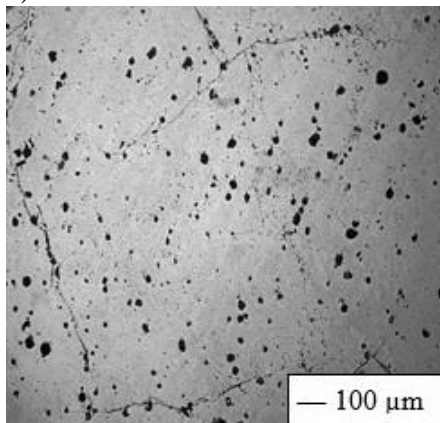
d) katsekeha 3-10



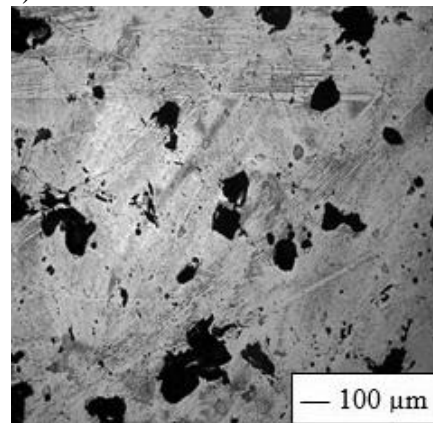
e) katsekeha 3-14



f) katsekeha 3-17



g) katsekeha 3-18



h) katsekeha 3-19

Sele 4.16 Katseseeria nr. 3 katsekehade mikrostruktuuride sõltuvus printimisparameetritest:

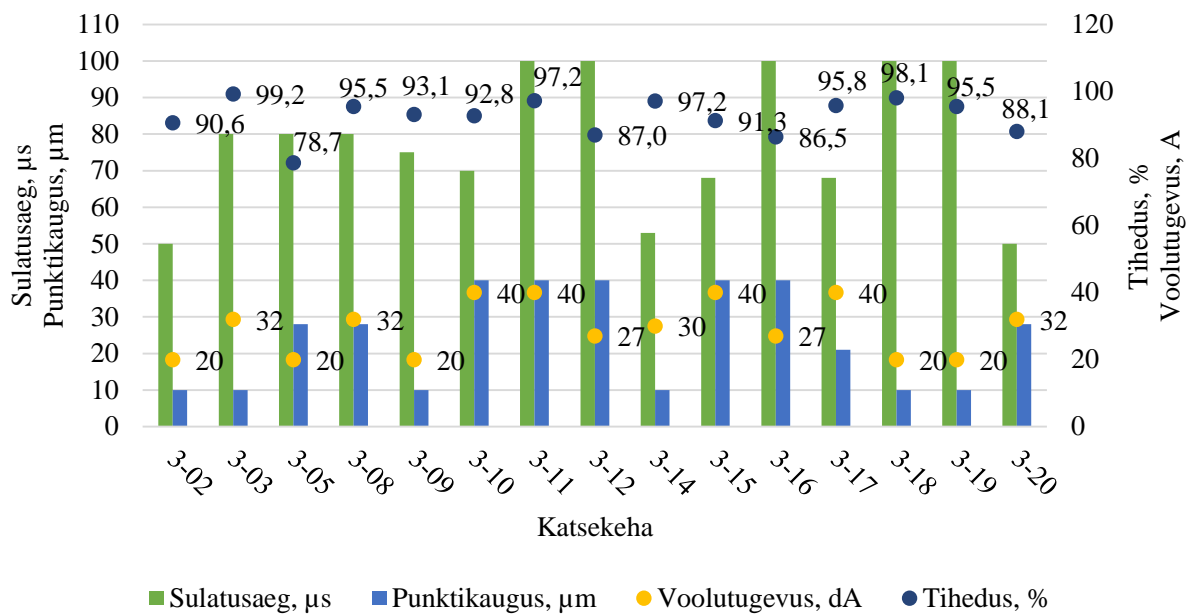
a) PD = 10 μm, ET = 80 μs, I = 3,2 A; b) PD = 28 μm, ET = 80 μs, I = 2,3 A; c) PD = 10 μm, ET = 75 μs, I = 2 A; d) PD = 40 μm, ET = 70 μs, I = 4 A; e) PD = 10 μm, ET = 53 μs, I = 3 A; f) PD = 21 μm, ET = 68 μs, I = 4 A; g) PD = 10 μm, ET = 100 μs, I = 2 A; h) PD = 10 μm, ET = 100 μs, I = 2 A

Tiheduse ja kõvaduse mõõtetulemused on toodud all olevas tabelis (Tabel 4.7). Katsekehadel, mille kõvadust tabelis pole märgitud oli kõvaduse mõõtmine raskendatud või võimatu - põhjuseks katsekehade suur poorsus.

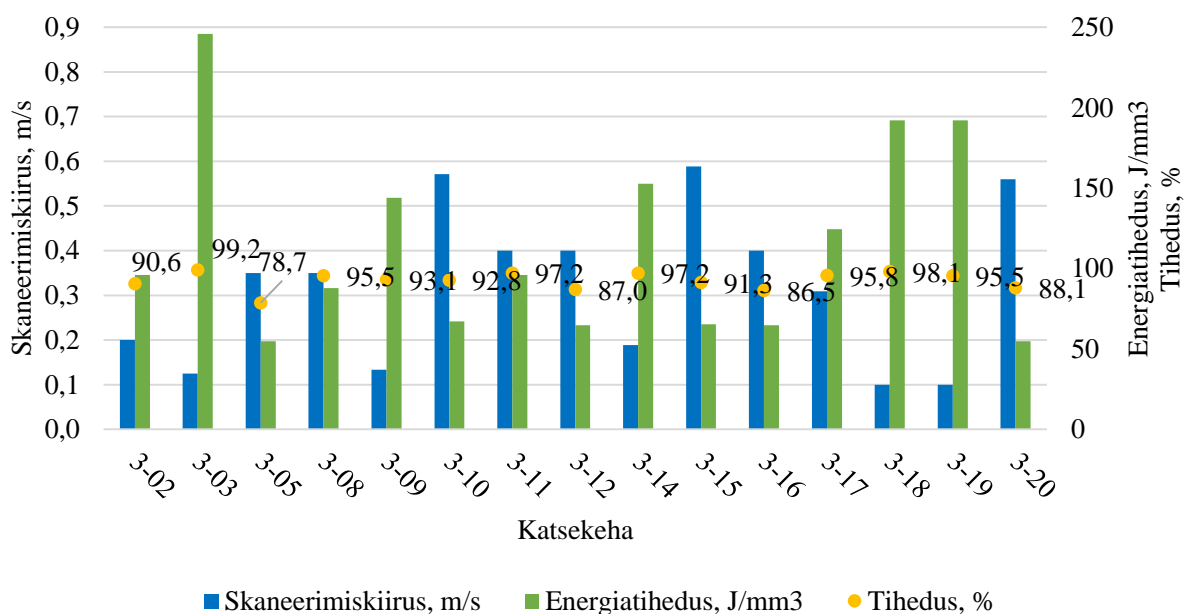
Tabel 4.7 Katseseeria nr. 3 tihedused ja kõvadused

Katsekeha	Tihedus, g/cm <sup>3</sup>	Tihedus, %	Kõvadus, HV30
3-02	13,0 ±0,1	90,6	
3-03	14,2 ±0,2	99,2	1081 ±25
3-05	11,3 ±0,1	78,7	
3-08	13,7 ±0,1	95,5	893 ±25
3-09	13,3 ±0,1	93,1	988 ±25
3-10	13,3 ±0,1	92,8	1044 ±25
3-11	13,3 ±0,2	97,2	
3-12	12,4 ±0,2	87,0	
3-14	13,9 ±0,1	97,2	882 ±25
3-15	13,1 ±0,1	91,3	
3-16	12,4 ±0,1	86,5	
3-17	13,7 ±0,1	95,8	948 ±25
3-18	14,0 ±0,1	98,1	1031 ±25
3-19	13,7 ±0,2	95,5	918 ±25
3-20	12,6 ±0,1	88,1	

Tabelist 4.7 on nähtav, et visuaalsel vaatlusel välja valitud katsekehad annavad kõik tihedused üle 90 %, parima tulemuse andis katsekeha 3-03, mille tiheduseks oli 99,2 % (sulatusaeg 80 µs, punktikaugus 10 µm ja voolutugevus 4 A), suure tõenäosusega on ka sellest katsekehast Co välja aurustunud, sest mikrostruktuurilt on näha, et poorsus on suurem kui 0,8 %. Kokku on 15 lõpuni sulatatud katsekeha hulgas 11 katsekeha, mille tihedus on üle 90 % ning lõpuni prinditud katsekehade keskmiseks tiheduseks on 92,4 %. Vaadeldes katsekehasid mille tulemused tiheduse vallas on üle 90 % jäävad parameetrid vahemikku. Sulatusajad jäävad vahemikku 50-100 µs ning punktikaugused 10-40 µm (Sele 4.17). Skaneerimiskiiruse, energiatiheduse ja tiheduse vaheline seos on toodud seel 4.18 (Sele 4.18).



Sele 4.17 Katseseeria nr.3 sulatusaja, punktikauguse, voolutugevuse ja tiheduse omavaheline seos

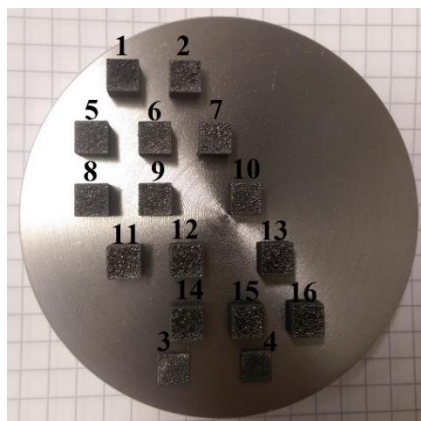


Sele 4.18 Katseseeria nr. 3 voolutugevuse, skaneerimiskiiruse ja tiheduse omavaheline seos

Kuna kõvadust ei õnnestunud mõõta kõigil katsekehadel, ei ole võimalik selle põhjal kolmanda katsetuse katsekehi võrrelda. Katsekehade keskmine kõvadus oli HV30 973 ning suurim kõvadus HV30 1044 (katsekeha 3-10). Kolmanda katseseeria puhul olid paljude katsekehade tihedus üle 90 % seetõttu võib väita, et antud fookuskaugus võiks sobida volframkarbiid-koobalti printimiseks. Parima tulemuse antud fookuskauguse juures andis kolmandas katseseerias sulatusaeg 75-80  $\mu$ s punktikaugus 10  $\mu$ m keskmise voolutugevuse juures (2,0-3,2 A).

#### 4.5 Lasersulatusparameetrite katseseeria number 4

Neljanda katseprintimise parameetrite valikul lähtuti eelmiste katseseeriade tulemustest. Fookuskauguseks valiti 10,5 mm (keskmine sulatustäpi suurus), sest antud fookuskauguse juures tuli katsekehade keskmine tihedus suurim (92,4 %). Kõigi eelnevate katsetuste parimatel tulemustel olid läbivad praod, mis viitavad suurtele sisepingetel, sellest lähtuvalt otsustati proovida katsekehade ühe kihi mitmekordset lasersulatus. Teoorias peaks selline lähenemine vähendama detailide sisepingeid. Lisaks otsustati laseri võimsuste valimisel vältida suuri voolutugevusi, mis põhjustavad hõõgumist. Valitud parameetrite vahemikud on nähtavad tabelis (Tabel 4.8) ja kõik parameetrid lisas (Lisa 4.4). Parameetrite valikul oli tähtis vältida pragude tekkimist, materjali tihedusele nii suurt tähelepanu ei pööratud, sest otsustati proovida materjali tihedust tõsta ning poorsust vähendada detailide järelpaagutusega HIP ahjus. Neljanda katseseeria lasersulatus käigus prinditi 16 katsekeha, millest lõpuni prinditi 14 (lõpuni printimise protsent 87,5 %). All oleval pildil on näha prinditud katsekehasid peale üleliigse pulbri eemaldamist (Sele 4.19).

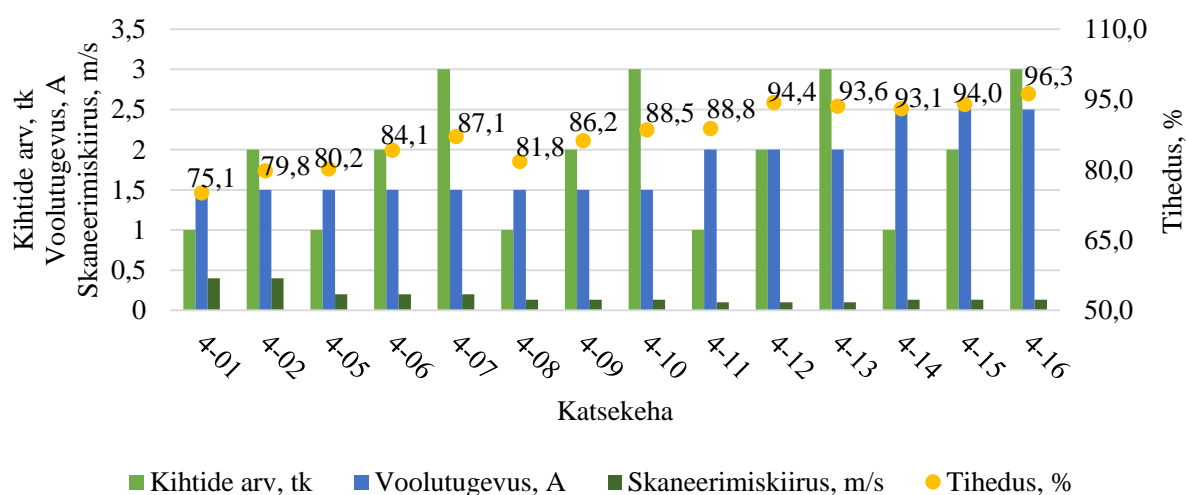


Sele 4.19 Katseseeria nr. 4 katsekehad

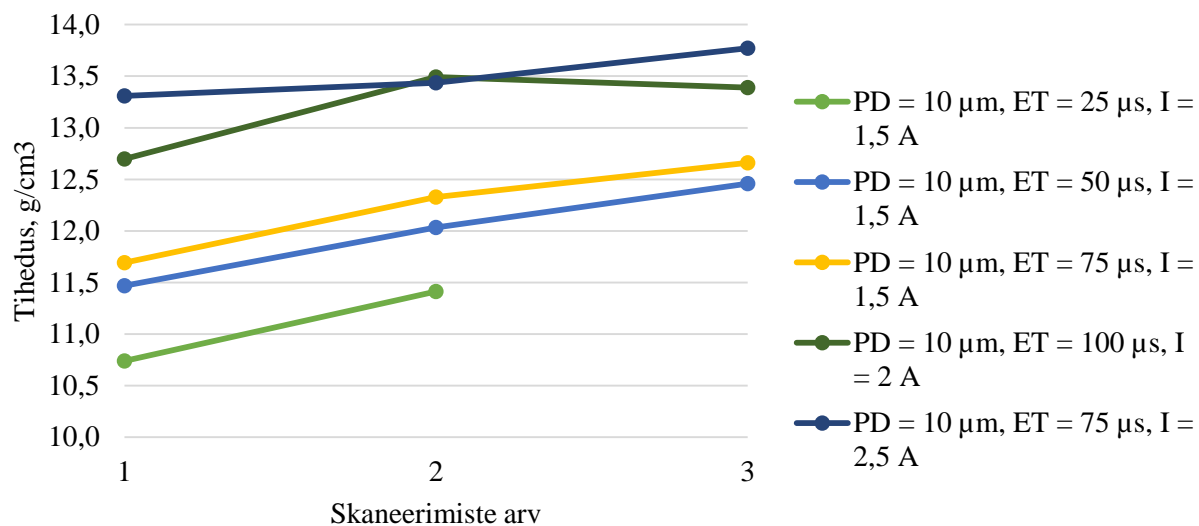
Tabel 4.8 Katseseeria nr. 4 parameetrite vahemikud

Parameeter	Vahemik
Punktikaugus, $\mu\text{m}$	10
Sulatusaeg, $\mu\text{s}$	25-100
Voolutugevus, A	1,5-2,5
Skaneerimiskiirus, m/s	0,1-0,4
Energiatihedus, $\text{J}/\text{mm}^3$	36-192
Kihtide arv, tk	1-3
Fookuskaugus, mm	10,5
Kihi paksus, $\mu\text{m}$	25
Platvormi temperatuur, $^{\circ}\text{C}$	200
Keskkond	Argoon

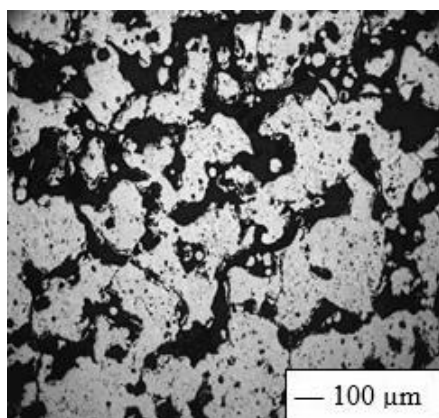
Katsekehadele teostati esmase hinnangu andmine visuaalse vaatluse põhjal. HIP ahju panekuks valiti välja 5 katsekeha. Valituks osutusid katsekehad, millel ei olnud näha läbivaid pragusid. Katsekehad olid: 4-01, 4-02, 4-14, 4-15 ja 4-16. Katsekehade sisestruktuurid enne ja peale järelpaagutust on toodud graafikutele järgneval pildil (Sele 4.22). Parima tulemuse antud parameetrite hulgast andis materjali kolmekordne lasersulatus parameetritega: sulatusaeg 75  $\mu\text{s}$ , punktikaugus 10  $\mu\text{m}$  ja voolutugevusega 2,5 A (Sele 4.20). Nimetatud parameetritega saavutati tiheduseks 96,3 %. Samade parameetritega, kuid ühekordse lasersulatus puhul oli tiheduseks 93,1 % ehk erinevus on 3,2 %. Seelt 4.21 (Sele 4.21) on näha, et parimad tulemused saavutati kolmekordsel kihi sulatusel.



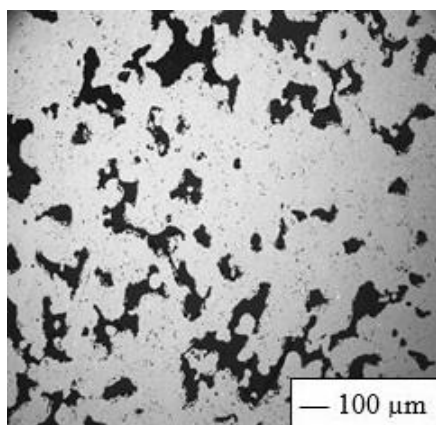
Sele 4.20 Katseseeria nr. 4 kihtide arvu, voolutugevuse, skaneerimiskiiruse ja tiheduse vaheline seos



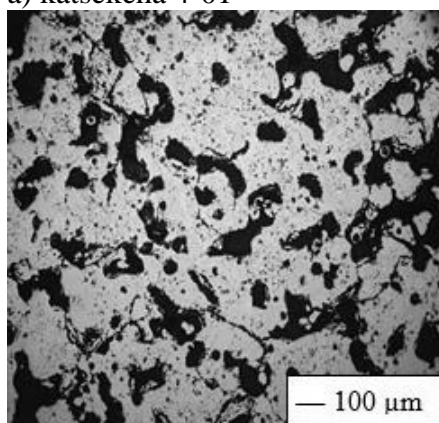
Sele 4.21 Katsekehade tiheduste sõltuvus ühe kihi skaneerimiste arvust



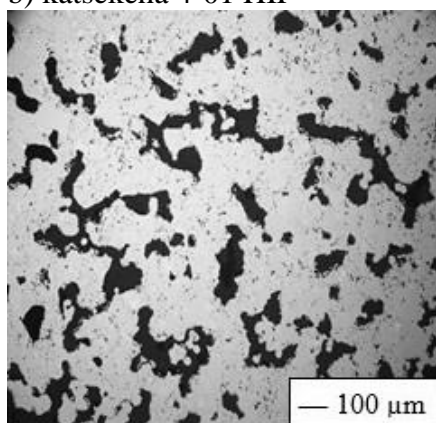
a) katsekeha 4-01



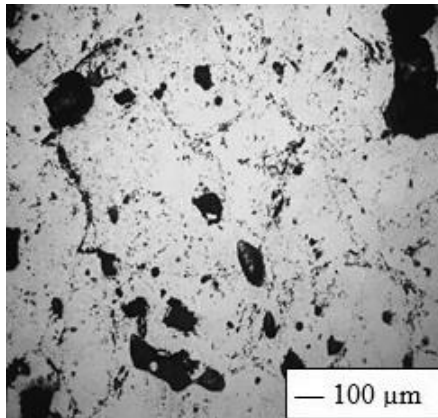
b) katsekeha 4-01 HIP



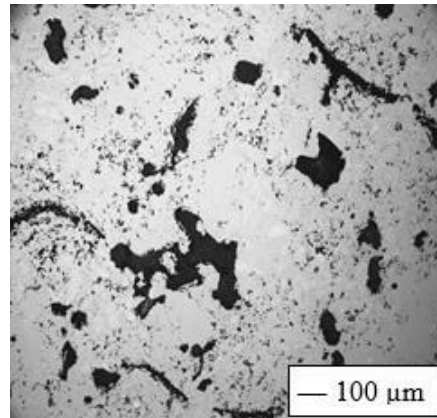
c) katsekeha 4-02



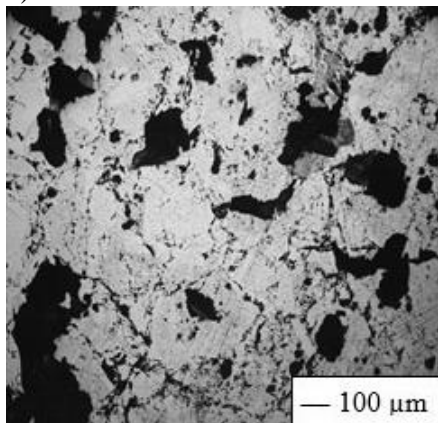
d) katsekeha 4-02 HIP



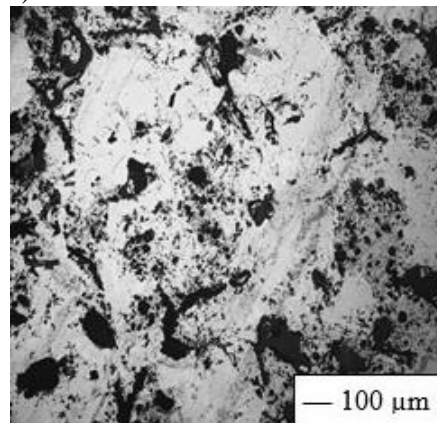
e) katsekeha 4-14



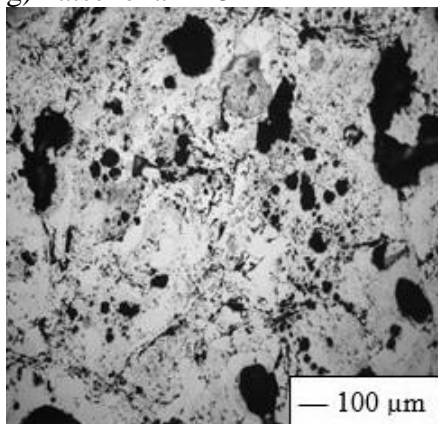
f) katsekeha 4-14 HIP



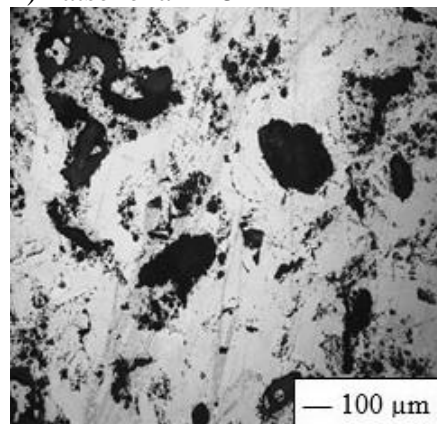
g) katsekeha 4-15



h) katsekeha 4-15 HIP



i) katsekeha 4-16



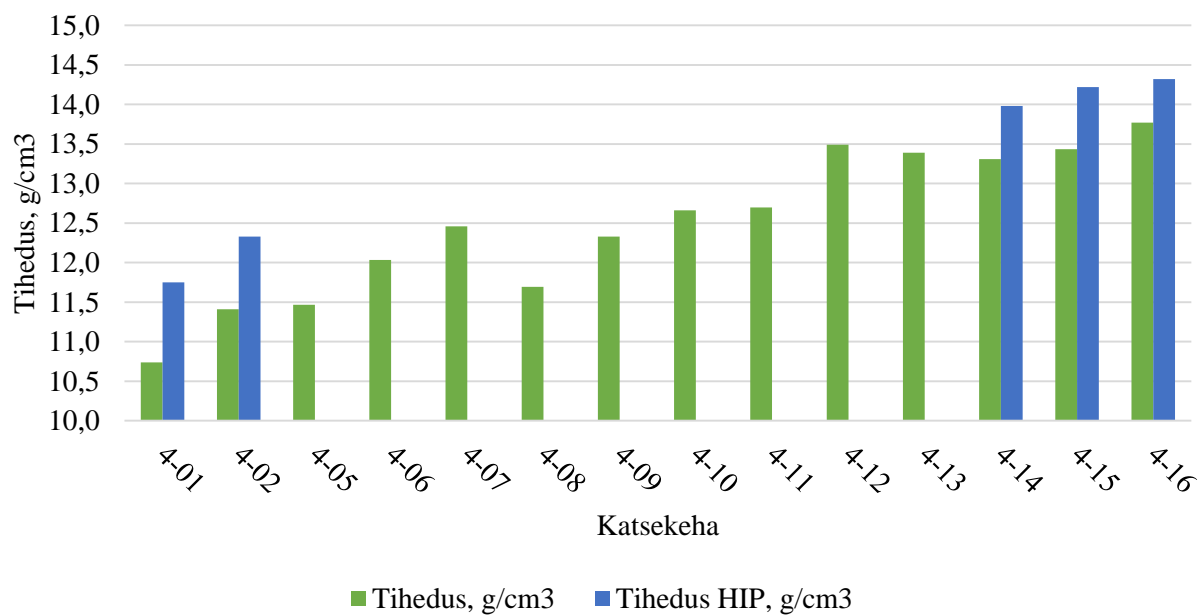
j) katsekeha 4-16 HIP

Sele 4.22 Katseseeria nr. 4 katsekehade mikrostruktuuride sõltuvus printimisparameetritest:

a) PD = 10 μm, ET = 25 μs, I = 1,5 A, kihte = 1; b) PD = 10 μm, ET = 25 μs, I = 1,5 A, kihte = 1, HIP; c) PD = 10 μm, ET = 25 μs, I = 1,5 A, kihte = 2; d) PD = 10 μm, ET = 25 μs, I = 1,5 A, kihte = 2, HIP; e) PD = 10 μm, ET = 75 μs, I = 2,5 A, kihte = 1; f) PD = 10 μm, ET = 75 μs, I = 2,5 A, kihte = 1, HIP; g) PD = 10 μm, ET = 75 μs, I = 2,5 A, kihte = 2; h) PD = 10 μm, ET = 75 μs, I = 2,5 A, kihte = 2, HIP; i) PD = 10 μm, ET = 75 μs, I = 2,5 A, kihte = 3; j) PD = 10 μm, ET = 75 μs, I = 2,5 A, kihte = 3, HIP



Piltidel on näha, et järelpaagutatud katsekehade mikrostruktuur on osadel juhtudel tunduvalt paranenud, kuid siiski esineb suhteliselt palju poore. All olevas graafikus (Sele 4.23) on välja toodud nii paagutatud kui paagutamata katsekehade tihedused. Graafikust on näha, et katsekehade paagutamine tõstis detailide tihedust kuni 1,02 ühikut (7,1 %) ning mida väiksem oli tihedus eelnevalt seda rohkem tihedus paranes. Saadud tiheduste väärtuseid ei saa võtta tõelistena, kuna mikroskoobiga tehtud pildid näitavad selgelt, et detailide tihedused ei ole nii suured, kui katsetulemuste väärtused seda näitavad. Sellest lähtuvalt võib eeldada, et katsekehade lasersulatus käigus on materjalist eraldunud kergemat sideainet – koobaltit.



Sele 4.23 Katseseeria nr. 4 tihedused enne ja pärast HIPi

Neljanda katse tulemusena võib öelda, et kuigi detailide mitmekordne sulatamine andis teatud tiheduse kasvu ei olnud tiheduse paranemine siiski märkimisväärselt suur (3,2 %). Märkimisväärset tiheduse tõusu annab lasersulatatud detailide järelpaagutus HIP ahjus. Järelpaagutatud katsekehade tihedus suurenes kuni 7,1 %. Pooride vähenemist oli näha ka katsekehade mikrostruktuuridelt.

## 4.6 Lasersulatusparameetrite katseseeria number 5

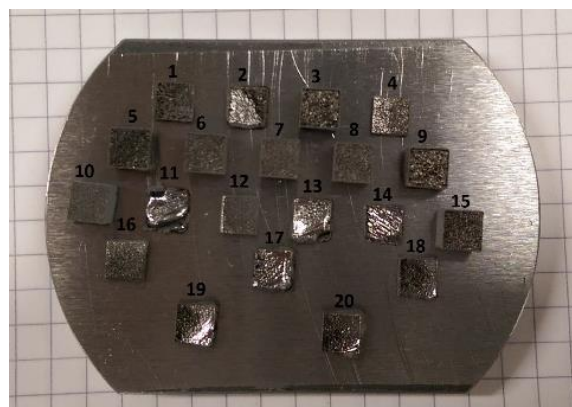
Vaadates eelmiste katsete tulemusi, saab teha järelduse, et tiheduste väärtuseid ei saa koobalti võimaliku välja aurustumise tõttu võtta tõelistena. Tulemusi tuleks ennekõike hinnata mikrostruktuuri piltide põhjal. Viimasest lähtuvalt valiti 5. katseseeria fookuskauguseks 8,5 mm (väikseim sulatustäpp), sest mikrostruktuuri pildid 2. katseseeria juures olid

lootustandvamad, kui katseseeriade 3 ja 4 puhul. Lisaks oli katseseeria nr. 2 puhul suur lõpuni printimise protsentuaalne väärtus (80 %).

Katseseeria juures proovitakse katsekehade kahekordset lasersulatust selliselt, et teine sulatus teostatakse 50 % vähendatud laseri võimsusega. Nimetatud lähenemine peaks vähendama materjalis tekkivaid sisepingeid ning sellest lähtuvalt ära hoidma pragude tekkimise [30]. Printimise parameetrid on valitud arvesse võttes eelnevaid katsetulemusi ning vahemikud on näha all olevas tabelis (Tabel 4.9) kõik parameetrid on nähtavad lisas (Lisa 4.5). Kokku on viiendas katseseerias printimisel 20 katsekeha.

Kahekümnest parameetrist õnnestus lõpuni printida 8 katsekeha. Tähendades, et lõpuni prinditi 40 % katsekehades, andes senistest katseseeriatest selgelt kõige madalama protsentuaalse lõpuni printimise väärtuse. Lõpuni prinditud katsekehade sulatusajad olid vahemikus 50-100  $\mu$ s, punktikaugused 10-30  $\mu$ m ja voolutugevused 1,5-4 A. Parameetrite ja lõpuni printimise seosed on välja toodud graafikutel (Sele 4.24 ja 4.25). Graafikutelt on näha, et enamus lõpuni prinditud katsekehadel oli madal voolutugevus ning skaneerimiskiirus.

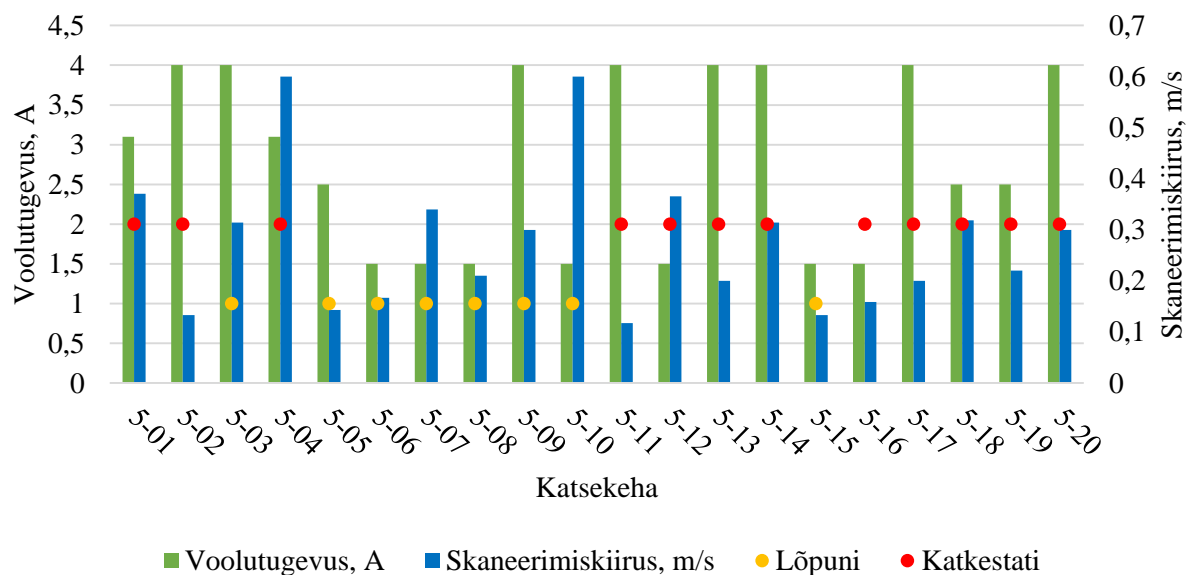
Põhjused, et esimesel katseprintimisel fookuskauguse 8,5 mm juures tuli katkestada vaid 4 katsekeha (lõpuni printimise protsentuaalne väärtus oli 80 %), uuriti uuesti seadmesse sisestatud parameetreid ning avastati teatud erinevused, suurimaks neist võib pidada välise kihi eraldi sulatamise kaotamist. Viimast võib pidada üheks põhjuseks, miks õnnestumise protsent oli madal. Teiseks põhjuseks võib pidada suurt energia intensiivsust, sest antud katseseeria puhul on kasutusel väiksem sulatustäpi suurus, kui 4. katseseeria korral. Viimane tähendab, et laser sulatab korraka väiksemat kogust materjali ehk energiatihedus pindala kohta on suurem, kui 4. katseseeria puhul. Pilt katsekehadest on toodud all oleval pildil (Sele 4.26) .



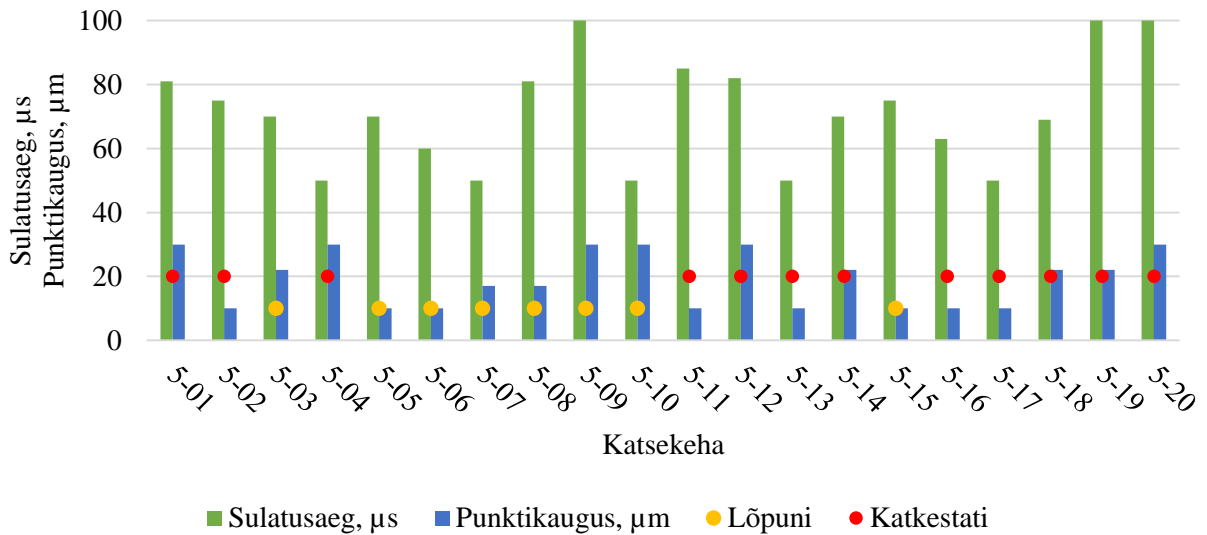
Sele 4.26 Katseseeria nr. 5 katsekehad

Tabel 4.9 Katseseeria nr. 5 parameetrite vahemikud

Parameeter	Vahemik
Punktikaugus, $\mu\text{m}$	10-30
Sulatusaeg, $\mu\text{s}$	50-100
Voolutugevus, A	1,5-4,0
Skaneerimiskiirus, m/s	0,13-0,60
Kahekordne ülesulatus, voolutugevus	100 % + 50 %
Energiatihedus, $\text{J}/\text{mm}^3$	24-326
Fookuskaugus, mm	8,5
Kihi paksus, $\mu\text{m}$	25
Platvormi temperatuur, $^{\circ}\text{C}$	200
Keskkond	Argoon

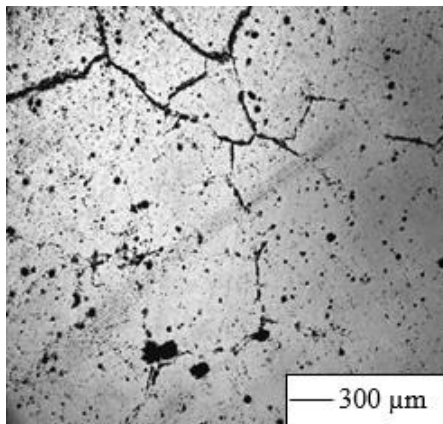


Sele 4.24 Katseseeria nr. 5 skaneerimiskiiruse ja voolutugevuse vaheline lõpuni printimise seos

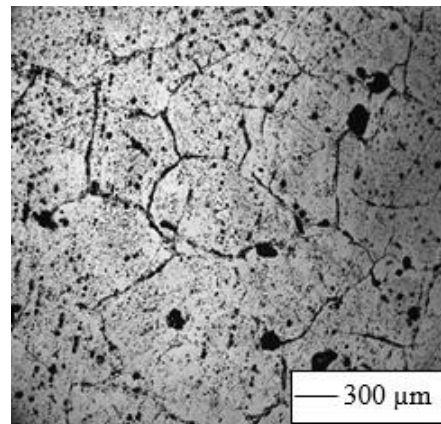


Sele 4.25 Katseseeria nr. 5 sulatusaja, punktikauguse ja voolutugevuse vaheline lõpuni printimise seos

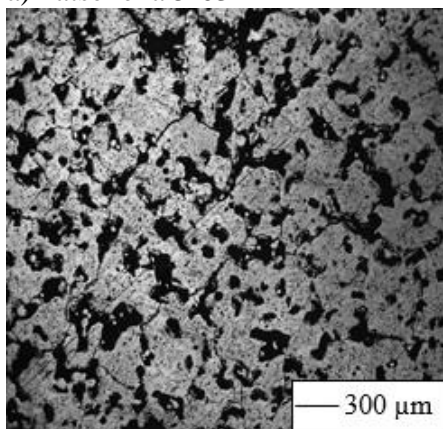
Tulemuste hindamiseks tehti igast katsekehast mikrostruktuuri pildid, suurema pinna korraga hindamiseks teostati pildid 50-ne kordse suurendusega (Sele 4.27).



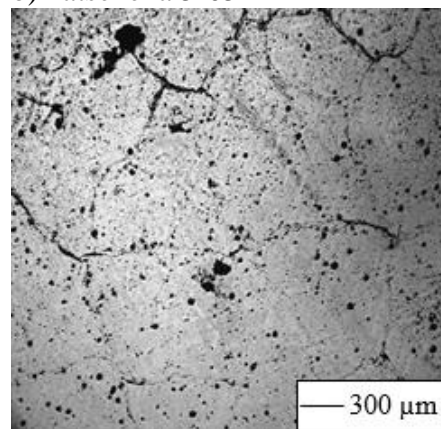
a) katsekeha 5-03



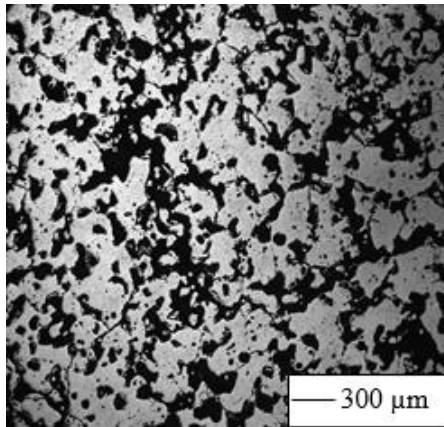
b) katsekeha 5-05



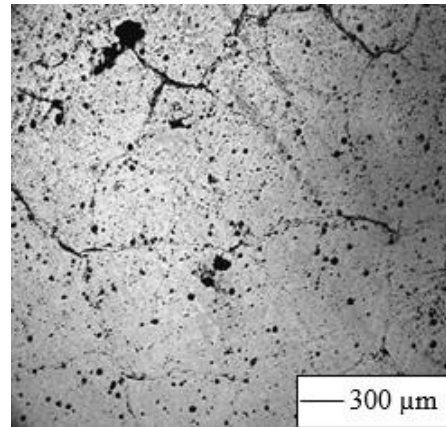
c) katsekeha 5-06



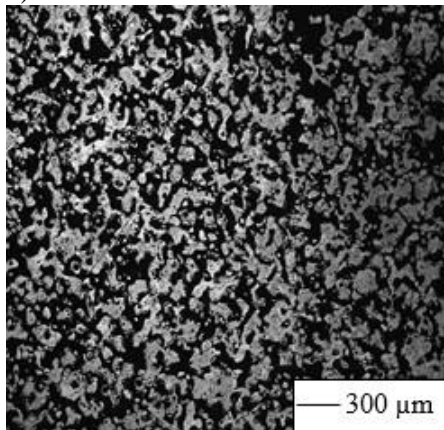
d) katsekeha 5-07



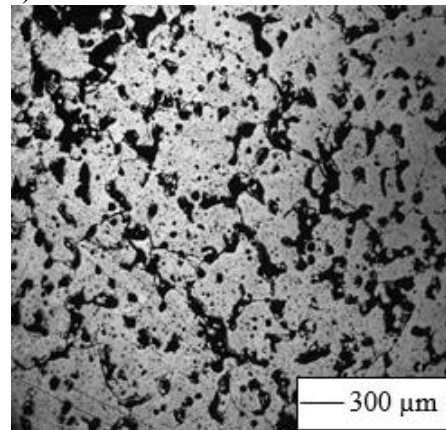
e) katsekeha 5-08



f) katsekeha 5-09



g) katsekeha 5-10



h) katsekeha 5-15

Sele 4.27 Katseseeria nr. 5 katsekehade mikrostruktuuride sõltuvus printimisparameetritest: a) PD = 22  $\mu\text{m}$ , ET = 70  $\mu\text{s}$ , I = 4 A; b) PD = 10  $\mu\text{m}$ , ET = 70  $\mu\text{s}$ , I = 2,5 A; c) PD = 10  $\mu\text{m}$ , ET = 60  $\mu\text{s}$ , I = 1,5 A; d) PD = 17  $\mu\text{m}$ , ET = 50  $\mu\text{s}$ , I = 1,5 A; e) PD = 17  $\mu\text{m}$ , ET = 81  $\mu\text{s}$ , I = 1,5 A; f) PD = 30  $\mu\text{m}$ , ET = 100  $\mu\text{s}$ , I = 4 A; g) PD = 30  $\mu\text{m}$ , ET = 50  $\mu\text{s}$ , I = 1,5 A; h) PD = 10  $\mu\text{m}$ , ET = 75  $\mu\text{s}$ , I = 1,5 A

Piltidel on näha, et ühegi katsekeha mikrostruktuur ei ole hea, kuid antud katsekehadest võib parimateks pidada 5-03 ja 5-09. Nimetatud katsekehade puhul oli mõlemal skaneerimiskiirus 0,3 m/s ja voolutugevus 4 A. Selgelt on näha, et katsekehadel on läbivaid pragusid. Seega võib öelda detaili üle sulatamine poole väiksema laseri võimsusega oodatud tulemust ei andnud. Võib väita, et katseprintimine number 5 andis senistest printimistest kõige kehvema tulemuse, sest lõpuni õnnestus printida kõige väiksem kogus katsekehi ja neist ükski ei omanud lootust andvat mikrostruktuuri. Viienda katseseeria katsekehade tihedusi ei mõõdetud.

## 4.7 Lasersulatusparameetrite katseseeria number 6

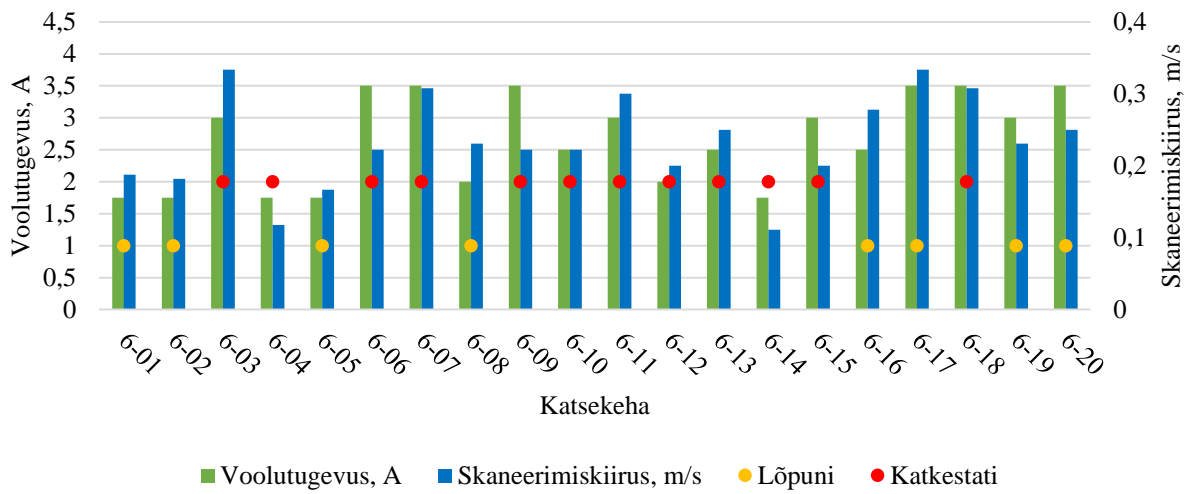
Katseparameetrid valiti eelnevatele katsetulemustele toetudes, kusjuures sulatusaegade vahemikuks valiti 45-90  $\mu$ s, punktikauguse vahemikuks 10-20  $\mu$ m ja voolutugevuse vahemikuks 1,75-3,5 A (Tabel 4.10). Täpsemalt on parameetrid toodud lisa (Lisa 4.6). Lisaks katsekuubikutele prooviti antud katseseeria käigus lasersulatada ka õhukese seinapaksusega torusid. Torude seinapaksused olid vahemikus 0,2-0,5 mm ning torude kõrguseks oli 5 mm. Torude parameetrid valiti samad, mis eelmise testi katsekehal 5-09 (sulatusaeg 100  $\mu$ s, punktikaugus 30  $\mu$ m ja voolutugevus 4 A).

Tabel 4.10 Katseseeria nr. 6 parameetrite vahemikud

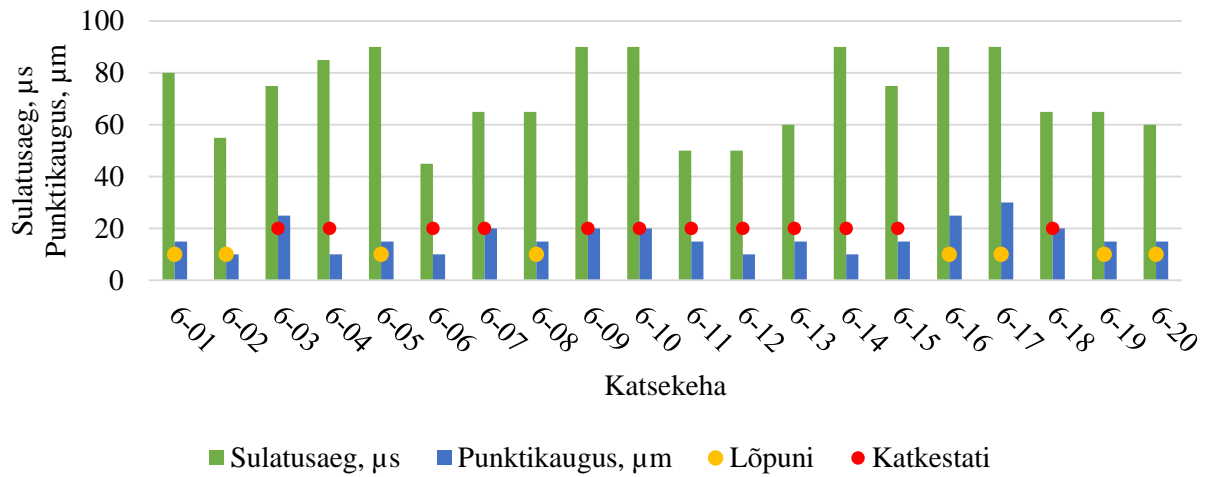
Parameeter	Vahemik
Punktikaugus, $\mu$ m	10-30
Sulatusaeg, $\mu$ s	50-100
Voolutugevus, A	1,5-4,0
Skaneerimiskiirus, m/s	0,13-0,60
Kahekordne ülesulatus, voolutugevus	100 % + 50 %
Energiatihedus, J/mm <sup>3</sup>	24-326
Fookuskaugus, mm	8,5
Kihi paksus, $\mu$ m	25
Platvormi temperatuur, °C	200
Keskkond	Argoon

20-nest parameetrist prinditi lõpuni 8 katsekeha (lõpuni printimise protsentuaalne väärtus 40 %). Kuna katseseeriad nr. 5 ja 6 toimusid väikese ajavahemiku jooksul, võib ka antud katse juures pidada madala lõpuni printimise protsentuaalse väärtuse põhjuseks välise kihi eraldi sulatamise kaotamist. Graafikutel (Sele 4.28 ja 4.29) on välja toodud parameetrite lõpuni printimise seosed. Lõpuni teostatud katsekehade punktikaugused olid 10-30  $\mu$ m, sulatusajad 55-90  $\mu$ s ja voolutugevused 1,75-3,5 A. Mainitud vahemikud hõlmavad praktiliselt kogu katseseeria vahemikke. Printimisprotsessi jälgides täheldati, et materjali kasvamine, mis põhjustab katsekeha printimise peatamist, oli tunduvalt suurem diagonaalset lasersulatust teostades. Sulatusel X või Y telje suunas kasvamist praktiliselt ei esinenud. Torudest olid kõik peale minimaalse seinapaksusega alt katkised. All oleval pildil (Sele 4.30) on näidatud plastikusse pandud katsekehad ning järgneb pilt kahest alt katkisest torust (Sele 4.31) (töölaualt

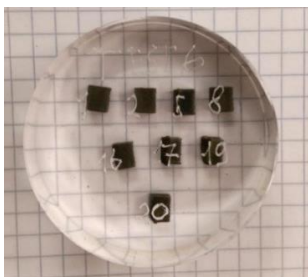
eemaldades läks katki ka 0,2 mm seinapaksusega toru, toru oli kõvasti tööalusel kinni ning materjal on habras).



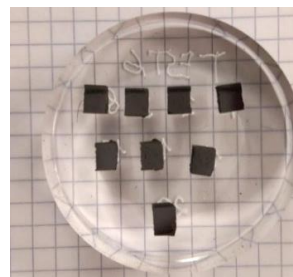
Sele 4.28 Katseseeria nr. 6 skaneerimiskiiruse ja voolutugevuse lõpuni printimise seos



Sele 4.29 Katseseeria nr. 6 sulatusaja ja punktikauguse lõpuni printimise seos

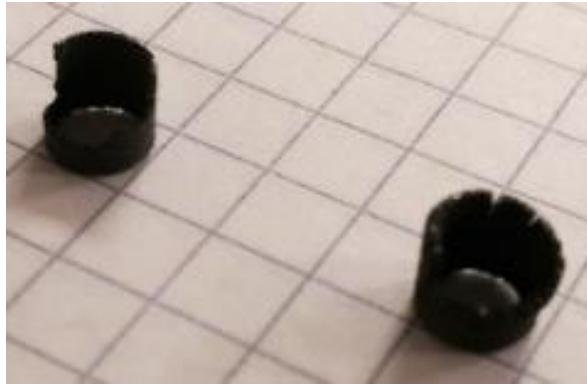


a)



b)

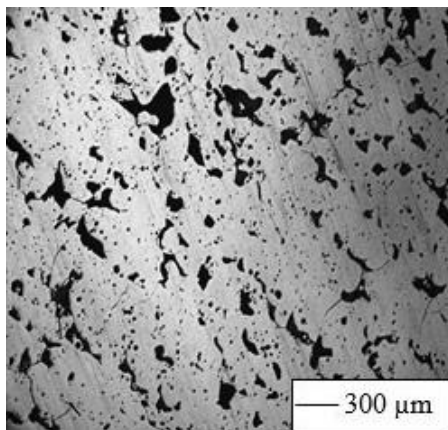
Sele 4.30 Katseseeria nr. 6 plastikusse pandud katsekehad: a) katsekehade numbrid, b) lihvitud katsekehad



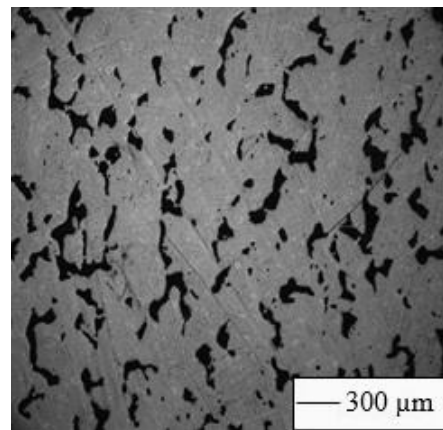
Sele 4.31 Vasakul 0,2 mm seinapaksusega toru ning vasakul 0,4 mm seinapaksusega toru

Kuuenda katseseeria detailid valati plastikusse võrreldes eelmiste katsekehadega erinevalt. Eelnevate katsekehade puhul lihviti katsekehade otspindu, kuid seekord lihviti detailide külgpindu. Külgpindade lihvimine peaks näitama kas kihtide kasvades toimub materjali tihedust arvesse võttes muutusi.

Katsekehad lihviti ning tehti mikrostruktuuri pildid. Seejärel katsekehad eemaldati plastikust ning detailidele teostati järelpaagutus, katsekehad 6-16, 6-19 ja 6-20 purunesid plastikust eemaldades, seetõttu neid järelpaagutada ei õnnestunud. Järgneval pildil on toodud detailid enne ja peale järelpaagutust 50-ne kordse suurendusega (Sele 4.32).

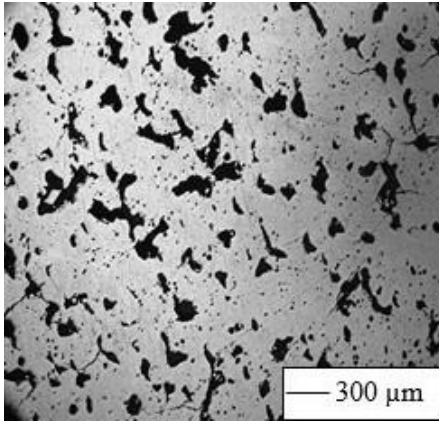


a) katsekeha 6-01

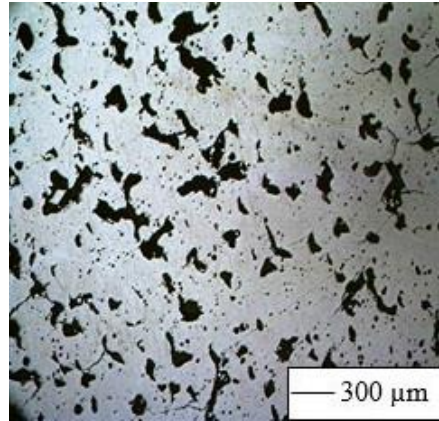


b) katsekeha 6-01 HIP

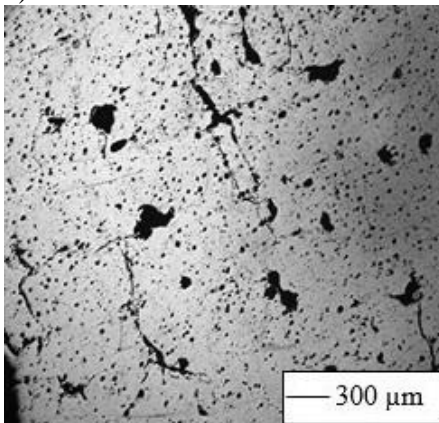




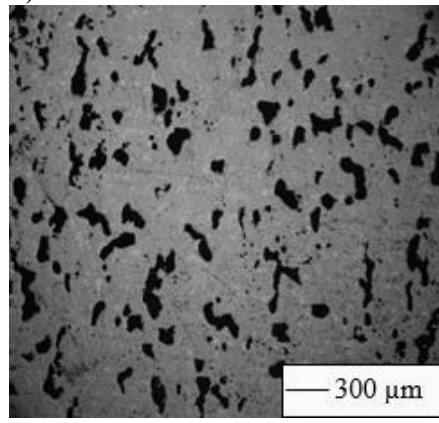
c) katsekeha 6-02



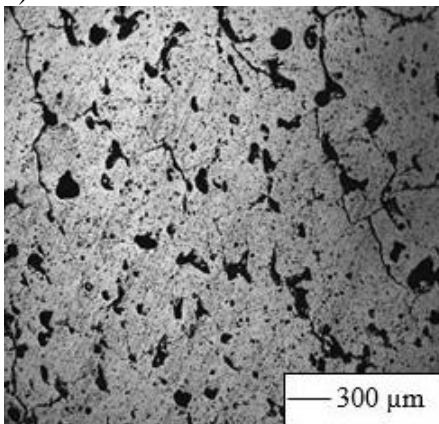
d) katsekeha 6-02 HIP



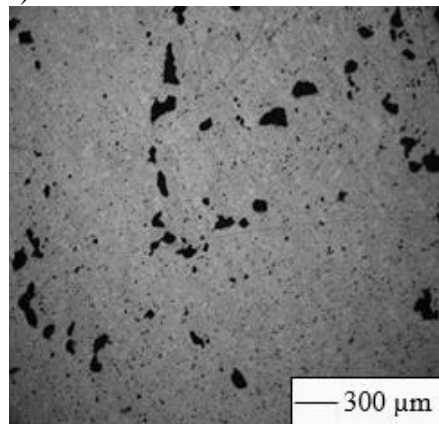
e) katsekeha 6-05



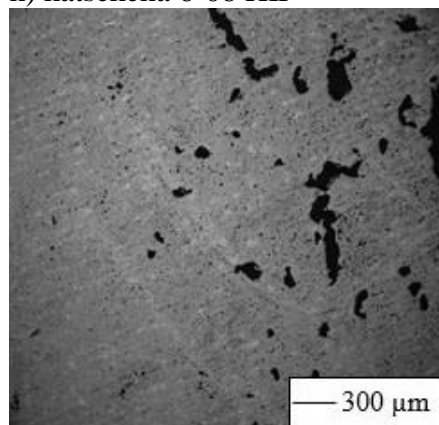
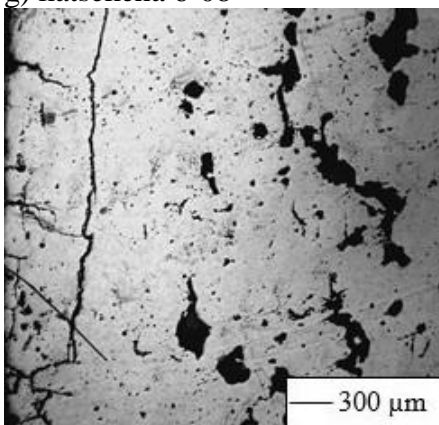
f) katsekeha 6-05 HIP



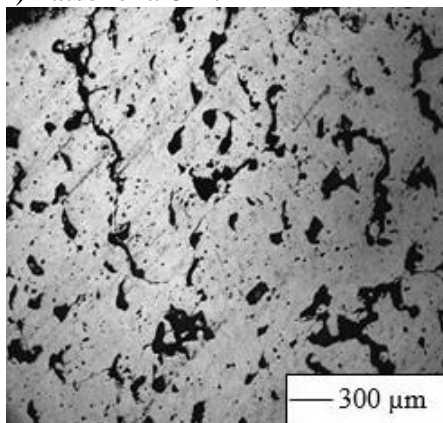
g) katsekeha 6-08



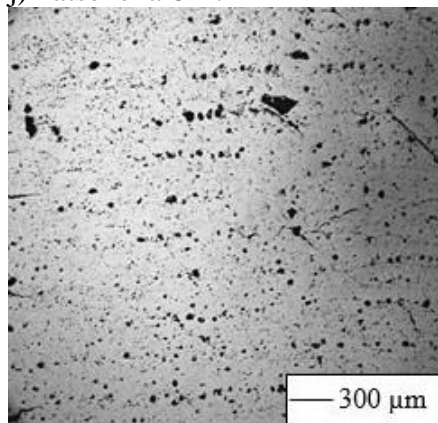
h) katsekeha 6-08 HIP



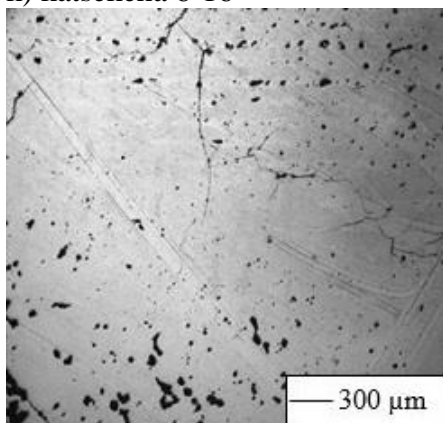
i) katsekeha 6-17



j) katsekeha 6-17 HIP



k) katsekeha 6-16



l) katsekeha 6-19

m) katsekeha 6-20

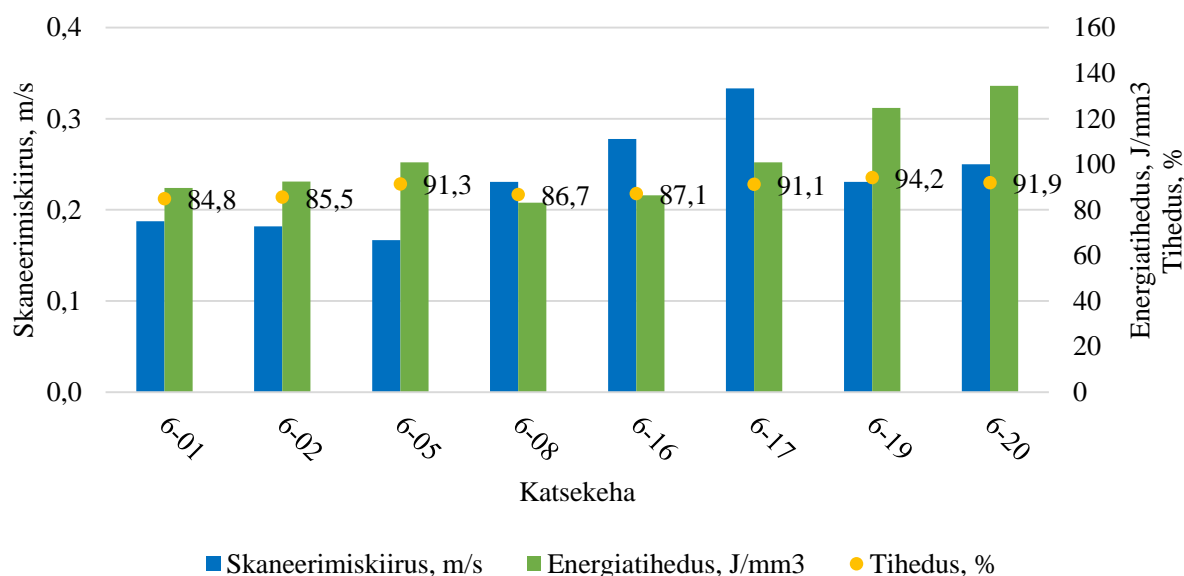
Sele 4.32 Katseseeria nr. 6 katsekehade mikrostruktuuride sõltuvus printimisparameetritest:  
a) PD = 15  $\mu\text{m}$ , ET = 80  $\mu\text{s}$ , I = 1,75 A; b) PD = 15  $\mu\text{m}$ , ET = 80  $\mu\text{s}$ , I = 1,75 A, HIP; c) PD = 10  $\mu\text{m}$ , ET = 55  $\mu\text{s}$ , I = 1,75 A; d) PD = 10  $\mu\text{m}$ , ET = 55  $\mu\text{s}$ , I = 1,75 A, HIP; e) PD = 15  $\mu\text{m}$ , ET = 90  $\mu\text{s}$ , I = 1,75 A; f) PD = 15  $\mu\text{m}$ , ET = 90  $\mu\text{s}$ , I = 1,75 A, HIP; g) PD = 15  $\mu\text{m}$ , ET = 65  $\mu\text{s}$ , I = 2 A; h) PD = 15  $\mu\text{m}$ , ET = 65  $\mu\text{s}$ , I = 2 A, HIP; i) PD = 30  $\mu\text{m}$ , ET = 90  $\mu\text{s}$ , I = 3,5 A; j) PD = 30  $\mu\text{m}$ , ET = 90  $\mu\text{s}$ , I = 3,5 A, HIP; k) PD = 25  $\mu\text{m}$ , ET = 90  $\mu\text{s}$ , I = 2,5 A; l) PD = 15  $\mu\text{m}$ , ET = 65  $\mu\text{s}$ , I = 3 A; m) PD = 15  $\mu\text{m}$ , ET = 60  $\mu\text{s}$ , I = 3,5 A

Mikrostruktuuri piltidelt on näha, et järelpaagutus parandab detailide mikrostruktuuri märkimisväärselt. Katsekehade 6-08 ja 6-17 järelpaagutatud mikrostruktuuri pilte võib pidada võrreldes eelmiste tulemustega heaks. All olevas tabelis (Tabel 4.11) on välja toodud katsekehade tihedused enne ja peale paagutust.

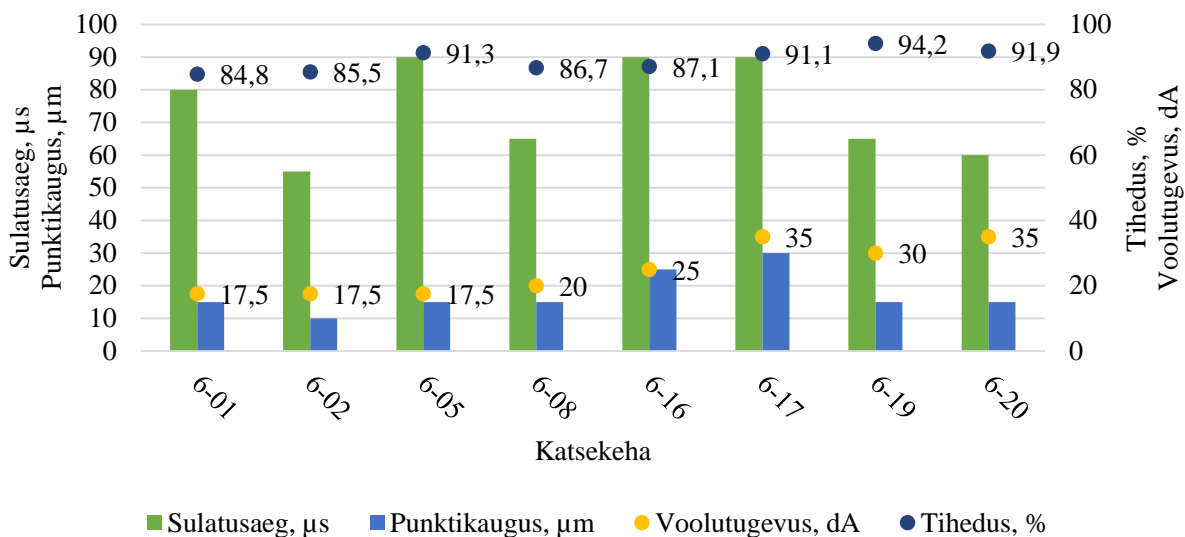
Tabel 4.11 Test nr. 6 tihedused enne ja peale paagutust

Katsekeha	Tihedus, g/cm <sup>3</sup>	Tihedus, %	Tihedus HIP, g/cm <sup>3</sup>	Tihedus HIP, %
6-01	12,1 ±0,2	84,8	12,5 ±0,1	87,1
6-02	12,2 ±0,1	85,5	12,6 ±0,1	87,7
6-05	13,1 ±0,1	91,3	13,1 ±0,1	91,5
6-08	12,4 ±0,1	86,7	14,0 ±0,2	97,6
6-16	12,5 ±0,2	87,1		
6-17	13,0 ±0,1	91,1	14,1 ±0,1	98,3
6-19	13,5 ±0,1	94,2		
6-20	13,2 ±0,1	91,9		

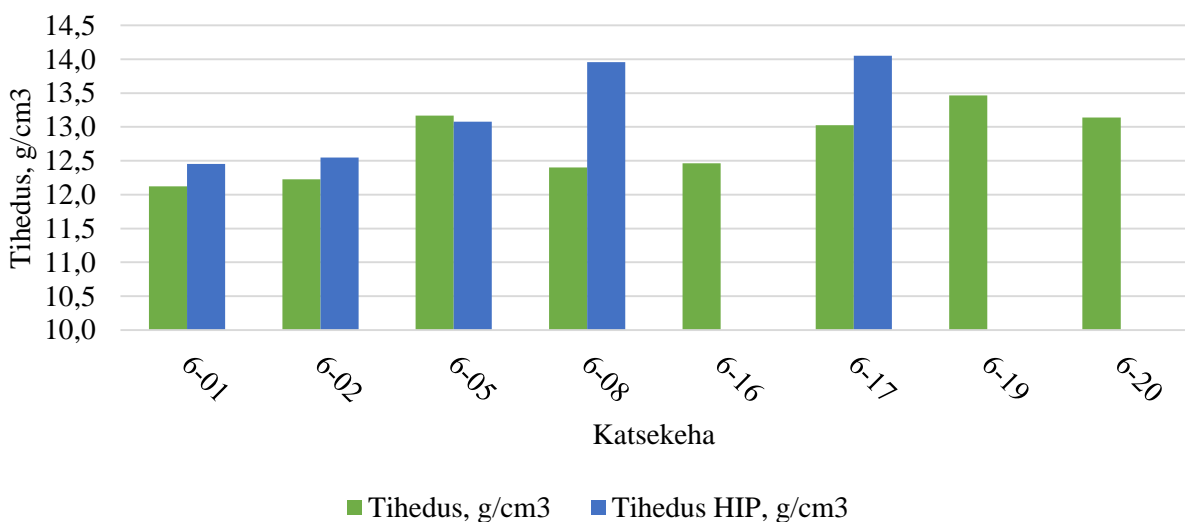
Mikrostruktuur piltidelt välja valitud katsekehad 6-08 ja 6-17 omavad ka tiheduse tabelis kõrgemaid väärtuseid - vastavalt 97,6 % ja 98,3 %. Antud katsekehade printimisparameetrid on täiesti erinevad ning mingit seost nende vahel tuua on väga raske. Parameetrite mõju paremaks hindamiseks on seletuskirja lisatud graafikud (Sele 4.33-4.35).



Sele 4.33 Katseseeria nr. 6 energiatiheduse, skaneerimiskiiruse ja tiheduse omavaheline seos



Sele 4.34 Katseseeria nr. 6 sulatusaja, punktikauguse, voolutugevuse ja tiheduse omavaheline seos



Sele 4.35 Katseseeria nr. 6 tiheduste võrdlus enne ja pärast HIPi

Graafikutele toetudes saab välja tuua juba eelnevalt korduva informatsiooni. Üldjuhul annab tiheduse vallas paremaid tulemusi suur energiatihedus. Suur energia tihedus tähendab, et kasutusel on suhteliselt kõrge voolutugevus ning madal skaneerimiskiirus. Katsekehade järelpaagutus parandas detailide tihedust märgatavalt. Katsekeha 6-08 puhul paranes tihedus 10,9 %. Katseseeria nr. 6 tulemusena saab väita, et WC-12Co lasersulatamine fookuskauguse 8,5 mm juures koos järelpaagutusega HIP ahjus annab lootustandvaid tulemusi.

## 4.8 Lasersulatusparameetrite katseseeria number 7

Eelnevatele katsetulemustele tuginedes otsustati katseseeria nr. 7 teostada 8,5 mm fookuskauguse juures (väikseim sulatustäpi suurus) ning kasutati ainult ühte voolutugevust (2 A). Kindla voolutugevuse valiku põhjuseks oli sulatusaja ja punktikauguse mõjule parema hinnangu andmise soov. Katse juures lisati detailidele tagasi raamistiku eraldi sulatamine ning kaotati ära diagonaalis lasersulatus, mis tähendab, et kihi sulatamised toimuvad ainult X ja Y suunal. Materjali sisepingete vähendamiseks proovitakse kasutada suurendatud katsekehi (7x7x5 risttahukas). Kolmel katsekehal prooviti kasutada ka nii öelda eelsoojendust ehk kihi kahekordset lasersulatus, kuid seekord algselt madalama laseri võimsusega (50 % + 100 %).

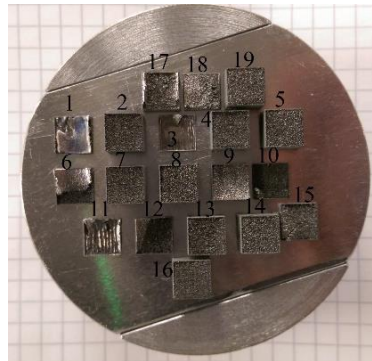
Katse parameetrite vahemikud on välja toodud all olevas tabelis (Tabel 4.12) ning kõik parameetrid on nähtavad lisas (Lisa 4.7). Seitsmenda katseseeria käigus prinditi kokku 19 katsekeha. Katsekehadel 7-17, 7-18 ja 7-19 kasutati eelsoojendamist.

Tabel 4.12 Katseseeria nr. 7 parameetrite vahemikud

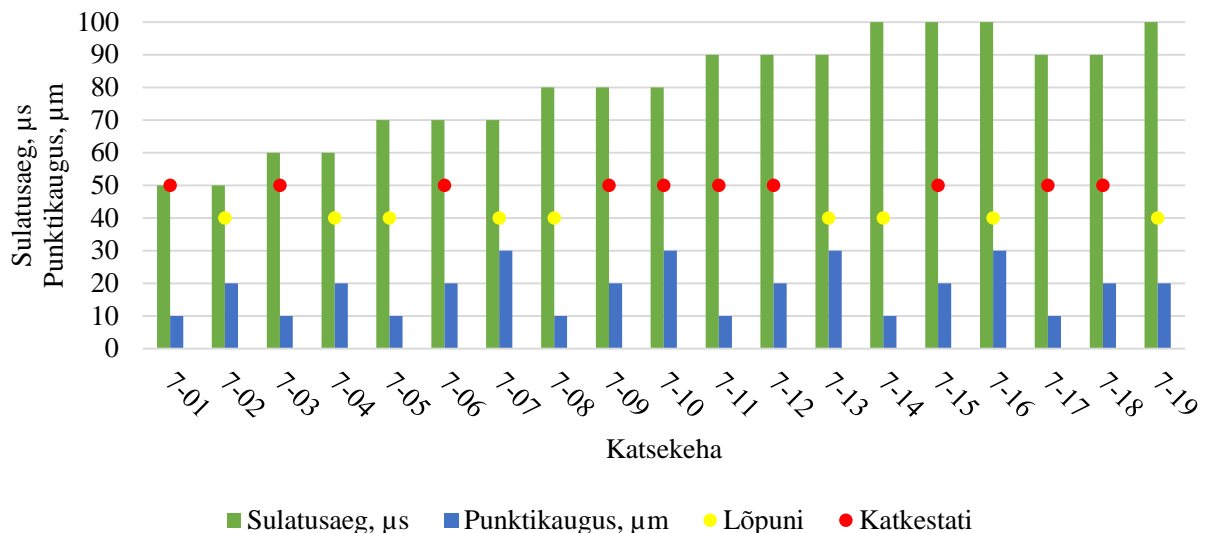
<b>Parameeter</b>	<b>Vahemik</b>
Punktikaugus, $\mu\text{m}$	10-30
Sulatusaeg, $\mu\text{s}$	50-100
Voolutugevus, A	2
Skaneerimiskiirus, m/s	0,10-0,4
3 katsekeha eelsoojendati, voolutugevus	50 % + 100 %
Energiatihedus, $\text{J}/\text{mm}^3$	49-192
Fookuskaugus, mm	8,5
Kihi paksus, $\mu\text{m}$	25
Platvormi temperatuur, $^{\circ}\text{C}$	200
Keskkond	Argoon

Lõpuni prinditi 9 katsekeha (lõpuni printimise protsentuaalne väärtus 47%). Eelsoojendatud katsekehast õnnestus lõpuni teostada vaid katsekeha 7-19. Mainimist väärib asjaolu, et parameetrid mis eelnevate katsete puhul olid toimunud ei töötanud ja vastupidi. Näiteks teise katseseeria juures töötanud sulatusaeg 50  $\mu\text{s}$ , punktikaugus 10  $\mu\text{m}$  ja voolutugevus 2 A andis tiheduse 94 % (katsekeha 2-02), kuid antud katseseeria puhul tuli samade parameetritega detaili printimine katkestada. Teise katseseeria juures peatada tulnud detailid 2-18 ja 2-19 (sulatusaeg 100  $\mu\text{s}$  ja punktikaugus 10  $\mu\text{m}$ , voolutugevus 2 A) omasid, aga samu parameetreid, mis antud

katseseeria detail 7-14, mis seekord õnnestus lõpuni printida. Lõpuni prinditud katsekehad on näha all oleval pildil (Sele 4.36) ning parameetrite ja lõpuni printimise seos pildile järgneval graafikul (Sele 4.37).

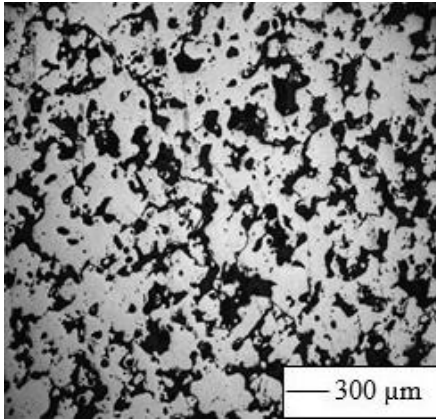


Sele 4.36 Katseseeria nr. 7 katsekehad

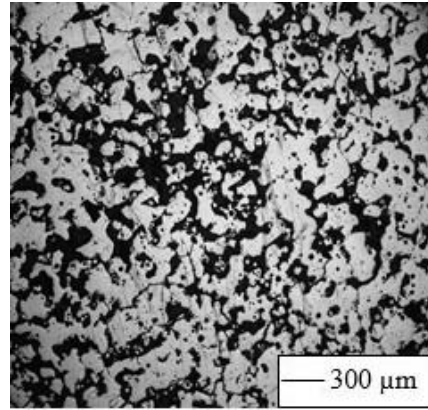


Sele 4.37 Katseseeria nr. 7 sulatusaja ja punktikauguse seos katsekehade lõpuni printimisel

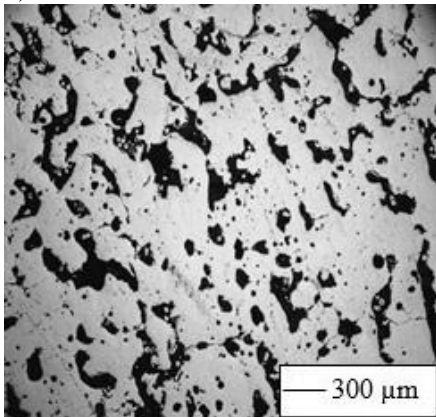
Katsekehadele parema hinnangu andmiseks tehti neist mikroskoobi abil pildid ning mõõdeti tihedused (Sele 4.38) (Tabel 4.13). Piltide suurendus on 50-ne kordne. Kahjuks antud katsekehi ei õnnestunud järelepaagutada, sest plastikust eemaldamise käigus detailid purunesid. Põhjuseks katsekehade suur haprus ning suurem kontaktpind plastikkattega kui väiksematel katsedetailidel, mis muutus detailide plastikust eemaldamise väga keeruliseks.



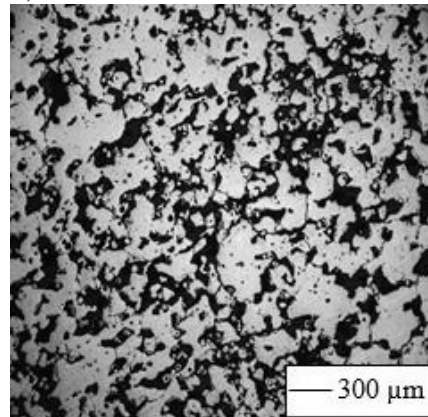
a) katsekeha 7-02



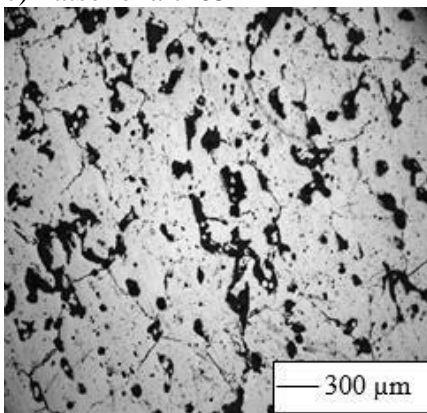
b) katsekeha 7-04



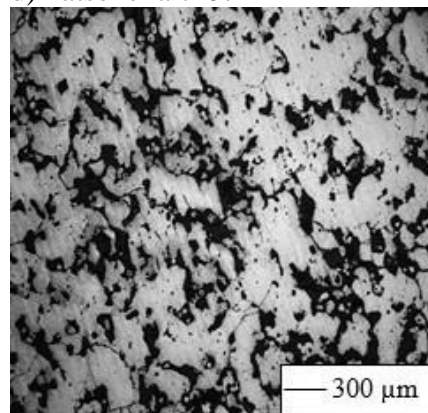
c) katsekeha 7-05



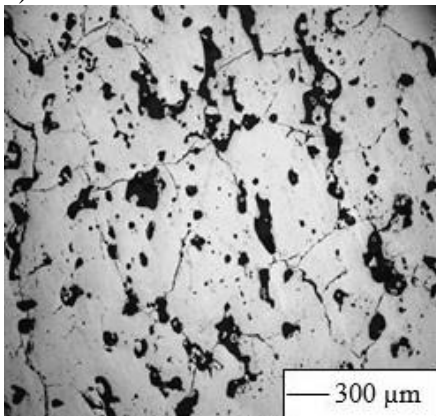
d) katsekeha 7-07



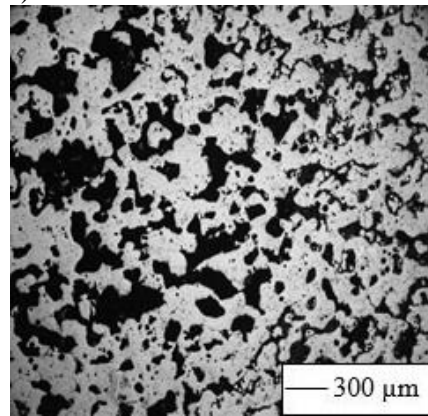
e) katsekeha 7-08



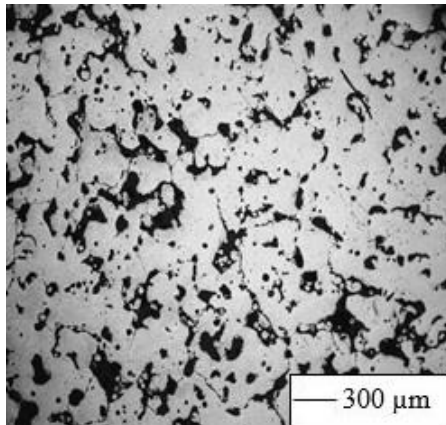
f) katsekeha 7-13



g) katsekeha 7-14



h) katsekeha 7-16



i) katsekeha 7-19

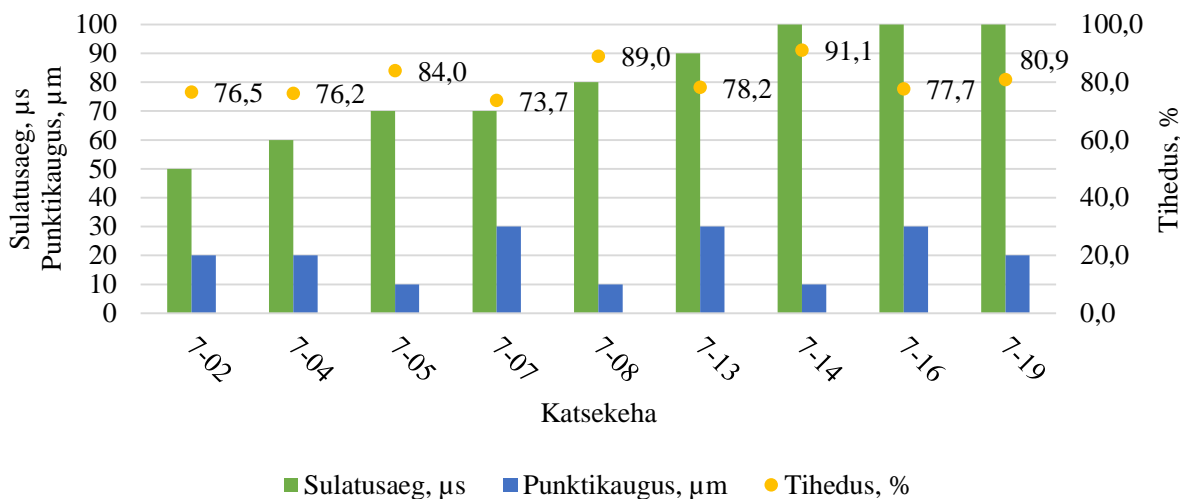
Sele 4.38 Katseseeria nr. 7 katsekehade mikrostruktuuride sõltuvus printimisparameetritest  $I = 2 \text{ A}$ : a) PD = 20  $\mu\text{m}$ , ET = 50  $\mu\text{s}$ ; b) PD = 20  $\mu\text{m}$ , ET = 60  $\mu\text{s}$ ; c) PD = 10  $\mu\text{m}$ , ET = 70  $\mu\text{s}$ ; d) PD = 30  $\mu\text{m}$ , ET = 70  $\mu\text{s}$ ; e) PD = 10  $\mu\text{m}$ , ET = 80  $\mu\text{s}$ ; f) PD = 30  $\mu\text{m}$ , ET = 90  $\mu\text{s}$ ; g) PD = 10  $\mu\text{m}$ , ET = 100  $\mu\text{s}$ ; h) PD = 30  $\mu\text{m}$ , ET = 100  $\mu\text{s}$ ; i) PD = 20  $\mu\text{m}$ , ET = 100  $\mu\text{s}$ ,  $I = 1+2 \text{ A}$

Vaadates mikrostruktuuri pilte ja tiheduste väärtuseid, siis ei saa ühtegi katsekeha otseselt välja tuua. Tihedus on suurim katsekehal 7-14 (91 %), kuid pildil on näha siiski suurt poorsust. Võib eeldada, et kui katsekehi oleks võimalik olnud järelepaagutada oleks tulemused olnud paremad, kuid antud katset võib pidada ebaõnnestunuks. Tulemuste piltlikumaks hindamiseks on järgnevalt lisatud graafik (Sele 4.39).

Tabel 4.13 Katseseeria nr. 7 tihedused

Katsekeha	Tihedus, $\text{g/cm}^3$	Tihedus, %
7-02	10,9 $\pm$ 0,1	76,5
7-04	10,9 $\pm$ 0,1	76,2
7-05	12,0 $\pm$ 0,1	84,0
7-07	10,5 $\pm$ 0,1	73,7
7-08	12,7 $\pm$ 0,1	88,9
7-13	11,2 $\pm$ 0,1	78,2
7-14	13,0 $\pm$ 0,2	91,1
7-16	11,1 $\pm$ 0,1	77,7
7-19	11,6 $\pm$ 0,1	80,9





Sele 4.39 Katseseeria nr. 7 sulatusaja ja punktikauguse seos tihedusega

Katseseeria tulemusena saab väita, et suurema pindalaga detailide printimine ei andnud soovitud tulemust sisepingete vähenemises. Jättes laseri võimsuse samaks loodeti selgeks teha, kuidas mõjub sulatusaja ja punktikauguse muutmine ning antud katseseeria puhul andisid parimad tulemused pikk sulatusaeg ja väike punktikaugus (sulatusaeg 90-100 µs ja punktikaugus 10-30 µm). Katsedetailide eelnev soojendamine nõrgema võimsusega töötas kolmest detailist ühel, kusjuures samade parameetrite (sulatusaeg 100 µs ja punktikaugus 20 µm) ning ühekordse sulatusega detaili printimine tuli katkestada.

## 4.9 Tulemuste võrdlus ja analüüs

Töö raames tehti kokku 7 printimist, mille raames katsetati 130 parameetri kombinatsiooni ning saadi 76 katsekeha. Lasersulatused tehti kolme erineva laseritäpi suuruse juures: suur (fookuskagus 12,5 mm), keskmine (fookuskaugus 10,5 mm) ja väike (fookuskaugus 8,5 mm). Kihi paksus oli kõigil printimistel 25 µm ning viirutusvahe 0,1 mm.

Suure sulatustäpiga tehti 1 printimine, mille käigus prooviti 20 parameetri kombinatsiooni. Keskmise sulatustäpi suurusega tehti 2 printimist, mille käigus prooviti 36 parameetri kombinatsiooni. Enim printimisi teostati väikese sulatustäpiga (4), mille käigus prooviti 74 parameetri kombinatsiooni ning lisaks prooviti printida erineva seinapaksusega torusid ja suuremaid katsekehasid.

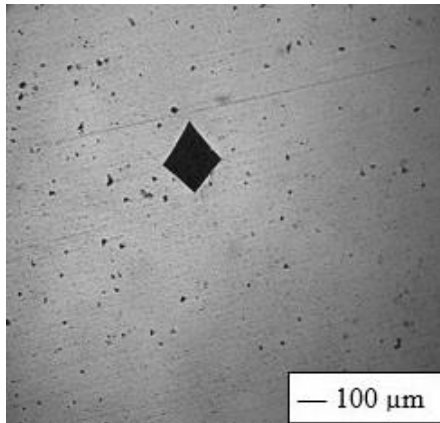
Parameetrite valikul muudeti lisaks sulatustäpi suurusele kolme peamist SLM parameetrit: sulatusaega, punkti kaugust ja laseri võimsust. Sulatusaegu prooviti vahemikus 20-100  $\mu\text{s}$ , punktikauguseid vahemikus 10-50  $\mu\text{m}$  ning voolutugevust vahemikus 1,5-4 A. Lisaks prooviti katsetuste käigus ühe kihi mitmekordset lasersulatust sama laseri võimsuse juures, kahekordset kihi sulatust kasutades teisel sulatusel 50 % vähendatud laseri võimsust ja kihi eelsoojendamist kasutades 50 % väiksemat laseri võimsust esimesel korral.

130-nest parameetrite kombinatsioonist õnnestus katsekeha lõpuni printida 76 juhul, see annab lõpuni printimise protsentuaalseks väärtuseks 58 %. Tähendades, et üle poolte valitud parameetritega õnnestus printimine teostada lõpuni. Katsekeha printimise katkestamise põhjuseks oli materjali ebasobiv kasvamine.

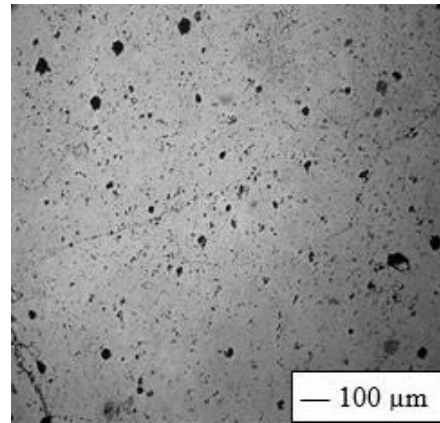
Kokku mõõdeti tihedust 71 katsekehal. Mõõtetulemused jäid vahemikku 70-102 %. Tihedused üle 100 % ei tähenda, et katsetuste käigus õnnestus saada suurema tihedusega materjal kui allikas, vaid seda, et lasersulatuse käigus on eemaldunud sideainet – koobaltit. Keskmine tihedus katsekehadel oli 88 %. Pulbertehnoloogiat kasutades saadud katsekeha tiheduseks mõõdeti 99,8 % olles 14,28  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Näidult suurimad tihedused andsid katsekehad 1-02 ja 1-17 (sulatusaeg 70  $\mu\text{s}$ , punktikaugus 10  $\mu\text{m}$  ja voolutugevus 4 A). Tiheduseks saadi 102 %, arvvaartusega 14,5  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Kümnel katsekehal prooviti tihedust parandada kasutades HIP ahju. Järelepaagutatud katsekehade keskmine tihedus oli 92,8 %. Parim tihedus katsekehal 4-16, kus tiheduseks mõõdeti 100,1 % - arvvaartuseks 14,31  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

16 katsekehal mõõdeti kõvadust. Mõõdetud kõvaduste väärtused olid vahemikus HV30 820-1190 ning keskmine kõvadus oli HV30 1005 näiteks teras S235 puhul ei ole kõvadus suurem kui HV10 350. Pulbertehnoloogiat kasutades valmistatud katsekeha kõvaduseks oli HV30 1340. Lasersulatatud katsekehade mõõdeti suurim kõvadus katsekehal 1-02 – HV30 1190.

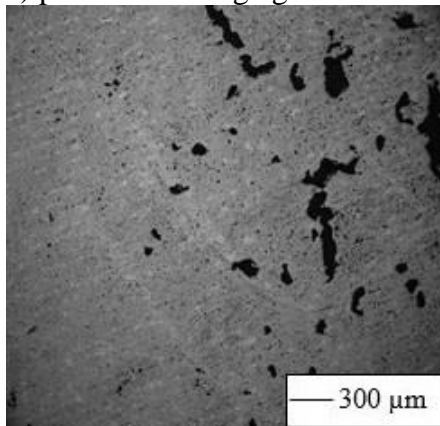
Kõige parem oli saadud tulemusi hinnata vaadates mikrostruktuuri pilte. Erinevaid pilte vaadates võib parimaks katsekehadeks lugeda katsekeha 2-17 (sulatusaeg 68  $\mu\text{s}$ , punktikaugus 21  $\mu\text{m}$  ja voolutugevus 4 A). Katsedetaili tiheduseks mõõdeti 92 % (13,20  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ja kõvaduseks 1050 HV30. Mainimist tasub ka järelepaagutatud katsekeha 6-17 (sulatusaeg 90  $\mu\text{s}$ , punktikaugus 30  $\mu\text{m}$  ja voolutugevus 3.5 A), millel mõõdeti tiheduseks 98 % (14,05  $\text{g}/\text{cm}^3$ ). Mõlemad katsekehad lasersulatati minimaalse sulatustäpiga (fookuskaugus 8,5 mm). Mikrostruktuuride võrdlus on toodud all oleval pildil (Sele 4.40).



a) pulbertehnoloogiaga tehtud katsekeha



b) katsekeha 2-17



c) katsekeha 6-17 HIP

Sele 4.40 Katsekehade mikrostruktuuride sõltuvus printimisparameetritest a) Pulbertehnoloogia abil tehtud katsekeha, b)  $PD = 21 \mu\text{m}$ ,  $ET = 68 \mu\text{s}$ ,  $I = 4 \text{ A}$ ; c)  $PD = 30 \mu\text{m}$ ,  $ET = 90 \mu\text{s}$ ,  $I = 3,5 \text{ A}$

Proovitud 130 parameetri hulgast ei suudetud leida sobivaid, et oleks võimalik valmistada WC-12Co samade mehaaniliste omadustega detaile nagu pulbertehnoloogiast kasutades. Õnnestus printida suhteliselt tihedaid ning tavamaterjalist (nt. terasest) kordades suurema kõvadusega katsekehad, kuid keeruliste detailide printimiseks töö raames sobivaid parameetreid ei leitud, põhjuseks võib olla H.C Starcki pulbri erinevus võrreldes traditsiooniliste SLM pulbriga (Sele 3.8 ja Sele 3.9), nimelt pulbriosakeste poorsus. Antud erinevuse põhjustab pulbrite erinev valmistamise viis (H.C Starck aglomeeritakse ja paagutatakse, aga traditsioonilisi SLM pulbreid valmistatakse pihustades).

## 5. SLM SEADME DETAILIDE MODIFITSEERIMINE

### 5.1 Tööplatvormi modifitseerimine

Traditsiooniline tööplatvorm on seadmel kettakujuline ning kinnitamiseks töökambrisse on kettal M8 keere (Sele 5.1). Platvorm valmistatakse kasutades terast või alumiiniumi, olenevalt printitavast materjalist. Tööplatvormi puhastamiseks printimise jälgedest kasutatakse standardmaterjalide (teras, alumiinium) korral treimist, kuid kuna WC-Co treimine, materjali kõvaduse tõttu oli laboris raskendatud tuli välja töötada uus platvorm. Eesmärk oli välja töötada platvorm, mida oleks võimalik puhastada kasutades lihvimismasinat, kettakujulise platvormi kinnitamine lihvimis seadmesse on raskendatud.



a)



b)

Sele 5.1 Standardplatvorm, a) pealt vaade, b) külgvaade

#### 5.1.1 Platvormi nõuded

Platvormi konstrueerimisel võeti arvesse originaalplatvormi diameetrit, kasutatavat kinnitust ning uue platvormi tööplaadi kinnitamise võimalust lihvimisseadmesse (Tabel 5.1). Platvormi kõrgus väga suurt tähtsust ei oma, sest platvormi kõrgust SLM 50 seadmes on võimalik reguleerida. Tööplatvormi materjaliks WC-Co printimiseks valiti teras.

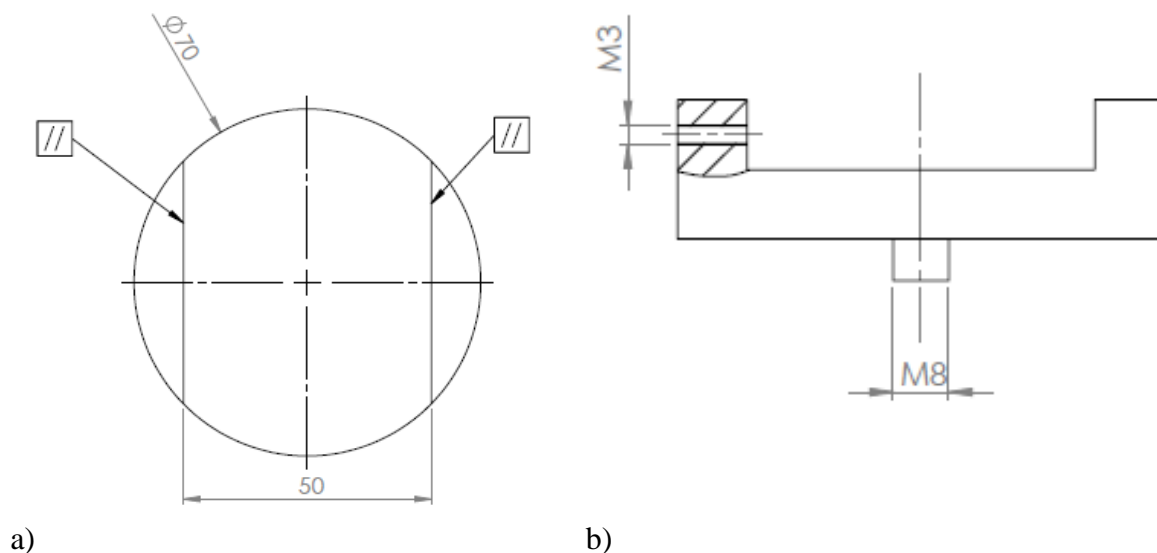
Selleks, et platvormi oleks võimalik lihvimisseadmesse kinnitada peavad platvormil olema omavahel paralleelsed pinnad. Sellele lähtudes peab modifitseeritud platvorm koosnema minimaalselt kahest detailist – paralleelsete külgedega tööplaadist ning ümarast kettasarnasest osast, mille abil kinnitatakse platvorm SLM 50 seadmesse.

Tabel 5.1 Platvormi omadused

Omadus	Originaal platvorm	Modifitseeritud platvorm
Diameeter, mm	70	70
Kinnitus	M8 kõrgusega 6 mm	M8 kõrgusega 6 mm
Lihvimise võimalus	Raskendatud	Lihhtne

### 5.1.2 Modifitseeritud tööplatvorm

Modifitseeritud tööplatvorm projekteeriti freesides kettast välja paralleelsete külgedega sektor jättes ketta mõlemasse serva poolkuu kujulised alad (Sele 5.2). Võimalik oleks ka ketta keskele freesida ruudu või ristküliku kujuline süvis, kuid antud lähenemine tagab suurema tööpinna detailide printimiseks. Antud tööplatvormi puhul on tähtis, et külje pinnad oleksid omavahel paralleelsed ja risti põhjaga.



Sele 5.2 Tööplatvormi modifikatsioon, a) pealt vaade, b) külgvaade

Tööplaadi kinnitamiseks modifitseeritud platvormi külge on kõige lihtsamaks meetodiks seadekrivi kasutamine. Valmis tööplatvormi on võimalik näha all oleval pildil (Sele 5.3). Tööplatvormi joonised on lisas (Lisa 5.1).



Sele 5.3 Modifitseeritud tööplatvorm

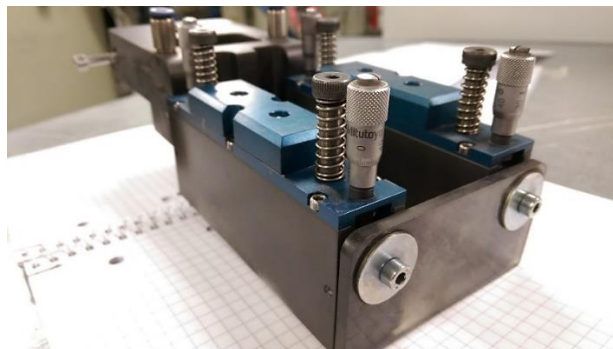
Pildil nähtavat kahest osast koosneva tööplatvormi tööala on võimalik lihvimisseadmesse kinnitada ning tänu sellele on platvormi puhastamine eelneva lasersulatus jälgedest võimalik.

## 5.2 Pulbri etteandemehhanismi modifitseerimine

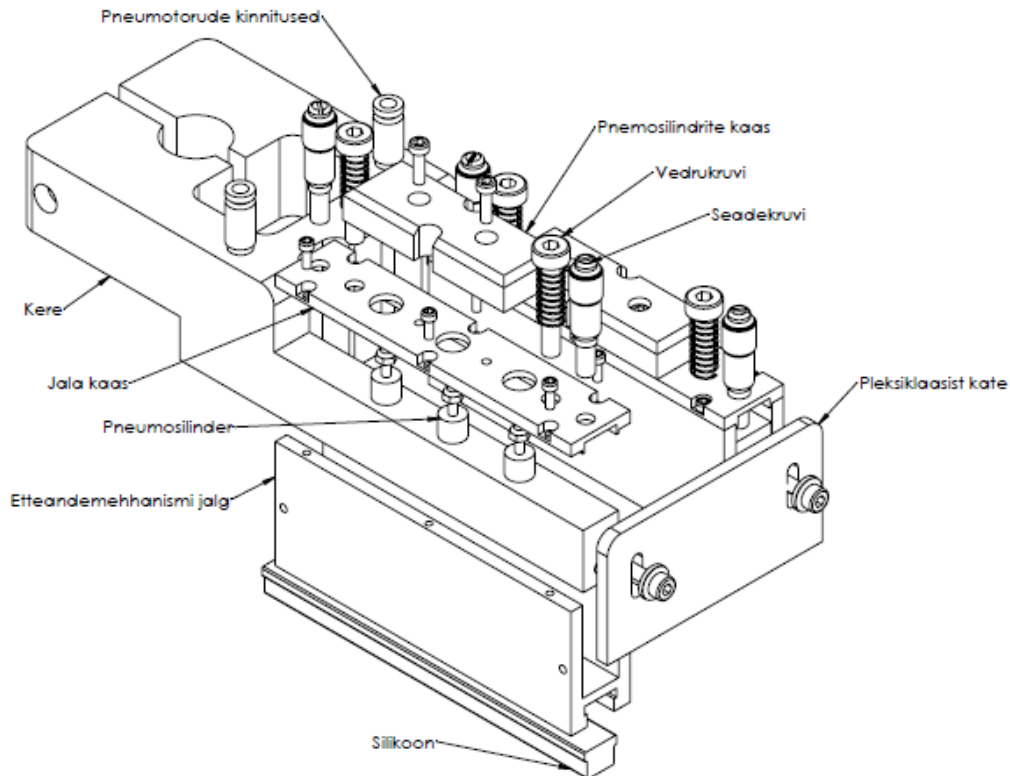
Pulbri etteandemehhanismi modifitseerimise põhjuseks on asjaolu, et mehhanismis soovitakse kasutada standardile vastavat silikoonist profiili. Standardse silikoonriba kasutamine võimaldaks kokku hoida raha ja aega. Hetkel tellitakse silikoonribad ReaLizeri edasimüüjalt, mis tähendab, et ribade Eestisse jõudmine võtab aega ning ribad on võrreldes standardprofiilidega kallid.

### 5.2.1 Pulbri etteandemehhanismi detailid ja tööpõhimõte

Pulbri etteandemehhanism on seade, mis jaotab SLM süsteemis kasutusel oleva pulbri ühtlaselt tööpinnale (Sele 5.4). Mehhanismi liigutab SLM süsteemis elektrimootor ning seadeldise kõrguse muutmiseks on keres pneumosilindrid. All oleval pildil on toodud objekti koostisosad (Sele 5.5). Mehhanismi täpne koostejoonis on nähtav lisas (Lisa 3.2).

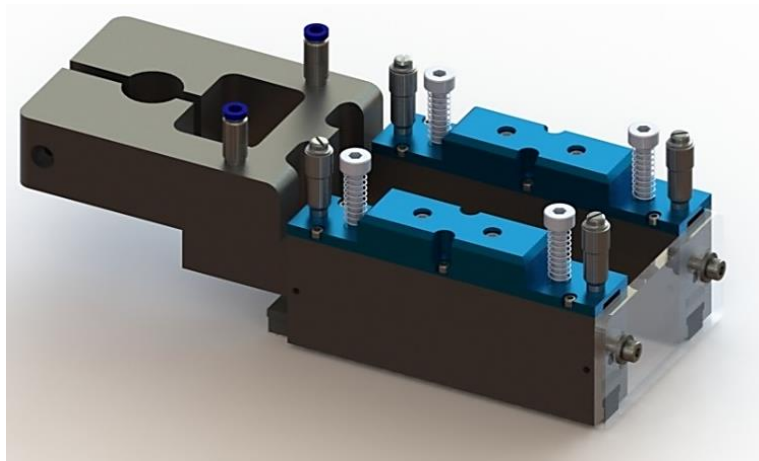


Sele 5.4 Pulbri etteandemehhanism



### Sele 5.5 Pulbri etteandemehhanism

Selel 5.5 on välja toodud mehhanismi peamised koostu elemendid. Süsteemi südameks on kere, mille sees on kahel välja ulatuval osal nii öelda kahvil mõlemal pool 3 pneumosilindrit ehk kokku on süsteemil 6 väikest pneumosilindrit. Silindrite ülesandeks on etteandemehhanismi jalgade ülesse ja alla tõstmine. Nimetatud protsessi on võimalik juhtida nii, et üleval on kas ainult üks jalg või mõlemad korraga. Seadme jalad ei ole kerega ühendatud järgalt vaid pneumosilindrite kaane abil võimaldades jalgade vaba ülesse ja alla liikumise. Pneumosilindrite kaas kinnitub omakorda jala kaane külge. Etteandemehhanismi jalgadel on 2 ülesannet. Esiteks, silikoonist ribade hoidmine ning teiseks pulbri liigutamine (kasutusel olev pulber kogutakse kahe jala vahel asuvasse ruumi). Pleksiklaasist kate tagab, et pulber püsiks kahe jala vahel. Silikooniriba ülesandeks on ühtlase pulbrikihi laotamine printimisalusele. Tähtsateks komponentideks on ka seadekrugi ja vedrukrugi. Seadekrugi abil on võimalik muuta mehhanismi jalgade kõrgust ning vedrukrugi tagab jalgadele vastusurve. Mõlemad elemendid kinnituvad jala kaane külge, mis on keermetatud ning elementide põhjad toetuvad vastu etteandemehhanismi kere. Kõik mehhanismi detailid mõõdeti ning projekteeriti sellest täpne koopia (Sele 5.6).



Sele 5.6 Pulbri etteandemehhanismist tehtud mudel

Analüüsisid mehhanismi ehitust saab järelda, et standardsete silikoonist ribade kasutusele võtuks on vaja modifitseerida vaid pulbri etteandemehhanismi jalgu.

### 5.2.2 Etteandemehhanismi jala modifitseerimine

Etteandemehhanismi jala modifitseerimiseks tuleb esmalt välja valida profiil, mida soovitakse kasutada silikoonribana. Üks enamlevinud ja kättesaadavamaid profiile on ümar profiil, kuid kuna tegemist on kummiga nimetakse profiili kumminööriks (Sele 5.7). Kumminööri kasutatakse näiteks tihendite valmistamiseks. Üldjuhul on valmistatavate nööride läbimõõdud 1-10 mm vahel. All olevas tabelis on välja toodud erinevate pakutavate materjalide omadused (Tabel 5.1).



Sele 5.7 Kumminöör [31]

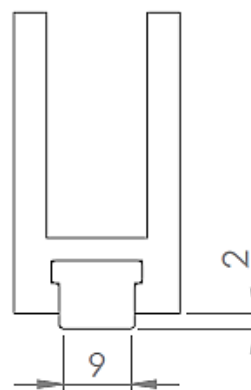


Tabel 5.1 Materjalide omadused [31]

Omadus	Etüleenpropüleen (EPDM)	Nitriil (NBR)	„Viton“ kumm (FPM)	Silikoon (MVQ)
Kõvadus, Sh	15	70	75	60
Töötemperatuur, °C	-40...+120	-30...+100	-20...+200	-55...+175
Iseloomustus	Hea keemiakindlus, poorne struktuur	Õlikindel	Väga hea keemiakindlus	Hea temperatuuritaluvus

Väga hea temperatuuritaluvuse ning keskmise kõvadusnäitaja tõttu sobib kõige paremini kasutamiseks silikoon. Originaal riba on samuti valmistatud silikoonist. Kumminööri diameetriks valiti 8 mm.

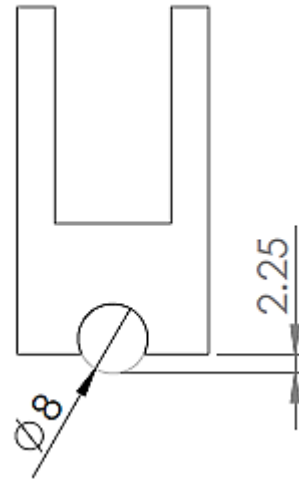
Järgmisena tuleb otsustada millisest materjalist mehhanismi jalad valmistada. Valitav materjal peab olema piisavalt kerge, et pneumosilindrid suudaksid jalga liigutada. Originaaljalg on valmistatud alumiiniumi sulamist, sellest lähtuvalt võiks ka modifitseeritud jala materjalina kasutada alumiiniumi sulamit. Antud rakenduse puhul sobib kasutamiseks EN AW AlCu4PbMg (2030). Materjal on hea lõiketöödeldavusega ning mõeldud freesitud või treitud detailide valmistamiseks [32]. Etteandemehhanismi jala modifitseerimiseks vaadeldakse algselt, kuidas kinnitub silikoonist riba originaal jala külge (Sele 5.8).



Sele 5.8 Originaal etteandemehhanismi jalg

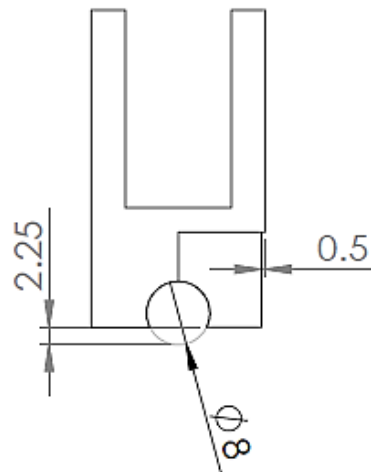
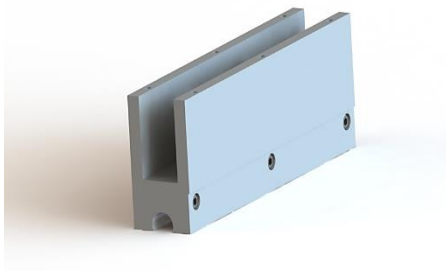
Originaalis on silikoonriba T kujulise profiiliga ning riba surutakse alumiiniumist jala külge jõuga. Siin aitab kaasa asjaolu, et silikoon on elastne. Võrreldes originaal ribaga on ümarprofiili kasutamisel kontaktpind palju väiksem kui ristkülikul, kuid kuna paljud teised seadmed kasutavad silikoonribana ümarprofiile, ei tohiks väiksem kontaktpind olla probleemiks.

Üheks väga lihtsaks lahenduseks kumminööri kasutamiseks oleks jala alumisse ossa soone tegemine, mis oleks natukene tsentrist eemale viidud, et ääred jääksid kummiriba hoidma (Sele 5.9). Sellise lahenduse puhul tuleb sarnaselt originaallahendusele riba suruda oma pesa.



Sele 5.9 Modifitseeritud etteandemehhanismi jalg

Meetodit on lihtne kasutada ja teostada, kuid ei pruugi fikseerida silikoonist riba ühtlaselt ning silikoonile võib tekkida lainetus. Nööri täielikuks fikseerimiseks on välja pakutud lahendus etteandemehhanismi jalg valmistada kahest osast (Sele 5.10).



Sele 5.10 Modifitseeritud etteandemehhanismi jalg

Lahenduse puhul koosneb mehhanismi jalg kahest osast ning jäetud on 0,5 mm varu, mis võimaldab kinnitada silikoonist riba kerge survega. Detailid kinnituvad omavahel 3 poldiga. Lahenduse eeliseks on silikooni kindlam fikseerimine.

Tööjoonised mõlema lahenduse kohta on toodud lisades (Lisa 5.2 ja 5.3).

## KOKKUVÕTE

Magistritöö keskendus volframkarbiid koobalti jaoks sobivate printimisparameetrite leidmisele Realizer SLM 50 seadmega. Töö peamiseks eesmärgiks oli valmistada lasersulatusseadmega samaväärsete mehaaniliste omadusega materjal, millel omadused oleksid võrreldavad pulbertehnoloogiat kasutades saaduga. Kõrvaleesmärgiks oli välja pakkuda lahendus, kuidas saaks SLM 50 seadme pulbri etteandemehhanismis kasutada standardile vastavat peamist kuluosa – silikoonist pühkimisriba.

Lõputöö esimene osa on pühendatud kirjanduse ülevaatele. Paragrahvi esimeses osas tutvustatakse, kuidas printimine toimub ning millised on peamised eeldused CAD mudelist reaalse detaili valmistamiseks. Lisaks antakse põgus ülevaade kermiste olemusest ning tuuakse välja kasutusel oleva kõvasulami WC-Co peamised mehaanilised omadused ja kasutusvaldkonnad. Lühidalt räägitakse ka SLM 50 seadme tootjast. Realizeri ajalugu ning peamised tooted on välja toodud kirjandusülevaate viimastes punktides.

Magistritöö teine osa on pühendatud töös kasutatavate meetodite ning tarkvarade tutvustamisele. Paragrahvis tutvustatakse Realizer SLM 50 seadme tööpõhimõtet ning muudetavaid parameetreid, millede muutmisel on võimalik manipuleerida lõpptulemusena saadava materjali omadusi. Eraldi on tutvustatud kasutusel olevat H.C Starck pulbrit ning võrreldud seda traditsioonilise printimiseks mõeldud pulbriga. Meetodite tutvustamise raames on välja toodud kõigi katsekehade analüüsiks vajalike seadmete nimed ning nende tööpõhimõtted.

Lõputöö tähtsaim osa keskendub parimate võimalike parameetrite leidmisele H.C Starck volframkarbiid-koobalti pulbri jaoks. Parameetrite otsingul võrreldi katsekehi peamiselt tiheduse ja mikrostruktuuri piltide alusel. Võimalusel määrati ka katsekehade kõvadused. Kokku prooviti lõputöö raames 130 parameetri kombinatsiooni mille käigus prinditi lõpuni 76 katsekeha. Katsedetailide saamiseks teostati 7 printimist, mille käigus rakendati kolme erinevat laseritäpi suurust. Laseritäpi suurust reguleeriti, muutes seadme fookuskaugust. Lisaks fookuskaugustele muudeti töö käigus sulatusaega, punktikaugust ning laseri võimsust. Tõstmaks katsekehade tihedust prooviti kasutada ühe kihi mitmekordset sulatamist, eelsoojendamist laseriga ning järelpaagutust HIP ahjus.

Parim tulemus ilma järelpaagutuseta saadi materjali kihi ühekordsel sulatamisel kasutades laseri minimaalselt sulatustäpi suurust, kasutades järgnevat laseri parameetreid: sulatusaeg 68  $\mu\text{s}$ , punktikaugus 21  $\mu\text{m}$  ning voolutugevus 4 A. Nimetatud parameetreid kasutades saadi katsekeha tiheduseks 13,20  $\text{g}/\text{cm}^3$  (92 % WC-12Co allikas antud tihedusest) ning kõvaduseks HV30 1050. Järelpaagutust kasutades saadi suurimate omadustega katsekeha kasutades laseri minimaalset sulatustäpi suurust ning sulatusaega 90  $\mu\text{s}$ , punktikaugust 30  $\mu\text{m}$  ja voolutugevust 3,5 A. Saadud detaili tiheduseks mõõdeti 14,05  $\text{g}/\text{cm}^3$  (98 % WC-12Co allikas antud tihedusest). Võrdluseks samast pulbrist pulbertehnoloogiat kasutades valmistatud katsekeha tiheduseks oli 14,28  $\text{g}/\text{cm}^3$  (99,8 % WC-12Co allikas antud tihedusest ning kõvaduseks HV30 1340).

Magistritöö põhjal saab WC-12Co selektiivsel lasersulatusel välja tuua järgnevad järeldused:

- 1) Kõrgemad tulemused saavutati kasutades väikseimat sulatustäpi suurust ehk seadme fookuskauguse 8,5 mm juures.
- 2) Soovitavad printimisparameetrite vahemikud WC-12Co lasersulatusel on: punktikaugus 10-30  $\mu\text{m}$ , sulatusaeg 70-100  $\mu\text{s}$  ja voolutugevus 3,5-4,0 A.
- 3) Mitmekordne kihi lasersulatus sama laseri võimsuse juures parandab materjali tihedust kuni 3,2 %, kuid võtab printimisel vastavalt ka rohkem aega.
- 4) Katsekehade järelpaagutamine HIP ahjus parandab detailide tihedust kuni 10,9 %. Poorsuse vähenemist oli näha ka mikrostruktuuridelt.
- 5) Katsekehade kahekordne lasersulatus kasutades teisel sulatusel 50 % vähendatud laseri võimsusega (laseri võimsus 100 % + 50 %), ei vähenda detaili sisepeingeid ega suurenda katsekeha tihedust.
- 6) Katsekehade laseriga eelsoojendus ehk kahekordne sulatus algselt poole võimsuse ning teistkordselt täisvõimsusega (laseri võimsus 50 % + 100 %) ei tõstnud materjalide omadusi.
- 7) Liialt suurt energiatihedust kasutades hakkab katsekeha ebasobivalt kasvama, mille tulemusena tuleb katsekeha printimine katkestada. Liiga väikeste energiatiheduste puhul materjal ei paaku ning tekib jääkpoorsus. Optimaalne energiatihedus jääb vahemikku 100-140  $\text{J}/\text{mm}^3$ .

- 8) Katsekehade mikrostruktuuri ja tiheduse protsentide omavaheline võrdlemine viitab materjalis sideaine ehk koobalti aurustumisele. Sideaine vähenemine kõvasulamis tõstab materjali tihedust, sest koobalti tihedus on volframkarbiidi omast peaaegu 2 korda väiksem.

Magistritöö viimases osas tuuakse välja kahe SLM 50 detaili modifitseerimise võimalused. Komponentideks olid tööplatvorm ning pulbri etteandemehhanism. Tööplatvormi modifitseerimise vajadus tulenes töös kasutatava materjali suurest kõvadusest, mis raskendab aluse ette valmistamist järgmiseks printimiseks. Suurest kõvadusest lähtuvalt oli vaja valmistada tööplatvorm, millist oleks võimalikult lihtne lihvimispinki kasutades puhastada. Arendatud tööplatvorm tehti ka töö käigus valmis ning leidis kasutamist. Pulpri etteandemehhanismi arenduse vajadus tulenes mehhanismi kuluosa standardiseerimise soovist. Nimelt tahetakse tulevikus raha kokku hoidmiseks kasutama hakata standardse profiiliga pulbri etteandemehhanismi peamist kuluosa – silikoonist pühkimisriba. Töö autor pakub antud probleemi lahendamiseks välja 2 lahendust.

Magistritöö käigus suudeti tõestada, et H.C Starck Amperit 519.074 WC-Co kõvasulami pulbrit on võimalik ReaLizer SLM 50 seadmega printida. Pulbertehnoloogiale konkureeriva tootmisviisi pakkumiseks vajab materjal siiski edasist uurimist. Printimise tulemusena saadi suhteliselt suure tihedusega katsekehad, millel on arvestatav kõvadus, kuid pulbertehnoloogiat kasutades oli samast materjalist katsekeha tunduvalt tihedam ning suurema kõvadusega.

## SUMMARY

This master's thesis focuses on finding suitable printing parameters for tungsten carbide cobalt on ReaLizer SLM 50 device. The main aim of the work was to prepare hard metal detail using selective laser melting device with similar mechanical properties like detail that was made using powder technology. The second goal was to provide a solution for SLM 50 sweeper so that there would be a possibility to use standard wear part - silicone wiper blade.

First part of the thesis is devoted to used literature. Paragraph is divided into three parts. First section explains how 3D printing works and what needs to be done to make final product from CAD model. Second part presents carbides especially tungsten carbide cobalt. The end of the first part focuses on ReaLizers history and company's main products.

Second part of the thesis is devoted to methods and software's. Paragraph talks about ReaLizer SLM 50 machine. How the machine works and which variable parameters can be manipulated to change the properties of the material end result. Separately the used H.C Starck powder and its properties are explained and compared with the traditional powder for printing. Lastly, the author introduces all the equipment that was used for testing the details.

The primary goal of the thesis concentrates finding the best possible parameters for printing H.C Starch tungsten carbide cobalt powder. The samples were compared mainly by density and microstructures. If possible, the hardness of the samples was measured. All together 130 parameter combinations were tested and 76 test cubes were made. 7 test printings were conducted in which 3 different spot sizes were used. Spot size can be adjusted by regulating focus distance of the laser. In addition to changing focus distance the exposure time, point distance and the power of the laser were also changed. Various methods were used to raise the density of the material. They were: melting one layer several times, preheating the layer with the laser and sintering test subjects in high pressure stove.

The highest result without sintering was reached by using the smallest spot size and following the laser parameters: exposure time 68  $\mu\text{s}$ , spot distance 21  $\mu\text{m}$  and current strength 4 A. These parameters yielded a test cube that had density of 13,20  $\text{g}/\text{cm}^3$  and hardness of HV30 1050. By using sintering the best test subject had density of 14,05  $\text{g}/\text{cm}^3$  and was made using exposure time 90  $\mu\text{s}$ , spot distance 30  $\mu\text{m}$  and current strength 3,5 A. For comparison, test subject that was made by using powder technology had density of 14,28  $\text{g}/\text{cm}^3$  and hardness of HV30 1340.

Conclusions made on printing WC-12Co powder using selective laser melting:

- 1) The highest results were achieved using the smallest spot size, focus length of 8,5 mm.
- 2) Recommended printing parameters for WC-12Co in SLM 50 device are: point distance 10-30  $\mu\text{m}$ , exposure time 70-100  $\mu\text{s}$  and current strength 3,5-4 A.
- 3) Melting one layer several times improves material density up to 3,2 % but also takes more time to print. Using double melting takes twice as much time as melting one layer.
- 4) Sintering the test objects on high pressure in HIP improves density up to 10,9 %. In addition, decrease of the porosity was seen in the microstructures.
- 5) Using double laser melting with second time decreasing the laser power by 50 % (laser power 100 % + 50 %) does not improve the density of the material.
- 6) Using laser preheating (laser power 50 % + 100 %) does not improve density or reduce internal tensions.
- 7) Using of high energy density causes inappropriate grow of the material so the test subjects has to be stopped. To low energy density yields in insufficient sintering and retained excessive porosity. Optimal energy density is 100-140  $\text{J}/\text{mm}^3$ .
- 8) Comparing test objects microstructures and densities it can be seen, that binder material cobalt may have been evaporated during the laser melting process. Binder material degression increases the density of the material because binder material density is almost twice as low as tungsten carbides.

The final part of the thesis is devoted for developing two pieces of SLM 50 machine. Two components were working platform and powder feeding mechanism (sweeper). Work platform had to be modified due to the high hardness of the used carbide, which makes it difficult to prepare the platform for the next printing. High hardness meant that platform which can be cleaned by using grinding machine, had to be developed. Developed platform was made and found usage. Due to the fact, that laboratory wants to use standard silicone wiper blades two sweeper modification variants were offered.

This master's thesis proved that H.C Starck Amperit 519.074 WC-Co hard alloy powder can be printed using ReaLizer SLM 50 device. As a result relatively high density and hardness test subject were made but using powder technology the properties of the material were higher. This means to print complex details from tungsten carbide cobalt - parameter developing must continue.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] 3D Printing Industry [WWW] <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/> (05.01.2016).
- [2] Chee Kai Chua, Kah Fai Leong „*3D Printing and additive manufacturing principles and applications*“ (*The 4th edition of Rapid Prototyping: Principles and Applications*) World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd 2015 Singapur
- [3] STL-1 masin [WWW] <http://www.springitalia.com/img/azienda/storia-aziendale/1987-1.png> (11.01.2016).
- [4] TTÜ õppematerjal „Freesimise programmeerimine „ [WWW] <http://www.ene.ttu.ee/leonardo/cnc/CNCtoopingid40.pdf> (25.04.2016)
- [5] Infobrošüür - European powder metallurgy association (EPMA) „Introduction to Additive Manufacturing Technology“, esimene number 2015
- [6] Paigutus [WWW] [https://media.licdn.com/mpr/mpr/shrinknp\\_800\\_800/AEAAQAAAAAAAAAXPAAAAJDk2ZTcyZjY1LWNhZTQtNDdlNC1iYmIzLWlxY2UyNTgyMzQ3Mg.png](https://media.licdn.com/mpr/mpr/shrinknp_800_800/AEAAQAAAAAAAAAXPAAAAJDk2ZTcyZjY1LWNhZTQtNDdlNC1iYmIzLWlxY2UyNTgyMzQ3Mg.png) (03.02.2016)
- [7] STL fail [WWW] <http://www.3ders.org/images2014/emendo-repairs-errors-in-stl-3d-printing-files-4.png> (03.02.2016)
- [8] Järeldöötus [WWW] <https://octave3d.files.wordpress.com/2015/06/untitled.jpg> (03.02.2016)
- [9] Kihltisandustehnoloogiate jagunemine [WWW] [http://www.astm.org/FULL\\_TEXT/F2792/HTML/F2792.htm#s00200](http://www.astm.org/FULL_TEXT/F2792/HTML/F2792.htm#s00200) (04.02.2016)
- [10] Õppematerjal „Prototüüpide kiirvalmistamine“ [WWW] <http://innomet.ttu.ee/oppetoo/ayx/2osa.pdf> (04.02.2016)
- [11] Tallinna Tehnikaülikool, Materjalitehnika instituut, Loengukonspekt aines „Kõvasulamid“, Jüri Pirso, Tallinn 2004
- [12] Tallinna Tehnikaülikool, Materjalitehnika instituut, Loengukonspekt „Pulbermetallurgia“, Jüri Pirso, Tallinn 2005



- [13] Rockwell Powders [WWW] <http://www.rockwellinc.ca/Products/WearParts/TungstenCarbideStandardGradeChart/WC12CoWC13Co.aspx> (04.05.2016)
- [14] ReaLizer infobrošuur „REALIZER The Pioneer of 3-D Printers“
- [15] ReaLizeri ametlik veebileht [WWW] <http://www.realizer.com/en/startseite/machinery-equipment/machinery-slm50-slm100-slm125-slm250-slm300/slm-50> (24.03.2016)
- [16] ReaLizeri ametlik veebileht [WWW] <http://www.realizer.com/en/startseite/machinery-equipment/machinery-slm50-slm100-slm125-slm250-slm300/slm-100> (24.03.2016)
- [17] ReaLizeri ametlik veebileht [WWW] <http://www.realizer.com/en/startseite/machinery-equipment/machinery-slm50-slm100-slm125-slm250-slm300/slm-125> (24.03.2016)
- [18] ReaLizeri ametlik veebileht [WWW] <http://www.realizer.com/en/startseite/machinery-equipment/machinery-slm50-slm100-slm125-slm250-slm300/slm-250> (24.03.2016)
- [19] ReaLizeri ametlik veebileht [WWW] <http://www.realizer.com/en/startseite/machinery-equipment/machinery-slm50-slm100-slm125-slm250-slm300/slm300i> (24.03.2016)
- [20] 3D Printing Industry [WWW] <http://3dprintingindustry.com/2015/09/17/a-look-into-powder-materials-for-metal-3d-printing/> (11.04.2016)
- [21] Sandvik Materials Technology [WWW] <http://smt.sandvik.com/en/products/metal-powder/3d-printing/> (11.04.2016)
- [22] Sandvik Materials Technology [WWW] <http://smt.sandvik.com/en/products/metal-powder/additive-manufacturing/> (11.04.2016)
- [23] Pilt SLM 50 seadmest [WWW] <http://trident.ee/wp-content/uploads/2013/10/Yeti-SLM501.jpg> (24.03.2016)
- [24] ReaLizer SLM 50 kasutusjuhend - väljaanne 1 - 2015 „Operating Manual ReaLizer SLM 50“
- [25] Infobrošuur H.C.Starck „Powders for thermal spraying“ Amperit 519, 17.05.2013
- [26] Infobrošuur H.C.Starck „Thermal Spray Powders“ Amperit, info

- [27] Kasutusjuhend „Density Kit for Solids and Liquids Determination“ [WWW]  
[http://us.mt.com/us/en/home/supportive\\_content/product\\_documentation/operating\\_instructions/NC\\_density\\_OI/jcr:content/download/file/file.res/Operating\\_Instructions\\_Density%20Kit\\_\(OP-EN\).pdf](http://us.mt.com/us/en/home/supportive_content/product_documentation/operating_instructions/NC_density_OI/jcr:content/download/file/file.res/Operating_Instructions_Density%20Kit_(OP-EN).pdf) (27.04.2016)
- [28] Indentec „Vickers Hardness Test“ [WWW]  
[http://www.indentec.com/downloads/info\\_vickers\\_test.pdf](http://www.indentec.com/downloads/info_vickers_test.pdf) (27.04.2016)
- [29] P. Kulu, J. Kübarsepp, E. Hendre, T. Metusala, O. Tapupere „Materjalid“ [WWW]  
<http://www.ene.ttu.ee/leonardo/materjalid/Materjalid.pdf> (17.05.2016)
- [30] Teadusartikkel; Peter Mercelis, Jean-Pierre Krauth (Department of Mechanical engineering, University of Leuven, Belgium) „Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting“ Rapid Prototyping Journal Vol. 12 Iss 5 pp. 254-256
- [31] Optirans kodulehekülg [WWW] <http://www.optitrans.ee/tooted/tehniline-kumm/>  
(29.04.2016)
- [32] P. Kulu, Mehaanikainseneri käsiraamat, 2 trükk. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2013

**LISAD**

## Lisa 3.1 ReaLizer SLM 50 koostejoonis

## **Lisa 3.2 Pulbri etteandemehhanismi koostejoonis**

## Lisa 4.1 Katseseeria nr. 1 parameetrid

Katsekeha	Sulatusaeg, μs	Punktikaugus, μm	Voolutugevus, A	Skaneerimiskiirus, m/s	Energiatihedus, J/mm <sup>3</sup>	Märkmed
1-01	70	50	1,5	0,71	20	Katkestati
1-02	70	10	4	0,14	269	Hõõgumine
1-03	20	10	1,5	0,50	29	Katkestati
1-04	51	50	2,4	0,98	24	Katkestati
1-05	70	34	3	0,49	59	
1-06	20	50	4	2,50	15	Katkestati
1-07	40	35	3	0,88	33	Katkestati
1-08	70	13	2,8	0,19	142	
1-09	70	10	1,5	0,14	101	Vähe sädet
1-10	40	34	1,5	0,85	17	Katkestati
1-11	52	50	4	0,96	40	Hõõgumine
1-12	70	50	1,5	0,71	20	Katkestati
1-13	40	34	1,5	0,85	17	Katkestati
1-14	20	10	1,5	0,50	29	Katkestati
1-15	40	10	3	0,25	115	
1-16	70	10	1,5	0,14	101	Vähe sädet
1-17	70	10	4	0,14	269	Palju sädet
1-18	20	24	4	1,20	32	
1-19	20	50	2,4	2,50	9	Katkestati
1-20	20	25	2,4	1,25	19	Katkestati

## Lisa 4.2 Katseseeria nr. 2 parameetrid

Katsekeha	Sulatusaeg, μs	Punktikaugus, μm	Voolutugevus, A	Skaneerimiskiirus, m/s	Energiatihedus, J/mm <sup>3</sup>	Märkmed
2-01	100	21	4	0,21	183	Hõõgus väga pikalt
2-02	50	10	2	0,20	96	Ei hõõgunud
2-03	80	10	3,2	0,13	246	Katkestati
2-04	50	40	2	0,80	24	
2-05	80	28	2	0,35	55	Ei hõõgunud
2-06	50	10	4	0,20	192	Hõõgus väga pikalt
2-07	50	40	2	0,80	24	
2-08	80	28	3,2	0,35	88	
2-09	75	10	2	0,13	144	Katkestati
2-10	70	40	4	0,57	67	Ei hõõgunud
2-11	100	40	4	0,40	96	Ei hõõgunud
2-12	100	40	2,7	0,40	65	
2-13	50	10	4	0,20	192	
2-14	53	10	3	0,19	153	
2-15	68	40	4	0,59	65	Ei hõõgunud
2-16	100	40	2,7	0,40	65	Ei hõõgunud
2-17	68	21	4	0,31	124	
2-18	100	10	2	0,10	192	Katkestati
2-19	100	10	2	0,10	192	Katkestati
2-20	50	28	3,2	0,56	55	Ei hõõgunud

### Lisa 4.3 Katseseeria nr. 3 parameetrid

Katsekeha	Sulatusaeg, µs	Punktikaugus, µm	Voolutugevus, A	Skaneerimiskiirus, m/s	Energiatihedus, J/mm <sup>3</sup>	Märkmed
3-01	100	21	4	0,21	183	Katkestati
3-02	50	10	2	0,20	96	
3-03	80	10	3,2	0,13	246	Hõõgus
3-04	50	40	2	0,80	24	Katkestati
3-05	80	28	2	0,35	55	
3-06	50	10	4	0,20	192	Katkestati
3-07	50	40	2	0,80	24	Katkestati
3-08	80	28	3,2	0,35	88	
3-09	75	10	2	0,13	144	Hõõgus
3-10	70	40	4	0,57	67	
3-11	100	40	4	0,40	96	
3-12	100	40	2,7	0,40	65	
3-13	50	10	4	0,20	192	Katkestati
3-14	53	10	3	0,19	153	
3-15	68	40	4	0,59	65	
3-16	100	40	2,7	0,40	65	
3-17	68	21	4	0,31	124	Hõõgus väga pikalt
3-18	100	10	2	0,10	192	Hõõgus
3-19	100	10	2	0,10	192	Väike säde, hõõgus
3-20	50	28	3,2	0,56	55	



## Lisa 4.4 Katseseeria nr. 4 parameetrid

Katse	Kihtide arv, tk	Sulatusaeg, $\mu$ s	Punktikaugus, $\mu$ m	Voolutugevus, A	Skaneerimiskiirus, m/s	Energiatihedus, J/mm <sup>3</sup>	Märkmed
4-01	1	25	10	1,5	0,40	36	
4-02	2	25	10	1,5	0,40	36	
4-03	3	25	10	1,5	0,40	36	Katkestati
4-04	4	25	10	1,5	0,40	36	Katkestati
4-05	1	50	10	1,5	0,20	72	
4-06	2	50	10	1,5	0,20	72	
4-07	3	50	10	1,5	0,20	72	
4-08	1	75	10	1,5	0,13	108	
4-09	2	75	10	1,5	0,13	108	
4-10	3	75	10	1,5	0,13	108	
4-11	1	100	10	2	0,10	192	
4-12	2	100	10	2	0,10	192	
4-13	3	100	10	2	0,10	192	
4-14	1	75	10	2,5	0,13	180	
4-15	2	75	10	2,5	0,13	180	
4-16	3	75	10	2,5	0,13	180	

## Lisa 4.5 Katseseeria nr. 5 parameetrid

Katsekeha	Sulatusaeg, $\mu$ s	Punktikaugus, $\mu$ m	Voolutugevus, A	Skaneerimiskiirus, m/s	Energiatihedus, J/mm <sup>3</sup>	Märkmed
5-01	81	30	3,1	0,37	80	Katkestati
5-02	75	10	4	0,13	288	Katkestati
5-03	70	22	4	0,31	122	
5-04	50	30	3,1	0,60	50	Katkestati
5-05	70	10	2,5	0,14	168	
5-06	60	10	1,5	0,17	86	
5-07	50	17	1,5	0,34	42	
5-08	81	17	1,5	0,21	69	
5-09	100	30	4	0,30	128	
5-10	50	30	1,5	0,60	24	
5-11	85	10	4	0,12	326	Katkestati
5-12	82	30	1,5	0,37	39	Katkestati
5-13	50	10	4	0,20	192	Katkestati
5-14	70	22	4	0,31	122	Katkestati
5-15	75	10	1,5	0,13	108	
5-16	63	10	1,5	0,16	91	Katkestati
5-17	50	10	4	0,20	192	Katkestati
5-18	69	22	2,5	0,32	75	Katkestati
5-19	100	22	2,5	0,22	109	Katkestati
5-20	100	30	4	0,30	128	Katkestati

## Lisa 4.6 Katseseeria nr. 6 parameetrid

Katsekeha	Sulatusaeg, µs	Punktikaugus, µm	Voolutugevus, A	Skaneerimiskiirus, m/s	Energiatihedus, J/mm <sup>3</sup>	Märkmed
6-01	80	15	1,75	0,19	90	
6-02	55	10	1,75	0,18	92	
6-03	75	25	3	0,33	86	Katkestati
6-04	85	10	1,75	0,12	143	Katkestati
6-05	90	15	1,75	0,17	101	
6-06	45	10	3,5	0,22	151	Katkestati
6-07	65	20	3,5	0,31	109	Katkestati
6-08	65	15	2	0,23	83	
6-09	90	20	3,5	0,22	151	Katkestati
6-10	90	20	2,5	0,22	108	Katkestati
6-11	50	15	3	0,30	96	Katkestati
6-12	50	10	2	0,20	96	Katkestati
6-13	60	15	2,5	0,25	96	Katkestati
6-14	90	10	1,75	0,11	151	Katkestati
6-15	75	15	3	0,20	144	Katkestati
6-16	90	25	2,5	0,28	86	
6-17	90	30	3,5	0,33	101	
6-18	65	20	3,5	0,31	109	Katkestati
6-19	65	15	3	0,23	125	
6-20	60	15	3,5	0,25	134	
Toru seinapaksus 0.2	100	30	4	0,30	128	
Toru seinapaksus 0.3	100	30	4	0,30	128	Lagunes
Toru seinapaksus 0.4	100	30	4	0,30	128	Lagunes
Toru seinapaksus 0.5	100	30	4	0,30	128	Lagunes

## Lisa 4.7 Katseseeria nr. 7 parameetrid

Katsekeha	Sulatusaeg, μs	Punktikaugus, μm	Voolutugevus, A	Skaneerimiskiirus, m/s	Energiatihedus, J/mm <sup>3</sup>	Märkmed
7-01	50	10	2	0,20	96	Katkestati
7-02	50	20	2	0,40	48	
7-03	60	10	2	0,17	115	Katkestati
7-04	60	20	2	0,33	58	
7-05	70	10	2	0,14	134	
7-06	70	20	2	0,29	67	Katkestati
7-07	70	30	2	0,43	45	
7-08	80	10	2	0,13	154	
7-09	80	20	2	0,25	77	Katkestati
7-10	80	30	2	0,38	51	Katkestati
7-11	90	10	2	0,11	173	Katkestati
7-12	90	20	2	0,22	86	Katkestati
7-13	90	30	2	0,33	58	
7-14	100	10	2	0,10	192	
7-15	100	20	2	0,20	96	Katkestati
7-16	100	30	2	0,30	64	
7-17	90	10	1+2	0,11	86+173	Katkestati
7-18	90	20	1+2	0,22	43+86	Katkestati
7-19	100	20	1+2	0,20	48+96	

## **Lisa 5.1 Modifitseeritud tööplatvormi tööjoonis**

## **Lisa 5.2 Modifitseeritud pulbri etteandemehhanismi jalg variant nr. 1**

## **Lisa 5.2 Modifitseeritud pulbri etteandemehhanismi jalg variant nr. 2**