



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

3D-METALLITULOOSTUKSEN KEHITTÄMINEN

Käyttöohjeiden visualisointia ja
materiaaliominaisuuksien perustutkimusta

Mari Tanntari

Opinnäytetyö
Toukokuu 2017
Konetekniikka
Tuotekehitys



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Tuotekehitys

TANTTARI, MARI:
3D-metallitulostuksen kehittäminen

Opinnäytetyö 46 sivua, joista liitteitä 1 sivu
Toukokuu 2017

Metallien 3D-tulostus on kasvanut maailmalla vahvasti yhdeksi valmistustekniikaksi perinteisten valmistusmenetelmien rinnalle ja myös Suomessa tekniikka on alkanut saada jalansijaa. 3D-tulostuksessa on mahdollista unohtaa valmistustekniikan rajoitteet ja keskittyä optimoimaan tuotteen toiminnallisuus ja suorituskyky ja myös materiaalinkäyttö, sillä materiaalia voidaan laittaa vain sinne, missä sitä tarvitaan. Teknologia mahdollistaa muotoilun vapauden ja monimutkaiset rakenteet.

Opinnäytetyön taustalla ovat pirkanmaalaiset 3D Boosti ja Invest -kehittämishankkeet, jotka keskittyvät 3D-tulostukseen. Hankkeessa yhteistyökumppaneina ovat Tampereen teknillinen yliopisto, Tampereen ammattikorkeakoulu ja Sastamalan koulutuskuntayhtymä. Työssä tarkastellaan hankkeen aikana hankittua metallien 3D-tulostuslaitteen käyttöä ja ohjeistusta sekä käydään läpi valmistukseen liittyvät työvaiheet. Laitteen käyttämä teknologia on lasersulatukseen perustuva jauhepetiteknikka eli Selective Laser Melting -menetelmä. Työssä arvioidaan myös teknologian ja käytettyjen materiaalien merkitystä Suomessa sekä tutkimusinstituutin että yrityksen näkökulmasta.

Vaikka puhutaan yksittäisestä metallien 3D-tulostuksesta, valmistukseen kuuluu ennen varsinaista tulostusprosessia olevia tehtäviä, varsinainen tulostusprosessi, joka myös sisältää useita eri vaiheita ja lisäksi tulostuksen jälkeisiä tehtäviä. Kaikkien näiden osaluokkien hallinta on erittäin olennaista sekä tulostuslaitteen toimivuuden että valmistettavien tuotteiden kannalta. Työn tavoitteena oli, että 3D-tulostimen käyttäjät voivat tehostaa työskentelyään ja toisaalta uudet käyttäjät pääsevät nopeasti sisään teknologiaan. Opinnäytetyön tuloksena tuotettiin uusi visuaalinen työkalu, A1-kokoinen vuokaavio, tulostuslaitteen prosessien hallintaan ja valmistusmenetelmän kokonaisuuden syy- ja seuraussuhteiden hahmottamiseen.

Kun tavoitteena on metallien 3D-tulostamisen saaminen kaupallisiksi tuotteiksi, on tärkeää tietää, millainen tuotteen laatu ja sen materiaaliominaisuudet ovat. 3D-tulostukseen liittyviä materiaalitutkimuksia on jonkin verran saatavilla, mutta koska useat prosessiparametrit ovat laitekohtaisia, tässä työssä perehdyttiin myös materiaalitutkimuksen kautta austeniittisestä ruostumattomasta teräksestä tulostettujen kappaleiden ominaisuuksiin. Tuloksena oli perustietämystä mikrorakenteesta, kovuuksista ja siitä, miten kappaleen sijoittuminen tulostusalustalla mahdollisesti vaikuttaa materiaaliominaisuuksiin.

Asiasanat: 3D-tulostaminen, jauhepetimenetelmä, ruostumaton teräs, materiaaliominaisuudet

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Mechanical Engineering
Product Development

TANTTARI, MARI
Development of 3D-printing of metals

Bachelor's thesis 46 pages, appendices 1 page
May 2017

In the last few years, metal 3D printing has become increasingly popular. 3D printing makes possible to manufacture nearly any geometry without constraints imposed by traditional manufacturing techniques. In addition the process uses material only where it is needed so the material waste could be in minimum.

The background of the work is the projects called 3D Boosti and Invest which are carried out in cooperation with Tampere University of Technology (TUT), Tampere University of Applied Sciences (TAMK) and Sastamala Municipal Education and Training Consortium (SASKY). The object of the projects is the 3D printing technologies.

This work is focused on the selective laser melting technology (SLM) of metals. In addition the importance of the technology and the used materials in Finland were examined during studies. 3D printing as a manufacturing technology is pretty complex process. There are several activities before and after the main printing process. Therefore one purpose of this study was to develop the visual tool for the main users to clarify and simplify the operating chain and the interaction between different tasks. As a final result the flow chart of A1 size was introduced.

The other purpose of the work concentrated in material studies. In order to understand the influence of different parameters during printing process, several specimens were manufactured and tested. The studies clarified the correlation between the processing conditions, the microstructures and the mechanical properties of samples from stainless steel EN 1.4404 processed by SLM.

The initial steps towards to reach better understanding of the 3D printing process of metals were taken. The review of printing processes were carried out which clarify the entire process and may help to enhance the working methods. However, it should be continually updated and improved. Also this work confirms that the material studies have a key role in order to understand the influence of the process parameters and to improve the quality of the parts.

Key words: 3D printing, selective laser melting, stainless steel, material properties

SISÄLLYS

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 5 |
| 2 | LÄHTÖKOHDAT..... | 6 |
| 2.1 | Opinnäytetyön taustalla 3D Boosti ja Invest -kehittämishanke..... | 6 |
| 2.2 | Opinnäytetyön tarkoitus ja tavoite..... | 6 |
| 2.3 | Aiheen merkitys kohderyhmälle..... | 7 |
| 3 | 3D-TULOSTUSTEKNOLOGIAT..... | 8 |
| 3.1 | Lisäävä valmistus..... | 8 |
| 3.2 | Selective Laser Melting -menetelmä..... | 10 |
| 4 | KÄYTTÖOHJEET..... | 13 |
| 4.1 | SLM 125 HL -laite..... | 13 |
| 4.2 | Vuokaaviotekniikka..... | 14 |
| 4.3 | Prosessien kuvaus..... | 15 |
| 5 | MATERIAALITARKASTELU..... | 18 |
| 5.1 | SLM-tekniikalla 3D-tulostettavat metallimateriaalit..... | 18 |
| 5.2 | Käyttökokemukset materiaaleista Suomessa..... | 18 |
| 5.2.1 | Tutkimusinstituutin näkökulma..... | 19 |
| 5.2.2 | Yrityksen näkökulma..... | 23 |
| 5.3 | 3D-tulostettavat ruostumattomat teräkset..... | 24 |
| 5.4 | 3D-tulostettujen metallinäytteiden tutkimus..... | 24 |
| 5.4.1 | Mikrorakenne..... | 26 |
| 5.4.2 | Kovuusmittaukset..... | 32 |
| 5.4.3 | Iskusitkeys-koe..... | 33 |
| 5.4.4 | Vetokoe..... | 36 |
| 6 | TULOKSET..... | 39 |
| 6.1 | Visuaalinen työkalu..... | 39 |
| 6.2 | Materiaalitarkastelu..... | 39 |
| 6.3 | Materiaalin mikrorakennetarkastelu..... | 40 |
| 7 | POHDINTA..... | 42 |
| | LÄHTEET..... | 44 |
| | LIITTEET..... | 46 |
| | Liite 1. Vuokaavio A1 (850 x 550 mm)..... | 46 |

1 JOHDANTO

Metallien 3D-tulostuksella on merkittävä ja koko ajan kasvava rooli tuotteiden valmistuksessa maailmalla ja vähitellen myös Suomessa. Opinnäytetyön taustalla on Tampereen ammattikorkeakoulun, Tampereen teknillisen yliopiston ja Sastamalan koulutuskuntayhtymän yhteinen kehittämishanke. Hankkeen tavoitteena on ollut rakentaa kaikkiin kolmeen yksikköön toimintaympäristöt 3D-teknologiaan liittyvään soveltavaan tutkimukseen, koulutukseen ja osaamisen siirtoon. Tämä opinnäytetyö on osa TAMKin ja SAS-KYN metallien 3D-tulostuksen kehitystä ja soveltamista. Työssä tarkastellaan TAMKin ja SAS-KYN yhdessä hankkiman 3D-tulostuslaitteen käyttöä ja ohjeistusta ja käydään läpi valmistukseen liittyvät työvaiheet. Työn toisessa osa-alueessa arvioidaan teknologian ja käytettyjen materiaalien merkitystä Suomessa sekä yrityksen että tutkimusinstituutin näkökulmasta. Lisäksi perehdytään materiaalitutkimuksen kautta ruostumattomasta teräksestä tulostettujen tuotteiden ominaisuuksiin. 3D-tulostukseen liittyvät materiaalitutkimuksen tulokset ovat hyvin usein laitekohtaisia, joten perustiedon tuottaminen tulostusparametrien vaikutuksesta tuotteen laatuun sekä saavutettaviin materiaaliominaisuuksiin on tärkeää.

2 LÄHTÖKOHDAT

2.1 Opinnäytetyön taustalla 3D Boosti ja Invest -kehittämishanke

Opinnäytetyö liittyy lokakuussa 2014 alkaneeseen 3D Boosti ja Invest -kehittämishankkeisiin, jotka keskittyvät materiaalia lisäävän valmistuksen kehittämiseen. Hankkeessa ovat yhteistyökumppaneina Tampereen teknillinen yliopisto (TTY), Tampereen ammattikorkeakoulu (TAMK) ja Sastamalan koulutuskuntayhtymä (SASKY). Koulutusyksiköt ovat keskittyneet eri 3D-teknologioihin, mikä on mahdollistanut eri menetelmien vertailun ja uuden tietämyksen siirtämisen nopeasti yritysten ja opiskelijoiden käyttöön. Hankkeen tavoitteena on muodostaa verkosto, joka sisältää kaikki 3D-tekniikkaan liittyvät osa-alueet, kuten perustutkimuksen, kehittämisen, integroinnin, testauksen, soveltamisen ja koulutuksen, yhdeksi kokonaisuudeksi. (3dpirkanmaa 2017.)

Hankkeeseen liittyen syksyllä 2016 toteutettiin TAMKIn ja SASKYn yhteishankintana jauhepetimenetelmään perustuvan metallitulostimen hankinta. SLM Solutions GmbH -yhtiön SLM 125 HL -tulostuslaite sijoitettiin Sastamalaan, Vammalan ammattikoulun metalliosastolle. Metallitulostimen hankinnan myötä on pyritty lisäämään koulutusinstituuttien 3D-tulostusosaamista. Lisäksi on tehty yhteistyötä yritysten kanssa ja kartoitettu yritysten kiinnostusta ja tarpeita metallien 3D-tulostukseen liittyen.

2.2 Opinnäytetyön tarkoitus ja tavoite

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on edesauttaa TAMKIn ja SASKYn metallien 3D-tulostuksen kehitystä ja soveltamista. Opinnäytetyö jakautuu kahteen eri osa-alueeseen. Ensimmäinen osa liittyy SLM 125 HL -laitteen käyttöohjeiden visualisointiin. Ohjeiden käytössä pääkäyttäjät ovat havainneet haasteita kokonaisuuden hallinnassa. Käyttöohjeet on saatavilla sekä suomeksi että englanniksi ja ohjeet ovat varsin yksityiskohtaiset, mutta pääkäyttäjät ovat kokeneet, että heille koulutuksessa saama tieto on ollut aivan ensiarvoisen tärkeää syy-seuraussuhteiden hahmottamisessa eri prosessivaiheiden välillä. Jatkossa tiedon välittämiseksi uusille käyttäjille olisi tärkeää, että ohjeiden päälinjaukset olisivat

käytettävissä ja mahdollisesti selkeästi nähtävillä. Tämän opinnäytetyön tuloksena saadaan A1-kokoinen vuokaavio, johon on koottu tulostuksen päävaiheet ja eri prosessivaiheiden vuorovaikutussuhteet.

Opinnäytetyön toinen osuus liittyy materiaalitutkimukseen ja tulostettavien materiaalien käyttökokemuksiin Suomessa. Haastatteluissa ja kirjallisuustarkasteluissa kartoitetaan suomalaista sekä SLM-menetelmän että materiaalien käyttöä. Materiaalitutkimusosuus nousee tarpeesta ymmärtää 3D-tulostuksella saavutettavat materiaaliominaisuudet, kun puhutaan prosessin ja tuotteiden kaupallisesta tuotteistamisesta. Onkin tärkeää lisätä tietämystä prosessiparametrien vaikutuksesta materiaalin ominaisuuksiin ja mikrorakenteeseen. Lisäksi tavoitteena on tutkia valmistusprosessin vaikutusta eri kohtiin tulostusalustalla sijoittuneiden kappaleiden välillä. Tarkemmissa materiaalitutkimuksissa keskitytään tällä hetkellä TAMKin ja SASKYn käytössä olevan austeniittisen ruostumattoman teräksen AISI 316L (EN 1.4404) tutkimiseen.

2.3 Aiheen merkitys kohderyhmälle

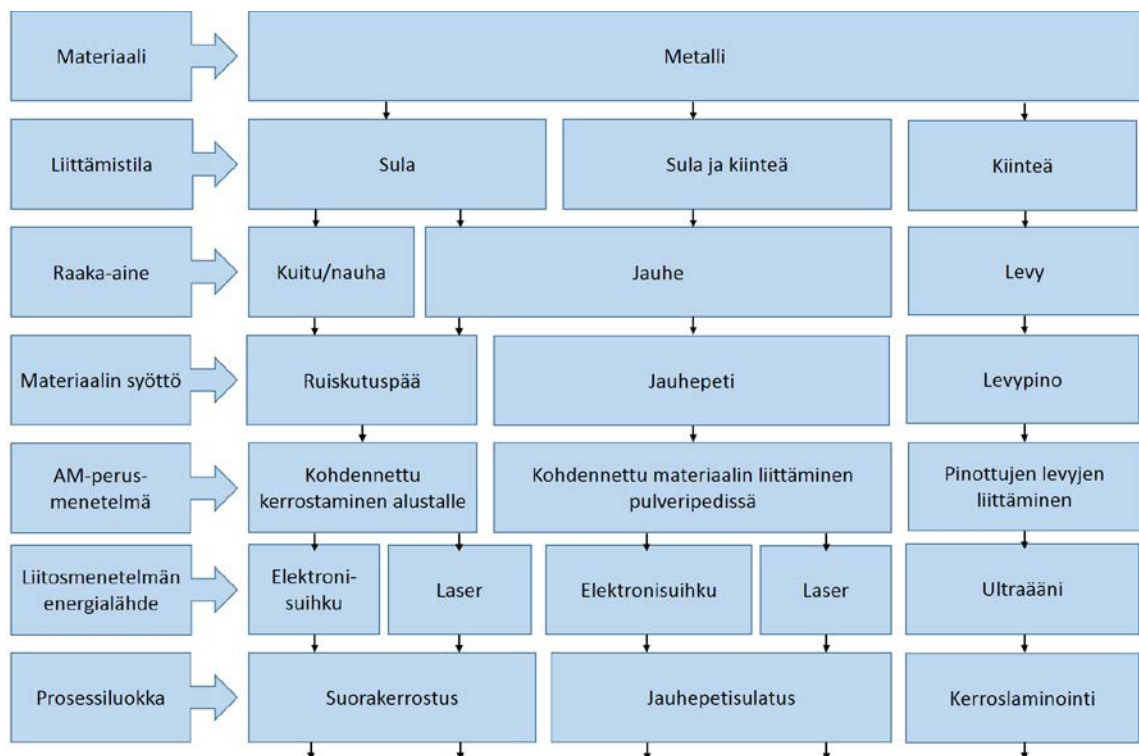
Käyttöohjeiden muokkaamisella muotoon, jossa kokonaisuuden ja tiettyjen prosessivaiheiden kytkeytyminen toisiinsa on helposti tarkistettavissa, on suora vaikutus työntekoon. Erityisesti tilanteessa, kun uusi henkilö aloittaa työskentelyn tai käyttäjällä on ollut tauko 3D-tulostimen käytössä, kaaviosta on helppo ja nopea hahmottaa kokonaisuus ja palauttaa prosessit mieleen.

Materiaalitutkimusosuus on oikeastaan vasta aloitusvaihe materiaalien näkökulmasta TAMKin ja SASKYn 3D-tulostuksen käyttöönotossa. Tutkimustuloksista voidaan jatkaa eteenpäin ja päättää, miten 3D-tulostamisessa tulisi materiaaleja tarkastella ja ylipäätään minkälaisiin asioihin pitäisi kiinnittää huomiota, pitäisikö mahdollisesti testata uusia tulostusparametreja tai kokonaan uusia materiaaleja. Metallijauheiden käsittely ja prosessiparametrien hallinta nousevat varmasti merkittävään rooliin laadukkaiden 3D-tulostettujen tuotteiden valmistuksessa.

3 3D-TULOSTUSTEKNOLOGIAT

3.1 Lisäävä valmistus

Lisäävä valmistus (Additive Manufacturing, AM), tai ehkä yleisesti kansan kielellä paremmin tunnettu 3D-tulostus (3D Printing), sisältää useita erillisiä valmistusmenetelmiä. Standardin EN ISO/ASTM 52900:2017 mukaan materiaalia lisäävä valmistus pitää sisälleen menetelmät, joilla kappale valmistetaan geometriakuvauksen perusteella ainetta lisäävillä tekniikoilla. Menetelmät ovat laajasti käytössä teknologiateollisuudessa, mutta myös lääketieteessä, arkkitehtuurissa sekä lelu- ja viihdeteollisuudessa. Standardi määrittelee erikseen, että 3D-tulostus on materiaalia lisäävän valmistuksen prosessista käytetty termi, kun kappaleen valmistuksessa materiaali kovetetaan käyttämällä kirjoituspäää, suutinta tai muuta tulostusteknologiaa. (EN ISO/ASTM 52900:2017, 8.) Kuviossa 1 esitellään metallien lisäävän valmistuksen prosessien erilaisia vaiheita standardin EN ISO/ASTM 52900:2017 mukaisesti.



KUVIO 1. Metallien lisäävän valmistuksen eri vaiheita (EN ISO/ASTM 52900:2017, 18, muokattu)

Nykyinen metalliteollisuus pohjautuu hyvin pitkälti materiaalia poistavien, kuten sorvaus, jyrsintä, leikkaus, ja muovaavien, esimerkiksi taivutus, särmäys, syväveto, menetelmien hyödyntämiseen. Lisäävässä valmistuksessa kappale suunnitellaan ensin tietokoneella kolmiulotteiseksi malliksi esimerkiksi CAD-ohjelmistolla tai 3D-skannaamalla, minkä jälkeen malli tulostetaan konkreettiseksi kappaleeksi lisäämällä materiaalia äärimmäisen tarkasti vain haluttuihin kohtiin. Materiaalia lisäävä valmistus ei ole korvaamassa perinteisiä valmistusmenetelmiä vaan tulossa niiden rinnalle täydentämään erilaisten tuotteiden valmistusmahdollisuuksia. Materiaalia lisäävän valmistuksen etuja perinteisiin valmistusmenetelmiin ovat mm. fyysisten kappaleiden valmistus suoraan 3D-mallista ja mahdollisuus suunnitella tuotteet toiminnallisuuden, eikä käytettävien valmistustekniikoiden mukaan. Lisäksi pystytään hyödyntämään materiaaleja paremmin ja tekemään entistä kevyempiä tuotteita. Yksi käyttökohde on useiden komponenttien yhdistäminen ja valmistaminen yhtenä osana, mikä vähentää niin varastointi- kuin kokoonpanokustannuksia. Myös tuotteiden läpimeno-prosessia suunnittelusta markkinoille voidaan nopeuttaa merkittävästi. (Vossi 2017)

Metallien lisäävän valmistuksen sovelluskohteet ovat lähes rajattomat. Perinteisesti lisäävä valmistus on keskittynyt nopeaan prototyyppien mallinnukseen ja lähinnä muottien ja työkalujen valmistukseen, joissa sillä on edelleenkin merkittäviä sovelluksia. Nykyisin menetelmällä on keskeinen rooli myös lopputuotteiden valmistuksessa esim. auto- ja lentokone-teollisuuden käytössä. Kohteita ovat myös erilaiset lääketieteelliset sovellukset, kuten implantit, sillä menetelmä sopii erinomaisesti yksilöllisten tuotteiden valmistukseen. Ainetta lisäävä valmistustekniikka, käytettävät laitteet ja materiaalit ovat suuren kiinnostuksen kohteita ja nopean kehityksen alla, minkä ansiosta tekniikan käyttökohteetkin lisääntyvät koko ajan. Tekniikalle onkin tyypillistä niin teknologioiden kuin myös sovelluskohteiden suuri laaja-alaisuus. (Piili & Salminen 2016, 6.)

Kappaleet, joissa on sisäisiä kanavia tai verkkomaisia rakenteita, ovat hyviä esimerkkejä tuotteista, joissa lisäävällä valmistuksella voidaan saavuttaa niin mahdottomilta tuntuvien rakenteiden valmistaminen, kustannussäästöt kuin komponentin parempi suorituskykykin. 3D-tulostuksen etujen maksimaalinen hyödyntäminen edellyttää, että valmistusmenetelmä olisi huomioitava tuotesuunnittelussa heti alusta asti. Suunnittelijoiden olisi osattava kyseenalaistaa vanhoja tapoja ja irtautua perinteisistä koneensuunnittelun periaatteista. Kuitenkin myös 3D-tulostuksen asettamat rajoitteet, kuten ongelmalliset yli 45°

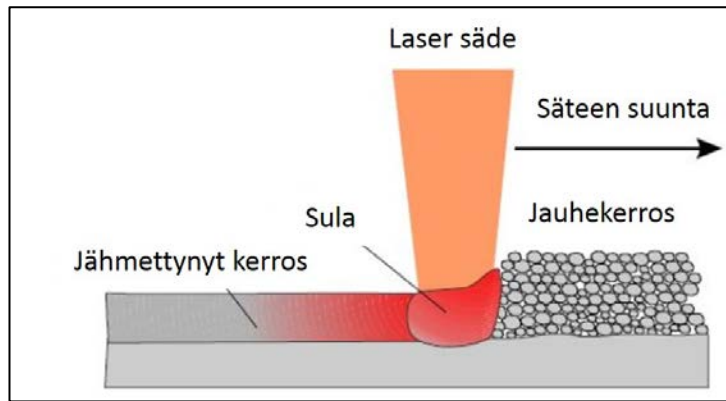
asteen kulmat tai pyöreät muodot, olisi hyvä ottaa huomioon jo kappaletta suunniteltaessa. (Piili & Salminen 2016, 10.)

3.2 Selective Laser Melting -menetelmä

Selective Laser Melting (SLM) eli valikoiva lasersulatus -menetelmä on yksi materiaalia lisäävistä valmistusmenetelmistä. Standardin mukaan se luokitellaan jauhepetisulatusmenetelmäksi, jossa yhdellä tai useammalla laserilla tuotettu lämpöenergia sulattaa jauhepeidin kohdennettuja alueita. (EN ISO/ASTM 52900:2017, 7.). SLM-menetelmässä käytetään prosessin kuvauksesta myös termiä 3D-tulostus. Kappaleet valmistetaan kolmiulotteiseksi kerros kerrokselta jauhemaisesta lähtömateriaalista. Menetelmä on yleisesti käytössä metallien tulostuksessa. Metallin hapettumisen ja jauheen reagoinnin estämiseksi kammio on suojakaasussa tulostusprosessin ajan. (Operating manual Selective Laser Melting System 2015, 42.)

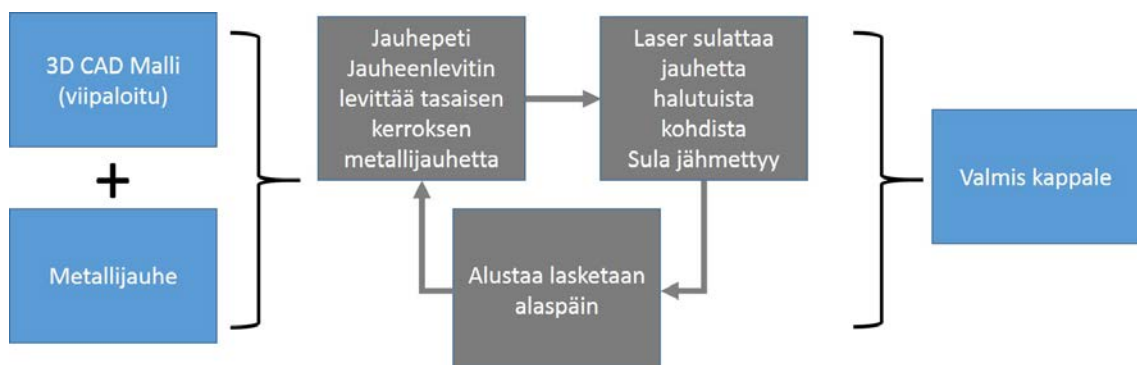
SLM-menetelmässä tuotteen valmistus aloitetaan luomalla halutusta kappaleesta 3D CAD (Computer Aided Design) -malli. Ennen kuin malli voidaan siirtää tulostuslaitteelle, tiedosto pitää muuttaa STL-tiedostomuotoon (STereoLithography), jossa 3D-mallin geometria määritellään tasokolmioiden avulla. Malli viipaloidaan ohuisiin kerroksiin, n. 20 – 100 µm, jotka muodostavat 2D-poikkileikkauksia. Metallijauheista tulostettava rakenne tarvitsee lähes aina myös tukirakenteita, sillä jauhe ei tue valmistettavaa rakennetta, joten tulostukseen lisätään tarvittavat tukirakenteet ja määritellään halutut tulostusparametrit, kuten kappaleen orientaatio alustalla. Lopuksi tiedosto siirretään tulostuslaitteelle. Valmistusprosessissa yksi viipaloitu kerros vastaa yhtä tulostuskerrosta.

Kappaleen valmistus perustuu sykliseen prosessiin, jossa vaiheet toistuvat, kunnes kappale on lopulta valmis. Ensin jauheenlevitin levittää metallijauhetta tasaiseksi kerrokseksi, jonka paksuus on 20 – 100 µm. Metallijauhe sulatetaan tehokkaalla lasersäteellä (400 W) juuri halutusta kohdasta tiedoston määrittelemän kerroksen mukaisesti. Lasersäteen energia imeytyy metallijauheeseen ja saa metallijauheen lämpiämään metallin sulamislämpötilan yläpuolelle. Kuva 1 esittää sulatusprosessin periaatetta. (Operating manual 2015, 43.)



KUVA 1. SLM-prosessissa yhden kerroksen periaatekuva (Meiners 2011, 10, Hovilehdon 2016, 12 mukaan, muokattu)

Tavoitteena on, että jauhe sulaa riittävän isolta alueelta, jolloin saadaan muodostumaan vakaa sulavyöhyke, eikä kerrosten väliin jää tyhjää tilaa. Tuloksena on sulametallurginen sidos, jonka ansiosta rakenteesta muodostuu tiivis, ilman huokoisuutta oleva rakenne. Kun kerros on valmis, alustaa lasketaan alaspäin ja sykli alkaa alusta. SLM-menetelmän kuvaus on kuviossa 2. (Operating manual 2015, 43).



KUVIO 2. SLM-menetelmän kuvaus

Tulostuksen päätyttyä ylimääräinen metallijauhe kierrätetään uudelleen käytettäväksi. Prosessin ajan kammio on suojakaasussa, millä estetään metallin hapettuminen. Suoja-kaasuna voidaan käyttää argonia tai typpeä. Lisäksi alustalevy voidaan lämmittää prosessin aikana jopa + 200°C, mikä vähentää kappaleen jännityksiä. (Operating manual 2015, 43.)

Kappaleet tulostetaan alustalevyllä, josta ne irrotetaan esim. sahaamalla. Erityisesti metalliosien tulostukseen liittyy irrotuksen ja tukirakenteiden poiston lisäksi erilaisia jälkikäsittelyvaiheita. Jos valmistettu kappale ei täytä pinnan tarkkuus- ja laatuvaatimuksia,

jälkikäsittelyt, kuten lämpökäsittely, koneistus ja hionta ovat välttämättömiä. Käsillä tehtyä jälkikäsittelyä voidaan tarvita, jos kappaleessa on monimutkaisia muotoja. (Vaajoki, Metsä-Kortelainen 2016, 5.)

4 KÄYTTÖOHJEET

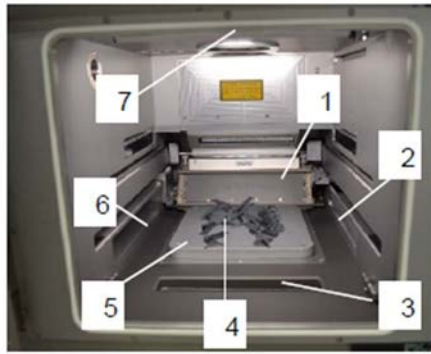
4.1 SLM 125 HL -laite

TAMKin ja SASKYn yhteishankinta on SLM 125 HL -laite (Kuva 2). Laite on saksalaisen SLM Solutions GmbH -yrityksen valmistama metallien 3D-tulostin. Laite käyttää Selective Laser Melting -menetelmää, jolla valmistetaan metallisia kolmiulotteisia kappaleita kerros kerrokselta. Metallia on prosessissa jauheena, joka sulatetaan laserilla.



KUVA 2. SLM 125 HL -laite (Operating manual 2015, 1)

Laitteen alustan koko on $125 \times 125 \text{ mm}^2$ ja korkeus 125 mm, mitkä asettavat tulostettavalle kappaleelle teoreettisen maksimikoon. Käytännössä tulostuksessa on huomioitava myös kiinnitys, joten koko alustan ala ei ole käytettävissä. Tyypillisesti tulostettavat kappaleet ovat kuitenkin pienempiä ja alustalla on useampia kappaleita kerralla. Laite on suunniteltu 24 tunnin jatkuvaan käyttöön. Kuvassa 3 esitellään laitteen prosessikammio ja sen eri osia (Käyttöohje Selective Laser Melting –laite 2015, 43)



1. Jauheenlevitin
2. Kaasun (Argon) tuloaukko
3. Ylivuoto, edessä
4. Tulostettava kappale
5. Alustalevy
6. Kaasun poistoaukko
7. Valo, vieressä laserin suojalasi

KUVA 3. Prosessikammio (Operating manual 2015, 43, muokattu)

Taulukossa 1 esitellään laitteen teknisiä ominaisuuksia. (Operating manual, 2015, 33-40.)

TAULUKKO 1. SLM 125 HL -laitteen teknisiä ominaisuuksia

| | |
|------------------------|--|
| Kammion koko | 125x125x125 mm ³ |
| Laserlähde | 400W IPG kuitulaser |
| Suojakaasu | Typpi/Argon |
| Kasvatus nopeus | 25 cm ³ /h |
| Materiaalit | Ruostumattomat teräkset, työkaluteräkset, CoCr, Inconel, titaaniseokset, alumiiniseokset, yms. |
| Metallijauheen raekoko | 10 – 63 μm |

4.2 Vuokaaviotekniikka

Vuokaaviot ovat kaavioita, jotka näyttävät prosessin vaiheet. Vuokaaviotekniikassa prosessin eri vaiheita kuvataan erilaisilla symboleilla, jotka on kytketty toisiinsa nuolilla. Kaaviossa prosessi etenee alusta loppuun. Perusvuokaavioita on helppo luoda, ja ne ovat selkeitä. Koska vuokaavioiden muotokieli on yksinkertaista ja visuaalista, prosessin etenemistä on helppo ymmärtää kaavion avulla. (Flow Chart Definition 2017.)

Vuokaavio on optimaalinen työkalu vaihtoehtoisten prosessivaiheiden kuvaamiseen, jos esimerkiksi prosessissa päädytäänkin vaihtoehtoon, että prosessi joudutaan aloittamaan

uudelleen. Vuokaavioita käytetään pääasiallisesti analysoinnissa, suunnittelussa ja dokumentoinnissa. Kaavioiden luonti, prosessien mallinnus ja tietojen visualisointi voivat tuottaa positiivisia tuloksia. (Flow Chart Definition 2017.)

4.3 Prosessien kuvaus

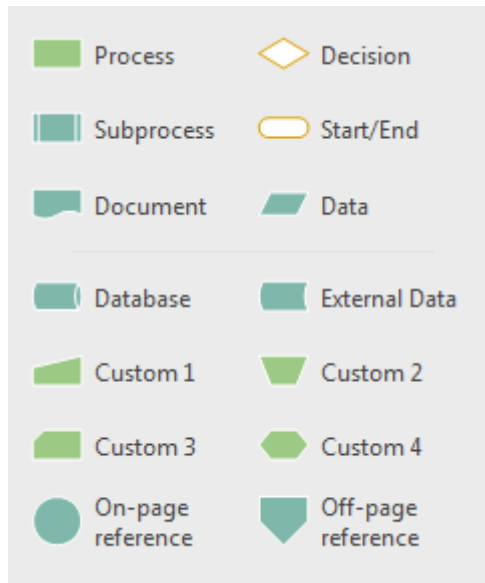
3D-tulostuksella valmistettujen kappaleiden tuotantoprosessi rakentuu useasta eri vaiheesta. Kokonaisuus koostuu ennen varsinaista tulostusta tapahtuvasta materiaalien eli jauheiden hallinnasta, tulostusprosessista ja tulostuksen jälkeisistä toimenpiteistä. Käyttöohjeet SLM 125 HL -tulostimelle muodostuvat erilaisista pää- ja aliprosesseista. Kaikkien näiden erilaisten vaiheiden ja prosessien syy- ja seuraussuhteiden kuvaamiseksi päätettiin käyttää vuokaaviota. Perusvuokaavioiden muotokieli on yksinkertaista ja visuaalista, joten niitä on helppo ymmärtää.

Käyttöohjeiden ja prosessien eri vaiheiden kuvaamiseen käytettiin Microsoft Visio 2016 -ohjelmaa. Ohjelmassa on mahdollista rakentaa selkeä perusvuokaaviomalli, jossa erilaiset muodot edustavat prosessin erilaisia vaiheita. Visio-muodoilla on nimet, jotka kuvaavat niiden yleisimpiä käyttötarkoituksia. Muodoille ei kuitenkaan ole olemassa yhtä yleistä vakiomerkitystä, vaan muodot voivat sisältää mitä tahansa merkityksiä. Useimmissa vuokaavioissa käytetään vain kolmea tai neljää muotoa. (Microsoft Visio 2017.)

Tulostusprosessi paloiteltiin yksityiskohtaisempiin työvaiheisiin, jotka kuvattiin niin tarkasti kuin se on hyödyllistä kokonaiskuvan muodostumisen kannalta. Liian yksityiskohtainen kuvaus tai toisaalta erikoisempien työvaiheiden kuvaus ei ollut prosessikuvauksen tavoitteena, vaan silloin vuokaaviossa on mahdollisesti viittaus käyttöohjeisiin. Työvaiheiden loogisen etenemisen hahmottamista varten haastateltiin SLM 125 HL -tulostuslaitteen pääkäyttäjiä ja prosessien tarkempiin kuvauksiin käytettiin laitteen englanninkielistä Operating manual Selective Laser Melting System 2015 -käyttöopasta.

Vuokaaviossa jaoteltiin tietyt tulostusprosessin työvaiheet, joista käyttäjä todennäköisesti aloittaa työskentelynsä. Kyseisiin työvaiheisiin käytettiin Aloita/Lopeta-muotoa ja prosessin etenemisen jatkumista kuvattiin Prosessi- tai Alaprosessi-muodoilla. Poikkeuksellisesti alemman tason prosessien otsikoihin käytettiin ruutumaista Päätös-muotoa, minkä ansiosta alaprosessien visuaalinen erottuminen kaaviossa oli selkeämpää. Ulkopuolisissa

huomautuksissa käytettiin Asiakirja-muotoa. Erilaisia Microsoft Visio muotoja on esitelty kuvassa 4. Vuokaaviossa kuvatut pääprosessit on listattu taulukkoon 2. Lisäksi vuokaaviossa käytettiin kuvia selventämään haastavia kohtia, lähinnä laitteiston osia. Vuokaavioon kirjatut prosessit tarkastettiin käytännössä Sastamalassa tulostinlaitteella. Prosessien eteneminen ja vaiheet, jauheiden sihtaus, tulostuksen aloitus ja tulostuksen lopetus käytiin läpi varsinaisen tulostustyön edetessä.

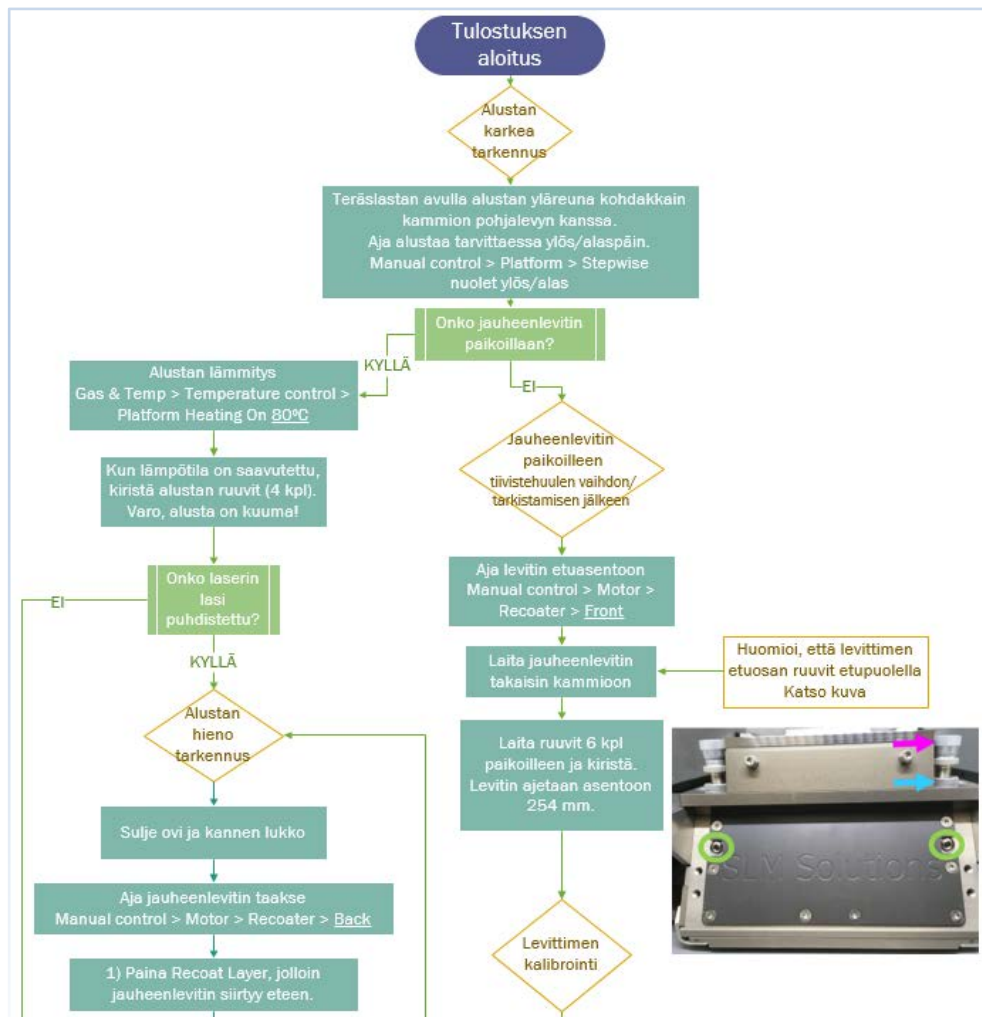


KUVA 4. Microsoft Visio 2016 muotoja

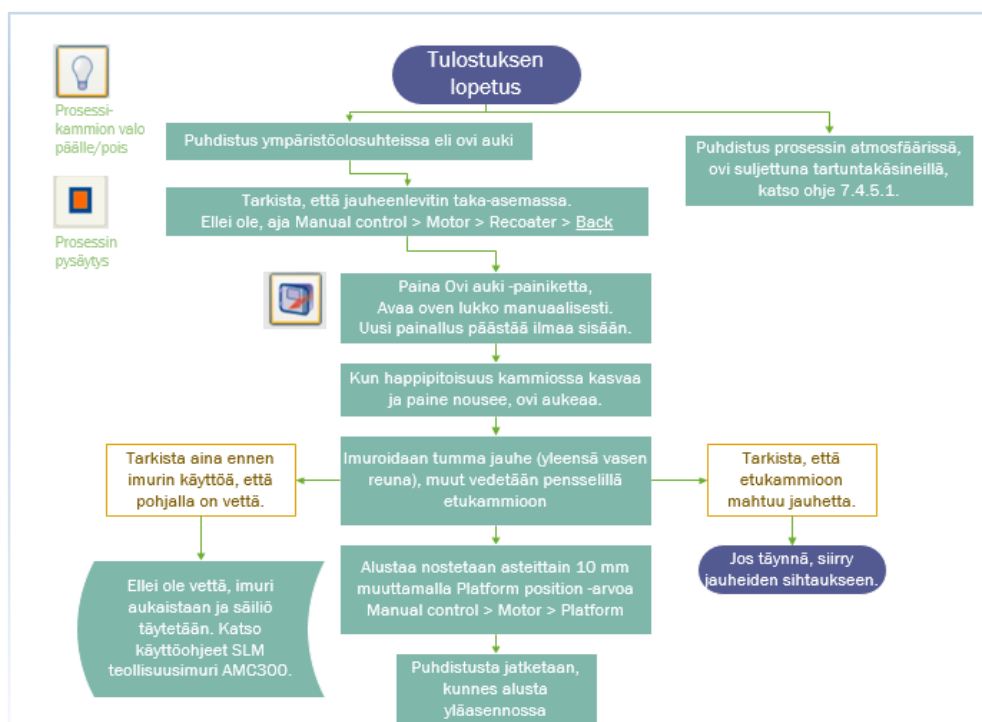
TAULUKKO 2. Vuokaaviossa kuvatut 3D-tulostukseen liittyvät pääprosessit

| |
|-----------------------------------|
| Tulostuksen lopetus |
| Tulostuksen aloitus |
| Tulostuksen suoritus |
| Jauheiden sihtaus |
| Tulostettujen kappaleiden irrotus |
| Alustan puhdistus |
| Ylivuotosäiliön poisto |

Kuvioissa 3 ja 4 on esitelty Tulostuksen aloitus ja Tulostuksen lopetus -vaiheiden rakentuminen vuokaavioksi. Lopulliseksi kokonaisuudeksi visuaalisesta ohjeesta muodostui A1-kokoinen vuokaavio, joka on kuvattu liitteessä 1.



KUVIO 3. Tulostuksen aloitus -prosessikuvausta vuokaaviossa



KUVIO 4. Tulostuksen lopetus -prosessikuvausta vuokaaviossa

5 MATERIAALITARKASTELU

5.1 SLM-tekniikalla 3D-tulostettavat metallimateriaalit

Kun puhutaan SLM-tekniikalla 3D-tulostettavista metallimateriaaleista, puhutaan aina jauheista. Yleensä jauheet hankitaan laitetoimittajien kautta, sillä laitevalmistajat ovat testanneet erilaisten jauhemateriaalien toimivuutta ja usein antavatkin jauheiden mukana myös prosessiparametrit 3D-tulostusta varten. Valmistettava kappale, käyttöolosuhteet ja vaatimukset asettavat lopulliset vaatimukset käytettävälle materiaalille.

Yleisesti ottaen kaikista metallimateriaaleista, joita voi hitsata huoneen lämpötilassa, voidaan valmistaa tuotteita SLM-tekniikalla. Myös jauheen juoksevuus on tärkeää, sillä SLM-tekniikassa jauhe levitetään alustan pinnalle mekaanisesti jauhelevittimellä, joka annostelee jauhetta tietyn määrän prosessissa käytettävän kerrospaksuuden mukaan. Jotta jauhe levittyy tasaisesti, jauheen juoksevuus on merkittävä tekijä. Jauheen partikkelien pallomaisuus ja partikkelikokojakauma vaikuttavat juoksevuuteen. Mitä pallomaisempia partikkeleita ja mitä kapeampi kokojakauma on, sitä juoksevampaa on jauhe. Lisäksi merkitystä on myös partikkelikoolta, joka ei saisi olla liian pientä, eikä liian suurta, jotta levitettävä kerros olisi tasainen. Tulostuksen laatuun vaikuttaa myös kammion happipitoisuus, jonka pitäisi olla alle 0,1 %. (Li ym. 2012, 1025; Jokinen & Riipinen, 2016.)

Sandvikin Materials Technology (Sandvik 2017) ilmoittaa lukuisia jauhemaisia materiaaleja käytettäväksi lisäävässä valmistuksessa, mikä ei siis rajoitu pelkästään SLM-menetelmään. Laite- ja jauhevalmistaja SLM Solutions GmbH (SLM Metal Powder 2017) listaa materiaalivaihtoehtoihin titaanin ja titaaniseoksia, työkaluteräksiä, ruostumattomia teräksiä, alumiiniseoksia, koboltti-kromiseoksia ja nikkelseoksia. Suomessa SLM-menetelmällä yleisimmin käytössä olevia materiaaleja ovat AlSi12-alumiiniseos, Inconel 625 -nikkelseos, AISI 316L austeniittinen ruostumaton teräs, maraging teräs, H13-kuumatyöstöteräs, hopea, pronssi ja koboltti-kromi-seos (3DStep, AM Finland, VTT).

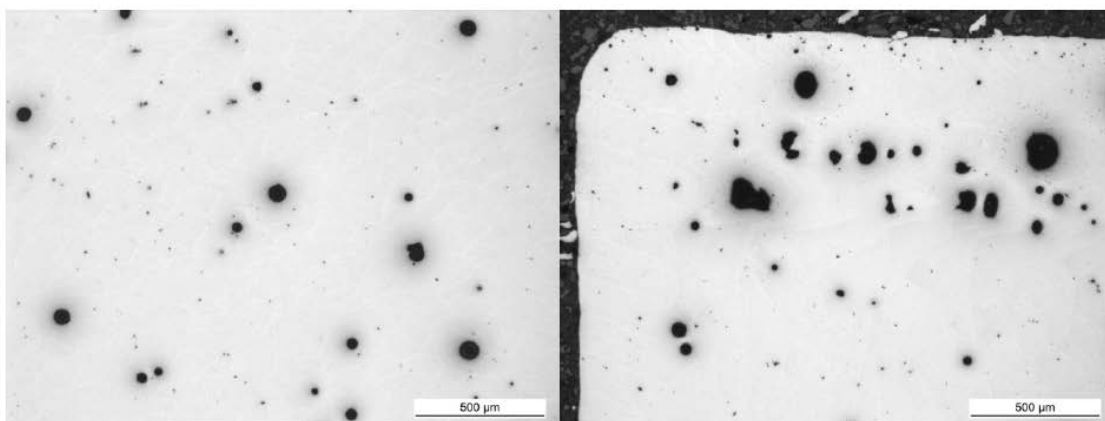
5.2 Käyttökokemukset materiaaleista Suomessa

5.2.1 Tutkimusinstituutin näkökulma

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy on toiminut Suomessa edelläkävijänä SLM-menetelmän tutkimuksessa. VTT:llä on ollut vuodesta 2015 käytössä Suomen ensimmäinen SLM Solutionsin laite, SLM 125 HL -tulostinlaite (Vossi 2015). Heillä on ollut useita 3D-tulostukseen ja SLM-menetelmään liittyviä projektikokonaisuuksia yhteistyössä eri yritysten kanssa. VTT:llä on erittäin korkeatasoista metallurgian ja kappaleiden osaamista ja he ovatkin panostaneet vahvasti uudenlaisen suunnitteluosaamisen kehittämiseen, jotta 3D-tulostuksen koko potentiaali saataisiin käyttöön. (Komi 2016.) Yhtenä tutkimusalueena on ollut 3D-tulostukseen soveltuvien materiaalien ja materiaaliyhdistelmien ominaisuuksien tutkiminen ja kehittäminen. Raaka-aineena käytettävä jauhe ja sen ominaisuudet, tulostuksen lukuisat eri parametrit ja erilaiset jälkikäsittelyt ovat merkittävässä roolissa laadukkaiden tuotteiden valmistuksessa. (Jokinen & Riipinen, 2016.)

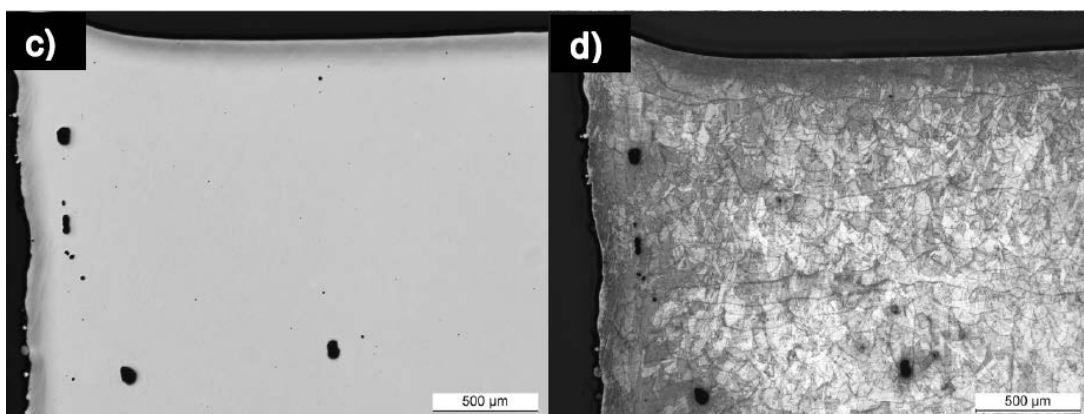
VTT:n materiaalitutkimuksissa selvitettiin käytettävien materiaalien ominaisuuksien ja valmistusparametrien avulla parhaat ominaisuusyhdistelmät. Tutkimuksiin valittiin suomalaisen valmistavan teollisuuden käyttämiä materiaaleja, kuten alumiiniseos AlSi12, joka on myös kaupallinen valuseos, nikkelpohjainen superseos Inconel 625, austeniittinen ruostumaton teräs AISI 316L, työkaluteräs AISI H13 ja teknisesti puhdas alumiini (Al 99,7 %). Tutkimuksessa oli myös saman materiaalin eri jauhevalmistajien vertailua. Materiaaleista tulostetuista näytteistä tutkittiin mikrorakenne ja huokoisuus ja lisäksi näytteille tehtiin kovuus- ja vetokokeita sekä tutkittiin lämpökäsittelyn vaikutusta materiaaliominaisuuksiin. Tutkimuksissa käytettiin myös matemaattista koesuunnittelua ja simulointia prosessiparametrien määrittelyyn. (Jokinen & Riipinen 2016.)

Vetokoetulosten perusteella AlSi12-sauvojen myötölujuus vastasi valmistajan antamia arvoja, mutta murtolujuus ja murtovenymä jäivät selvästi pienemmiksi. Syynä oli materiaalin huokoisuus, joka oli noin 2 %. (kuva 5). Huokoisuus voi johtua lasersulatuksen parametreista, jotka eivät ehkä olleet optimaaliset, tai materiaali jauheen liian suuresta kosteuspitoisuudesta, mikä siis aiheuttaa kaasuhuokoisuuden muodostumista. Jos verrataan 3D-tulostettua ja hiekkavalettua alumiiniseosta keskenään, niin 3D-tulostuksella saadaan paremmat lujuusarvot, mutta alhaisemmat sitkeysominaisuudet. (Jokinen & Riipinen 2016, 9.)



KUVA 5. Kiillotetun AISi12-näytteen mikrorakennetta (Jokinen & Riipinen 2016, 9)

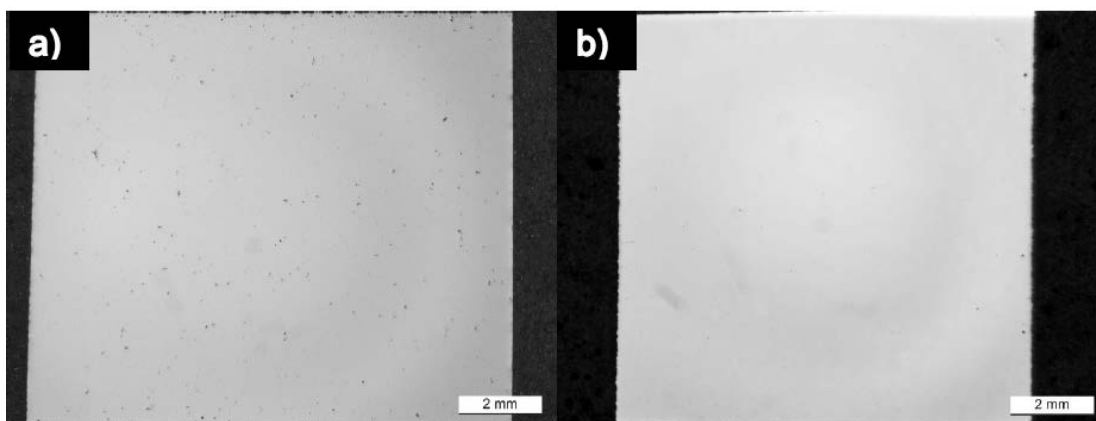
Inconel 625 -nikkeliseoksen tulostetuista näytteistä osa tutkittiin valmistustilassa ja osalle tehtiin jännitystenpoistohehkutus. Kun verrataan vetokoetuloksia 3D-tulostuksen ja perinteisesti valmistetun levyn välillä, niin 3D-tulostuksella saadaan selvästi suurempi myötölujuus, murtolujuus on samaa suuruusluokkaa, mutta sitkeys jää alhaisemmaksi. Sitkeyteen voi tosin vaikuttaa erilaiset lämpökäsittelyt. Toisaalta osalle näytteistä tehty jännitystenpoistohehkutus ei vaikuttanut tuloksiin, ei myöskään vetosauvojen erilaiset tulostussuunnat valmistusprosessin aikana. Kovuusmittauksissa havaittiin, että jännitystenpoistohehkutus vähentää näytteiden kovuutta noin 10 %. Näytteen suhteellinen tiheys oli noin 99,7 % (kuva 6). (Jokinen & Riipinen 2016, 11-16.)



KUVA 6. Kiillotetun (c) ja etsatun (d) Inconel 625-näytteen poikkileikkaus (Jokinen & Riipinen 2016, 13)

Haponkestävää austeniittista ruostumatonta terästä, AISI 316L myös EN 1.4404, käytetään hyvin yleisesti 3D-tulostuksessa SLM-menetelmällä. Tutkimusjulkaisujen määristä voidaan myös päätellä, että AISI 316L on teräksistä eniten tutkittu. VTT:n tutkimuksissa

havaittiin, että 316L-vetosauvojen tuloksissa oli eroja riippuen siitä, missä asennossa sauvat oli tulostettu. Vaakaan ja 45° kulmaan tulostetuilla sauvoilla lujuusarvot olivat suurimmat ja pystysuunnassa tulostetuilla sauvoilla venymäarvot olivat selvästi alhaisemmat. Kovuustutkimuksissa havaittiin, että arvot vaihtelivat riippuen, miltä pinnalta kovuus mitattiin. Kovuus kerrostussuunnan mukaisesti oli alhaisempi kuin kerrostussuuntaa vasten kohtisuoralta pinnalta. Tutkimuksissa määriteltiin materiaalille myös optimaalisempia tulostusparametreja ja havaittiin, että jauhepeti ei sula riittävästi, jos energiatiheys on liian alhainen, mikä aiheuttaa huokoisuuden lisääntymistä materiaalissa. Lisäksi havaittiin, että laserin skannausviivojen välisen etäisyyden (hatch distance) suuri arvo voi myös johtaa huokoisuuteen. Kuvassa 7 on esitetty valmistajan antamilla parametreilla ja tutkituilla optimaalisilla parametreilla tulostettujen näytteiden poikkileikkauskuvat. Voidaan päätellä, että tulostusparametrien hallinnalla on todella merkittävä vaikutus tulostettavien kappaleiden laatuun. (Jokinen & Riipinen 2016, 15-19.)



KUVA 7. AISI316L näytteiden poikkileikkauskuvat valmistajan parametreilla (a) ja optimaalisilla (b) (Jokinen & Riipinen 2016, 19)

Työkaluteräksessä AISI H13, myös EN 1.2344, on kromi-molybdeeni-vanadiiniseostus. Teräkselle on ominaista hyvät lujuus-, sitkeys- ja virumisominaisuudet korkeissa lämpötiloissa, joten käyttökohteet löytyvätkin lämmönkestoja vaativista sovelluksista. H13-teräsnäytteiden tiheyttä optimoitiin etsimällä tulostusparametreista, kuten tehosta, skannausnopeudesta ja skannausviivojen välisestä etäisyydestä yhdistelmä, joka antaisi ilman huokoisia olevan rakenteen. Prosessiparametrit on esitetty taulukossa 3. (Jokinen & Riipinen 2016, 21.)

TAULUKKO 3. Työkaluteräksen H13 prosessiparametrit (Jokinen & Riipinen 2016, 21)

| Parametri | Teho (W) | Skannausnopeus (mm/s) | Viivan etäisyys (μm) |
|---------------------|----------|-----------------------|-----------------------------------|
| SLM | 175 | 750 | 120 |
| Ajo 76 optimaalinen | 175 | 869 | 90 |
| Ajo 77 optimaalinen | 204 | 928 | 100 |

Näytteitä jätettiin valmistustilaan ja osalle tehtiin jännitystenpoistohehkutus sekä karkaisu ja päästö. Näytteiden tutkimisessa ja mittauksessa otettiin huomioon tulostussuunta. Kovuus havaittiin jännitystenpoistohehkutuksen jälkeen matalammaksi. Vetokokeiden tuloksista havaittiin, että teräs on valmistustilassa kovaa ja haurasta ja murtovenymä on pieni. Karkaistuilla ja päästetyillä näytteillä saavutettiin suurimmat myötö- ja murtolujuuden arvot, jotka ovat suuruudeltaan samaa luokkaa kuin perinteisesti valmistetunkin H13-teräksen. Mutta 3D-tulostetulla teräksellä murtovenymä jää alhaiseksi, arvo on noin 1 %, kun perinteisellä valmistusmenetelmällä murtovenymä on luokkaa 13 – 15,4 %. Tähän saattaa vaikuttaa näytteiden reunalla oleva huokoisuus, mikä heikentää sitkeyttä. Mikrorakennetarkastelussa havaittiin, että kun skannausviivojen etäisyys oli 120 μm , rakenteeseen oli jäänyt sulamattomia alueita. Kun taas näytteistä, joissa etäisyys oli 100 μm , sulamattomia alueita ei havaittu ja lisäksi näytteistä mitattiin myös alhaisin huokoisuus. (Jokinen & Riipinen 2016, 20-26.) Rakenteessa oli näkyvissä huokosia reunalla, mikä on havaittu muissakin tutkimuksissa SLM-menetelmään liittyväksi piirteeksi ja ongelmaksi (Yusuf ym. 2017, 5).

VTT:n tutkimusten perusteella kaupallisilla materiaaliseoksilla AlSi12-seosta lukuun ottamatta päästään 99,7 – 99,98 % suhteelliseen tiheyteen. 3D-tulostamalla valmistettujen materiaalien lujuudet vastaavat lähinnä perinteisesti muokkaamalla valmistettujen vastaavia lujuuksia, mutta sitkeys verrattuna perinteisesti valmistettuihin oli etenkin H13- ja AlSi12-materiaaleilla huonompi. Tulostussuunnalla oli vaikutusta 316L-teräksen lujuusominaisuuksiin, jotka olivat parhaimmat vaakaan ja 45° kulmassa tulostetuilla näytteillä. Samanlaista ilmiötä ei havaittu Inconel 625 ja H13 materiaaleilla. (Jokinen & Riipinen, 2016.)

Uusien materiaalien kehitystyössä isossa roolissa ovat kokeellinen tutkimus ja lukuisat eri parametriyhdistelmien testaukset. Tavoitteena on, että kokeellista tutkimusta voitaisiin vähentää matemaattisen koesuunnittelun ja simuloinnin avulla. Kun jatkossa laitteet edelleen kehittyvät ja on mahdollista tulostuksenaikaiseen prosessin monitorointiin, myös useampia materiaaleja on mahdollista käyttää 3D-tulostuksessa. (Jokinen & Riipinen 2016, 30.)

5.2.2 Yrityksen näkökulma

Metallimateriaalien tulostuksen käyttökokemuksien kartoitusta varten haastateltavina olivat 3DStep Oy:n teknologiajohtaja Vesa Kananen ja 3D-tulostusinsinöörit Petri Ehonsalo ja Tuomo Liukku. Yrityksellä on Suomen suurin kaupallisten tuotteiden valmistukseen käytössä oleva metallien 3D-tulostin SLM Solutionsin SLM 280 HL -laite. (Kananen, Ehonsalo & Liukku 2017.)

Laitteella tulostettavia materiaalivaihtoehtoja ovat alumiiniseos AlSi10Mg, työkaluteräs ja ruostumaton teräs. Eri materiaalien kanssa toimittaessa haasteet alkavat yhden koneen käytöllä materiaalin vaihdossa. Alumiinille ja teräksille on omat ns. vaihtosarjat, joihin kuuluu kaksi karkeaa suodatinta, hieno suodatin, jauheenlevitin, kaikki säiliöt sekä lisäksi letkuja ja putkia. Alumiini jauheena on terästä kevyempää ja pölyävämpää, mikä pitää käsittelyssä ottaa huomioon. Lisäksi alumiini on reaktioherkempää, mikä pitää myös huomioida. Käytännössä alumiinitulostuksen jälkeen imuri on syytä olla heti oven aukaisusta asti päällä. Jauheen puhdistukseen pitää myös varata enemmän aikaa, sillä liikkeiden täytyy olla rauhallisempia ja jos alumiinijauhe lähtee pölisemään, on ovi suljettava ja tilanteen annettava rauhoittua. Myös jauheen sihtauksessa on omat vaihto-osat eri materiaaleille. Lisäksi sihtausosa on imuroitava ja pyyhittävä isopropanolilla jokaisen materiaalinvaihdon välillä, myös eri terästen välillä. (Kananen, Ehonsalo & Liukku 2017.)

Teräksillä tulostettavien kappaleiden tukirakenteiden suunnitteluun ja myös tulostusorientaation suunnitteluun on kiinnitettävä enemmän huomiota kuin alumiinilla. Alumiinin hyvän lämmönjohtavuuden ansiosta vähäisemmät tukirakenteet kappaleille ovat mahdollisia. Alumiinin tulostusparametreissa tulostusnopeus ja laserin teho ovat suurempia, joten laserin synnyttämä sula-alue on suurempi ja ei niin hallittu verrattuna teräksien sula-alueeseen. Tästä seuraa, että teräksillä tulostuksen jälkeinen pinnanlaatu on parempi ja myös tarkemmat yksityiskohdat rakenteessa ovat mahdollisia. Lisäksi alumiini on tulostuksen jälkeen lujempaa ja kovempaa ja siten myös hauraampaa kuin mitä esim. valettu alumiinimateriaali. Yleensä alumiinikappaleille tehdäänkin lämpökäsittely tulostuksen jälkeen. (Kananen, Ehonsalo & Liukku 2017.)

Yritykset ovat eniten kiinnostuneita ruostumattomasta teräksestä ja seuraavana kiinnostuksen kohteena tulee alumiini. Myös titaani tulostusmateriaalina kiinnostaa yrityksiä. On ollut yllättävää, että perinteisten konepajayritysten lisäksi myös huomattavasti eksoottisemmatkin toimijat ovat olleet teknologiasta ja sen tuomista mahdollisuuksista kiinnostuneita. Kuvaava on myös, että yrityksen koolla ei ole suurta merkitystä, vaan isojen yritysten lisäksi myös hyvinkin pienet yritykset ovat lähteneet soveltamaan 3D-printtausta valmistukseensa. Piensarjojen tuotannossa ja useamman erilaisen kappaleen yhtäaikaissa tulostuksessa parannetaan myös yrityksen kannattavuutta. (Kananen, Ehonsalo & Liukku 2017.)

5.3 3D-tulostettavat ruostumattomat teräkset

Ruostumattomat teräkset ovat rautapohjaisia seoksia, joiden kromipitoisuus on vähintään 10,5 %. Ruostumattomien terästen hyvä korroosionkestävyys perustuu kromin ja hapen ansiosta teräksen pinnalle muodostuvaan tiiviiseen kromioksidikerrokseen. Hapettavissa olosuhteissa, vaikka kerros rikkoutuu, sillä on kyky uusiutua, kun pinta reagoi hapen kanssa. Ruostumattomien terästen neljä pääryhmää muodostuvat metallin kiderakenteen mukaan. Ryhmät ovat austeniittiset, ferriittiset, austeniittis-ferriittiset eli duplex-teräkset ja martensiittiset ruostumattomat teräkset. Ruostumattomista teräksistä eniten käytetään austeniittisiä ruostumattomia teräksiä, joilla on erinomainen sitkeys yhdistettynä kohtalaiseen lujuuteen. Ne ovat siis hyvin muovattavia, sitkeitä matalissa lämpötiloissa, hyvin hitsattavia ja lujuus säilyy korkeissakin lämpötiloissa. Seosaineista austeniittiset teräkset sisältävät kromia vähintään 17 % ja nikkeliä 7 %. Ilman seostusta huoneenlämmössä oleva ferriittinen rakenne muuttuu juuri nikkelseostuksen avulla austeniittiseksi mikro-rakenteeksi. 2 – 3 % molybdeeniseostuksella saadaan haponkestäviä teräksiä. (Koivisto ym. 2008, 144-147.)

Korroosion- ja haponkestävä austeniittinen ruostumaton teräs AISI 316L, eurooppalaisen standardin nimikettä käyttäen EN 1.4404, on yleisesti 3D-tulostuksessa käytetty materiaali. TAMKin ja SASKYN laitteissa on käytössä austeniittinen ruostumaton teräs, joten sen tutkimukseen perehdyttiin tarkemmin.

5.4 3D-tulostettujen metallinäytteiden tutkimus

Tulostuksissa materiaalina käytettiin SLM Solutionsin AISI 316L -jauhetta. Jauheen koostumus on esitelty taulukossa 4 (SLM Solutions GmbH Analysis Certificate 2016). SLM Solutionsin analyysin mukaan jauheen muoto on pyöreää ja partikkelikokojakauma on 10 – 45 µm, keskipartikkelikoon ollessa noin 35 µm.

TAULUKKO 4. SLM Solutions 316L-jauheen koostumus vs. standardi

| Alkuaine | massa-% | SFS-EN 10088 1.4404 |
|----------|---------|------------------------|
| C | 0,02 | 0,03 |
| Si | 0,54 | 1,00 |
| Mn | 1,24 | 2,00 |
| P | <0,005 | 0,045 |
| S | 0,004 | 0,015 |
| Cr | 16,72 | 16,5...18,5 |
| Ni | 12,14 | 10,0...13,0 |
| Mo | 2,38 | 2,00...2,50 |
| N | 0,0 | 0,10 |

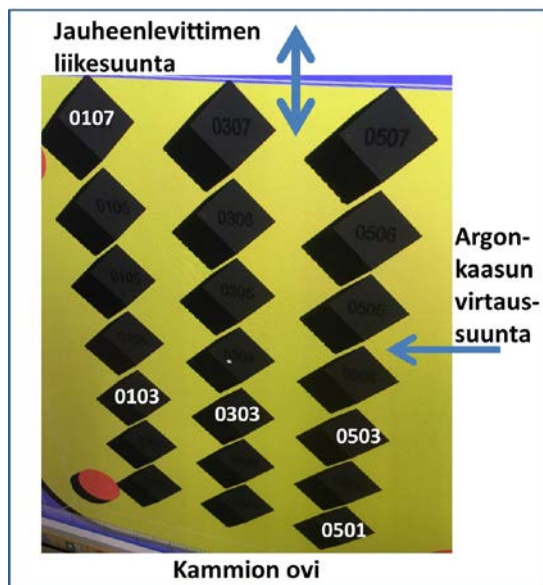
Tutkimusten tavoitteena oli selvittää, minkälaisia ominaisuuksia mikrorakenteessa, koivuudessa, iskutheydessä ja lujuudessa saavutetaan käytössä olevilla prosessiparametreilla. Lisäksi tutkittiin, onko sillä merkitystä, missä tutkittava kappale sijaitsee alustalla. SLM Solutionsin antamia parametreja 316L-materiaaliin tulostusprosessiin on koottu taulukkoon 5.

TAULUKKO 5. Laittevalmistajan parametriarvoja

| | |
|---|----------|
| Laserin teho | 200 W |
| Skannausnopeus | 800 mm/s |
| Viivan etäisyys | 0,12 mm |
| Ulkoreunojen (Border) lkm | 2 |
| Ulkoreunojen etäisyys (Border distance) | 0,09 mm |
| Täytön ääri viivan etäisyys (Fill Contour distance) | 0,08 mm |
| Kerrospaksuus | 0,03 mm |
| Alustan lämpötila | 80°C |

5.4.1 Mikrorakenne

Alkuperäinen idea oli, että mikrorakenne tutkittaisiin samoista iskutitkeyssauvoista, joille tehdään myös iskutitkeystestit. Valitettavasti ensimmäinen iskutitkeyssauvojen tuotostus keskeytyi, mutta sauvoja kuitenkin käytettiin mikrorakenteen tutkimiseen. Kuvasta 8 ilmenee, miten kappaleet olivat sijoittuneet kammioon ja alustalle.



KUVA 8. Tutkittavien kappaleiden sijoittuminen kammioon ja alustalle

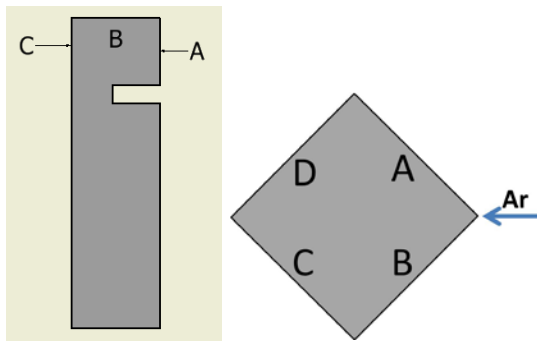
Kappaleista sahattiin riittävän isot kappaleet, jotta saatiin materiaalia hieen tekemiseen. Näytekappaleet valettiin muottiin, siten näytteen käsittely hionnassa ja kiillotuksessa oli

helpompaa. Muotin materiaali oli bakeliittia ja tekemiseen käytettiin Struersin LaboPress3-laitetta. Kuvassa 9 on esitetty työvaiheita ja muotintekoa. Hionta aloitettiin pelkällä karkealla hiekkapaperilla, jolloin näytteen pinta suoristettiin ja mahdollinen pinnalla oleva bakeliitti poistettiin. Tämän jälkeen näytettä hiottiin käyttäen vesihiomapapereita. Käytettyjen hiomapaperien karkeudet olivat 220, 320, 500, 800 ja 4000. Mitä suurempi luku oli, sitä hienojakoisempi paperi oli ja sitä sileämpi jälki näytteeseen saatiin. Luku perustuu hiomajyväsien määrään ja kokoon, niin sanottuun MESH-lukuun. Tavoitteena oli saada näytteelle mahdollisimman tasainen pinta, jonka kulmat eivät olisi pyöristäyneet. Mikrorakenteet tutkittiin optisella mikroskoopilla.



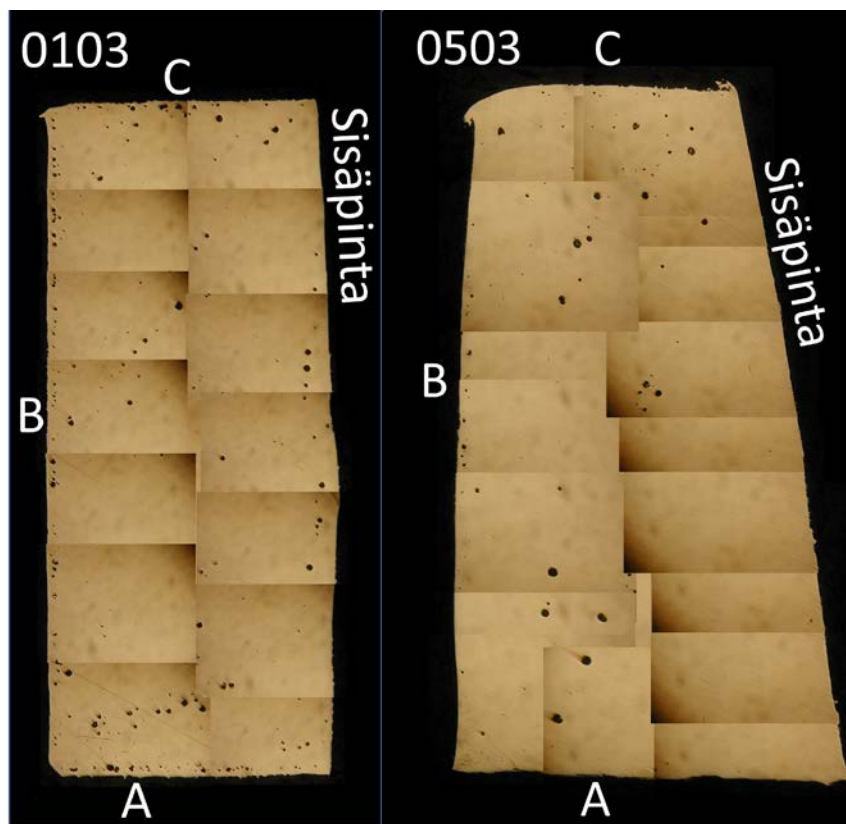
KUVA 9. Näytekappaleen sahaaminen kappaleesta ja näytteen valaminen muottiin

Yleensä aina tulostusprosessin valmistuttua vasempaan reunaan jäänyt jauhe on selvästi tummempaa kuin muualla. Ilmiöstä puhutaan nokeentumisena. Tutkimuksissa haluttiin saada selville, onko sillä vaikutusta kappaleiden mikrorakenteeseen, joten hieet mikrorakennetarkastelua varten valmistettiin kappaleista 0103 ja 0503. Hieet valmistettiin XY-tulostussuunnassa sauvojen yläpinnalta siten, että ulkopinnat A, B ja C (kuva 10) olivat tarkastelun kohteena. Hieiden koko oli noin 10 x 4 mm, B x C-sivu.

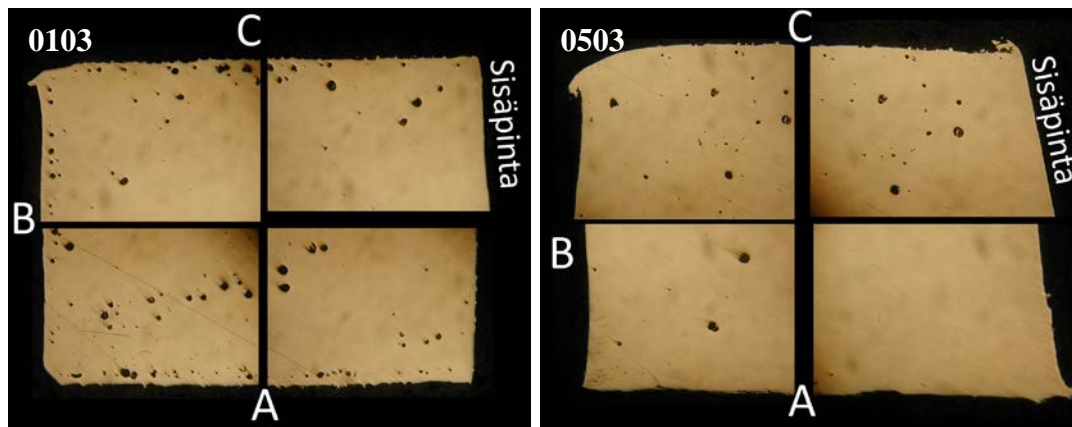


KUVA 10. Pintojen suunnat mikrorakenne- ja kovuustarkasteluissa

Hieiden tarkastelussa oli selvästi nähtävissä ero 0103 ja 0503 kappaleiden välillä. Jo aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että rakenteeseen jää ns. mustia kohtia. Tarkastelussa havaittiin, että lähellä argonin syöttöä olevassa rakenteessa on selkeästi vähemmän mustia kohtia. Kuvassa 11 on molempien hieiden pinnat kuvattuna yhdistämällä useampi mikroskoopilla otettu kuva. Kuvassa 12 on hieiden kulmat. Molemmissa on havaittavissa sekä isompia että pieniä pyöreähköjä mustia kohtia. Selkeästi kuitenkin kappaleessa 0503, joka on lähempänä argon-virtausta, on vähemmän mustia kohtia. Lisäksi kappaleessa 0103 mustat kohdat ovat selkeästi nauhamaisena rakenteen ulkoreunoilla.

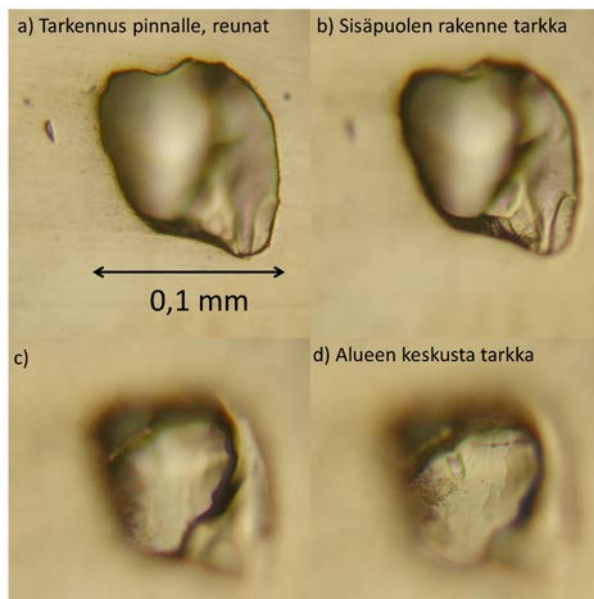


KUVA 11. Kappaleista 0103 ja 0503 tehdyt hieet



KUVA 12. Kappaleiden 0103 ja 0503 kulmat

Suurimmat mustat kohdat ovat halkaisijaltaan n. 0,1 mm. Mikroskoopin suurimmalla suurennoksella otetussa kuvasarjassa (kuva 13), kun tarkennuskohtaa siirretään pinnasta kohti alueen keskiosaa, voidaan havaita, että kyseessä on kuoppa, mikä viittaa huokoisuuteen.



KUVA 13. Kuvasarja mustasta kohdasta hieen pinnalla

VTT:n tutkimuksissa (Jokinen & Riipinen 2016) havaittiin alumiinin rakenteessa vastaavan kaltaisia tummia kohtia, jotka tulkittiin kaasuhuokosiksi. Tutkimuksessa todettiin useita eri mahdollisuuksia huokosten syntymekanismille, kuten sulan riittämätön kostutus, sulan päälle muodostuva oksidikerros tai sulavyöhykkeiden väliin jäävä sulamaton alue.

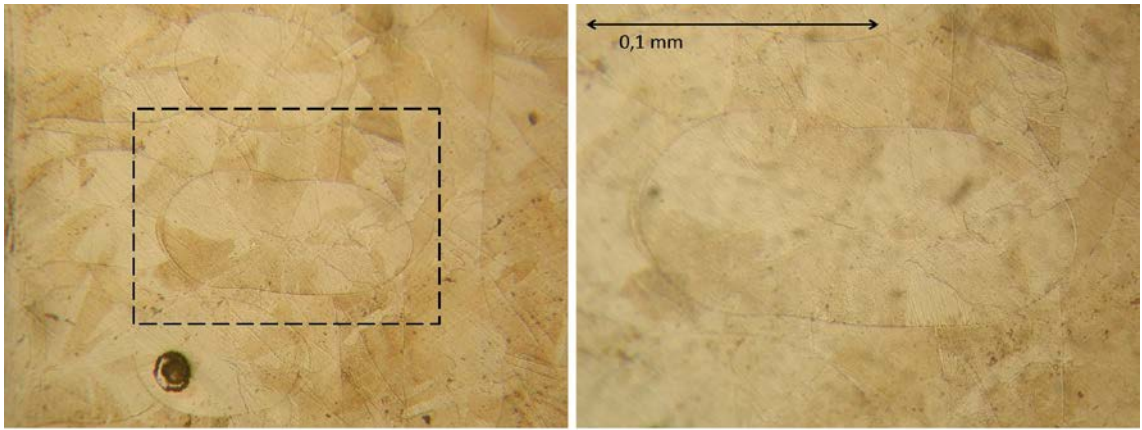
Myös aiemmissa AISI316L-materiaalin tutkimuksissa havaittiin, että huokoiset olivat keskittyneet tietyille alueille enemmän kuin muualla. Tutkimuksissa johtopäätöksenä oli, että huokoiset olivat sijoittuneet kohtaan, jossa laserilla on jonkinasteinen päällekkäisyys (overlapping) johtuen valitusta skannausmenetelmästä. Tämäkin johtuisi epäpuhtauksien kuten oksidikerroksen muodostumisesta jähmettyneen sula-alueen päälle. (Yusuf ym. 2017, 5.) Kummassakaan näistä tutkimuksista ei otettu kantaa näytteiden sijoittumiseen tulostusalustalla, mikä taas nousee esille 0103 ja 0503 kappaleiden tarkastelussa.

Syövytystä varten valittiin enemmän huokoisia sisältävä 0103 hie. Hie syövytettiin elektrolyyssillä, jossa käytettiin 39 %:sta typpihappoa ja 0,1 mA virtaa. Näytteen bakeliitin läpi porattiin reikä hieen pintaan saakka. Reikään kiinnitettiin ruuvi, jonka avulla hie saatiin kytkettyä sähköpiiriin. Katodina käytettiin platinal levyä. Syövytysaika oli noin 10 s. Kuvassa 14 esitellään syövytysjärjestely.

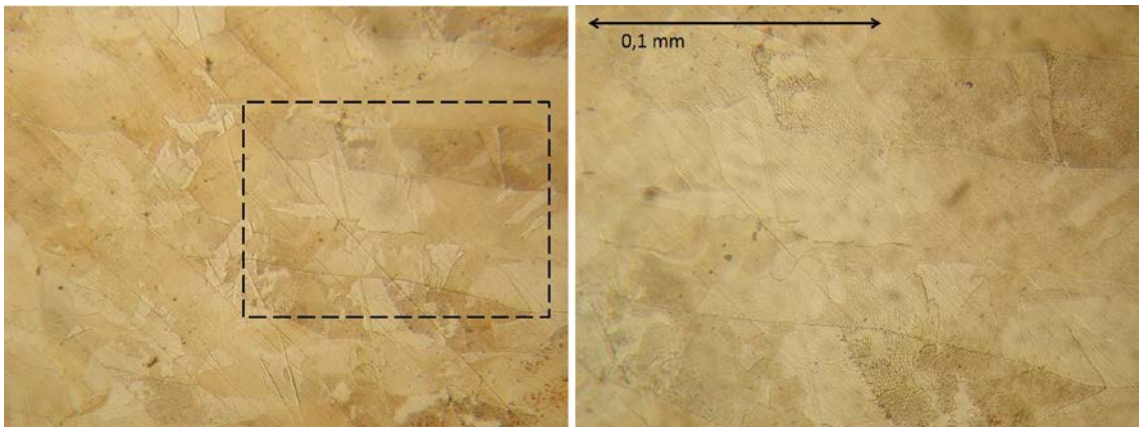


KUVA 14. Syövytysjärjestely

Mikrorakenteessa oli havaittavissa sekä soikeita että kerroksellisia rakenteita. Kuvassa 15 on selvästi näkyvissä useampia soikeita alueita, joiden sisäosa on jakautunut sektoreihin. Yksi musta piste on näkyvissä keskellä tällaista soikeaa aluetta. Kuvassa 16 on kerroksellisia rakenteita.



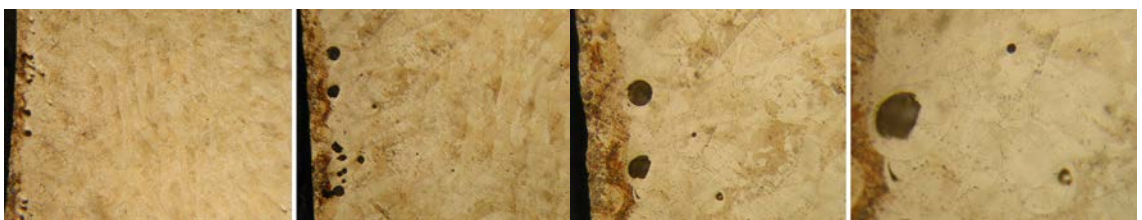
KUVA 15. Mikrorakenteessa soikeat alueet kahdella eri suurennoksella



KUVA 16. Mikrorakenteessa kerroksellisia rakenteita kahdella eri suurennoksella

Molemmissa rakenteissa on mahdollista nähdä pienempinä sektoreina dendriittirakennetta, eli austeniitin kiteytyminen on tapahtunut haaroittuneena ja näyttää vähän puumaiselta. Aiempien tutkimusten perusteella tällainen hieno dendriittinen rakenne on tyypillistä 3D-tulostetuille metalleille, koska prosessissa laserin vaikutusaika on lyhyt ja sulan jäähtyminen tapahtuu nopeasti. (Yusuf ym. 2017, 4.)

Kuvassa 17 on eri suurennoksilla kuvattu hieen ulkoreunaa, missä useita mustia kohtia. Vastaavantyyppisiä soikeita ja kerroksellisia rakenteita sekä dendriittirakenteita on nähtävissä myös huokoisella alueella. Perusteita huokoisten kohtien sijoittumiseen ei syövytetystä mikrorakenteesta löytynyt.



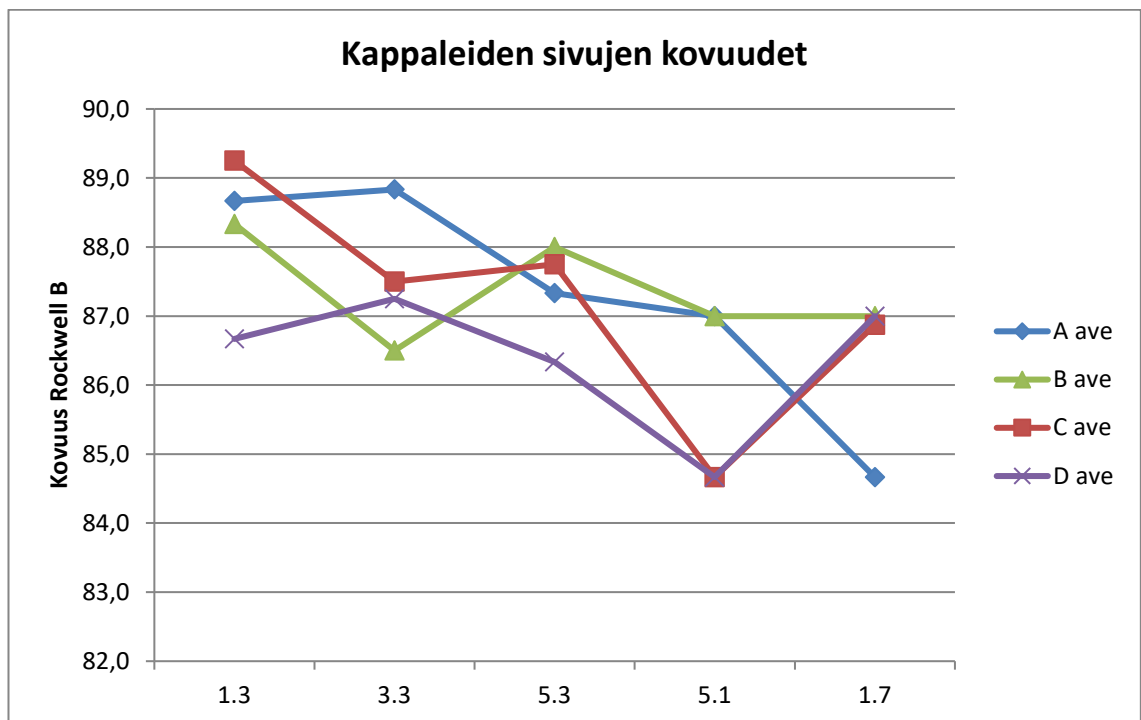
KUVA 17. Kuvasarja syövytetystä 0103-hieestä eri suurennoksilla

5.4.2 Kovuusmittaukset

Kovuudet mitattiin Rockwell B -kovuuksina. Menetelmässä käytetään teräskuulaa ja saataa kilogrammaa. Kovuusmittauksiin valittiin kappaleet 0103, 0107, 0303, 0503 ja 0501. Jotta havaittaisiin, onko kovuuksissa eroa kappaleen eri pinnoilla, jokaiselta pinnalta tehtiin kolme mittausta. Yhdestä kappaleesta saatiin yhteensä 12 mittausta. Mittausten keskiarvot ja virheet on esitelty taulukossa 6. Merkittäviä eroja kovuuksien keskiarvoissa ei ole havaittavissa. Suurempi huomio oli, kuinka mittaustulokset vaihtelivat samassakin kappaleessa. Kuviossa 5 on esitelty kappaleiden kovuudet eri sivujen mittausten keskiarvoina. Tällä tavoin tarkasteltuna ei suinkaan suurin kovuus, mutta pienin hajonta pintojen välillä on 0503-kappaleella, joka on siis lähimpänä argon-virtausta.

TAULUKKO 6.

| Kappale | 0103 | 0303 | 0503 | 0501 | 0107 |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Kovuus [HRB] | 88,3±3,1 | 87,4±4,9 | 87,5±2,5 | 85,8±2,5 | 86,5±3,6 |

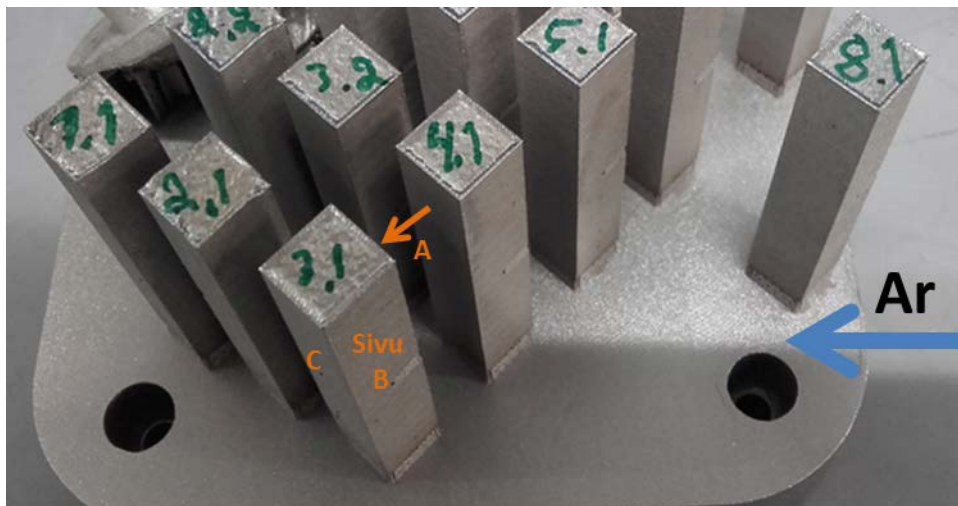


KUVIO 5. Kappaleiden kovuusarvot eri sivuilta mitattuina

5.4.3 Iskustikeyskoe

Metallien V- ja U-lovikoesauvoilla tehtävät Charpyn iskukokeet määritellään standardissa SFS-EN ISO 148-1:2016. Yleisesti iskustikeyskoe tehdään murtamalla lovettu koesauva iskuheilurilla yhdellä iskulla. Koesauvan lovella on joko V- tai U-geometria ja sauva sijoitetaan kannattimien puoliväliin vastakkaiselle puolelle iskukokeessa iskettävää kohtaa. Iskukokeessa määritetään murtamiseen sitoutunut energia. Kokeen tarkoituksena on selvittää materiaalin hauraskäyttäytymistä. (Koivisto ym. 2008, 20.)

Iskustikeysmittauksia varten yksi tulostus oli lähes pelkästään standardin (Metallien Charpyn iskukoe 2016.) mukaisia 10x10x50 mm sauvoja. Kappaleet irrotettiin tulostusalustasta metallivannesahalla. Tutkimuksia varten valittiin seitsemän sauva 1.1, 2.1, 3.1, 3.2, 4.1, 5.1 ja 8.1, joiden sijainti ilmenee kuvasta 18. Irrotuksen jälkeen sauvat mitattiin ja todettiin, että ulkomitat olivat määriteltyä pienemmät. Iskustikeysmittaukset tehtiin huoneenlämpötilassa kaikille sauvoille. Mittaustulokset vaihtelivat minimin 39,3 J ja maksimin 48,1 J välillä, keskiarvoksi tuli 43,6 J. Taulukkoon 7 on koottu kaikki iskustikeystulokset ja sauvojen mitat.



KUVA 18. Iskustikeyssauvat tulostusalustalla

TAULUKKO 7. Iskusitkeydet ja sauvojen mitat

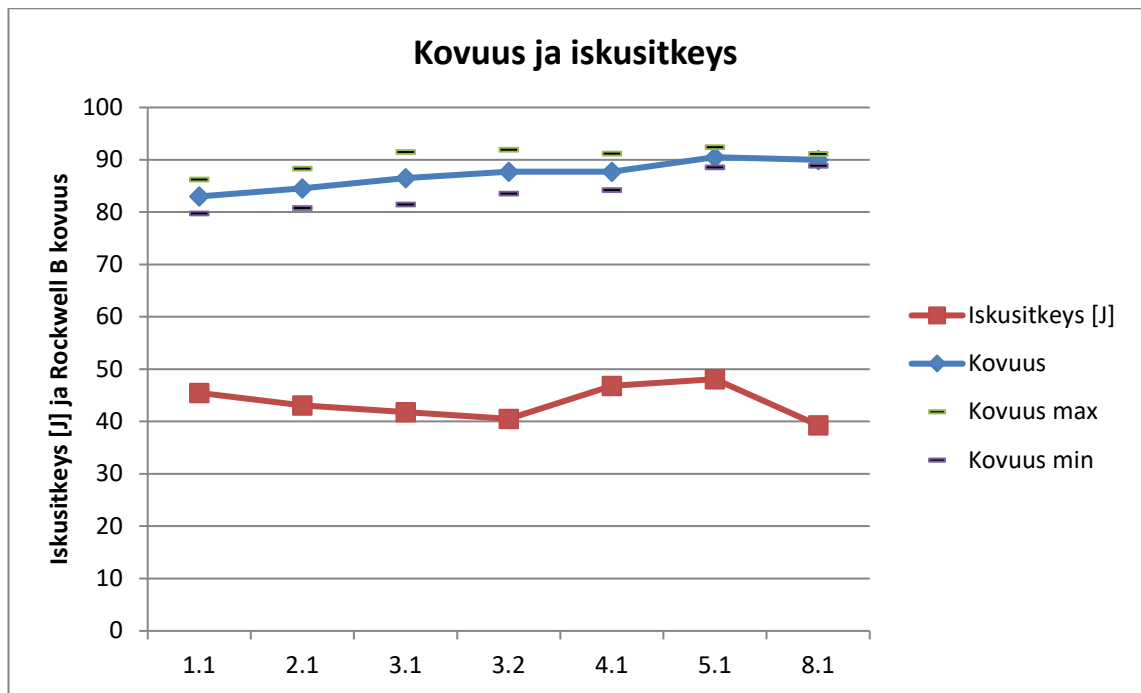
| Näyte | 1.1 | 2.1 | 3.1 | 3.2 | 4.1 | 5.1 | 8.1 | Keskiarvo |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------------|
| Iskusitkeys [J] | 45,5 | 43,1 | 41,8 | 40,5 | 46,8 | 48,1 | 39,3 | 43,6 ± 3,3 |
| B [mm] | 9,80 | 9,85 | 9,85 | 9,80 | 9,80 | 9,80 | 9,80 | |
| W [mm] | 9,80 | 9,85 | 9,85 | 9,85 | 9,85 | 9,85 | 9,85 | |

Iskusitkeyssauvoista mitattiin myös kovuudet. Kaikkien kovuusmittausten kappalekohtaiset keskiarvot virherajoineen ovat taulukossa 8. Lisäksi iskusitkeys ja kovuudet virherajoineen on esitetty kuviossa 6.

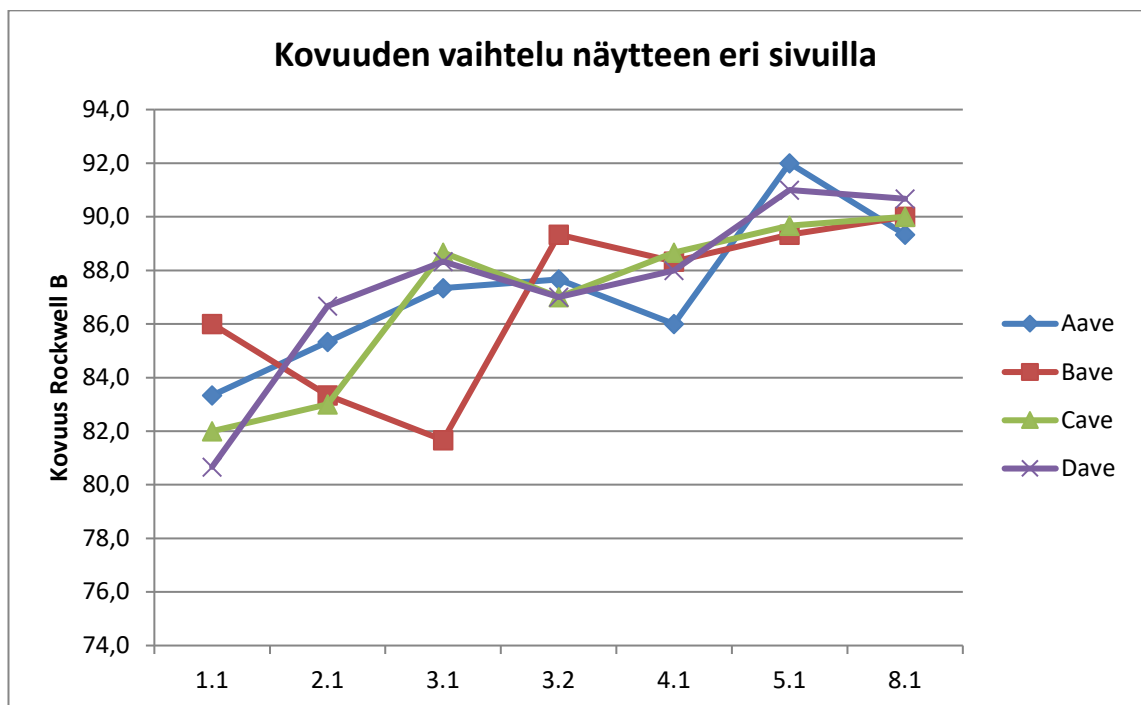
Myös näissä kappaleissa kovuusmittaukset tehtiin kultakin kappaleen sivulta kolmena mittauksena. Eri sivujen kovuusvaihtelu on nähtävissä kuviossa 7. Huomioitavaa on, että mitä lähempänä argonvirtausta kappale on, sitä vähemmän vaihtelua on kovuusarvoissa. Yksittäinen huomio oli 3.1 B-sivun merkittävä pudotus kovuudessa, yksi arvoista oli 77 HRB, jolloin mahdollisesti mittaus on osunut johonkin suurempaan pinnalla olevaan huokoseen.

TAULUKKO 8. Iskusitkeyssauvojen kovuudet

| Kappale | 1.1 | 2.1 | 3.1 | 3.2 | 4.1 | 5.1 | 8.1 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Kovuus [HRB] | 83,0 ±3,2 | 84,6 ±3,8 | 86,5 ±5,0 | 87,8 ±4,2 | 87,8 ±3,5 | 90,5 ±1,9 | 90,0 ±1,1 |



KUVIO 6. Iskutitkeys ja kovuus virherajoiheen



KUVIO 7. Iskutitkeyssauvojen kovuusarvot eri sivuilta mitattuina

Myöhemmissä tutkimuksissa (Läntinen, Pänkälä & Riihimäki 2017) loput samassa tuloksessa olleiden iskutitkeyssauvojen kovuudet vaihtelivat todella merkittävästi välillä 35 – 45 HRB. Tarkasteltaessa lähimmin kyseisten kahdeksan sauvan asemointia alustalla havaittiin, että suurin hajonta kovuudessa oli sauvoilla, jotka olivat lähellä alustalla tulos-

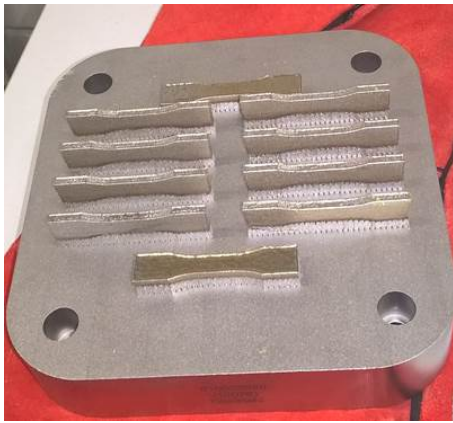
tettua suurempaa kappaletta ja toisaalta myös argon-kaasun poistoaukon puoleisella sivulla. Kuitenkin mitatut iskusitkeydet olivat samaa suuruusluokkaa kuin aiemminkin mitatut. Arvot vaihtelivat välillä 39,3 – 49,3 J ja mittausten keskiarvoksi tuli 44,5 J.

5.4.4 Vetokoe

Standardi SFS-EN ISO 6892-1:2016 määrittelee metallien vetokokeen suorittamisen huoneenlämpötilassa ja kokeessa määritettävät mekaaniset ominaisuudet. Vetokokeessa dimensioiltaan ja geometrialtaan tunnettua koesauvaa vedetään aineenkoetuskoneessa, jolloin koesauvan pituus kasvaa vakionopeudella. Kokeen aikana rekisteröidään muodonmuutokseen tarvittava voima koesauvan pituuden muutoksen funktiona. Tuloksena on voima-pituudenmuutoskäyrä. (Koivisto ym. 2008, 16-17.)

Vetokoe on metallisten materiaalien aineen koestuksessa tärkein ja yleisin menetelmä, sillä lujuusarvot määrittelevät metallien kyvyn kestää ulkoisten ja sisäisten kuormitusten aiheuttamia veto- tai puristusjännityksiä. Teräksillä myötöraja (myötölujuus) on jännitys, jossa koesauvassa staattisessa vetokokeessa alkaa tapahtua plastista muodonmuutosta. Myötörajan sijaan suunnittelussa lujuuslaskuille voidaan käyttää myös 0,2-venymärajaa, joka ilmaisee, milloin aineeseen syntyy 0,2 % pysyvä venymä. Murtolujuus tarkoittaa vetosauvassa vallitsevaa suurinta jännitystä jännitys-venymäkäyrän korkeimmalla kohdalla. (Koivisto ym. 2008, 17)

Aiemmissä tutkimuksissa (Katajisto 2016) vetokokeita varten tulostettiin kahdeksan sauvaa XZ-asennossa ja kaksi sauvaa XY-asennossa. Koesauvana käytettiin lyhennettyä geometriaa, joka on kehitetty sopimaan SLM 125 HL -kammioon (Jokinen & Riipinen 2016, 13). Kuvissa 19 ja 20 esitellään sauvojen sijainti ja asento tulostusalustalla sekä tukirakenteet. Tulostusparametreina käytettiin laitevalmistajan antamia arvoja. Alustan lämpötilaksi oli määritelty 100°C. Vetokokeiden tuloksena saatiin murtolujuudet, venymät sekä arvio myötölujuudesta. (Katajisto 2016.)



KUVA 19. Vetosauvat alustalla (Kuva: Katajisto J. 2016)



KUVA 20. Vetosauvat alustalla (Kuva: Katajisto J. 2016, muokattu)

Sauvat jätettiin valmistustilaan vetokokeita varten. Vetokokeet suoritettiin kahdella eri laitteella, joilla kummallakin vedettiin neljä XZ-sauvaa ja yksi XY-sauva. Murtovenymä-% ja myötölujuus $R_{p0,2}$ arvioitiin vetokoneiden ohjelmistojen tuottamista voima-siirtymäkuvaajista (kuva 21). Saadut murtolujuus- ja venymätulokset on koottu taulukoon 9. Myötölujuudeksi arvioitiin noin 575 MPa. (Katajisto 2016.)



KUVA 21. Voima-siirtymä -kuvaaja (Kuva Katajisto J. 2016)

TAULUKKO 9. Vetokokeiden tulokset (Katajisto 2016)

| | Suunta | Murtolujuus [MPa] | Venymä [%] |
|-----------------|---------------|------------------------------|-----------------------|
| P5-laite | XZ | 686±5 | 24±3 |
| Matertest-laite | XZ | 695±8 | 23±2 |
| P5-laite | XY | 672 | 25 |
| Matertest-laite | XY | 690 | 23 |

Haasteena mittauksissa oli sauvojen lyhyys, joten hienovenymäänturia ei voitu käyttää ja myötörajan määrittäminen tarkasti oli mahdotonta. Myös pituuden ja pinta-alan mittauksissa oli haasteita johtuen sauvojen pienestä koosta ja geometrian epätasaisuudesta. Vetosauvoissa oli havaittavissa vääntymistä, mistä voi päätellä, että joko tulostusasento ei ole ollut paras mahdollinen tai sauvojen tuentaa olisi voinut olla enemmän. Eri veto-koelaitteiden välillä tehdyissä mittauksissa ei havaittu merkittävää eroa. (Katajisto 2016) Saadut tulokset ovat kuitenkin linjassa VTT:n tutkimustulosten kanssa, kun verrataan valmistajan antamilla parametreilla tehtyjä tulostuksia ja testejä.

6 TULOKSET

6.1 Visuaalinen työkalu

Opinnäytetyön yhtenä tavoitteena oli luoda visuaalinen työkalu, jonka avulla TAMKin ja SASKYn SLM 125 HL -tulostuslaitteen käyttäjät voivat tehostaa työskentelyään ja toisaalta uudet käyttäjät pääsevät nopeasti sisään SLM-menetelmään. Opinnäytetyön tuloksena tuotettiin uusi visuaalinen työkalu, A1-kokoinen vuokaavio (liite 1), tulostuslaitteen prosessien hallintaan ja valmistusmenetelmän kokonaisuuden syy- ja seuraussuhteiden hahmottamiseen. Vuokaavio on jatkossa tarkoitettu ollen päivitettävä eli kun työtavat kehittyvät ja muuttuvat myös kaavio päivitetään tilanteen mukaiseksi. Siitä voidaan myös irrottaa selkeitä osakokonaisuuksia omiksi kaavioiksi, jotka voidaan sijoittaa tarkoituksenmukaiseen paikkaan.

6.2 Materiaalitarkastelu

Opinnäytetyöhön sisältyneet haastattelut ja kirjallisuustarkastelut keskittyivät tarkastelemaan, millainen on tämän hetken 3D-tulostuksen ja erityisesti SLM-menetelmän käytön tilanne Suomessa ja mitä materiaaleja on käytössä. Suomalaisessa teollisuudessa tämän hetken painotus materiaaleissa on ruostumattomassa teräksessä, alumiinissa ja työkaluteräksessä. Myös materiaalikehityksen ja tulostusparametrikehityksen painopiste on ollut näissä kyseisissä materiaaleissa.

Työn varsinaisessa materiaalitutkimusosuudessa keskityttiin AISI 316L (EN 1.4404) ruostumattomaan teräkseen. Saatua kovuuden, lujuuden ja iskutheyden arvoja verrattiin eri materiaalitoimittajien julkaisemiin arvoihin, sekä perinteisesti valmistettuja, kuten Sandvik ja Outokumpu että SLM-tulostuksella valmistettuja. Ominaisuudet on koostettu taulukkoon 10 (Jokinen & Riipinen, 2016; MatWeb 2017; SLM Solutions 2017). Havaittiin, että työssä mitatut kovuusarvot vastaavat SLM Solutionsin antamia arvoja. Yllättävää oli, että lujuusarvot olivat samaa luokkaa VTT:n tutkimusten arvojen kanssa, mutta kovuus tehdyissä mittauksissa on selvästi VTT:n arvoja alhaisempi. Charpy-kokeella tehtyjä iskutheyden arvoja ei löytynyt vertailuun kuin perinteisesti valmistetuista materiaaleista, jotka nekin vaihtelivat merkittävästi keskenään. Alkuperäisenä ajatuksena

iskusitkeysmittauksien työhön sisällyttämällä oli erojen näkeminen eri osissa tulostus-
alustaa sijoittuneille näytteille. Tämä olisi ohjannut tarkemmin, mitkä näytteet valittaisiin
mikrorakennetutkimuksiin. Tehdyissä iskusitkeysmittauksissa ei kuitenkaan havaittu
merkittävää hajontaa.

TAULUKKO 10. Kooste eri valmistajien antamista ominaisuuksista 316L-materiaalille

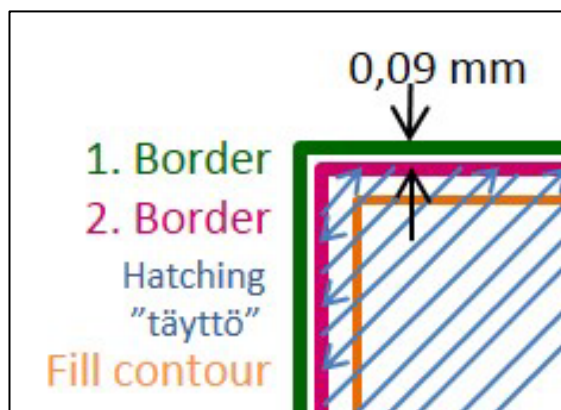
| AISI 316L EN 1.4404 | Kovuus | Myötölujuus [MPa] | Murtolujuus [MPa] | Iskusitkeys [J] |
|------------------------|---------------------|------------------------------|----------------------|--------------------|
| SLM Solutions | HV 209 (94 HRB) | 519 [R _{p0.2}] | 633 | |
| Sandvik | 170 HB (87 HRB) | 205 | 515 | 150 |
| Outokumpu | 160 HB (84 HRB) | 220 | 570 | > 60 |
| VTT | 24 HRC (100 HRB) | 566 [R _{p0.2}] | 705 | |
| Omat | 83 – 90 HRB | ~575 [R _{p0.2}] | 672 – 695 | 44 |

6.3 Materiaalin mikrorakennetarkastelu

Mikrorakenteen tutkimista varten valmistettiin kaksi hiettä eri puolille tulostusalustaa si-
joittuneista kappaleista. Hieet tutkittiin optisella mikroskoopilla. Molemmissa oli nähtä-
villä mustia kohtia, jotka selvästi keskittyivät ulkoreunoihin tai tietyn suuntaisesti pin-
nalle. Mikroskoopilla tarkasteltaessa mustat kohdat määrittyivät kuopiksi ja niitä oli sel-
keästi vähemmän lähellä argonin syöttöä olleen kappaleen rakenteessa. Enemmän mustia
kohtia sisältänyt hie syövytettiin ja havaittiin sekä soikeaa että kerroksellista rakennetta.
Oli myös mahdollista nähdä pienempinä sektoreina dendriittirakennetta, eli austeniitin
kiteytyminen oli tapahtunut haaroittuneena ja näyttää vähän puumaiselta. Tällainen
rakenne on tyypillistä 3D-tulostetuille metalleille, koska prosessissa laserin vaikutusaika
on lyhyt ja sulan jäähtyminen tapahtuu nopeasti.

Mikrorakennetarkasteluissa huokoisuuden keskittyminen erityisesti ulkopinnalle on ha-
vaittu aiemmissakin tutkimuksissa, joissa johtopäätöksenä oli, että huokoiset olivat sijoit-

tuneet kohtaan, jossa laserilla on jonkinasteinen päällekkäisyys (overlapping) johtuen valitusta skannausmenetelmästä. (Yusuf ym. 2017). Kohteissa, jossa kappaleen pinta on kriittinen tekijä esim. korroosionkestävyyden kannalta, tällainen lopputulos tulostuksessa ei ole toivottavaa. Tarkasteltaessa laserin liikkeen periaatetta reunan sulatuksessa, missä parametreilla hallitaan ulkoreunoja (border) ja niiden etäisyyttä, täytön ääriä (fill contour) sekä näiden välistä täyttöä (hatching) (kuva 20) voidaan todeta, että näiden parametrien hallinnalla on erityinen merkitys reunan huokoisuuden kontrolloinnissa. On myös hyvä huomioida, että kaikkien näiden suorittamisjärjestys saattaa vaihdella erityyppisissä prosesseissa. (Kananen ym. 2017.)



KUVA 20. Periaatekuvaus laserin liikkeistä

Mitatut kovuudet vaihtelivat välillä 77 – 92 HRB. Selkeästi eniten hajontaa oli kauimpana argon-virtauksesta olleissa kappaleissa, mikä viittaa siihen, että siellä satunnainen kovuusmittaus on hyvinkin voinut osua huokosen kohdalle. Toisaalta iskutkeysarvoissa merkittävää eroa ei kuitenkaan ollut havaittavissa, mikä oli vähän hämmäntävää, sillä arvio oli, että suurempi huokoisuus pinnalla vaikuttaisi myös iskutkeyttä alentavasti.

Tulevaisuudessa työskennellessä yhteistyössä eri yritysten kanssa, voisi varsinaisen kappaleen valmistamisen yhteydessä valmistaa samalla myös esim. vetosauvat ja testinapit, joista voidaan mitata tulostuskohtaisesti lujuusarvot sekä analysoida mikrorakennetta. Samalla kehitettäisiin 3D-tulostuksen laatuja järjestelmäkin.

7 POHDINTA

3D-tulostus elää vahvaa ”hypetys”-kautta, mutta toisaalta ero odotusten ja todellisuuden välillä voi olla suurikin. 3D-tulostus ei ole valmistusmenetelmänä pelkkää napin painallusta, vaan pitkälti raakaa käsityötä.

Kuitenkin 3D-tulostuksella on merkittävät mahdollisuudet yhtenä valmistusmenetelmänä perinteisten menetelmien rinnalla. 3D-tulostus tarjoaa vaihtoehtoja, joita ei yksinkertaisesti voi saada aikaan perinteisillä menetelmillä, kuten kappaleen sisäisiä monimutkaisia rakenteita. Toisaalta teknologia myös vaatii, että menetelmän tarjoamat mahdollisuudet ja toisaalta vaatimukset huomioidaan jo tuotteiden suunnittelussa - siis paljon ennakkoluulottomuutta ja valmiutta vastaanottaa uusia ajatuksia. Hyvällä suunnittelulla tuotteesta voidaan saada ylivertainen, mutta huonosti suunniteltu tuote osoittautuu varmasti 3D-tulostuksella tehtynä kannattamattomaksi.

Varsinaisessa valmistusprosessissa 3D-tulostuksella on omat haasteensa. Tämänkin työn tuloksena voidaan todeta, että tulostusparametrien hallinnalla on todella merkittävä vaikutus tulostettavien kappaleiden laatuun. Optimaalisten parametrien määrittäminen eri materiaaleille ja mahdollisesti erilaisille kappaleillekin on tärkeä vaihe tulostuksen suunnittelussa, koska se suurimmalta osin ratkaisee lopputuotteen laadukkuuden. Erilaisiin parametreihin ja niiden optimointiin on perehdyttävä, jotta tuotteen laadukkuus taataan. Tällainen tutkimusmenetelmä on hidasta, mutta se on lähes välttämätöntä, jotta parametrien optimointi ja sitä kautta kappaleiden materiaalien optimointi onnistuu. Näin valmistetaan tuote, joka täyttää sille asetetut vaatimukset ja saadaan syntymään kannattavaa liiketoimintaa asiakkaille.

Suomalaisten valmistavan teollisuuden käyttämien metalliseosten soveltuvuutta 3D-tulostukseen ja SLM-menetelmään on VTT:n toimesta pitkälti jo tutkittu ja maailmalla vieläkin enemmän. Kuitenkin 3D-tulostukseen liittyvät materiaalitutkimuksen tulokset ovat hyvin usein laitekohtaisia ja vaihtelevat jopa tulostettavien kappaleiden mukaan, joten tiedon lisääminen kyseisen laitteen tulostusparametrien vaikutuksesta tuotteen laatuun sekä saavutettaviin materiaaliominaisuuksiin on tärkeää. Voidaan todeta, että tärkeimmät parametrit valmistuksen kannalta ovat laserin teho, skannausnopeus, skannausviivojen etäisyys toisistaan sekä levitettävän jauheen kerrospaksuus. TAMKIn ja SASKYn 3D-

tulostukseen liittyvää materiaalitutkimusta kannattaisi jatkaa, erityisesti pinnan huokoisuuden kontrolloimiseksi, sillä huokoisuus on erittäin kriittinen lähes kaikissa sovelluskohteissa, kuten kulumiskestävyyden, iskumaisen kuormituksen ja särön ydintymisenkin kannalta. Toisaalta pyörää ei kannata keksiä uudestaan, vaan ennemminkin lisätä yhteistyötä muiden suomalaisten osaajien kanssa.

Suunnitteluosaamisen kehittämisellä on hyvin suuri merkitys 3D-tulostuksen onnistumisessa Suomessa, mutta sen lisäksi metallijauheiden käsittely, tulostuksen prosessiparametrien hallinta ja tuotteiden jälkikäsittely ovat varmasti jatkossakin erittäin tärkeässä roolissa laadukkaiden 3D-tulostettujen tuotteiden valmistuksessa.

LÄHTEET

3DPirkanmaa. Luettu 10.4.2017. <http://3dpirkanmaa.fi/hanketietoa/>

Edraw Visualization Solutions, Flow Chart Definition. Luettu 10.4.2017.
<https://www.edrawsoft.com/Flowchart-Definition.php>

Hovilehto M. 2016. Characterization of design of a product for additive manufacturing. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Jokinen A. & Riipinen T. 2016. Lisäävän valmistuksen keskeiset materiaalit ja niiden ominaisuudet. Tutkimusraportti VTT-R-03997-16. VTT.

Kananen V. technical manager, Ehonsalo P. 3D printing engineer & Tuomo Liukku 3D printing engineer. Haastattelu 13.4.2017. Haastattelija Tanttari, M. 3DStep Oy Ylöjärvi.

Katajisto J. 2016. Metallitulosteiden materiaalikokeiden tuloksia. Raportti. Tampereen ammattikorkeakoulu.

Koivisto K., Laitinen E., Niinimäki M., Tiainen T., Tillikka P., Tuomikoski J. 2008. Konetekniikan materiaalioppi. Edita.

Käyttöohje Selective Laser Melting –laite SLM[®]125^{HL}. 2015. SLM Solutions GmbH.

Li, R., Liu, J., Shi, Y., Wang, L. & Jiang, W. 2012. Balling Behavior of Stainless Steel and Nickel Powder during Selective Laser Melting Process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 59, (9-12), 1025-1035.

Läntinen J., Pänkälä J. & Riihimäki J. 2017. Materiaalitekniikan laboriotyö. Tampereen ammattikorkeakoulu.

Meiners W. 2011. Selective Laser Melting – Additive manufacturing for series production of the future? INTERMAT 2011, Luxembourg.

Microsoft Visio. Visuaalista työskentelyä. Luettu 10.4.2017. <https://products.office.com/fi-fi/visio/flowchart-software#>

Operating manual Selective Laser Melting System SLM[®]125^{HL}. 2015. SLM Solutions GmbH.

Piili H. & Salminen A. 2016. Pohdintoja 3D-tulostuksen opetuksesta. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/120218/160207%20N%C3%A4in%20opetan%20ja%20koulutan%203D-tulostusta%20FV.pdf?sequence=2>

Sandvik Metal Powder for Additive Manufacturing. Luettu 11.4.2017. <http://smt.sandvik.com/en/products/metal-powder/additive-manufacturing/>

SLM Metal Powder. Luettu 11.4.2017. <https://slm-solutions.com/products/accessories-and-consumables/slm-metal-powder>

SFS-EN ISO 148-1:2016. Metallien Charpyn iskukoe. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. SFS Verkkokauppa.

SFS-EN ISO 6892-1:2016. Metallien vetokoe. Osa 1: Vetokoe huoneenlämpötilassa. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. SFS Verkkokauppa.

SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. Materiaali lisäävävalmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. 24.2.2017. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. SFS Verkkokauppa.

Vaajoki A. & Metsä-Kortelainen S. 2016. AM-prosessin integrointi tuotantoon – metalliosien valmistuksen työvaiheet. Tutkimusraportti VTT-R-03327-16.

Vossi Group Oy. 2015. VTT 3D- tulostaa metallia. Julkaistu 31.5.2015. Luettu 6.5.2017. http://www.vossi.fi/vossista/VTT_3D_tulostaa_metallia_129.html

Vossi M. 2017. 3D-vallankumouspäivä. Seminaari. 7.4.2017, Ylöjärvi

Wang D., Liu Y., Yang Y. & Xiao D. 2016. Theoretical and experimental study on surface roughness of 316L stainless steel metal parts obtained through selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 22 (4), 706-716.

Yusuf S. M., Chen Y., Boardman R., Yang S. & Gao N. 2017. Investigation on Porosity and Microhardness of 316L Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting. *Metals*, 7 (64).

