



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**METALLIEN 3D-TULOSTAMISEN
METALLISINTRAUKSEN
TULOSTUSPARAMETRIT**

Jonne Sarajärvi

TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Marraskuu 2021

TIIVISTELMÄ

Metallisintrauksen laserparametrit

Jonne Sarajärvi

Oulun yliopisto, konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2021, 22 s.

Työn ohjaaja: Jyri Porter

Tässä kandidaatintyössä tutustutaan metallien 3D-tulostukseen käytettävään suoraan metallin lasersintraukseen. 3D-tulostuksen metallisintraus tarkoittaa menetelmää, jossa laserilla sintrataan metallijauhetta kerros kerrallaan, jonka jälkeen lisätään jauhetta uusi kerros ja sintrataan se kiinni edelliseen kerrokseen. Tätä jatketaan niin kauan kunnes kappale on valmis.

Tutkittavat parametrit olivat laser-, skannaus-, teho- sekä lämpötilaparametrit. Näiden parametrien sovittaminen yhteen halutun ergiatheyden saavuttamiseksi on oleellista, mutta kuinka se saavutetaan eri arvoja muuttamalla vaikuttaa lopullisen kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin sekä pinnanlaatuun. Esimerkiksi skannausnopeuden hidastaminen, sen sijaan että nostettaisi lasertehoa, parantaa kappaleen lopullista tiiviyyttä. Mikäli halutaan parempaa pinnanlaatua skannauskuvion tihentäminen on paras vaihtoehto. Lasertehon nosto taas on järkevin jos halutaan korkeampaa kerrospaksuutta. Parametreihin, joiden säätäminen on hankalampaa, ja jotka tulisi harkita jo hankkimisvaiheessa, ovat tehoparametrit sekä lämpötilaparametrit. Tehoparametrit määrittyvät hankitun jauheen perusteella. Prosessin kannalta tärkeimpänä jauheen parametrina voidaan pitää jauheen virtaavuutta, joka puolestaan määrittyy jauheen partikkeleiden eri ominaisuuksien summasta. Laskennallisesti virtaavuutta määritettäessä on olemassa myös Hausner-suhde ja Carr-indeksi. Myös tulostimen kiinteiden osien kuten jauheen levittimen ja jauheen esilämmittimen säätäminen on työlästä, tai jälkimmäisen tapauksessa yleensä ei tarpeellista.

Asiasanat: metallin lasersintraus, 3D-tulostus, ainetta lisäävät valmistusmenetelmät, sintrausparametrit

ABSTRACT

Laser parameters in direct metal laser sintering

Jonne Sarajärvi

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelors's thesis 2021, 22 p.

Supervisor: Jyri Porter

This Bachelor's thesis is about reviewing and compiling the parameters used in direct metal laser sintering. Direct metal laser sintering is a method of 3D-printing where a thin layer of metal powder is sintered together, after which a new layer of powder is spread, and the process repeats for as long as is needed for the object to be ready.

Powder-, scanning-, temperature- and laser parameters were reviewed. While it is essential to reach the wanted laser energy to scan volume -ratio (i.e. energy density), the means of adjusting it is almost as important in attaining the wanted mechanical properties and surface roughness. For example, slowing down the hatching speed, instead of increasing laser power, improves the density of the printed part. To get smoother surface roughness, it is advisable to decrease the hatching distance. Moreover, increasing the laser power is the best way to increase layer height. Powder- and temperature parameters are more difficult to adjust quickly, and they should be taken into consideration when acquiring the printer and the metal powders. One of the most important powder parameters is its flow rate which in turn is the sum of various physical attributes of the powder. It can be tested or calculated using Hausner ratio or Carr index. The adjusting of recoater arm geometry and the powder preheater is also often difficult, or in the case of the latter example, often not necessary.

Keywords: direct metal laser sintering, 3D-printing, additive manufacturing, sintering parameters

ALKUSANAT

Yleinen kiinnostukseni 3D-tulostamista ja sen mahdollisuuksia kohtaan saivat minut valitsemaan tämän aiheen.

Tämän kandidaatintyön tavoite on tutkia metallien 3D-tulostuksen metallisitrauksen parametrien vaikutuksia valmistukseen, valmistettuun kappaleeseen sekä parametrien rajoittavia tekijöitä.

Oulu, 20.11.2021

Jonne Sarajärvi

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	1-2
ABSTRACT.....	1-3
alkusanat.....	1-4
SISÄLLYSLUETTELO.....	1-5
MERKINNÄT JA LYHENTEET.....	1-6
1 Johdanto.....	1-7
2 DMLS-tulostus.....	2-8
2.1 DMLS-tulostuksen edut ja haitat.....	2-8
2.2 Vaikuttavat parametrit.....	2-9
3 Parametrien vaikutukset.....	3-11
3.1 Laserparametrit.....	3-11
3.2 Skannausparametrit.....	3-12
3.3 Tehoparametrit.....	3-13
3.4 Lämpötilaparametrit.....	3-16
4 Kappaleen suunnittelu.....	4-17
5 Yhteenveto.....	5-18
LÄHDELUETTELO.....	5-20

MERKINNÄT JA LYHENTEET

DMLS	Direct Metal Laser Sintering, suora metallin lasersintraus
I_0	lasersäteen maksimi intensiteetti
v_s	skannausnopeus
d_s	säteen halkaisija
d_A	näennäinen tiheys
d_T	painettu tiheys

1 JOHDANTO

Metallin 3D-tulostus kuuluu ainetta lisääviin valmistusmenetelmiin, joiden etuna yleisesti on se, että materiaalihukkaa ei tule niin paljon kun verrataan materiaalia poistaviin menetelmiin kuten jyrsintään ja sorvaukseen. Metallien 3D-tulostus on yleistynyt kovaa vauhtia varsinkin prototyyppien- ja pienien erikoiserien valmistuksessa erityisesti sen mahdollistamien muotojen vuoksi, jotka eivät ole välttämättä mahdollisia muilla valmistusmenetelmillä. Laitteistojen hintojen lasku, niiden saatavuuden lisääntyminen sekä niiden tarkkuuden paraneminen ovat lisänneet mielenkiintoa 3D-tulostusta kohtaan yleisesti. Metallia voidaan 3D-tulostaa useilla tavoilla ja yhdeksi yleisimmäksi niistä on noussut DMLS (Direct Metal Laser Sintering) sen verrattain halvan hinnan, monipuolisuuden ja tarkkuuden yhdistelmän vuoksi. (Lehtinen 2014; Karolewska et al. 2020)

Tämän työn tarkoituksena on tutustua DMLS-menetelmään ja sinä käytettäviin keskeisiin parametreihin, jotka vaikuttavat kappaleen valmistamiseen sekä valmiiseen kappaleeseen. Tutkin myös parametrejä rajoittavia tekijöitä kuten laserin tehoa, kerrospaksuutta sekä jauheen raekokoa. Työn tavoite on auttaa valitsemaan sopivat tulostusparametrit DMLS-menetelmällä muutamaa yleistä metallien 3D-tulostuksessa käytettävää materiaalia esimerkkinä käyttäen.

2 DMLS-TULOSTUS

3D-tulostus on valmistusprosessi, jossa materiaalia sulatetaan kerroksittain päällekkäin korkeussuunnassa laaditun 3D-mallin mukaisesti, ja näin saadaan kolmiulotteinen kappale tulostettua. Suorassa metallin lasersintrauksessa eli DMLS-tulostuksessa laserilla lämmitetään metallijauhetta halutuista kohdista jolloin se sintrautuu kiinteäksi materiaaliksi, jonka jälkeen tulostuspeti liikkuu kerroksen verran alaspäin ja kerros uutta jauhetta pusketaan tulostusalueelle, ja tämä jatkuu kunnes haluttu kappale on valmis. Tulostus tapahtuu umpinaisessa kammiossa joka on täytetty reagoimattomalla jalokaasulla. DMLS-menetelmä kuuluu ainetta lisääviin valmistusmenetelmiin. Tämän tyyllisiä jauhesintrausmenetelmiä on useita, ja ne eroavat toisistaan hyvin vähän. Näitä lähinnä nimeltään erottuvia menetelmiä DMLS-menetelmän lisäksi ovat esimerkiksi selektiivinen lasersintraus (SLS) sekä jauhepetitulostus (PBF). Verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin eli ainetta poistaviin menetelmiin, kuten sorvaus ja jyrsintä, suora metallin lasersintraus poistaa geometrisia rajoitteita jotka tekisivät kappaleista mahdottomia valmistaa. Esimerkiksi ruiskuvalumuottien jäähtytyskanavista voidaan tehdä tehokkaampia ja näin nopeuttaa jäähtymisaikaa, joka puolestaan parantaa tuotannon tehokkuutta (Shen et al 2020).

Kappale tehdään CAD-ohjelmalla, jonka jälkeen se muutetaan tulostimen ymmärtämäksi koodiksi ja sille luodaan halutut tulostusradat joka kerrokselle erikseen. Erityisesti suoran metallien lasersintrauksen tulostusratoja ja niiden vaikutuksista valmiisiin kappaleisiin kehitetään jatkuvasti. (Mustafa 2020)

DMLS-menetelmässä yleisesti käytettävät lasertyypit ovat Yb-kuitu tai CO₂, tehoiltaan 100 W:sta jopa 1000 W, kuten Caprio et al käytti tutkimuksessaan. EOS GmbH:n myymissä tulostimissa teho on 200 W tai 400 W. Kerroksien paksuus vaihtelee, mutta yleensä alueella 0,01-0,03 mm. (Swift, Booker 2013;)

2.1 DMLS-tulostuksen edut ja haitat

DMLS-tulostuksen suurimpiin hyötyihin kuuluvat erityisesti toiminnallisten ja monimutkaisten prototyyppien valmistus yhdellä valmistusvaiheella, jotka vastaavat

ominaisuuksiltaan lähes perinteisesti valmistettuja kappaleita. Lisäksi viime vuosina materiaalivalikoima on laajentunut myös reaktiivisiin materiaaleihin kuten titaaniin ja alumiiniin. DMLS- tulostuksessa ei myöskään tarvita sidonta-aineita kuten polymeerejä tukemaan sintrausta. Muita etuja ovat se, että kappaleen muoto ja monimutkaisuus eivät käytännössä vaikuta kappaleen hintaan. Myös materiaalihukka on hyvin vähäistä. DMLS-menetelmällä voidaan tulostaa monimutkaisia rakenteita, jotka eivät välttämättä ole mahdollisia perinteisillä valmistusmenetelmillä, kuten kappaleen sisäisiä kanavia tai verkkomaisia sisärakenteita. (Calignano et al 2013)

Menetelmän haittoihin puolestaan kuuluvat monimutkainen prosessinohjaus ja tarkka hallinta, suuri lämpötilagradientti ja jähmettymissuhde prosessissa muodostaa suuria sisäisiä jännityksiä ja vääristymisiä kappaleeseen. Palloutuminen sekä kuonan muodostuminen voivat aiheuttaa huonon pinnankarheuden. Myös kappaleen tulostusorientaatio ja kerrospaksuus tulee ottaa huomioon, sillä erityisesti loivassa kulmassa olevilla vinoilla pinnoilla voidaan huomata askelmaista kuviota näiden seurauksena. Pinnankarheuden parantamiselle ei ole kehitetty standardikeinoa johtuen prosessin monimutkaisuudesta ja eri materiaalien ominaisuuksista. Prosessin monimutkaisuuden vuoksi myös DMLS-menetelmää käyttävien 3D-tulostimien hinta on suhteellisen korkea. (Calignano et al 2013)

2.2 Vaikuttavat parametrit

Valmiin kappaleen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa laitteesta riippuen säädettävillä parametreilla, jotka voidaan jaotella neljään eri ryhmään:

- Laser-parametrit
- Skannausparametrit
- Tehoparametrit
- Lämpötilaparametrit

Taulukossa 1 on esitetty parametrit eri ryhmiin jaoteltuna. Useat parametrit kuitenkin ovat toisistaan riippuvaisia, ja näin ollen ne eivät ole täysin eroteltavissa valmistusprosessia silmällä pitäen. (Gibson et al 2010)

Taulukko 1. Laserpohjaisen PBF-prosessin eroteltavissa olevat parametriryhmät

Laser parametrin	Skannausparametrit	Tehoparametrit	Lämpötilaparametrit
Laserteho	Skannausnopeus	Partikkelien muoto	Jauhepedin lämpötila
Polttopisteen koko	Skannaustiheys	Partikkelien koko	Jauheensyötön lämpötila
Pulssin pituus	Skannauskuvio	Partikkelien levitys	Lämpötilan tasaisuus
Pulssitaajuus		Jauhepedin tiheys	
		Kerospaksuus	
		Materiaaliominaisuudet	

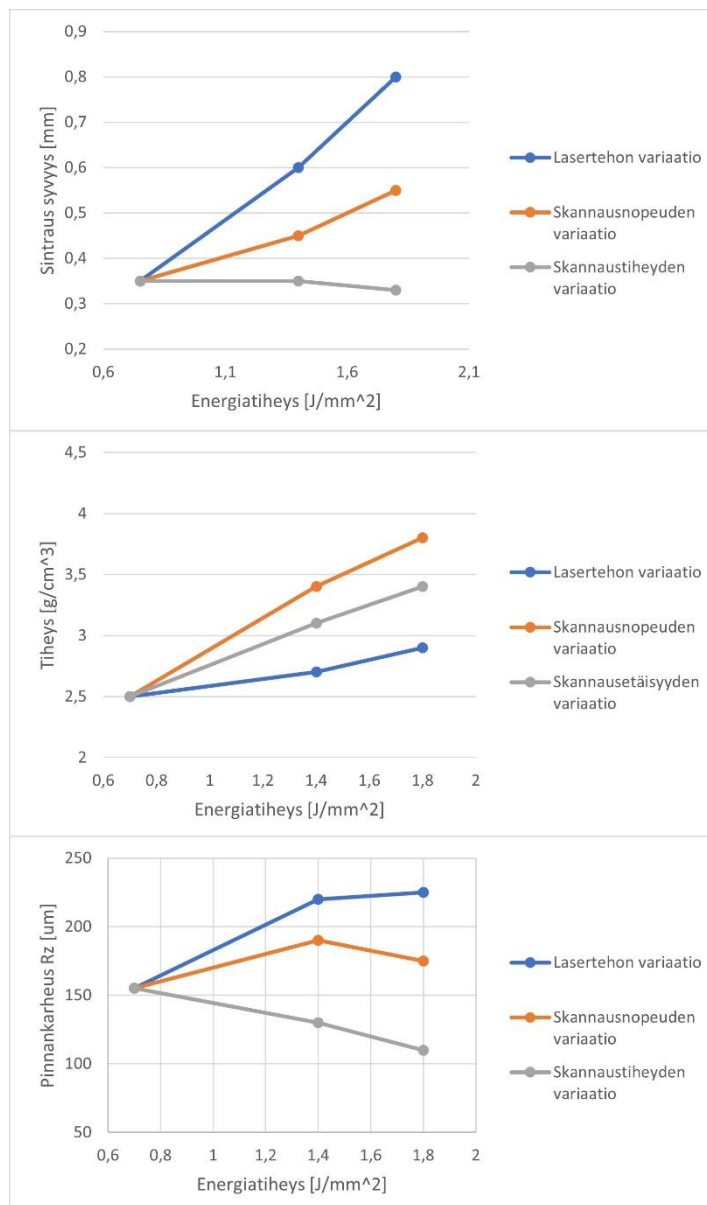
Käytännössä sintrattu alue on suurempi kuin laserin polttopiste, ja tätä aluetta kutsutaan efektiiviseksi sintrausalueeksi, ja se on suoraa verrannollinen lasertehon kanssa ja kääntäen verrannollinen skannausnopeuden kanssa. (Calignano et al 2013)

3 PARAMETRIEN VAIKUTUKSET

Tulostusparametrien oikeilla asetuksilla voidaan vaikuttaa huomattavasti valmiin kappaleen lopullisiin ominaisuuksiin. Riippuukin käyttökohteesta ja kappaleelle asetetuista vaatimuksista kuinka mitään arvoa tulisi tarkastella. Tässä kappaleessa tarkastellaan eri parametrejä ja hieman niiden vaikutuksia toisiinsa.

3.1 Laserparametrit

Laserteho on valittava huolella, sillä se vaikuttaa tulostaessa eniten kerroksen paksuuteen ja näin ollen kerrospaksuuden kasvaessa, tulisi käyttää suurempaa lasertehoa.



Haittapuolena lasertehon kasvattamisesta seuraa pinnankarheuden huonontuminen. Kappaleen tiheys nousee kasvattamalla energiatihyyttä, mutta pelkkä lasertehon nosto on tähän tarkoitukseen huono vaihtoehto, sillä skannausnopeuden laskemisella sintrauslinjoista saadaan vähemmän rikkonaisia ja skannaustiheyden nostamisella sintrauslinjat ovat lähempänä toisiaan. Kaikilla näillä kolmella keinoilla voidaan kasvattaa energiatihyyttä. Kuvassa 1 esitetään lasertehon, skannausnopeuden ja -tiheyden yhteys kerrospaksuuteen, kappaleen tiheyteen sekä

Kuva 1: lasertehon, skannausnopeuden ja pinnankarheuteen. (Song 1997) -tiheyden vaikutukset

Laserin polttopisteen muuttamisella voidaan nopeuttaa pinta-alan käsittelyä suurentamalla täyttörasteria ja nostamalla tehoa intensiteetin pysyessä samana.

3.2 Skannausparametrit

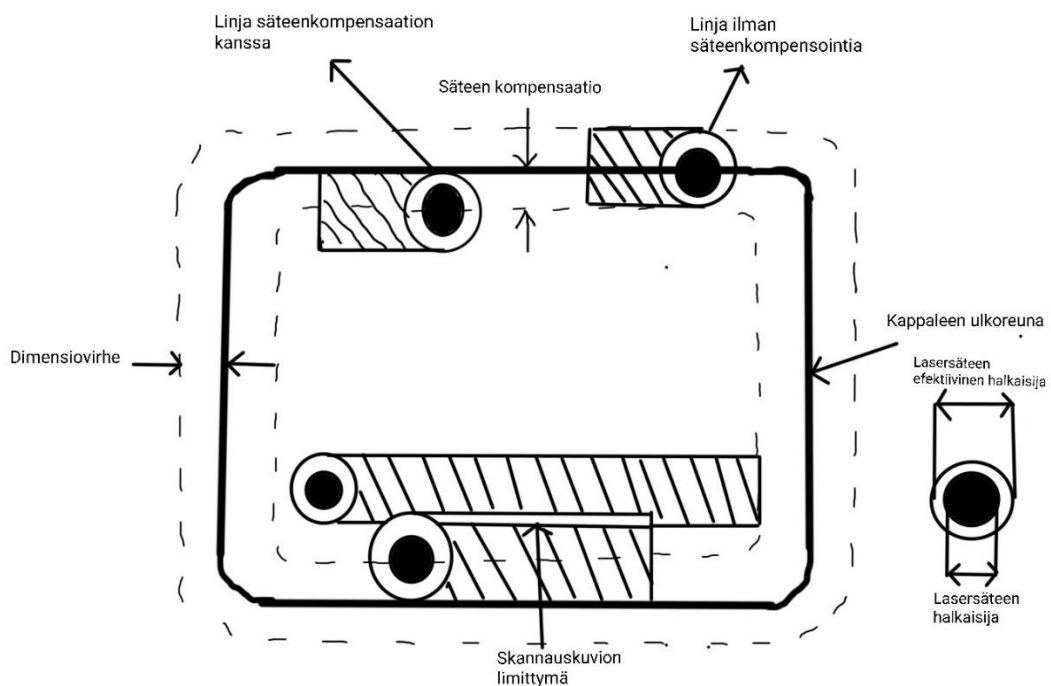
Skannausnopeus, kuten aiemmin todettiin, on tärkeää energiatheyden hallinnassa ja esimerkiksi pelkkää skannausnoeputta muuttamalla saadut energiatheyden muutokset ovat parempi vaihtoehto kuin lasertehon nostaminen kappaleen tiheyden ja pinnankarheuden parantamisessa. (Song 1997)

Esimerkki käytetyistä skannausnopeuksista ja -tiheyksistä löytyy Sateesh et al. 2014 tutkimuksesta, jossa tutkittiin DMLS-menetelmällä Inconel-625 metalliseosjauheesta valmistettujen kappaleiden mikrorakennetta ja mekaanisia ominaisuuksia käyttäen eri tulostusparametreja. Tutkimuksessa käytetyt skannausnopeudet olivat 2.5 mm/s, 5 mm/s, 7,5 mm/s ja 10 mm/s lasertehon ollessa 240 W. Testatut skannaustiheydet olivat 0,2 mm, 0,3 mm sekä 0,4 mm lasersäteen halkaisijan ollessa 0,4 mm. Jauheen palloutuminen 0,2 mm skannaustiheydellä oli niin voimakasta, että kappaleita ei saatu tulostettua loppuun, sillä jauheen tasoittaja jäi palloihin jumiin.

Skannaustiheyden tulisi olla tarpeeksi tiheä vaikka teoriassa tarvittava energiateho saavutettaisiin lasertehon nostamisella, sillä liian harva kuvio laskee kappaleen lopullista tiiviyttä. (Song 1997)

Molemmat skannausnopeus ja -tiheys vaikuttavat lämmöntuontiin ja jäähtymisnopeuteen. Näin ollen suurella skannausnopeudella ja harvalla skannaustiheydellä tulostettaessa mikrorakenne koostuu pääosin lyhyistä dendriittisistä kiteistä nopeasta jäähtymisestä johtuen. Pienellä skannausnopeudella taas jäähtyminen on hitaampaa ja mikrorakenteesta tulee solumaisempaa. Sama ilmiö toistuu skannaustiheyden yhteydessä, tiheämmällä skannaustiheydellä laser tuo lämpöä osittain myös viereiseen skannauslinjaan ja näin hidastaa jäähtymistä. Kuitenkin taas liian tiheä skannaus aiheuttaa jauheen palloutumista. Sopiva skannaustiheys riippuu kuitenkin lasertehosta ja laserin polttopisteen koosta, esimerkiksi lasersäteen halkaisijan ollessa 0,4 mm, parhaat tulokset saavutettiin 0,3 mm skannaustiheydellä tässä tapauksessa. (Sateesh et al 2014)

Skannaustiheys yleisesti on sopiva kun noin neljäsosa laserin efektiivisestä halkaisijasta menee limittäin edellisen skannauslinjan kanssa. Tämä voi vaihdella materiaalista riippuen. Skannaustiheyden ylittäessä lasersäteen halkaisijan metallijauhe ei sitoudu keskenään hyvin. Harva skannaustiheys aiheuttaa yleensä kappaleeseen korkean mekaanisen lujuuden, sillä suurempi osa energiasta imeytyy jauheeseen. Osittain sulan päältä skannaaminen ei nosta energiatheyttä suoraan suhteessa tiheämpään skannauskuvioon, sillä sula materiaali heijastaa laserin energiasta huomattavasti enemmän pois kappaleesta kuin jauhe. Kuvassa 2 esitetään skannaustiheyden limittäisyyttä ja säteen kompensatiota kappaleen mittatarkkuuden parantamiseksi. (Calignano et al 2014)



Kuva 2 Calignano et al 2014 skannaustiheys ja -kuvio

3.3 Tehoparametrit

Partikkeleiden koko ja kokojakauma vaikuttavat pinnankarheuteen. Esimerkiksi alle 45 μm partikkelit sulavat helpommin ja muodostavat kasan, kun taas 45-90 μm kokoiset partikkelit säilyttävät enemmän muotoaan ja sintrautuvat hyvin toisiinsa. Paras lopputulos tässä testissä saatiin kun sekoitettiin partikkeleita suhteessa 30:70 painoprosentin mukaan. Alle 45 μm kokoisia partikkeleita oli 30% ja 45-90 μm partikkeleita 70%. (Song 1997)

Partikkeleiden muoto, erityisesti pyöreys, vaikuttaa jauhekerroksen suhteelliseen tiheyteen, mutta yleisesti ottaen jauheiden laatu on niin hyvä, että sillä ei juurikaan enää ole vaikutusta. (Haferkamp et al 2020)

Keskimääräinen partikkeleiden koko sekä kokojakauma ovat tärkeitä, kun mitataan jauheen näennäistä tiheyttä ja painettua tiheyttä. Yhdessä partikkeleiden pyöreiden kanssa nämä muodostavat jauheen ominaisuuden virtausasteen, joka vaikuttaa tulostetun kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin sekä pinnanlaatuun. Virtausastetta voidaan mitata erillisellä testilaitteella, mutta aiheesta tehdyt tutkimukset osoittavat, että virtausasteen laskemiseksi löydetty Hausner-suhde sekä Carr-indeksi ovat hyvin lähellä testattuja tuloksia.

$$\text{Hausner-suhde (HR)} = d_A/d_T$$

$$\text{Carr-indeksi (CI)} = \left\{ \frac{d_T - d_A}{d_T} \right\} * 100$$

Joissa d_A ja d_T tarkoittavat näennäistä ja painettua tiheyttä.

Jauheen virtaavuus	Hausner-suhteen rajat	Carr-indeksin rajat
Loistava	1.00-1.11	<10
Hyvä	1.12-1.18	11-15
Kohtalainen	1.19-1.25	16-20
Kelpaava	1.26-1.34	21-25
Huono	>1.35	>26

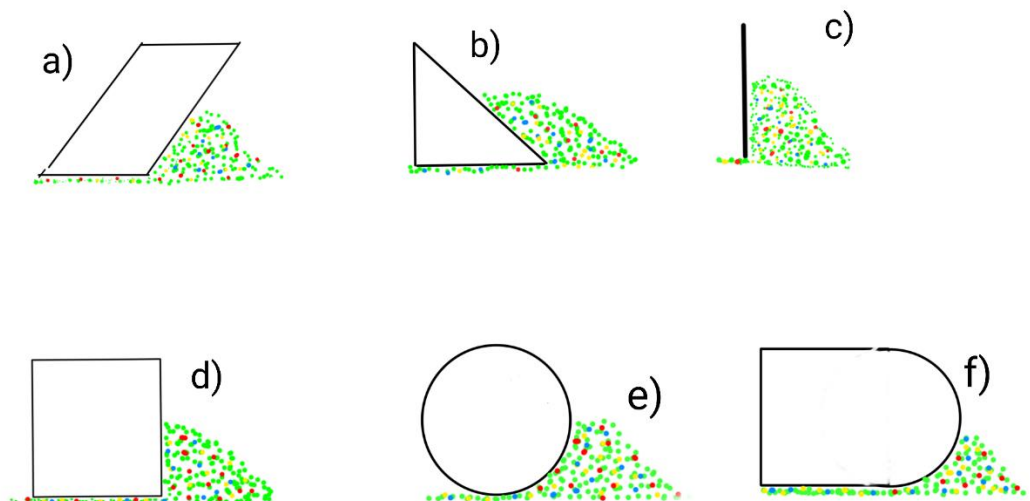
Kuva 3 Hausner-suhde ja Carr-indeksi

Kuvassa 3 esitetään edellämaituilla kaavoilla laskettujen arvojen suhdetta virtausasteeseen. (Kaleem et al 2020)

Kaleem et al huomasivat tutkimuksessaan, että laaja kokojakauma parantaa virtausastetta, sillä pienemmät partikkelit täyttävät kolot isompien partikkeleiden väleissä virtauksen aikana. Kokojakauman laajuudelle kuitenkin on optimaalinen alue ja sen ollessa liian suuri, virtaus huononee. Tässä kyseisessä tutkimuksessa parhaat tulokset virtaukselle saatiin kun partikkeleiden mediaanikoko $d_{50} = 75 \mu\text{m}$ ja kokojakauma jossain $d_{10} = 18 \mu\text{m}$ ja $d_{90} = 135 \mu\text{m}$ välissä.

Kerrosrakisuuden ohentamisen on todettu parantavan valmistettavan kappaleen tiheyttä sekä mittatarkkuutta. Kuitenkin kerrosrakisuutta on hankala säädellä täysin, esimerkiksi uudelleenlevityksen nopeuden kasvaessa kerrosrakisuus pienenee. Myös sintrattujen alueiden pinnankarheus vaikuttaa levitettävään jauhekerrokseen, jolloin on mahdollista muodostua epätasainen kerros. Jos tämä ilmiö esiintyy erityisen voimakkaasti, voi jo sintrautuneita kappaleita lähteä jauheen levittäjän mukaan ja jauhekerrokseen muodostuu uria. (Phua et al 2021)

Jauheen levitykseen käytettävän pyyhkijän geometria on myös oleellinen osa jauhepedin tasaista muodostamista. Käytössä on olemassa useita eri tyyliä esimerkiksi suora terä, joka on 90 asteen kulmassa jauhepetiin nähden, pyöreä terä, jonka kärki on puolilympyrän muotoinen, tai rullamainen pyyhkijä, joka pyörii menosuuntaa vastaan jauhetta levittäessään.



Kuva 4 (a) eteenpäin kallistuva terä; (b) taaksepäin kallistuva terä; (c) pystysuora terä; (d) leveä terä; (e) rulla; (f) pyöreä terä

Kuvassa 4 esitetään eri tyyliä jauheenlevitys pyyhkijöitä. Värilliset pisteet esittävät partikkeleita värijärjestyksessä pienimmästä suurimpaan vihreä, sininen, keltainen ja punainen. Näistä kuudesta tyylistä pyöreäteräisen pyyhkijän todettiin sijoittavan suurimman määrän partikkeleita tilavuudeltaan. Toiseksi paras oli eteenpäin kalteva terä. Rulla todettiin näistä huonoimmaksi paitsi silloin, kun kerrosrakisuus oli suuri. Eteenpäin

kaltevan terän etu pyöreään terään on se, että se kohdistaa alla olevaan kappaleeseen kaikista vähiten voimaa jauheen välityksellä. Pyöreällä terällä ja rullalla voimat ovat paljon suurempia, tosin ne pienenevät kerrospaksuuden kasvaessa. Rullan suurin heikkous on kuitenkin partikkeleiden purskahtelu, josta voi johtua epätasainen jauhekerros. Purskahduksessa rullan jauheeseen aiheuttama paine ja pyörivä liike aiheuttaa partikkeleiden purskahtamisen rullan keskikohdan takana. (Wang et al 2021)

Käytettävät parametrit skannausnopeuksien ja kerrospaksuuksien osilta riippuvat myös käytettävästä materiaalista. Eri artikkeleita tutkittuani kuitenkin huomasin, että parametrit joudutaan määrittämään koepohjaisesti mikäli juuri kyseisestä materiaalista ei ole tutkimustietoa valmiiksi saatavilla. Aiemmin esitetyt teoriat ja eri parametreihin liittyvät tutkimukset pätevät kuitenkin pääosin ja niitä voi pitää hyvänä lähtökohtana uutta materiaalia käytettäessä.

EOS GmbH on yleisesti viitattu johtavaksi DMLS-menetelmää käyttäväksi 3D-tulostimien valmistajaksi. Heidän tarjonnastaan materiaalien osalta lippulaiva tuotantomalliin löytyy alumiini (AlSi10Mg), työkaluteräs (MS1), ruostumaton teräs (316L), kolmea eri nikkelseosta (HX, IN718, IN939), karkaisuterästä (20MnCr5) sekä neljää eri titaanilaatua (Ti64, TiCP, Ti64 Grade 5, Ti64 Grade 23).

3.4 Lämpötilaparametrit

DMLS-menetelmää käyttävät tulostimet esilämmittävät jauheen yleensä jauhesäiliön pohjassa olevilla lämmitysvastuksilla, ja näin ollen lämpötilat eivät ole huomattavan suuria, noin 200 °C. Tämä kuitenkin hidastaa sintratun aineen jäähtymistä ja vähentää energiantuontia laserilta verrattuna jos jauhe olisi huoneenlämpöistä. Caprio et al kehittivät testilaitteen jolla voidaan lämmittää jauhetta jopa 800 C° käyttäen induktiota, sekä hallita jauheen ja tulostetun kappaleen jäähtymistä paremmin. Tehokkaammalla esilämmityksellä ja hallitummalla jäähtymisellä voitaisiin mahdollisesti estää nopeasta jäähtymisestä johtuvia halkeamia ja parantaa kappaleen tiheyttä. Jäähtymishalkeamat ei ole kuitenkaan ongelma yleisesti käytetyillä materiaaleilla. (Caprio et al 2020)

4 KAPPALEEN SUUNNITTELU

Vaikka kappaleen suunnittelu ei suoranaisesti ole tulostuksen parametri, voidaan sillä saada huomattavia etuja kappaleen lopullisiin mekaanisiin ominaisuuksiin ja pinnanlaatuun. Vaikka DSML-menetelmällä voidaan tulostaa erittäin vaativiakin kappaleita, täytyy lopputuotteen kerrosmainen rakenne ottaa huomioon.

Kappaleen tulostussuunta on hieman suunnittelun ja tulostusparametrien välimaasta, mutta se on yksinkertaisin vaihtoehto saavuttaa halutut ominaisuudet tekemättä muutoksia jo suunniteltuun kappaleeseen. Esimerkiksi Miozga ja Kurek (2021) huomasivat kokeessaan, että vaakasuunnassa tulostetut vetokoesauojen vetolujuus oli jopa noin 22% korkeampi kuin pystysuorassa tulostettujen.

Myös kerrosmaisesta rakenteesta johtuva porrasmaisuus voi aiheuttaa huonon pinamkarheuden erityisesti välillä 0° - 45° astetta. Kerrospaksuus vaikuttaa huomattavasti siihen, kuinka karkea porrastuksesta tulee. Näin ollen mikäli tasosta halutaan mahdollisimman hyvä pinnanlaadultaan, on se parasta tulostaa joko vaaka- tai pystysuoraan. Vaihtoehtoista parempi on se, johon suuntaan hyvää lujuutta halutaan. (Miozga & Kurek 2021)

5 YHTEENVETO

Kuten parametreistä käy ilmi, tärkeä osa DMLS-menetelmällä tulostettaessa parhaiden mahdollisten ominaisuuksien ja pinnanlaadun saamiseksi on tarkoin mietittävä tulostuksessa käytettävien arvojen valinta jo etukäteen yhdessä valitun materiaalin kanssa. Myös tulostettavan materiaalin raekoko ja sen jakauma vaikuttavat huomattavan paljon lopullisen kappaleen tiivyyteen ja kerrosten yhteen liittymiseen. Menetelmä on jo sen verran kypsä ja tutkittu, että käytettäessä tunnetun valmistajan tulostinta ja materiaalia, saadaan hyvän kappaleen tulostamisen mahdollistavat parametrit jo valmistajalta.

Laserparametrejä ei yleensä muuteta tulostusten välillä ja suurinta osaa niistä voi olla hankalaa muuttaa, sillä ne ovat lasermoduulin ominaisuuksia. Tehon ollessa ainoa helposti muutettava parametri, mikäli halutaan käyttää pienempää tehoa kuin maksimiteho.

Skannausparametrit ovat lähes tärkeimpiä parametrejä kun lähdetään toteuttamaan tulostusta. Skannauslinjojen etäisyydet vaikuttavat mm. tehohäviöön, linjojen liittymiseen, tiheyteen yms. ja niiden muoto vaikuttaa kappaleen lujuuteen ja mittatarkkuuteen. Esimerkiksi jos joka toisen kerroksen linjat skannataan 90° asteen kulmassa, kappaleen lujuus nousee sivuttaissuunnissa rasituksessa.

Suurin osa tehoparametreista valitaan jo siinä vaiheessa kun mietitään mistä materiaalista kappale valmistetaan. Nämä ovat siis materiaalin ominaisuudet, raekoko ja -jakauma, partikkeleiden muoto sekä osittain myös jauhekerroksen tiheys. Jo tulostinta miettiessä nousee esiin jauheen levittäjän geometria, joka osaltaan vaikuttaa myös jauhekerroksen tiheyden, kuten aiemmin esitetty. Mahdollisesti jauheenlevittäjän geometriaan voi vaikuttaa myöhemmin vaihtamalla sen. Ainoastaan kerrospaksuus on helposti muuteltavissa ja se kulkeekin yhdessä lasertehon ja skannausnopeuden kanssa halutun energiatiheyden saavuttamiseksi.

Lämpötilaparametrit ovat yleensä, kuten laserparametrit, vähemmän säädeltäviä, sillä esimerkiksi jauheen esilämmityksen lämpötila suurimmillaankaan ei ole niin suuri, että sen alentamisesta aiheutuisi muuta kuin hitaampi tulostusnopeus. Tähän on kehitelty

menetelmiä lämmittää jauhe induktion avulla jopa 800 C°, mutta se on harvoin tarpeellista ja myös rajoittaa tulostusalueen kokoa.

Suunnittelulla ja tulostussuunnalla voidaan muokata kappaleen mekaanisia ominaisuuksia sekä pinnankarheutta. Kappaleen lujuus tulostuksen Z-akselin suuntaisesti on heikoin ja pinnankarheus taas paras X-Y-tasossa. Huonosti valittu tulostussuunta voi aiheuttaa porrasmaisen pinnan ja huonon pinnankarheuden kappaleeseen.

LÄHDELUETTELO

Karolewska, K., Ligaj, B., Wirwicki, M., Szala, G., 2020. Strength analysis of Ti6Al4V titanium alloy produced by the use of additive manufacturing method under static load conditions, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 9, Issue 2, s. 1365-1379, ISSN 2238-7854

Lehtinen, K., 2014. Sanasto ja termistö, Suomenkielinen sanasto [verkkodokumentti].
Julkaisupaikka: FIRPA. Saatavissa: <http://www.firpa.fi/html/suomi.html>

Shen, S., Kanbur, B. B., Zhou, Y., Duan F., 2020. Thermal and Mechanical Assessments of the 3D-Printed Conformal Cooling Channels: Computational Analysis and Multi-objective Optimization, *Journal of Materials Engineering and Performance* 29, s. 8261–8270

Mustafa, S. S., Lazoglu, I., 2020. A design framework for build process planning in DMLS, *Progress in Additive Manufacturing* 5, 125–137

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

Swift, K. G., Booker, J. D., 2013. *Manufacturing Process Selection Handbook*, Elsevier, Lontoo

Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., 2010. *Additive manufacturing Technologies Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. 459 s. Springer, New York. ISBN 978-1-4419-1119-3.

Song, Y., 1997. Experimental study of the basic process mechanism for direct selective laser sintering of low-melting powder. *Ann CIRP* 46(1):127–130

Sateesh, N. H., Mohan Kumar, G. C., Prasad Krishna, Srinivasa, C. K., Vinod, A. R., 2014. Microstructure and Mechanical Characterization of Laser Sintered Inconel-625 Superalloy, *Procedia materials science* 5, s. 772-779

Haferkamp, L., Spierings, A., Rusch, M., Jermann, D., Spurek, M. A. 2020. Effect of Particle size of monomodal 316L powder on powder layer density in powder bed fusion, *Progress in Additive Manufacturing* 6, s. 367–374

Kaleem, M. A., Alam, M. Z., Khan, M., Jaffery, S. H. I., Rashid, B. 2020. An experimental investigation on accuracy of Hausner Ratio and Carr Index of powders in additive manufacturing processes, *Metal powder report*.
<https://doi.org/10.1016/j.mprp.2020.06.061>

Phua, A., Doblin, C., Owen, P., Davies, C. H. & Delaney, G. W. 2021. The effect of recoater geometry and speed on granular convection and size segregation in powder bed fusion. *Powder technology*, 394, 632-644. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.058>

Wang, L., Yu, A., Li, E., Shen, H. & Zhou, Z.. 2021. Effects of spreader geometry on powder spreading process in powder bed additive manufacturing. *Powder technology*, 384, 211-222. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.022>

EOS GmbH, 2021. EOS M 400-4 tekninen tietolomake [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.eos.info/03_system-related-assets/system-related-contents/_pdf_system-data-sheets/eos_system_data_sheet_eos_m_400-4_en.pdf [vitattu 12.11.2021].

Marrey, M., Malekipour, E., El-Mounayri, H. & Faierson, E. J. (2019). A Framework for Optimizing Process Parameters in Powder Bed Fusion (PBF) Process Using Artificial Neural Network (ANN). <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.214>

Caprio, L., Demir, A. G., Chiari, G. & Previtali, B. (2020). Defect-free laser powder bed fusion of Ti-48Al-2Cr-2Nb with a high temperature inductive preheating system. *Journal of Physics: Photonics*, 2(2), 24001. <https://doi.org/10.1088/2515-7647/ab7080>

Miozga, R. & Kurek, M. (2021). Effect of print orientation using DMLS method on strength of materials. MATEC web of conferences, 338, 1017.
<https://doi.org/10.1051/matecconf/202133801017>