

Ville Korhonen

LASERJAUHEPETIMENETELMIEN TU- LOSTUSPARAMETRIEN VAIKUTUS ME- TALLISIIN TULOSTEISIIN

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Kesäkuu, 2023

TIIVISTELMÄ

Ville Korhonen: Laserjauhepetimenetelmien tulostusparametrien vaikutus metallisiin tulosteisiin
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Materiaalitekniikan tutkinto-ohjelma
Kesäkuu 2023

Tässä työssä perehdytään laserjauhepetimenetelmiin (LPBF, Laser Powder Bed Fusion) metallisten kappaleiden ainetta lisäävässä valmistuksessa. Laserjauhepetimenetelmissä jauhe- maista raaka-ainetta sulatetaan tai sintrataan yhteen kerroksittain lasersäteellä. Menetelmät ovat alun perin kehitetty 1990-luvulla, mutta ne ovat kehittyneet merkittävästi ja yleistyneet teolliseen käyttöön 2010-luvulla. LPBF-menetelmien avulla voidaan valmistaa monimutkaisia kappaleita, joiden valmistus olisi muuten mahdotonta tai erittäin haastavaa.

LPBF-menetelmät ovat monimutkaisia ja niissä voi olla yli 100 säädettävää parametria. Menetelmien ollessa uusia verrattuna tavanomaisiin valmistustapoihin niissä on paljon kehitettävää. Parametrien vaikutus tulostuvan kappaleen ominaisuuksiin on kriittistä ymmärtää, jotta voidaan kehittää laadukkaampia kappaleita sekä prosessin tehokkuutta.

Tämä kirjallisuuskatsaus koostuu kolmesta osa-alueesta. Alussa tarkastellaan LPBF-laitteiston rakennetta, menetelmien eroja ja prosessin toimintatapaa. Toisessa osassa perehdytään tulostusprosessissa käytettäviin materiaaleihin ja niiden vaatimuksiin. Kolmannessa osassa perehdytään LPBF-menetelmien prosessiparametreihin, skannausstrategiaan sekä syntyviin vikoihin ja mikrorakenteeseen. Työn tarkoituksena on selvittää tulostusparametrien ja kappaleen rakenteen, mekaanisten ominaisuuksien sekä syntyvien vikojen välistä yhteyttä laadukkaampien kappaleiden tuottamiseksi.

Työssä huomataan jauheen ominaisuuksien olevan merkittävin prosessiparametri, jotta saavutetaan tasalaatuinen tuloste. Materiaalivaihtoehdot ovat rajattuja prosessissa herkkien seosainneiden haihtumisreaktioiden vuoksi. Materiaalit ovat kalliita verrattuna tavanomaisiin menetelmiin. Skannausnopeus, kerrospaksuus, laserin teho ja skannausväli muodostavat laskennallisen energiatiheyden, jonka avulla voidaan arvioida sopivia prosessiparametreja. Liian suuri energiatiheys voi aiheuttaa haihtumisreaktioita sekä keyhole-huokoisuutta. Liian matala energiatiheys voi aiheuttaa puutteellisesta sulamisesta aiheutuvaa lack-of-fusion huokoisuutta, joka aiheuttaa skannauspolkujen ja kerrosten välistä heikkoutta. Lisäksi huomataan LPBF-menetelmissä syntyvän mikrorakenteen olevan yleisimmin pylväsmäinen tai tasakantainen dendriittinen. Suuntautuneen pylväsmäisen rakenteen voi aiheuttaa liian suuri jähmettymisnopeus tai lämpötilagradientti.

Avainsanat: Ainetta lisäävä valmistus, 3D-tulostus, AM, LPBF, SLM

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	4
2. LASERJAUHEPETIMENETELMÄT	5
2.1 Laitteiston rakenne.....	5
2.2 Tulostusprosessin vaiheet.....	7
2.3 Menetelmien erot	8
3. MATERIAALIT	10
3.1 Materiaaleilta vaadittavat ominaisuudet.....	10
3.2 Yleisimmät tulostettavat materiaalit	12
4. TULOSTUSPARAMETRIT JA VAIKUTUS KIDERAKENTEeseen	15
4.1 Sulan ominaisuudet.....	15
4.2 Säädettävät parametrit.....	16
4.2.1 Laserparametrit.....	18
4.2.2 Skannausparametrit.....	20
4.2.3 Lämpötilaparametrit	24
4.3 Syntyvä mikrorakenne.....	25
4.4 Parametrien vaikutus syntyviin vikoihin	29
5. YHTEENVETO.....	33
LÄHTEET	35
LIITE A.....	39

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AM	Additive Manufacturing, ainetta lisäävä valmistus
BD	Build Direction, rakennussuunta
DMLS	Direct Metal Laser Sintering, metallijauheen sintraukseen perustuva tulostustekniikka
EBSD	Electron Backscatter Diffraction, Elektronien takaisinsirona diffraktio
HAZ	Heat Affected Zone, lämpövaikutusvyöhyke
HIP	Hot Isostatic Pressing, kuuma isostaattinen puristus
IPF	Inverse Pole Figure, kideorientaation osoittava kaavio
LPBF	Laser Powder Bed Fusion, laserjauhepetimenetelmä
LPS	Liquid-phase Sintering, nestefaasi sintraus
LSM	Liquid-state Melting, nestemäiseen tilaan sulatus
PBF	Powder Bed Fusion, jauhepetimenetelmä
PKK	Pintakeskinen kuutiollinen
PM	Partial Melting, osittainen sulatus
SD	Scanning Direction, skannaussuunta
SLM	Selective Laser Melting, sulattamiseen perustuva tulostustekniikka
SSS	Solid-state sintering, kiinteässä tilassa sintraus
TD	Transverse Direction, poikkisuunta
TKK	Tilakeskinen kuutiollinen
VED	Volumetric energy density, energiatiheys
d	lasersäteen halkaisija
G	lämpötilagradientti
h	skannausväli
l	jauhekerroksen paksuus
M_d	sulan tunkeuma
M_d^0	sulan minimitunkeuma
P	lasersäteen teho
R	jähmettymisnopeus
s	skannausväli
t_{max}	suurin jauhekerroksen paksuus
T_m	sulamislämpötila
v	skannausnopeus

1. JOHDANTO

Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät (AM, Additive Manufacturing) ovat nopeasti kasvattamassa suosiotaan teollisuudessa niiden tuomien mahdollisuuksien ansiosta. Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät poikkeavat huomattavasti tavanomaisista valmistusmenetelmistä rakentamalla kappaleen kerroksittain suoraan 3D-mallista, mikä mahdollistaa monimutkaisten kappaleiden valmistuksen ilman kalliita työkaluja tai muotteja. Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä voidaan esimerkiksi yhdistää monta tavallisesti erikseen valmistettua kappaletta yhdeksi kappaleeksi, jolloin voidaan saavuttaa kevyempiä, lujempia ja halvempia komponentteja.

Metallisten kappaleiden valmistus ainetta lisäävillä menetelmillä on kehittynyt erittäin nopeasti viimeisen vuosikymmenen aikana uusien teknologioiden mahdollistamana. Eräs yleisimmistä metallien ainetta lisäävistä valmistusmenetelmistä on laserjauhepetimenetelmä, josta yleisesti käytetään lyhennettä LPBF (Laser Powder Bed Fusion). LPBF-menetelmät kykenevät tuottamaan hyvin tarkkoja ja laadukkaita kappaleita, mutta menetelmän monimutkaisuuden vuoksi niiden tuottaminen vaatii säädettävien parametrien tarkan tuntemuksen. LPBF-menetelmillä voidaan valmistaa kappaleita erittäin vaativiin käyttökohteisiin, kuten suihkuturbiineihin, joissa osien laatu on kriittistä. Ainetta lisäävien valmistusmenetelmien prosessissa on runsaasti kehitettävää laadukkaampien kappaleiden tuottamiseksi, koska menetelmät ovat suhteellisen uusia verrattuna tavanomaisiin valmistustapoihin. Tässä työssä perehdytään LPBF-menetelmiin metallien valmistuksessa, niiden toimintatapaan, käytettäviin materiaaleihin ja säädettäviin parametreihin. Tavoitteena on selvittää säädettävien parametrien vaikutusta tulostettavan kappaleen ominaisuuksiin ja materiaaliin syntyviin vikoihin sekä selvittää, kuinka parametreja optimoimalla voidaan valmistaa laadukkaampia kappaleita. Selvittämällä tulostusparametrien, syntyvän mikrorakenteen ja mekaanisten ominaisuuksien välistä yhteyttä voidaan tulostusprosessi optimoida tehokkaammaksi sekä luoda uusia rakenteita, joita ei voitaisi muuten valmistaa.

2. LASERJAUHEPETIMENETELMÄT

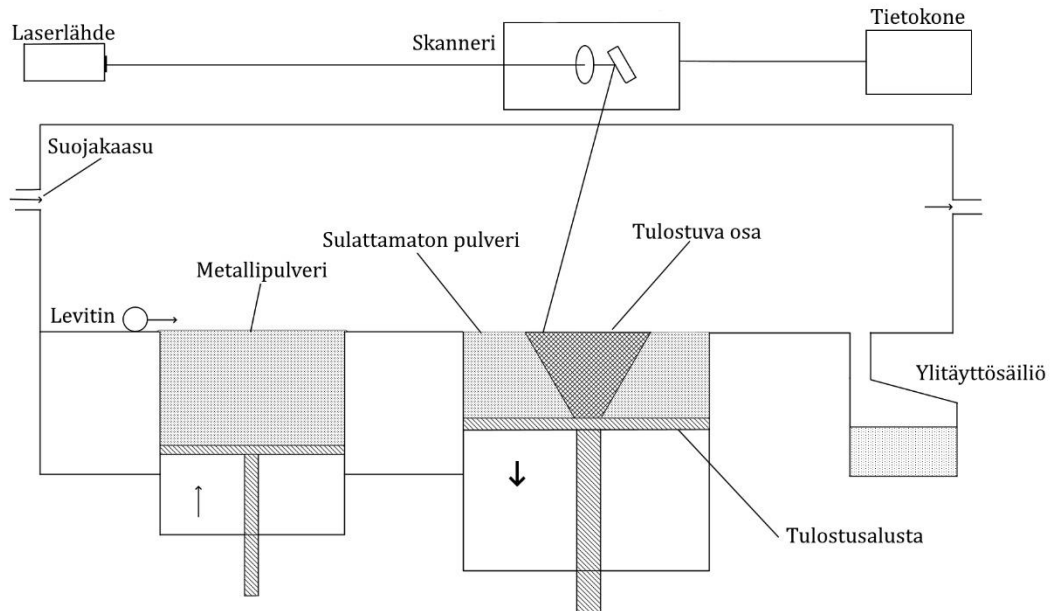
Ainetta lisäävä valmistus, joka tunnetaan myös 3D-tulostuksena, on yleistymässä valmistustekniikoiden kehittyessä. Materiaalia lisäävän valmistuksen etuja ovat muotoilun vapaus, raaka-aineen säästö sekä nopea prototyyppien valmistus.

Jauhepetimenetelmät (PBF, Powder Bed Fusion) ovat materiaalia lisäävän valmistuksen alaryhmä, ja ne perustuvat jauhemaisessa muodossa olevan raaka-aineen kerroksittaiseen lisäämiseen. Kerrokset yhdistetään toisiinsa kuumentamalla yhdistettäviä alueita energialähteellä, yleensä lasersäteellä tai elektronisuihkulla. [1, s. 67–69] Tässä työssä keskitytään laserjauhepetimenetelmiin (LPBF, Laser Powder Bed Fusion) niiden yleisyyden ja paremman tarkkuuden vuoksi. LPBF-menetelmät ovat yleisessä käytössä metallien ainetta lisäävänä valmistusmenetelmänä sen tuottaman hyvän mittatarkkuuden sekä mekaanisten ominaisuuksien ansiosta. Metalleille käytössä olevia menetelmiä ovat Selective Laser Melting (SLM) ja Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Menetelmät ovat hyvin lähellä toisiaan, mutta erona on käytössä olevan lasersäteen teho ja sen tuottama prosessilämpötila. [2] Menetelmien nimiä käytetään osittain synonyymeinä toisilleen niiden historian vuoksi. DMLS kehitettiin vuonna 1990 Yhdysvalloissa, minne se jäi yleiseksi nimitykseksi metallien laserjauhepetimenetelmälle. SLM puolestaan kehitettiin vuonna 1995 Saksassa ja on yleisempi termi Euroopassa. [2], [3]

2.1 Laitteiston rakenne

DMLS- ja SLM-laitteistot ovat rakenteeltaan hyvin samanlaisia ja laitteistojen perusrakenne on esitetty kuvassa 1. Energialähteenä LPBF-menetelmissä käytetään lasersädettä, joka tuotetaan yleensä CO₂-, Nd:YAG- tai kuitulaserilla. Laserlähteen teho on yleensä SLM-tulostimissa noin 200–2 000 W. Yleensä metallitulostimissa käytetään kuitulaseria tehon, optisen laadun, kompaktin koon ja luotettavuuden takia. Kuitulaser mahdollistaa myös lasersäteen kuljetuksen helposti liikutettavalle kohdistimelle. [4, s. 20] Tulostettaessa metalleja kuitulaserin tuottama noin 1 µm:n aallonpituus absorboituu tehokkaammin jauheeseen kuin CO₂-laserin noin 10 µm:n aallonpituus [5, s. 6]. Parempi absorptio parantaa energiatehokkuutta ja mahdollistaa pienempitehoisemman laserin käytön. Esimerkiksi kuparijauhe absorboi 59 % Nd:YAG-lasersäteestä (aallonpituus 1,06 µm) ja 26 % CO₂-lasersäteestä (aallonpituus 10,6 µm) [2]. Moderneissa tulostimissa voidaan käyttää useampaa laserlähdettä samanaikaisesti nopeamman tulostusnopeuden saavuttamiseksi. Lasersäde ohjataan skannerille, jossa peilit ohjaavat lasersäteen

tulostusalustalle. Tietokone ohjaa skanneria 3D-mallista luodun tiedoston avulla. Tulostusalusta on metallinen levy, jota liikutetaan korkeussuunnassa tulostuksen aikana. Tulostusalustaa voidaan lämmittää tulostettavan kappaleen jäähtymisen hidastamiseksi, jolloin hauraita materiaaleja voidaan tulostaa ilman säröjä [6]. Hidas jäähtyminen pienentää kappaleeseen syntyviä lämpötilaeroja, mikä vähentää syntyviä jäännösjännityksiä.



Kuva 1. SLM/DMLS tulostimen rakenne, muokaten lähteistä [7], [8].

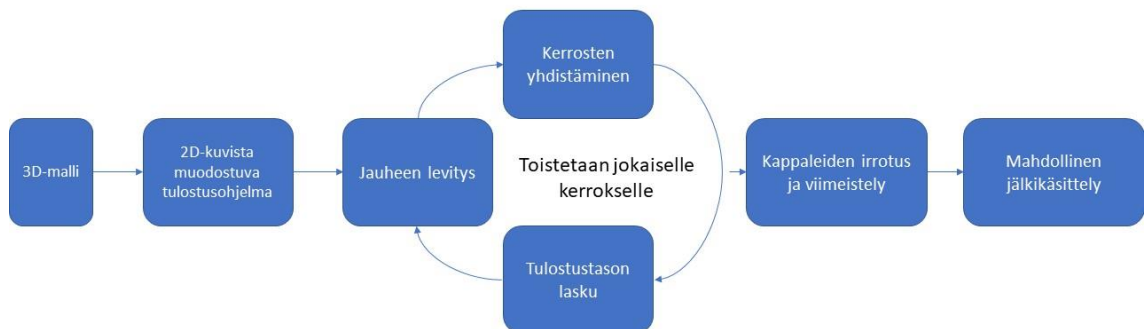
Tulostusprosessissa käytettävä metallipulveri voidaan syöttää joko ala- tai yläpuolelta. Alapuolisessa syötössä sylinteri nostaa halutun määrän raaka-ainetta levittimelle, kuten kuvassa 1. Yläpuolisessa syötössä raaka-ainetta pudotetaan säiliöstä joko levittimelle tai suoraan tulostusalueen päälle. Levittimen tehtävänä on tuottaa tasalaatuinen ja halutun kerrospaksuuden korkeinen raaka-ainekerros tulostusalueen päälle. Tuotetun kerroksen ominaisuudet vaikuttavat saavutettavaan tulostettavan kappaleen ominaisuuksiin, kuten tiheyteen. Levittimenä voidaan käyttää terää, rullaa tai näiden yhdistelmää. Terä on yksinkertaisin levitin, mutta sillä voidaan ainoastaan säädellä kerrospaksuutta. Yleisin levitin on liikettä vastakkaiseen suuntaan pyörivä rulla, koska se parantaa jauheen virtausta ja tiivistää kerrosta. Liikkeen suuntaan pyörivä rulla tiivistää kerrosta enemmän verrattuna vastakkaiseen suuntaan pyörivään. Vastakkainen suunta työntää jauhetta pois rullan alta liikkeen suuntaan pyörivän painaessa jauhetta rullan alle. Liikkeen suuntaan pyörivä rulla nostaa jauhetta rullan takana jättäen pinnan epätasaiseksi, jolloin tulostuva kerros ei ole homogeeninen. Tämä voidaan estää käyttämällä terän ja rullan yhdistelmää, jolloin terän levittämä kerros tiivistetään liikesuuntaan pyörivällä rullalla. Terä tiivistää irtonaista jauhetta luoden ohuemman jauhekerroksen ennen rullaa. Tällöin jauhe

ei enää tartu liikkeen suuntaan pyörivän rullan pintaan. [9] Ylimääräinen pulveri työnnetään ylitäyttösäiliöön, josta se voidaan kierrättää uudelleen.

Tulostuskammiossa käytetään suojakaasuna yleensä helium-, typpi- tai argonkaasua estämään jauhemaista metallijauhetta hapettumasta [10]. Kaasun on tärkeää virrata tulostuskammiossa ja sen tehtävänä on poistaa tulostusympäristöstä sulamisprosessissa syntyvät hiukkaset, jotka hajottavat lasersädettä [11].

2.2 Tulostusprosessin vaiheet

Tulostusprosessin kulku on esitetty kuvassa 2. Tulostusprosessi alkaa tulostettavien kappaleiden 3D-mallien sovittamisella haluttuun järjestykseen tulostimen ohjelmistolla. Yli 45°:n kalteviin piirteisiin tarvitaan tukirakenteet kannattelemaan ulokkeiden painoa sekä vähentämään jäännösjännityksiä ja vääntymistä [1, s. 397]. Lisäksi tukirakenteita tarvitaan kappaleen mittatarkkuuden säilyttämiseksi. 3D-malli muutetaan kaksitulotteisiksi kerroksiksi, joiden perusteella tietokone laskee lasersäteen työradan. Tulostusalustalle voidaan lisäksi sovittaa laadunvalvontaa varten tulostettavaksi koesauvoja, jotka testataan riittävien mekaanisten ominaisuuksien takaamiseksi.



Kuva 2. Tulostusprosessin vaiheet.

Tulostimessa prosessi alkaa tulostusalustan tasoittamisella vaakasuoraan, jotta kerroksesta tulee tasainen. Tulostusalusta puhdistetaan kontaminaatioiden välttämiseksi ja haluttu raaka-aine syötetään tulostimeen. Ilmatiiviiseen tulostuskammioon syötetään suojakaasua happitason laskemiseksi, mikä vähentää hapettumisreaktioita.

Tulostusprosessi koostuu kahdesta vaiheesta: jauheen levityksestä ja kerrosten yhdistämisestä. Jauheen levityksessä levitin levittää tasaisen kerroksen metallijauhetta tulostusalustalle. Yhdistysvaiheessa lasersäde sulattaa tai sintraa levitetyn kerroksen jauhetta kiinni alempaan kerrokseen tulostusohjelman määrittämistä alueista. Yhdistysvaiheessa sulattamaton jauhe jää tukemaan ulokemaisia rakenteita. Tulostustaso laskee halutun kerrospaksuuden verran, minkä jälkeen levitin levittää uuden kerroksen raakaainetta. Nämä kaksi vaihetta toistetaan kuvan 2 mukaisesti jokaiselle tulostusohjelman määrittämälle kerrokselle, kunnes koko kappale on tulostettu. Tulostusprosessin aikana prosessia voidaan valvoa ja säätää suljetulla säätöpiirillä. Säätöpiiri kameroiden ja antureiden avulla seuraa sulaa aluetta sekä lämpövaikutusvyöhykettä ja säätää prosessiparametrejä mallin mukaan. Lisäksi jokaisesta valmiista kerroksesta voidaan tallentaa kuva myöhempää tarkastelua varten. [12, s. 53—54, 57—58]

Tulostuksen valmistuttua kappaleet sahataan irti tulostusalustasta. Kappaleet irrotetaan tukirakenteista sekä toisistaan ja viimeistellään ennen mahdollisia jälkikäsitteilyitä. Kappaleet voidaan hioa ja kiillottaa lujuuden sekä pinnanlaadun parantamiseksi. Lämpökäsittelyillä ja kuumalla isostaattisella puristuksella (HIP) voidaan saavuttaa haluttuja tiheyksiä ja mekaanisia ominaisuuksia. [4, s. 23]

2.3 Menetelmien erot

Laserjauhepetimenetelmät voidaan jakaa sintraaviin ja sulattaviin menetelmiin prosessin lämpötilan perusteella. Sintraavat menetelmät voivat perustua joko kiinteän tilan sintraukseen (SSS Solid-state sintering) tai nestefaasisintraukseen (LPS Liquid-phase sintering). Kiinteän tilan sintrauksessa prosessilämpötila on $0,5 \cdot T_m - T_m$. Koska partikkelit eivät sulaa, rakenteeseen jää huokosia ja huokosten välisiä yhteyksiä. Huokoisuus keventää rakennetta ja heikentää mekaanisia ominaisuuksia, mutta sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi biolääketieteessä lääkkeiden annostelussa. Nestefaasisintrauksessa matalamman sulamispisteen sideainetta, esimerkiksi toista metallia, lisätään jauheeseen. Sideaine sulaa ja sitoo rakenteellisen jauheen yhteen. Rakenteellisen jauheen partikkelit eivät sintraudu LPS-prosessissa. [2]

Sulattavat menetelmät ovat joko osittain sulattavia (PM Partial Melting) tai nestemäiseen tilaan sulattavia (LSM Liquid-state Melting). Sulamisen lisääntyessä kappaleen tiheys paranee, jolloin osittain sulattavat menetelmät tuottavat tiheimmän ja lujemman rakenteen kuin kiinteän tilan sintraus. Osittain sulattavien menetelmien tuottamaan

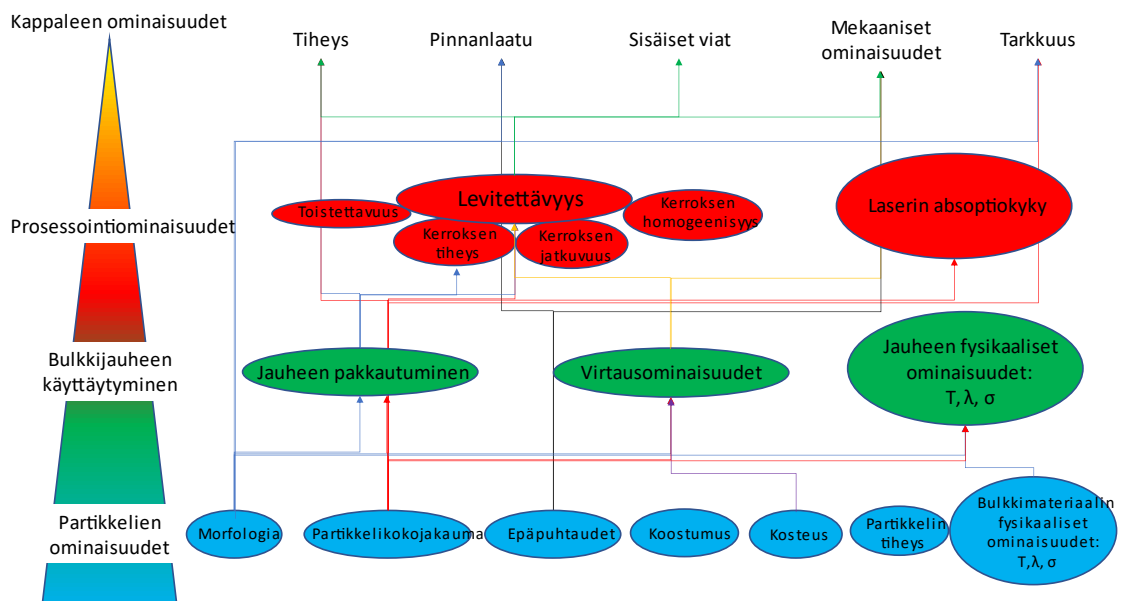
rakenteeseen jää edelleen huokosia. Nestemäiseen tilaan sulattamista hyödynnetään erityisesti SLM-tulostuksessa, sillä kokonaan sulanut raaka-aine tuottaa tiheän ja vähän huokosia sisältävän rakenteen, jolla on hyvät mekaaniset ominaisuudet. [2] Sulattavilla menetelmillä voidaan savuttaa jopa 99,9 % tiheys ilman jälkikäsitteilyä. Suuremman tiheyden ansiosta sulattavat menetelmät voivat saavuttaa paremman pinnanlaadun kuin sintraavat menetelmät. Sintraavilla menetelmillä voidaan saavuttaa 14–16 µm pinnan- karheus ja sulattavilla 9–10 µm. Koska sulattavissa menetelmissä sulan jähmettyessä tapahtuu kutistumista, syntyy kappaleisiin enemmän jäännösjännityksiä sintraaviin me- netelmiin verrattuna. Jäännösjännityksiä käsitellään tarkemmin seuraavissa luvuissa. Sulattavat menetelmät vaativat enemmän kontrollia kuin sintraavat, koska sula on epästabiilia ja pyrkii palloontumaan. [4, s. 16–23] Sulan palloontuminen tarkoittaa pallo- maisten rakenteiden muodostumista joko matalan laserin tehon tai liian suuren skan- nausnopeuden takia [13]. Palloontuminen aiheuttaa epäjatkuvan skannausjäljen ja epä- tasaisen kerrostumisen, josta seuraa huokoisuutta kappaleeseen sekä heikko sidos tu- lostuskerrosten välille [4, s. 54].

3. MATERIAALIT

Jauhepetimenetelmissä raaka-aineella on suuri merkitys syntyvän kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin ja laatuun. Ilman tasalaatuista jauhetta on haastavaa valmistaa laadukkaita kappaleita, sillä silloin myös tulostusparametrien tulisi muuttua jatkuvasti, joten on tärkeää ymmärtää raaka-aineen ja valmiin kappaleen ominaisuuksien väliset yhteydet. Jauhepetimenetelmissä käytettävä jauhe on yleensä partikkelikooltaan välillä 15–45 µm riippuen tulostusmenetelmästä sekä vaadittavasta tarkkuudesta. [14] Jauheet valmistetaan atomisoimalla haluttu raaka-aine esimerkiksi vesi-, plasma- tai kaasuatomisoinnilla, minkä jälkeen jauhe lajitellaan partikkelikoon perusteella. [1, s. 293]

3.1 Materiaaleilta vaadittavat ominaisuudet

Tulostettavan materiaalin ominaisuudet voidaan jakaa neljään eri tasoon: partikkelien, bulkkijauheen, tulostusprosessin aiheuttamiin ja kappaleen ominaisuuksiin. Kuvaan 3 on merkitty jauheen tärkeimpien ominaisuuksien yhteys kappaleen ominaisuuksiin. Alemmat tasot vaikuttavat ylempiin tasoihin, jolloin tasojen yhteisvaikutus määrittää kappaleen ominaisuudet. Partikkelien tärkeimpiä ominaisuuksia ovat morfologia, partikkelikojakauma, puhtaus, koostumus, kuivuus, tiheys sekä fysikaaliset ominaisuudet. Partikkelien morfologialla tarkoitetaan partikkelien pallomaisuutta, symmetrisyyttä ja pinnanlaatua.



Kuva 3. Jauheen ominaisuuksien sekä kappaleen ominaisuuksien yhteydet, muokaten lähteestä [15].

Partikkelien morfologian vaikutus bulkkijauheen, prosessointi- sekä syntyvän kappaleen ominaisuuksiin on monimutkainen. Suuremmilla partikkeliko'illa pallomaiset ja siileät partikkelit virtaavat parhaiten, mutta hienoilla partikkeliko'illa adheesiovoimien merkityksen kasvaessa karkeapintaiset partikkelit virtaavat usein paremmin. Lisäksi karkeampi pinta, epäsäännöllisempi partikkelin muoto ja pienempi partikkelikoko parantavat lasersäteen absorptiota jauheeseen, koska silloin syntyy enemmän koloja, joista valo siroaa. [16]

Jauheen virtausominaisuudet ovat kriittisiä laadukkaan osan valmistamiseksi, sillä virtausominaisuuksiltaan huono jauhe ei levitysvaiheessa tuota tasalaatuista ja toistettavaa kerrosta. Jauheelta tavoitellaan mahdollisimman tasaista virtausta tulostusprosessin häiriöiden välttämiseksi ja kappaleen vikojen vähentämiseksi. Kapeampi partikkelikokojakauma sekä pallomainen muoto parantavat jauheen virtausta. Lisäksi virtausominaisuudet paranevat partikkelikoon kasvaessa ja partikkelin pinnan karhentuessa. [16] Virtausominaisuudet heikkenevät jauheen kosteuden kasvaessa, minkä vuoksi tulostusympäristön kosteus on pidettävä mahdollisimman vakiona ja matalana [15]. Korkea kosteus lisää jauheen alttiutta paakkuuntua [14].

Partikkelikokojakauma vaikuttaa virtausominaisuuksien lisäksi jauheen pakkautuvuuteen. Partikkelikokojakaumaltaan useaa eri partikkelikokoa sisältävä, hienoista partikkeleista koostuva jauhe pakkautuu tiiveimmin, sillä pienemmät partikkelit täyttävät suurempien partikkelien väliin jäävät alueet. Useaa eri kokoa sisältävä partikkelikokojakauma voi kuitenkin johtaa jauheen erottumiseen. [15] Pienempi partikkelikoko haittaa prosessoitavuutta, sillä se paakkuuntuu herkemmin ja voi johtaa huokosten syntymiseen. [14] Pienempien partikkelien virtausominaisuudet ovat suurempia heikommat [5, s. 58]. Lisäksi pienemmillä partikkeleilla on suurempi pinta-ala suhteessa tilavuuteen, minkä seurauksena ne ovat herkempiä hapettumiselle varastoinnin aikana. Jauheen hapettumisesta voi seurata huokoisuuden kasvu, koska hapettunut pinta tuottaa kaasumaisia reaktiotuotteita prosessin aikana [14]

Sulattavissa menetelmissä raaka-aineen sulakäyttäytymisellä on suuri merkitys prosessoitavuuteen ja syntyvän kappaleen laatuun. Tulostusprosessissa sulan täytyy yhdistyä aikaisempaan kerrokseen, ja tämän tapahtumiseksi sulalla täytyy olla hyvä kostuvuus. Kostuvuuden parantamiseksi sekä hapettumisen vähentämiseksi jauheeseen voidaan sekoittaa pieniä määriä juoksuteaineita sekä hapettumisenestoaineita, jotka parantavat sulakäyttäytymistä ja parantavat kappaleen tiheyttä. Hyvään sulakäyttäytymiseen

vaaditaan myös tarpeeksi pieni viskositeetti, jotta sula leviää tasaisesti tulostettavalle pinnalle luoden hyvän sidoksen kerrosten välille. [4, s. 52–53]

3.2 Yleisimmät tulostettavat materiaalit

Metallia lisääviä valmistusmenetelmiä käytetään vaativien osien valmistukseen pääosin ilmailu-, ajoneuvo- ja puolustusteollisuuteen sekä biolääketieteellisiin käyttökohteisiin. Raaka-aineiden hinta on korkea verrattuna tavallisiin valmistusmenetelmiin. Tämän vuoksi tuotettavia kappaleita käytetään usein vaativiin käyttökohteisiin, joissa vaaditaan erittäin hyviä mekaanisia ominaisuuksia ja keveyttä. Jauhepetimenetelmillä voidaan myös valmistaa rakenteita, kuten jäähdytyskanavia, joita ei perinteisillä valmistusmenetelmillä voitaisi tuottaa. Nykyään laserjauhepetimenetelmillä tuotetaan suurimmaksi osaksi erilaisia metalliseoksia, joilla voidaan saavuttaa vaadittavat mekaaniset ominaisuudet. Puhtaita metalleja ei yleisesti tulosteta, koska niiden mekaaniset ominaisuudet eivät ole riittäviä. Lisäksi niiden prosessointi tuottaa ongelmia. Esimerkiksi puhtaan titaanin valmistus sintraamalla tuottaa osittaisen sulamisen vuoksi heterogeenisen mikrorakenteen, joka koostuu rakeiden sulamattomista sisäosista, rakeiden sulaneesta pinnasta sekä huokosista. Tulostettavia puhtaita metalleja ovat titaani, tantaali, kupari ja kulta. [4, s. 30–31] Yleisimmät tulostettavat materiaalit sekä niiden ominaisuudet ovat koostettu liitteeseen A.

Titaaniseokset ovat tutkituimpia ainetta lisäävien valmistusmenetelmien raaka-aineita. Erityisesti Ti-6Al-4V on erittäin yleinen ja tutkittu materiaali jauhepetimenetelmissä. Titaaniseokset ovat bioyhteesopivia ja niillä on erinomaiset mekaaniset ominaisuudet suhteessa tiheyteen [17]. Titaani on lisäksi erittäin korroosion kestävä ja sitä käytetään erityisesti ilmailuteollisuudessa. Titaanin yleisyyttä jauhepetimenetelmissä lisää titaanin työstön haastavuus lastuavilla menetelmillä. [4, s. 32–37] Titaanin korkea murtolujuus, kovuus ja 80 % heikompi lämmönjohtavuus teräkseen verrattuna vaikeuttaa lastuavaa työstöä [17]. Titaanin työstö lastuavilla menetelmillä on kallista ja se voidaan minimoida valmistamalla kappaleet LPBF-menetelmillä. Tällöin ainoastaan tarkasti toleroidut pinnat tarvitsevat viimeistelyä ja kalliin titaanin materiaalihukka pystytään minimoimaan. [1, s. 109–110] Sulattavilla jauhepetimenetelmillä Ti-6Al-4V tuottaa martensiittisen heksagonaalisen tiivispakkauskeräkkeen, jonka murtolujuus on suurempi mutta sitkeys alhaisempi kuin kuumatyöstetyillä kappaleilla. Lämpökäsittämällä tulostettu kappale voidaan parantaa sitkeyttä sekä alentaa murtolujuutta muuttamalla martensiittinen mikrorakenne kaksifaasiseksi α - β -rakenteeksi. Ti-6Al-4V-seoksella voidaan saavuttaa sulattavissa menetelmissä yli 1000 MPa murtolujuus sekä lähes 100 % tiheys. [4, s. 32–37]

Nikkelipohjaiset metalliseokset ovat yleisiä ilmailu- ja avaruusteollisuudessa niiden erinomaisten mekaanisten ominaisuuksien vuoksi [4, s. 38–39]. Nikkelipohjaisilla metalliseoksilla on korkea lujuus myös korkeissa lämpötiloissa, hidas virumisnopeus sekä hyvä iskusitkeys. Nikkelipohjaisia metalliseoksia, kuten Inconel 728, käytetään suihkumoottorien turbiineissa, joissa vaaditaan erinomaista virumisenkestoa korkeissa lämpötiloissa. Nikkelipohjaisten metalliseosten valmistuksessa jauhepetimenetelmissä ongelmana on säröjen syntyminen sulan jäähmettyessä. Esimerkiksi Inconel 728 -seoksella jäähmettyessä raerajoille kerääntyy seosaineita kuten zirkoniumia ja booria, mitkä haurastuttavat rakennetta. [18] Nikkeliseoksilla voidaan saavuttaa 99,7 % tiheys sekä noin 1000 MPa murtolujuus. [4, s. 38–39]

LPBF-menetelmillä rautapohjaisista metalliseoksista, kuten ruostumattomasta teräksestä valmistettuja komponentteja voidaan käyttää esimerkiksi huokoisissa biolääketieteen implanteissa ja työkaluissa [1, s. 109]. Terästen prosessointia vaikeuttaa raudan sekä yleisen seosaineen kromin herkkä hapettuminen, joka aiheuttaa tulostusprosessissa oksidikerroksen syntymisen. Oksidikerros heikentää sulan kostutuskykyä aiheuttaen sulan palloontumisen, joka pienentää tiheyttä. Jauhepetimenetelmissä täytyy käyttää hiilipitoisuudeltaan matalia metalliseoksia, sillä hiilipitoisuuden kasvaessa sulan pintaan erottuvan hiilikerroksen paksuus kasvaa. Pintaan syntyvä hiilikerros lisää oksidikerroksen tavoin palloontumista. Kasvava hiilipitoisuus lisää myös raerajoille syntyvien karbidien määrää ja haurastuttaa rakennetta. Teräksillä voidaan saavuttaa sulattavilla menetelmillä yli 99,5 % tiheys. [4, s. 40]

Alumiiniseoksista tulostetut kappaleet ovat kevyitä, sitkeitä, lämpöä johtavia sekä korrosionkestäviä, minkä vuoksi niitä käytetään yleisesti ilmailu- ja ajoneuvoteollisuudessa. Alumiiniseokset ovat haastavia prosessoitavia jauhepetimenetelmissä, koska ne ovat erittäin heijastavia ja heijastavuus heikentää laserin absorptiota. Lisäksi ne johtavat hyvin lämpöä, jolloin vaaditaan tehokas laser jauheen sulattamiseksi. Alumiiniseosten sulaessa sulan viskositeetti on matala, jolloin sulan alueen on pysyttävä pienenä sen hallitsemiseksi. Jauhepetimenetelmissä käytetään lähinnä AlSi10Mg- sekä AlSi7Mg0.6-seoksia, koska kyseiset alumiiniseokset ovat hyvin koneistettavia ja lisäaineiltaan tarpeeksi vakaita. Sinkki ja magnesium ovat yleisiä alumiiniseosten lisäaineita, koska niiden avulla luodaan lujia faaseja. Ongelmaksi kyseisillä lisäaineilla muodostuu niiden haihtuminen prosessissa, mikä estää monien yleisien seosten käytön LPBF-menetelmissä. [19] Alumiiniseoksilla prosessoitavuutta vaikeuttaa oksidikerroksen syntyminen sulan pintaan, sillä se pienentää kostuvuutta. Jauhepetimenetelmille kriittistä

jauheenlevitysvaihetta vaikeuttaa alumiinipohjaisten jauheiden huono virtaavuus niiden pienen tiheyden vuoksi. [4, s. 40–41]

Sintraavilla menetelmillä voidaan hyödyntää monikomponenttisia jauheita, joissa on erikseen matalamman sulamispisteen sidosaine sekä korkeamman sulamispisteen lujittavat partikkelit. Sidosaainepartikkelit ovat yleensä partikkelikooltaan lujittavia partikkeleita pienempiä sen täydellisen sulattamisen saavuttamiseksi. Pienempi partikkelikoko täyttää myös lujittavien partikkelien väliin jäävät alueet tehokkaammin, jolloin jauhe pakkautuu tiiviimmäksi. Lujittavien partikkeleiden ja sidosaineen sulamispisteen välisen eron vuoksi partikkeleilla on taipumus irrota sidosaineesta. Tämä johtaa rakeiden väliseen heikkouteen. Sintraavilla menetelmillä käytetään myös monikomponenttisia jauheita, joissa eri metallien sulamispisteet ovat lähellä toisiaan. Tällaisilla jauheilla eri metallien pitoisuudet vastaavat usein tietyn metalliseoksen pitoisuuksia, jolloin sintraus muodostaa halutun metalliseoksen. Syntyvä mikrorakenne jää kuitenkin heterogeeniseksi eivätkä kaikki partikkelit sulaa kokonaan sintrausprosessissa. Tämän tyyppisillä jauheilla voidaan sintrausprosessissa saavuttaa lähes täydellinen tiheys. [4, s. 42,45,47]

4. TULOSTUSPARAMETRIT JA VAIKUTUS KIDE- RAKENTEeseen

Laserjauhepetimenetelmät ovat herkkiä prosesseja, joihin vaikuttaa yli 100 erilaista parametria [20]. Laadukkaan kappaleen luomiseksi on tärkeää tietää kuinka käytetyt parametrit vaikuttavat syntyvän kappaleen ominaisuuksiin. Ainetta lisäävät valmistusmenetelmät ovat suhteellisen uusia perinteisiin metallien valmistusmenetelmiin verrattuna, joiden prosessiparametreja on tutkittu jo satoja vuosia. Valaminen ja lastuava työstö ovat esimerkkejä perinteisistä valmistusmenetelmistä. Ainetta lisäävien valmistusmenetelmien parametreja tai niiden välisiä yhteyksiä ei vielä tunneta kunnolla, ja monet parametrivalinnat perustuvat kokeilemalla hyväksi havaittuihin arvoihin.

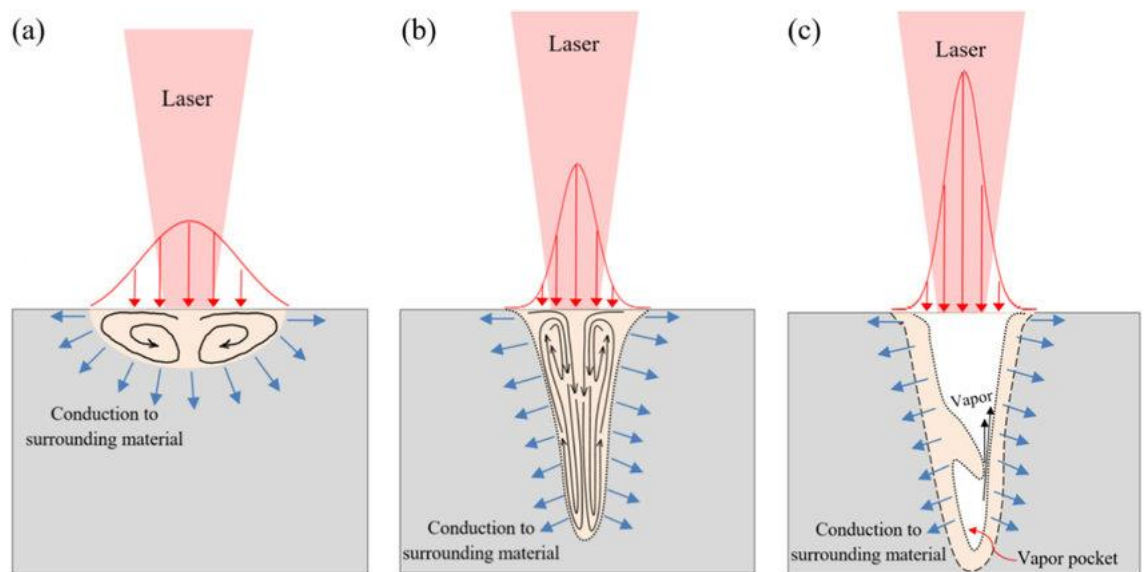
4.1 Sulan ominaisuudet

Jotta voidaan ymmärtää säädettävien parametrien vaikutukset tulostusprosessissa, on tärkeää ymmärtää sulan ominaisuudet sekä sulamisprosessi. Sulan ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi lämpösykliin ja mikrorakenteen muodostumiseen. Laserjauhepetimenetelmän sulamisprosessi muistuttaa hitsausprosessia, sillä molemmissa liikkuva paikallinen lämmönlähde synnyttää sulan alueen, josta lämpö johtuu ympäröivään materiaaliin ja synnyttää lämpövaikutusvyöhykkeen (HAZ).

Lasersäteestä absorboituva energia lämmittää jauhetta. Lämpöenergia kulkeutuu ympäröivään jauheeseen ja kappaleeseen eri tavoin. Tarvittava prosessointilämpötila voidaan saavuttaa vain lasersäteestä absorboituvan energian ollessa suurempi verrattuna kappaleeseen kulkeutuneeseen energiaan [20]. Lämpö kulkeutuu säteilemällä, johtamalla ja konvektiolla sulan mukana. Lisäksi osa energiasta kuluu haihtumisreaktioihin. Säteilemällä lämpö siirtyy partikkeleiden välisten ilmataskujen yli sekä muuhun ympäristöön. Johtumalla lämpö siirtyy sulasta jauheeseen sekä jauhepartikkeleiden välillä. Johtumiseen vaikuttaa merkittävästi jauheen tiheys ja ilmataskujen määrä. Huonosti pakautuneessa jauheessa lämpö johtuu huonosti partikkelien välisen vähäisen kosketuspinta-alan vuoksi. [21]

Sulassa tapahtuu virtauksia, jotka johtuvat pintajännityksestä ja nosteesta. Yleensä merkittävin virtausta ajava voima aiheutuu eroista sulan pinnan pintajännityksessä, mitkä johtuvat lämpötilan epätasaisesta lämpötilajakaumasta. Lisäksi lämpötilaerot sulan sisällä aiheuttavat Marangoni-virtauksen, joka näkyy kuvassa 4b. Virtaus johtuu sulan

keskellä olevasta kuumemmasta lämpötilasta, minkä keskellä sulan tiheys on pienempi ja syntyy nostetta. [22]



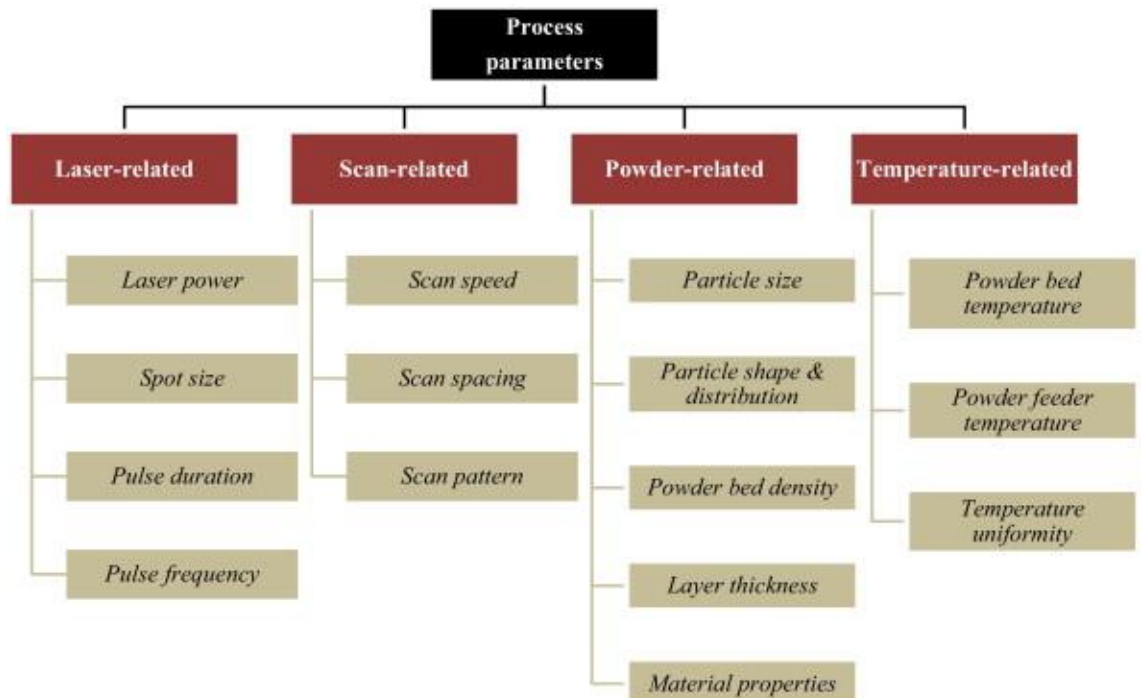
Kuva 4. Sulan muodostumismekanismit: a) johtumismalli, b) keyhole-malli ja c) keyhole-malli huokosilla. [23]

Sula voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin: keyhole- ja johtumismalliin sekä niiden väli-
muotoihin. Keyhole-mallissa voi suuren energiatihedden vuoksi syntyä haihtumisreakti-
oita, jotka synnyttävät sulasta ulos poistuvaa kaasua. Poistuva kaasu muodostaa sulan
keskellä kuvassa 4c havaittavan kapean aukon, joka ulottuu sulan pohjaan asti. Tästä
aiheutuu kapea mutta syvä sula. Ongelmaksi voi muodostua aukon romahtaminen, jol-
loin kaasua jää jumiin sulan sisään ja muodostuu pieniä huokosia. Johtumismallissa
pienemmän energiatihedden vuoksi lämpö kulkeutuu pääasiassa johtumalla eikä kuljet-
tumalla. Tästä seuraa kuvassa 4a oleva matala ja leveä sulan muoto, jolloin ongelmaksi
voi syntyä sulan riittämätön tunkeuma alempiin kerroksiin ja huokosten syntyminen ker-
rosten välille. [24]

4.2 Säädettävät parametrit

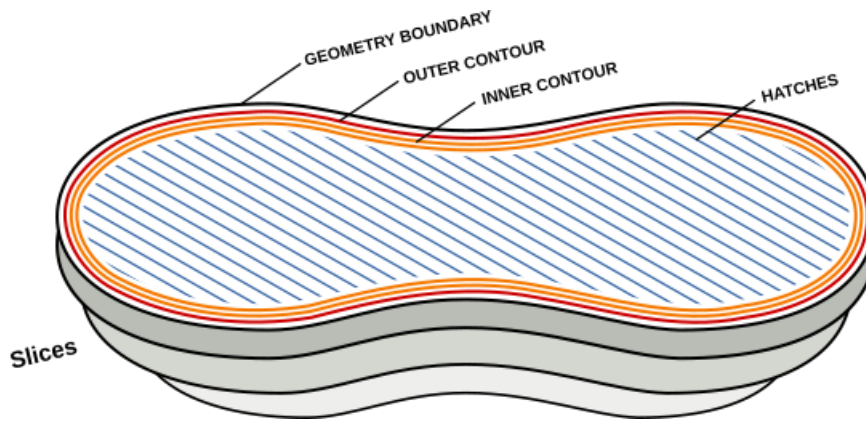
Tulosprosessin parametrit voidaan jakaa kuvan 5 mukaisesti neljään pääryhmään:
laser-, skannaus-, jauhe- ja lämpötilaparametreihin. Laserparametrit säätävät säteen te-
hoa, halkaisijaa ja pulssin kestoa sekä taajuutta. Skannausparametrit vaikuttavat laser-
säteen skannauskuvioon, nopeuteen ja skannauspolkujen etäisyyteen toisistaan. Jau-
heeseen liittyvät parametrit käsittelevät sekä jauheen ominaisuuksia, kuten partikkelien
kokoa ja muotoa, että jauhekerroksen ominaisuuksia, kuten tiheyttä ja paksuutta.

Lämpötilaparametrit vaikuttavat tulostuslämpötilaan ja lämpötilajakaumaan esimerkiksi tulostusalustan ja jauheen lämmityksen avulla.



Kuva 5. Tärkeimmät tulostusprosessiin vaikuttavat parametrit [25].

LPBF-menetelmissä osaa parametreista voidaan säätää tulostuksen aikana. Esimerkiksi laserin tehoa ja skannausnopeutta voidaan säätää prosessin aikana, kun taas raaka-aine säilyy vakiona koko prosessin ajan. Säädettävillä parametreilla voidaan lisäksi luoda erilaisia rakenteita kappaleen eri osiin. Kuvassa 6 on esitetty kappaleen eri osissa vaihteleva skannausstrategia. Hyvän pinnanlaadun aikaansaamiseksi kappaleen geometria tyypillisesti kierretään kuvan 6 mukaisesti useaan kertaan. Sisäosat skannataan usein eri parametreilla kuin pinta huokoisuuden ja jäännösjännitysten minimoimiseksi. [26] Myös helposti irrotettavat tukirakenteet voidaan luoda säätämällä parametreja, jolloin saavutetaan heikko liitos tukirakenteen ja tulostettavan osan välille. Kyky säätää parametreja on tärkeää, koska kappaleen erilaiset geometriat, kuten paksut- ja ohuet rakenteet, vaativat omat parametrisa.



Kuva 6. Skannausstrategian erot kappaleen eri osissa [26].

4.2.1 Laserparametrit

Lasersäteelle tärkeimpiä parametreja ovat laserin teho, tarkennetun säteen halkaisija, aallonpituus sekä pulssin kesto ja taajuus. Lasersäteen teho vaikuttaa suoraan jauheeseen absorboituvan energian määrään, joka vaikuttaa sulan lämpötilaan. Tehokkaampaa laserlähdettä käyttämällä voidaan saavuttaa tarvittava prosessilämpötila suuremmilla skannausnopeuksilla. Lasersäteen aallonpituus vaikuttaa jauheeseen absorboituvan energian määrään. Yleisesti metallijauheille heijastuvuus pienenee ja absorptio kasvaa aallonpituuden lyhentyessä, minkä takia metalleille suositaan lyhyen aallonpituuden lasereita [1, s. 159]. Parempi absorptio kasvattaa sulan lämpötilaa ja prosessin hyötysuhdetta. Erityyppisillä lasersäteillä on vakioaallonpituutensa, joita ei voi säätää.

Lasersäteen keskimääräistä tehoa voidaan säätää pulssien avulla. Pulssituksen taajuutta ja pulssinkestoja voidaan säätää pulssitettavaa laseria käytettäessä. Laserin liikkuessa eteenpäin pulssitettu lasersäde sulattaa tiheästi peräkkäisiä pisteitä, joiden välistä etäisyyttä voidaan säätää taajuuden ja skannausnopeuden avulla. Liian suuresta taajuudesta aiheutuva lyhyt pisteiden välinen etäisyys kasvattaa jauheeseen absorboituvaa energiaa liikaa, mikä aiheuttaa pienten huokosten syntymisen metallin haihtuessa. Tätä aiheuttaa myös liian tehokas laser ja liian pitkä pulssin kesto. [27]

Laserin tarkennetun säteen halkaisijalla voidaan vaikuttaa tulosteen resoluutioon ja tulostusnopeuteen. Käyttämällä pienempää halkaisijaa tulosteen resoluutio paranee, mutta rakenteeseen syntyy herkemmin vikoja tulostusreittien välille. Tämä johtuu niiden välisen rajapinnan kasvusta, sillä pienemmällä säteen halkaisijalla joudutaan tekemään useampi skannaus koko pinnan sulattamiseksi. Suuremmalla säteen halkaisijalla tarvitaan tehokkaampi laser prosessilämpötilan saavuttamiseksi kuin pienellä, sillä laserin energia jakaantuu suuremmalle pinta-alalle.

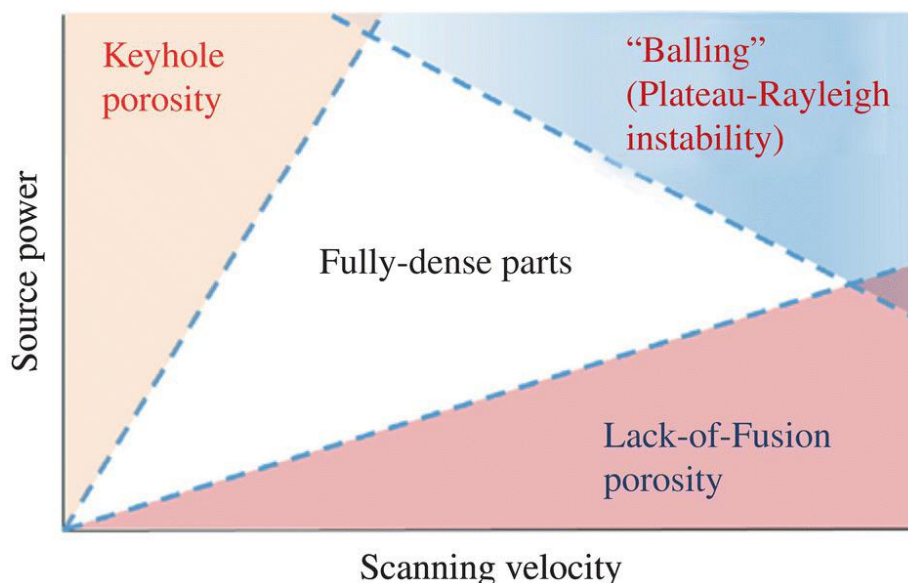
Usean parametrin vaikuttaessa pintaan absorboituvan energian määrään voidaan niiden yhteisvaikutusta kuvata VED:in (Volumetric energy density) avulla. VED kuvaa absorboituvan energian määrää suhteessa jauheen tilavuuteen. VED voidaan laskea kaavalla

$$VED_{Hatch} = \frac{P}{vsl}, \quad (1)$$

jossa VED_{Hatch} on energiatiheys, P on laserin teho, v on skannausnopeus, s on skannausväli ja l on kerroksen paksuus. Lasersäteen tiettyyn pisteeseen kohdistamaa energiaa voidaan kuvata spot-arvon avulla

$$VED_{Spot} = \frac{P}{vdl}, \quad (2)$$

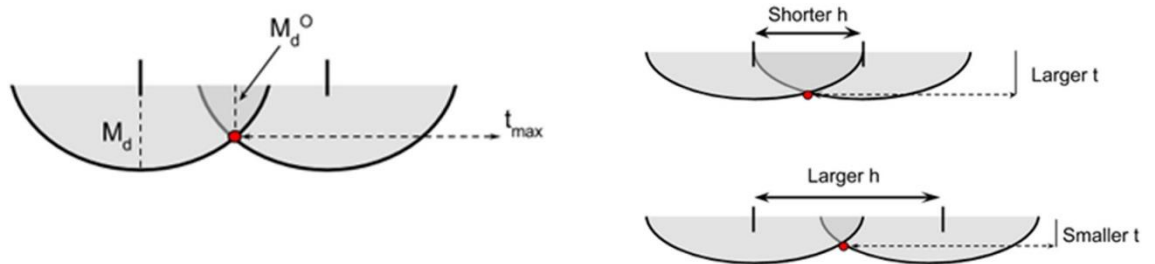
jossa d on säteen halkaisija. Koska jauheeseen absorboituvan energian määrään vaikuttaa useita parametreja, tarkastellaan usein näiden parametrien muodostamaa VED-arvoa. Eri materiaaleille määritetään sopiva VED-arvon vaihteluväli, jonka alueella arvon tulisi olla optimaalisen tiheyden ja tulosteen laadun saavuttamiseksi. Kuvassa 8 on esitetty skannausnopeuden ja säteen tehon vaikutus huokoisuuteen. Samaa kuvaa voidaan soveltaa myös VED-arvoille. Kuvan 8 keskellä on tavoiteltava täysin tiheä alue, jota ympäröi huonosti optimoitujen parametrien aiheuttama huokoinen alue. Liian pienen VED-arvon seurauksena prosessilämpötila ei nouse tarpeeksi korkeaksi, jolloin jauhe ei sulaa täydellisesti ja syntyy lack-of-fusion -huokoisuutta, joka korostuu erityisesti kerrosten- ja skannauspolkujen välissä. Liian suuri VED-arvo aiheuttaa sulan hallitsematonta käyttäytymistä, kuten palloontumista sekä haihtumisesta johtuvaa huokoisuutta (keyhole porosity). [1, s. 93, 98]



Kuva 7. Skannausnopeuden ja säteen tehon vaikutus huokoisuuteen [20].

4.2.2 Skannausparametrit

Merkittävimpiä laserin liikerataan liittyviä parametreja ovat skannausnopeus, skannauspolkujen väli ja skannauskuvio. Skannausnopeus huomioidaan sopivan VED-arvon avulla, mutta liian hidas tai nopea skannaus aiheuttaa ongelmia kuvan 8 mukaisesti. Liian hidas nopeus aiheuttaa haihtumisesta syntyvän keyhole-huokoisuuden lisäksi mikrosuotaukia joillekin metalliseoksille. Liian suuri skannausnopeus aiheuttaa matalla laserin teholla kerrosten välistä lack-of-fusion -huokoisuutta.



Kuva 8. Skannausvälin ja kerrospaksuuden vaikutus sulan muotoon. Kuvassa skannausväli (h), kerrospaksuus (t), sulan syvyys (M_d) ja sulan minimitunkeuma (M_d^0). [20]

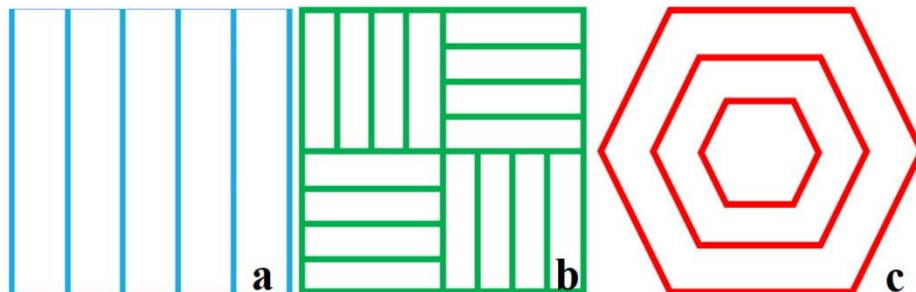
Skannausväli vaikuttaa tulostuksen tehokkuuteen. Kuvassa 9 on esitetty skannausväliin liittyvät parametrit. Suurentamalla skannausväliä h tulostusprosessi nopeutuu, mutta skannausvälin kasvaessa liikaa sulan minimitunkeuma M_d^0 pienenee. M_d^0 määrittää suurimman mahdollisen kerrospaksuuden t_{max} , jolla voidaan saavuttaa täydellinen kerrosten yhdistyminen. Liian suurella skannausvälillä minimitunkeuman kohdalle voi jäädä lack-of-fusion -huokoisuutta. Liian pienellä skannausvälillä polkujen päällekkäisyys puolestaan lisääntyy. Tästä seuraa kappaleen lämpötilan kasvu, joka voi johtaa haihtumislmiöihin sekä karkeampaan raerakenteeseen. [20]

Levitetyn jauhekerroksen paksuus on yksi tärkeimmistä tulostusparametreista, koska se vaikuttaa merkittävästi tulosteen laatuun, resoluutioon ja tulostusnopeuteen. Kerrospaksuudella tarkoitetaan levitettävän jauhekerroksen korkeutta. Laserin sulattaessa jauhekerroksen kerros tiivistyy. Sulatuksen jälkeistä kerrospaksuutta kutsutaan nominaaliseksi kerrospaksuudeksi. Jauhekerroksen minimipaksuutta rajoittaa levittimen tarkkuus ja partikkelikoko. Tulostimella ei voida valmistaa kappaleita ohuemmista kerroksista kuin mitä levittimellä voidaan tasalaatuisesti muodostaa. Tähän vaikuttaa raaka-aineen suurin partikkelikoko, jonka halkaisijaa pienempää kerrosta ei voida levittää. [1, s. 102–103]

Ohuiden kerrosten avulla voidaan luoda resoluutioltaan tarkempia kappaleita verrattuna paksuihin kerroksiin. Kerrospaksuuden kasvaessa kappaleen pinnasta voidaan helpommin havaita porrasmainen rakenne, joka korostuu erityisesti kaarevilla pinnoilla.

Ohuilla kerrospaksuuksilla kappaleen valmistamiseksi tarvitaan enemmän kerroksia, jolloin tulostusaika kasvaa, vaikka ohuilla kerrospaksuuksilla voidaan käyttää korkeampia skannausnopeuksia. Kerroksen maksimipaksuutta rajoittaa laserin kyky sulattaa koko kerros alempaan kerrokseen asti. Laserin tulee kyetä muodostamaan sula, joka ulottuu osittain alempaan kerrokseen tiiviin rakenteen ja kerrosten välisen lujuuden aikaansaamiseksi. Lisäksi sulan täytyy ulottua viereiseen aikaisemmin sulatettuun tulosteeseen ja sulattaa niiden välinen jauhe kokonaan. Tästä syystä skannauspolkujen välin kasvaessa jauhekerroksen täytyy ohentua, jotta sula ulottuu koko kerroksen läpi. [1, s. 102–103]

Suurilla kerrospaksuuksilla voidaan sulan tunkeumaa parantaa hidastamalla skannausnopeutta, jolloin absorboituvalla energialla on enemmän aikaa johtua syvemmälle kerrokseen, ja sula syvenee. Tällöin rajoitteeksi kuitenkin muodostuu materiaalin lämmönjohtokyky. Mitä pienempi materiaalin lämmönjohtavuus on, sitä ohuempia kerroksia täytyy käyttää. Huonosti lämpöä johtavilla materiaaleilla sula kuumenee pinnasta liikaa ennen kuin se saavuttaa tarvittavan tunkeuman alempaan tulostuskerrokseen. Tästä seuraa haihtumisreaktiota, jotka aiheuttavat pieniä huokosia rakenteeseen. Mikäli sulan tunkeuma ei yllä aikaisempaan kerrokseen, rakenteeseen syntyy suuria satunnaisen muotoisia huokosia. [27]



Kuva 9. Yleisimmät skannausstrategiat: a) viivastrategia, b) shakkilautastrategia ja c) kehämäinen strategia [28].

Skannausstrategioilla voidaan vaikuttaa erityisesti jäännösjännitysten määrään, mutta lisäksi myös sisäisten vikojen syntymiseen. Laserin liike vaikuttaa suoraan syntyvään lämpövuohon, joka vaikuttaa syntyviin jäännösjännityksiin. On olemassa lukuisia erilaisia skannausstrategioita, mutta yleisimmät strategiat ovat kuvassa 10 esitetyt viiva- ja shakkilautastrategia sekä kehämäiset strategiat, kuten ulkoa sisäänpäin tai sisältä ulospäin. Kuvassa 10a olevassa viivastrategiassa koko pinta skannataan samansuuntaisilla viivoilla. Shakkilautastrategia on esitetty kuvassa 10b, jossa kerros jaetaan pienempiin alueisiin, joiden skannaussuunnat vaihtelevat keskenään. Kuvassa 10c

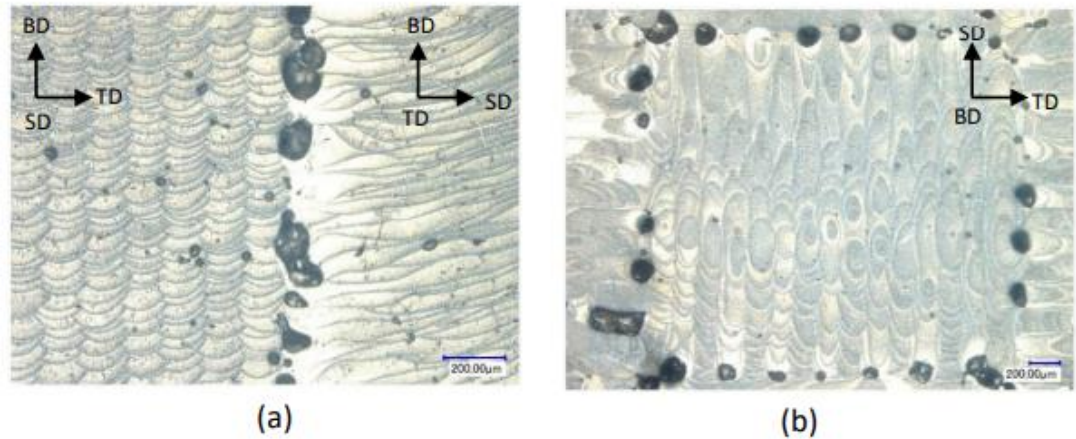
havainnollistetussa kehämäisessä strategiassa pinta skannataan kehissä ulkoa sisään-päin tai sisältä ulospäin. [28]

Tulostuksessa syntyviltä jäännösjännityksiltä ei voida välttyä prosessissa olevien lämpötilaerojen vuoksi. Lämpötilaerot johtavat epätasaiseen jäähtymiseen, jolloin metallin kutistuessa syntyy jäännösjännityksiä. Tulostusprosessin yhtenä tavoitteena on saavuttaa mahdollisimman tasaiset ja pienet jäännösjännitykset vääntymien minimoimiseksi ja mittatarkkuuden säilyttämiseksi. Lämpötilaeroon vaikuttaa merkittävästi skannausstrategia. Skannausvektorin suuntainen lämpötilaero kasvaa vektorin pidentyessä, mistä seuraa myös pituussuuntaisen jännityksen kasvu. Pitkillä skannausvektoreilla syntyy anisotrooppinen jännityskenttä, jossa skannausvektorien suuntainen jännitys on suurempi verrattuna poikittaiseen suuntaan. Tämän minimoimiseksi suositetaan yleensä lyhyitä skannausvektoreita. Shakkilautastrategian etuna on lyhyiden skannausvektorien lisäksi skannattavan alueen korkeampi keskilämpötila verrattuna viivastrategiaan. Korkeampi keskilämpötila pienentää syntyviä jäännösjännityksiä pienempien lämpötilaerojen seurauksena. Shakkilautastrategialla skannattavien alueiden kokoa säätämällä kappaleen rakenteen mukaan voidaan ylläpitää mahdollisimman korkeaa keskilämpötilaa jäännösjännitysten minimoimiseksi. [29]

Kehämäisillä skannausstrategioilla voidaan teoriassa tuottaa tulostettavan kappaleen pintaan puristusjännitys, mikäli skannataan ulkopinnalta sisälle päin [28]. Pinnan puristusjännitys syntyy kappaleen pinnan jähmettyessä ennen sen sisäosia. Sisäosien jähmettyessä tapahtuva kutistuma vetää pintaa kasaan. Pinnan puristusjännitys voi parantaa kappaleen kykyä sietää säröjä [30, s. 70–71]. Heksagonaalinen skannaus ulkoa sisälle päin tuottaa kuitenkin pienimmän tiheyden, huonomman mittatarkkuuden sekä eniten huokosia verrattuna viiva- ja shakkilautastrategiaan. Tämä voi johtua suurimmasta ajasta vierekkäisten skannausten välillä verrattuna muihin strategioihin, mistä seuraa suurempi lämpötilaero sulan ja ympäröivän materiaalin välille. Suurempi lämpötilaero johtaa sulan roiskeisiin sekä heikompaan sulautumiseen viereisen skannauksen kanssa. [28]

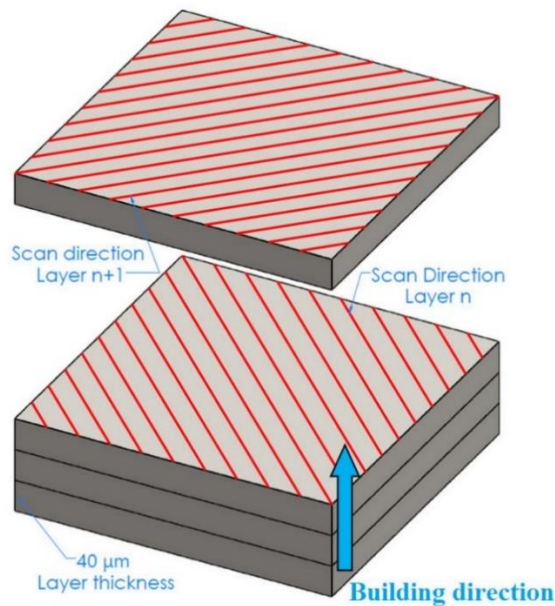
Shakkilautastrategiassa voidaan havaita huokoisuuden kasvu skannattavien alueiden koon pienentyessä. Uuden skannauspolun alussa laserin osuessa jauhepetiin se luo alueen, jossa jähmettyvän sulan viereen jää vähemmän jauhetta kuin sulattamattomalle alueelle. Tästä voi seurata tilanne, jossa jauhetta ei ole tarpeeksi yhdistämään skannatut alueet, jolloin skannattavien alueiden väliin voi jäädä kuvassa 11 havaittavia huokosia. Kuvaan merkityt suunnat ovat: rakennussuunta (BD, Build Direction),

poikkisuunta (TD, Transverse Direction) ja skannausuunta (SD, Scanning Direction). Kuvassa 11a nähdään shakkilautastrategiassa eri suuntiin skannattujen alueiden väliin muodostuvien huokosten kasaantuvan päällekkäin rakennussuunnassa, jos alueet ovat kohdakkain. Kuvassa 11b havaitaan huokosten muodostuvan skannauspolkujen aloituspisteisiin. Shakkilautastrategiassa laser aloittaa skannaamisen useasti keskellä jauhepetiä verrattuna muihin skannausstrategioihin. Tämän vuoksi shakkilautastrategiassa huokoisuus kasvaa alueiden koon pienentyessä, koska silloin alueiden välinen rajapinta kasvaa. [31] Mikäli skannattavat alueet ovat useissa kerroksissa samassa kohdassa, saattavat alueiden väliin muodostuvat huokokset kasaantuessaan aiheuttaa rakenteeseen heikkoja tasoja rakennussuuntaan kuvan 11a mukaisesti.



Kuva 10. Shakkilautastrategiassa skannattujen alueiden väliin muodostuvia huokosia: a) sivusta tarkasteltuna ja b) tulostussuunnasta tarkasteltuna. Muokaten lähteestä [31].

Kerrosten välissä skannaussuuntaa usein vaihdetaan homogeenisemmän rakenteen aikaansaamiseksi ja jäännösjännitysten minimoimiseksi. Kuvassa 12 on esimerkki skannaussuunnan vaihdosta viivastrategialla, jossa kerrosta käännetään 90 astetta. Skannaussuuntaa kääntämällä kääntyy myös skannauksessa syntyvä tekstuuri. Kerroksen tekstuurin kääntäminen vähentää kappaleen rakennussuuntaan syntyvää tekstuuria, kuten pylväsmäisiä rakeita. [31] Samalla syntyvien vikojen määrä vähenee merkittävästi homogeenisemmän energiantuonnin seurauksena [32]. Skannaussuunnan vaihto ei vaikuta merkittävästi huokoisuuteen viivastrategiassa, mutta shakkilautastrategiassa vaikutus on merkittävä. Shakkilautastrategiassa skannaussuunnan kääntö laskee huokoisuutta huomattavasti [31]. Huokoisuuden laskuun erityisesti shakkilautastrategiassa voi olla syynä alueiden väleihin muodostuvat huokokset. Skannaussuuntaa käännettäessä väleihin muodostuvat huokokset eivät asetu päällekkäin, jolloin laser saattaa sulattaa jauheen tasaisemmin.



Kuva 11. Kerrosten välinen skannaussuunnan vaihto [28].

Kappaleen ominaisuuksia voidaan parantaa skannaamalla tulostettu kerros uudelleen. Uudelleenskannauksessa kerros voidaan joko sulattaa uudelleen tai suorittaa sille lämpökäsittely kuumentamalla pintaa. Tällä voidaan esimerkiksi ehkäistä tulostaessa lämpölaajenemisesta aiheutuvien säröjen muodostumista hauraille materiaaleille. Mikäli samalla käännetään skannaussuuntaa, tulostaessa muodostuvien säröjen pituus pienenee 30–47 % verrattuna uudelleen skannaamattomaan kappaleeseen käytettäessä raaka-aineena Ti-45Al-3Nb-Y₂O₃ -jauhetta [33]. Uudelleenskannaamalla kerros eri suuntaan yhdistää aiemmin skannatut alueet toisiinsa paremmin, jolloin esimerkiksi huokoisuus laskee. Lämpökäsittelmällä kerros sulattamalla se kahdesti tiheys paranee 0,77 % saatuaan 98,78 % tiheyden käytettäessä raaka-aineena Ti-48Al-2Cr-2Nb -jauhetta. Kuumentamalla pintaa uudestaan voidaan pienentää lack of fusion -huokoisuutta. [32] Koska uudelleenskannaus tasoittaa ja luo yhtenäisemmän kerroksen, myös pinnanlaatu paranee ja jäännösjännitykset vähenevät [34].

4.2.3 Lämpötilaparametrit

Tulosteen mekaaniset ominaisuudet riippuvat merkittävästi tulostuksen aikana syntyvistä lämpögradieniteista. Kappaleen lämpötila vaikuttaa huomattavasti syntyvien

lämpögradienttien määrään, mikä vaikuttaa syntyvään mikrorakenteeseen, jäännösjännityksiin sekä niiden aiheuttamiin vääntymiin. Kappaleen lämpötilaan voidaan vaikuttaa skannausparametrien ja tulostusalustan lämmityksen avulla. [35]

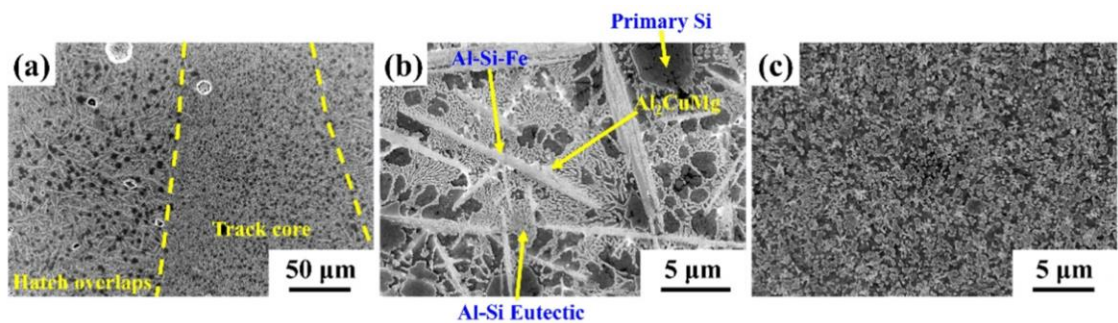
Tulostusprosessissa syntyviä lämpötilaeroja voidaan pienentää kasvattamalla kappaleen lämpötilaa esimerkiksi tulostusalustan lämmityksen tai säteilylämmittimen avulla. Lämpötilaerojen pienentyessä jäännösjännitykset vähenevät, koska lämpölaajenemisesta aiheutuvat paikalliset muutokset pienenevät. [32] Liian nopea sulan jäähtyminen tuottaa enemmän jäännösjännityksiä, mutta voi lisäksi aiheuttaa lack of fusion -huokoisuutta, sillä sula ei ehdi kunnolla yhdistyä alempiin kerroksiin. Lack of fusion -huokoisuuden aiheuttamasta kerrosten välisestä heikkoudesta sekä jäännösjännitysten yhdistelmästä voi seurata kerrosten irtoaminen toisistaan.

Osa tulostettavista materiaaleista, kuten monet alumiiniseokset, ovat hyvin heijastavia ja lämpöä johtavia. Heijastavuus heikentää laserin absorptiota, jolloin on haastavaa tuottaa tarpeeksi lämpöä sulan aikaansaamiseksi. Mikäli tarvittava energia tuotaisiin pelkästään laserin avulla kappaleeseen, saattaisi sula palloutua tai seosaineet osittain haihtua. Suuren energiatheyden seurauksena sulan pinta kuumenisi liikaa ennen kuin saavutettaisiin tarvittava sulan tunkeuma, jolloin erityisesti alumiiniseoksissa herkäät seosaineet saattavat haihtua. Lisäksi suuri lämmönjohtavuus johtaa laserin tuoman lämmön nopeasti koko kappaleeseen ja tulostusalustaan, jolloin tarvitaan tehokasta laseria. Tulostusalustan lämmityksellä voidaan tuoda osa tarvittavasta energiasta kappaleeseen, jolloin tulostusprosessi vakautuu. Lisäksi alustan lämmitys vähentää alumiiniseoksille tyypillistä jähmettyessä syntyvästä kutistumasta aiheutuvaa halkeilua. [36] Alumiiniseosten lämpölaajenemiskerroin on noin kaksinkertainen verrattuna teräksiin. Tämä voi johtaa tulostaessa syntyviin mittaeroihin, jotka voivat puolestaan aiheuttavaa suuria jäännösjännityksiä kappaleeseen. Jäännösjännitysten seurauksena tulostusprosessissa voi ilmetä halkeilua.

4.3 Syntyvä mikrorakenne

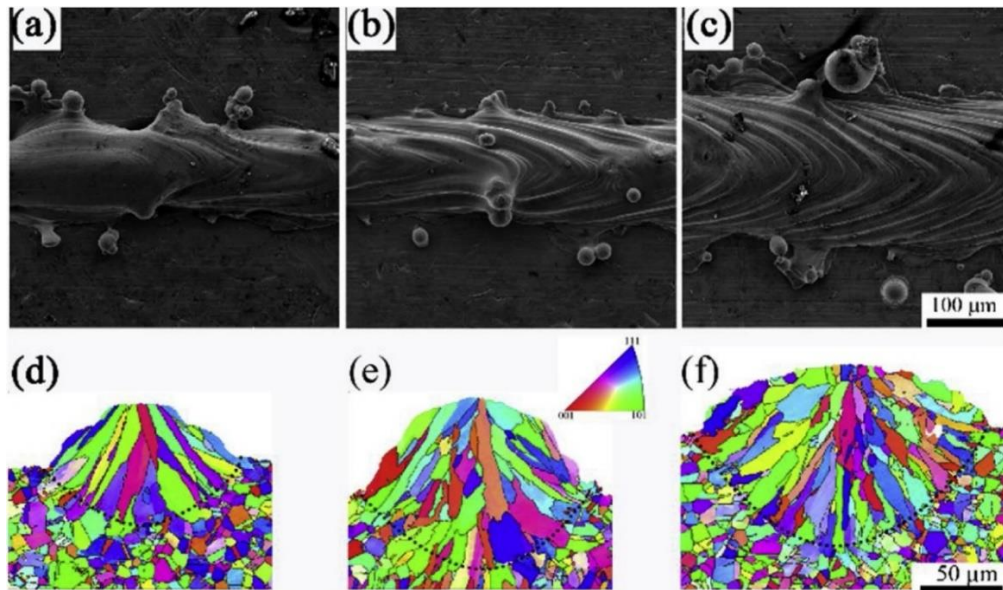
LPBF-menetelmissä mikrorakenteen syntyminen poikkeaa tavanomaisista valmistusmenetelmistä, koska rakenne syntyy kerros kerrallaan ja jäähtymisnopeus on suuri tulostusprosessin vuoksi. Mikrorakenteen syntymiseen vaikuttavat lämpötilagradientti, jäähtymisnopeus, alijäähtyminen ja tulostettava materiaali [37].

Jäähtymisnopeudet ovat suuria jauhepetimenetelmissä, koska lämpö keskittyy pieneen lasersäteen tuottamaan sulaan, josta lämpö johtuu nopeasti muualle kappaleeseen ja tulostusalustaan. Jäähtymisnopeuteen voidaan vaikuttaa tulostusalustan lämmityksen sekä laserin parametrien avulla. Merkittävimmät jäähtymisnopeuteen vaikuttavat parametrit ovat skannausnopeus ja lasersäteen teho. Suurella skannausnopeudella ja pienellä laserin teholla jäähtymisnopeus on suuri, koska sula ei kerkeä lämmittämään ympäröivää materiaalia merkittävästi. Hitaalla skannausnopeudella ja tehokkaalla lasersäteellä puolestaan jäähtymisnopeus on pienempi. [1, s. 311–313]



Kuva 12. SLM tekniikalla valmistettu Al-20Si-5Fe-3Cu-1Mg seos: a) rakenteen erot skannauspolkujen keskustassa ja päällekkäisillä alueilla, b) Päällekkäisen alueen rakenne ja c) keskustan rakenne. [36]

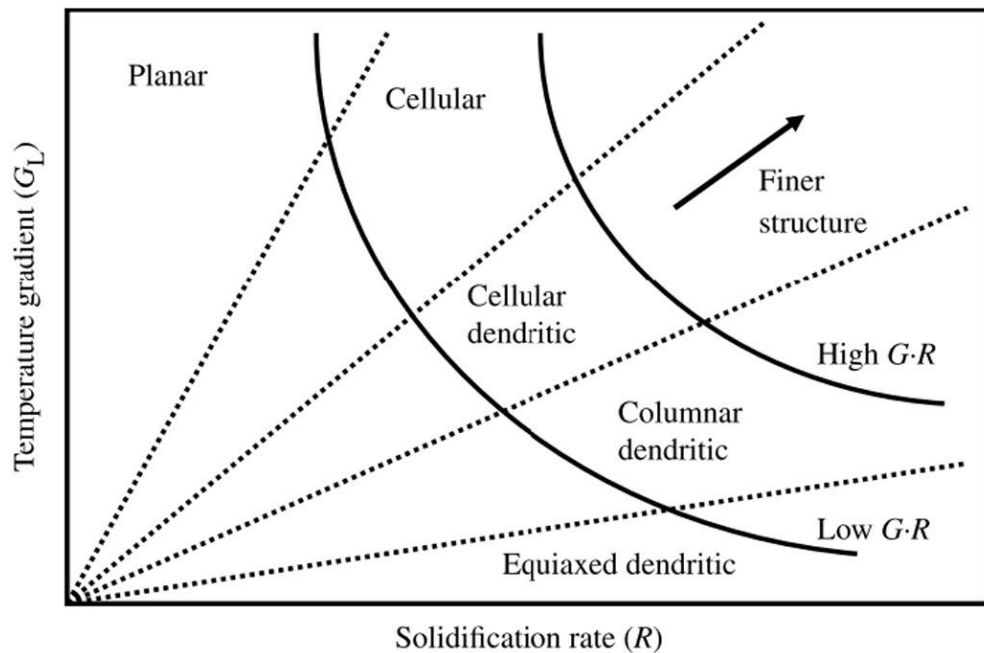
Suuri jäähtymisnopeus tuottaa yleensä erittäin hienon raerakenteen, minkä seurauksena LPBF-menetelmillä valmistetut kappaleet ovat yleensä lujempia mutta eivät yhtä sitkeitä kuin valetut näytteet [20]. Raerakenne kuitenkin vaihtelee kappaleen sisällä riippuen skannausstrategiasta ja skannauspolkujen päällekkäisyyksistä. Kuvassa 13 on esitetty skannauspolkujen päällekkäisyyden vaikutus mikrorakenteeseen. Päällekkäin olevilla skannauspolkujen alueilla keskimääräinen raekoko on suurempi kuin polkujen keskiosassa. Raekoon kasvu aiheutuu päällekkäisten alueiden sulattamisesta uudelleen, jolloin jäähtymisnopeus on hitaampi verrattuna polkujen keskiosaan. [36]



Kuva 13. Skannausnopeuden vaikutus syntyvään mikrorakenteeseen: a) ja d) ovat 0,75 m/s, b) ja e) ovat 0,5 m/s, c) ja f) ovat 0,25 m/s. [37]

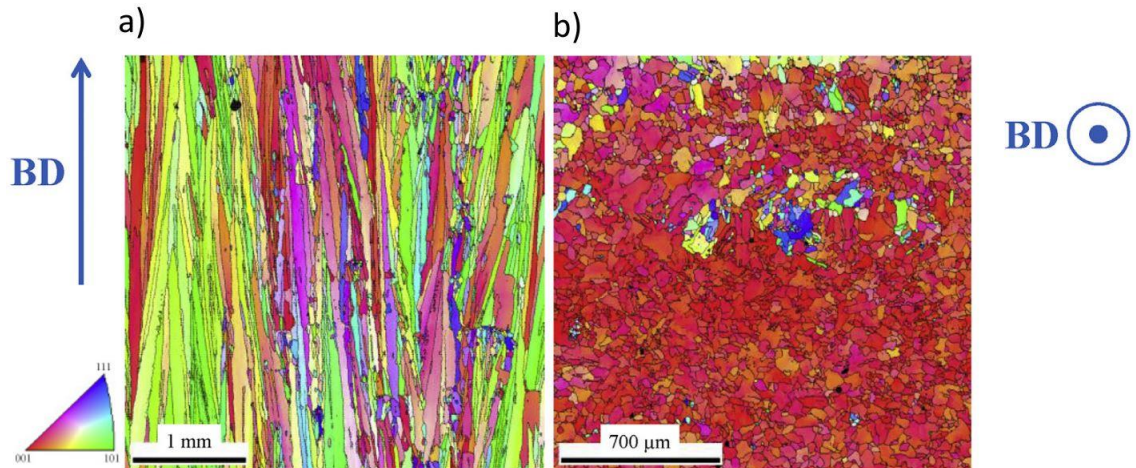
Rakeen kasvu tapahtuu yleensä lämpötilagradientin suuntaan, jolloin sulan muoto vaikuttaa syntyvien rakeiden suuntautumiseen. Kuvassa 14 on esitetty skannausnopeuden vaikutus sulan muotoon ja syntyvään mikrorakenteeseen. Ylemmissä kuvissa on kuvattu skannauspolut rakennussuunnasta ja alemmissä kuvissa on EBSD-kuvat poikisuunnassa. Kuvassa 14 skannausnopeus pienenee oikealle mentäessä. Korkealla skannausnopeudella muodostuu matala sula, jolloin lämpötilagradientti on pääosin kohtisuorassa tulostusalustaan nähden. Tällöin rakeet muodostuvat pystysuoraan. Hitaalla skannausnopeudella puolestaan muodostuu syvä sula, jolloin sulan sivuilta muodostuu vinoja rakeita. [37]

Kuvassa 15 on esitetty lämpötilagradientin (G) ja jähmettymisnopeuden (R) vaikutus syntyvään mikrorakenteeseen. Lämpötilagradientin ja jähmettymisnopeuden suhde G/R määrittää syntyvän mikrorakenteen morfologian ja tulo $G \cdot R$ mikrorakenteen koon [21]. Syntyvät mikrorakenteet voivat olla tasomaisia, solumaisia, pylväsmäisiä dendriittisiä tai tasakantaisia dendriittisiä, joiden koko pienenee jäähtymisnopeutta kuvaavan tulon $G \cdot R$ kasvaessa. Yleisimmin LPBF-menetelmissä syntyvät rakenteet ovat pylväsmäisiä tai tasakantaisia dendriittisiä. [21] Tämä voi johtua tulostusprosessin rajoitteista ja materiaalin ominaisuuksista, kuten lämmönjohtavuudesta, jolloin käytännössä syntyvän kappaleen mikrorakenne on pylväsmäinen tai tasakantainen dendriittinen.



Kuva 14. Lämpötilagradientin (G) ja jähmettymisnopeuden (R) vaikutus syntyvään mikrorakenteeseen [20].

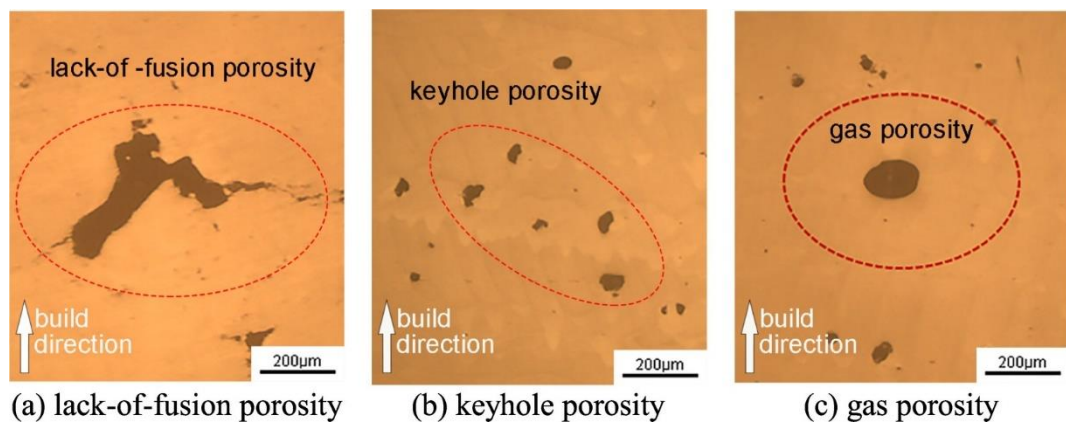
Tavanomaisilla menetelmillä valmistetuille kappaleille poikkeava suuntautunut pylväsmäinen rakenne syntyy, kun kiteiden nopein kasvusuunta on samansuuntainen lämpövuon kanssa. Tyypillisesti nopein kasvusuunta TKK- ja PKK-rakenteille on $\langle 100 \rangle$ -suunnat niiden ollessa vähiten tiiviitä. [20] Kuvassa 16 on esimerkki pylväsmäisten rakeiden vuoksi voimakkaasti suuntautuneesta rakenteesta Inconel 718 -tulosteessa. Kuvassa 16a nähdään tulostussuuntaan muodostuvia korkeita rakeita. Kuva 16b on kohtisuorassa tulostussuuntaan. Kuvassa rakeet ovat selkeästi orientoituneet samaan suuntaan keskenään, joka havaitaan rakeiden orientaatiota kuvaavasta punaisesta väristä. Punainen väri kuvaa vasemmassa alareunassa olevan IPF-kolmion mukaisesti (001) -suuntaa, joka on edellä mainitun $\langle 100 \rangle$ -suuntaperheen mukainen tyypillinen kasvusuunta TKK- ja PKK-rakenteille. Pylväsmäinen raerakenne aiheuttaa voimakkaan tekstuurin ja anisotrooppiset mekaaniset ominaisuudet. Mikrorakenteeltaan suuntautunut pylväsmäinen kappale ei sovellu käyttökohteisiin, joihin kohdistuu rasituksia useista suunnista. Kyseiseen käyttökohteeseen tarvitaan tasakantainen raerakenne, jolloin anisotropia on vähäistä. Pylväsmäisillä rakeilla murtolujuus ja sitkeys alenevat huomattavasti vedon kohdistuessa kohtisuoraan raerajoihin nähden. [21]



Kuva 15. Esimerkki rakennussuuntaan BD suuntautuneista pylväsmäisistä rakeista Inconel 718 tulosteessa: a) sivusta tarkasteltuna ja b) tulostussuunnasta tarkasteltuna. Muokaten lähteestä [38].

4.4 Parametrien vaikutus syntyviin vikoihin

Tässä kappaleessa kootaan yhteen tulostusparametrien vaikutuksia syntyviin vikoihin. LPBF-menetelmissä kappaleisiin syntyy herkästi vikoja prosessin monimutkaisuuden ja haastavan ohjattavuuden seurauksena. Taulukkoon 1 on koottu LPBF-menetelmissä yleisimmin esiintyviä vikoja, niiden aiheuttajia sekä vikojen välttämiseksi tehtäviä parametrimuutoksia.



Kuva 16. Eri huokoisuuksille tyypilliset muodot alumiinisinkkiseoksessa: a) lack-of-fusion -huokosten suuri ja epäsäännöllinen, b) keyhole-huokosten pieni ja pyöreähkö ja c) kaasuhuokosten suuri ja pyöreä muoto. [39]

Lack of fusion -huokoisuus aiheutuu jauheen riittämättömästä sulamisesta ja yhdistymisestä. Sulamattomien partikkelien väliin jäävä tyhjä tila synnyttää huokosia rakenteesseen. Kuvassa 17a on esitetty lack of fusion -huokoisuudelle tyypillinen suuri ja

epäsäännöllinen muoto. Yleensä lack of fusion -huokoisuus voi ilmetä kerrosten tai skannauspolkujen välissä riittämättömän energiatiheuden seurauksena, jolloin sula ei saavuta tarvittavaa tunkeumaa. Energiatiheys voidaan arvioida VED-arvolla, jolloin liian alhainen energiatiheys voi aiheutua liian suuresta skannausnopeudesta, kerrospaksuudesta, skannausvälistä ja lasersäteen halkaisijasta tai alhaisesta laserin tehosta. Vaikka laskennallisesti energiatiheys olisi riittävä, voivat jauheen ominaisuudet aiheuttaa lack of fusion -huokoisuutta. Lasersäteen heikkoon absorptioon voi olla syynä partikkelien sileä pinnanlaatu tai joillekin materiaaleille tyypillinen korkea heijastavuus. Heikon absorptioon aiheuttamaa lack of fusion -huokoisuutta voidaan ehkäistä lämmittämällä kappaletta esimerkiksi tulostusalustan tai säteilylämmittimen avulla. Lack of fusion -huokoisuus voi heikentää lujuus-, sitkeys- ja väsymisominaisuuksia merkittävästi. Liiallinen huokoisuus aiheuttaa kerrosten ja skannauspolkujen välistä heikkoutta, mistä voi seurata kerrosten irtoaminen toisistaan.

Haihtumisilmiöt ja materiaalikoostumuksen muutos voivat aiheuttaa kaasuhuokoisuutta, jossa syntynyt kaasu jää jumiin sulaan. Haihtumisilmiöt voivat aiheutua liian suuresta energiatiheudesta tai herkistä seosaineista. Liian suuri energiatiheys voi aiheuttaa sulan kuumentamisen materiaalin kiehumispisteen yli, jolloin syntyy kuvan 17c mukaisia suuria kaasuhuokosia. Energiatiheyttä voidaan alentaa pienentämällä lasersäteen tehoa tai kasvattamalla skannausnopeutta, kerrospaksuutta ja suurentamalla lasersäteen halkaisijaa. Skannausnopeutta nostettaessa on kuitenkin varottava palloontumista. Materiaalin liian herkäät seosaineet voivat aiheuttaa haihtumisilmiöitä alhaisissakin sulan lämpötiloissa, mikä täytyy huomioida materiaalivalintaa ja prosessiparametreja valittaessa. Haihtumista voi tapahtua myös erittäin hyvin lämpöä johtavilla materiaaleilla, jolloin tarvittavan energian tuonti kuumentaa sulaa pinnasta liikaa ennen halutun tunkeuman saavuttamista.

Keyhole-huokoisuutta syntyy keyhole-tyyppisellä sulalla, jossa syvän sulan keskelle muodostuu kanava prosessissa syntyville kaasulle. Mikäli energiatiheys kasvaa liian suureksi keyhole-tyyppiselle sulalle, sulan epävakaas voi romahduttaa keskellä kulkevan kaasukanavan, jolloin rakenteeseen jää kuvan 17b mukaisia pieniä kaasuhuokosia. Keyhole-huokoisuutta voidaan ehkäistä laskemalla energiatheyttä.

Palloontumista voi ilmetä tulostusprosessissa useiden eri syiden vuoksi. Palloontuminen aiheutuu yleensä liian suuresta skannausnopeudesta, joka luo pitkän sulan alueen. Pitkä sula voi muuttua herkästi palloiksi pintajännityksen seurauksena. Suurella skannausnopeudella sula ei välttämättä ehdi sulautumaan aiempaan kerrokseen, mikä

edesauttaa palloontumista. Liian pieni energiatiheys voi tästä syystä aiheuttaa palloontumista. Myös liian suuri energiatiheys voi aiheuttaa palloontumista sulan kuumentuessa liikaa. Yleisesti palloontumista voi syntyä puutteellisen sulan kostutuskyvyn vuoksi. Puutteellinen kostutus voi aiheutua esimerkiksi partikkeleihin tai aiempaan kerrokseen muodostuneen oksidikerroksen vuoksi.

Jäännösjännitykset ovat yleinen ongelma jauhepetimenetelmissä, eikä niiltä voida kokonaan välttyä prosessissa syntyvien lämpötilaerojen aiheuttamien mittaerojen vuoksi. Jäännösjännityksiä voidaan vähentää skannausstrategian avulla minimoimalla syntyvät lämpötilaerot käyttämällä esimerkiksi shakkilautastrategiaa. Syntyviä jännityksiä pyritään tasaamaan kääntämällä skannausuuntaa kerrosten välissä, jolloin mittavirheet pysyvät mahdollisimman pieninä. Mahdollisia tapoja lämpötilaerojen minimoimiseksi ovat esimerkiksi alustan lämmitys, kappaleen lämmittäminen säteilylämmittimellä sekä kerroksen skannaaminen useaan kertaan. Tukirakenteiden avulla voidaan vähentää esimerkiksi ulokemaisten ja ohuiden piirteiden vääntymistä.

Jauhepetimenetelmissä syntyvä pinnanlaatu muistuttaa valukappaleen pintaa. Pinnan laatuun vaikuttaa raaka-aineen levitettävyyden, kerrospaksuus sekä tulostettavat muodot. Epätasaisesti levittyvä jauhe voi aiheuttaa epätasaisen sulan synnyn, mikä heikentää pinnanlaatua. Myös erilaiset epäpuhtaudet tai oksidikerros jauheessa voivat heikentää pinnanlaatua tuottamalla epätasaisen sulan. Liian suuri kerrospaksuus aiheuttaa vinoihin tai pyöreisiin muotoihin porrasmaisen rakenteen. Lisäksi pinnan laatu voi huonontua myös, mikäli muut skannausparametrit eivät ole optimaaliset esimerkiksi liiallisen skannausnopeuden aiheuttaman palloontumisen seurauksena.

Rakenteeseen voi syntyä ei-toivottua tekstuuria ja korkeita pylväsmäisiä rakeita, jotka aiheuttavat anisotrooppiset ominaisuudet kappaleeseen. Pylväsmäinen rakenne voi syntyä liian suuren jäähmettymisnopeuden tai lämpötilagradientin vuoksi. Jäähmettymisnopeutta voidaan laskea hidastamalla skannausnopeutta. Lämpötilagradienttia voidaan laskea pienentämällä lasersäteiden tehoa.

Taulukko 1. Tulosteissa esiintyvät viat, niiden mahdolliset aiheuttajat sekä säädettävät parametrit

Vika/ongelma	Mahdolliset aiheuttajat	Säädettävät parametrit
Lack of fusion -huokoisuus	Sulan riittämätön tunkeuma tai Haihtumislmiöt kts. Seuraava kohta	Laserin tehon nosto Skannausnopeuden lasku Kerrospaksuuden ohentaminen Skannausvälin lyhennys Alustan lämmitys Lasersäteen halkaisijan pienennys
Haihtumislmiöt/koostumuksen muutos	Liian kuuma sula/herkät seosaineet	Laserin tehon lasku Skannausnopeuden nosto Raaka-aineen muutos Lasersäteen halkaisijan suurenus Skannausvälin pidennys Kerrospaksuuden nosto
Keyhole-huokoisuus	Liian kuuma sula/herkät seosaineet	Laserin tehon lasku Skannausnopeuden nosto Raaka-aineen muutos Lasersäteen halkaisijan suurenus Skannausvälin pidennys Kerrospaksuuden nosto
Palloontuminen	Sula ei yhdisty aiempaan kerrokseen Sulan huono kostuttavuus Liian kuuma sula	Skannausnopeuden lasku Tulostusalustan lämmitys Energiatehyyden vähennys tai lisäys
Jäännösjännitykset/mittamutokset	Liian suuret lämpötilaerot	Skannausstrategian muutos Tukirakenteiden optimointi Alustan esilämmitys Kerroksen jälkilämmitys
Huono pinnanlaatu	Huonosti levittyvä raaka-aine Vaikeasti tulostettavat muodot Liian suuri kerrospaksuus Väärä skannausstrategia	Kerrospaksuuden ohennus Kappaleen orientaation muutos Paremmen levittyvän raaka-aineen vaihto Oksidikerroksen poisto/synnyksen ehkäisy
Liiallinen tekstuuri/pylväsmäiset rakeet	Liian suuri jähmettymisnopeus Liian suuri lämpötilagradientti	Skannausnopeuden lasku Laserin tehon lasku

5. YHTEENVETO

LPBF-laitteistojen toimintatavat noudattavat syklistä prosessia, jossa levitetään kerros metallista jauhetta, jonka laser sintraa tai sulattaa kiinni aikaisempaan kerrokseen. Laitteistoissa erot ovat jauheensyöttömenetelmissä sekä laserin tyypissä, tehossa ja lukumäärässä, mitkä vaikuttavat syntyvän tulosteen laatuun ja tulostusnopeuteen. Usein laitteistoissa käytetään jauheen yläpuolista syöttöä ja kuitulaseria parhaan laadun ja tehokkuuden saavuttamiseksi. Tällä hetkellä kehitys painottuu rakennusnopeuden parantamiseen käyttämällä useita lasereita samanaikaisesti, sekä tarkkailu- ja laadunvalvontajärjestelmien kehittämiseen.

LPBF-menetelmien raaka-aineiden vaatimusten huomataan olevan tarkkoja. Raaka-aine vaikuttaa kaikkiin tulostettavan kappaleen ominaisuuksiin, mutta niiden välinen yhteys on monimutkainen ja eri tutkimusten välillä esiintyy eroja. Raaka-aine on tärkein tulostettavaan kappaleeseen vaikuttava muuttuja, koska ilman laadukasta ja tasalaa- tuista jauhetta parametreja ei voida säätää optimaalisiksi. Jauheelta vaaditaan erityisesti hyviä virtausominaisuuksia ja pakkautumiskykyä levitettävyyden parantamiseksi, jolloin myös tiheys paranee. Hyvät virtausominaisuudet voidaan saavuttaa kapealla partikkelikokojakaumalla sekä partikkelien pallomaisella muodolla. Pakkautuvuutta voidaan parantaa käyttämällä useaa eri partikkelikokoa sisältävää jauhetta. Jauheen partikkelikoko on yleensä 15–45 µm. Erilaisten raaka-ainevaihtoehtojen huomataan olevan vielä rajallisia, kalliita ja painottuvan vaativiin käyttökohteisiin soveltuviin materiaaleihin. Yleisimmät raaka-aineet ovat teräkset sekä titaani-, nikkeli-, koboltti-, kupari ja alumiiniseokset. Raaka-ainevaihtoehtojen rajallisuus aiheutuu luultavasti tulostusprosessin herkkyydestä erilaisille seosaineille sekä uusille materiaaleille sopivien parametrien säätämisen vaativuudesta.

Laserjauhepetimenetelmissä säädettäviä parametreja on yli 100, mutta tässä työssä keskitytään vain merkittävimpiin. On kuitenkin hyvä tiedostaa prosessin monimutkaisuus sekä parametrien laajuus, jotka vaikuttavat kappaleen laatuun. Tulostusparametrien todetaan vaikuttavan merkittävimmin energiatihyden sekä jäähtymisnopeuden kautta syntyvän rakenteen ominaisuuksiin. Energiatihyden avulla voidaan koostaa useiden eri parametrien, kuten kerrospaksuuden, skannausnopeuden, laserin tehon ja skannausvälin yhteinen vaikutus syntyvän sulan ominaisuuksiin. Energiatiheys vaikuttaa merkittävimmin lack of fusion- ja keyhole-huokoisuuden syntyyn sekä erilaisiin

haihtumisilmiöihin. Liian suuri energiatiheys voi aiheuttaa keyhole-huokoisuutta ja haihtumisilmiöitä. Liian pieni energiatiheys voi aiheuttaa lack-of-fusion -huokoisuutta, joka johtaa skannauspolkujen ja kerrosten väliseen heikkouteen.

Jäähtymisnopeutta muuttavat tekijät, kuten skannausnopeus ja skannausstrategia, vaikuttavat erityisesti syntyviin jäännösjännityksiin sekä syntyvään mikrorakenteeseen. Jäännösjännityksiä voidaan vähentää lyhyempien skannausvektorien sekä alustan esilämmityksen avulla.

LPBF-menetelmissä syntyvät mikrorakenteet saattavat erota merkittävästi tavanomaisista menetelmistä. LPBF-menetelmissä huomataan olevan taipumus kasvattaa suurilla jähmettymisnopeuksilla lämpötilagradientin suuntaan $\langle 100 \rangle$ orientoitunut pylväsmäinen raerakenne, joka aiheuttaa anisotrooppiset mekaaniset ominaisuudet. Suuntautuneen pylväsmäisen rakenteen voi aiheuttaa liian suuri jähmettymisnopeus tai lämpötilagradientti. Pylväsmäisen rakenteen lisäksi tasakantainen dendriittinen mikrorakenne on yleinen. Mikrorakenteen havaitaan myös vaihtelevan kappaleen sisällä rae-koon ollessa pienempi skannauspolkujen keskellä verrattuna reunoihin.

Vaikka LPBF-menetelmillä kyetään nykyään tulostamaan tavanomaisten menetelmien tasolle yltäviä kappaleita, on kriittistä selvittää tarkemmin prosessiparametrien vaikutusta syntyvään rakenteeseen. Paremmalla ymmärryksellä LPBF-menetelmillä voidaan valmistaa tasalaatuisia kappaleita hyödyntäen menetelmien mahdollisuutta tuottaa erilaisia mikrorakenteita. Erityistä huomioita vaatii myös laaduntarkkailujärjestelmän sekä prosessin aikana säätävien parametrien kehitys, jotta voidaan saavuttaa laadukas, nopea ja automatisoitu tuotanto.

LÄHTEET

- [1] E. Toyserkani, *Metal additive manufacturing*. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley, 2022.
- [2] Fina F, Gaisford S, Basit AW. Powder bed fusion: The working process, current applications and opportunities. In: AAPS advances in the pharmaceutical sciences series. 2018. p. 81–105.
- [3] Patterson AE, Messimer SL, Farrington PA. Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need. *Technologies (Basel)*. 2017;5(2):15–.
- [4] Gu D. *Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials*. 1st ed. 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2015.
- [5] Brandt M. *Laser additive manufacturing : materials, design, technologies, and applications*. Brandt M, editor. Amsterdam: Elsevier; 2017.
- [6] Uddin SZ, Murr LE, Terrazas CA, Morton P, Roberson DA, Wicker RB. Processing and characterization of crack-free aluminum 6061 using high-temperature heating in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive manufacturing*. 2018;22:405–15.
- [7] Zhu Y, Chen X, Zou J, Yang H. Sliding wear of selective laser melting processed Ti6Al4V under boundary lubrication conditions. *Wear*. 2016;368-369:485–95.
- [8] Frazier WE. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of materials engineering and performance*. 2014;23(6):1917–28.
- [9] Budding A, Vaneker THJ. New Strategies for Powder Compaction in Powder-based Rapid Prototyping Techniques. *Procedia CIRP*. 2013;6:527–32.
- [10] Ch SR, Raja A, Nadig P, Jayaganthan R, Vasa NJ. Influence of working environment and built orientation on the tensile properties of selective laser melted AISi10Mg alloy. *Materials science & engineering A, Structural materials : properties, microstructure and processing*. 2019;750:141–51.
- [11] Ferrar B, Mullen L, Jones E, Stamp R, Sutcliffe CJ. Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance. *Journal of materials processing technology*. 2012;212(2):355–64.
- [12] Natarajan J, Cheepu M, Yang CH. *Advances in Additive Manufacturing Processes*. Singapore: Bentham Science Publishers; 2021.
- [13] Gu D, Shen Y. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials & design*. 2009;30(8):2903–10.
- [14] Muñiz-Lerma JA, Nommeots-Nomm A, Waters KE, Brochu M. A comprehensive approach to powder feedstock characterization for powder bed fusion additive manufacturing: A case study on AISi7Mg. *Materials*. 2018;11(12):2386–.

- [15] Vock S, Klöden B, Kirchner A, Weißgärber T, Kieback B. Powders for powder bed fusion: a review. *Progress in additive manufacturing*. 2019;4(4):383–97.
- [16] Riener K, Albrecht N, Ziegelmeier S, Ramakrishnan R, Haferkamp L, Spierings AB, et al. Influence of particle size distribution and morphology on the properties of the powder feedstock as well as of AlSi10Mg parts produced by laser powder bed fusion (LPBF). *Additive manufacturing*. 2020;34:101286–.
- [17] Matej Balažic, Janez Kopač, "Machining of Titanium Alloy Ti-6Al-4V for Biomedical Applications: Odrezavanje titanove zlitine Ti-6Al-4V za potrebe biomedicinskih aplikacij.", *J. Mech. Eng. Stroj. Vestn.*, 2010;56;3, p. 202–206.
- [18] Vilanova M, Taboada MC, Martinez-Amesti A, Niklas A, Sebastian MS, Guraya T. Influence of minor alloying element additions on the crack susceptibility of a nickel based superalloy manufactured by lpb. *Materials*. 2021;14(19):5702–.
- [19] Martin A, Vilanova M, Gil E, Sebastian MS, Wang CY, Milenkovic S, et al. Influence of the Zr content on the processability of a high strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy by laser powder bed fusion. *Materials characterization*. 2022;183:111650–.
- [20] Oliveira JP, LaLonde AD, Ma J. Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing. *Materials & design*. 2020;193(C):108762–.
- [21] DebRoy T, Wei HL, Zuback JS, Mukherjee T, Elmer JW, Milewski JO, et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in materials science*. 2018;92(C):112–224.
- [22] Debroy T, David SA. Physical processes in fusion welding. *Reviews of modern physics*. 1995;67(1):85–112.
- [23] Balbaa M, Mekhail S, Elbestawi M, Mclsaac J. On selective laser melting of Inconel 718: Densification, surface roughness, and residual stresses. *Materials & design*. 2020;193:108818–.
- [24] Oliveira JP, Santos TG, Miranda RM. Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice. *Progress in materials science*. 2020;107:100590–.
- [25] Aboulkhair NT, Everitt NM, Ashcroft I, Tuck C. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive manufacturing*. 2014;1-4:77–86.
- [26] L. Parry, "Slicing and Hatching for Selective Laser Melting (L-PBF) - lukeparry.uk", 2020. <https://lukeparry.uk/slicing-and-hatching-for-selective-laser-melting/> (viitattu 21. toukokuuta 2023).
- [27] AlFaify A, Hughes J, Ridgway K. Controlling the porosity of 316L stainless steel parts manufactured via the powder bed fusion process. *Rapid prototyping journal*. 2019;25(1):162–75.
- [28] Rivalta F, Ceschini L, Jarfors AEW, Stolt R. Effect of scanning strategy in the l-pbf process of 18ni300 maraging steel. *Metals (Basel)*. 2021;11(5):826–.

- [29] Parry L, Ashcroft IA, Wildman RD. Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation. *Additive manufacturing*. 2016;12:1–15.
- [30] Cicero S, Álvarez JA. Fracture, fatigue, and structural integrity of metallic materials. *Metals (Basel)*. 2019;9(8):913–.
- [31] Yadav P, Rigo O, Arvieu C, Lacoste E. Microstructural and mechanical aspects of AlSi7Mg0.6 alloy related to scanning strategies in L-PBF. *International journal of advanced manufacturing technology*. 2022;120(9-10):6205–23.
- [32] Soliman HA, Elbestawi M. Influence of scanning strategies on L-PBF processing of titanium aluminides. *Journal of manufacturing processes*. 2023;86:187–207.
- [33] Kenel C, Dasargyri G, Bauer T, Colella A, Spierings AB, Leinenbach C, et al. Selective laser melting of an oxide dispersion strengthened (ODS) γ -TiAl alloy towards production of complex structures. *Materials & design*. 2017;134:81–90.
- [34] Yasa E, Kruth JP. Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting. *Procedia Engineering*. 2011;19:389–95.
- [35] Xi LX, Ma P, Jia YD, Chaubey AK, Wang Z, Prashanth KG. Influence of substrate plate heating on the fabrication of Al-12Si produced by selective laser melting. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering (Online)*. 2021;6(4):1027–36.
- [36] Ma P, Ji P, Jia Y, Shi X, Yu Z, Prashanth KG. Effect of substrate plate heating on the microstructure and properties of selective laser melted Al-20Si-5Fe-3Cu-1Mg Alloy. *Materials*. 2021;14(2):1–15.
- [37] Wang Y, Yu C, Xing L, Li K, Chen J, Liu W, et al. Grain structure and texture of the SLM single track. *Journal of materials processing technology*. 2020;281:116591–.
- [38] Cakmak E, Kirka MM, Watkins TR, Cooper RC, An K, Choo H, et al. Microstructural and micromechanical characterization of IN718 theta shaped specimens built with electron beam melting. *Acta materialia*. 2016;108(C):161–75.
- [39] Wang T, Wang Y, Chen C, Zhu H. Relationships between the characteristics of porosity, melt pool and process parameters in laser powder bed fusion Al Zn alloy. *Journal of manufacturing processes*. 2021;68:1236–44.
- [40] SLM Solution Group AG, Material data sheet AlSi10Mg, [Viitattu 4.6.2023] Saata-
vissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/nw/MDS_AlSi10Mg_2023-05.1_EN.pdf
- [41] SLM Solution Group AG, Material data sheet IN165, [Viitattu 4.6.2023] Saata-
vissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/MDS_Ni-Alloy_IN625_0819_EN.pdf
- [42] SLM Solution Group AG, Material data sheet IN178, [Viitattu 4.6.2023] Saata-
vissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/nw/MDS_IN718_2023-04_EN.pdf

- [43] SLM Solution Group AG, Material data sheet H13, [Viitattu 4.6.2023] Saatavissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/MDS_Fe-Al-loy_H13_0219_EN.pdf
- [44] SLM Solution Group AG, Material data sheet 316L, [Viitattu 4.6.2023] Saatavissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/nw/MDS_316L_2023-04_EN.pdf
- [45] SLM Solution Group AG, Material data sheet 15.5PH, [Viitattu 4.6.2023] Saatavissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/nw/MDS_15-5PH_2023-04_EN.pdf
- [46] SLM Solution Group AG, Material data sheet 17.4PH, [Viitattu 4.6.2023] Saatavissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/nw/MDS_17-4PH_2023-04_EN.pdf
- [47] SLM Solution Group AG, Material data sheet Invar 36, [Viitattu 4.6.2023] Saatavissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/nw/MDS_Invar_36_R_2023-04_EN.pdf
- [48] SLM Solution Group AG, Material data sheet Ti6Al4V, [Viitattu 4.6.2023] Saatavissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/nw/MDS_Ti6Al4V_2023-04_EN.pdf
- [49] SLM Solution Group AG, Material data sheet TA15, [Viitattu 4.6.2023] Saatavissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/nw/MDS_TA15_2023-04_EN.pdf
- [50] SLM Solution Group AG, Material data sheet Ti (Grade 2), [Viitattu 4.6.2023] Saatavissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/nw/MDS_Ti_Gd_2_2023-04_EN.pdf
- [51] SLM Solution Group AG, Material data sheet CoCr28Mo6, [Viitattu 4.6.2023] Saatavissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/nw/MDS_CoCr28Mo6_2023-04_EN.pdf
- [52] SLM Solution Group AG, Material data sheet CuNi2SiCr, [Viitattu 4.6.2023] Saatavissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/nw/MDS_CuNi2SiCr_2023-04_EN.pdf
- [53] SLM Solution Group AG, Material data sheet CuCr1Zr, [Viitattu 4.6.2023] Saatavissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/nw/MDS_CuCr1Zr_2023-04_EN.pdf

LIITE A

Taulukko 2. Yleisimmät tulostettavat materiaalit sekä niiden ominaisuudet.

Materiaaliryhmä	Materiaali	Partikkelikoko [µm]	Saavutettava suhteellinen tiheys SLM-menetelmillä [%]	Kovuus (ilman lämpökäsittelyä)	Käyttökohteita	Lähde
Alumiiniseokset	AlSi10Mg	20-63	99,0-99,9	106-130 HV5	Ilmailu- ja autoteollisuus Lämmönvaihtimet	[40]
Nikkeliseokset	IN625	10-45	>99,5	291-310 HV10	Ilmailu Energia Kemianteollisuus Turbiinit	[41]
	IN718	10-45	99,6-99,8	265-305 HV10	Ilmailu Energia Kemianteollisuus Turbiinit	[42]
Rautapohjaiset seokset	H13	10-45	≈ 99,5	Ei ilmoitettu	Ruiskuvalumuotit Työkalut	[43]
	316L	10-45	99,3-99,9	215-220 HV10	Ilmailu- ja autoteollisuus Kirurgiset välineet Elintarviketeollisuus Meri-ympäristö	[44]

	15-5PH	10–45	99,3-99,8	318-373 HV10	Ilmailu Lääketieteellinen Kemianteollisuus Prosessiteollisuus	[45]
	17-4PH	10–45	99,6-99,8	226-229 HV10	Ilmailu Lääketieteellinen Kemianteollisuus Prosessiteollisuus	[46]
	Invar 36®	10–45	99,6	149 HV10	Ilmailu Moottorien venttiilit Tarkkuusinstrumentit	[47]
Titaaniseokset	Ti6Al4V	20–63	99,8-99,9	340-375 HV10	Ilmailu- ja autoteollisuus Lääketieteellinen Energiateollisuus	[48]
	TA15	20–63	99,8	385 HV10	Ilmailu Moottorien valmistus	[49]
	Ti (Grade 2)	20–63	99,9	225	Lääketieteellinen Ilmailu Energiateollisuus Lämmönvaihtimet	[50]
Koboltiseokset	CoCr28Mo6	10–45	99,8-99,9	380-400 HV10	Lääketieteellinen Ilmailu Energiateollisuus Turbiinit	[51]
Kupariseokset	CuNi2SiCr	20–63	99,1-99,9	105 HV10	Hitsausteknologia Sähkötekniikka Työkalujen valmistus	[52]
	CuCr1Zr	20–63	99,1-99,6	75-80 HV10	ilmailu ja avaruus Sähkötekniikka	[53]