

LUT-YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

METALLIJAUHEEN LEVITTYVYYS JA LEVITTYVYYDEN VAIKUTUS
JAUHEPETISULATUKSELLA VALMISTETUN KAPPALEEN LAATUUN

CHARACTERISTICS OF METAL POWDER FLOWABILITY AND THE EFFECTS OF
FLOWABILITY ON THE QUALITIES OF PARTS MADE BY POWDER BED FUSION

Lappeenrannassa 31.8.2021

Janne Sepänaho

Tarkastaja Ilkka Poutiainen

Ohjaajat Ilkka Poutiainen

TIIVISTELMÄ

LUT-Yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Janne Sepänaho

Metallijauheen levittyvyys ja levittyvyyden vaikutus jauhepetisulatuksella valmistetun kappaleen laatuun

Kandidaatintyö

2021

23 sivua, Kuva 9 kuvaa, 0 taulukkoa

Tarkastaja: Ilkka Poutiainen

Ohjaaja: Ilkka Poutiainen

Hakusanat: lisäävä valmistus, metallijauhe, levittyvyys, 3D-tulostus, jauhepetisulatus

Metallien lisäävän valmistuksen yleisin menetelmä on sulattaa metallijauhetta kerros kerrokselta. Prosessissa jauhetta levitetään sulatusalustalle mahdollisimman ohut ja tasainen kerros hyvän tulosteen laadun saavuttamiseksi. Tässä työssä kootaan kirjallisuuskatsauksena metallijauheen levittyvyyteen vaikuttavat ominaisuudet ja arvioidaan levittyvyyden vaikutusta tulostuksen laatuun. Levittyvyyttä arvioidaan numeerisin menetelmin. Tulostuslaatua arvioidaan vertailemalla tulosteiden huokoisuuden riippuvuutta levittyvyyteen. Hyvä jauheen levittyvyys korreloi suoraan jauhekerroksen tiheyteen. Kuitenkin vain suuret erot jauheen levittyvyydessä vaikuttavat lopullisen tulosteen laatuun merkittävästi.

ABSTRACT

LUT University
LUT Energy systems
LUT Mechanical engineering

Janne Sepänaho

Characteristics of metal powder flowability and the effects of flowability on the qualities of parts made by powder bed fusion

Bachelor's thesis

2021

23 pages, 9 graphs, 0 charts

Examiner: Ilkka Poutiainen

Instructor: Ilkka Poutiainen

Keywords: additive manufacturing, metal powder, flowability, 3D printing, laser powder bed fusion

The most common method for manufacturing metal parts using additive manufacturing is to melt metal powder layer by layer. In the process a thin and even layer of powder is spread on a melting platform to ensure a good quality print. In this thesis the characteristics of metal powders and their effects on the quality of prints are investigated and documented from a literature review. The powder flowability is assessed by numeric methods. The printing quality is assessed by the dependency of porosity to powder flowability. Good powder flowability correlates to powder layer density. However only large differences in flowability affect the final print quality significantly.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT.....	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
1 JOHDANTO.....	5
1.1 Tutkimuksen tausta	5
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset	5
1.3 Työn rajaukset.....	6
1.4 Tutkimusmenetelmät.....	6
2 KIRJALLISUUSKATSAUS	7
2.1 Levittyvyyden määrittely ja mittaus	8
2.2 Valumiskeon kulma	9
2.3 Puristuvuusindeksi ja Hausnerin suhde	10
3 LEVITYVYYTEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ.....	12
3.1 Partikkelikokojakauma	12
3.2 Partikkelien muoto.....	13
3.3 Jauheen valmistusmenetelmä.....	14
3.4 Jauheen uudelleenkäyttö	15
4 VAIKUTUKSET TULOSTEESSA	17
5 YHTEENVETO	19
LÄHTEET	21

1 JOHDANTO

Tässä työssä tutkitaan metallien lisäävässä valmistuksessa yleisimmin käytettyjen teräsjauheiden levittyvyyteen vaikuttavia ominaisuuksia ja niiden vaikutuksia tulostetun kappaleen ominaisuuksiin. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, jonka tavoitteena on kerätä uusimmat tieteelliset havainnot metallijauheen levittyvyyden vaikutuksista tulosteen laatuun.

1.1 Tutkimuksen tausta

Työn tarkoituksena on tuottaa tutkimustuloksena materiaalia, josta ilmenee metallijauheen levittyvyyden vaikutukset jauhepetiteknikalla valmistetussa kappaleessa. Tutkimustulosta voidaan hyödyntää esimerkiksi jauhemateriaalien ja tulostusmenetelmien kehittämiseen. Työn merkitys on myös suuri metallien lisäävää valmistusta hyödyntäville yrityksille, joille työ voi mahdollistaa kaupallisen prosessin tehostamisen. Jauheen levittyvyys on vain yksi osa metallien lisäävän valmistuksen tärkeistä muuttujista ja työn tuloksia voidaan hyödyntää jatkotutkimuksissa osana prosessin laajempaa kehitystä.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Työn tärkeimpänä tavoitteena on koota nykyisen tutkimusdatan pohjalta katsaus jauheen levittyvyyden vaikutuksista jauhepetiteknikalla valmistetun kappaleen ominaisuuksiin. Työn tavoitteena on myös tuottaa tutkimustuloksia, jotka huomioimalla, voidaan esimerkiksi parantaa jauheen käyttöikä, vähentää huonolaatuisten tulosteiden määrää tai parantaa materiaalikulutuksen ennakoitavuutta. Työssä tarkasteltavia ominaisuuksia ovat eri materiaalien partikkelikoko, partikkelien muoto, jauheen hitsattavuus, homogeenisuus ja jauheen kierrätyskerrat. Tutkimuksessa erityisen tärkeää on löytää näiden ominaisuuksien muutosten vaikutus jauheen levittyvyyteen ja sen vaikutukseen valmistettavan kappaleen ominaisuuksissa.

Tutkimuskysymyksiä, joihin työllä pyritään vastaamaan ovat:

- Miten metallijauheen levittyvyys määritellään?
- Mitkä asiat vaikuttavat metallijauheen levittyvyyteen ja miksi?
- Mitä ilmiöitä metallijauheen levittyvyyden vaihtelu aiheuttaa jauhepetiteknikassa?
- Mitkä metallijauheen levittyvyyteen vaikuttavat ominaisuudet vaikuttavat tulosteeseen ja miksi?

1.3 Työn rajaukset

Työssä tarkastellaan metallien jauhepetisulatuksessa yleisesti käytettävää ruostumatonta terästä 316L. Työssä käsiteltävä materiaali on rajattu suomalaisten yritysten yleisesti metallitulostuksessa tarjoamaan teräkseen. Työn aihe on rajattu käsittelemään metallijauheen levittyvyyttä, koska kaikkien metallijauheen prosessissa huomioitavien ominaisuuksien käsittely yhdessä tutkimuksessa ei olisi tarkoituksenmukaista. Tutkimuksessa käytetyt lähteet on pyritty rajaamaan vuonna 2015 julkaistuihin, ja sitä uudempia lähteisiin tutkimuksen nopeasti kehittyvän aiheen vuoksi.

1.4 Tutkimusmenetelmät

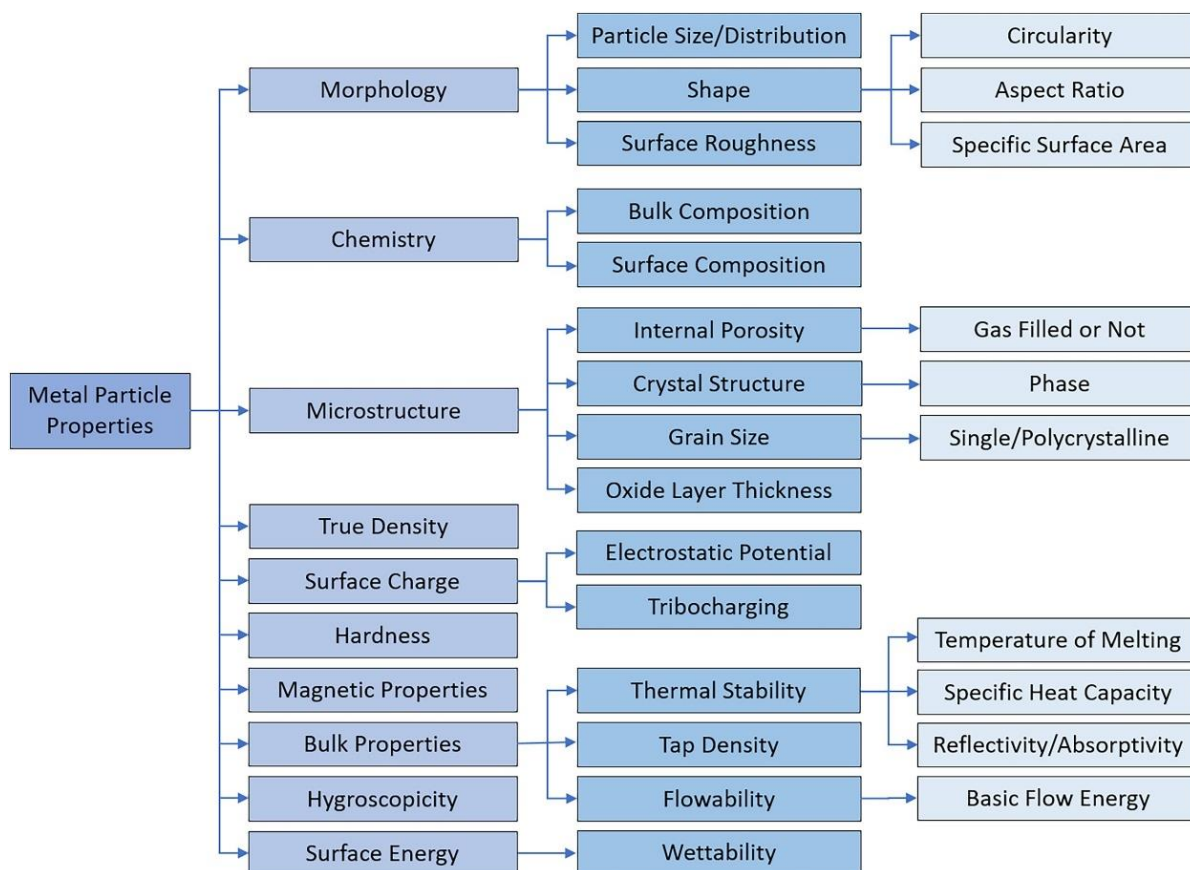
Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena, jonka tärkeimpinä lähteinä toimivat kansainväliset artikkelit, kirjat ja konferenssijulkaisut. Aineiston etsimiseen on käytetty LUT-Primon kansainvälisten aineistojen kirjastoa. Tiedonhaku on toteutettu englanniksi, koska suomenkielisiä tutkimuksia aiheeseen liittyen on saatavilla vähän, eikä suomenkielisillä hakusanoilla löydetty riittävästi aineistoa.

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Metallien lisäävän valmistuksen tekniikoita on nykyään monia. Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan yleisimmin teollisuudessa käytettyä tekniikkaa, jauhepetisulatusta. Metallien jauhepetisulatuksessa korkean energiatiheuden laser- tai elektronisäde sulattaa jauhemuotoista materiaalia kerroksittain. Jauhepetisulatuksessa materiaalia levitetään ja sulatetaan rakennusalustalle vuorotellen ohuina kerroksina. Lasersäde sulattaa materiaalia halutun geometrian mukaan muodostaen kerroksista yhtenäisen kappaleen. (Zhang, Jung 2018) (Frazier 2014)

Lisäävän valmistuksen menetelmät mahdollistavat monimutkaisten kappaleiden valmistamisen. Jauhepetisulatus mahdollistaa tarkkojen piirteiden, erikoisten geometrioiden sekä kappaleen sisäisten käytävien valmistamisen, jotka ovat hankalia valmistaa perinteisillä aihioista materiaalia poistavilla valmistusmenetelmillä. (Frazier 2014)

Metallien jauhepetisulatuksessa prosessiin vaikuttavia tekijöitä ovat jauhemateriaalin ominaisuudet, prosessilaitteisto, sekä sulatusmenetelmä ja prosessiparametrit. Tässä työssä keskitytään jauheen levittyvyyteen, siihen vaikuttaviin ominaisuuksiin, sekä siihen, miten levittyvyys vaikuttaa tulosteeseen. Metallijauheen levittyvyyteen vaikuttaviin ominaisuuksiin täytyy huomioida jauheen ominaisuuksien lisäksi ulkoisten tekijöiden kuten kosteuden vaikutus, sekä jauheen levittämiseen käytetty menetelmä. Kuva 1 on lista metallijauheen ominaisuuksista, jotka voivat vaikuttaa tulosteen laatuun. (Spierings 2016) (Heiden, Deibler et al. 2019)



Kuva 1. Metallijauheen ominaisuudet jauhepitisulatuksessa (Heiden, Deibler et al. 2019)

Ominaisuuksia, jotka vaikuttavat prosessiin on monia ja yksittäisten ominaisuuksien vaikutusta tulosteeseen on hankala tutkia. Monet jauheen ominaisuudet vaikuttavat tulosteen laatuun suoraan, mutta osa ominaisuuksista vaikuttaa lopputulokseen välillisesti myös levittyvyyden kautta. Tässä työssä käsitellään jauheen ominaisuuksia, jotka vaikuttavat levittyvyyteen, sekä levittyvyyden muutoksen seurauksia.

2.1 Levittyvyyden määritelmä ja mittaus

Yksinkertaisesti määriteltynä levittyvyys tarkoittaa jauheen kykyä levittyä tai virrata. Tämä määritelmä on kuitenkin epämääräinen ja levittyvyyttä voidaan paremmin ajatella levittyvyyteen vaikuttavien tekijöiden yhteisvaikutuksena. Sama materiaali voi käyttäytyä eri tavalla prosessilaitteistosta ja ulkoisista tekijöistä riippuen. Jauheen levittyvyyden

arvioimiseen ja mittaamiseen on kuitenkin kehitetty menetelmiä, joiden avulla jauheen levittyvyydelle voidaan määritellä myös numeerisia arvoja. (Prescott 2000)

Koska levittyvyys on materiaalin ominaisuus, joka riippuu osittain ulkoisista tekijöistä, levittyvyyden mittaamiselle on kehitetty useita menetelmiä ja mitattavia arvoja, joista yleisimmin käytetään jauheelle määritettävää valumiskeon kulmaa eli lepokulmaa (angle of repose), sekä Hausnerin suhdetta (Hausner ratio). (Prescott 2000)

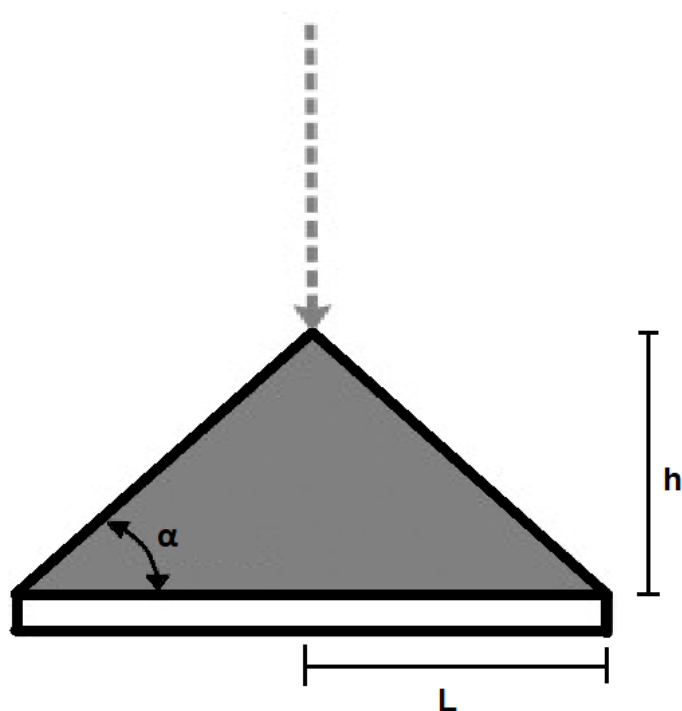
2.2 Valumiskeon kulma

Jauheiden levittyvyydelle on kehitetty useita erilaisia menetelmiä, joiden avulla jauheen soveltuvuutta jauhepetisulatukseen voidaan arvioida. Valumiskeon kulma eli lepokulma on yksi tapa mitata jauhepartikkelien vierimistä toistensa suhteen. Lepokulman arvot ovat riippuvaisia valumiskeon tuottamiseen käytetystä metodista. Lepokulman määrittäminen on sovelluskohtaista, sillä jauheen käyttäytyminen käyttökohteen prosessissa täytyy ottaa huomioon. (Beakawi Al-Hashemi, Baghabra Al-Amoudi 2018)

Yksi yleisimmin käytetyistä valumiskeon kulman määritelmistä on rajoittamattoman materiaalin jyrkin kaltevuus mitattuna vaakasuorasta tasosta, jolle materiaali voidaan kasata ilman materiaalin vierimistä tai liukumista. Kuvassa Kuva 2 valumiskeon kulman (α) mittaus asetelma. Kuvassa lepokulma α , keon korkeus h ja puolikkaan keon leveys L . (Beakawi Al-Hashemi, Baghabra Al-Amoudi 2018) (Krantz, Zhang et al. 2009)

Valumiskeon kulman arvo lasketaan kaavalla:

$$\tan \alpha = \frac{h}{L} \quad (1)$$



Kuva 2 Valumiskeon kulma α on jauheen reunan kulma vaakasuoraan alustaan.

2.3 Puristuvuusindeksi ja Hausnerin suhde

Jauheen irtotiheys (bulk density) on väljästi pakkautuneen täryttämättömän jauheen massan suhde tilavuuteen. Irtotiheyden tilavuudessa otetaan huomioon jauhepartikkelien lisäksi niiden väliin jäävä tyhjä tila. Jauheen irtotiheyteen vaikuttaa jauheen levittyvyyteen vaikuttavat parametrit kuten partikkelikokojakauma, partikkelien muoto, sekä partikkelien välinen kitka. Tärytiheys (tapped density) tarkoittaa jauheen tiheyttä, kun jauhetta sisältävää astiaa on tärytetty ennalta määritelty aika. Tärytiheys kuvaa jauheen sattumanvaraisesti pakkautunutta tilaa. (He 2009)

Puristuvuusindeksi (compressibility index) ja Hausnerin suhde ovat yksinkertaisia ja nopeita tapoja määrittää jauheen levittyvyys numeerisilla arvoilla. Puristuvuusindeksi PI ja Hausnerin suhde kuvaavat jauhepartikkelien taipumusta takertua. Puristuvuusindeksin ja Hausnerin suhteen laskemiseksi jauheelle täytyy määrittää irtotiheys (V_0) ja tärytiheys (V_f). (He 2009).

Puristuvuus indeksi lasketaan kaavalla:

$$PI = 100 \times \frac{V_0 - V_f}{V_0} \quad (2)$$

Hausnerin suhde lasketaan kaavalla:

$$\text{Hausnerin suhde} = \frac{\text{Täryttheys}}{\text{Irtotiheys}} \quad (3)$$

Puristuvuusindeksi ja Hausnerin suhde ovat hyödyllisiä parametreja jauhemateriaalin kohesiivisuuden arviointiin. Kohesiiviset materiaalit reagoivat täryttelyyn voimakkaasti. Vapaasti liikkuvaan jauheeseen täryttely ei vaikuta merkittävästi. Puristuvuusindeksiä tai Hausnerin suhdetta ei voi pitää luotettavasti ainoana tapana arvioida jauheen levittyvyyttä, mutta ne ovat helposti ja nopeasti määritettäviä parametreja, joiden avulla voidaan vertailla jauheiden leviämiskäyttäytymistä. (He 2009)

Puristuvuusindeksi tai Hausnerin suhde ei kuitenkaan välttämättä ole paras tapa mitata jauhepetisulatuksessa käytettäviä jauheita, koska jauhetta levitetään alustalle ohuina kerroksina eikä jauhe altistu ulkoiselle täryttelylle prosessin aikana. (Spierings 2016)

3 LEVITTYVYYTEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Jauheen hyvä levittyvyys on edellytys tasaisten ja ohuiden materiaalikerrosten muodostamiselle. Materiaalikerrokset pyritään jauhepetisulatuksessa muodostamaan mahdollisimman tasaisiksi, tiiviiksi ja kerrosten paksuus pyritään pitämään samana koko prosessin ajan. Jos jauhekerroksessa on suuria muutoksia, lasersäde ei sulata valmistettavan kappaleen jokaista kerrosta samalla tavalla ja kappaleeseen voi syntyä epäjatkuvuuskohtia. Jauhekerros pyritään pitämään tasaisena, jotta virheiden mahdollisuus pysyy pienenä ja lopullisen tuotteen pinnanlaatu pysyy hyvänä. Materiaalin huonosta levittyvyydestä voi myös aiheutua lopullisen tulosteen sisään jääviä ilmakuplia, jotka heikentävät kappaleen sisäistä rakennetta merkittävästi.

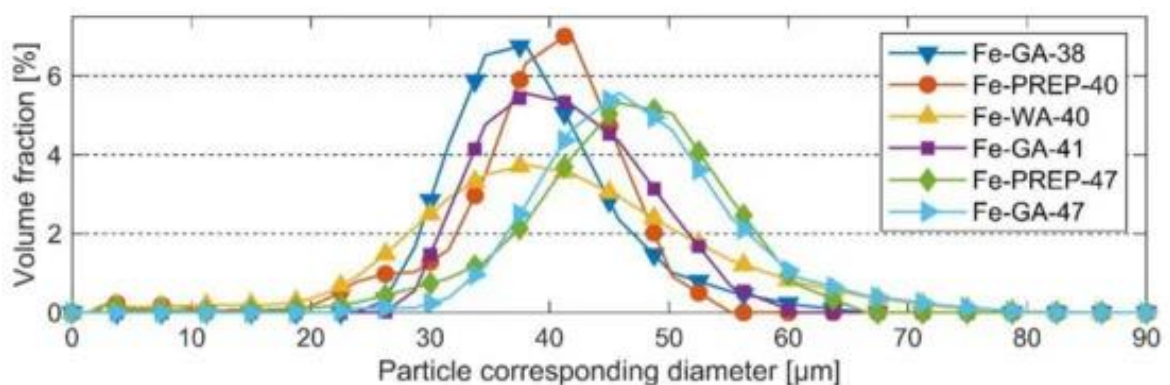
3.1 Partikkelikokojakauma

Jos jauhe koostuu suurista homogeenisista partikkeleista, partikkelien väliin jää runsaasti tilaa. Tyhjät alueet suurten partikkelien välissä aiheuttavat jauheeseen epäjatkuvuuskohtia, jotka huonontavat jauheen sulatettavuutta. Heikosti sulavista alueista saattaa aiheutua tulosteeseen sisäisiä rasiuksia ja huokoisuutta. Tyhjät alueet voidaan täyttää jättämällä jauheeseen pienempiä partikkeleita suurikokoisten partikkelien lisäksi. Suurten partikkelien väliset alueet täyttyvät pienemmistä partikkeleista, jonka seurauksena jauheesta tulee tiheämpää.

Pienten ja suurten partikkelien suhdetta kutsutaan partikkelikokojakaumaksi. Partikkelikokojakaumalla on suuri vaikutus jauheen levittyvyyteen, pakkautuvuuteen ja tiheyteen. Jauheen tiheys ja pakkautuvuus pyritään jauhepetisulatuksessa pitämään korkeana, jotta lopullisen tulostetun kappaleen tiheys olisi mahdollisimman lähellä materiaalin teoreettista tiheyttä. (Spierings 2016)

Metallijauhe ei koskaan ole täysin homogeenista ja partikkelikoko vaihtelee jauheissa merkittävästi. Partikkelikoko vaikuttaa välillisesti moniin jauheen ominaisuuksiin, joiden vaikutus voi aiheuttaa ongelmia jauhekerroksen muodostumisessa. Partikkelikoko vaikuttaa jauhepartikkelien välisiin vuorovaikutusvoimiin ja kitkaan. Hienojakoisen jauheen partikkelit jäävät helpommin toisiinsa kiinni kuin suuremmat partikkelit, mikä huonontaa jauheen levittyvyyttä. (Spierings 2016)

Haferkamp et al. 2021 tutkimuksessa vertailtiin kuuden 316L teräs jauheen, sekä kuuden alumiinijauheen ominaisuuksia ja niiden vaikutusta jauheiden levittyvyyteen. Levittyvyyttä arvioitiin jauheista määritetyillä parametreilla kuten Hausnerin suhteella, partikkelien pyöreydellä, sekä tiheysmittauksilla. Kuvassa Kuva 3 tutkimuksessa käytettyjen teräs jauheiden partikkelikokojakaumat.

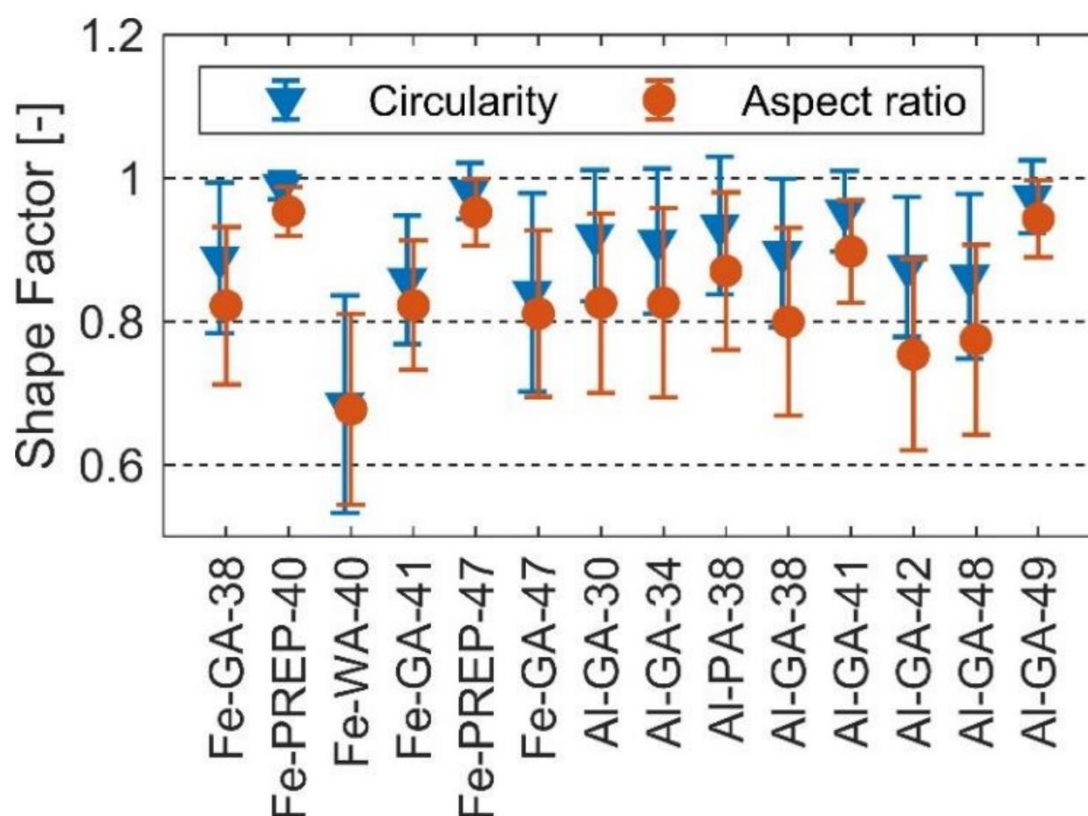


Kuva 3 Partikkelikokojakauma kuudesta 316L teräs jauheesta. (Haferkamp, Haudenschild et al. 2021)

3.2 Partikkelien muoto

Partikkelit, jotka muistuttavat muodoltaan täydellistä palloa vierivät muiden pintojen, sekä toistensa suhteen hyvin, mikä parantaa jauheen levittyvyyttä. Satunnaisen muotoiset partikkelit jäävät mikroskooppisella tasolla toisiinsa helposti kiinni ja hankaloittavat jauheen virtausta. (Herzog 2016)

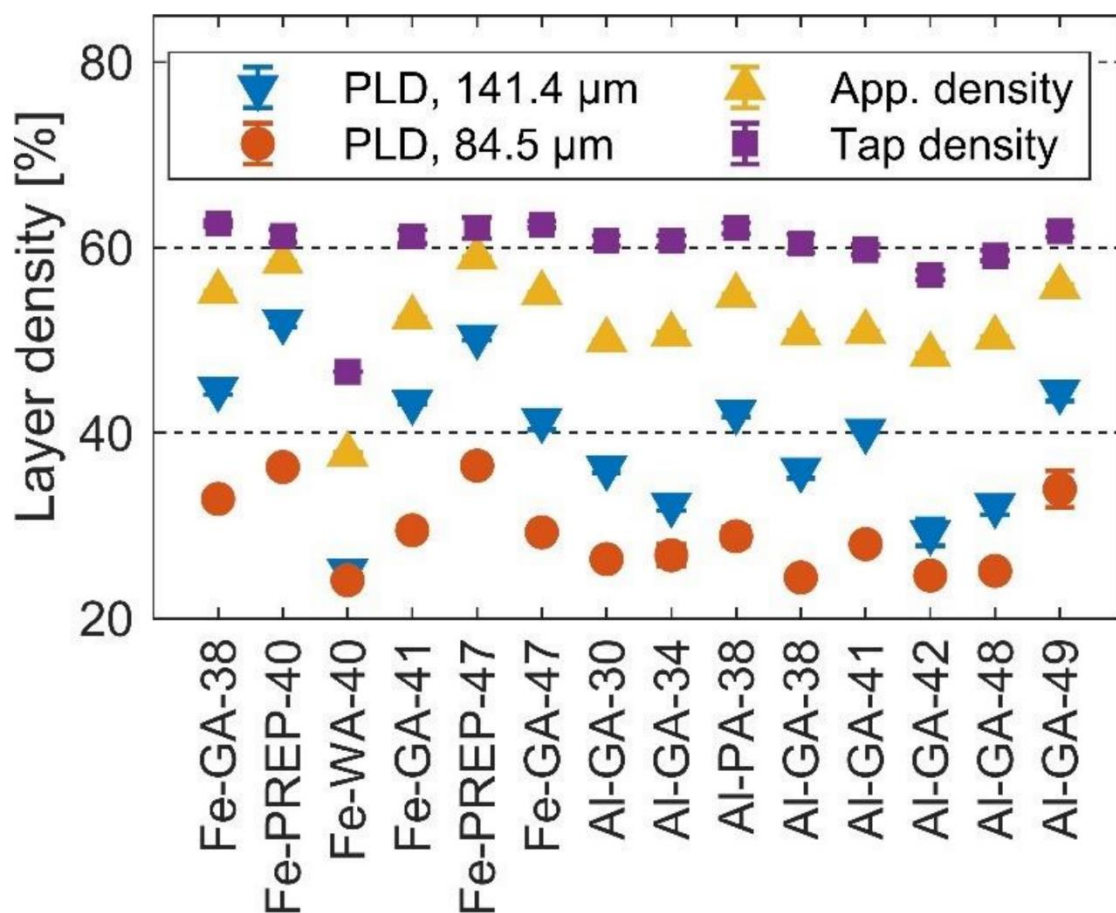
Partikkelien muotoa voidaan mitata partikkelien pyöreytinä tai muotosuhteena. Muotosuhde tarkoittaa partikkelin ohuimman ja paksuimman mitan suhdetta. Täydellisen muotosuhteen omaava kappale tarkoittaa palloa. Partikkelien pyöreys ja muotosuhde korreloivat vahvasti toisiinsa, kuten voidaan nähdä kuvasta Kuva 4. (Haferkamp, et al. 2021)



Kuva 4 Jauhepartikkelien pyöreys ja muotosuhde. (Haferkamp, et al. 2021)

3.3 Jauheen valmistusmenetelmä

Metallijauheen valmistusmenetelmä vaikuttaa suoraan materiaalin partikkelikokojakaumaan ja partikkelien geometriaan. Teollisuudessa yleisimmin käytetyt jauheen valmistusmenetelmät ovat vesi- ja kaasuatomisaatio. Vesiatomisaatiolla valmistettu metallijauhe on yleensä karkeampaa ja epätasaisempaa kuin kaasuatomisaatiolla valmistettu jauhe. Kuvassa Kuva 5 erilaisten metallijauheiden tiheyksien vertailu. Vesiatomisaatiolla valmistetun FeWA-40 jauheen tiheys on huomattavasti muita teräsjaueita pienempi. Kaasuatomisaatiolla valmistettu jauhe on tasaisempaa ja jauhepartikkelit ovat lähempänä täydellisen pallon muotoa. Kaasuatomisaatiolla valmistettua jauhetta pidetään teollisuudessa parempana, mutta prosessiparametreja muuttamalla vesiatomisoidusta jauheesta tulostetuista kappaleista voidaan saada lähes identtiset kaasuatomisoituun jauheeseen verrattuna. (Herzog 2016) (Hoeges 2017)

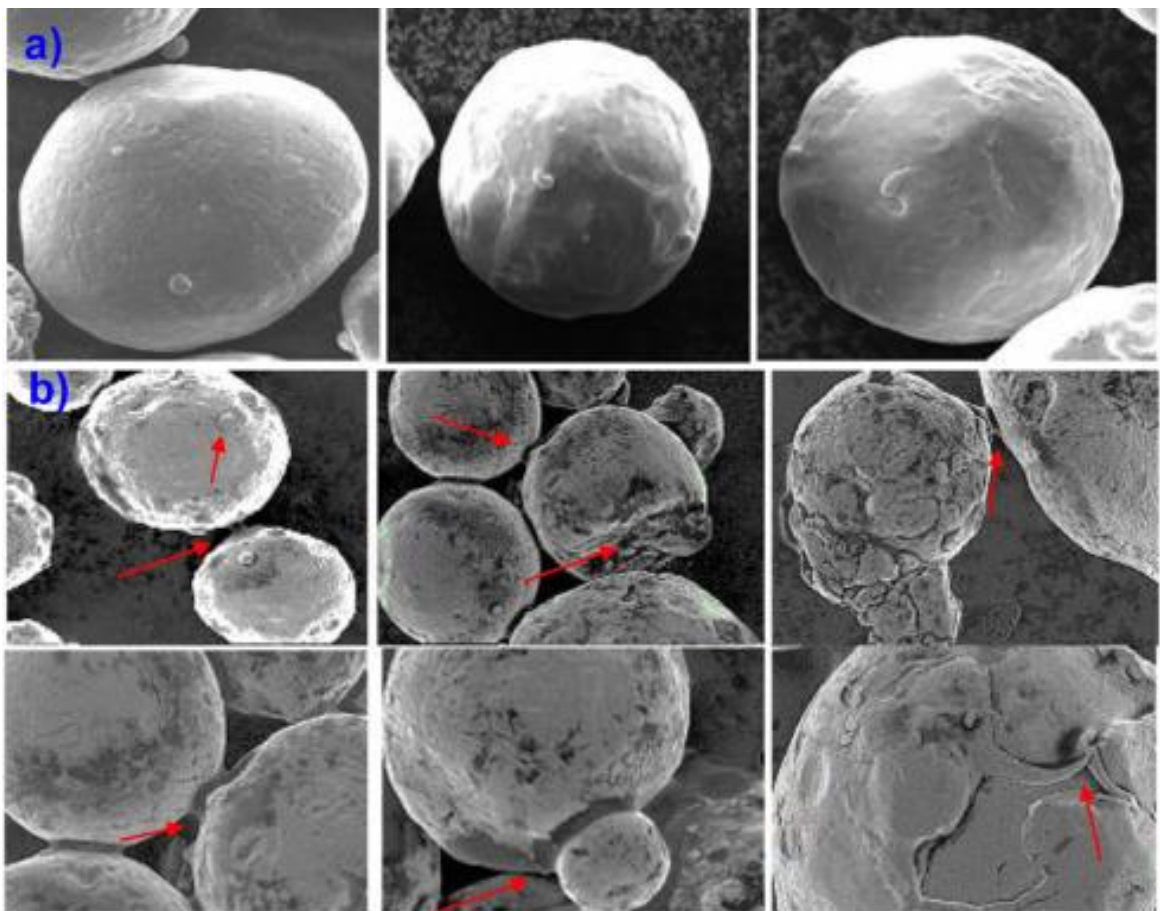


Kuva 5 Metallijauheiden 141.4μm ja 84.5 μm paksut kerrostiheydet, irtotiheys, sekä tärytelty tiheys. (Haferkamp, et al. 2021)

3.4 Jauheen uudelleenkäyttö

Jauhepetisulatuksessa valmiin tulosteen ympärille rakennuskammioon jää paljon ylimääräistä sulamatonta jauhetta, joka voidaan käyttää seuraavien tulosteiden valmistusmateriaalina. Tulosteen ympärille jäänyt materiaali kuitenkin 'ikäntyy' jokaisella kierrätyskerralla. Metallijauheen ikääntymisellä tarkoitetaan jauheen sulatuksen, ja siitä syntyvien roiskeiden vaikutusta ympäröivään jauheeseen. Roiskeiden vaikutus ilmenee jauhepartikkelien kiinnittymisenä toisiinsa sekä pienten roiskeiden kiinnittymisenä sulamattomiin partikkeleihin. Sulatuksen aikana osa partikkeleista saattaa myös hapettua ja lasersäteen lähellä jauhepartikkelit saattavat sulaa toisiinsa kiinni sulamatta kuitenkaan kiinni valmistettavaan kappaleeseen. Uudelleenkäytetyn jauheen hyödyntäminen aiheuttaa enemmän huokoisuutta, sekä karkeampaa pinnanlaatua kuin käyttämätön jauhe. Kuvassa

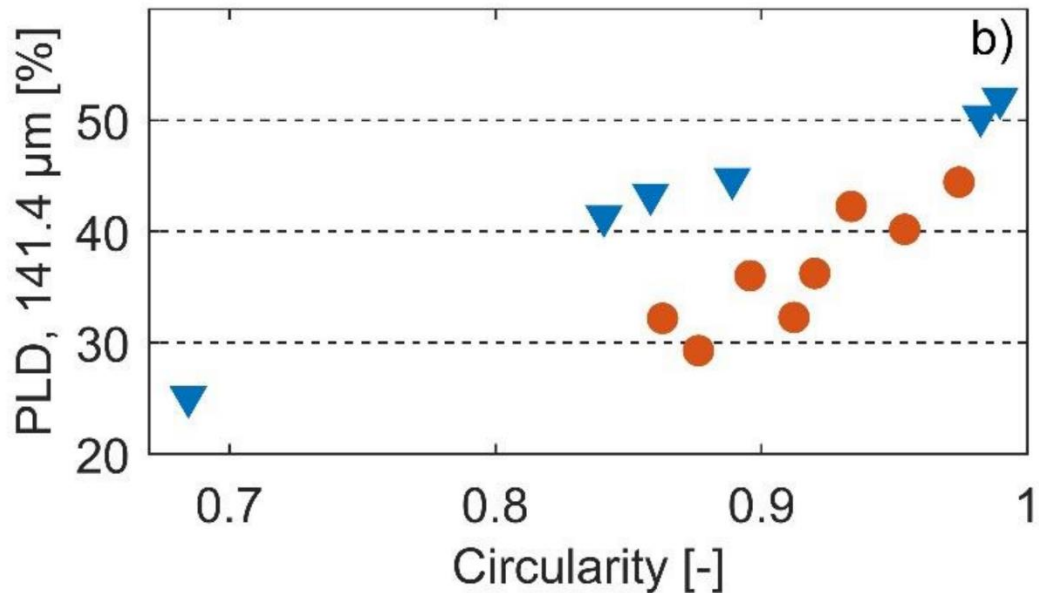
Kuva 6 on elektronimikroskoopilla kuvattu vertailu uuden jauheen a) ja kierrätetyn jauheen b) välillä. Kuvattu materiaali on ruostumatonta terästä 316L. Kuvaan on merkitty kierrätettyjen jauhepartikkelien täysi sulaminen toisiinsa, partikkelien osittainen kiinnittyminen toisiinsa, sekä pienet roiskeet jauhepartikkeleissa. (Heiden 2019) (Gorji 2019) (Santecchia 2020)



Kuva 6 Vertailu uuden jauheen a) ja kierrätetyn jauheen b) välillä. Kuvissa ilmenee jauheen uudelleenkäytöstä johtuvia epämuodostumia. (Gorji 2019)

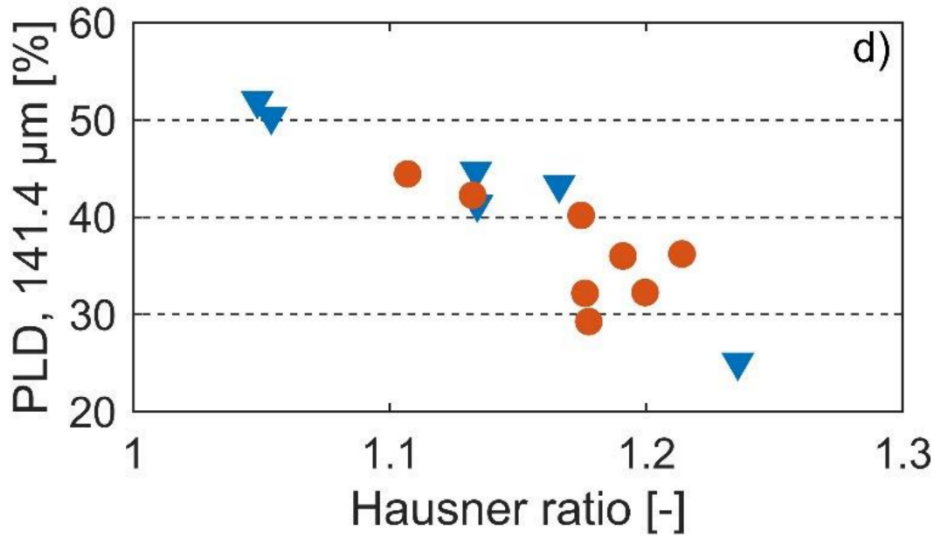
4 VAIKUTUKSET TULOSTEESTA

Jauhekerroksen tiheys vaikuttaa suoraan tulosteeseen, sillä tulosteen lopullinen tiheys riippuu siitä, kuinka paljon kiinteää materiaalia jauhepedillä on. Kiinteän materiaalin määrää jauheen tilavuudesta kuvaa jauhekerroksen tiheys (particle layer density). Jauheen pyöreys korreloi suoraan jauhekerroksen tiheyteen. Kuvassa Kuva 7 ilmenee jauhepartikkelien merkittävä korrelaatio jauhekerroksen tiheyteen. Kun jauhe levittyy hyvin, jauhekerroksen tiheys pysyy korkeana. (Haferkamp, et al. 2021)



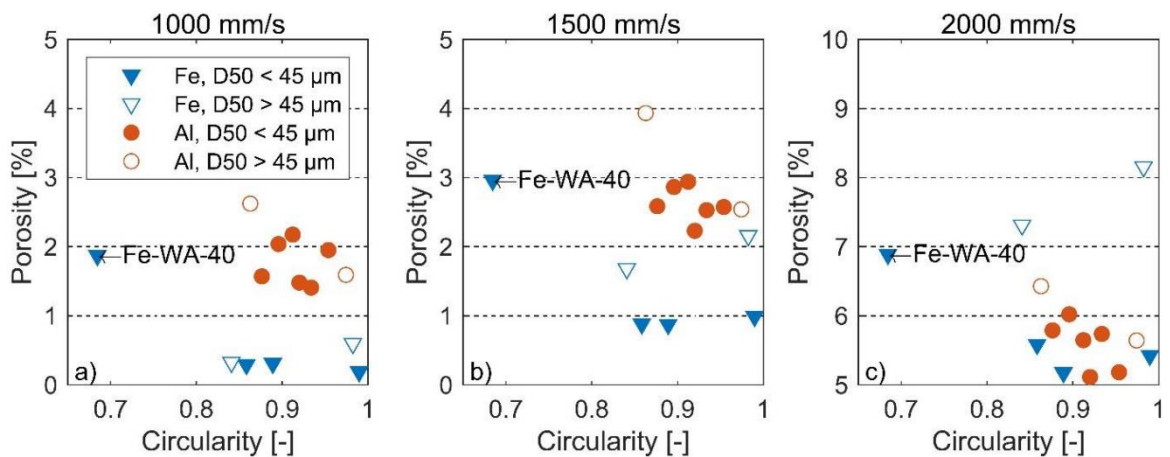
Kuva 7 Testattujen jauheiden pyöreiden korrelaatio jauhekerroksen tiheyteen. Siniset kolmiot vastaavat teräsjaueita ja oranssit ympyrät alumiinijauheita. (Haferkamp, et al. 2021)

Hausnerin suhde korreloi myös jauhekerroksen tiheyteen. Kuvassa Kuva 8 ilmenee osittaista korrelaatiota jauhekerroksen ja korkean jauhekerroksen tiheyden välillä. Materiaalilla on kuitenkin suuri vaikutus siihen, kuinka tarkasti Hausnerin suhde vastaa levittyvyyttä käytännössä. Alumiinijauheilla korrelaatio ei ole yhtä selkeä kuin teräsjaueilla.



Kuva 8 Hausnerin suhteen korrelaatio jauhekerroksen tiheyteen. Siniset kolmiot vastaavat teräsjaueita ja oranssit ympyrät alumiinijauheita. (Haferkamp, et al. 2021)

Jauhepartikkelien pyöreys ei suoraan vaikuttanut lopullisen tulosteen laatuun. Ainoastaan heikoimmin levittyvä vesiatomisaatiolla valmistettu jauhe aiheutti huomattavasti enemmän huokoisuutta tulosteeseen, kuin paremmin levittyvät jauheet. Kuvassa Kuva 9 vertailu jauhepartikkelien pyöreyyden vaikutuksesta tulosteen huokoisuuteen eri sulatusnopeuksilla. Suurilla sulatusnopeuksilla helposti levittyvien ja karkeiden jauheiden ero on kuitenkin pienempi, sillä huokoisuutta alkaa esiintyä paljon kaikilla jauheilla. (Haferkamp, et al. 2021)



Kuva 9 partikkelien pyöreyyden vaikutus tulosteen huokoisuuteen eri sulatusnopeuksilla. (Haferkamp, et al. 2021)

5 YHTEENVETO

Metallijauheen levittyvyys yleisesti on melko uusi tutkimuskohde ja aihetta käsitteleviä tutkimuksia on tehty vähän. Metallijauheiden käyttäytymistä käsittelevät lähteet viittaavat usein keskenään samoihin lähteisiin, mikä myös osoittaa, että aihetta ei vielä ole tutkittu laajasti. Jauheita käsittelevissä tutkimuksissa myös viitataan usein lääketieteessä käytettävien jauhemateriaalien käyttäytymistä tutkiviin kymmeniä vuosia vanhoihin teoksiin. Jauheiden levittyvyyttä on tutkittu aikaisemmin lähinnä lääkejauheiden käsittelyn osalta. Metallijauheiden ja erityisesti metallien lisäävään valmistukseen tarkoitettujen jauheiden käyttäytymistä täytyy siis vielä tutkia.

Metallijauheen levittyvyyteen vaikuttaa jauhepartikkelien muoto ja koko, partikkelikokojakauma, valmistusmenetelmä sekä jauheen uudelleenkäyttö. Partikkelit, joiden muoto on lähimpänä geometristä palloa vierivät toistensa suhteen parhaiten. Vapaasti vierivät partikkelit levittyvät helpommin kuin epämääräiset ja vaihtelevan muotoiset partikkelit.

Eri valmistusmenetelmät tuottavat erilaisia metallijauheita lisäävän valmistuksen tarpeisiin. Valmistusmenetelmän vaikutuksen levittyvyyteen voi kuitenkin sisällyttää jauhepartikkelien muotoon ja kokoon. Eri valmistusmenetelmät tuottavat erilaisia jauhepartikkeleja, mutta ainoastaan valmistusmenetelmä ei suoraan määrittele metallijauheen laatua.

Suuret partikkelit levittyvät pienempiä partikkeleja helpommin. Suurikokoisten partikkelien väliin jää kuitenkin myös enemmän tyhjää tilaa, joka huonontaa materiaalin tiheyttä. 3D tulostuksessa tulosteen lopullinen tiheys halutaan pitää mahdollisimman lähellä materiaalin teoreettista tiheyttä, joten partikkelikokojakauman muuttaminen parempaan levittyvyyteen ei aina paranna lopullisen tulosteen laatua.

Jauheen uudelleenkäyttö aiheuttaa helpoiten havaittavia muutoksia jauhepartikkeleissa. Fyysiset muutokset jauheessa vaikuttavat jauheen levittyvyyteen heikentävästi. Jauheen uudelleenkäyttö aiheuttaa kierrätettyyn jauheeseen myös muutoksia, jotka eivät vaikuta jauheen levittyvyyteen, mutta vaikuttavat myös jauheen sulatettavuuteen. Tästä johtuen

uudelleen käytetyn jauheen levittyvyyden heikentyminen ei välttämättä ole syy lopullisen tuloksen heikentyneeseen laatuun.

Prosessiin vaikuttavia ominaisuuksia on monia ja yksin levittyvyyden vaikutuksen tutkiminen on vaikeaa. Monet jauheiden ominaisuuksista vaikuttavat toisiinsa merkittävästi ja tarkkoja havaintoja jauheen käyttäytymisestä on hankala tutkia. Aiheita jatkotutkimuksille voisivat olla jauheen erilaisten levitysmenetelmien vaikutus jauheen levittyvyyteen ja pakkautuvuuteen, sekä tarkempi tutkimus jauheille määritettävien numeeristen arvojen hyödyntämisestä jauhetypin valinnassa.

LÄHTEET

Beakawi AL-Hashemi, H.,M. and Baghabra Al-Amoudi, O.,S., 2018. A review on the angle of repose of granular materials. *Powder Technology*, 330, pp. 397-417.

Clayton, J., Millington-Smith, D. and Armstrong, B., 2015. The Application of Powder Rheology in Additive Manufacturing. *JOM (1989)*, 67(3), pp. 544-548.

Frazier, W., 2014. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), pp. 1917-1928.

Gorji, N.E., 2019. Recyclability of stainless steel (316 L) powder within the additive manufacturing process. *Materialia*, 8.

Haferkamp, L., Haudenschild, L., Spierings, A., Wegener, K., Riener, K., Ziegelmeier, S. and Leichtfried, G.J., 2021. The Influence of Particle Shape, Powder Flowability, and Powder Layer Density on Part Density in Laser Powder Bed Fusion. *Metals (Basel)*, 11(3), pp. 418.

Hausner, H.H., 1981. Powder characteristics and their effect on powder processing. *Powder Technology*, 30(1), pp. 3-8.

He, X., 2009. Integration of Physical, Chemical, Mechanical, and Biopharmaceutical Properties in Solid Oral Dosage Form Development.

Heiden, M.J., Deibler, L.A., Rodelas, J.M., Koepke, J.R., Tung, D.J., Saiz, D.J. and Jared, B.H., 2019. Evolution of 316L stainless steel feedstock due to laser powder bed fusion process. *Additive manufacturing*, 25, pp. 84-103.

Herzog, D., 2016. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, pp. 371-392.

Hoeges, S., 2017. Additive manufacturing using water atomized steel powders. *Metal Powder Report*, 72(2), pp. 111-117.

Krantz, M., Zhang, H. and Zhu, J., 2009. Characterization of powder flow: Static and dynamic testing. *Powder Technology*, 194(3), pp. 239-245.

Prescott, J., 2000. On powder flowability. *Pharmaceutical Technology*, 24(10), pp. 60-82.

Santecchia, E., 2020. Material Reuse in Laser Powder Bed Fusion: Side Effects of the Laser—Metal Powder Interaction. *Metals*, 10(3), pp. 341.

Spierings, A., 2016. Powder flowability characterisation methodology for powder-bed-based metal additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 1(1), pp. 9-20.

Zhang, J. and Jung, Y., 2018. *Additive Manufacturing*. Saint Louis: Elsevier Science & Technology.