



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**AUSTENIITTISEN RUOSTUMATTOMAN
TERÄKSEN 316 L SOVELTUVUUS 3D-
TULOSTUKSEEN**

Paul Ohlmeier 2584498

KONETEKNIIKAN KANDIDAATTI

Kandidaatintyö

Tammikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Austeniittisen ruostumattoman teräksen 316 L soveltuvuus 3D-tulostukseen

Paul Ohlmeier

Oulun yliopisto, Konetekniikan kandidaatti

Kandidaatintyö 2023, 29 s.

Työn ohjaajat yliopistolla: Olli Nousiainen, Matias Jaskari

Lisäävä valmistus tai tavallisemmin 3D-tulostus on kasvanut yhdeksi valmistustekniikaksi perinteisten valmistusmenetelmien rinnalle. Erityisesti metallisten materiaalien tulostus on kasvattanut suosiotaan viimeisten vuosikymmenien aikana. Ajankohtaista tutkimustietoa eri menetelmistä ja materiaaleista on runsaasti saatavilla, johtuen valmistustavan uutuudesta. Työn tarkoituksena on tutustua metallien 3D-tulostamiseen käytettävien menetelmien toimintaan sekä tulostusmateriaaleihin. Tärkeimpänä tutkimuskohteena on austeniittisen ruostumattoman teräksen 316 L soveltuvuus metallia lisäävien menetelmien tulostusmateriaalina.

Tutkielma on jaettu selkeyden vuoksi osioihin. Ensimmäiset osiot käsittelevät 3D-tulostamisen kehityskaarta sekä valmistustavan tulevaisuutta. Seuraavat osiot esittelevät 3D-tulostamisen periaatteet ja käytetyimmät metallia lisäävät valmistusmenetelmät. Lopuksi tarkastellaan tutkittavaa materiaalia ja sen tarjoamia mahdollisuuksia samalla muihin materiaaleihin verraten.

Asiasanat: materiaalia lisäävä valmistus, 3D-tulostus, metallit

ABSTRACT

Austenitic stainless steel 316 L:s suitability for 3D-printing

Paul Ohlmeier

University of Oulu, Bachelor's thesis of Mechanical engineering

Bachelor's thesis 2023, 29 pp.

Supervisors at the university: Olli Nousiainen, Matias Jaskari

Additive manufacturing or more commonly 3D-printing has grown into a manufacturing technique alongside the traditional manufacturing methods. Especially printing of metallic materials has rapidly grown its popularity over the last decades. Topical research data of different kinds of methods and materials is widely available due to the novelty of the manufacturing process. The purpose of this thesis is to introduce the working principles of various metal 3D-printing methods and printing materials. As the main subject of this thesis is to investigate how suitable austenitic stainless steel 316 L as a printing material is for metal additive manufacturing.

This thesis has been split into sections for the sake of clarity. The first sections discuss the development of 3D-printing and the future of this manufacturing process. The following sections introduce the main principles of 3D-printing and the most used methods of metal additive manufacturing. At the end of this work, we look at the material of interest and showcase the possibilities it has to offer while comparing it to other used materials.

Keywords: additive manufacturing, 3D-printing, metals

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	6
2 Materiaalia lisäävä valmistus	7
2.1 Historiakatsaus	7
2.2 Materiaalia lisäävän valmistamisen edut.....	8
2.3 Mittakaava nyt ja ennuste tulevasta	9
3 Prosessin kulku.....	11
3.1 Menetelmän ja materiaalin valinta	11
3.2 Tulostimen valmistelu	12
3.3 Tulostusprosessi	12
3.4 Kappaleen irrottaminen ja puhdistaminen.....	12
3.5 Jälkikäsittelyt.....	12
4 Menetelmät	13
4.1 Jauhepetisulatus.....	13
4.2 Suorakerrostus	15
4.3 Pursotus	16
4.4 Materiaalin suihkutus	16
4.5 Sideaineen suihkutus	17
4.6 Valokovetusallas	18
4.7 Kerroslaminointi.....	18
5 Austeniittinen ruostumaton teräs 316 L	20
5.1 Materiaalin seostus ja mekaaniset ominaisuudet	20
5.2 Laatuokat 316 L ja 316	21
5.3 Käyttökohteet ja 3D-tulostus.....	22
5.4 Laserjauhepetisulatuksessa käytettävät materiaalit	22
5.5 Tulostusasennon ja tulostussäteen vaikutus teräksen ominaisuuksiin	23
5.6 Tulostetun materiaalin korroosiokäyttäytyminen ja lämpökäsittelyt	24
6 Yhteenveto	26
LÄHDELUETTELO	27

MERKINNÄT JA LYHENTEET

AM	Materiaalia lisäävä valmistus (additive manufacturing)
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (computer-aided design)
DED	Suorakerrostus (directed laser deposition)
FDM	Pursotus (fused deposition modelling)
LMM	Valokovetusallas (lithography-based metal manufacturing)
MBJ	Sideaineen suihkutus (metal binder jetting)
MJ	Materiaalin suihkutus (metal jetting)
MSL	Kerroslaminointi (metal sheet lamination)
PBF	Jauhepehtisulatus (powder bed fusion)
SLM	Laserjauhepehtisulatus (selective laser melting)
WAAM	Suorakerrostus (wire arc additive manufacturing)

1 JOHDANTO

3D-tulostaminen on noussut viime aikoina varsin kuumaksi puheenaiheeksi, kun yhä useampi teollisuuden ala on tullut tietoiseksi menetelmän tarjoamista mahdollisuuksista. Metallien valmistusmenetelmänä menetelmä on suhteellisen uusi eikä ole vielä aivan saavuttanut täyttä potentiaaliaan, mutta kehitys- ja tutkimustyötä tehdään aktiivisesti.

Tässä tutkielmassa tutustutaan aluksi 3D-tulostamisen historiaan, menetelmän kehityskaareen sekä tämänhetkiseen tilanteeseen. Työn tarkoituksena on perehtyä metallien yleisimpiin kaupallisiin 3D-tulostustekniikoihin sekä tarkastella austeniittisen ruostumattoman teräksen 316 L soveltuvuutta kyseisiin tekniikoihin.

2 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS

Ainetta lisäävä valmistus on nimitys valmistusmenetelmille, joissa kolmiulotteisen (three dimensional) eli 3D-kuvauksen pohjalta valmistetaan fyysinen kappale hyödyntämällä materiaalia lisääviä tekniikoita. Menetelmästä käytetään myös nimitystä materiaalia lisäävä valmistus sekä lyhennettä AM (additive manufacturing). Puhekielistä termiä 3D-tulostaminen käytetään kuvaamaan kaikkia tulostamiseen viittaavia prosesseja ja menetelmiä.

Lisäävät valmistusmenetelmät ovat suurimmaksi osaksi ”Near net shape” menetelmiä eli menetelmiä, joissa valmistetun kappaleen muoto on hyvin lähellä lopullista muotoa. Myös kappaleelta vaaditut ominaisuudet saavutetaan yleensä yhden prosessin aikana. Tulostettavat materiaalit ovat useimmiten kestopuoveja, keraameja, komposiitteja ja metalleja. Metallia lisäävässä valmistuksessa raakamateriaali on joko metallia tai välittäjäainetta, joka sisältää metallia. Valmistusprosessin lopputulos on metallinen kappale. Materiaalia lisäävän valmistuksen yleiset periaatteet ja terminologia on esitetty standardissa SFS-EN ISO 52900:2017.

2.1 Historiakatsaus

Materiaalia lisäävä valmistus voidaan katsoa saaneen alkunsa vuonna 1977, kun insinööri Ichiro Endo Canonista keksi nykypäiväisen mustesuihkutulostimen. Vaikka mustesuihkutulostimen käyttökohteet ulottuivatkin vielä toisaalle kuin muovin tai metallin tulostamiseen, muistutti se tulostustavaltaan nykypäiväistä 3D-tulostamista. Erityisesti kaksi tekijää nostattivat mustesuihkutulostimen 3D-tulostamisen edelläkävijäksi. Ensimmäistä kertaa tulostin sisälsi erillisen suuttimen, joka päästi lävitseen halutun määrän mustetta ja jättäen jälkeensä halutun vahvuisen jäljen. Tämän lisäksi suuttimen ja tulostuskelkan yhteistoiminta oli merkittävä askel tekniikan kehittymiselle. Kelkka liikkui X- ja Y-akseleilla, mikä mahdollisti suuttimen liikkumisen tulostettavalla paperin pinnalla, samalla päästään mustetta ainoastaan haluttuihin pisteisiin. (Maxey 2013)

Tutkimukset ja niiden myötä mustetulostus-konseptiin tehdyt muutokset muovasivat tekniikan hyvin nopeasti musteen tulostamisesta materiaalin tulostamiseen. Japanilainen

Hideo Kodama onnistui 1980-luvulla kehittämään automaattisen laitteen, jonka avulla pystyttiin valmistamaan kappaleita kovettamalla ohuita kerroksia hartsia ohjatun ultraviolettivalon avulla. Patentti teknologiasta myönnettiin vuonna 1984 yhdysvaltalaiselle Charles Hullille, joka oli jatkokehittänyt Kodaman keksimää prosessia. Hull kutsui prosessia stereolitografiaksi (SL). Menetelmä mahdollisti kolmiulotteisten kappaleiden tulostamisen tietokonemalleista, mikä helpotti huomattavasti suunnittelijoiden työtä, sillä koekappaleita pystyttiin tuottamaan ilman kalliita ja rakentamista vaativia tuotantomenetelmiä. (Maxey 2013; Gibson et al. 2015 s.63–64)

Seuraavien vuosien aikana 3D-tulostus teknologiaa käytettiin yhä laajamittaisemmin ja monimuotoisemmin, kun uusia käyttökohteita löytyi esimerkiksi lääketieteen ja teollisuuden kasvaneisiin tarpeisiin. Vuonna 2006 markkinoille saapui ensimmäinen SLS (selective laser sintering) -tulostin, jossa metallijauhetta sulatettiin laserin avulla tulostuskelpoiseksi. Keksintö oli hyvinkin merkittävä, sillä se mahdollisti massaräätälöimisen ja 3D-tulostamisen myös tuotantolaitosten käyttöön. (Maxey 2013)

2.2 Materiaalia lisäävän valmistamisen edut

Verrattaessa materiaalia lisäävää valmistusmenetelmää muihin perinteisiin valmistusmenetelmiin huomataan useita erottavia tekijöitä menetelmien välillä. Suunnittelijalle merkittävimpänä on lisääntynyt geometrinen vapaus. Materiaalia lisäävän valmistusmenetelmän avulla voidaan toteuttaa hankaliakin muotoja, joita ei välttämättä saataisi valmistettua materiaalia muovaavilla tai poistavilla menetelmillä. Ominaista on, että materiaalia saadaan sijoitettua haluttuihin kohtiin, jolloin monimutkaisetkin sisäiset kanavat ja muut geometrisesti monimutkaiset sisäiset rakenteet onnistuvat vaivatta.

Geometrisen vapauden myötä AM-menetelmien avulla voidaan valmistaa, joko yksittäisiä kappaleita tai useamman osan osakokonaisuuksia, jolloin kokoonpanoa ei tarvita. Erilliset työkalut tai pidikkeet eivät ole tarpeen sillä työkonetekeekäiken työn, mikä taas näkyy valmistustavan edullisuutena. Prosessi on myös verrattain nopea riippumatta siitä kuinka yksinkertainen tai vaikea kappale on. Koko prosessin aikajänne, mahdolliset jälkikäsittelyt huomioiden, voi vaihdella muutamasta tunnista viikkoon. (Market Prospects 2020; Oulun yliopisto 2020)

2.3 Mittakaava nyt ja ennuste tulevasta

Näkemyks AM-menetelmistä prototyyppien valmistusmenetelmänä on muuttunut viimeisten vuosien aikana kohti kaupallisesti ja teollisesti hyödynnettävää valmistusmenetelmää. Sen katsotaan siis yltäneen samalle tasolle perinteisten valmistustapojen rinnalle. Yleisimmät käytössä olevat metalleja lisäävät valmistusmenetelmät ovat yksivaiheisia. Menetelmistä jauhepetisulatus on teknologisesti kypsä ja hallitseva menetelmä. Suorakerrostustekniikat ovat myös teollisesti hyödynnettävissä. AMPOWER (2020) raportista käy ilmi, että vuoden 2019 kokonaisymyynnistä 85 % oli jauhepetisulatuslaitteita ja 8 % suorakerrostuslaitteita. Jauhepetisulatuslaitteiden osuuden ennustettiin kuitenkin putoavan viiden vuoden sisällä 63 %:iin uusien laitteiden kokonaisymyynnistä. Suorakerrostuslaitteiden myynnin ennustettiin kasvavan 11 %:iin. Kokonaisymyynnille taas arvioitiin vuosittaista kasvua noin 28 % verran tällä ajanjaksolla.

Yksivaiheiset menetelmät ovat vielä tällä hetkellä valtamenetelmiä, mutta monivaiheisten menetelmien suosio on selvässä nousussa. Esimerkiksi monivaiheisista menetelmistä sideaineen suihkutuksen ennustetaan nousevan lähivuosien aikana varteenotettavaksi vaihtoehdoksi yksivaiheisten menetelmien rinnalle. Syynä tähän on menetelmän suuri tulostusnopeus ja sitä myötä saavutetut säästöt kustannuksissa. (Petch 2022; Oulun yliopisto 2020) Myös uudet teknologiat kuten MagnetoJet tai ylääänihiukkaskerrostuminen (supersonic particle deposition) ovat nousemassa markkinoilla teknologian kehittyessä. (Kerns 2020)

Nopeudestaan ja kustannustehokkuudestaan huolimatta AM-prosessit soveltuvat tällä hetkellä vain yhtenäisten tai pienten sarjojen tuottamiseen, eikä niillä ole kovin suurta merkitystä massatuotannolle. Tutkimus- ja kehitystyötä tehdään kuitenkin jatkuvasti, jotta mahdollistettaisiin tulostusmenetelmien soveltuvuus myös suurten sarjojen tuotantoon. Laitteiden parissa tehtävän kehitystyön ansiosta valmistusprosessi on siirtymässä kohti automatisoituneempaa valmistusta, jossa laite tekee tarvittavat jälkikäsittelyt ja materiaalien vaihdot. Seurauksena, että tulostimien tulostusnopeudet tulevat kasvamaan merkittävästi nykyisistä. (Autonomous Manufacturing 2019)

Siinä missä tulostuslaitteistot jatkavat kehityskulkuaan niin tulostusmateriaalit seuraavat perässä. Kehittyneen tulostusteknologian ja entistäkin tarkemman materiaalikuvantamisen avulla osataan seostaa materiaaleja niin, että käyttökohteen asettamat materiaaalilta vaaditut ominaisuudet toteutuvat aiempaa paremmin. Esimerkiksi tulostukseen soveltuvia metallijauheita löytyy jo nyt hyvin laaja valikoima ja tämän valikoiman ennustetaan kasvavan entisestään, kun kehitetään uusia, pelkästään AM-valmistusta varten suunnattuja materiaaleja. Sekä laitteistojen että materiaalien kehityksen edellytyksenä on, että käytetyt suunnitteluohjelmistot ovat ajantasaiset ja kullekin AM-menetelmälle soveltuvat. (Oulun yliopisto 2020)

3 PROSESSIN KULKU

Materiaalia lisäävä valmistus kuuluu digitaalisiin valmistusmenetelmiin. Digitaalinen valmistus on lähestymistapa, jossa hyödynnetään tietokoneavusteista suunnittelua eli CAD (computer-aided design) tuotteen suunnitteluun. Ohjelman avulla suunnitellaan kolmiulotteinen malli halutusta kappaleesta, joka siirretään tulostimeen manuaalisesti sirun tai muistikortin avulla tai vaihtoehtoisesti sähköisesti.

Materiaalia lisäävässä valmistuksessa tehdyt vaiheet noudattavat jotakuinkin samaa kaavaa riippumatta käytetystä tulostustavasta. Prosessissa esiintyvät vaiheet voidaan jakaa neljään osaan eli 3D-suunnitteluun, työn suunnitteluun, tulostukseen ja jälkikäsittelyyn. Pyrkimys on, että valmistettava kappale toteuttaa mahdollisimman hyvin osalle asetetut tekniset ja ulkonäölliset vaatimukset. (Oulun yliopisto 2020)

3.1 Menetelmän ja materiaalin valinta

Vaikka mallintajalla on pitkälti vapaat kädet tuotetta suunnitellessa, tulee hänen kiinnittää huomiota valmistettavan tuotteen kokoon ja tulostusasentoon. Menetelmä, jolla materiaalia lisätään, on riippuvainen tulostettavan osan koosta ja osalta vaadituista ominaisuuksista. Menetelmien tulostuskammiot voivat vaihdella hyvinkin paljon, esimerkiksi jauhepetitekniikan tulostuskammio asettaa kappaleelle kokorajoituksen 280 x 280 x 350 mm. Suorakerrostusmenetellä voidaan taas saavuttaa huomattavasti suurempia kappaleen kokoja. Myös suuntautuneisuus ja rakenteessa esiintyvät huokokset on hyvä pitää mielessä. Valmistetuilla kappaleilla on taipumus Z-akselin suuntaiseen ansiotropiaan, mikä aiheuttaa poikkeavuuksia materiaalin ominaisuuksiin rakennussuunnassa.

Materiaalin valinta ohjautuu käytetyn valmistusmenetelmän sekä kappaleelta vaadittavien ominaisuuksien mukaan. Materiaalin lähtötilalla eli lähtöolomuodolla ja tulostetun osan käyttöolosuhteilla on myös merkittävä vaikutus materiaalin valintaan. (Oulun yliopisto 2020)

3.2 Tulostimen valmistelu

Valmis malli syötetään tulostusparametrien osalta optimoituun 3D-tulostimeen. Tulostimen pohjalle voidaan asettaa erillinen tukilevy pitämään kappaleet paikallaan tulostamisen aikana. Monilla tulostimilla voidaan tulostaa useita eri materiaaleja. Siksi onkin erittäin tärkeää puhdistaa tulostin huolellisesti siirryttäessä materiaalista toiseen tai tulostettaessa samalla materiaalilla uudestaan. (Oulun yliopisto 2020)

3.3 Tulostusprosessi

Valmistusosuus on käytännössä täysin automatisoitu. Tulostin voi kappaletta valmistessaan toimia muutamasta tunnista viikkoon. Tämän ajanjakson aikana tulostusta ylläpidetään lisäämällä materiaalia tai kierrättämällä kerrosten levittämistä jäänyttä ylimääräistä materiaalia takaisin tulostukseen. Prosessia tulee myös pitää aika ajoin silmällä, jotta vältetään laiterikoilta ja materiaalivahingoilta. (Oulun yliopisto 2020)

3.4 Kappaleen irrottaminen ja puhdistaminen

Tulostusjakson jälkeen kappaleet voivat olla tulostusmateriaalin peitossa. Sekä tulostusalusta että kappale puhdistetaan. Tulostusmateriaalin ollessa jauheena huolehditaan siitä, että käyttämätön materiaali saadaan talteen, seuraavaa tulostussykliä varten. Puhdistamisen jälkeen tulostetut kappaleet nostetaan yhdessä tulostusalustan kanssa koneesta kappaleen ja tukirakenteiden irrottamista varten. (Oulun yliopisto 2020)

3.5 Jälkikäsittelyt

Tukirakenteiden irrottamisen jälkeen kappaleille tehdään vielä tarvittavat pinta- ja jälkikäsittelyt. Valmistettu kappale voi vaatia erilaisia jälkikäsittelyjä riippuen käytetystä menetelmästä ja kappaleen käyttötarkoituksesta. Menetelmän ollessa kaksivaiheinen, tulee kappale sintrata vielä uunissa, jotta saataisiin halutun mukainen geometria ja mekaaniset ominaisuudet. Sintraamiseen lisäksi osaa voidaan myös kiillottaa, hioa, pinnoittaa sekä maalata. (Oulun yliopisto 2020)

4 MENETELMÄT

Materiaalia lisäävät prosessit jaotellaan standardin SFS-EN ISO 17296-2:2016 ”Additive manufacturing. General principles. Part 2: Overview of process categories and feedstock”, mukaisesti seitsemään pääryhmään, joista kaikille on sovellutukset metallia lisäävään valmistukseen. AM standardien karkeampi prosessijaottelu jakaa prosessit yksivaiheisiin ja monivaiheisiin menetelmiin.

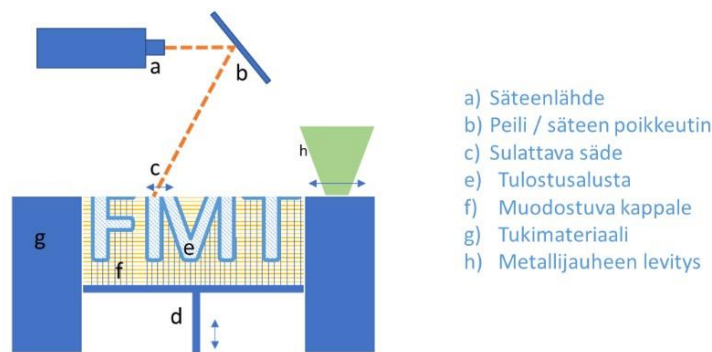
Yleisimmät nykyisin käytössä olevat metallia lisäävät menetelmät ovat yksivaiheisia eli sulatukseen perustuvia menetelmiä. Yksivaiheisissa prosesseissa kappaleen geometria ja materiaaliominaisuudet muodostuvat yhdessä vaiheessa samassa AM-prosessissa. Pyrkimyksenä on vähentää mahdollisten jälkikäsittelyiden ja pintakäsittelyiden tarvetta. Tällaisia menetelmiä ovat jauhepetisulatus, suorakerrostus sekä kerroslaminointi. Näissä menetelmissä materiaali voi esiintyä jauheena, lankana tai levyinä.

Monivaiheisissa prosesseissa kappale saa lopullisen geometrian ja materiaaliominaisuudet useamman vaiheen kautta. Monivaiheisia menetelmiä ovat pursotus, materiaalin suihkutetus, sideaineen suihkutetus sekä valokovetusallas. Näissä menetelmissä materiaali on useimmiten jauheena, joka siirretään kappaleeseen ja sidotaan väliaikaisesti paikalleen välittäjäaineen avulla. Välittäjäaineena käytetään yleensä muovia, joka on joko lankana tai nesteenä. Toinen tapa on sidostaa metalli kappaleen muotoon erillisen sidosaineen avulla. Käytetystä tavasta riippumatta kappaleesta luodaan aluksi esiaste ”Green part”, joka saa mahdollisten välitoimenpiteiden jälkeen lopullisen muodon ja metallisen rakenteensa uunissa korkeassa lämpötilassa sintrautuen. Valmiin kappaleen mitat ovat hieman pienemmät kuin ennen sintrausta olevan esiasteen. (Oulun yliopisto 2020)

4.1 Jauhepetisulatus

Jauhepetisulatus, tai lyhyemmin PBF (powder bed fusion) on vallitseva menetelmä metallia lisäävistä valmistusmenetelmistä. Menetelmä on yksivaiheinen eli kappaleen muoto ja kappaleelta vaaditut ominaisuudet saavutetaan tulostusprosessin aikana. (Oulun yliopisto 2020)

PBF-laitteiston toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1. Prosessi alkaa, kun jauheenlevitin eli kaavain (h), levittää viipalointipaksuutta vastaavan kerroksen metallijauhetta tulostettavalle alustalle (e). Tämän jälkeen energialähteen lähettämä lasersäde tai elektronisuihku (a) fokusoidaan ja suunnataan peilien (b) avulla haluttuun kohtaan jauhepetiä. Metallijauhe sulaa kohdistetun lämpöenergian myötä, jolloin saadaan kiinteä kaksikulotteinen kerros. Tässä vaiheessa prosessi noudattaa samaa kaavaa eli tulostusalustan laskiessa pystysuunnassa alaspäin jauheenlevitin levittää aina uuden kerroksen metallijauhetta edellisen kerroksen päälle, ja sulatus tapahtuu halutuista kohdista. Prosessia jatketaan, kunnes kappale on kokonaan valmis. (Gibson et al. 2015 s.107–109)



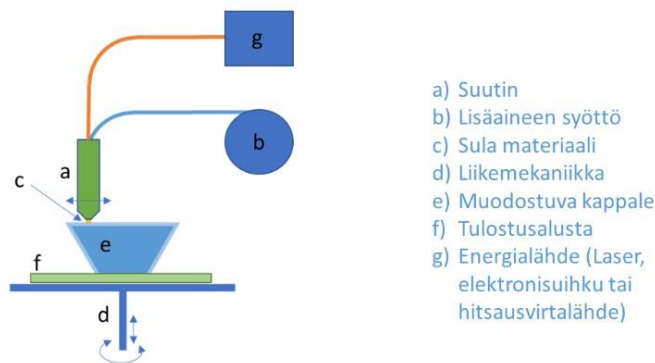
Kuva 1. Jauhepetisulatuksen periaatekuva. (Oulun yliopisto 2020)

Laserjauhepetisulatus on huomattavasti käytetympi menetelmä, sillä metalliin siirtyvä energia on intensiteetiltään pienempää ja prosessi toimii matalammissa lämpötiloissa kuin elektronisuihkuprosessi. Jauhepetisulatuksesta puhuttaessa käytetään myös nimityksiä selective laser melting (SLM) tai laser powder bed fusion (L-PBF), jotka viittaavat laserilla tapahtuvaan jauhepetisulatukseen. Laserjauhepetimenetelmällä valmistetut osat ovat mittatarkkoja ja varsin tiheitä, sillä yli 99 % tiheys on saavutettavissa. Lisäksi muodostuvaan mikrorakenteeseen voidaan vaikuttaa jo valmistusvaiheessa säätämällä jäähtytynopeutta muun muassa laserin nopeuden ja jauhekerroksen paksuuden avulla. (Kauppila 2022; SLM Solutions 2022)

4.2 Suorakerrostus

Suorakerrostus, englanniksi directed energy deposition (DED) tai toiselta nimitykseltään wire-arc additive manufacturing (WAAM), on metallia lisäävistä menetelmistä toiseksi yleisin. Se on pääasiassa metallien 3D-tulostamiseen käytettävä prosessi ja jauhepetisulatuksen tavoin menetelmä on yksivaiheinen. (Oulun yliopisto 2020)

Suorakerrostukselle on ominaista, että tulostettavaa kappaletta valmistetaan sulattamalla samanaikaisesti jo muodostunutta alla olevaa kerrosta sekä syötettävää uutta materiaalia. Alla olevassa kuvassa 2 on esitetty menetelmän periaatekuva. Menetelmässä tulostusmateriaali syötetään suuttimeen (a) joko jauheena tai kiinteänä lankana (b), joka sulatetaan laserin (g) avulla. Myös elektronisuihku, plasma tai sähköinen valokaari voivat toimia lämmönlähteenä. Lämmönlähde muodostaa parametrien mukaan noin 0.25–1 mm paksuisen ja 0.1–0.5 mm syvän sulan (c), johon uusi materiaali syötetään. Toisin sanoen kappaleen karkeahko geometria luodaan lisääneellisellä hitsauksella ja kappale muodostuu päällekkäisistä hitsauspalkoista. Ensimmäiset kerrokset muodostuvat suoraan tulostusalustalle (f), mutta prosessia toistamalla kerroksia muodostuu yhä enemmän ja enemmän, kunnes saadaan valmis ja umpinainen kappale. (Gibson et al. 2015 s.245–248)



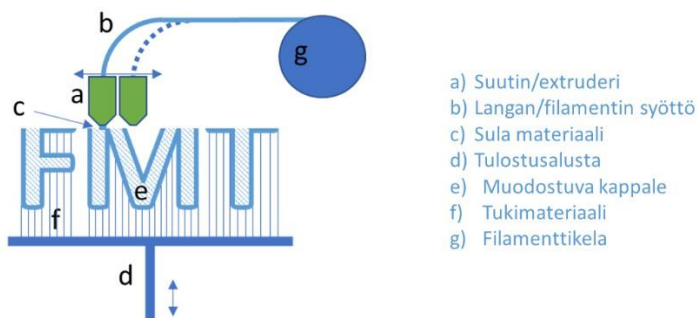
Kuva 2. Suorakerrostuksen periaatekuva. (Oulun yliopisto 2020)

Koska laitteen suutin syöttää materiaalin suoraan haluttuun kohtaan, avaa se mahdollisuuden käyttää enemmän liikeratoja. Laitteelle on myös ominaista, että tulostuspää on kääntyvä. Nämä yhdessä mahdollistavat tulostamisen kaareville sekä jo olemassa oleville pinnoille. Menetelmää voidaankin käyttää uusien tuotteiden valmistamisen lisäksi kappaleiden korjaamiseen tai modifioimiseen. Vaikka

menetelmällä saadaankin tulostettua varsin nopeasti ja metallurgisesti erinomaisia kappaleita, on menetelmän epätarkkuus suurempi verrattuna muihin metallia lisääviin menetelmiin. (Oulun yliopisto 2020)

4.3 Pursotus

Pursotus on tällä hetkellä yleisin AM-menetelmä ja sen toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 3. Pursotettaessa materiaalia tuodaan kelasta (g) tulostuspäähän (a), jossa materiaali kuumennetaan sulamispisteeseen ja pursotetaan suuttimen läpi tulostettavalle alustalle (d). Kappale rakentuu kerroksista, sillä seuraava kerros pursotetaan aina edellisen kerroksen päälle. Suurin osa sovellutuksista on suunnattu muoveille. Menetelmää voidaan kuitenkin hyödyntää myös metallien tulostamiseen, jolloin muovilangan eli filamentin sekaan on sekoitettu metallijauhetta. Tulostamisen aikana muovi palaa pois ja metallijauhe sintrautuu kiinteäksi, mistä johtuen kyseessä on monivaiheinen menetelmä. Englanniksi menetelmästä käytetään nimitystä metal extrusion tai fused deposition modelling (FDM). (Gibson et al. 2015 s.147–148)

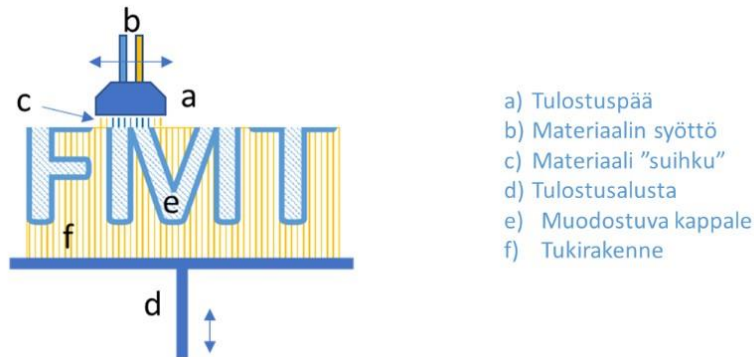


Kuva 3. Pursotuksen periaatekuva. (Oulun yliopisto 2020)

4.4 Materiaalin suihkutus

Materiaalin suihkutus, material jetting (MJ), on pursotuksen tavoin monivaiheinen menetelmä. Sen periaate on esitetty kuvassa 4. Prosessissa laitteen suutin (a) suihkuttaa nestemäistä raaka-ainetta, useimmiten muovia, tulostusalustalle (d), joka sitten kovetetaan lämmön ja/tai valon avulla kemiallisen reaktion aikaansaamiseksi. Tulostettaessa metallisia materiaaleja metallijauhe on sekoitettu välittäjäaineen sekaan,

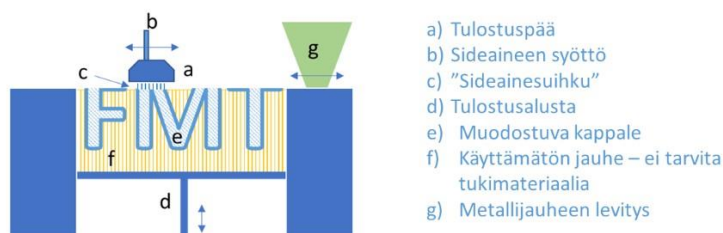
jolloin valmistunut esiaiste edellyttää lämpökäsittelyä, jotta se saisi metallisen rakenteensa. (Gibson et al. 2015 s.175–176)



Kuva 4. Materiaalin suihkutuksen periaatekuva. (Oulun yliopisto 2020)

4.5 Sideaineen suihkutuksen periaatekuva

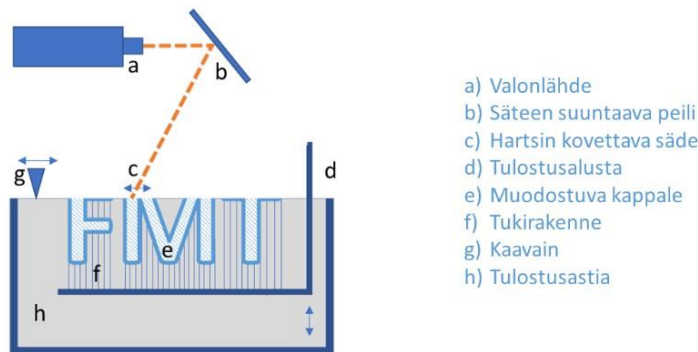
Sideaineen suihkutuksen binder jetting (BJ), on muovien valmistusmenetelmänä melko yleinen. Se on jauhepetimenetelmä, ja muistuttaaakin laitteistoltaan ja toimintatavaltaan pitkälti jauhepetisulatusta. Erona kuitenkin, että sideaineen suihkutuksen on monivaiheinen menetelmä ja metallien valmistusmenetelmänä vielä suhteellisen uusi. Prosessi on kuvattu alla olevassa kuvassa 5. Menetelmän alussa kaavain (g) levittää ohuen kerroksen metallijauhetta tulostusalustalle (d). Tämän jälkeen tulostuspää (a) suihkuttaa nestemäistä sideainetta jauhepedille halutun geometrian mukaisesti lähinnä sitomaan muodostuvaa kappaletta. Kerros kerrokselta kappaleen Green part muodostuu. Esiaiste ei sellaisenaan ole vielä valmis vaan edellyttää lämpökäsittelyä, jossa liima kovettuu tai vaihtoehtoisesti palaa pois ja jauhepartikkelit sintrautuvat yhteen. (Gibson et al. 2015 s.205–206)



Kuva 5. Sideaineen suihkutuksen periaatekuva. (Oulun yliopisto 2020)

4.6 Valokovetusallas

Valokovetusallas on vanhin 3D-tulostusmenetelmä ja ensimmäisenä yleistynyt lisäävä menetelmä erityisesti hartsipohjaisten materiaalien tulostamiseen. Prosessissa nestemäisessä muodossa oleva hartsi kovetetaan kohdennetusti käyttämällä UV-laseria (c), kuva 6 esitetty alla. Metallisia kappaleita tulostettaessa metallijauhe on seostettu hartsin sekaan. Tulosprosessin jälkeen kappale lämpökäsitellään uunissa, jolloin hartsi höyrystyy ja metallijauhe sintrautuu. Varsinaisen kappaleen valmistamiseen tarvitaan siis useampi vaihe. Menetelmälle löytyy useampi englanninkielinen nimitys kuten, vat photopolymerization tai stereolithography. Metallien tulostamiseen voidaan käyttää nimitystä lithography-based metal manufacturing (LMM). (Gibson et al. 2015 s.63–65)

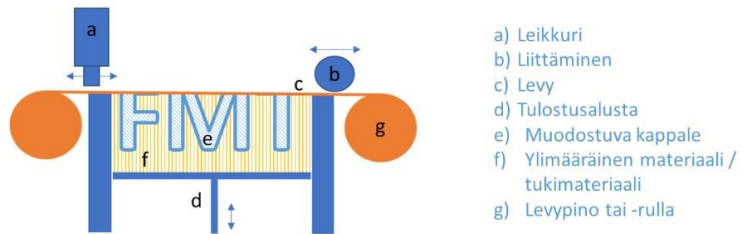


Kuva 6. Valokovetusallas periaatekuva. (Oulun yliopisto 2020)

4.7 Kerroslaminointi

Kerroslaminoinnissa kappale muodostuu ohuista toisiinsa liitetyistä ja muotoon leikatuista levykerroksista. Vaikka menetelmä onkin yksivaiheinen, on se varsin harvinainen metallien tulostusmenetelmä. Prosessissa, periaatekuva 7 alla, metalli tulee joko kelalta metallinauhana tai arkkeina (g), jotka liitetään edelliseen kerrokseen (b) ja leikataan muotoonsa leikkurin avulla (a). Materiaalin leikkaus voidaan tehdä ennen tai jälkeen liittämisen prosessin. Metalliarakit liitetään toisiinsa hitsaamalla esimerkiksi ultraäänihitsaamalla tai laserhitsaamalla ja tulostusmateriaalin leikkaamiseen käytetään

useimmiten laserleikkuria tai jyrsintää. Englanninkielinen nimitys menetelmästä on metal sheet lamination (MSL). (Gibson et al. 2015 s.219–224)



Kuva 7. Kerroslaminointi periaatekuva. (Oulun yliopisto 2020)

5 AUSTENIITTINEN RUOSTUMATON TERÄS 316 L

Austeniittisen eli pintakeskisen kuutiollisen kiderakenteen omaava 316 L on matalahiilinen korroosionkestävä metalliseos, joka tunnetaan sen erinomaisesta kyvystä kestää happoja ja emäksiä. Kyseistä terästä löytyy markkinoilta useilla eri koostumuksilla. Erottelun vuoksi työssä tarkasteltava teräs vastaa eurooppalaista EN 1.4404 luokitusta, ja jonka teräsnumeri on X2CrNiMo17-12-2. (Valmistajat.fi)

5.1 Materiaalin seostus ja mekaaniset ominaisuudet

Teräksestä valmistetut kappaleet omaavat erittäin hyvät mekaaniset ominaisuudet, kuten erinomaisen lämmön- ja korroosionkestävyyden, korkean vetolujuuden sekä hyvän sitkeyden. Näiden lisäksi kappaleet kestävät kulutusta, ovat muovattavissa sekä myös hitsattavissa. Hitsattavuus on lähinnä metalliseoksen matalan hiilipitoisuuden ansiota. Austeniittinen kiderakenne tekee teräksestä ei-magneettisen.

Teräksen 316 L korroosionkestävyys on pitkälti sen seostuksen ansiota. Vähähiiliseen rautaan sekoitetaan kromia (Cr), joka yhdistyessään ilmassa olevan hapen kanssa muodostaa materiaalin pintaan korroosiota estävän kromioksidikalvon. Kalvossa esiintyvät heikot kohdat voivat altistaa pinnan pistekorroosiolle, mutta useimmiten kromioksidikalvo korjaa itse itsensä. Siltä varalta, että näin ei tapahdu, pistekorroosion vaikutusta pyritään ehkäisemään seostamalla teräkseen molybdeenia (Mo). Nikkeliillä (Ni) ei puolestaan ole vastaavanlaista korroosiota ehkäisevää vaikutusta. Sen avulla parannetaan metalliseoksen sitkeyttä ja muokattavuutta teräksen kiderakennetta muuttamalla. Edellä mainittujen lisäksi 316 L sisältää myös mangaania (Mn), fosforia (P), rikkiä (S) ja piitä (Si). Teräkseen voidaan myös seostaa typpiä (N) lujittamaan terästä. AISI 316 L teräksen seosainepitoisuudet on esitetty taulukossa 1 ja mekaanisia ominaisuuksia taulukossa 2. (Materflow)

Taulukko 1. EN 1.4404 mukainen kemiallinen koostumus. (SLM Solutions 2022)

316 L (1.4404)	C	Mn	P	S	(N)	Si	Cr	Ni	Mo
Max.	0.03	2.0	0.045	0.03	0.1	1.0	18.5	13.0	2.5
Min.							16.5	10.0	2.0

Taulukko 2. EN 1.4404 mukaiset mekaaniset ominaisuudet. (Valmistajat.fi)

Tiheys [kg / m ³]	8000
Murtolujuus R _m [N / mm ²]	520–680
Myötölujuus R _{p0,2} [N / mm ²]	220–240
Kimmomoduuli 20 °C: ssa [kN / mm ²]	200
Murtovenymä A ₅ [%]	48
Lämmönjohtokyky 20 °C: ssa [W / mK]	15
Lämpölaajenemiskerroin 20–100 °C	16

5.2 Laatu luokat 316 L ja 316

Seostukseltaan ja ominaisuuksiltaan teräslaadut ovat hyvinkin samankaltaiset. Suurimpana erona näiden kahden ruostumattoman teräksen välillä on hiilipitoisuuden määrä. Lyhenteen L: kirjaimella viitataan teräksen matalaan hiilipitoisuuteen. Siinä missä 316:n hiilipitoisuus on 0,08 p-% niin 316 L:n on vain 0,03 p-%. Mainitut hiilipitoisuudet ovat sallittuja ylärajoja. Alhaisen hiilipitoisuuden ansiosta 316 L soveltuu paremmin hitsattavaksi kuin bulkkiteräs. Bulkkiterästäkin voidaan hitsata, mutta se on alttiimpi

hitsin vaurioitumiselle. Tämä on kuitenkin ongelmana vain, jos metallia on hitsattava useiden minuuttien ajan tai metalli kuumenee 425–815 °C lämpötilaan. Vähähiilisemmällä teräksellä on myös pienempi riski syöpymistä aiheuttavien hiili-kromi-karbidien muodostumiselle.

Molemmat metallit omaavat erinomaisen korroosionkestävyyden, sillä kummatkin laatuluokat sisältävät molybdeenia. 316 L:n korroosionkestävyys on kuitenkin aavistuksen verran parempi, sillä pienempi hiilipitoisuus kestää pidempään kloridipitoisissa ympäristöissä. Vähähiilisemmästä teräksestä valmistetut tuotteet kestävät siis paremmin piste- ja rakokorroosiota niiden käyttöänsä aikana. (Bell 2020; Materflow)

5.3 Käyttökohteet ja 3D-tulostus

Haponkestävä AISI 316 L on yksi käytetyimmistä ruostumattomista teräksistä. Ominaisuuksiensa ja seostuksensa ansiosta teräs soveltuu käytettäväksi lukuisiin käyttökohteisiin. Materiaalin ominaisuudet ovat ihanteelliset esimerkiksi prosessi-, energia- ja meriteollisuuden tarpeisiin. Esimerkiksi korroosion kannalta vaativissa ja suolaisissa meriolosuhteissa, teräs soveltuu erilaisten työkonien ja kaiteiden valmistusmateriaaliksi. Teräksen pitkäikäisyydestä ja hygieenisyydestä johtuen käyttökohteiden kirjo ulottuu myös elintarvike- ja lääketieteelliseen asti. (Valmistajat.fi)

Perinteisten valmistusmenetelmien lisäksi materiaalia hyödynnetään aktiivisesti myös kappaleiden 3D-tulostamiseen. Tulostaminen mahdollistaa saman toiminnallisuuden rakentamisen samalla säilyttäen materiaalin mekaaniset ominaisuudet. Yleisesti jauhemateriaalien staattiset lujuusominaisuudet, kuten murtolujuus ja myötöraja voivat olla paremmat tai vastaavat kuin vastaavan muulla valmistusmenetelmällä valmistetun materiaalin. (Materflow)

5.4 Laserjauhepetisulatuksessa käytettävät materiaalit

Laserjauhepetimenetelmässä käytettävät metallijauheet ovat raekooltaan tyypillisesti 10–45 µm jauheen ollessa terästä ja alumiini- ja titaaniseoksilla 20–65 µm. Yleisimmät käytössä olevat metallijauheet ovat alumiini AlSi10Mg sekä ruostumaton teräs 316 L.

Titaaniseoksia (Ti6Al4V), karkaistavia teräksiä (1.2709), nikkelseoksia (IN718, IN939) ja koboltiseoksia (CoCr28Mo6) voidaan myös käyttää.

Alumiinia tulostettaessa kappaleen tukemiseen tarvitaan huomattavasti vähemmän tukirakenteita kuin AISI 316 L kohdalla. Tulostuskulma on terästä tulostettaessa noin 40–45°, kun taas alumiinilla voidaan tulostaa jopa 30° suuremmalla kulmalla kuin terästä. Lisäksi alumiinin lämmönjohtavuus on parempi mikä näkyy kohtuullisina lämpöjännityksinä. Heikommasta lämmönjohtavuudesta johtuen teräksen lämpöjännitykset ovat suuremmat. Alumiinista valmistetut tuotteet soveltuvat kohteisiin, joissa vaaditaan hyviä mekaanisia ominaisuuksia sekä keveyttä. Haponkestävä ruostumaton teräs taas soveltuu kohteisiin, jossa kappaleelta vaaditaan hyviä mekaanisia ominaisuuksia sekä erinomaista korroosionkestävyyttä varsinkin kloridipitoisissa ympäristöissä. Yleisesti ottaen 316 L teräksen elinkaari on varsin pitkä, minkä vuoksi se on useimmiten kustannustehokkaampi vaihtoehto vaikka verrattava materiaali olisikin ominaisuuksiensa puolesta parempi. (Materflow; Oulun yliopisto 2020)

5.5 Tulostusasennon ja tulostussäteen vaikutus teräksen ominaisuuksiin

Tulostettaessa laserjauhepetisulatusmenetelmällä, kappaleen syklinen lämpökuorma (cyclic thermal load) on osa valmistusprosessia. Tämä lämpökuorma aiheuttaa kappaleessa jäännösjännityksiä (residual stresses), johtuen osien lämpölaajenemisesta (thermal expansions) ja kutistumisesta (contractions). Nämä edellä mainitut jäännösjännitykset altistavat teräksen ei-toivotulle deformaatiolle eli hilavikojen liikkeelle. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miksi deformaatiota tapahtuu laserjauhepetimenetelmällä valmistetuissa osissa. Tutkittavalle materiaalille, AISI 316 L, suoritettiin erilaisia mittauksia, joissa terästä tulostettiin eri asennoissa. Tutkimus osoitti, että tulostusorientaatiolla oli merkittävä vaikutus deformaation esiintyvyyteen. Vaaka-asentoon tulostusalustalle tulostetut kappaleet sisälsivät huomattavasti enemmän deformaatiota, kuin pystyasentoon tulostetut kappaleet. Mitä enemmän kappaleella oli korkeutta, eli mitä enemmän kappale nousi tulostusalustan pinnasta tulostussuuntaa kohti, sitä enemmän kappaleella oli jäykkyyttä (stiffness) tulostussuuntaan nähden vastustaa deformaatiota. Myös kappaleen koolla oli vaikutusta deformaatioiden havaittavuuteen. Pienemmet kappaleet osoittautuivat hankalammaksi tulkita. Deformaatiota sisältäneet

kappaleet pystyttiin valmistamaan orientaatiota muuttamalla, niin että kappaleessa ei enää esiintynyt deformaatiota. (Riikonen and Piili 2020)

Myös tulostussäteen voimakkuudella on havaittu olevan vaikutus tulostettavan teräksen mekaanisiin ominaisuuksiin ja rakenteeseen. Tutkimus Jaskari et al. (2021) suoritettiin tulostamalla AISI 316 L:sta kappaleita käyttämällä eri voimakkuuksisia säteitä (different volume energy densities, VED) (matala, medium ja korkea) ja vertaamalla saatuja tuloksia vastaavaan työstettyyn (wrought) arkkiin. Rakeiden ja vikojen tunnistamiseen hyödynnettiin pyyhkäisyelektroni -ja läpäisyelektronimikroskooppia ja mekaanisten ominaisuuksien tarkastelun apuna kovuusmittauksia. Tarkastelu osoitti, että tulostetun osan mikrorakenne ja tiheys vaihtelivat käytetyn säteen voimakkuuden mukaan. Voimakkuuden kasvaessa sekä erkaumien määrä (substructure coarsening) että tiheys kasvoi. Myötö -ja murtolujuuden arvoissa ei havaittu merkittäviä eroja, mutta venymä (elongation) kasvoi voimakkuuden kasvaessa. Kaikkein voimakkaimmalla säteellä venymä oli lähes sama vastaavaan arkkiin verrattuna. Kaksostumisen havaittiin olevan merkittävä deformaationmekanismi varsinkin keski- ja korkealla säteellä. Kaksosten läheisyyteen muodostui ϵ -martensiittia varsinkin käytettäessä voimakkainta sädettä.

5.6 Tulostetun materiaalin korroosiokäyttäytyminen ja lämpökäsittelyt

Raakamateriaalina 316 L on varsin kestävä korroosiolle. Tulostettaessa materiaalin korroosionkestävyys kuitenkin heikkenee hieman. Tutkimuksessa Sampath et al. (2020) tarkasteltiin laserjauhepetisulatusmenetelmällä valmistetun 316 L teräksen korroosionkestävyyttä ja hitsattavuutta samalla verraten sitä sen työstettyyn/taottuun (wrought) versioon. Tulostetuille pelleteille tehtiin erilliset tarkastelut kiihdytetysti korroosioivissa olosuhteissa useatutkimusmenetelmää apuna käyttäen. Seuraavaksi materiaalin hitsattavuutta tarkasteltiin hitsaamalla tulostetut osat työstettyyn teräkseen ja tekemällä erilaisia kovuusmittauksia hitsiliitokselle korroosioympäristöissä. Tutkimuksessa selvisi, että tulostettujen osien korroosioherkkyys oli alhaisempi kuin työstetyn materiaalin. Mahdollisuus pistekorrosion alulle oli korkeampi tulostetuissa teräksissä, pistesyöpymispotentiaalin ollessa 42 % suurempi kuin työstetyn teräksen. Elektrokemiallinen impedanssispektroskopi -testi osoitti, että varauksen siirtovastus (charge transfer resistance) oli korkeampi tulostetulla teräksellä, kuin työstetyllä teräksellä. Tämä oli seurasta tulostetun teräksen virheettömmästä hilasta ja

hienommasta alirakenteesta. Hitsausmittaukset osoittivat, että tulostettua 316 L voidaan hitsata vastaavaan työstettyyn materiaaliin samalla säilyttäen yli 80 % kovuudestaan.

Tulostetulle kappaleelle voidaan tehdä lämpökäsittelyjä, esimerkiksi jännityksenpoistoherkutuksen muodossa jäännösjännitysten pienentämiseen ja jähmettymisrakenteen palauttamiseksi. Kong et al. (2019) tutkimuksessa selvitettiin lämpökäsittelyn vaikutusta SLM menetelmällä valmistetun kappaleen mikrorakenteeseen, mekaanisiin ominaisuuksiin ja korroosio käyttäytymiseen. Kappale oli valmistettu haponkestävästä ruostumattomasta teräksestä 316 L. Ennen varsinaista tutkimusta kappaleen oli todettu sisältävän alirakeita ja pienenkulmarajoja (teräksillä tyypillisesti 2–5°). Ensimmäisessä lämpökäsittelyssä kappaletta kuumennettiin 1050 °C lämpötilassa, jolloin tuloksena saatiin, että alirakeet ja pienenkulmanrajat muuttuivat hieman ja kappaleen jännitystila ja lujuus laskivat dislokaatiitiheyden laskun myötä. Toisessa lämpökäsittelyssä kappaletta kuumennettiin 1200 °C lämpötilassa, jolloin rakeet olivat kasvaneet huomattavasti ja dislokaatiot kadonneet, mikä taas näkyi lujuuden ja kovuuden jyrkkänä laskuna. Myös materiaalin korroosionkestävyys heikkeni merkittävästi.

6 YHTEENVETO

Metallien 3D-tulostuksen kehityskulku on ollut varsin hämmästyttävää ja nopeaa ottaen huomioon, että ensimmäinen SLS -tulostin saapui markkinoille vuonna 2006. Valmistusmenetelmän suosio on kasvanut räjähdysmäisesti ja menetelmän tulevaisuus näyttää varsin valoisalta. Erilaisia tulostusmenetelmiä löytyy lukuisia ja saatavilla olevien materiaalien ja tulostimien kirjo on hyvin laaja.

Metallia lisäävistä menetelmistä erityisesti yksivaiheiset menetelmät ovat olleet aallonharjalla. Jauhepetisulatus ja suorakerrostus ovat käytetyimmät menetelmät tällä hetkellä. Monivaiheiset menetelmät ovat kuitenkin osoittaneet potentiaalinsa ja esimerkiksi sideaineen suihkutuksen ennustetaan nousevan jauhepetisulatuksen ja suorakerrostuksen rinnalle.

Eurooppalaisen EN 1.4404 luokituksen mukainen austeniittinen ruostumaton teräs 316 L on mekaanisten ominaisuuksiensa ja erinomaisen korroosionkestävyytensä ansiosta luotettava vaihtoehto moniin eri sovellutuksiin. Myös tulostusjauhemateriaalina se on yksi käytetyimpiä. Pientä häviötä mekaanisissa ominaisuuksissa ja korroosionkestävyydessä lukuunottamatta 3D-tulostus ja erityisesti jauhepetisulatus ovat onnistuneesti tuoneet teräksen parhaat puolet esiin.

LÄHDELUETTELO

SFS-EN ISO 52900, 2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. Suomen standardoimisliitto SFS: 47 + 29 s.

Maxey, R., 2013. Infographic: The History of 3D Printing [verkkodokumentti]. Engineering.com. Saatavissa: <https://www.engineering.com/story/infographic-the-history-of-3d-printing> [viitattu 26.11.2022].

Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B., 2015. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. New York: Springer, 498 s. ISBN 978-1-4939-2112-6

Market Prospects, 2020. Additive Manufacturing in the Future and Areas of Application [verkkodokumentti]. Market Prospects. Saatavissa: <https://www.market-prospects.com/articles/additive-manufacturing-in-the-future> [viitattu 27.11.2022].

“Materiaalia lisäävä valmistus (3D-tulostus)”. Kurssin opintomateriaalit sl-22. Teknillinen tiedekunta. Oulun yliopisto.

AMPOWER REPORT, 2020. Metal Additive Manufacturing [verkkodokumentti]. Hamburg: AMPOWER GmbH & Co. KG. Saatavissa: <https://additive-manufacturing-report.com/wp-content/uploads/2020/05/AMPOWER-Report-2020-management-summary.pdf> [viitattu 28.11.2022]. 4-5 s

Petch, M., 2022. 2022 Trends in 3D Printing, Forecasts from Additive Manufacturing Experts and Leaders [verkkodokumentti]. 3D Printing Industry. Saatavissa: <https://3dprintingindustry.com/news/2022-trends-in-3d-printing-forecasts-from-additive-manufacturing-experts-and-leaders-202426/> [viitattu 30.11.2022].

Kerns, J., 2020. The Future of Metal Additive Manufacturing and 3D Printing [verkkodokumentti]. Control Automation. Saatavissa: <https://control.com/technical-articles/The-Future-of-Metal-Additive-Manufacturing-and-3D-Printing/> [viitattu 30.11.2022].

Autonomous Manufacturing, 2019. 10 Predictions on the Future of 3D Printing [Expert Roundup] [verkkodokumentti]. Autonomous Manufacturing. Saatavissa: <https://amfg.ai/2019/08/21/10-predictions-on-the-future-of-3d-printing-expert-roundup/> [viitattu 30.11.2022].

SFS-EN ISO 17296-2, 2016. Additive manufacturing. General principles. Part 2: Overview of process categories and feedstock. Suomen standardoimisliitto SFS: 14 s.

Kauppila, I., 2022. Selective Laser Melting (SLM 3D Printing) – The Ultimate Guide [verkkodokumentti]. All3DP. Saatavissa: <https://all3dp.com/1/selective-laser-melting-guide/> [viitattu 02.12.2022].

SLM Solutions, 2022. SLM Metal Powder & Material Parameters [verkkodokumentti]. SLM Solutions. Saatavissa: <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/powders/> [viitattu 03.12.2022].

Valmistajat.fi. Haponkestävä teräs EN - 1.4404 (ASTM - 316L) [verkkodokumentti]. Valmistajat.fi. Saatavissa: <https://valmistajat.fi/materiaalit/en-1-4404> [viitattu 17.12.2022].

Materflow. 316L Ruostumaton teräs (1.4404) [verkkodokumentti]. Materflow. Saatavissa: <https://www.materflow.com/316l-ruostumaton-teras-1-4404/> [viitattu 17.12.2022]

SLM Solutions, 2022. 316L ASTM276 / DIN EN 10088 / 1.4404 Material Data Sheet [verkkodokumentti]. SLM Solutions Group AG. Saatavissa: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/Content/Powder/MDS/nw/MDS_316L_2022-10_EN.pdf [viitattu 03.12.2022].

Bell, T., 2020. Type 316 and 316 L Stainless Steels [verkkodokumentti]. ThoughtCo. Saatavissa: <https://www.thoughtco.com/type-316-and-316l-stainless-steel-2340262> [viitattu 08.12.2022].

Riikonen, N. and Piili, H., 2020. Characterization of part deformations in laser powder bed fusion of stainless steel 316L. In: Procedia CIRP. Elsevier B.V., 161–166.

Jaskari, M., Ghosh, S., Miettunen, I., Karjalainen, P. and Järvenpää, A., 2021. Tensile Properties and Deformation of AISI 316L Additively Manufactured with Various Energy Densities. *Materials*, 14 (19), 5809.

Sampath, V. K., Silori, P., Paradkar, P., Niazorau, S., Sharstniou, A., Hasib, A., Villalobos, S. and Azeredo, B., 2022. 3d printing of stainless steel 316L and its weldability for corrosive environments. *Materials Science and Engineering A*, 833.

Kong, D., Dong, C., Ni, X., Zhang, L., Yao, J., Man, C., Cheng, X., Xiao, K. and Li, X., 2019. Mechanical properties and corrosion behavior of selective laser melted 316L stainless steel after different heat treatment processes. *Journal of Materials Science and Technology*, 35 (7), s. 1499–1507.