

Elli Haikio

METALLIEN 3D-TULOSTUKSEN NYKYTILANNE JA TULEVAISUUDENNÄKYMÄT

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Ilari Laine
Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Elli Haikio: Metallien 3D-tulostuksen nykytilanne ja tulevaisuudennäkymät
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma, Konetekniikka
Huhtikuu 2023

Metallien 3D-tulostus on ainetta lisäävä valmistusmenetelmä, jossa metallista raaka-ainetta liitetään kerroksittain yhteen ulkoisen lämmönlähteen tai sintrauksen avulla. Metallinen raaka-aine on usein metallijauhetta tai -lankaa. Tässä työssä tutkitaan kirjallisuuden avulla, millainen nykytilanne ja millaiset tulevaisuudennäkymät metallien 3D-tulostuksella on. Työn tavoitteena on perehtyä metallien 3D-tulostukseen teollisuudessa, metallisten 3D-tulostettavien osien suunnitteluun ja metallien 3D-tulostukseen tulevaisuudessa.

Tällä hetkellä metallien 3D-tulostuksessa kolme yleisintä tulostustekniikkaa ovat jauhepetisulatus, suorakerrostus ja sideaineen suihkutus. Jokaisessa tulostustekniikassa voidaan käyttää raaka-aineena metallijauhetta, jota voidaan valmistaa atomisointimenetelmällä. Atomisointimenetelmässä sulasta metallista muodostetaan ympyrämäisiä partikkeleja. Metallien 3D-tulostuksessa voidaan hyödyntää useita eri metalleja ja metalliseoksia, mutta niitä on saatavilla vielä rajoitetusti. Uusien materiaalien kehittäminen tulostusta varten on hidasta ja kallista. Tällä hetkellä metallien 3D-tulostus soveltuu matalavolyymiseen tuotantoon, koska 3D-tulostus on vielä suhteellisen kallis ja hidas menetelmä massatuotannon toteuttamiseen.

3D-tulostettavan osan suunnittelussa tulee huomioida prosessiparametrit ja geometriset ominaisuudet, jotta osan valmistusprosessista saadaan mahdollisimman sujuva. 3D-tulostettava osa täytyy usein suunnitella uudelleen 3D-tulostusta varten, jotta materiaalin käyttö ja valmistusaika saadaan optimoitua. Lisäksi 3D-tulostus mahdollistaa vapaamman suunnittelun, jolloin osien suunnittelussa voidaan hyödyntää topologian optimointia. Topologian optimoinnilla saadaan parannettua osan suorituskykyä samalla, kun osan rakenne suunnitellaan kevyemmäksi. Tällä voidaan vaikuttaa myös energiankulutukseen osan käyttökohteessa.

Tulevaisuudessa metallisia 3D-tulostettuja osia voidaan soveltaa monipuolisesti eri teollisuuden aloilla. 3D-tulostuksen avulla kokoonpanoissa voidaan vähentää osien lukumäärää. Lisäksi eri materiaalien käyttöä ja rakenteiden tiheyksiä voidaan vaihdella osan eri kohdissa käyttökohteen tarpeen mukaisesti. Osiin voidaan tehdä myös sisäisiä jäähdytyskanavia ja lämpöä poistavia rakenteita, jotka parantavat osan suorituskykyä. Lisäksi 3D-tulostuksella voidaan korjata ja kunnostaa osia pidentäen niiden käyttöikä. Tulevaisuudessa 3D-tulostuksen uskotaan olevan keskeinen osa teollisuutta 4.0 eli teollisuuden uutta vallankumousta, jossa osia voidaan valmistaa energiatehokkaasti ja joustavasti tarpeen mukaan. Lisäksi 3D-tulostuksen avulla voidaan saavuttaa monia kestäväen kehityksen kriteerejä.

Tämän kirjallisuustutkimuksen perusteella voidaan päätellä, että eri teollisuusalojen kiinnostus metallien 3D-tulostusta kohtaan on kasvussa. Metallien 3D-tulostuksella on jo paljon potentiaalisia tulevaisuudennäkymiä, joita voidaan soveltaa myös nykypäivän teollisuudessa pienemmässä tuotantovolyymissä.

Avainsanat: 3D-tulostus, ainetta lisäävä valmistus, topologian optimointi, teollisuus 4.0

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Elli Haikio: The current state and future prospects of metal 3D printing
Bachelor's Thesis
Tampere University
Bachelor's Degree Programme in Mechanical Engineering
April 2023

3D printing of metals, also known as metal additive manufacturing, is a process to manufacture part layer by layer with external energy source or sintering. In metal additive manufacturing, feedstock material is usually metal powder. This thesis explains the current state and future prospects of metal 3D printing. The metal 3D printing in industry, design for the 3D printing and the future prospects of metal 3D printing is studied in this paper.

In the metal additive manufacturing, there are three main printing processes: powder bed fusion, directed energy deposition and binder jetting. Metal powder can be used as feedstock material in all these processes. The metal powder can be produced by atomization. In atomization, molten metal is separated into spherical particles. Nowadays, the material selections are limited for metal additive manufacturing, and developing new materials are time consuming and expensive. Currently, 3D printing of metals is used in low-volume production because 3D printing is relatively expensive and slow for mass production.

In the future, metal additive manufacturing can be used in many industrial applications. The metal 3D printing can be used to consolidate parts. In addition, it can be used to integrate multiple materials or change the density of the structure gradually. Also, conformal cooling channels can be added inside the part to improve the functionality. 3D printing can also be used to repair parts. In the future, metal additive manufacturing is part of the industry 4.0 and the sustainable industry.

According to this thesis, metal additive manufacturing is increasing in the industry. Furthermore, there are potential future prospects in metal additive manufacturing which can be applied to the industry nowadays.

Keywords: 3D printing, Metal Additive Manufacturing, topology optimization, industry 4.0

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. METALLIEN 3D-TULOSTUS TEOLLISUUDESSA.....	3
2.1 Tulostustekniikat	3
2.1.1 Jauhepetisulatus	3
2.1.2 Suorakerrostus	4
2.1.3 Sideaineen suihkutus.....	5
2.2 Materiaalit	6
2.2.1 Metallijauheet.....	7
2.2.2 Alumiinit	8
2.2.3 Teräkset.....	8
2.3 Tuotanto.....	9
3. METALLISEN 3D-TULOSTETTAVAN OSAN SUUNNITTELU	12
3.1 Suunnitteluperiaatteet	12
3.2 Tukirakenteet ja tulostusorientaatio.....	14
3.3 Topologian optimointi	15
3.4 Jälkityöstö ja lämpökäsittelyt	16
4. METALLIEN 3D-TULOSTUS TULEVAISUUDESSA	18
4.1 Osat tulevaisuudessa.....	18
4.2 Massatuotanto	20
4.3 Kestävä kehitys.....	21
4.4 Teollisuus 4.0.....	21
4.5 Esimerkkikomponentti	23
5. YHTEENVETO.....	24
LÄHTEET	26
LIITE A:.....	29

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. PBF-laitteisto (Armstrong et al. 2022).</i>	4
<i>Kuva 2. DED-laitteisto (a) ja DED-suutin (b) (Armstrong et al. 2022).</i>	5
<i>Kuva 3. BJ-laitteisto (a) ja BJ-tulostuspää (b) (Armstrong et al. 2022).</i>	6
<i>Kuva 4. Osan monimutkaisuuden vaikutus hintaan 3D-tulostuksessa ja perinteisissä valmistusmenetelmissä (Duda & Raghavan 2018).</i>	10
<i>Kuva 5. Kuvaaja metallien ja polymeerien 3D-tulostuksen maailmanlaajuisista markkinoista (Toyserkani et al. 2021).</i>	11
<i>Kuva 6. Ulokkeen kulman asteluvun vaikutus pinnanlaatuun (Bikas et al. 2019).</i>	13
<i>Kuva 7. Puun muotoinen tukirakenne (Liu et al. 2018).</i>	14
<i>Kuva 8. Tukirakenteita tarvitseva geometria (vasemmalla) ja itseään tukeva geometria (oikealla) (Zhu et al. 2021).</i>	15
<i>Kuva 9. Tulostusorientaation vaikutus tukirakenteiden määrään (Zhang et al. 2022).</i>	15
<i>Kuva 10. Osakokoonpanon suunnittelu yhdeksi komponentiksi (Toyserkani et al. 2021, s. 47).</i>	19
<i>Kuva 11. Erilaisia materiaalimuutoksia (kuva muokattu lähteestä (Ghanavati & Naffakh-Moosavy 2021).</i>	19
<i>Kuva 12. Alkuperäinen osa (oranssi), 3D-tulostukseen optimoitu osa (vihreä) ja topologisesti optimoitu osa (sininen) (Etteplan AM swing piece pilot – Final report 2019).</i>	23

1. JOHDANTO

3D-tulostus on ainetta lisäävä valmistusmenetelmä, jossa osa valmistetaan 3D-mallin pohjalta lisäämällä materiaalia kerroksittain. Metallien 3D-tulostuksessa raaka-aineena käytetään pääosin metallijauhetta tai -lankaa, joka liitetään yhteen ulkoisen energialähteen tai sintrauksen avulla.

Metallien 3D-tulostus on nopea ja kustannustehokas tapa valmistaa kustomoituja ja geometrialtaan monimutkaisia osia matalavolyymisessa tuotannossa. Monet eri teollisuuden alat, kuten auto- ja ilmailuteollisuus, ovatkin kiinnostuneita prototyyppien ja varaosien valmistamisesta 3D-tulostuksen avulla (Vafadar et al. 2021). Lisäksi teollisuudessa ollaan kiinnostuneita 3D-tulostuksen mahdollisuudesta valmistaa monimutkaisia geometrioita. 3D-tulostuksessa halutut geometriat saadaan valmistettua jo tulostusprosessissa, eivätkä geometrioiden monimutkaisuus vaikuta osan valmistuskustannuksiin. Perinteisissä valmistusmenetelmissä, kuten koneistuksessa, monimutkaisten geometrioiden valmistus on haastavaa ja kallista. Lisäksi perinteisissä valmistusmenetelmissä osan geometria valmistetaan poistamalla materiaalia, minkä takia hukkamateriaalia syntyy paljon ja materiaalikustannukset voivat olla korkeat. 3D-tulostuksen avulla materiaalia voidaan säästää jopa 40 % perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna (Powell et al. 2020). 3D-tulostus tarjoaa yrityksille taloudellisen ja ekologisen tavan valmistaa osia.

3D-tulostuksella voidaan toteuttaa monimutkaisia ja käyttökohteeseen optimoituja geometrioita. Metallien 3D-tulostus mahdollistaa useiden osien yhdistämisen, jolloin osakoonpano voidaan tulostaa yhdeksi isoksi osakokonaisuudeksi. Lisäksi osan materiaaleja tai rakennetta voidaan muuttaa gradienttimaisesti, jotta osan funktionaalisuutta voidaan lisätä halutulla tavalla. Osan rakennetta voidaan muuttaa myös gradienttimaisesti huokoiseksi tai vaihtaa rakenne verkkorakenteeksi, jolloin osan tiheyttä eri kohdissa voidaan muuttaa. Lisäksi osaan voidaan tehdä erilaisia rakenteita, kuten jäähdytiskanavia tai lämpöä johtavia rakenteita, jotka parantavat suorituskykyä. (Toyserkani et al. 2021, s. 47–48)

Suunnittelulla on tärkeä tehtävä materiaalin tehokkaassa käytössä ja tulostuksen onnistumisessa. Suunnittelussa pitää esimerkiksi huomioida tulostuksen kannalta ideaaliset geometriat, jotta voidaan välttää tulosteen epämuodostumat. Lisäksi suunnittelulla voidaan vaikuttaa tukirakenteiden määrään, tulostusaikaan ja jälkiprosessien määrään.

Koska 3D-tulostus mahdollistaa vapaamman suunnittelun, suunnittelussa voidaan hyödyntää topologian optimointia. Topologian optimoinnissa osan rakenne suunnitellaan uudelleen, jotta osasta saadaan mahdollisimman kevyt ja suorituskykyinen. Onnistuneella suunnittelulla voidaan vaikuttaa valmistuskustannuksiin ja tuotannon tehokkuuteen.

Vaikka 3D-tulostus on vielä kehitysvaiheessa oleva valmistusmenetelmä, sillä on jo paljon potentiaalisia tulevaisuudennäkymiä ja 3D-tulostuksen uskotaan olevan merkittävä osa tulevaisuuden tuotantoa sekä teollisuuden seuraavaa vallankumousta. Tulevaisuudessa 3D-tulostus on osana joustavaa ja älykästä tuotantoa, jossa voidaan valmistaa korkeasti kustomoituja osia tarpeen mukaan (Moshiri et al. 2020).

3D-tulostuksesta on tehty viime vuosina paljon tutkimuksia liittyen muun muassa tulostusteknologioihin, osan suunnitteluun, topologian optimoinnin hyödyntämiseen ja teollisuus 4.0:aan. Samalla metallien 3D-tulostus on alkanut kiinnostaa myös yrityksiä potentiaalisena valmistusmenetelmänä. Tämän takia on tärkeää selvittää, mikä on metallien 3D-tulostuksen nykytilanne ja millaisia tulevaisuudennäkymiä sillä on.

Tässä kirjallisuuskatsauksessa syvennyttään metallien 3D-tulostuksen teollisuuden nykytilanteeseen, kuten yleisimpiin tulostustekniikoihin, materiaalivalikoimiin ja tuotantoon. Tämän jälkeen käydään läpi yleisimpiä suunnitteluperiaatteita ja tukirakenteita, jotka varmistavat materiaalin tehokkaan käytön ja tulostusprosessin onnistumisen. Lopuksi kerrotaan mahdollisista tulevaisuuden komponenteista ja 3D-tulostuksesta tulevaisuuden tuotannossa. Lisäksi esimerkkikomponentin avulla havainnollistetaan, miten komponentin massaa ja valmistuskustannuksia saadaan vähennettyä topologian optimoinnilla. Tämä kandidaatintyö on tehty Sandvik Mining and Construction Oy:n toimeksiantona.

2. METALLIEN 3D-TULOSTUS TEOLLISUUDESSA

Teollisuudessa ollaan kiinnostuneita 3D-tulostuksen tuomista mahdollisuuksista, koska sillä voidaan valmistaa nopeasti ja suhteellisen edullisesti prototyyppisiä ja varaosia. Lisäksi 3D-tulostusta voidaan käyttää osien korjaamiseen. Prototyyppien valmistuksessa tulostusprosessissa ei tarvitse käyttää muotteja tai ainetta poistavia työkaluja. Tämän seurauksena toimitusaikaa voidaan lyhentää ja valmistuskustannukset ovat pienemmät. Prototyyppien lisäksi 3D-tulostusta voidaan käyttää esimerkiksi varaosien valmistamiseen sekä osien korjaamiseen ja nopeaan kunnostamiseen. Kunnostamisen avulla voidaan kasvattaa osan käyttöikä ja säästää uuden osan hankintakustannuksissa. (Toyserkani et al. 2021, s.47–48)

3D-tulostus nähdään potentiaalisena valmistusmenetelmänä myös suurempivolyymisessä tuotannossa sen hyötyjen, kuten vapaamman suunnittelun ja taloudellisuuden, takia. Metallien 3D-tulostukseen on alettu kehittää myös halvempia metalliseoksia, kuten alumiini- ja teräseoksia, jotta 3D-tulostuksen käyttöä voidaan laajentaa teollisuudessa.

2.1 Tulostustekniikat

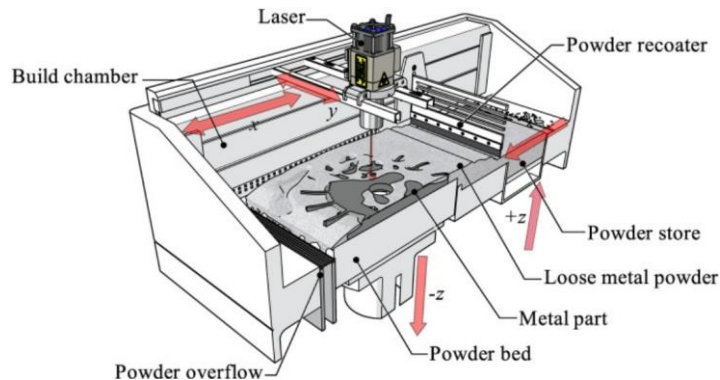
Metallin 3D-tulostus perustuu laserilla tai elektronisuihkun avulla tapahtuvaan metallisen materiaalin sulattamiseen kerroksittain. Metallia voidaan tulostaa sulattamalla metallilankaa, tuomalla metallijauhetta tai -lankaa laseriin, tai sulattamalla metallijauhetta kerroksittain laserin avulla. (Shrinivas Mahale et al. 2022)

Metallien yleisimmät tulostustekniikat ovat jauhepetisulatus (engl. Powder Bed Fusion, PBF), suorakerrostus (engl. Directed Energy Deposition, DED) ja sideaineen suihkutus (engl. Binder Jetting, BJ). Metallien ainetta lisäävistä menetelmistä PBF on yleisin, jonka osuus on 54 %. Seuraavaksi yleisimmät menetelmät ovat DED ja BJ, joiden molempien osuudet ovat 16 % metallien ainetta lisäävistä menetelmistä. (Vafadar et al. 2021)

2.1.1 Jauhepetisulatus

Jauhepetisulatuksessa eli PBF-menetelmässä (kuva 1) tulostusalustalle levitetystä metallijauheesta sulatetaan haluttu alue laserin tai elektronisuihkun avulla. Aluksi tulostusalueelle levitetään ohut metallijauhekerros, joka on paksuudeltaan 20–200 µm. Tämän

jälkeen säde sulattaa tai sintraa jauheen yhteen 3D-mallin mukaisesti. Samalla tulostetaan myös tukirakenteet, jotka tukevat komponentin muotoja. Kun yksi kerros on saatu tulostettua, tulostusalusta liikkuu pystysuunnassa alaspäin, ja voidaan levittää uusi sulattettava jauhekerros. Kun komponentti on valmis, ylimääräinen jauhe poistetaan manuaalisesti ja jauhe kierrätetään seuraavaa tulostusta varten. (Armstrong et al. 2022)



Kuva 1. PBF-laitteisto (Armstrong et al. 2022).

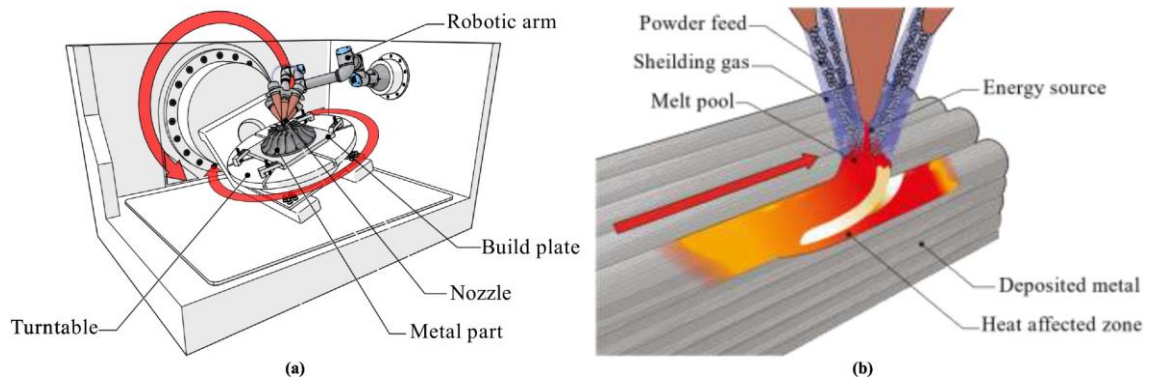
PBF-menetelmässä tulostusnopeus on 5–20 cm³/h eli noin 40–160 g/h. Tämän lisäksi menetelmällä päästään +/- 0,02–0,05 mm/25 mm tarkkuuksiin ja sillä pystytään tekemään 0,04–0,2 mm yksityiskohtia. Pinnanlaatu Ra on noin 4–10 µm. (Duda & Raghavan 2018)

PBF-menetelmän hyötyjä ovat suhteellisen hyvä tarkkuus ja hyvä kyky tuottaa monimutkaisia geometrioita. Osaan saadaan hyvät lujuus- ja jäykkyysominaisuudet, materiaalivalikoima on laaja sekä metallijauhe on hyvin kierrätettävissä. Huonoiksi puoliiksi nousee suhteellisen huono pinnanlaatu ja korkea huokoisuus. Lisäksi osissa esiintyy korkeita jäännösjäännityksiä ja valmistuksessa tarvitaan tukirakenteita. Tämän takia tarvitaan myös jälkikäsittelyitä. Lisäksi PBF-menetelmän tuotantokyky on matala. (Armstrong et al. 2022)

2.1.2 Suorakerrostus

Suorakerrostuksessa eli DED-menetelmässä suuttimessa oleva raaka-aine tuodaan lämmönlähteeseen, jolloin raaka-aine saadaan sulatettua kerrokseksi tulostusalustalle tai edellisten kerrosten päälle (kuva 2). Raaka-aine voi olla metallilankaa tai -jauhetta, ja tulostuskerroksen paksuus on 0,25–0,5 mm. Lämmönlähteenä voidaan käyttää plasma-laseria, elektronisuihkua, valokaarta tai lasersädettä. Komponentin tulostumista ja suuttimen liikettä voidaan ohjata robottikäden ja kääntöpöydän avulla. DED-menetelmää voi-

daan käyttää myös uusien komponenttien valmistuksessa, mutta ensisijaisesti sitä käytetään valmiiden komponenttien korjaamiseen tai materiaalin lisäämiseen. (Armstrong et al. 2022)



Kuva 2. DED-laitteisto (a) ja DED-suutin (b) (Armstrong et al. 2022).

DED-menetelmässä tulostusnopeus on $70 \text{ cm}^3/\text{h}$ eli noin $0,5 \text{ kg/h}$. Menetelmässä tarkkuus on $\pm 0,125\text{--}0,25 \text{ mm}/25 \text{ mm}$ ja sillä päästään $0,5\text{--}1,0 \text{ mm}$ yksityiskohtiin. Pinnanlaaduksi Ra saadaan $7\text{--}20 \mu\text{m}$. (Duda & Raghavan 2018)

DED-menetelmän hyötyjä ovat suhteellisen suurien osien valmistus ja materiaalin lisääminen jo valmiisiin osiin esimerkiksi korjausta varten. Lisäksi tulostusnopeus on hyvä ja materiaalivalikoima laaja. Materiaalia pystyy myös vaihtamaan kesken tulostusprosessin ja osan ominaisuuksia pystytään muuttamaan paikallisesti. Huonoja puolia ovat korkeat jäännösjännitykset ja siitä johtuvat vääntymät sekä suuri pinnankarheus. Yleensä osa tarvitsee myös jälkikäsittelyitä. (Armstrong et al. 2022)

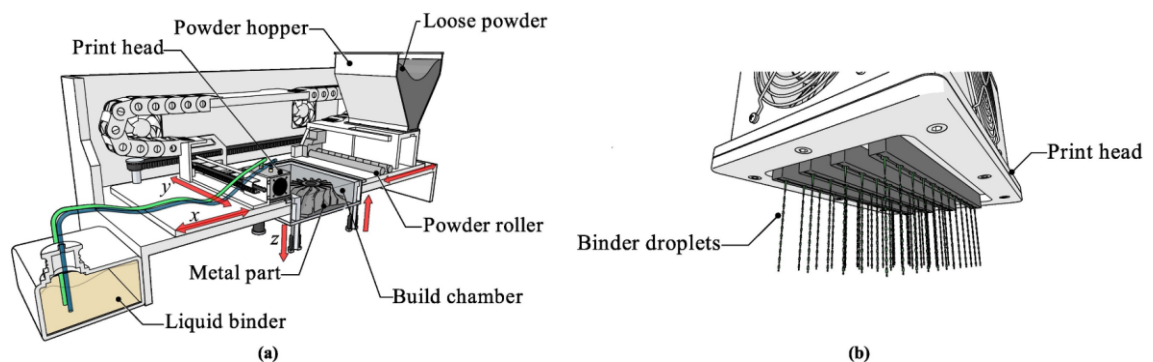
2.1.3 Sideaineen suihkutetus

Sideaineen suihkutuksessa eli BJ-menetelmässä tulostusalustalle levitetulle jauhekerrokselle suihkutetaan haluttuihin kohtiin sideainetta. Jauhekerroksen paksuus on $50\text{--}200 \mu\text{m}$. Sideaine sitoo metallijauheen yhteen tunkeutumalla partikkeleiden väliin ja se kovetetaan lämpimällä valolla tai ultraviolettivalolla. Lopuksi tulostusalusta liikkuu alaspäin, ja siihen levitetään uusi jauhekerros. Prosessia toistetaan, kunnes osa on kokonaan valmis. (Armstrong et al. 2022)

Tulostuksen päätyttyä osa on vielä erittäin hauras, minkä vuoksi osa pitää kovettaa uudissa $6\text{--}7$ tuntia $200\text{--}260^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Lämpötila ja aika riippuvat osan paksuudesta, korkeudesta, ylimääräisestä jauheesta ja sidosaineesta. (Armstrong et al. 2022)

Kovetuksen jälkeen osa sintrataan, jotta huokokset saadaan poistettua ja osasta saadaan tiheä. Sintraus myös parantaa osan mekaanisia ominaisuuksia. Sintrauksen seurauksena osa kutistuu. (Armstrong et al. 2022)

BJ-menetelmässä ei tarvita tukirakenteita, koska ympäröivä jauhe tukee komponenttia riittävästi. Tämän seurauksena hukkamateriaalia tulee vähemmän, kun ylimäärisiä tukirakenteita ei tarvitse poistaa. Lisäksi prosessi vie suhteellisen vähän energiaa muihin tulostustekniikoihin verrattuna, koska prosessissa ei tarvitse käyttää laseria tai elektroni-suihkua. Prosessi tapahtuu myös ympäristön kanssa samassa lämpötilassa. (Armstrong et al. 2022)



Kuva 3. BJ-laitteisto (a) ja BJ-tulostuspää (b) (Armstrong et al. 2022).

BJ-menetelmän etuina ovat matalat pääomakustannukset ja suhteellisen hyvä tuotantonopeus. Lisäksi osilla on hyvä pinnanlaatu ja menetelmässä ei tarvita tukirakenteita. Huonoina puolina ovat osan kutistumisen vaikea kontrollointi ja huokosten syntyminen. (Armstrong et al. 2022)

2.2 Materiaalit

Metallien 3D-tulostuksessa materiaailta vaaditaan nopeaa sulamista ja jäähtymistä sykleittäin. Tämän takia metallien 3D-tulostus eroaa useimmista perinteisistä valmistusmenetelmistä. Materiaalien kehittäminen ja optimointi tulostusta varten on tämän takia haastavaa ja kallista. (Toyserkani et al. 2021, s. 67)

Vaikka metallien 3D-tulostus on kasvava teknologian ala, materiaalivalikoima on edelleen suppea. Tulostettavia materiaaleja on suhteellisen vähän verrattuna siihen, mitä materiaaleja voidaan käyttää perinteisissä valmistusmenetelmissä. Tällä hetkellä tulostettavia metallimateriaaleja ovat muun muassa ruostumaton teräs, työkaluteräkset, kupari, titaaniseokset, nikkelpohjaiset superseokset ja alumiiniseokset. Myös näiden metallien valikoimat ovat vielä rajalliset 3D-tulostukseen. (Vafadar et al. 2021)

2.2.1 Metallijauheet

Metallien 3D-tulostuksessa käytetään pääosin metallijauheita, koska niitä käytetään myös yleisimmissä tulostustekniikoissa, kuten PBF-, DED- ja BJ-menetelmissä. Jauheet ovat suhteellisen kalliita, koska valmistajien välillä on vain vähän kilpailua ja tuotantovo-lyymit ovat matalat. Esimerkiksi metallijauheet maksavat 10–15 kertaa enemmän verrat- tuna perinteisissä valmistusmenetelmissä käytettäviin raaka-ainemateriaaleihin. Metallijauheiden hintojen odotetaan kuitenkin laskevan tulevaisuudessa. (Toyserkani et al. 2021, s. 60–61) Hintojen seurauksena tulostuksessa materiaalikustannukset voivat olla jopa 31 % koko osan valmistuskustannuksista, vaikka materiaalia voidaan säästää 40 % perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. (Powell et al. 2020)

Metallijauheiden korkeiden hintojen ja hukkamateriaalin vähentämiseksi metallijauheet kannattaa kierrättää. Käyttämättömästä metallijauheesta voidaan kierrättää 90–95 %. 15 kertaa kierrätetty käyttämätön jauhe voi säästää materiaalikustannuksia 92 %. (Powell et al. 2020)

Metallijauheet koostuvat ympyrämaisista metallipartikkeleista, jotka on valmistettu ato- misointimenetelmällä. Atomisointimenetelmässä atomisointikammioon syötetään sulaa metallia, jota puhalletaan veden, kaasun tai plasman avulla. Tällöin saadaan muodostet- tua ympyrämaisii metallipartikkeleita. Vesiatomisoinnissa metallipartikkeleiden muoto on epäsäännöllisempi ja jauheen happipitoisuus on suurempi. Lisäksi jauhe pitää kuivat- ta. Tämän takia vesiatomisointi on vähemmän suosittu, mutta halpa menetelmä valmis- ta metallijauheita. Kaasuatomisointi tehdään inerteissä olosuhteissa, jotta jauhe ei ha- petu ja siihen ei tule epäpuhtauksia. Kaasujen matalan lämpökapasiteetin seurauksena metallipartikkeleista tulee pallomaisia, koska niiden jäähtyminen kestää kauemmin. Tä- män takia kaasuatomisoinnista saadaan laadukkaampia jauheita kuin vesiatomisoin- nista. Plasma-atomisoinnissa partikkelit saadaan atomisoitua hyvin nopeasti, jolloin par- tikkeleista saadaan erittäin pyöreitä ja niihin ei pääse epäpuhtauksia. Plasma-atomisoin- nissa metallijauheiden laatu on parempi kuin vesi- ja kaasuatomisoinnissa, mutta mene- telmä on kalliimpi. (Powell et al. 2020) Vesi- ja kaasuatomisoinnissa partikkelien koko on 0–500 µm ja plasma-atomisoinnissa 0–200 µm (Kassym & Perveen 2020).

Metallijauheissa partikkelien koko, muoto ja kemiallinen koostumus saattavat vaihdella. Partikkeleilta ja jauheilta vaadittavia ominaisuuksia ovat muun muassa partikkelikokoja- kauma, jauheiden pakkaustiheys, partikkelin muoto, kemiallinen koostumus ja juokse- vuus. Partikkelikokojakauma kertoo partikkeleiden kokoosiintyvyyden jauheessa, ja sen avulla voidaan myös ilmoittaa kuinka monta prosenttia jauheesta saavuttaa tietyn partik-

kelikoon. Pakkaustiheyteen vaikuttaa partikkeleiden koko. Partikkeleiden pitää olla erikokoisia, jotta pakkaustiheys olisi mahdollisimman iso. Tällöin tulostettavaan osaan muodostuu mahdollisimman vähän huokosia ja pinnan laadusta saadaan hyvä. Ideaalisen partikkelin muoto on pyöreä, jotta partikkelit pystyvät pakkautumaan mahdollisimman lähelle toisiaan. Pieni partikkeli absorboi enemmän energiaa, jolloin se sulaa helpommin toisin kuin suurempi partikkeli, joka ei välttämättä sula kokonaan. Jauheen juoksevuus kertoo, kuinka hyvin partikkelit pystyvät liikkumaan toistensa yli. DED-menetelmässä tämä vaikuttaa jauheen syöttämiseen laseriin ja PBF-menetelmässä jauheen levittämiseen alustalle. Huono juoksevuus vaikuttaa myös partikkelien yhdistymiseen tulostuksen aikana, mikä vaikuttaa valmiin osan ominaisuuksiin. (Powell et al. 2020)

2.2.2 Alumiinit

Alumiini on teollisuudessa eniten käytetty metalli teräksen jälkeen. Alumiineilla on alhainen tiheys, korkea korroosionkestävyys ja erinomaiset mekaaniset ominaisuudet. Alumiineilla on lisäksi hyvä lujuus-paino-suhde. 3D-tulostuksessa alumiiniseosten kehitys on ollut hidasta, koska auto- ja ilmailuteollisuudessa on keskitytty enemmän titaani- ja nikkeliseosten kehittämiseen. 3D-tulostuksessa tutkimus on keskittynyt erityisesti Al-SiMg-seoksiin, joita käytetään myös muun muassa valamisessa ja hitsauksessa. Lisäksi kehitteillä on uusia AlMgSc-seoksia, jotka on tarkoitettu 3D-tulostukseen. 3D-tulostuksessa käytetään paljon AlSi-pohjaisia seoksia, koska niillä on lyhyt jäätymislämpötila-alue. (Kotadia et al. 2021)

Alumiiniseoksia käytetään DED- ja PBF-menetelmissä. Lisäksi BJ-menetelmään on kehitteillä alumiiniseoksia (Armstrong et al. 2022). Alumiinijauheet maksavat noin 70 US\$/kg (Diegel 2022, s. 81).

2.2.3 Teräkset

Teräksiä käytetään hyvin laajasti eri teollisuuden osa-alueilla, kuten ilmailu- ja autoteollisuudessa sekä lääketieteessä. Niillä on paljon erilaisia ominaisuuksia, kuten korkea lujuus, korroosion kestävyys, hyvä muovattavuus, alhainen hinta ja lähes 100 % kierrätettävyys. 3D-tulostuksessa teräksiä ja rautapohjaisia seoksia ei ole kuitenkaan saatavilla yhtä laajasti kuin perinteisissä valmistusmenetelmissä, koska prosessiolosuhteissa niillä on rajoitteita, joita ei olla pystytty ratkaisemaan. Lisäksi yksityiskohtaiset materiaalistandardit puuttuvat sekä prosessiparametrien korrelointi ja teknisten haasteiden ratkaisemi-

nen on vaikeaa. Prosessiparametreja ja teknisiä haasteita ovat muun muassa tulostettujen osien dimensioiden tarkkuus, osien valikoimat, rajallinen materiaalivalikoima ja manuaalinen jälkiprosessointi. (Narasimharaju et al. 2022)

Teräksiä voidaan käyttää monipuolisesti eri tulostustekniikoissa, kuten PBF-, DED- ja BJ-menetelmissä. Näissä tulostustekniikoissa käytetään esimerkiksi erilaisia työkaluteräksiä ja ruostumattomia teräksiä. Lisäksi DED-menetelmässä voidaan käyttää hiilliteräksiä ja PBF-menetelmässä maraging-teräksiä. BJ-menetelmään on kehitteillä niukkaseosteisia teräksiä. (Armstrong et al. 2022) Teräsjauheet maksavat noin 70 US\$/kg (Diegel 2022, s. 81).

2.3 Tuotanto

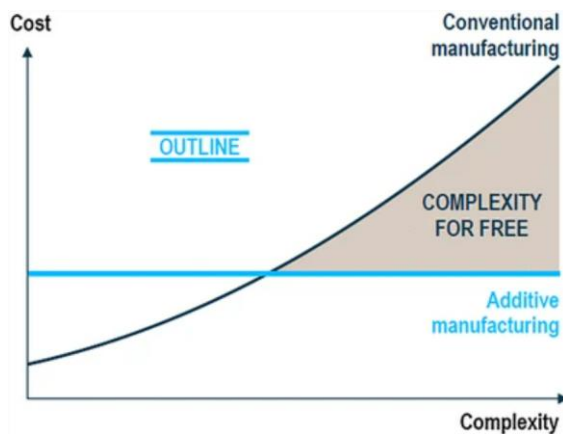
3D-tulostuksen tuotannosta ollaan kiinnostuneita monella eri teollisuuden osa-alueilla. Metallien 3D-tulostuksessa suurimmat teollisuudet ovat autoteollisuus 20 %, teollisuus-koneet 20 % sekä ilmailuteollisuus ja avaruusteknologia 18 %. Autoteollisuuden osuus metallien 3D-tulostuksen markkinoista on kasvanut vuosittain keskimäärin 3,6 %. Autoteollisuudessa ollaan erityisesti kiinnostuneita prototyyppien nopeasta valmistamisesta sekä osien massan optimoinnista. Ilmailuteollisuudessa on kiinnostuttu massan optimoinnin lisäksi osien nopeasta korjaamisesta ja osakokoonpanojen yksinkertaistamisesta. Kaivosteollisuudessa 3D-tulostusta voidaan hyödyntää erityisesti varaosien valmistamisessa. Nopealla varaosien saatavuudella voidaan vähentää jopa 50 % kustannuksista, jotka aiheutuvat koneiden seisona-ajasta. (Vafadar et al. 2021)

Tällä hetkellä metallien 3D-tulostus soveltuu pääosin matalavolyymiseen tuotantoon, vaikka myös massatuotantoon soveltuvia järjestelmiä on esitelty. 3D-tulostuksen massatuotanto on vielä kallista verrattuna perinteisten valmistusmenetelmien massatuotantoon, koska 3D-tulostuksen raaka-ainemateriaalit ovat kalliita. Lisäksi perinteisten valmistusmenetelmien kanssa samanlaisten geometrioiden valmistaminen vie enemmän aikaa. Tämän takia 3D-tulostus soveltuu parhaiten tuotantoon, jossa tarvitaan suurta joustavuutta ja osien alhainen yksikköhinta ei ole merkittävänä kriteerinä. (Vafadar et al. 2021)

Taulukko 1. Eri tulostusteknologioiden tulostuskoot (taulukko muokattu lähteistä (Vafadar et al. 2021; Armstrong et al. 2022)).

Prosessi	Teknologia	Valmistaja/Kone	Tulostuskoko (mm×mm×mm)
PBF	SLM	ADIRA /AddCreator	1000×1000×500
DED	DED	DMD 500D	1219×1219×600
BJ	BJ	ExOne X1	800×500×400

Taulukosta 1 nähdään eri valmistajien 3D-tulostulaitteistoja ja niiden tulostuskokoja. Tulostustilavuuden ollessa iso voidaan tulostimella tulostaa isoja osia tai vastaavasti paljon pieniä osia. Usean osan tulostus samanaikaisesti on myös tuotannon kannalta tehokkaampaa ja näin ollen mahdollistaa myös suuremmat tuotantovolyymit. Taulukossa 1 mainittava SLM eli selektiivinen lasersulatus (engl. Selective Laser Melting) on yksi PBF-menetelmistä.



Kuva 4. Osan monimutkaisuuden vaikutus hintaan 3D-tulostuksessa ja perinteisissä valmistusmenetelmissä (Duda & Raghavan 2018).

Kuvan 4 kuvaajissa nähdään vertailu, miten osan kompleksisuus vaikuttaa valmistuskustannuksiin. Ainetta lisäävässä valmistusmenetelmässä eli 3D-tulostuksessa valmistuskustannukset pysyvät samana osan monimutkaisuudesta riippumatta. Perinteisissä valmistusmenetelmissä osan valmistuskustannukset kasvavat eksponentiaalisesti osan monimutkaisuuden kasvaessa. Perinteisin valmistusmenetelmin on siis järkevämpää valmistaa yksinkertaisia osia, mutta kompleksisuuden kasvaessa 3D-tulostuksen käyttö on valmistuskustannusten kannalta järkevämpää.



Kuva 5. Kuvaaja metallien ja polymeerien 3D-tulostuksen maailmanlaajuisista markkinoista (Toyserkani et al. 2021).

Metallien ja polymeerien 3D-tulostuksen maailmanlaajuisiin markkinoihin kuuluu laitteistot, materiaalit, palvelut ja ohjelmistot (kuva 5). Kuvan 5 vihreästä kuvaajasta nähdään myös, että vuonna 2027 3D-tulostuksen markkinoiden on odotettu olevan yli 41 miljardia US\$. (Toyserkani et al. 2021, s. 50) Kuvan 5 kuvaajien tulkinnassa tulee huomioida maailmanlaajuinen epävarma taloustilanne, joka voi vaikuttaa kuvaajissa esitettyihin tulevaisuudennäkymiin.

3. METALLISEN 3D-TULOSETTAVAN OSAN SUUNNITTELU

Metallijauheiden korkeiden hintojen ja valmistuskustannusten takia 3D-tulostettava osa pitää suunnitella eri tavalla kuin perinteisissä valmistusmenetelmissä. Perinteisissä valmistusmenetelmissä osan geometriasta pyritään suunnittelemaan mahdollisimman yksinkertainen, jotta esimerkiksi koneistaminen olisi mahdollisimman helppoa. Tällaisissa osissa on paljon umpinaisia rakenteita ja geometrioihin kuluu ylimääräistä materiaalia. Tämän takia 3D-tulostuksessa osasta ei ole järkevää valmistaa samanlaista. 3D-tulostusta varten osa pitää suunnitella uudelleen, jotta materiaalin käyttö saadaan optimoitua. Samalla voidaan säästää tulostukseen kuluva aikaa, kun tulostettavaa materiaalia on vähemmän.

Suunnittelussa tulee huomioida tulostusprosessi, jotta tulostus tapahtuu sujuvasti ja tulostusjälki on tasaista. Tähän voidaan vaikuttaa muun muassa suosimalla tiettyjä muotoja ja valitsemalla oikeanlainen tulostusorientaatio, jotta tukirakenteita tarvitaan mahdollisimman vähän. Suunnittelussa voidaan myös hyödyntää topologian optimointia, jonka avulla osa saadaan optimoitua käyttökohteeseen sopivaksi samalla vähentäen ylimääräistä materiaalia ja keventämällä osaa. Topologian optimoinnin avulla voidaan myös toteuttaa esimerkiksi itseään tukevia rakenteita, jolloin tukirakenteita ei tarvita. Suunnittelun apuna voidaan käyttää viipalointiohjelmia, joiden avulla osan tulostus voidaan simuloida kerros kerrokselta.

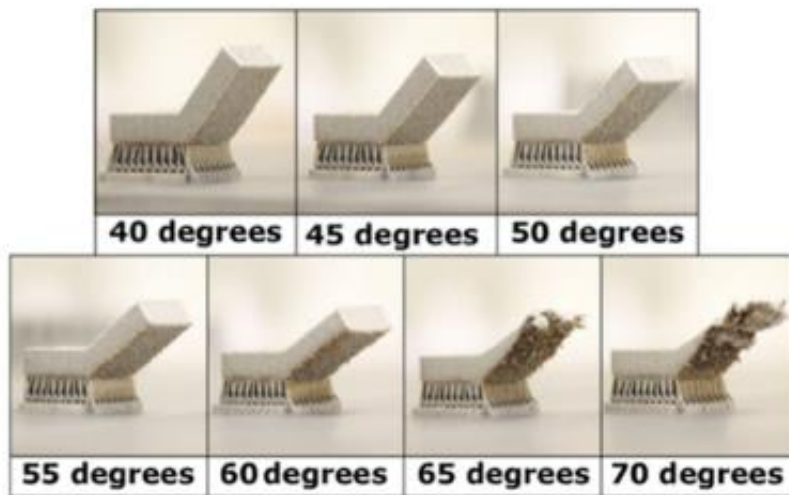
Tulostuksen jälkeen tarvitaan usein jälkityöstöä tukirakenteiden poistamiseksi, toleranssien saavuttamiseksi ja pinnan laadun parantamiseksi. Osalle voidaan myös tehdä lämpökäsittelyjä sen ominaisuuksien parantamiseksi. Jälkityöstön osuus on kuitenkin selvästi pienempi kuin perinteisin menetelmin valmistettavissa osissa.

3.1 Suunnitteluperiaatteet

Suunnitteluvaiheessa osan suunnittelussa tulee huomioida geometriset ominaisuudet ja prosessiparametrit. Näiden avulla voidaan täyttää osalle tarvittavat vaatimukset. Geometriisiin ominaisuuksiin kuuluvat muun muassa erilaiset ulokkeet, reiät ja kanavat, sillat, seinämänpaksuus ja tuet. Prosessiparametreihin taas kuuluu tulostuskerroksen paksuus ja tulostusorientaatio. (Bikas et al. 2019)

3D-tulostuksessa on haastavaa valmistaa ulkonevia ja siltamaisia rakenteita, koska painovoiman vaikutuksesta tuloste sortuu ja pinnasta tulee epätasainen. Pahimmillaan koko

tuloste voi epäonnistua. Erityisesti vaakasuuntaisten ulokkeiden tulostaminen on haastavaa, koska materiaalia tulostetaan ilmaan. Tämän takia ulokkeet tulee suunnitella siten, että niissä on joko tukirakenteita tai ulokkeiden tulostuskulma on tarpeeksi jyrkkä sortumisen estämiseksi (kuva 6). Ideaalisesti suunnittelussa osassa on itseään tukevia rakenteita, jolloin tukirakenteita ei tarvita ollenkaan. Tulostustekniikasta riippuen jauhepeti voi tukea rakennetta, jolloin tukirakenteita ei tarvita tai niitä tarvitaan vasta tietyn asteisen kulman ylityttyä. Siltamaisissa rakenteissa sillan pituus ei saa olla liian pitkä, jotta rakenne ei romahda. (Bikas et al. 2019)



Kuva 6. Ulokkeen kulman asteluvun vaikutus pinnanlaatuun (Bikas et al. 2019).

Reikiä voidaan myös pitää siltamaisina rakenteina. Halkaisijaltaan isot reiät tarvitsevat tukia, jotta reiän yläosaan ei tule epämuodostumia tai geometria ei sorru. (Bikas et al. 2019) Reiän epämuodostuminen voidaan myös välttää suunnittelemalla reikään itseään tukeva rakenne. Diegel (2022) mukaan reikä voidaan suunnitella soikean, pisaran tai salmiakin malliseksi. Tällöin saadaan vältettyä reiän yläosan romahtaminen.

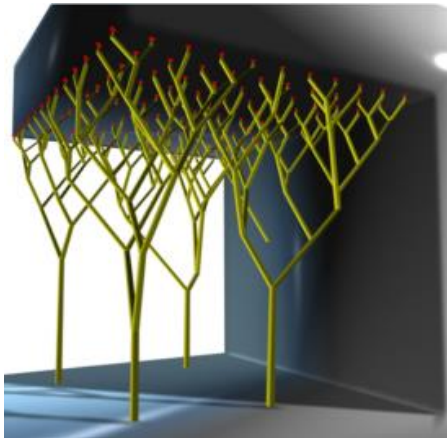
Seinämäpaksuuden suunnittelussa pitää huomioida tulostusteknologia ja tulostettavan osan korkeus. Korkea osa tarvitsee suuremman seinämäpaksuuden, jotta rakenne ei romahda. Lisäksi liian ohueen seinään voi tulla epämuodostumia. (Bikas et al. 2019)

Tulostuskerroksen paksuus vaikuttaa tulosteen laatuun ja tulostusaikaan. Pienemällä tulostuskerroksella saadaan aikaan yksityiskohtaisempaa jälkeä. Esimerkiksi vinoista pinnoista saadaan siistimpiä eikä reuna ole porrasmainen. Ohuiden kerrosten tulostaminen vie kuitenkin paljon aikaa. Ratkaisuksi on esitetty tulostuskerroksen paksuuden muuttamista. Yksityiskohtaisissa kohdissa tulostuspaksuus olisi ohuempaa kuin osan muissa kohdissa. (Bikas et al. 2019)

3.2 Tukirakenteet ja tulostusorientaatio

Liu et al. (2018) mukaan 3D-tulostuksen onnistumiseksi jotkin geometriat tarvitsevat tukirakenteita, jotta voidaan välttää mahdolliset epämuodostumat ja muotojen romahtaminen. Metallien 3D-tulostuksessa tukirakenteet ovat erityisen tärkeitä, koska ne tukevat ulkonevia geometrioita ja reikiä sekä kiinnittävät osan tulostusalustaan. Lisäksi ne johtavat pois ylimääräistä lämpöä ja ehkäisevät vääntymiä varmistaen tulostuksen onnistumisen. Erilaisia tukirakenteita on olemassa useita ja jokaisella on ominaiset lämmönjohtavuus- ja lujuusominaisuudet. Tukirakenteet voivat olla esimerkiksi umpinaisia, seinämäisiä, puun muotoisia, kartiomaisia tai verkkomaisia. (Diegel 2022, s. 107)

Tukirakenteiden tulostus hidastaa tulostusprosessia ja ne lisäävät osan massaa, minkä takia osa on tärkeää suunnitella siten, että niitä tarvitaan mahdollisimman vähän. Tukirakenteet poistetaan tulostuksen jälkeen koneistamalla, joten suunnittelussa tulee huomioida, että ne eivät tulostu hankalasti työstettäviin paikkoihin. Suunnittelussa on tärkeää minimoida tukirakenteiden tarve, koska niiden poistaminen voi lisätä valmistuskustannuksia jopa 40–70 %. (Liu et al. 2018)



Kuva 7. Puun muotoinen tukirakenne (Liu et al. 2018).

Tukirakenteiden muodoilla voidaan vaikuttaa tukirakenteiden määrään. Tällaisia tukirakenteita ovat esimerkiksi kaltevat seinätukirakenteet, puun muotoiset tukirakenteet, silta-maiset tukirakenteet ja verkkorakenteet. (Liu et al., 2018) Puun muotoisten tukirakenteiden valmistamiseen kuluu vähemmän materiaalia ja ne voidaan poistaa helposti (kuva 7) (Zhu et al. 2021). Tämän lisäksi topologian optimoinnin avulla voidaan optimoida tukirakenteiden tarve mahdollisimman pieneksi. Sitä voidaan hyödyntää myös itseään tukevien rakenteiden suunnitteluun, jolloin tukirakenteita ei tarvita (kuva 8). (Liu et al. 2018)



Kuva 8. Tukirakenteita tarvitseva geometria (vasemmalla) ja itseään tukeva geometria (oikealla) (Zhu et al. 2021).

Tulostusorientaatio on yksi tärkeimmistä prosessiparametreista, koska sillä voidaan päättää, mitkä osan geometriat ovat ulkonevia. Sillä voidaan siis vaikuttaa suoraan tukirakenteiden tilavuuteen, joka tarvitaan tulostumisen onnistumiseen. Tulostusorientaatiolla voidaan myös vaikuttaa keskeisesti tulostusnopeuteen, koska materiaalin tulostus vaakasuunnassa on nopeampaa kuin pystysuunnassa. Tämä johtuu siitä, että uuden materiaalikerroksen lisäämiseksi koko tulostusalustaa pitää liikuttaa pystysuunnassa, mihin kuluu aikaa. (Bikas et al. 2019)



Kuva 9. Tulostusorientaation vaikutus tukirakenteiden määrään (Zhang et al. 2022).

Kuvasta 9 nähdään, miten osan orientaatio vaikuttaa tukirakenteiden muodostumiseen. Tulostusorientaatio tulee valita siten, että ulkonevia geometrioita on mahdollisimman vähän. Kuten kuvasta 9 nähdään, tukirakenteiden tarve on saatu eliminoitua tulostusorientaation avulla.

3.3 Topologian optimointi

Topologian optimointi on menetelmä, jossa osan rakenne suunnitellaan käyttökohteen optimaaliseksi huomioiden osaan kohdistuvat voimat, osan suorituskyky ja rajoitukset. Tämän seurauksena osasta saadaan korkeasti suorituskykyinen, painoltaan kevyt ja osan rakenteesta monikäyttännöllinen. Topologian optimointi voidaan tehdä monien ominaisuuksien perusteella. Sitä voidaan käyttää muun muassa rakenteen opti-

moimiseen siihen kohdistuvien voimien perusteella. Lisäksi sitä voidaan käyttää esimerkiksi lämpöä johtavien rakenteiden ja monimutkaisten osakokonaisuuksien layoutien optimoimiseen sekä mikro- ja makrorakenteiden optimoimiseen. (Zhu et al. 2021)

Topologian optimoinnin seurauksena osan geometriasta tulee usein monimutkainen, minkä takia osan valmistaminen perinteisin valmistusmenetelmin on kallista tai mahdotonta. Tämän takia topologisesti optimoitujen osien valmistus suurissa tuotantovolyymeissa ei ole mahdollista perinteisin valmistusmenetelmin. 3D-tulostus mahdollistaa topologisesti optimoitujen osien edullisen valmistuksen ja voi mahdollistaa tulevaisuudessa myös niiden suuremman tuotantovolyymien.

3D-tulostuksessa topologian optimointia voidaan lähestyä vapaan suunnittelun näkökulmasta ja tulostusprosessin rajoitteiden näkökulmasta. Suunnittelupainotteisessa näkökulmassa osan suorituskyky pyritään maksimoimaan samalla hyödyntäen mahdollisia verkkorakenteita. Nämä halutut ominaisuudet pyritään toteuttamaan tulostuksessa. Toisessa näkökulmassa topologian optimoinnissa huomioidaan tulostusprosessin mahdolliset rajoitteet, jotta suunnittelusta ja valmistusprosessista saadaan mahdollisimman sujuvaa. (Zhu et al. 2021)

Topologian optimointia voidaan hyödyntää myös tukirakenteiden suunnittelussa. Esimerkiksi sen avulla voidaan ottaa huomioon tukirakenteiden lämpömekaaniset ominaisuudet, jolloin vältetään tukirakenteiden sisäiset jännitteet ja halkeamat. Pahimmassa tapauksessa halkeamat voivat johtaa tukirakenteen irtoamiseen tulostusalustasta ja tulostettavasta osasta. (Liu et al. 2018) Topologian optimoinnissa täytyy huomioida myös tukirakenteiden poistaminen, jotta tukirakenteet eivät tulostu jälkityöstön kannalta hankaliin paikkoihin. Tämä voi selkeästi vaikeuttaa tukirakenteiden poistamista ja vaikuttaa näin ollen myös jälkityöstön kustannuksiin.

3.4 Jälkityöstö ja lämpökäsittelyt

3D-tulostuksen jälkeen tarvitaan suhteellisen vähän jälkiprosesseja perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna, koska halutut geometriat ja muodot voidaan toteuttaa jo tulostusvaiheessa hyvällä tarkkuudella. Lisäksi jälkityöstön määrään voidaan vaikuttaa jo suunnitteluvaiheessa esimerkiksi tukirakenteiden ja tulostusorientaation avulla. Jälkityöstöä ja lämpökäsittelyjä tarvitaan osan laadun ja ominaisuuksien parantamiseksi. Liu et al. (2018) mukaan 3D-tulostuksen ja ainetta poistavien menetelmien käyttöä tuotannossa kutsutaan hybridivalmistukseksi.

Koneistusta tarvitaan halutun pinnanlaadun ja toleranssien saavuttamiseksi. Jännös-
jännitysten takia osan geometria saattaa poiketa halutusta, jolloin se pitää koneistaa oi-
keisiin mittoihin. (Liu et al. 2018) Lisäksi koneistamalla voidaan irrottaa tulostusalusta ja
mahdolliset tukirakenteet valmiista osasta (Armstrong et al. 2022). Tukirakenteiden pois-
taminen voi huonontaa pinnanlaatua, minkä takia voidaan tarvita lisää jälkityöstöjä.

Lämpökäsittelyiden avulla voidaan poistaa osaan syntyneitä sisäisiä jännityksiä, jotka
ovat syntyneen tulostusprosessin syklisten lämpötilavaihteluiden seurauksena. Lisäksi
erilaisia lämpökäsittelyjä voidaan käyttää mikrorakenteen, mekaanisten ominaisuuksien
ja korroosio-ominaisuuksien parantamiseen. (Armstrong et al. 2022)

4. METALLIEN 3D-TULOSTUS TULEVAISUUDESSA

3D-tulostuksella uskotaan olevan merkittävä osa tulevaisuuden tuotannossa. Sen uskotaan olevan keskeinen osa teollisuuden seuraavaa vallankumousta eli teollisuutta 4.0. 3D-tulostuksessa on kuitenkin vielä paljon ratkaistavia haasteita, jotta sen tuotannosta saadaan tehokasta. Tulevaisuudessa ratkaistavia ongelmia ovat muun muassa massa-tuotanto ja siihen liittyvät ongelmat, kuten osien laatu ja tuotannon automatisointi. Myös materiaalivalikoimien laajentuminen ja uusien materiaalien kehittäminen on tärkeää. 3D-tulostuksen käyttöönottoa osaksi teollisuutta vaikeuttaa myös standardien puuttuminen. Ilman standardeja esimerkiksi osien laadulle on hankalaa määrittää täytettäviä vaatimuksia. (Toyserkani et al. 2021, s. 60–61)

3D-tulostuksen käyttöönotto vaatii yrityksiltä isoja investointeja, jotta se saadaan osaksi tuotantoa. Investointeja tarvitaan 3D-tulostuksen ekosysteemiin, johon kuuluu muun muassa ohjelmistot, materiaalit, asiantuntijat ja jälkiprosessointilaitteistot. Lisäksi ekosysteemiin kuuluu työntekijöiden koulutus. Yrityksen toimitusketjuun voidaan integroida 3D-tulostuspalveluja tarjoavia yrityksiä, jotta voidaan vähentää 3D-tulostuksen investointiin liittyviä käyttöönoton riskejä alkuvaiheessa. (Toyserkani et al. 2021, s. 62)

4.1 Osat tulevaisuudessa

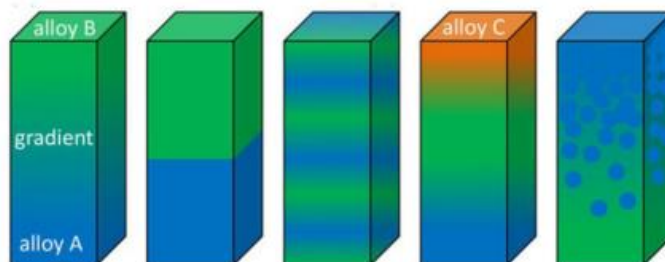
Monet esiteltävistä tulevaisuuden osista on mahdollista valmistaa myös nykypäivänä 3D-tulostuksella. Tulevaisuudessa näitä osia voidaan mahdollisesti valmistaa suurempina tuotantovolyymeinä ja niiden käyttö on yleisempää nykypäivään verrattuna. Tulevaisuudessa myös tulostustilavuuden kasvaessa tulostettavien osien kokoa voidaan kasvattaa suuremmaksi.

Uudelleensuunnittelun ja 3D-tulostuksen avulla voidaan pienentää osien ja kokoonpanojen määrää yhdistämällä ne yhdeksi isoksi osakokonaisuudeksi (kuva 10). Tämän avulla voidaan yksinkertaistaa suunnitteluprosessia ja toteuttaa halutut monimutkaiset muodot. Lisäksi voidaan vähentää materiaalihukkaa ja komponentin kokonaisuutta. Kokonaiskustannuksia saadaan pienennettyä, koska kokoonpanoon ja suunnitteluun kuluu vähemmän aikaa. Tämän lisäksi myös toimittajien pienempi määrä vähentää riskejä toimitusketjuissa. (Toyserkani et al. 2021, s. 47)



Kuva 10. Osakokoonpanon suunnittelu yhdeksi komponentiksi (Toyserkani et al. 2021, s. 47).

3D-tulostus mahdollistaa myös osien optimoimisen eri materiaalien avulla. Osan materiaalia voidaan muuttaa gradienttimaisesti, jolloin voidaan lisätä osan funktionaalisuutta ympäristön mukaan. Samalla voidaan muuttaa mekaanisia ominaisuuksia tarpeiden mukaiseksi (kuva 11). Metalleilla tutkittuja monimateriaalisia seoksia ovat titaani-, kupari-, alumiini- ja terässeokset. Metallien monimateriaalisissa seoksissa pyritään panostamaan kovuuden, johtavuuden, magneettisuuden, lujuuden ja termisten ominaisuuksien parantamiseen. Metalliin voidaan yhdistää myös muita materiaaleja, kuten keraameja ja polymeerejä. (Nazir et al. 2023)



Kuva 11. Erilaisia materiaalimuutoksia (kuva muokattu lähteestä (Ghanavati & Naf-fakh-Moosavy 2021).

3D-tulostuksen avulla voidaan valmistaa komponentteja, joissa on sisäisiä jäähdytyskanavia. Esimerkiksi ruiskutusvalussa muoteissa voidaan käyttää sisäisiäjäähdytyskanavia, jotka kulkevat muotissa valmistettavan muovituotteen profiilin muotoisesti. Tällaisten vapaasti kaartuvien jäähdytyskanavien avulla voidaan tehostaa muovin jäähtymistä muotissa, nopeuttaa valmistusprosessia ja alentaa muotin lämpötilan epätasaisuuksia. (Kanbur et al. 2022) Erilaisia jäähdytyskanavia voidaan hyödyntää myös koneenosissa. Esimerkiksi ilmailuteollisuudessa polttomoottorien sylinterilohkoissa ja korkeapaineisten turbiinien lavoissa voidaan käyttää sisäisiä jäähdytyskanavia. 3D-tulostuksen avulla jäähdytyskanavista voidaan tehdä geometrialtaan monimutkaisempia ja niiden sijainti komponentin sisällä voidaan valita vapaammin kuin perinteisissä valmistusmenetelmissä. Lisäksi niissä voidaan hyödyntää erilaisia verkkorakenteita. Jäähdytyskanavien

avulla voidaan parantaa osan suorituskykyä, koska niiden avulla voidaan optimoida lämmönsiirron ominaisuuksia ja samalla vähentää osan massaa. (Blakey-Milner et al. 2021)

3D-tulostusta voidaan käyttää myös osien korjaamiseen. Korjaamisen tavoitteena on saada osa kunnostettua toiminnaltaan alkuperäistä vastaavaksi. Kalliiden osien korjaaminen on myös taloudellisesti kannattavampaa kuin uuden osan valmistaminen. Lisäksi korjaamiseen kuluu vain 15 % energiaa verrattuna uuden osan valmistukseen tarvittavaan energiaan. Korjaaminen tapahtuu usein DED-menetelmällä, jossa DED-suuttimeen on kiinnitetty 3D-skanneri. Korjattava osa skannataan, jolloin sen muodoista ja vaurioista saadaan muodostettua pistepilvi. Tämän jälkeen CAD-malleja prosessoidaan vikojen havaitsemiseksi ja CAM-ohjelmistolla määritetään työstöreitti. Lopuksi DED-menetelmällä tulostetaan uusi materiaalikerros, kunnes vaurioitunut alue on saatu alkuperäisen muotoiseksi. (Aprilia et al. 2022)

4.2 Massatuotanto

Metallien 3D-tulostuksen massatuotannossa suurin haaste on tuotannon nopeus. Metallien tulostusnopeus on vielä hidas, minkä takia tuotantonopeus on liian pieni massatuotantoon. Tulostusprosessien nopeuttaminen on vielä kehitysvaiheessa, mutta kehitteillä on muun muassa tulostimia, joissa on useita lämmönlähteitä, kuten lasereita, joilla voidaan nopeuttaa tulostusprosessia. Tulostusnopeuden lisäksi 3D-tulostimien pieni tulostustilavuus rajoittaa valmistettävien osien määrää. (Toyserkani et al. 2021, s. 61) Suuremmalla tulostustilavuudella voidaan tuottaa enemmän osia samanaikaisesti, jolloin osia voidaan valmistaa suurempia määriä.

Osan valmistusprosessin toistettavuus ja laatu ovat myös haaste massatuotannossa. Esimerkiksi pinnanlaadun parantaminen lisää jälkiprosessoinnin määrää, mikä vaikuttaa myös lopulliseen tuotantoaikaan. Laadun parantaminen on tärkeää, jotta jälkiprosessien määrää saadaan vähennettyä ja tuotantoaika lyhennettyä. Tulostuksessa prosessin ja ympäristön kontrolloiminen on haastavaa, joten laitteiden kehittämisessä yritetään keskittyä häiriötekijöiden kompensoimiseen. Esimerkiksi sensoreiden avulla voidaan tarkkailla olosuhteita. Laadua voidaan kontrolloida algoritmeilla, joilla voidaan automaattisesti säätää prosessiparametreja, kuten laserin tehoa ja prosessin nopeutta. (Toyserkani et al. 2021, s. 61)

Tulevaisuudessa 3D-tulostuksen mahdollinen automatisointi helpottaisi tuotannon sujuvuutta. Tulostimien raaka-aineväestöjen automatisoitu täyttäminen ja ohjelmistojen hyödyntäminen esimerkiksi helpottaa systeemin koordinoitua ja työnkulkua. Lisäksi koneoppimisen ja tekoälyn avulla voidaan tunnistaa tulostuksen aikana syntyneitä virheitä.

Tulevaisuudessa myös valmiin osan poistaminen ja putsaminen ylimääräisestä jauheesta voidaan tehdä robotin avulla sekä ylimääräisen metallijauheen kierrätys ja uusiokäyttö tapahtuu automatisoidusti. Lisäksi jälkiprosessit, kuten lämpökäsittelyt ja kiillotus voidaan automatisoida ja integroida osaksi työnkulkua. (Toyserkani et al. 2021, s. 61–62)

4.3 Kestävä kehitys

Kestävässä kehityksessä tarkoituksena on minimoida, uudelleen käyttää ja kierrättää resursseja. Kestävässä valmistuksessa pyritään ekotehokkailla toimilla vähentämään päästöjä ja kehittämään kestävä kehityksen mukaisia innovaatioita. Kestävä tuotanto voi olla myös taloudellista, koska sen avulla voidaan vähentää energian kulutusta ja vähentää valmistukseen kuluva aikaa. Tavoitteena on parantaa tuotantolaitosten ja prosessien suorituskykyä niiden luotettavuuden ja automatisoinnin lisäämiseksi. (Javaid et al. 2021)

3D-tulostuksen avulla ympäristön kestävyttä voidaan parantaa useilla eri tavoilla. Innovatiivisella suunnittelulla ja huomioimalla ympäristövaatimuksen voidaan valmistaa laadukkaita ja kevyitä osia, joissa materiaalin käyttö on optimoitu. Näin voidaan minimoida materiaalityönteon määrä ja säästää energiaa, kun käyttökohteessa kevyemmät osat kulluttavat vähemmän esimerkiksi polttoainetta. 3D-tulostettavat osat voidaan valmistaa kierrätysmateriaaleista ja ne voidaan myös kierrättää elinkaaren lopussa. Osia voidaan lisäksi valmistaa tarpeen mukaan, jolloin vältetään turhaa ylituotantoa. Kestävillä toimitusketjuilla ja digitalisaation avulla mahdollistetaan toimitusketjujen turvaaminen ja osien saatavuus. (Javaid et al. 2021)

Metallijauhetta voidaan valmistaa kierrätysmateriaaleista, kuten koneistuslastuista. Lastuista valmistettua jauhetta eli lastujauhetta voidaan valmistaa jauhamalla metallilastut kuulamylyssä. Tällaista jauhetta voidaan käyttää esimerkiksi PBF-menetelmässä. Kierrätetyn materiaalin avulla voidaan säästää 20–30 % energiaa verrattuna metallijauheen tavanomaiseen valmistukseen. (Dhiman et al. 2021) Lisäksi metallijauhetta voidaan valmistaa romumetallista atomisointimenetelmällä, jolloin valmistettava metallijauhe kuluttaa vain 41,1 % energiaa verrattuna suoraan atomisointiin (Powell et al. 2020).

4.4 Teollisuus 4.0

Teollisuus 4.0 eli teollisuuden neljäs vallankumous tarkoittaa tulevaisuudessa kyberfyysisistä systeemiä, jossa integroituneet fyysiset prosessit, varastojärjestelmät ja tuotantolaitokset koordinoivat ja vaihtavat tietoa keskenään automaattisesti. Digitalisoituneiden

valmistusprosessien hyötyjä ovat ajankäytön tehokkuus, korkeampi tuottavuus ja parempi laatu. Lisäksi laitteiden välinen kommunikointi vähentää ihmisen tekemää työtä ja virheiden mahdollisuuksia. (Ashima *et al.*, 2021)

3D-tulostus on yksi teollisuus 4.0 peruspilareista, koska 3D-tulostuksella voidaan toteuttaa monia teollisuus 4.0 vaatimuksia. Näitä ovat esimerkiksi tuotantoketjujen uudelleensuunnittelu ja korkeasti kustomoitujen tuotteiden valmistus. Teollisuus 4.0:ssa 3D-tulostuksen avulla voidaan vähentää uusien tuotteiden kehitykseen kuluva aikaa, vähentää valmistuskustannuksia ja minimoida tuotannon hukkamateriaalia. Lisäksi 3D-tulostus mahdollistaa toimitusketjujen lyhentämisen ja vähentää varastoinnin tarvetta. (Malik *et al.* 2022)

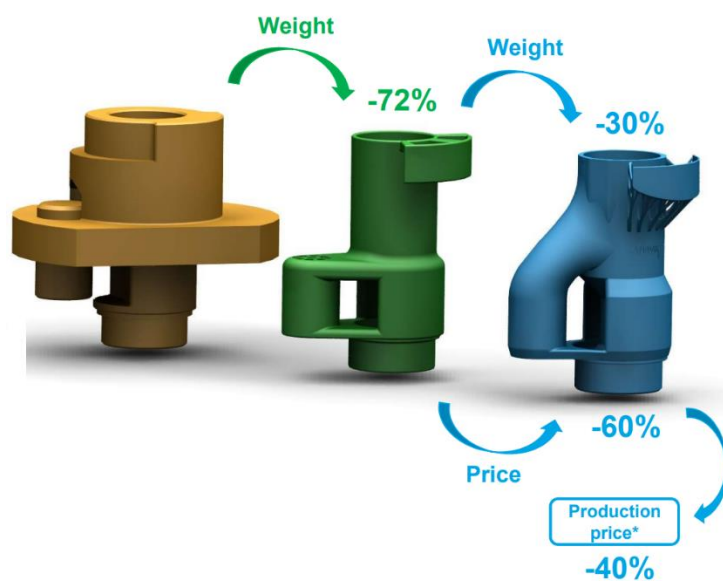
Tulevaisuuden teollisuudessa 3D-tulostusta käytetään älykkäässä tuotannossa ja joustavassa valmistusjärjestelmässä, jossa järjestelmä pystyy reagoimaan nopeasti muutokseen ja valmistamaan uusien vaatimusten mukaisia osia. Lisäksi digitaalinen ja modulaarinen tuotanto voidaan tuoda lähemmäs asiakkaita tai materiaalitoimittajia. Samalla tuotantoa pystytään ohjaamaan päätoimipaikasta. (Moshiri *et al.* 2020)

Teollisuuden neljänteen vallankumoukseen liittyy 3D-tulostuksen osalta paljon samankaltaisia haasteita kuin massatuotantoon. 3D-tulostuksen massatuotanto onkin yksi tulevaisuuden tuotannon haasteista. Ashima *et al.* (2021) mukaan automaation avulla voidaan ratkaista monia 3D-tulostuksen haasteita tulevaisuuden teollisuudessa. Tällä hetkellä isojen osien massatuottaminen ei ole järkevää, koska tulostukseen kuluu paljon aikaa. Lisäksi ongelmaksi nousevat tukirakenteiden poistamiseen kuluva aika ja hukkamateriaalin syntyminen, mitkä vaikuttavat kustannuksiin. Suuren mittakaavan tuotannossa tulostettujen osien materiaaliominaisuudet saattavat olla keskenään epätarkkoja ja tulostuskerroksissa virheitä, kuten vääristymiä. Näiden seurauksena myös osien toistettavuus eli niiden valmistaminen tasalaatuisina on haastavaa. Teollisuus 4.0:n saavuttamiseksi 3D-tulostuksen valmistuskustannukset pitää saada matalammaksi ja tuotteet pitää saada tarkemmin personoitua asiakkaan toiveiden mukaiseksi. Myös datan hallinta älykkäässä tuotannossa on tärkeää, jotta tuote saadaan valmistettua sujuvasti raaka-aineista lähetysvalmiiksi tuotteeksi. Tulevaisuuden teollisuudessa älykkääseen tuotantoon kuuluu myös kestävä kehitys, minkä takia on tärkeää kehittää 3D-tulostuksen tuotannon ekologisuutta ja ympäristöystävällisyyttä. Tällöin voidaan vähentää hiilidioksidipäästöjä ja pienentää energiankulutusta teollisuudessa. (Ashima *et al.* 2021)

4.5 Esimerkkikomponentti

Esimerkkikomponenttina toimii geneva drive -vaihdemekanismin pyörittävä osa, joka koostuu kahdesta hitsatusta osasta. Osien yhteismassa on 3,7 kg ja dimensiot 140 mm×100 mm×121 mm. (Etteplan AM swing piece pilot – Final report 2019)

Komponentti on tarkoitettu suunnitella 3D-tulostukseen sopivaksi ja tehdä osalle topologian optimointi. Suunnittelun keskeisenä kriteerinä on saada komponentista edullisempi. Lisäksi komponentin pitää kestää sille määritetyt voimat ja jakopinnan tulee olla sama kuin alkuperäisessä versiossa. Materiaalin ei tarvitse olla sama. (Etteplan AM swing piece pilot – Final report 2019)



Kuva 12. Alkuperäinen osa (oranssi), 3D-tulostukseen optimoitu osa (vihreä) ja topologisesti optimoitu osa (sininen) (Etteplan AM swing piece pilot – Final report 2019).

Kuvassa 12 nähdään alkuperäinen komponentti, joka koostuu kahdesta erillisestä osasta. Kun komponentti uudelleen suunnitellaan 3D-tulostusta varten, sen massaa saadaan vähennettyä 72 %. Kun uudelleen suunnitellulle osalle tehdään topologian optimointi, sen painoa saadaan vähennettyä vielä 30 %. Lisäksi osan hintaa saadaan laskettua 60 % verrattuna 3D-tulostusta varten suunniteltuun osaan. Topologisesti optimoidun osan valmistushinta on lopulta 40 % pienempi kuin alkuperäisen osan. Samalla osan massaa ja dimensioita on saatu pienennettyä. Topologisesti optimoidun osan massa on 0,7 kg ja dimensiot 67 mm×99 mm×121 mm. (Etteplan AM swing piece pilot – Final report 2019)

5. YHTEENVETO

Tässä kirjallisuuskatsauksessa syvennyttiin metallien 3D-tulostuksen nykytilanteeseen ja tulevaisuudennäkymiin. Kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan todeta, että metallien 3D-tulostus on teollisuudessa kasvava valmistusmenetelmä, ja se mahdollistaa vapaamman suunnittelun ja kustannustehokkaan tuotannon. Tällä hetkellä metallien 3D-tulostus sopii erityisesti pienivolyymiseen tuotantoon, kuten prototyyppien ja varaosien valmistukseen. Tulevaisuudessa metallien 3D-tulostus tulee olemaan merkittävä osa tuotantoa, koska sen avulla voidaan joustavasti valmistaa käyttökohteeseen optimoituja ja funktionaalisia osia. Lisäksi sillä voidaan yksinkertaistaa osakokoonpanoja, jolloin voidaan säästää valmistuskustannuksissa ja vähentää kokonaismassaa. 3D-tulostuksen uskotaan olevan tulevaisuudessa tärkeä osa kestävästä kehityksestä ja teollisuutta 4.0.

Metallien 3D-tulostuksessa käytetään pääosin kolmea eri tulostustekniikkaa: jauhepetisulatusta, suorakerrostusta ja sideaineen suihkutusta. Jauhepetisulatuksella ja sideaineen suihkutuksella voidaan valmistaa suhteellisen pieniä osia, kun taas suorakerrostus soveltuu paremmin isojen osien valmistukseen. Kaikissa tekniikoissa käytetään raaka-aineena metallijauhetta, jota valmistetaan atomisointimenetelmällä. Atomisointimenetelmiä ovat vesi-, kaasu- ja plasma-atomisointi. Eri atomisointimenetelmällä voidaan vaikuttaa metallijauheen ominaisuuksiin, jotka vaikuttavat tulostusprosessiin ja tulostettavan osan laatuun. Metallijauheet ovat nykypäivänä vielä suhteellisen kalliita ja uusien materiaalien kehittäminen on kallista. Lisäksi materiaalivalikoimat ovat vielä rajalliset, mutta kiinnostus halvempia materiaaleja, kuten alumiineja ja teräksiä, kohtaan on kasvanut.

Teollisuudessa monet alat, kuten auto- ja ilmailuteollisuus, ovat kiinnostuneet 3D-tulostuksen tuomista mahdollisuuksista tuotannossa ja 3D-teollisuuden markkinaosuus on kasvussa. Tällä hetkellä 3D-tulostus on suhteellisen edullinen menetelmä tulostaa monimutkaisia osia matalavolyymisessa tuotannossa. Lisäksi metallien 3D-tulostimien kooka pyritään kasvattamaan tuotantovolyymien kasvattamiseksi.

3D-tulostus mahdollistaa vapaamman suunnittelun. Suunnittelussa tulee huomioida geometriset ominaisuudet ja prosessiparametrit, joilla voidaan vaikuttaa tulostuksen sujuvuuteen. Geometrisia ominaisuuksia ovat muun muassa erilaiset geometriset muodot, kuten reiät ja ulokkeet. Nämä tulee suunnitella siten, että tukirakenteita tarvitaan mahdollisimman vähän, jotta jälkiprosesseja tarvitaan mahdollisimman vähän. Osaan voi-

daan suunnitella itseään tukevia geometrioita, jolloin tukirakenteita ei tarvita. Tukirakenteiden määrään voidaan myös vaikuttaa prosessiparametreilla, kuten tulostusorientaatiolla. Onnistuneella suunnittelulla voidaan lyhentää valmistusaikaa ja vähentää valmistuskustannuksia.

Tulostusprosessin jälkeen tarvitaan useimmiten erilaisia jälkiprosesseja, kuten koneistusta ja lämpökäsittelyjä. Yleisimmät jälkiprosessit ovat muun muassa tulostusalustan irrottaminen osasta sekä erilaiset lämpökäsittelyt jäännösjännitysten poistamiseksi.

Tulevaisuudessa osia voidaan tuottaa tehokkaasti massatuotantona huomioiden kestävä kehityksen kriteerit. Osista voidaan valmistaa monifunktionaalisia esimerkiksi yksinkertaistamalla osakokoonpanoja ja muuttamalla osan rakennetta tai materiaalia asteittain. Lisäksi osiin voidaan tehdä erilaisia jäähdytyskanavia, joilla voidaan parantaa osan suorituskykyä. 3D-tulostuksen avulla osia voidaan myös korjata ja kunnostaa käyttöiän pidentämiseksi. Esimerkkikomponentin avulla saatiin havainnollistettua, miten tulevaisuuden komponenteissa voidaan vähentää massaa ja säästää valmistuskustannuksissa, kun osan rakenne optimoidaan. Tulevaisuudessa yrityksiltä vaaditaan vielä paljon investointeja metallien 3D-tulostukseen, jotta se saadaan integroitua osaksi tuotantoa.

LÄHTEET

- Aprilia, A., Wu, N. & Zhou, W. (2022). Repair and restoration of engineering components by laser directed energy deposition. *Materials Today: Proceedings*, 70, pp. 206–211. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.022>
- Armstrong, M., Mehrabi, H. & Naveed, N. (2022). An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 84, pp. 1001–1029. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.060>
- Ashima, R., Haleem, A., Bahl, S., Javaid, M., Mahla, S.K. & Singh, S. (2021). Automation and manufacturing of smart materials in additive manufacturing technologies using Internet of Things towards the adoption of industry 4.0. *Materials Today: Proceedings*, 45, pp. 5081–5088. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.583>
- Bikas, H., Lianos, A.K. & Stavropoulos, P. (2019). A design framework for additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(9–12), pp. 3769–3783. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03627-z>
- Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, B., Pitot, J., Lopez, E. et al. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*, 209, p. 110008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
- Dhiman, S., Joshi, R.S., Singh, S., Gill, S.S., Singh, H., Kumar, R. et al. (2021). A framework for effective and clean conversion of machining waste into metal powder feedstock for additive manufacturing. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, p. 100151. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100151>
- Diegel, O. (2022). Design for AM. in D. Godec, J. Gonzalez-Gutierrez, A. Nordin, E. Pei & J.U. Alcázar (Eds.). *A Guide to Additive Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing (Springer Tracts in Additive Manufacturing), pp. 75–117. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05863-9_4
- Duda, T. & Raghavan, L.V. (2018). 3D metal printing technology: the need to re-invent design practice. *AI & SOCIETY*, 33(2), pp. 241–252. <https://doi.org/10.1007/s00146-018-0809-9>
- Etteplan AM swing piece pilot – Final report. (2019). Pdf-tiedosto. sähköpostiviesti 13.2.2023.
- Ghanavati, R. & Naffakh-Moosavy, H. (2021). Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, pp. 1628–1664. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.022>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., Suman, R. & Rab, S. (2021). Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(4), pp. 312–322. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.07.005>

Kanbur, B.B., Zhou, Y., Shen, S., Wong, K.H., Chen, C., Shocket, A. *et al.* (2022). Metal additive manufacturing of conformal cooling channels in plastic injection molds with high number of design variables. *Materials Today: Proceedings*, 70, pp. 541–547. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.555>

Kassym, K. & Perveen, A. (2020). Atomization processes of metal powders for 3D printing. *Materials Today: Proceedings*, 26, pp. 1727–1733. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.364>

Kotadia, H.R., Gibbons, G., Das, A. & Howes, P.D. (2021). A review of Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing of aluminium alloys: Microstructure and properties. *Additive Manufacturing*, 46, p. 102155. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102155>

Liu, J., Gaynor, A.T., Chen, S., Kang, Z., Suresh, K., Takezawa, A. *et al.* (2018). Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57(6), pp. 2457–2483. <https://doi.org/10.1007/s00158-018-1994-3>

Malik, A., Ul Haq, M.I., Raina, M. & Gupta, K. (2022). 3D printing towards implementing Industry 4.0: sustainability aspects, barriers and challenges. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 49(3), pp. 491–511. <https://doi.org/10.1108/IR-10-2021-0247>

Moshiri, M., Charles, A., Elkaseer, A., Scholz, S., Mohanty, S. & Tosello, G. (2020). An Industry 4.0 framework for tooling production using metal additive manufacturing-based first-time-right smart manufacturing system. *Procedia CIRP*, 93, pp. 32–37. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.151>

Narasimharaju, S.R., Zeng, W., See, T.L., Zhu, Z., Scott, P., Jiang, X. *et al.* (2022). A comprehensive review on laser powder bed fusion of steels: Processing, microstructure, defects and control methods, mechanical properties, current challenges and future trends. *Journal of Manufacturing Processes*, 75, pp. 375–414. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.033>.

Nazir, A., Gokcekaya, O., Masum Billah, K.M., Ertugrul, O., Jiang, J., Sun, J. *et al.* (2023). Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials. *Materials & Design*, 226, p. 111661. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111661>

Powell, D., Rennie, A.E.W., Geekie, L. & Burns, N. (2020). Understanding powder degradation in metal additive manufacturing to allow the upcycling of recycled powders. *Journal of Cleaner Production*, 268, p. 122077. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122077>

Shrinivas Mahale, R., Shamanth, V., Hemanth, K., Nithin, S.K., Sharath, P.C., Shashanka, R. *et al.* (2022). Processes and applications of metal additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 54, pp. 228–233. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.298>

Toyserkani, E., Sarker, D., Ibadode, O.O., Liravi, F., Russo, P. & Taherkhani, K. (2021). *Metal additive manufacturing*. Wiley.

Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A. & Hayward, K. (2021). Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges. *Applied Sciences*, 11(3), p. 1213. <https://doi.org/10.3390/app11031213>

Zhang, J., Cao, Q. & Lu, W.F. (2022). A review on design and removal of support structures in metal additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 70, pp. 407–411. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.277>

Zhu, J., Zhou, H., Wang, C., Zhou, L., Yuan, S., Zhang, W. (2021). A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1), pp. 91–110. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020>

LIITE A:

