

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

LISÄÄVÄLLÄ VALMISTUKSELLA TUOTETUT TYÖKALUT AUTOTEHTAAN  
KORIHITSAAMON TARPEISIIN

ADDITIVE MANUFACTURING IN TOOLING AT BODY-IN-WHITE

Lappeenrannassa 18.8.2020

Janne Sääski

Tarkastaja Professori Heidi Piili, TkT

Ohjaajat Advanced Project Engineer Joonas Pekkarinen, TkT

Tutkijatohtori Anna Unt, TkT

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT  
LUT Energiajärjestelmät  
LUT Kone

Janne Sääski

### **Lisäävällä valmistuksella tuotetut työkalut autotehtaan korihitsaamon tarpeisiin**

Kandidaatintyö

2020

44 sivua, 10 kuvaa

Tarkastaja: Professori Heidi Piili, TkT

Ohjaajat: Advanced Project Engineer Joonas Pekkarinen, TkT  
Tutkijatohtori Anna Unt, TkT

Hakusanat: Lisäävä valmistus, 3D-tulostus, työkalut

Tässä kandidaatintyössä käsitellään autotehtaan korihitsaamoon soveltuvia lisäävän valmistuksen menetelmiä, materiaaleja ja sovelluskohteita.

Parhaiten korihitsaamon työkalujen tarpeisiin soveltuvan metallien lisäävän valmistuksen menetelmän havaittiin olevan laserpohjainen jauhepetisulatus. (L-PBF) Nykyisen aihealueen tuntemuksen perusteella menetelmällä voidaan valmistaa työkaluja suurimmasta määrästä eri materiaaleja, sen laitteiden ja valmistajien tarjonta on laajinta ja sitä myös käytetään eniten muihin metallien lisäävän valmistuksen menetelmiin verrattuna. Laserpohjaisella jauhepetisulatuksella voidaan valmistaa kappaleita hyvin työkalukäyttöön soveltuvista metalleista, kuten alumiiniseoksesta, H13-työkaluteräksestä ja maraging-teräksestä. Oikeilla valmistus- ja viimeistelyparametreilla lisäävällä valmistuksella tuotettujen materiaalien mekaaniset ominaisuudet ovat perinteisillä menetelmillä, kuten valamalla ja tai koneistamalla tuotettujen kappaleiden tasolla.

Lisäävä valmistus on kuitenkin nuorehko ala, jolloin tutkittua tietoa on vielä vähän. Menetelmän työkalukäyttöön soveltamisen suhteen erittäin tärkeä puuttuva tieto on lisäävällä valmistuksella tuotettujen materiaalien väsymislujuus eli kestävyys pitkäaikaisessa käytössä. Monesta materiaalista ei ollut väsymislujuuden suhteen ollenkaan tietoa, ja tutkimuksissa, joissa asiaa oli tutkittu, ei oltu varmoja kappaleen optimaalisista valmistus- ja viimeistelyparametreista, jotka olisivat voineet parantaa kappaleen ominaisuuksia perinteisillä menetelmillä valmistettuihin kappaleisiin verrattuna.

Monella lisäävän valmistuksen menetelmällä ja materiaalilla on potentiaalia soveltua hyvin työkalukäyttöön tulevaisuudessa, mutta tiedon puuttuessa on toistaiseksi vaikea sanoa, mitkä potentiaalit voivat toteutua ja mitkä eivät.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT  
LUT School of Energy Systems  
LUT Mechanical Engineering

Janne Sääsäki

### **Additive Manufacturing in Tooling at Body-in-White**

Bachelor's thesis

2020

44 pages, 10 figures

Examiner: Professor Heidi Piili, D. Sc. (Tech.)

Supervisors: Advanced Project Engineer Joonas Pekkarinen, D. Sc. (Tech.)  
Post-doctoral researcher Anna Unt, D. Sc. (Tech.)

Keywords: Additive Manufacturing, 3D-printing, Tooling

The topic of this bachelor's thesis is the application of metal additive manufacturing in the tooling of the body shop of a car manufacturer.

The additive manufacturing method which is the best for the needs of body-in-white tooling is laser based powder bed fusion (L-PBF). Based on current knowledge, laser based powder bed fusion can be used to produce the largest range of materials compared to other additive manufacturing methods. It has also the largest offering of hardware and hardware manufacturers and has the biggest userbase of all additive manufacturing methods. Laser based powder bed fusion can be used to produce tooling from metals that are excellent for use in tooling, such as aluminium alloys, H13 tool steel and maraging steel. With the right manufacturing and finishing parameters, tools produced with additive manufacturing can have equal mechanical properties with tools manufactured with conventional methods, like casting or forging.

Since additive manufacturing is a relatively new field, there are some topics regarding it that have not yet been extensively studied. A very important piece of knowledge regarding the tooling applications of additive manufacturing which is still missing is the fatigue strength of the produced materials, i.e. their durability in long term use. There was no knowledge on the subject on many of the applicable materials. In the studies that addressed the subject, it was not certain whether optimal manufacturing and finishing parameters had been applied to the piece that was produced, and if applying them could have improved the piece's properties compared to having it produced with conventional methods.

Many additive manufacturing methods and materials currently have potential to be viable for tooling applications in the future, but due to the lack of knowledge on the subject, it is currently difficult to estimate what potential can be realised and what cannot.

## SISÄLLYSLUETTELO

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

<b>SISÄLLYSLUETTELO .....</b>	<b>4</b>
<b>LYHENNELUETTELO.....</b>	<b>5</b>
<b>1 JOHDANTO.....</b>	<b>6</b>
1.1 Tutkimuksen tausta .....	6
1.2 Tutkimusongelma.....	6
1.3 Tavoitteet .....	6
1.3.1 Tutkimuskysymykset .....	6
1.4 Tutkimusmenetelmät .....	7
1.5 Rajaukset.....	7
1.6 Tieteellinen anti.....	7
<b>2 TUTKIMUSMENETELMÄT .....</b>	<b>9</b>
2.1 Sovelletut tutkimusmenetelmät .....	9
<b>3 KIRJALLISUUSKATSAUS.....</b>	<b>10</b>
3.1 Korihitsaamon työkalujen ja niiden AM-valmistuksen nykytila .....	10
3.2 Lisäävän valmistuksen menetelmien esittely .....	13
3.3 AM-materiaalien ominaisuudet.....	19
3.4 Esimerkkejä lisäävän valmistuksen sovelluksista teollisuudessa.....	24
<b>4 TULOKSET .....</b>	<b>28</b>
<b>5 POHDINTA.....</b>	<b>29</b>
5.1 Työkalut, joita voidaan valmistaa hitsaamon tarpeisiin lisäävällä valmistuksella .....	29
5.2 Milloin kannattaa käyttää AM-valmistettuja työkaluja ja milloin perinteisiä työkaluja...30	
5.3 Työkalusuunnittelun tulevaisuuden trendit .....	32
5.4 Suositukset AM-tekniikoihin ja -materiaaleihin, joihin tulisi panostaa .....	35
<b>6 YHTEENVETO .....</b>	<b>38</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>41</b>

**LYHENNELUETTELO**

AM	Lisäävä valmistus (engl. additive manufacturing)
PBF	Jauhepetisulatus (engl. powder bed fusion)
L-PBF	Laserpohjainen jauhepetisulatus (engl. laser based powder bed fusion)
E-PBF	Elektronisuihkusulatus (engl. electron beam based powder bed fusion)
DED	Suorakerrostus (engl. directed energy deposition)

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Tämä kandidaatintyö tehtiin Valmet Automotive Oy:lle. Toimeksiantona oli selvittää mahdollisuuksia lisäävän valmistuksen (engl. additive manufacturing, lyh. AM) sovelluksille autotehtaan hitsaamossa. Lisäävällä valmistuksella tuotettuja osia on jo hyödynnetty kokoonpanon puolella korin paneeleita ja muita ulkoisia osia ihmisvoimin asennettaessa, mutta hitsaamon puolella työkalujen toleranssit ovat pienemmät ja niihin kohdistuvat voimat ovat suurempia. Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää kirjallisuustyönä lisäävän valmistuksen nykytila ja tulevaisuuden näkymät.

## 1.2 Tutkimusongelma

Kandidaatintyössä tutkittavat ongelmat vastaavat Valmet Automotiven tarpeisiin tehtaan tuotannossa. Hitsaamon tarpeita ajatellen on oleellista selvittää, mitä hitsaamon työkaluja voidaan valmistaa lisäävän valmistuksen menetelmillä. Toinen selvitettävä asia on, milloin on kannattavaa käyttää lisäävällä valmistuksella valmistettuja työkaluja, ja milloin perinteisillä menetelmillä valmistettuja työkaluja. Työssä tulisi myös selvittää, mihin lisäävän valmistuksen tekniikoihin, materiaaleihin ja käyttökohteisiin kannattaisi tulevaisuudessa panostaa. Edellä mainituissa tutkimuskysymyksissä tulisi myös ottaa huomioon tuotettavien sarjojen koon vaikutus.

## 1.3 Tavoitteet

Tutkimuksen tavoite on laajentaa Valmet Automotiven tietoa lisäävän valmistuksen sovelluksista korihitsaamon työkaluissa ja selvittää, mitkä ovat lisäävän valmistuksen tulevaisuuden näkymät työkaluvalmistuksen näkökulmasta.

### 1.3.1 Tutkimuskysymykset

Kandidaatintyön on määrä selvittää lisäävän valmistuksen mahdollisuuksia sekä valmistusteknisestä että taloudellisesta näkökulmasta.

Valmistustekninen näkökulma koostuu kysymyksistä alan statuksesta ja tulevaisuudesta sekä niiden merkityksestä Valmet Automotivelle:

- Mikä on työkalujen lisäävän valmistuksen tämänhetkinen tila?
- Mihin suuntaan lisäävä valmistus on menossa työkalujen valmistuksessa?
- Mikä on eri lisäävän valmistuksen menetelmien kypsyystaso työkalukäyttöä ajatellen?
- Mikä on hitsaamon näkökulma eri lisäävän valmistuksen menetelmiin?
- Mitä hitsaamon työkaluja, esimerkiksi tarttuvia tai jigejä, voidaan valmistaa lisäävän valmistuksen menetelmillä?
- Mihin käyttökohteisiin työkaluja voidaan valmistaa?

Taloudellisiin seikkoihin liittyvät kysymykset pyrkivät selvittämään uuden tekniikan hyötyjä nykyisiin menetelmiin verrattuna:

- Miten tuotettavan sarjan koko vaikuttaa käytettävien työkalujen kannattavuuteen?
- Mihin lisäävän valmistuksen tekniikoihin ja materiaaleihin kannattaa panostaa tulevaisuudessa, ja miten tuotettavan sarjan koko vaikuttaa tähän?
- Milloin on kannattavaa käyttää lisäävällä valmistuksella tuotettuja työkaluja ja milloin perinteisillä menetelmillä valmistettuja työkaluja?

#### 1.4 Tutkimusmenetelmät

Kandidaatintyö suoritetaan kirjallisuustyönä, jolloin pääasiallinen tutkimustyö koostuu tiedonhankinnasta eri lähteistä ja niiden perusteella johtopäätösten tekemisestä. Aineistona hyödynnetään tiedonlähteitä eri lisäävän valmistuksen menetelmistä sekä tutkimuksia eri materiaalien ominaisuuksista, kuten taloudellisesta kannattavuudesta, mekaanisista ominaisuuksista ja pitkän aikavälin kestävydestä eli väsymislujudesta.

#### 1.5 Rajaukset

Aihe rajataan siten, että sillä täytetään autotehtaan hitsaamon tarpeet. Työssä käsitellään pääasiassa metallien lisäävää valmistusta, koska niiden ominaisuuksien oletetaan täyttävän hitsaamon työkalujen asettamat vaatimukset pitkäaikaiselle käytölle muoveja paremmin.

#### 1.6 Tieteellinen anti

Kirjallisuustyönä suoritettu työ ei luo uutta tietoa käytännön kokeilla, vaan koostaa aihepiiriä käsitteleviä lähteitä yhteen ja muodostaa niiden sisältämän tiedon perusteella johtopäätöksiä vastauksina tutkimuskysymyksiin. Työssä selvitetään lähdemateriaalista minkälaisia

vaatimuksia työkalukäyttö asettaa materiaaleille ja minkälaisia ominaisuuksia lisäävällä valmistuksella tuotetuilla materiaaleilla on, ja muodostettiin johtopäätöksiä näiden tietojen perusteella. Kandidaatintyö kokoaa yhteen korihitsaamon työkalukäyttöön soveltuvat lisäävän valmistuksen menetelmät ja materiaalit, perustelee miksi ne soveltuvat parhaiten haluttuun tarkoitukseen ja antaa suuntaviivoja lisäävään valmistukseen pohjautuvat tuotannon laajentamiseen.



## 2 TUTKIMUSMETODIT

Kandidaatintyö tehtiin kirjallisuustyönä. Työtä varten ei tehty kokeellisia tutkimuksia, vaan perehdyttiin aiheeseen liittyvään kirjallisuuteen ja muuhun aineistoon, joiden pohjalta muodostettiin perusteltuja johtopäätöksiä tutkimuskysymysten vastauksiksi.

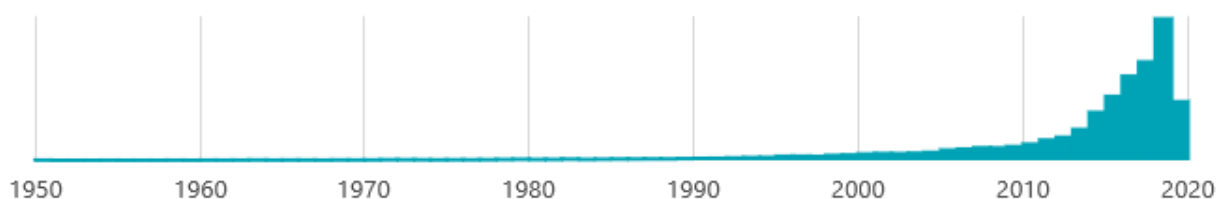
### 2.1 Sovelletut tutkimusmenetelmät

Kirjallisuustutkimusta varten tutkittiin aihepiirin kirjallista aineistoa. Näistä merkittävimmissä roolissa olivat eri lisäävän valmistuksen menetelmistä kertovat tietokirjat. Kirjoista koostettiin kirjallisuuskatsaukseen perustietoa yleisimpien lisäävän valmistuksen menetelmien ominaisuuksista, kuten toimintaperiaatteesta, työstönopeudesta ja tarkkuudesta, materiaaleista sekä menetelmälle ominaisista eduista ja ongelmista. Tarkempia tietoja, kuten eri materiaalien mekaanisia ominaisuuksia, sovelluskohteita ja väsymislujuutta varten viitataan myös kutakin aihetta käsitteleviin tutkimuksiin. Edellä mainittujen lähteiden pohjalta muodostettiin vastaukset tutkimuskysymyksiin. Työssä hyödynnettiin myös jonkin verran eri yritysten case-esimerkkejä lisäävän valmistuksen sovelluksista teollisuudessa. Tällaisia olivat tapaukset, joissa lisäävällä valmistuksella oli valmistettu kokonaisia työkaluja, joilla korvattiin perinteisillä menetelmillä valmistettuja kokoonpanoja tai tapaukset, joissa menetelmällä oli valmistettu materiaaleja työkalujen valmistukseen.

### 3 KIRJALLISUUSKATSAUS

#### 3.1 Korihitsaamon työkalujen ja niiden AM-valmistuksen nykytila

Ensimmäiset lisäävän valmistuksen materiaalit ja laitteet keksittiin Gibsonin, et al., 2015, mukaan 1980-luvulla (Gibson, Rosen, Stucker 2015, s. 37-38). Alan kaupallinen toiminta alkoi 1990-luvun alussa ensimmäisten yritysten ja kaupallisten laitteiden lanseerauksen muodossa. 2010-luvulla tekniikka on kehittynyt niin kypsäksi, että sen hyödyntäminen teollisuuden sovelluksissa on tullut mahdolliseksi. Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen on alkanut yleistyä vasta viimeisen kymmenen vuoden aikana kehittyneemmän mallinnus- ja tulostuslaitteiston yleistymisen ansiosta, minkä huomaa alan kirjallisuutta etsiessä. Lähteiden julkaisutahti on kiihtynyt vuosi vuodelta vuoteen 2019 tultaessa. Kuvassa 1 esitetään alan julkaisujen suhteellista vuosittaista julkaisumäärää toukokuussa 2019 tarkasteltuna.

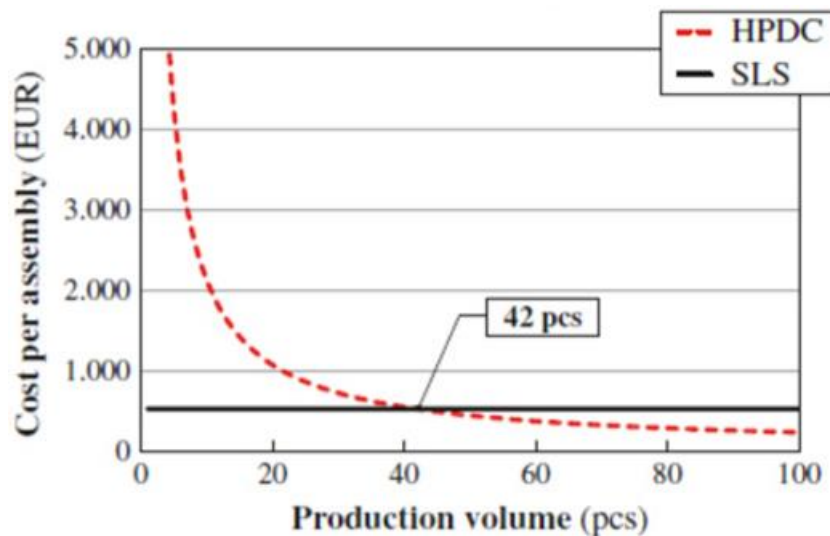


**Kuva 1.** Lisäävää valmistusta käsittelevien teosten suhteellinen vuosittainen julkaisumäärä toukokuussa 2019 tarkasteltuna. (LUT Finna, hakuterminä ”Additive Manufacturing”, 2019)

Kuvasta 1 voidaan havaita, että uusien julkaisujen määrä on lähtenyt kasvuun 1990-luvulla, ja uusien julkaisujen määrän kasvu on 2010-luvulla erittäin voimakasta.

Lisäävä valmistus on pieniä eriä tuottaessa kustannustehokas valmistusmenetelmä perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. Tämä johtuu yleisesti ottaen siitä, että valmistusprosessia varten ei tarvita tulostuslaitteiston lisäksi muita työkaluja sekä siitä, että materiaalia kuluu vain kunkin osan valmistamiseen tarvittava määrä. Sovelluskohteesta riippuen säästöjä voi myös tulla sellaisen tuotteen valmistuksessa, mikä hyötyy ominaisuuksiensa puolesta lisäävän valmistuksen tuomista hyödyistä. Lisäävän valmistuksen laitteiston hankintakustannukset pienentävät kuitenkin saavutettua

kustannushyötyä. Suuria eriä tuotettaessa lisäävä valmistus ei tyypillisesti ole enää hinnan suhteen kilpailukykyinen perinteisten menetelmien kanssa. Vuonna 2012 tehdyssä tutkimuksessa esitellyssä esimerkkitilanteessa pienlentokoneen laskutelineen valmistaminen lisäävällä valmistuksella oli Atzenin, et al., 2012, mukaan perinteisillä menetelmillä valmistamista kannattavampaa 42 osaan asti, jonka jälkeen osan valmistaminen alkoi olla kannattavampaa (Atzeni, Salmi, 2012, s. 1154). Asia ilmenee kuvan 2 kannattavuuskuvaajasta.

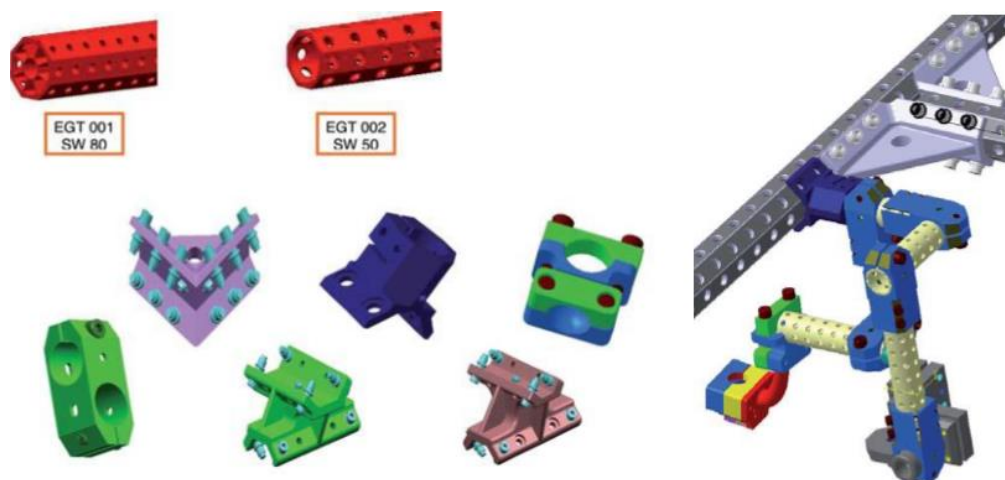


**Kuva 2.** Lisäävän valmistuksen kannattavuuskuvaaja (Atzeni, Salmi, 2012, s. 1154)

Kuvan 2 kannattavuuskuvaajasta voidaan havaita, että lisäävälle valmistukselle tyypillisesti valmistetun kappaleen yksikkökustannus pysyy vakiona, mikä tarkoittaa, että pieniä eriä tuotettaessa lisäävä valmistus on valmistamista kannattavampaa, mutta vastaavasti valmistuksen kustannukset laskevat nopeasti, kun tuotantomääriä kasvatetaan.

Toisessa esimerkissä yksittäisen osan valmistuskustannuksia tarkasteltaessa merkittävimmät osat kustannuksista syntyivät AM-laitteiston hinnasta ja valmistusajasta. Piili, et al., 2015, totesivat tutkimuksessa, että osien valmistaminen yksi kerrallaan oli siten erittäin kustannustehotonta laitteen koko kapasiteetin hyödyntämiseen verrattuna (Piili et al., 2015, s. 394-395). Tulevaisuutta ajatellen suurin potentiaali lisäävän valmistuksen hintojen laskemiselle olisi laitteiston halpeneminen (Piili et al. 2015, s. 395).

Hitsaamon robottitarttujen valmistus Valmet Automotivella tapahtuu Leinon, 2017, mukaan pääasiassa modulaarisia Euro Gripper Tooling-sarjan (EGT) osia käyttämällä (Leino, 2017 s. 23). Kuva valikoimasta eri EGT-komponentteja on kuvassa 3.



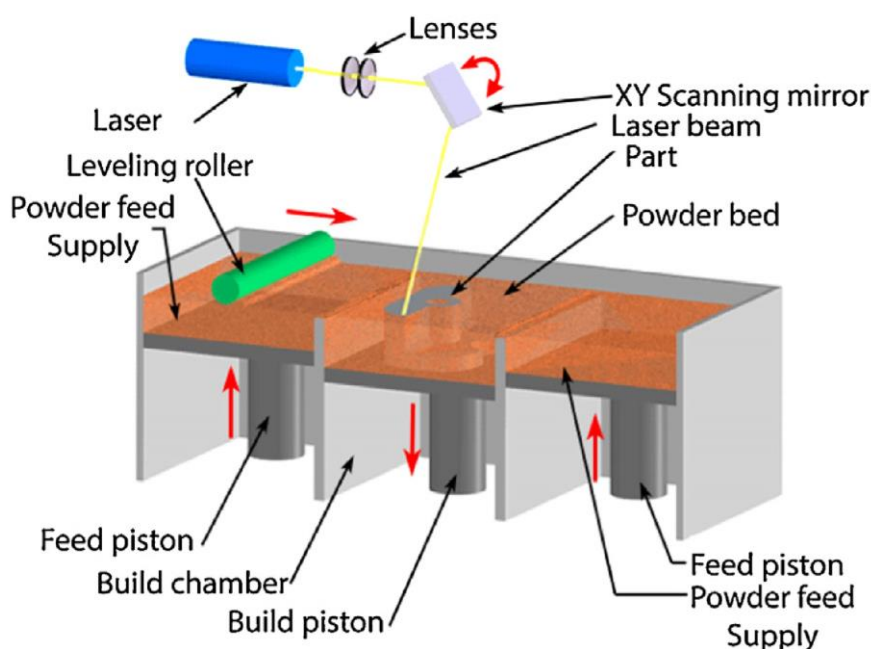
**Kuva 3.** Valikoima Euro Gripper Tooling -komponentteja sekä esimerkki EGT-osilla valmistetusta työkalukokoonpanosta. (Leino 2017, s. 25)

EGT:ssä on kyse valikoimasta standardiosia, joita käyttämällä voidaan valmistaa tarttujatyökalun koko runko ja asentaa siihen helposti kaikki liitännät. Modulaarista rakennetta suositellaan kaikkien valmistettavien tarraimien pohjaksi sekä työkalujen suunnittelun helppouden ja syntyvien kustannussäästöjen takia. Suunnittelun etuina ovat työkalun helppo säätäminen, mahdollisuus valmiin 3D-osakirjaston hyödyntämiseen ja mahdollisuus samojen standardiosien käyttämiseen kaikissa työkaluissa. Kustannussäästöt syntyvät Leinon, 2017, mukaan nopeammasta suunnitteluprosessista sekä mahdollisuudesta pienempään varastoon tarttujen käyttäessä samoja varaosia. (Leino, 2017, s. 25)

Jigejä käytetään, kun useaa osaa ollaan liittämässä yhteen hitsaamalla, liimaamalla, niittaamalla tai jollakin näiden yhdistelmällä. Jigin toimintaperiaatteena on pitää osat paikallaan halutussa asennossa ja paikassa toisiinsa ja robottiin nähden liitännän aikana. Mekaaniset rasitukset käyttökertojen aikana eivät ole suuria, mutta työkalun ulkopinnat kuluvat pois sitä mukaa kun osia asetetaan siihen, koska jigin toiminta perustuu fyysiseen kontaktiin. Kun työkalun pinta kuluu liikaa, sen geometrinen tarkkuus heikkenee, ja liitettävien osien välys työkaluun nähden kasvaa. Joidenkin sovellusten geometriset toleranssit voivat olla hyvinkin pieniä (noin 0,5 mm), jolloin melko pienikin kuluma voi tehdä jigistä käyttökeltottoman.

### 3.2 Lisäävän valmistuksen menetelmien esittely

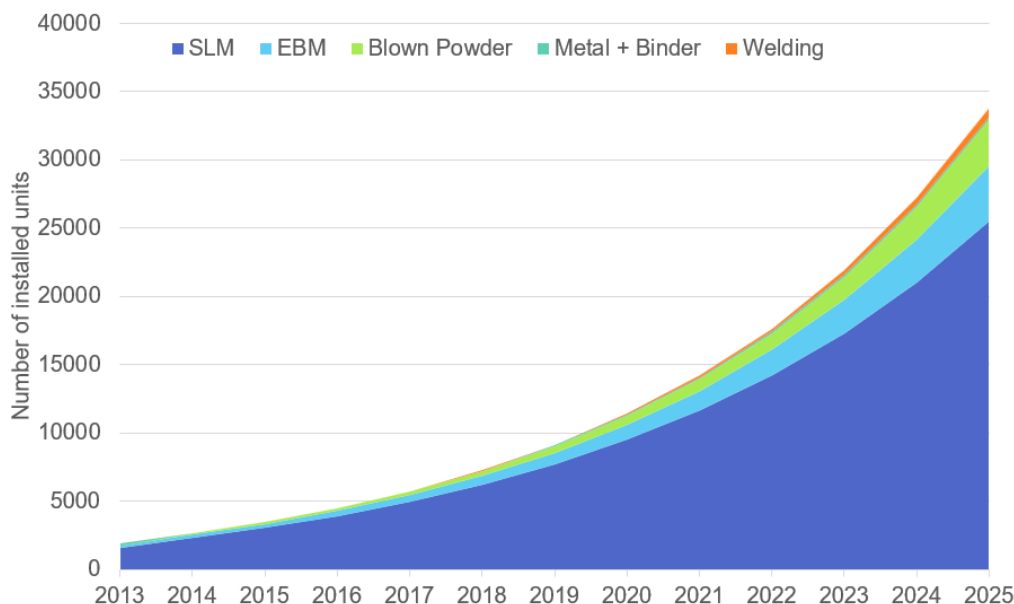
Jauhepetisulatus (engl. powder bed fusion, lyh. PBF) on lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa sulattava energia kohdistetaan haluttuun kohtaan vapaana olevaa jauhetta kappaleen valmistamiseksi kerros kerrokselta. Sulattavan energian lähteenä ollessa lasersäde, menetelmää kutsutaan laserpohjaiseksi jauhepetisulatukseksi (engl. laser based powder bed fusion, lyh. L-PBF). Kun kerros on saatu valmiiksi, uusi kerros jauhetta levitetään Hölker-Jägerin, et al., 2017, ja Murrin, et al., 2017, mukaan edellisen päälle (Hölker-Jäger & Tekkaya, 2017, s. 451; Murr et al., 2012, s. 2-3). Havainnekuva laserpohjaisesta jauhepetisulatuksesta on kuvassa 4.



**Kuva 4.** Havainnekuva laserpohjaisesta jauhepetisulatuksesta (Chen et al., 2017, s. 125). Otsikot myötöpäivään ylhäältä alkaen: linssit, XY-skannauspeili, lasersäde, osa, jauhepeti, syöttömäntä, jauhevarasto, rakennusmäntä, rakennuskammio, syöttömäntä, jauhevarasto, tasoitusrulla, laser.

Yksi jauhepetisulatuksen merkittävistä eduista on sen mahdollistama lähes rajoittamaton vapaus valmistettavan kappaleen geometrian suhteen. Valmistamalla kappale kerros kerrokselta, esimerkiksi tiettyjen lovien [undercut] ja kolmiulotteisten jäähdytyskanavien luominen kappaleen sisälle on mahdollista. Valmistuksen yhteydessä ei myöskään tarvita aputyökaluja.

IDTechExin julkaisemasta markkinatutkimuksesta (2017) käy ilmi, että jauhepetisulatus on selkeästi eniten käytetty lisäävän valmistuksen menetelmä. Kuvassa 5 on esitetty lisäävän valmistuksen markkinaosuus vuosina 2013-2025.



**Kuva 5.** Metallien lisäävän valmistuksen menetelmien markkinaosuus vuosina 2013-2025 asennettujen laitteistojen lukumäärän perusteella (IDTechEx, 2017). SLM: laserpohjainen jauhepetisulatus, EBM: elektronisuihkujauhepetisulatus, blown powder: suorakerrostus, metal + binder: sideaineen suihkutetus, welding: hitsaus.

Jauhepetisulatus on yksi ensimmäisinä keksityistä lisäävän valmistuksen menetelmistä, sillä ensimmäisen patentin rekisteröi Gibsonin, et al., 2015, mukaan DTM Corporation vuonna 1986 (Gibson et al., 2015, s. 34). Ensimmäiset laitteet valmistivat kappaleet polymeerijauheesta. Ensimmäinen menetelmää hyödyntävä kaupallinen laite oli saman yrityksen kehittämä polymeerejä valmistava Selective Laser Sintering Sinterstation 2000 vuodelta 1992 (Gibson et al., 2015, s. 132). DTM Corporation on osa 3D Systems USA:ta vuoden 2001 yritysoston seurauksena. Menetelmä on suosittu erityisesti koska se soveltuu erinomaisesti pienten ja keskisuurten kappaleiden sekä geometrisesti monimutkaisten kappaleiden valmistukseen (Gibson et al., 2015, s. 144). Metallien jauhepetisulatuksen kehitti EOS Finland Oy Turussa vuonna 1994 (Luotala, J., 2017).

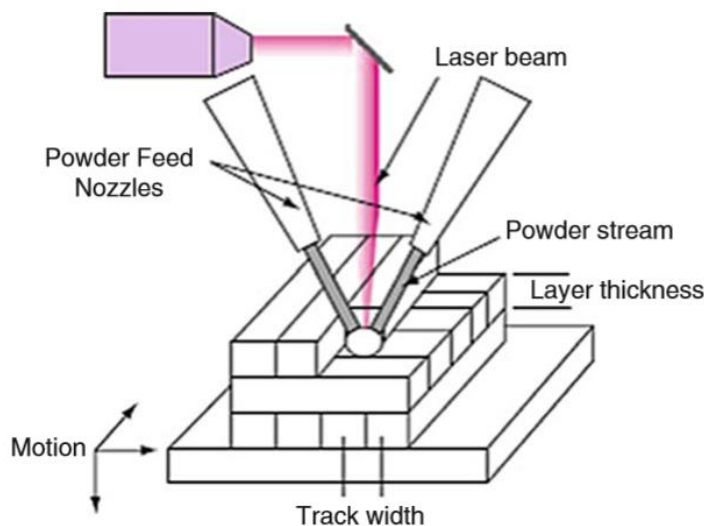
Jauhepetisulatuksen piiriin kuuluu useita eri toimintaperiaatteita. Matalan lämpötilan laitteet soveltuvat polymeerien lisäävään valmistukseen, ja toimivat CO<sub>2</sub>-lasereilla ja 0,1-3% happipitoisuudella (Gibson et al., 2015, s. 133). Niillä ei voida käsitellä keraameja tai metalleja. Metallisia ja keraamisia jauheita voidaan 3D-tulostaa käyttämällä kuitulaseria (Gibson et al., 2015, s. 134-135). Lasersäde kohdistetaan sulatettavaan kohtaan peilien avulla, ja kappale valmistetaan kerros kerrokselta.

Metallien valmistukseen voidaan hyödyntää Gibsonin, et al., 2015, ja Murrin, et al., 2012, mukaan myös elektronisuihkusulatusta (engl. electron beam based powder bed fusion, lyh E-PBF) (Gibson et al., 2015, s. 136-138; Murr et al., 2012, s. 2). Tässä jauhetta sulatetaan halutusta kohdasta siihen kohdistetulla elektronisuihkulla. Menetelmän toimintaperiaate on muuten sama kuin metallien laserpohjaisella jauhepetisulatuksella (Murr et al., 2012, s. 2). Lasersädettä käytettäessä jauhe sulaa lasersäteen aallonpituuden sisältämän energian absorboituessa metallijauheeseen, mutta elektronisuihkumenetelmässä jauhetta sulatetaan suureen nopeuteen kiihdytettyjen elektronien kineettisellä energialla. Lähes valon nopeutta kulkevien elektronien hyödyntäminen edellyttää, että laitteen sisällä olevassa valmistuskammiossa on oltava tyhjiö. Muuten elektronit törmäilisivät ympäröivän kaasuatomeihin, ja säde hajaantuisi liikaa. Kammioon lisätään kuitenkin pieni määrä inerttiä kaasua, jolla poistetaan kaasumaisia sivuaineita ja ylimääräistä happea. Koska elektronisuihkua hallitaan sähkömagnetismin avulla, sitä voidaan siirtää tarvittaessa erittäin nopeasti pisteestä toiseen. Käsiteltävän materiaalin tulee kuitenkin johtaa sähköä, koska muuten säteen toinen pää saa negatiivisen latauksen, ja aiheuttaa elektronisuihkun hajaantumisen. Siksi kyseinen menetelmä soveltuu ainoastaan sähköä hyvin johtaville metallijauheille. Negatiivista latausta vältettäessä elektronisuihku on käytännössä aina melko hajanainen. Tämän takia syntyvä sula on suurempi ja menetelmän tarkkuus ja sillä saavutettava pinnanlaatu on lasersäteellä saavutettavaa heikompi. (Gibson et al., 2015, s. 138) Menetelmän suurin etu laseriin verrattuna on korkeatehoisen laitteiston pienempi hankintakustannus (Gibson et al., 2015, s. 138). Toisaalta tulevaisuudessa elektronisuihkumenetelmän mahdollistama valmistusnopeus voi olla sille merkittävä etu. Jo nyt menetelmällä kappaleita valmistettaessa ei tarvita erillistä lämmitinlaitetta, koska jauheen pinnan yli nopeasti liikuteltava elektronisuihku kykenee lämmittämään jauheen riittävän nopeasti. (Gibson et al., 2015, s. 139) Optimistinen näkemys on, että elektronisuihkumenetelmässä voidaan vähentää kappaleen tukirakenteita hyvän

valmistuksenaikaisen lämpökäsittelyn avulla, jolloin myös kappaleen jälkikäsittelyaika lyhenee. (Gibson et al., 2015, s. 140)

Jauhepetisulatuksella voidaan valmistaa osia monista eri materiaaleista, kuten eri muoveista ja metalleista. Muoveista menetelmälle soveltuvat Gibsonin, et al., mukaan hyvin polyamidijauheet joko lasitäytteellä tai ilman sekä polystyreenit (Gibson et al., 2015, s. 109). Lasitäyte parantaa kappaleen lujuutta, mutta tekee siitä hauraamman. Polystyreeneillä saadaan aikaan hyvä pinnanlaatu. H13- ja A6-jauheita voidaan hyödyntää työkaluissa polymeeriliitosaineen ansiosta. Lämpökäsittelyssä tulee kuitenkin ottaa huomioon kappaleen mahdollinen vääntyminen eri lämpötiloissa. Metallien lisäävässä valmistuksessa käytettäviä teräksiä ovat ruostumattomat teräkset, työkaluteräkset, maraging-teräkset sekä alumiiniseokset (IDTechEx 2017). Edellä mainittuja materiaaleja on saatavilla monelta eri valmistajalta.

Kolmanneksi käytetyin lisäävän valmistuksen menetelmä on suorakerrostus (engl. directed energy deposition, lyh. DED) (IDTechEx, 2017). Suorakerrostuksen materiaalina voidaan hyödyntää keraameja, polymeerejä tai metalleja, mutta metallien hyödyntäminen on Gibsonin, et al., 2015, mukaan yleisintä (Gibson et al., 2015, s. 245). Menetelmän toimintaperiaatteena on materiaalin lisääminen jauheena tai lankana kerros kerrokselta energianlähteen avulla sulatetun alueen päälle. Erona jauhepetisulatukseen on, että jauhemainen materiaali lisätään lämmitetyn alueen päälle ilman, että aine olisi jo levitetty lämmitettävälle alueelle. Havainnekuva suorakerrostuksen toiminnasta on kuvassa 6 (Gibson et al., 2015, s. 246).





**Kuva 6.** Havainnekuva suorakerrostuksesta (Gibson et al., 2015, s. 246). Termit myötöpäivään ylhäältä alkaen: lasersäde, jauhesuihku, kerrospaksuus, palon leveys, liike, jauheensyöttösuuttimet.

Suorakerrostuksessa kerroksen lämmittämiseen voidaan käyttää joko lasersädettä tai elektronisuihkuja. Laser voi olla Shamsaein, et al., 2015, mukaan joko kuitulaser tai CO<sub>2</sub>-laser (Shamsaei et al., 2015, s. 13). Jokainen pyyhkäisy lämmittävällä säteellä luo palon sulaa ainetta, ja prosessissa kappale valmistetaan lisäämällä materiaalia näihin palkoihin kerros kerrokselta. Jauhepohjaisessa suorakerrostuksessa suihkutettavan jauheen kineettinen energia on suurempaa kuin siihen kohdistuva painovoima. Tällöin jauheen lisääminen muistakin suunnista kuin ylhäältä alaspäin on mahdollista, jolloin kappaleiden valmistaminen onnistuu Gibsonin, et al., mukaan 3-, 4- tai 5-akselisesti (Gibson et al., 2015, s. 248). Materiaaleiksi soveltuvat melkein kaikki metallit, mutta esimerkiksi kullan ja joidenkin alumiini- ja kupariseosten korkea lämmönjohtavuus ja heijastavuus vaikeuttavat niiden työstämistä (Gibson et al., 2015, s. 258). Menetelmän etuna on kuitenkin sen kyky käsitellä vaativaan käyttöön soveltuvia materiaaleja, kuten titaani-, nikkeli-, kupari- ja alumiiniseoksia (Shamsaei et al., 2015, s. 13). Keraamien hyödyntämisessä on vaikeinta niiden korkea sulamispiste, minkä takia niitä käytetään usein sekoitettuna metallien kanssa (Gibson et al., 2015, s. 258). Yleisesti ottaen hyvin hitsaamiseen soveltuvat materiaalit soveltuvat hyvin myös suorakerrostukseen (Gibson et al., 2015, s. 258).

Suorakerrostukselle ominaisia ominaisuuksia ovat Gibsonin, et al., 2015, mukaan laajat mahdollisuudet kappaleen mikrorakenteen hallintaan sekä kyky osien korjaamiseen ja päällystämiseen (Gibson et al., 2015, s. 266). Mikrorakenteen hallinta on mahdollista prosessiparametreja säätämällä. Näitä ovat esimerkiksi materiaalin tai materiaalisekoituksen valinta, jauheen syöttönopeus ja raekoko, metallisulan pinta-ala ja aineen jäähtymisnopeus. Tällä saavutettavat edut voivat olla esimerkiksi korkea myötö- ja vetolujuus hyödyntäen hienoa raerakennetta. Käytännössä materiaalin mikrorakennetta voidaan optimoida kullekin käytettävälle materiaalille tai niiden seokselle optimaaliseksi. Tätä ominaisuutta hyödynnetään myös kappaleiden päällystyksessä (Gibson et al., 2015, s. 267). Suorakerrostuksen mahdollistama raerakenteen optimointi on hyödyksi eri materiaaleilla päällystettäessä, mikä mahdollistaa suuremman sovelluskohteiden määrän. Laajemmassa mittakaavassa tehtynä menetelmän avulla voidaan myös korjata osia, joita olisi liian kallista

korvata kokonaan uusilla osilla. Suorakerrostuksen kyky tuottaa erittäin lujaa materiaalia mahdollistaa vaativissa sovelluksissa käytettävien osien korjaamisen. Esimerkiksi suihkumoottorien lapojen korjaaminen suorakerrostuksella on paljon kustannustehokkaampaa kuin kokonaan uuden kokoonpanon valmistaminen (Gibson et al., 2015, s. 266). Menetelmän ongelmia ovat huono pinnanlaatu metallisulan suurehkon pinta-alan takia sekä hidas valmistusnopeus (Gibson et al., 2015, s. 266; IDTechEx, 2017). Mitä tarkempi lopputulos halutaan, sitä pienempää metallisulaa on käytettävä, joka puolestaan rajoittaa suurinta jauheensyöttönopeutta. Suurempi valmistusnopeus taas heikentää kappaleen pinnanlaatua ja pienimpien valmistettavien dimensioiden kokoa. Siksi parametrien asettamisessa tulee tasapainoilla valmistusnopeuden, valmistustarkkuuden ja optimaalisen mikrorakenteen välillä. (Gibson et al., 2015, s. 266)

Sideaineen suihkutuspöly on Gibsonin, et al., 2015, mukaan lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa jauhepartikkelit liitetään yhteen sideaineella. Partikkelit ovat halkaisijaltaan muutama kymmenen mikrometriä. Kappaleet valmistetaan kerros kerrokselta jauhepedillä samaan tyyliin kuin jauhepetisulatuksessakin, mutta erona on, että sideaineen suihkutuksessa jauhepartikkelit liitetään yhteen sideaineella, eikä energianlähteen avulla sulattamalla. (Gibson, et al., 2015, s. 205) Menetelmän etuna on mahdollisuus valmistaa kaikkien jauhepedillä olevien osien kerrokset samaan tahtiin yhdellä pyyhkäisyllä, toisin kuin jauhepetimenetelmässä, jossa energianlähde sulattaa uuden kerroksen yksi kappale kerrallaan (Desktop Metal (c)). Sideaineen suihkutuksen haittapuolena on menetelmän monimutkaisuus (Gibson, et al., 2015, s. 184-185). Menetelmää hyödyntävät muun muassa yritykset XJet (Xjet) ja Desktop Metal (Desktop Metal (a)). Sideaineen suihkutuksella voidaan valmistaa kappaleita myös monista metalleista, kuten H13-työkaluteräksestä ja ruostumattomasta 316L-teräksestä (Desktop Metal (b)).

Metalleille sovellettavissa oleva lisäävä valmistusmenetelmä on Gibsonin, et al., 2015, mukaan myös arkkilaminointi, jossa hitsataan ultraäänien avulla ohuita kerroksia päällekkäin tai sivuttain työstettävää materiaalia sulattamatta. Prosessin lopuksi porrastukset koneistetaan pois. (Gibson, et al., 2015, s. 228) Menetelmää soveltaa muun muassa Fabrisonic-niminen yritys. Arkkilaminoinnin etuna on, että matalien, n. 120 °C työstölämpötilojen ansiosta valmistettavan metallisen kappaleen kiderakenne ei koe

muutoksia korkeiden lämpötilojen takia. Menetelmällä myös voi liittää yhteen keskenään erilaisia metalleja, ilman, että niiden liitoskohtaan jää haurasta kiderakennetta. (Fabrisonic)

Muita lisäävän valmistuksen menetelmiä ovat materiaalin pursotus ja valokovetus altaassa. Näille ei kuitenkaan ole Gibsonin, et al., 2015, mukaan toistaiseksi kehitetty työkalukäyttöön soveltuvien metallien valmistamiseen kykeneviä menetelmiä tai laitteita. (Gibson, et al., 2015, s. 163, s. 84)

### 3.3 AM-materiaalien ominaisuudet

Lisäävää valmistusta voi soveltaa joko polymeereille, metalleille tai keraameille. Polymeerejä on valmistettu lisäävästi pisimmän aikaa, ja lisäävän valmistuksen kehittäminenkin alkoi ensin muovien valmistuksella. Metallien lisäävä valmistus on yleistynyt viimeisten 20 vuoden aikana, mutta ei ole vielä aivan yhtä laajaa tai hyvin tunnettua kuin muovien lisäävä valmistus. Keraamien lisäävää valmistusta on Gibsonin, et al., mukaan sovellettu epäsuorassa valmistuksessa valumuotteina muita materiaaleja valamalla valmistettaessa (Gibson, et al., 2015, s. 133).

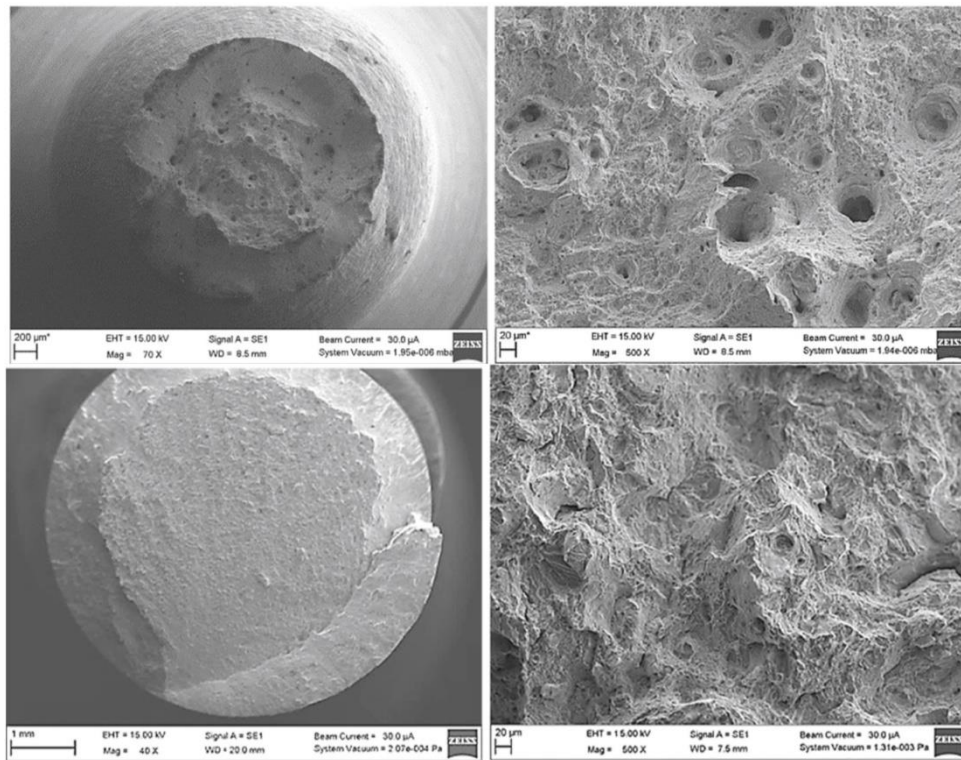
Tarjolla olevien muovilaatujen määrä polymeerien lisäävässä valmistuksessa on varsin laaja. Kaikista kestävimmit materiaalit ovat polykarbonaatti (PC), polypropyleeni (PP) ja copolyester (CPE) (Ultimaker). Ne kaikki kestävät 100-110 asteen lämpötiloja, ja ovat lisäävällä valmistuksella tuotetuista muoveista sitkeimpiä. Muovien valmistuksessa voidaan käyttää myös jauhepetisulatusta, mutta toinen yleinen muovien lisäävän valmistuksen menetelmä on materiaalin pursotus. Materiaalin pursotuksessa on Gibsonin, et al., mukaan kyse prosessista, jossa muovilankaa sulatetaan AM-laitteen tulostinkärjessä, joka levittää sen sulaneena kerroksittain valmistettavan osan päälle (Gibson, et al., 2015, s. 147).

Lisäävällä valmistuksella tuotetut työkalut ovat ilman lämpökäsittelyä Åsbergin, et al. 2019, ja Monkovan, et al., 2019, mukaan perinteisillä menetelmillä valmistettuihin työkaluihin verrattuna merkittävästi heikompia sekä mekaanisilta ominaisuuksiltaan että väsymislujuudeltaan (Åsberg, et al., 2019, s. 584; Monkova, et al., 2019, s. 802-803). Siksi kappaleiden viimeisteleminen lämpökäsittelyllä on pakollinen osa metallien lisäävää valmistusta. Mower, et al., 2015, ja Deirmina, et al., 2019, totesivat tutkimuksissaan, että tämä koskee vastaavasti sekä alumiiniseoksesta (Mower & Long, 2015, s. 212) että

työkaluteräksestä (Deirmina et al., 2019, s. 119-120) valmistettuja kappaleita. Molempien edellä mainittujen materiaalien ongelmana on niiden huokoisuus tulostuksen jälkeen. Huokoisuuden takia lujuuskokeissa ensimmäiset repeämät alkavat useimmiten kappaleiden ulkosivuilta pienten huokosten kohdalta. Poistettaessa ulkosivujen huokokset kappaleen kylkiä koneistamalla repeämät syntyvät Mowerin, et al., 2015, mukaan heti kappaleen pinnan alla seuraavan huokosen kohdalla (Mower & Long, 2015, s. 206). Kappaleen lujuus paranee lämpökäsittelyllä. Alumiinin tapauksessa T6-lämpökäsittelyllä materiaalin väsymislujuus parani 30-50% (Mower & Long, 2015, s. 210). Työkaluteräksen kohdalla vertailtiin karkaisua, hehkutusta sekä niiden yhdistelmää. Murtolujuudet kaikilla eri käsittelytavoilla olivat Deirminan, et al., 2019, mukaan melko samanlaisia, mutta hehkuttamalla saatiin martensiittisinta ja siten kovinta materiaalia (Deirmina et al., 2019, s. 113).

H13-työkaluteräksen kohdalla paras viimeistelymenetelmä materiaalin huokoisuuden vähentämiseksi on Åsbergin, et al. 2019, mukaan kuuma isostaattinen puristus (Åsberg et al., 2019, s. 589). Tutkimuksessa vertailtiin kolmea eri lämpökäsittelymenetelmää. Kaikista koetta varten lisäävällä valmistuksella tuotetuista osista poistettiin valmistuksen aikana syntyneitä jännityksiä pitämällä niitä 8 tunnin ajan 650 asteen lämmössä. Kolmannes kappaleista testattiin vain tämän käsittelyn läpikäyneenä. Toinen kolmasosa käsiteltiin lisäksi tyhjiöuunissa 1020 asteen lämpötilassa 70-75 minuuttia, jonka jälkeen ne karkaistiin työssä. Tämän jälkeen niitä käsiteltiin kahdesti 585 asteessa 2,25-3 tuntia, minkä jälkeen ne olivat valmiita testattavaksi. Viimeinen kolmasosa testikappalemäärästä käsiteltiin jäännösjännitysten poiston lisäksi myös kuumassa isostaattisessa puristuksessa 6 tuntia 1130 asteen lämpötilassa ja 100 MPa paineessa, minkä jälkeen niille suoritettiin vielä sama lämpökäsittely kuin edellisellekin kolmannekselle testikappaleista. (Åsberg et al., 2019, s. 585) Perinteisillä menetelmillä tuotettuun H13-teräkseen verrattuna testatuista viimeistelymenetelmistä vain pelkällä jäännösjännitysten poistolla hävitään myötö- ja vetolujuudessa. Muilla menetelmillä saavutetaan molemmilla saroilla parempia tuloksia. Kuumalla isostaattisella puristuksella käsitelty materiaali oli kuitenkin muita testimateriaaleja selvästi vähemmän huokoista ja myös jonkin verran kovempaa. (Åsberg et al., 2019, s. 586)

Maraging-teräs on työkaluterästä, jossa materiaalin lujuus on saavutettu hiilen sijaan nikkeliä. Tämän johdosta materiaali soveltuu hyvin hitsattavaksi. Aineen kovuus yhdistettynä hyvään hitsattavuuteen tarkoittaa, että se soveltuu Monkovan, et al., 2018, mukaan erinomaisesti lisäävällä valmistuksella tuotettavien työkalujen valmistukseen. (Monkova et al., 2018, s. 791). Lisäävän valmistuksen tarpeisiin on saatavilla MS1-nimistä maraging-terästä. Perinteisillä menetelmillä tuotettu maraging-teräs tunnetaan useammalla nimellä; eurooppalaisen standardin mukaan vastaavan kemiallisen koostumuksen omaavan materiaalin numero on 1.2709, saksalaisen standardin mukaan X3NiCoMoTi18-9-5 ja amerikkalaisen luokituksen mukaan 18% Ni Maraging 300 (Monkova et al., 2018, s. 795). Tutkimuksessa vertailtiin kappaleita ilman lämpökäsittelyä, kappaleita, joita oltiin lämpökäsitelty ja kappaleita, joita oltiin ensimmäisen lämpökäsittelyn lisäksi käsitelty toisella tutkimuksessa käytetyn MS1-jauhe-erän tuottajan EOS:n suosittelemalla lämpökäsittelymenetelmällä. Ensimmäisessä lämpökäsittelyssä kappale lämmitetään argonatmosfäärissä 820 asteeseen, jossa sitä pidetään tunnin ajan. Tunnin jälkeen kappale viilennetään nopeasti 500 asteeseen samassa argonatmosfäärissä. Lopuksi kappale viilennetään hitaasti huoneenlämpöisessä ilmassa. Toisessa lämpökäsittelyssä kappale lämmitetään nopeasti 490 asteeseen, jossa sitä pidetään 6 tuntia, jonka jälkeen sen annetaan jäähtyä ilmassa. (Monkova et al., 2018, s. 797-798) Testikappaleiden koostumus ja lujuus paranivat kokeissa kunkin lämpökäsittelyn jälkeen (Monkova et al., 2018, s. 802-803). Suoraan laiteesta otettujen kappaleiden rakenne oli huokoista verrattuna viimeistelyihin testikappaleisiin, mikä näkyi myös sen mekaanisissa ominaisuuksissa. Yhdellä lämpökäsittelyllä viimeistellyn kappaleen rakenne oli yhtenäisempi kuin heti tulostuksen jälkeen testatuilla kappaleilla, vaikka senkin sisällä oli jonkin verran huokosia. EOS:n suosittelemalla lämpökäsittelyn läpikäyneet kappaleet olivat rakenteeltaan kaikista tasaisimpia, vaikka niissäkin oli joitakin huokosia. Kyseiset kappaleet olivat myötölujuudeltaan perinteisillä menetelmillä valmistettuja kappaleita lujempia, mutta osoittivat kuitenkin myös merkkejä hauraasta murtumisesta. Kuvassa 7 esitetään makrokuvia lämpökäsittämättömistä testikappaleista ja valmistajan suosituksen mukaan käsitellyistä testikappaleista.



**Kuva 7.** Makrokuvat lämpökäsittämättömistä lujuuskokeen testikappaleista ja valmistajan suosituksen mukaan käsitellyistä testikappaleista. Ylärivillä testikappale ilman lämpökäsittelyä, alarivillä testikappale valmistajan suosittelman lämpökäsittelyn jälkeen (Monkova et al., 2018, s. 801-802).

Kuvasta 7 voidaan havaita, että lämpökäsittelty testikappale murtui hauraammin kuin käsittelemätön kappale, ja että lämpökäsittelyn kappaleen koostumus oli yhtenäisempää ja vähemmän huokoista kuin käsittelemättömän kappaleen.

Tutkimuksessa havaittiin Monkova, et al., 2018, mukaan myös, että lisäävällä valmistuksella tuotettujen kappaleiden mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttivat niiden valmistusarvot, kuten valmistusorientaatio ja viimeistely, kuten käytetyt lämpökäsittelyparametrit (Monkova et al., 2018, s. 802-803). Suunta, jossa testikappaleet tulostettiin, vaikutti jonkin verran kappaleiden lujuuteen. Vaikutus kuitenkin pieni sitä mukaa kuin kappaleita lämpökäsiteltiin. Lämpökäsittely myös vaikutti kappaleiden lujuuteen ja haurauteen. Käsittelemättömät kappaleet hajosivat merkittävän plastisen muodonmuutoksen jälkeen, kun pisimmälle käsitellyt testikappaleet murtuivat pääasiassa hauraasti. Ensimmäisen lämpökäsittelyn läpikäyneiden kappaleiden tulos lujuuskokeesta pieni 100 MPa, kun niitä testattiin neljä kuukautta valmistuksen jälkeen. Tämän oletettiin johtuvan materiaalin

luonnollisesta ikääntymisestä. Tutkimuksessa todetaan, että tulevaisuudessa on varmistettava sekä kappaleiden ikääntyessään heikentymisen vaikutus että valmistusorientaation ja lämpökäsittelyn vaikutukset lisäävällä valmistuksella tuotettujen kappaleiden lujuuteen. Siinä pystyttiin kuitenkin toteamaan, että AM-maraging-teräkset ovat työkalukäytössä pätevä vaihtoehto perinteisillä menetelmillä tuotetuille maraging-teräksille (Monkova et al., 2018, s. 803). Havainto kuitenkin koskee vain materiaalin mekaanisia ominaisuuksia, koska tutkimuksessa ei mitattu kappaleiden väsymisljuuksia.

Lisäävällä valmistuksella tuotettujen kappaleiden väsymisljuudenkin arvioimisessa on vielä monia haasteita. Afkhamin et al., 2018, tutkimuksen mukaan tieto parametreista, jotka vaikuttavat olennaisesti kappaleiden väsymisljuuteen, on puutteellista. Näitä parametreja ovat osan rakennusorientaatio, käytettävän jauheen ominaisuudet, oikea lämpökäsittely kullekin materiaalille, ulkopintojen koneistuksen vaikutus ja multiakksiaalisen väsymiskuormituksen analysointi. (Afkhami et al., 2018, s. 81) Tutkimuksessa havaittiin, että osia oli lujuuden kannalta parempi valmistaa vaakatasossa kuin pystysuorassa, mutta valmiin materiaalin mikrorakenteeseen saattaa ennemmin vaikuttaa kappaleen pinta-alan suhde valmistettavan kerroksen paksuuteen kuin pelkkä kappaleen asento valmistusvaiheessa. Lisäksi geometrisesti testikappaleita monimutkaisemmissa kappaleissa voi olla sekä vaakasuorassa että pystysuorassa valmistettavia osia, joten valmistusasennolla voidaan vaikuttaa vain rajallisesti aikaansaatavaan mikrorakenteeseen. Myöskään jauhemaisen materiaalin laadun tai sen poikkeamien vaikutusta ei ole tutkittu vielä riittävästi. Tietoa puuttuu etenkin metallijauheiden partikkelien koon ja jauheen levittämisen vaikutuksia valmistettavan kappaleen pinnanlaadulle, jolla taas on merkittävä vaikutus sen väsymisljuudelle. Aiemmissa tutkimuksissa ei myöskään ole huomioitu kunnolla oikean lämpökäsittelyn vaikutusta kullekin materiaalille. Usein kaikille testattaville materiaaleille on sovellettu samaa lämpökäsittelymenetelmää, mutta silloin kaikkien materiaalien optimaalisia ominaisuuksia ei ole saatu selville. Kappaleen ulkopintojen koneistaminen poistaa kyllä isoimmat railot ja siten todennäköisiä murtumien ydintymispaikkoja, mutta samalla vapautuu valmistuksen aikana materiaaliin syntyneitä jännityksiä, joiden puuttuminen taas helpottaa halkeamien syntymistä kappaleen ulkopinnalla. Tähän mennessä ei olla tutkittu tarpeeksi koneistuksen vaikutuksia AM-kappaleiden väsymisljuuteen eikä murtumien syntymiseen tai niiden leviämiseen. Kokeissa ei myöskään olla juuri huomioitu multiakksiaalisen kuormituksen vaikutusta, vaan niissä on pitkälti keskitytty yksiakksiaalisen

kuormituksen tutkimiseen. Tästä syystä vauriomalleista teollisissa sovelluksissa ei ole kattavaa tietoa. Tutkimukset kuitenkin osoittavat, että matalan ja keskitason lujuusluokan AM-teräksille saadaan optimaalisella lämpökäsittelyllä ja koneistuksella perinteisillä menetelmillä valmistettuja teräksiä vastaavat ominaisuudet. Nykyisen tutkimustiedon perusteella tämä ei kuitenkaan koske lujempia teräksiä. Ominaisuus, missä kaikki AM-teräslaadut ovat kuitenkin samalla tasolla perinteisesti valmistettujen terästen kanssa, on väsymisrailojen kasvunopeus. (Afkhami et al., 2018, s. 81)

#### 3.4 Esimerkkejä lisäävän valmistuksen sovelluksista teollisuudessa

Autotehtailla lisäävää valmistusta on hyödynnetty kokoonpanon puolella. Portugalilainen Volkswagen Autoeuropa on de Vriesin, 2017, mukaan hyödyntänyt lisäävää valmistusta sekä kokoonpanossa että osien tuotannossa (de Vries, 2017). Kokoonpanossa renkaan kiinnipulttaamisen aikana käytetty vannetta suojaava jigi oli hankittu aiemmin alihankkijalta 800 eurolla 56 päivän toimitusajalla, mutta paikan päällä lisäävän valmistuksen keinoilla valmistettu jigi maksaa 21 euroa toimitusajan ollessa 10 päivää. Kyseinen jigi näkyy kuvassa 8.



**Kuva 8.** Portugalilaisen autotehtaan Volkswagen Autoeuropan käyttämä lisäävällä valmistuksella tuotettu jigi vanteen asennuksen aikaista suojaamista varten (de Vries, 2017).

Tehtaalla valmistetaan lisäävällä valmistuksella myös takaluukkuun asennettavien mallimerkintöjen kiinnityksessä käytettävät työkalut sekä A-pilarin juuressa olevien kulmaikkunoiden asennuksessa käytettävät työkalut. Molemmat osat hankittiin aiemmin



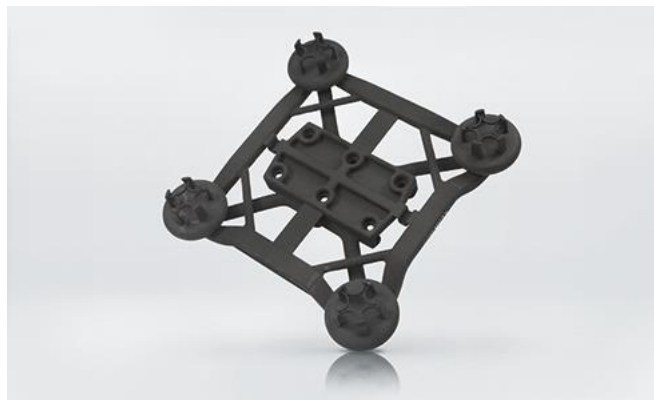
alihankkijoilta, mutta niiden valmistuksen siirtäminen omalle tehtaalle ja valmistusmenetelmän muuttaminen perinteisistä menetelmistä lisäävään valmistukseen on tuonut huomattavia säästöjä sekä kustannuksissa, että toimitusajoissa molempien osien kohdalla. Tehtaan ympäristössä lisäävän valmistuksen tuoma hyöty pelkkien kustannussäästöjen lisäksi on myös työkalujen valmistuksen nopeuden mahdollistama työkalujen kehittäminen nopealla aikataululla. Sen sijaan, että jouduttaisiin odottamaan monimutkaisten, perinteisillä menetelmillä valmistettavien työkalujen valmistusaika, uusia parannuksia voidaan implementoida yhdessä yössä. Tästä syystä eri parannuksien kokeileminen on aiempaa helpompaa ja riskittömämpää.

Sama tehdas valmistaa Lealin, et al., 2017, mukaan myös taivutettuja metalliosia (Leal et al., 2017, s. 1672). Taivutuksessa tarvitaan työkaluja, joilla itse materiaalin käsittely tapahtuu. Autoteollisuuden nopeassa kehitystahdissa on eduksi, että työkaluja voidaan kehittää mahdollisimman nopeassa tahdissa. Niinpä lisäävän valmistuksen soveltaminen taivutustyökaluissa voi tuottaa tehtaalle kilpailukykyä ja kustannussäästöjä. Casessa vertailtiin perinteisiä valmistusmenetelmiä ja lisäävää valmistusta taivutustyökalujen valmistuksessa. Perinteiset menetelmät sisälsivät kerrostetun teräksen [laminated steel] ja lost-foam -menetelmällä valamisen. Lisäävän valmistuksen menetelmänä käytettiin jauhepetisulatusta. Tutkimuksessa huomattiin, että lisäävä valmistus nosti suoria kustannuksia noin 65% tuotettua työkalua kohden. Jauhepetisulatuksessa suurin kustannuserä, 84,2%, oli kappaleen raaka-aine ja sen valmistus, kun kerrostetun teräksen [laminated steel] työstämiseen kulunut osuus kustannuksista osaa kohden oli 54,1% ja lost-foam -valussa 35,7% (Leal et al., 2017, s. 1675). Merkittävä osa kustannuksista perinteisillä menetelmillä kului kappaleen viimeistelyyn, kerrostetun teräksen [laminated steel] valmistuksessa sen ollessa 22,1% ja lost-foam -valussa 28,9%. Lisäävässä valmistuksessa kappaleen viimeistelyn osuus kustannuksista oli 6,2% (Leal et al., 2017, s. 1675). Suurin etu saavutettiin valmistusajassa, joka oli lisäävällä valmistuksella 480 tuntia, kerrostetulla teräksellä [laminated steel] 740 tuntia ja lost-foam -valulla 950 tuntia. Perinteisissä menetelmissä aikaa kului eniten itse valumuottien valmistukseen (Leal et al., 2017, s. 1674).

Casessa mainittiin kaksi etua, jotka lisäävän valmistuksen lyhyet valmistusajat Lealin, et al., 2017 mukaan tuovat. Tyypillinen esimerkki on mahdollisuus tuotteen nopeampaan lanseeraukseen, jolloin kustannukset saadaan kuoletettua aikaisemmin. Toinen etenkin

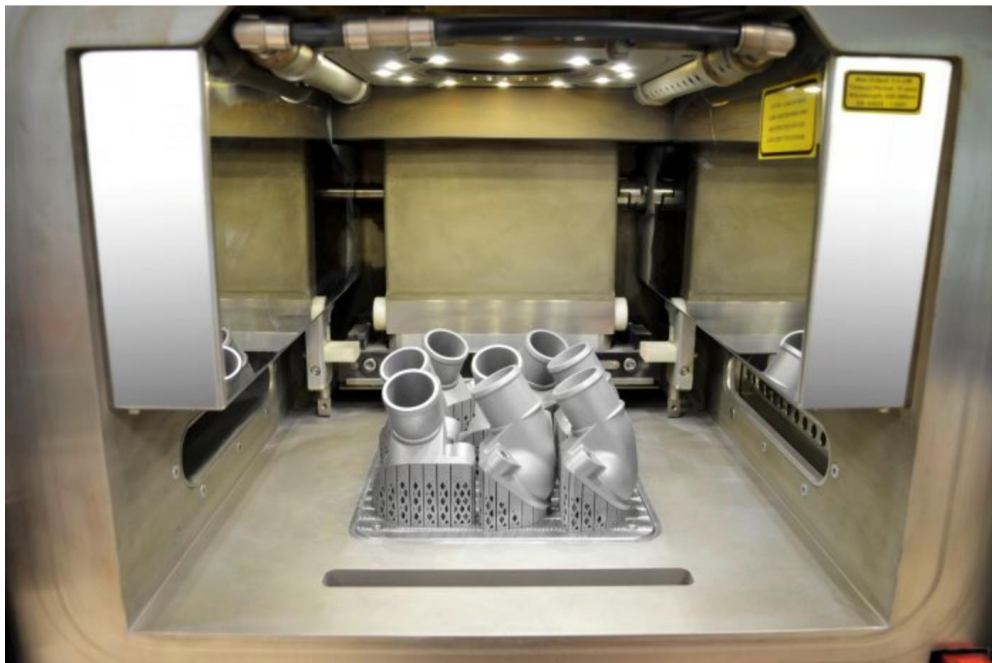
autoteollisuudelle hyödyllinen etu on, että työkalujen parantamiseen ja uusien versioiden kehittämiselle on enemmän aikaa (Leal et al., 2017, s. 1675). Jos työkaluja tarvitsee testata ja parannella, se kannattaa suorittaa projektin alkuvaiheessa ylimääräisten kustannusten minimoimiseksi. Casen lopussa mainitaan myös, että valmistusaikaetu korostuu sen mukaan, miten geometrisesti monimutkaista työkalua valmistetaan (Leal et al., 2017, s. 1676). Taivutustyökalun tapauksessa kyseessä ei ole geometrialtaan kovin monimutkainen työkalu, mutta sitäkin valmistettaessa aikaa voi säästyä puolet valamalla valmistettavan vastaavan työkalun valmistusprosessin pituudesta.

Lisävän valmistuksen mahdollistama työkalun kevyempi rakenne aiempiin valmistusmenetelmiin verrattuna voi EOS:n mukaan olla tärkeä ominaisuus työkalun tehokkuutta ajatellen. Jos kyseessä on nopeasti kappaleita liikuttavaan robottiin kiinnitetty tarttuja, ylimääräinen massa pienentää kokoonpanon suurinta mahdollista nopeutta, ja vaikuttaa pitkällä aikavälillä laitteen tehokkuuteen tietyssä aikayksikössä liikutettujen kappaleiden määrällä mitattuna. Tällaisen haasteen kohtasi Kuhn-Stoff GmbH asiakkaansa Wittman Groupin kanssa (EOS). Wittman Group halusi korvata mekaaniset tarttujansa työkaluilla, jotka olivat edeltäjiään kevyempiä mutta pystyivät kantamaan saman kuorman ja kestämään samat rasitukset kuin perinteisillä menetelmillä valmistetut työkalut (EOS). Rakennetta yksinkertaistamalla pyrittiin myös pienempiin valmistuskustannuksiin. Vanha työkalu oli valmistettu alumiinista, kumiletkuista ja useasta kiinnikkeestä, osien kokonaismäärän ollen 21. Lisävän valmistuksen hyödyntäminen mahdollisti työkalun valmistamisen kahdesta polyamidiosasta sekä paineilmaletkujen ja -liittimien integroimisen työkalun pohjalevyyn. Työkalun tartuntamekanismi toimi neljällä paineilmalla laajenevalla muovisella kouralla. Uuden työkalun massa oli 86% pienempi kuin korvattavan työkalun, ja sen valmistusaika lyheni 12 päivästä kahteen päivään. Kuvassa 9 esitetään tarttujan rakenne.



**Kuva 9.** Lisäävällä valmistuksella tuotettu tarttuja eli gripperi, jonka tarttujakourat avataan ja suljetaan paineilmalla, joka kulkee työkaluun integroiduissa rakenteissa (EOS).

Lisäävän valmistuksen osaa kohden matalia valmistuskustannuksia voidaan Daimlerin, 2017, mukaan hyödyntää pieneen kysyntään vastaamisessa. Yksi menetelmä tähän on varaosien valmistaminen tuotannosta poistunutta mallistoa varten suoraan kysyntään. Tällöin voidaan myös pienentää varaosavaraostoa. Esimerkkinä yrityksestä, joka on korvannut osan varastostaan valmistamalla tarvittavia varaosia paikallisesti lisäävällä valmistuksella, on Mercedes Benz Trucks (Daimler, 2017). Kuvassa 10 esitetään tulostettuja varaosia (Daimler, 2017.).



**Kuva 10.** Mercedes-Benz -kuorma-autoja varten tulostettuja varaosia. (Daimler, 2017.)

Yritys on valmistanut mallistostansa poistuneisiin kuorma-autoihin varaosia paikallisesti korjaamoissaan. Varaosien valmistuskustannukset ovat pieniä, ja kuljetuskustannukset ovat pieniä tai olemattomia, koska tarvittavia osia voidaan valmistaa joko paikan päällä korjaamolla tai samalla alueella kohtuullisen etäisyyden päässä. Myös varastointikustannukset ovat hyvin pieniä, koska osia voidaan valmistaa kysyntää vastaava määrä.

#### **4 TULOKSET**

Kirjallisuustyönä tehdyssä kandidaatintyössä pyrittiin kokoamaan johtopäätökset vastauksina tutkimuskysymyksiin. Tämän pohjana olivat kirjallisuuskatsaukseen kootut tiedot työkalukäytön asettamista vaatimuksista materiaaleille sekä tämänhetkinen tieto lisäävän valmistuksen menetelmistä ja materiaaleista sekä niiden ominaisuuksista. Johtopäätökset koottiin Pohdinta-lukuun (luku 5).

## 5 POHDINTA

### 5.1 Työkalut, joita voidaan valmistaa hitsaamon tarpeisiin lisäävällä valmistuksella

Yksi lisäävän valmistuksen tuoma etu perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna on kyky valmistaa monimutkaisiakin kappaleita suhteellisen yksinkertaisesti. Tämä mahdollistaa suuremman tuotemäärän valmistamisen omassa talossa. Työkalut tai niiden osat ovat siten hyvä lisäävän valmistuksen sovelluskohde. Siirrettäessä osien tuotanto oman talon sisälle osien toimitusajat lyhenevät ja niiden toimitusvarmuus paranee. Itse lisäävällä valmistuksella metallisista materiaaleista valmistettavia työkaluja voivat olla jiggit ja tarttujat tai niiden osat. Muoveja hyödynnettäessä voidaan valmistaa joitakin jigejä tai liimasuuttimia.

Jiggit ovat melko yksinkertainen sovelluskohde, koska työkalun tärkeimmät ominaisuudet ovat hyvä mittatarkkuus ja hyvä kulutuksen kesto. Jigin vaatimat mittatarkkuudet voidaan saavuttaa ongelmitta lisäävällä valmistuksella, mutta ei ole varmaa, onko niiden kestävyys pidempiaikaisessa kulutuksessa nykyisten perinteisillä menetelmillä valmistettujen kestävimpien terästen tasolla. Tilanne voi kuitenkin muuttua, koska AM-teräksille voi vielä löytyä nykyistä paremmin niille sopivia lämpökäsittelyparametrien arvoja tai pinnankäsittelymenetelmiä tulevaisuudessa tehtävissä tutkimuksissa.

Tarttujatyökaluja varten voi olla kannattavaa selvittää, voisiko joitakin modulaarisia EGT-komponentteja valmistaa itse lisäävällä valmistuksella. Tarttujien runkoprofiileja ei todennäköisesti kannata tai edes voi valmistaa itse, koska ne ovat liian suuria mahtuakseen esimerkiksi jauhepetisulatuslaitteen sisälle, mutta pienempien kappaleiden valmistus voisi olla mahdollista. Osat voisivat todennäköisesti olla sarjan kulma- ja liitospaloja, kunhan lisäävällä valmistuksella voidaan saavuttaa osilta vaadittavat mekaaniset ominaisuudet ja väsymislujuuDET. Jos työkaluilta ei vaadita liian suuria lujuuksia, lisäävällä valmistuksella tuotetut osat voitaisiin ottaa käyttöön ilman lämpökäsittelyä. Kappaleen viimeistelyn rajoituksessa valmistuksen aikaisten tukirakenteiden pois koneistamiseen sen valmistusaika verrattuna lämpökäsittelyyn kappaleeseen olisi huomattavan lyhyt. Tällöin tarvittavia varaosia voitaisiin valmistaa lyhyellä vasteajalla, jolloin varaston käyttöä voisi tehostaa entisestään.

Mikäli osien riittävän kattava ja laaja oma tuotanto lisäävällä valmistuksella on mahdollista, se voisi mahdollistaa varastojen pienentämisen nykyisestä valmistamalla tiettyjä varaosia vain tarpeen mukaan. Varastoon olisi kuitenkin jätettävä riittävä määrä varaosia, jotta tuotanto ei keskeytyisi uuden osan valmistuksen ajaksi, sillä se olisi erittäin haitallista tehtaan toiminnan kannattavuudelle.

5.2 Milloin kannattaa käyttää AM-valmistettuja työkaluja ja milloin perinteisiä työkaluja

Lisäävän valmistuksen menetelmillä valmistettujen työkalujen kannattavuus riippuu sovellettavasta menetelmästä ja käyttökohteesta. Kustannuksia tarkasteltaessa lisäävä valmistus on suorilla kustannuksilla mitatessa isoissa erissä tuotettuna kalliimpaa kuin työkalujen valmistaminen perinteisillä menetelmillä johtuen korkeista laite- ja raaka-ainekustannuksista. Volkswagen Autoeuropän tapauksessa, jossa vertailtiin lisäävän valmistuksen ja kahden perinteisen valmistusmenetelmän kustannuksia ja valmistusaikoja, yritys hyötyi lisäävän valmistuksen mahdollistamista lyhyistä valmistusajoista, koska särmästyökalua oli tarve muuttaa melko nopeaan tahtiin sen mukaan, kun auton ulkopaneeleita muokattiin mallistopäivitysten yhteydessä (Leal et al., 2017, s. 1675). Tällöin valmistusmenetelmästä saavutettiin niin suuri ajallinen hyöty, etteivät tuotetun erän suuremmat suorat kustannukset olleet ongelma. Toistaiseksi lisäävällä valmistuksella tuotetuilla osilla ei kuitenkaan olla vielä päästy lujimpien perinteisesti valmistettujen terästen tasolle väsymislujuudessa (Mower & Long, 2015, s. 212; Deirmina et al., 2019, s. 119-120). Lisäksi kyvystä muokata osien ulkopintoja nopeasti ei ole juurikaan hyötyä, jos käytettävät työkalut koostuvat pääasiassa standardiosista, koska standardiosien valmistaminen on todennäköisesti nopeampaa kuin AM-osien ja koska standardiosien kirjasto on jo valmiiksi tarpeeksi laaja erilaisten työkalujen valmistusta ajatellen. Mikäli hitsaamon työkaluja on tarve muokata, se onnistuu helpoiten modulaaristen osien kokoonpanoa muuttamalla.

Kyvystä muokata osia lisäävälle valmistukselle ominaisella tavalla joustavasti ja nopeasti on sen sijaan hyötyä, kun halutaan testata uusia työkaluja. Prototyypin eri versioita on helppo luoda, koska uusien versioiden valmistaminen on perinteisiin menetelmiin verrattuna helppoa muokkaamalla osaa joustavasti CAD-ohjelmalla ja valmistamalla se nopeasti lisäävällä valmistuksella. Havaittaessa puutteita prototyypissä uusi osa voidaan tuottaa

parhaimmillaan seuraavaksi päiväksi. Lisäävälle valmistukselle ominainen etu kyseisessä tilanteessa on myös matalat kustannukset pieniä sarjoja tuotettaessa. Perinteisillä menetelmillä osia valmistettaessa kappalekohtaiset kustannukset pienenevät sitä mukaa, mitä enemmän osia valmistetaan, mutta lisäävällä valmistuksella kustannukset osaa kohti ovat aina vakio.

Valmistettavan tuotantosarjan koko tarkoittaa työkalun näkökulmasta sen käyttöiän aikana tapahtuvien toistojen määrää. Pienen tuotantosarjan koko voi olla esimerkiksi 20 000 tuotetta, jolloin työkalua käytetään 20 000 toiston verran saman tuotantosarjan aikana. Suuressa tuotantosarjassa toistojen määrä voi olla esimerkiksi 100 000 kappaletta, mikä aiheuttaa suuren määrän pitkällä aikavälillä tapahtuvaa kulutusta sarjan valmistuksessa käytettävälle työkalulle. Lisäävällä valmistuksella tuotettujen työkalujen kestävyudessa ja väsymislujuudessa on kuitenkin selvittämättömiä asioita, kuten kirjallisuuskatsauksessa mainittiin. Koska kaikkien materiaalien optimaalisia viimeistelymenetelmiä ei vielä tunneta, etenkin lujimmista AM-työkalumateriaaleista ei olla vielä kyetty saamaan yhtä kestäviä kuin lujimmista perinteisillä menetelmillä tuotetuista työkalumateriaaleista. Niinpä tämänhetkisinä tiedoina ei voida sanoa tarkkaan, ovatko lisäävällä valmistuksella tuotetut osat kaikissa tilanteissa väsymislujuudeltaan perinteisillä menetelmillä tuotettuja osia heikompia. Kuitenkin tällä hetkellä lujimmat perinteisillä menetelmillä tuotetut osat ovat toistaiseksi kestävämpiä kuin vastaavat AM-osat. Tällä on merkitystä etenkin isoimpia tuotantosarjoja valmistettaessa, jolloin yksi tärkeä tavoite työkalujen osalta on niiden vaihtotarpeen minimointi. Pienellä vaihtotarpeella eli vastaavasti kestävästä materiaaleista tuotetuilla työkaluilla voidaan pienentää tuotteen valmistuskustannuksia minimoimalla linjaston tuotantokatkot työkaluja vaihdettaessa sekä vähentämällä työkalujen kokonaiskustannuksia, kun tuotannossa tarvitaan pienempi määrä työkaluja. Työkaluista aiheutuvat tuotantokatkot voivat johtua esimerkiksi niiden tuotteisiin aiheuttamista virheistä tai työkalujen vaihtamisesta uusiin. Jotta työkaluista johtuvat turhat katkot tuotannossa voidaan välttää, niiden on oltava laadukkaita ja kestäviä.

Yksi mahdollisuus työkalun kestävyuden parantamiseksi on sen päällystäminen kestäväällä pinnoitteella. Lisäävän valmistuksen menetelmistä tähän soveltuu suorakerrostus. Ajatuksena on valmistaa pohjaksi kappale heikommasta ja edullisemmasta materiaalista, ja päällystää se kulutusta hyvin kestäväällä pinnoitteella. Suurempien tuotantosarjojen

yhteydessä menetelmä voisi olla hyödyllinen, koska jigiin kohdistuvat mekaaniset rasitukset eivät ole kovin suuria, mutta niiden toistojen määrät voivat olla hyvinkin korkeita. Suorakerrostukselle ominaisten laajojen parametrien säätömahdollisuuksien avulla (Gibson, et al., 2015, s. 266) päällysteen ominaisuuksiin voi vaikuttaa paljon. Lisäksi menetelmän avulla on myös mahdollista korjata vaurioituneita kappaleita tai päällystää niitä uudelleen. Niinpä jonkin osan ulkopinnan kuluessa liikaa kokonaista uutta osaa ei välttämättä tarvitse valmistaa alusta asti korvaamaan kulunutta osaa. Vanha osa korjaamalla voidaan myös välttää varaosan uusi pintakäsittely.

Lisäävän valmistuksen kannattavuuden tarkastelu työkalukäyttöä ajatellen on alan nopean kehityksen takia melko hankalaa. Muovien kannalta asia on suhteellisen yksinkertainen, sillä niitä on käytetty teollisuudessa pidempään ja niistä on siten saatavilla enemmän tietoa, mutta metallien kohdalla tilanne on monimutkaisempi. Työkaluterästen pitkän aikavälin kestävyys on vielä pieni arvoitus, sillä on havaittu, että materiaaleista saatavat ominaisuudet riippuvat paljon siitä, miten ne on valmistettu ja viimeistely. Heikommille työkaluteräksille on löydetty valmistusparametrien arvoja, joilla niiden väsymislujuus ja mekaaniset ominaisuudet saadaan samalle tasolle vastaavien perinteisillä menetelmillä tuotettujen materiaalien kanssa, mutta samaa ei olla saavutettu lujimpien materiaalien kanssa. Niinpä ainakin toistaiseksi suurimpien sarjojen valmistuksessa on kannattavampaa käyttää perinteisillä menetelmillä tuotettuja työkaluja, vaikka vaikuttaakin siltä, että asia voi muuttua lähitulevaisuudessa. Pienempien sarjojen tuottamiseen lisäävää valmistusta sen sijaan voi jo hyödyntää sen nykyisten ominaisuuksien perusteella. Tähän soveltuvat sekä kovat muovit että heikot ja keskivahvat työkaluteräokset. Näistä materiaaleista valmistettuja työkaluja voitaisiin hyödyntää pienissä tai mahdollisesti myös keskisuurissa tuotantosarjoissa.

### 5.3 Työkalusuunnittelun tulevaisuuden trendit

Lisäävän valmistuksen tulevaisuuden trendejä on vaikea ennustaa, koska tutkittua tietoa aiheesta on toistaiseksi melko vähän. Ilmiö, joka kertoo tämänhetkisen tiedon vähyydestä, on useammassa tutkitussa lähteessä vastaan tullut toteama, jossa sanotaan joko, että käsiteltävää asiaa pitäisi tutkia tulevaisuudessa lisää paremman ymmärryksen saavuttamiseksi tai että aiempaa tutkimusta ei oltu suoritettu kaikkia muuttujia huomioon ottaen, jolloin saadut johtopäätökset ovat muuttuneet aiemmasta. Edellä mainituista asioista



käy hyvin ilmi, miten paljon tutkimuksille on tarvetta ja miten paljon niitä tullaan tulevaisuudessa todennäköisesti tekemään. Tutkitun tiedon puute lisäävästä valmistuksesta koskee etenkin eri menetelmällä valmistettavia metalleja ja niiden ominaisuuksia. Muoveja on tuotettu lisäävällä valmistuksella jo pidemmän aikaa, jolloin on jo kyetty selvittämään saatavilla olevia materiaaleja sekä niiden ominaisuuksia. Varmin asia alasta on sille ennustettu voimakas kasvu. IDTechExin markkinatutkimuksen mukaan (IDTechEx, 2017) pelkästään laserpohjaista jauhepetisulatusta hyödyntävien laitteiden määrä kasvaa vuosina 2017-2025 500 %, mikä vastaa asennettujen laitteiden määrässä kasvua 5 000 laitteesta 25 000 laitteeseen. Myös muiden lisäävän valmistuksen menetelmien kasvutahti on samaa luokkaa.

Kaikkein lupaavin hitsaamon työkalujen lisäävän valmistuksen menetelmä tulevaisuutta ajatellen on jauhepetisulatus. Tähän on monia syitä. Menetelmä on tälläkin hetkellä laajasti käytössä, se on erittäin joustava valmistettavien kappaleiden ja käytettävien materiaalien suhteen, ja siinä voidaan hyödyntää jauheen sulatukseen joko laseria tai elektronisuihkua. Jauhepetisulatuksen tämän hetken laajan teollisen käytön ansiosta menetelmän hyödyntäminen ja sen eri sovellukset ovat tuttuja suuremmalle yleisölle. Siten jauhepetisulatuksella valmistettavien kappaleiden suunnittelu on myös tutumpaa suuremmalle määrälle ihmisiä, jolloin sen käytön aloittamiselle tai laajentamiselle löytyy helposti tukea. Menetelmän joustavuus mahdollistaa hyvin erilaisten tuotteiden valmistamisen. Joustavuudessa yhdistyvät sekä lisäävän valmistuksen kerroksittaisen valmistuksen edut monimutkaisten geometrioiden suunnittelussa että mahdollisuus käyttää materiaalina joko muoveja, keraameja, metalleja tai muovin ja metallin tai keraamin tai metallin sekoitusta. Metalleja käsitellessä sulatusenergian lähteeksi voidaan valita lasersäteen ohella myös elektronisuihku. Jauhepetisulatuksen laajan käytön on myös ennustettu jatkuvan tulevaisuudessa. Niinpä menetelmän kehittämiseen kohdistetaan tulevaisuudessa todennäköisesti eniten resursseja kaikista lisäävän valmistuksen menetelmistä. Elektronisäteiden käytön tulevaisuuden kehitys on myös oma lisänsä menetelmän kehittämisessä, koska toistaiseksi kaikkea potentiaalia pienempään virrankulutukseen ja nopeampaan valmistusprosessiin ei olla vielä löydetty. Markkinatutkimuksen perusteella jauhepetisulatus on selvästi suosituin lisäävän valmistuksen menetelmä, sen osuuden kaikista asennetuista laitteista ollessa noin 85 % (IDTechEx, 2017). Datassa näkyy myös omana osanaan jauhepetisulatus elektronisuihkulla,

joka on toiseksi yleisin AM-menetelmä. Ero kolmannella sijalla olevaan suorakerrostukseen on kuitenkin melko pieni. Tulevaisuudessa laserpohjaisen jauhepetisulatuksen suhteellisen markkinaosuuden ylivoima kuitenkin kapenee hieman, sen ollessa ennusteen mukaan noin 75 % kaikesta laitteistosta vuonna 2025. Samaan aikaan elektronisuihkua hyödyntävän jauhepetisulatuksen osuus pysyy melko samana, sen ollessa noin 10 %. Kyseinen markkinatutkimus ei kuitenkaan ota huomioon mahdollisuutta sille, että muut tai kokonaan uudet menetelmät kehittyisivät kymmenessä vuodessa niin, ettei laserpohjainen jauhepetisulatus enää olisi ainut varteenotettava metallien lisäävän valmistuksen menetelmä.

Suorakerrostus on myös lupaava lisäävän valmistuksen menetelmä metallien tulostukseen. Menetelmä soveltuu erinomaisesti kappaleiden korjaamiseen tai päällystämiseen. Sen laajojen parametrien säätömahdollisuuksien ja usean jauheen samanaikaisen syöttämisen ansiosta sillä voidaan luoda hyvin monenlaisia materiaaleja. Tuotettavan materiaalin ominaisuuksia optimoimalla voidaan saada aikaan moniin eri ympäristöihin ja käyttötarkoituksiin erinomaisesti soveltuvia pinnoitteita tai osia. Suorakerrostuksen osuus asennetuista AM-laitteistoista on markkinatutkimuksen perusteella kolmanneksi suurin, pienellä erolla toiseksi suosituimpaan menetelmään eli elektronisuihkusulatukseen ja valtavalla erolla kaikista suosituimpaan menetelmään eli laserpohjaiseen jauhepetisulatukseen. Menetelmän osuus kaikista asennetuista laitteistoista on noin 10 %.

Sideaineen suihkutuksella on lupaavia sovelluksia metallisten kappaleiden valmistuksessa, mutta menetelmän hyödyntämä teknologia on monimutkaista eikä sen ole ennakoitu kasvavan kuin neljänneksi yleisimmäksi lisäävän valmistuksen menetelmäksi laitemäärässä mitattuna vuoteen 2025 mennessä. Lisäksi menetelmälle ominainen kyky valmistaa kaikkien jauhepedillä olevien kappaleiden kerrokset samaan aikaan yhdellä pyyhkäisyllä ei välttämättä ole hyödyllinen ominaisuus, mikäli kappaleita ei tarvitse valmistaa nopeasti suurehkoja määriä.

Tutkimustietoa puuttuu etenkin AM-terästen ominaisuuksista. Juuri tämä tieto olisi olennaista työkalujen tuottamiseksi lisäävällä valmistuksella. Aiempi käsitys lisäävällä valmistuksella tuotetuista työkaluteräksistä oli, että jauhe on väistämättä liian huokoista, jotta sen väsymislujuus voisi olla perinteisillä menetelmillä tuotettujen työkaluterästen tasolla. Pienistä ilmakuplista muodostuvat huokokset olivat syynä väsymiskokeissa

syntyneisiin säröihin, koska niistä ensimmäiset olivat syntyneet materiaaliin aina kyseisissä epäjatkuvuuskohdissa Alun perin osittaiseksi ratkaisuksi tarjottiin laserenergian suurentamista, jolloin väsymislujuus parani parhaimmillaan 50 %, mutta myöhemmin huomattiin, että oikeilla lämpökäsittelyparametreilla, työstettävän osan oikealla orientaatiolla ja kappaleen ulkopintaa koneistamalla voitiin vaikuttaa merkittävästi materiaalin lujuuteen. Nykyisen tiedon mukaan ainakin heikommista AM-työkaluteräslaaduista saadaan yhtä lujia kuin vastaavilla perinteisillä menetelmillä valmistetuista työkaluteräksistä. Toistaiseksi tämä ei kuitenkaan vielä koske lujimpia työkaluteräksiä, joissa lisäävällä valmistuksella tuotetut kappaleet ovat perinteisesti valmistettuja materiaaleja heikompia (Afkhami et al., 2018, s. 81). Tämä tieto voi kuitenkin mahdollisesti muuttua tulevaisuudessa materiaalien optimaalisia valmistusparametrien arvoja oppimalla, jolloin lisäävä valmistus olisi ehdottomasti harkitsemisen arvoinen vaihtoehto myös vaativampaan käyttöön sovellettavien työkalujen valmistukselle.

Kaiken kaikkiaan ala on vielä melko nuori, ja kehitystä ja tutkimusta tullaan tekemään tulevaisuudessa vielä paljon. Metallien lisäävään valmistukseen liittyy toistaiseksi niin monta tuntematonta muuttujaa, ettei voida varmuudella tietää, minkä menetelmien ja sovelluskohteiden potentiaali saadaan hyödynnettyä ja minkä ei. Tällä hetkellä on siten vaikea sanoa, miten ala kehittyy, ja ovatko kaikki tällä hetkellä ennustetut kehityskulut edes mahdollisia.

#### 5.4 Suositukset AM-tekniikoihin ja -materiaaleihin, joihin tulisi panostaa

Suositukset panostettavista lisäävän valmistuksen tekniikoista vaihtelevat valmistettavan materiaalin perusteella ja sen mukaan, millä aikavälillä niihin ollaan sijoittamassa. Muoveja valmistettaessa markkinoilla on jo monia vakiintuneita teollisiin sovelluksiin erikoistuneita laitteita ja valmistajia, joista useimmat käyttävät valmistusmenetelmänä materiaalin pursotusta. Mikäli tekniikka aiotaan ottaa käyttöön lähitulevaisuudessa ja soveltaa sitä metallien valmistukseen, ehdottomasti vahvin suositus menetelmästä, johon tulisi sijoittaa, on laserpohjainen jauhepetisulatus. Sen kehitys on kaikista metallin tulostamiseen soveltuvista lisäävän valmistuksen menetelmistä pisimmällä, sen laitetarjonta on laaja ja se on kaikista joustavin menetelmä valmistettavien geometrioiden ja käytettävien materiaalien perusteella. Suorakerrostusta voidaan myös soveltaa nykyisessä muodossaan sille ominaisille käyttötarkoituksille, eli osien korjaamiseen ja päällystämiseen, mutta siihen

sijoittamisesta aiheutuvat hankintakustannukset voivat olla liian korkeita menetelmästä saatavaan hyötyyn nähden, jos nykyiset päällystystekniikat ovat riittävän hyviä tai jos kyvyllä osien korjaamiselle ei löydy sovelluskohteita, joille siitä olisi erityistä hyötyä.

Mikäli tavoitteena on sijoittaa lisäävään valmistukseen vasta myöhemmin tulevaisuudessa, hyödyntämispotentiaalia löytyy useammasta metallien käsittelyyn soveltuvista menetelmistä. Yksi näistä on elektronisuihkusulatus, jonka ero laserpohjaiseen jauhepetisulatukseen on sulatusenergian lähde. Tällä hetkellä menetelmällä ei saada aikaan lasersäteen käyttöön verrattuna yhtä hyvää pinnanlaatua, mutta tulevaisuudessa menetelmän kehittyminen edellä mainituissa asioissa voi kuitenkin mahdollistaa sen hyödyntämisen, jolloin sen edut pienemmässä virrankulutuksessa pääsevät esille. Vielä pidemmällä tulevaisuudessa hyödynnettävien menetelmien joukossa voi olla arkkilaminointi, mutta tällä hetkellä sen sovellukset ovat olleet niin kokeellisella tasolla, että teollisuuden käyttöön soveltuvat tuotteet voivat olla saatavilla vasta useamman vuoden päässä.

Lisäävällä valmistuksella tuotettavissa metalleissa on tapahtunut paljon kehitystä, mutta aiheeseen liittyy myös tuntemattomia muuttujia. Viime aikoina on onnistuttu valmistamaan AM-työkaluteräksiä, joiden väsymislujuus on samalla tasolla kuin perinteisillä menetelmillä tuotetuilla heikoilla työkaluteräksillä. Tämä on ollut mahdollista optimoimalla AM-kappaleiden valmistusta ja viimeistelyä. Tutkimuksissa ei kuitenkaan vielä olla saatu varmuutta siitä, mitkä kaikki valmistus- ja viimeistelyparametrit vaikuttavat valmistettavaan kappaleeseen, ja mikä niiden vaikutus on. Niinpä on vielä vaikea sanoa, mihin lisäävällä valmistuksella tuotetuilla materiaaleilla vielä päästään. Teollisiin tarkoituksiin soveltuvia muoveja on sen sijaan tarjolla monia erilaisia, muun muassa laatuja, jotka kestävät korkeita, noin 100 asteen lämpötiloja. Kyseiset laadut ovat myös muita lisäävällä valmistuksella valmistettavia muoveja kovempia, joten ne kestävät paremmin mekaanista kulutusta.

Lisäävään valmistukseen sijoitettaessa on myös otettava huomioon sen tuotantosarjan koko, jonka valmistukseen työkaluja käytetään. AM:ää hyödynnettäessä pienimpien sarjojen tuotannossa voidaan harkita materiaalin pursotusta soveltavaa laitetta, mikäli aiotaan valmistaa pelkkiä muoveja, tai laserpohjaiseen jauhepetisulatukseen kykenevää laitetta, joka voidaan määrittää valmistamaan joko muoveja tai metalleja. Suurempia tuotantosarjoja valmistettaessa käytännössä ainoa laitteistotyyppi, johon kannattaa sijoittaa, on

laserpohjainen jauhepetisulatus. Toisaalta AM-metalleja valmistettaessa saavutetaan etu valmistettävien työkalujen tai niiden osien määrässä, koska metallisille osille löytyy enemmän sovelluskohteita kuin muoveille, ainakin mikäli niiden mekaaniset ominaisuudet ja väsymislujuus riittävät. Tämä voi kuitenkin olla yhä pienempi rajoite tulevaisuudessa lisäävän valmistuksen menetelmien kehittyessä ja tiedon eri materiaalien optimaalisesta käsittelystä lisääntyessä. Mikäli tulevaisuudessa voidaan valmistaa metalleista yhä lujempia työkaluja lisäävällä valmistuksella, samoilla laitteilla voidaan valmistaa laajempi määrä eri työkaluja useampaan eri käyttötarkoitukseen, jolloin sijoituksesta saatava hyöty kasvaa ajan mittaan ikään kuin itsestään.

## 6 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä käsiteltiin autotehtaan korihitsaamoon soveltuvia lisäävän valmistuksen menetelmiä, materiaaleja ja sovelluskohteita. Työ on tehty kirjallisuustyönä Lappeenrannassa. Työ on tehty, jotta molemminpuolinen ymmärrys ja tieto lisäävästä valmistuksesta kohentuisi.

Paras metallien lisäävän valmistuksen menetelmän työkalujen valmistukseen on jauhepetisulatus. Menetelmä on joustava geometrioiden suhteen, se on käytetyin ja tutkituin metallien lisäävän valmistuksen menetelmä ja sille on tarjolla monia laitteita ja monia eri materiaaleja. Muitakin menetelmiä on saatavilla, mutta joko metallisten työkalujen tai työkalujen valmistaminen yleensä ei onnistu niillä tai niiden ominaisuudet soveltuvat paremmin esimerkiksi kappaleiden korjaamiseen tai eri työkalukäyttöön kuin mille hitsaamossa on tarve. Korihitsaamon työkalujen valmistukseen hyvin soveltuvia materiaaleja ovat H13-työkaluteräs, Al6061:tä vastaava AlSi10Mg ja maraging-teräs. Edellä mainituista materiaaleista on kuitenkin vaikea sanoa varmuudella, mikä niistä on paras pitkän aikavälin käyttöön suuren määrän toistoja sisältävään tuotantosarjan valmistukseen, koska niiden väsymislujuudesta on toistaiseksi saatavilla hyvin vähän tietoa. Joissakin tutkimuksissa on saatu selville, että lisäävällä valmistuksella tuotettujen työkalumateriaalien huokoisuuden takia perinteisillä menetelmillä tuotetut kappaleet ovat väsymislujuudeltaan AM-materiaaleja parempia. Kuitenkin toisissa, uudemmissa tutkimuksissa on havaittu, että oikealla lämpökäsittelyllä joidenkin AM-materiaalien väsymislujuusominaisuudet voidaan saada samalle tasolle perinteisillä menetelmillä tuotettujen työkalujen kanssa. Ongelma on kuitenkin, että kaikkien valmistus- ja viimeistelyparametrien vaikutusta kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin ja väsymislujuuteen ei vielä tunneta. Lisäksi optimaaliset parametrit vaihtelevat eri materiaalien välillä. Lisäävällä valmistuksella tuotettujen muovien ominaisuuksissa on paljon vähemmän tuntemattomia muuttujia. Muovit eivät kuitenkaan ole yhtä lujia ja pitkäikäisiä kuin metallit. Lämpöä kestäville laaduilla voidaan kuitenkin valmistaa esimerkiksi suuttimia liimapursottimiin.

Lisäävän valmistuksen hyödyntäminen korihitsaamossa voisi tuoda uusia mahdollisuuksia työkalujen valmistukseen tai niiden varastoimiseen. Työkaluihin voidaan lisäävän

valmistuksen mahdollistamien monimutkaisten geometrioiden avulla mahdollisesti integroida paineilmajohtimia, jolloin ei tarvittaisi erikseen työkalun ulkopuolelle asennettavia venttiilejä tai johtimia. Työkalujen varaosia voitaisiin myös mahdollisesti valmistaa suuremmin vain tarpeeseen, jolloin varaston kokoa voitaisiin pienentää nykyisestä. Tällä hetkellä kannattavin lisäävän valmistuksen menetelmä on jauhepetisulatus. Tulevaisuudessa tutkitun tiedon lisääntyessä ja menetelmien kehittyessä markkinoille voi kuitenkin tulla enemmän lisäävän valmistuksen menetelmiä, jotka soveltuvat korihitsaamon työkalujen valmistukseen. Kaikkien menetelmien ja materiaalien potentiaaleista on kuitenkin toistaiseksi vaikea arvioida, mitkä niistä voivat toteutua ja mitkä eivät.

## 7 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET

Kenties tärkein tuntematon tekijä metallisiin lisäävällä valmistuksella tuotettuihin kappaleisiin liittyvä tekijä on niiden väsymislujuus. Metallisten AM-kappaleiden mekaanisista ominaisuuksista tiedetään jo niin paljon, että niitä voi hyödyntää käytännössä yhtäläisesti perinteisillä menetelmillä tuotettujen kappaleiden kanssa, mikäli jännityssykkien määrä sovelluksessa on pieni. Sen sijaan tiedon puute väsymislujuudesta estää AM-metallien soveltamisen monessa yhteydessä, kuten esimerkiksi tässä kandidaatintyössä käsitellyssä työkalukäytössä autotehtaan korihitsaamossa suuria tuotantosarjoja valmistettaessa.



## LÄHTEET

Afkhami, S., Dabiri, M., Alavi, S. B., Björk, T., Salminen, A. 2018. Fatigue characteristics of steels manufactured by selective laser melting. Teoksessa: International Journal of Fatigue 122, 2019. Elsevier Science Direct. S. 72-83. 81 s.

Atzeni E., Salmi, A., 2012. "Economics of Additive Manufacturing for End-usable Metal parts", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 62. S. 1147-1155.

Chen, Q., Guillemot, G., Gandin, C., Bellet, M., 2017. "Three-dimensional finite element thermomechanical modeling of additive manufacturing by selective laser melting for ceramic materials", Teoksessa: Additive Manufacturing 16, 2017. Elsevier Science Direct. S. 124-137. 125 s.

Deirmina, F., Peghini, N., AlMangour, B., Grzesiak, D., Pellizzari, M., 2019. Heat treatment and properties of a hot work steel fabricated by additive manufacturing. Teoksessa: Materials Science and Engineering A 753, 2019. Elsevier Science Direct. S. 109-121. 113, 119-120 Ss.

Desktop Metal (a). "About Us". [Verkkodokumentti.] [Viitattu 3.5.2020.] Saatavilla: <https://www.desktopmetal.com/about-us>

Desktop Metal (b). "Materials". [Verkkodokumentti.] [Viitattu 3.5.2020.] Saatavilla: <https://www.desktopmetal.com/materials>

Desktop Metal (c). "Production System™". [Verkkodokumentti.] [Viitattu 3.5.2020.] Saatavilla: <https://www.desktopmetal.com/products/production>

Fabrisonic. "3D Printing Metal Without Melting?" [Verkkodokumentti.] [Viitattu 3.5.2020.] Saatavilla: <https://fabrisonic.com/technology/>

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. 2015. Additive Manufacturing Technologies – 3D-Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition. Springer. 34, 37-38, 132, 133, 140, 144, 184-185, 205, 245, 266, 267 Ss.

LUT Finna – Lappeenrannan tiedekirjasto: Hakutulokset haulla ”Additive manufacturing”.  
[Verkkodokumentti.] [Viitattu 27.5.2019.] Saatavilla:  
<https://wilma.finna.fi/lut/Primo/Search?lookfor=additive+manufacturing&type=AllFields>  
&

Hölker-Jäger, R., Tekkaya, A.E., Additive manufacture of tools and dies for metal forming. Teoksessa: Brandt, M. 2017. Laser additive manufacturing: materials, design, technologies, and applications. Dawsonera. 451 s.

IDTechEx. 3D Printing Software 2018-2028: Technology and Market Analysis. 2017

Industry: Wittmann Group - EOS additive manufactured lightweight grip system with integrated functionality. [www-lehdistötiedote.] EOS GmbH. [Viitattu 25.4.2019.] Saatavilla: [https://www.eos.info/press/customer\\_case\\_studies/gripper](https://www.eos.info/press/customer_case_studies/gripper)

Kruth, J-P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., Rombouts, M., 2005. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. Teoksessa: Rapid Prototyping Journal; 2005; 11, 1. Proquest. S. 26-36. 34 s.

Leal, R., Barreiros, F. M., Alves, L., Romeiro, F., Vasco, J. C., Santos, M., Marto, C. 2016. Additive manufacturing tooling for the automotive industry. Teoksessa: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Springer-Verlag GmbH, 2017. S. 1671-1676. 1674-1676 Ss.

Leino, L. 2017. Robottitarttujen perehdytysmateriaalin luominen Valmet Automotiven korihitsaamoon. [opinnäytetyö]. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2017062814040>

Luotala, J. 2017. Turussa kehitettiin eksoottinen tulostusmateriaali. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 2.5.2020]. Saatavissa: <https://insinööri-lehti.fi/artikkelit/turussa-kehitettiin-eksoottinen-tulostusmateriaali/>

Monkova, K., Zetkova, I., Kučerová, L., Zetek, M., Monka, P., Daňa, M. Study of 3D printing direction and effects of heat treatment on mechanical properties of MS1 maraging steel. Springer-Verlag GmbH, 2018. 1, 4, 12-13 Ss.

Mower, T. M., Long, M. J. 2015. Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. Teoksessa: Materials Science and Engineering A 651, 2016. Elsevier Science Direct. S. 198-213. 206, 210, 212 Ss.

Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ramirez, D. A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K. N., Shindo, P. W., Medina, F. R., Wicker, R. B. Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies. Teoksessa: Journal of Materials Science & Technology, 28(1) (2012), Elsevier. S. 1–14. 2-3 Ss.

Piili, H., Happonen, A., Väistö, T., Venkataramanan, V., Partanen, J., Salminen, A. 2015. Cost Estimation of Laser Additive Manufacturing of Stainless Steel. Teoksessa: Physics Procedia, 78. S. 388-396. 394-395 Ss.

Premiere at Mercedes-Benz Trucks: New from the 3D printer: the first spare part for trucks made of metal. 2017. [www-lehdistötiedote.] Stuttgart: Daimler AG. [Viitattu 25.4.2019]. Saatavilla: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Premiere-at-Mercedes-Benz-Trucks-New-from-the-3D-printer-the-first-spare-part-for-trucks-made-of-metal.xhtml?oid=23666435>

Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L., Thompson, S. L. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. Teoksessa: Additive Manufacturing 8 (2015), Elsevier. S. 12-35. 13 s.

Ultimaker. Ultimaker CPE+ [verkkodokumentti.] [Viitattu 10.6.2019.] Saatavissa: <https://ultimaker.com/materials/cpe-plus>

Ultimaker. Ultimaker PC [verkkodokumentti.] [Viitattu 10.6.2019.] Saatavissa: <https://ultimaker.com/materials/pc>

Ultimaker. Ultimaker PP [verkkodokumentti.] [Viitattu 10.6.2019.] Saatavissa: <https://ultimaker.com/materials/pp>

de Vries, C. 2017. Volkswagen Autoeuropa: Maximizing production efficiency with 3D printed tools, jigs, and fixtures [verkkodokumentti]. Julkaistu 21.7.2017. [Viitattu 24.4.2019]. Saatavissa: <https://ultimaker.com/en/stories/43969-volkswagen-autoeuropa-maximizing-production-efficiency-with-3d-printed-tools-jigs-and-fixtures>

Åsberg, M., Fredriksson, G., Hatami, S., Fredriksson, W., Krakhmalev, P., 2019. Influence of post treatment on microstructure, porosity and mechanical properties of additive manufactured H13 tool steel. Teoksessa: Materials Science and Engineering A 742 (2019). Elsevier. S. 584-589. 586, 589 Ss..

XJet (a). "About XJet". [Verkkodokumentti.] [Viitattu 3.5.2020.] Saatavissa: <https://www.xjet3d.com/about-us/>