Tampereen yliopisto

Juho Jaatinen

ALUMIINIOSIEN AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Hossein Mokhtarian
Toukokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Juho Jaatinen: Alumiiniosien ainetta lisäävä valmistus
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Toukokuu 2024

Alumiini on yleinen valmistavan teollisuuden käyttämä materiaali. Lisäävä valmistus tuo uusia mahdollisuuksia tuottaa erilaisia kappaleita ja hyödyntää alumiinia tehokkaammin. Tässä työssä kartoitetaan, millä lisäävän valmistuksen tekniikoilla voidaan valmistaa alumiiniosia, minkä lisäksi tarkastellaan menetelmien heikkouksia, vahvuuksia, tekniikoiden käyttökohteita sekä alan tulevaisuuden näkymiä. Ainetta lisäävä valmistus on voimakkaasti kasvava ala, jonka tekniikka ja suorituskyky sekä taloudellinen potentiaali kehittyvät nopeasti. Monet yritykset tutkivat, miten lisäävää valmistusta voitaisiin hyödyntää uusien parempien tuotteiden valmistuksessa. Erityisesti liikenne- ja logistiikka-aloilla on kiinnostusta ja halua investoida lisäävään valmistukseen.

Lisäävän valmistuksen tapaan myös alumiinin käyttö on kasvussa. Se on tällä hetkellä toiseksi eniten käytetty metalli yhteiskunnassa. Alumiinia voidaan valmistaa useammalla lisäävän valmistuksen tekniikalla. Näistä yleisimmät ovat jauhepeltisulatus, suorakerrostus sekä sideaineen suihkutus. Jokaisella tekniikalla on omat heikkoutensa ja vahvuutensa. Tässä työssä havaitaan, että yleisiä heikkouksia ovat verrattain hidas valmistusnopeus, hinta sekä rajoitteet siinä, mitä alumiiniseoksia pystytään käyttämään. Ainetta lisäävän valmistuksen vahvuutena on se, että asetusajat ovat lyhyempiä kuin perinteisiä menetelmiä käytettäessä. Tekniikan avulla voidaan myös valmistaa monimutkaisia ja räätälöityjä geometrioita, joita olisi haastavaa tai mahdotonta saavuttaa tavanomaisilla valmistusmenetelmillä.

Alumiinin lisäävä valmistus on kasvava ala ja sen odotetaan jatkavan laajentumistaan tulevaisuudessa. Uudet materiaalit, parantuneet tulostustekniikat sekä lisääntyvä tietoisuus teollisuudessa edistävät teknologian kehitystä ja laajentavat sen sovellusalueita entisestään. Tulevaisuudessa näemme todennäköisesti entistä suurempia ja monimutkaisempia alumiinikappaleita, jotka on tuotettu lisäävän valmistuksen menetelmillä.

Avainsanat: Lisäävä valmistus, 3D-tulostus, alumiini, jauhepeltisulatus, suorakerrostus, sideaineen suihkutus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. ALUMIINI TEOLLISUUDESSA 2
2.1 Ominaisuudet 2
2.2 Alumiiniseokset 3
3. AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS 4
3.1 Soveltuvat tulostustekniikat 4
3.1.1 Jauhepeltisulatus PBF 6
3.1.2 Suorakerrostus DED 8
3.1.3 Sideaineen suihkutus BJT 9
4. ALUMIINI LISÄÄVÄSSÄ VALMISTUKSESSA 11
4.1 Lisäävän valmistuksen edut 11
4.1.1 Geometrian vapaus 11
4.1.2 Joustava valmistus 13
4.1.3 Materiaalin tehokkaampi käyttö 14
4.1.4 Muita etuja 15
4.2 Lisäävän valmistuksen haasteet 16
4.2.1 Valmistusnopeus 16
4.2.2 Alumiiniseosten heikkoudet 16
4.2.3 Standardien puute 17
4.2.4 Muita haasteita 17
4.3 Käyttökohteet 18
4.4 Tulevaisuuden näkymät 19
5. YHTEENVETO 21
LÄHTEET 23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AM	engl. Additive Manufacturing, lisäävä valmistus
ASTM	American Society for Testing and Materials
BJT	engl. Binder Jetting, sideaineen suihkutus
CAD	engl. Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CNC	engl. Computer Numerical Control, työstökoneen numeerinen ohjaus
DED	engl. Directed Energy Deposition, suorakerrostus
EBM	engl. Electron Beam Melting, elektronisuihkusulatus, jauhepetisulatukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia
ISO	International Organization for Standardization
MEX	engl. Material Extrusion, materiaalin pursotus
MJT	engl. MultiJet Printing, materiaalin suihkutus
PBF	engl. Powder Bed Fusion, jauhepetisulatus
SHL	engl. Sheet Lamination, kerroslaminointi
SLM	engl. Selective Laser Melting, jauheen sulatukseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia
SLS	engl. Selective Laser Sintering, jauheen sintraamiseen perustuva lisäävän valmistuksen teknologia
STL	engl. Standard Triangle Language, kappaleen pintageometrian kolmioverkkoon perustuva esitysmuoto, jota käytetään 3D-geometriatiedon siirtoon 3D-tulostuslaitteelle
WAAM	engl. Wire Arc Additive Manufacturing, suorakerrostukseen perustuva lisäävän valmistuksen menetelmä

1. JOHDANTO

Alumiini on hyvin keskeinen raaka-aine modernissa yhteiskunnassa. Alumiinia käytetään ruoan pakkaamiseen sekä laivojen rakennusmateriaalina ja hyvin moneen kohteeseen näiden kahden väliltä. Suurimmat alumiinin käyttökohteet ovat rakentaminen ja liikenne. Alumiini on toiseksi käytetyin metalli raudan jälkeen. (Huhtaniemi & Teknologiateollisuus 2006, s. 12–29) Onkin arvioitu, että puolivalmiiden alumiinituotteiden kulutus vuonna 2020 oli noin 86,2 megatonnia. Kulutuksen ennustetaan kasvavan 33,3 megatonnia vuoteen 2030 mennessä. (International Aluminium Institute 2022).

Alumiini on myös lisäävässä valmistuksessa tärkeä materiaali. Lisäävä valmistus, jota kutsutaan myös 3D-tulostamiseksi, on verrattaen uusi valmistustekniikka. Siinä valmistettava kappale tuotetaan kolmiulotteisen tietokonemallin pohjalta kerros kerrokselta. Lisäävästä valmistuksesta käytetään myös nimeä digitaalinen valmistus, mikä kuvaa tekniikan riippuvuutta teknologiasta ja tietokoneista. Verrattaessa perinteisiin valmistustekniikoihin lisäävä valmistus muistuttaa jossain määrin valutekniikkaa, jossa ei kuitenkaan tarvita muottia. (Toyserkani 2022, s. 5–7)

Idea kappaleiden valmistamisesta kerros kerrokselta ei kuitenkaan ole uusi. Tiilistä ja kivistä on rakennettu taloja ja rakennuksia jo tuhansia vuosia, mutta moderni tekniikka on tuonut menetelmään uuden ulottuvuuden. Nykyaikainen digitaalinen lisäävä valmistus on saanut alkunsa 1980-luvulla. Ensimmäisenä modernin lisäävän valmistuksen patenttina pidetään vuonna 1985 Charle Hullin jättämää hakemusta, jossa laser kovettaa ohuita kerroksia photopolymeeriä luoden kappaleen. Tämän jälkeen teknologia onkin kehittynyt ja myös metallikappaleiden valmistuksessa pystytään hyödyntämään ainetta lisääviä menetelmiä. (Toyserkani 2022, s. 5–7)

Tässä työssä tarkastellaan, mitä ominaisuuksia ja käyttökohteita alumiinilla on teollisuudessa ja yhteiskunnassa, sekä miten alumiinia valmistetaan, kierrätetään ja mitkä ovat sen ominaisuudet materiaalina. Näkökulmana on alumiinin käyttö lisäävässä valmistuksessa ja erilaiset lisäävän valmistuksen menetelmät, joilla alumiinikappaleita voidaan valmistaa. Eri menetelmien tärkeimpiä ominaisuuksia ja eroavaisuuksia käsitellään yleisesti. Lisäksi tarkastellaan alumiinin soveltuvuutta lisäävään valmistukseen sekä siihen liittyviä haasteita. Lopuksi arvioidaan alumiinin ja lisäävän valmistuksen tulevaisuudennäkymiä.

2. ALUMIINI TEOLLISUUDESSA

Lähes 8 % maankuoresta muodostuu mineraalimuodossa olevasta alumiinista. Se onkin yleisin metalli maankuoressa, kuitenkin sitä on käytetty työkalujen ja tarve-esineiden valmistukseen vasta alle 300 vuotta. Tämä johtuu siitä, että se esiintyy lähes aina oksidimuodossa, mikä tekee puhtaan alumiinin tuotannosta vaikeaa. Tehokkaan ja laajamittaisen alumiinin tuotantoprosessi kehitetiin vuonna 1886. Ranskalainen Paul T Héroult ja amerikkalainen Charles Martin Hall löysivät tämän prosessin samana vuonna toisistaan tietämättä. Sama prosessi on edelleen käytössä. (Frisk 2020, s. 6–9)

2.1 Ominaisuudet

Friskin (2020, s.7) mukaan alumiini on ominaisuuksiltaan sopiva monenlaiseen käyttöön. Alumiini on metalliksi kevyt, ja sen tiheys on 2,7 kg/dm^3, mikä on noin kolmanneksen raudan ja kuparin tiheydestä. Alumiini on seostettuna vahvaa ja korroosionkestävää, minkä lisäksi sillä on suuri sähkön johtavuus ja se on kohtuullisen pehmeä materiaali, mikä tekee siitä helposti työstettävää.

Alumiinin tuotantoprosessi on monivaiheinen ja alkaa bauksiitin louhinnalla. Bauksiittia löytyy pääasiassa trooppisilta alueilta, ja kannattavasti louhittavissa oleva bauksiitti sisältää noin 20–30 % alumiinioksidia. Bayer-prosessilla alumiinioksidi erotetaan bauksiittista ja erotettu oksidi muutetaan Hall–Heroult-prosessissa elektrolyysia hyödyntäen alumiiniksi. (Frisk 2020, s. 8–9)

Ympäristön näkökulmasta alumiinin tuotanto on kuormittavaa. Itse louhinta tapahtuu yleensä maan pintakerroksesta, ja louhinta-alue voidaan palauttaa takaisin lähelle luonnollista tilaansa. (Frisk 2020, s. 67) Vaikka itse louhinta ei ole erityisen saastuttavaa, Bayer-prosessissa syntyy jätettä, jonka uudelleen sijoituksessa on haasteita. Se onkin aiheuttanut ympäristöhaittoja jätteen vuotaessa muun muassa vesistöihin. (Gura 2010) Myös elektrolyysiprosessi vaatii merkittävästi sähköä, mikä lisää alumiinin tuotannon ympäristövaikutuksia. Energiaintensiivisen valmistusprosessin vastapainona alumiini on erittäin hyvin kierrätettävissä oleva materiaali. Arviolta noin 75 % historian aikana tuotetusta alumiinista on edelleen käytössä. (Frisk 2020 s.10)

2.2 Alumiiniseokset

Monessa käyttökohteessa, erityisesti konepajateollisuudessa, lähes kaikkeen käytössä olevaan alumiiniin on sekoitettu muita metalleja. Metallien sekoittaminen parantaa alumiinin ominaisuuksia. (Frisk 2020, s.67–70) Alumiinin käytössä haasteena on erityisesti se, että yksin käytettynä alumiini on hyvin pehmeää. Kun alumiiniin lisätään muita metalleja, sen lujuus kasvaa. Eri metallit muuttavat alumiinin ominaisuuksia hieman eri tavoin. Esimerkiksi magnesiumin tai mangaanin lisääminen alumiiniin parantaa sen työstöominaisuuksia, kuten sitä, kuinka sen hitsaaminen onnistuu. Titaanin lisääminen puolestaan parantaa valmiin tuotteen pinnan laatua. (Huhtaniemi & Teknologiateollisuus 2006)

Alumiinin lisäävä valmistus on pitkälti siinä tilanteessa, että sen kehittämiseen vaaditaan erilaisten alumiiniseosten testaamista ja tutkimista (Frisk 2020, s. 41). Alumiiniseosten tutkimiseen asettaa oman haasteensa se, että lisäävän valmistuksen erilaiset tekniikat asettavat rajoitteita sille, millaisia alumiiniseoksia niissä voidaan käyttää. Leirmon (2021) kirjallisuuskatsauksessa erilaisiin alumiiniseoksiin, todetaan, että erityisesti alumiini-kupariseoksia on tutkittu melko paljon lisäävän valmistuksen kentällä. Al-Cu-seosten lisäksi hän keskittyi katsauksessaan alumiini-sinkkiseoksiin. Hänen tutkimuksensa keskittyi näihin kahteen seokseen, sillä ne molemmat ovat yleisesti liikenne- ja ilmailualalla käytettyjä alumiiniseoksia niiden lujuuden takia. Myös Kenevisi et al. (2021) on tutkinut Al-Cu-seoksien käyttöä lisäävässä valmistuksessa, ja hän toteaakin, että aiheesta on paljon tutkimusta, joka keskittyy lisäävän valmistuksen prosessin aikana alumiinin mikrorakenteessa tapahtuviin muutoksiin ja ilmiöihin. Kenevisi et al (2021) kertoo myös, että lisäävää valmistusta varten on kehitetty myös täysin uusia alumiiniseoksia kuten Scalmalloy.

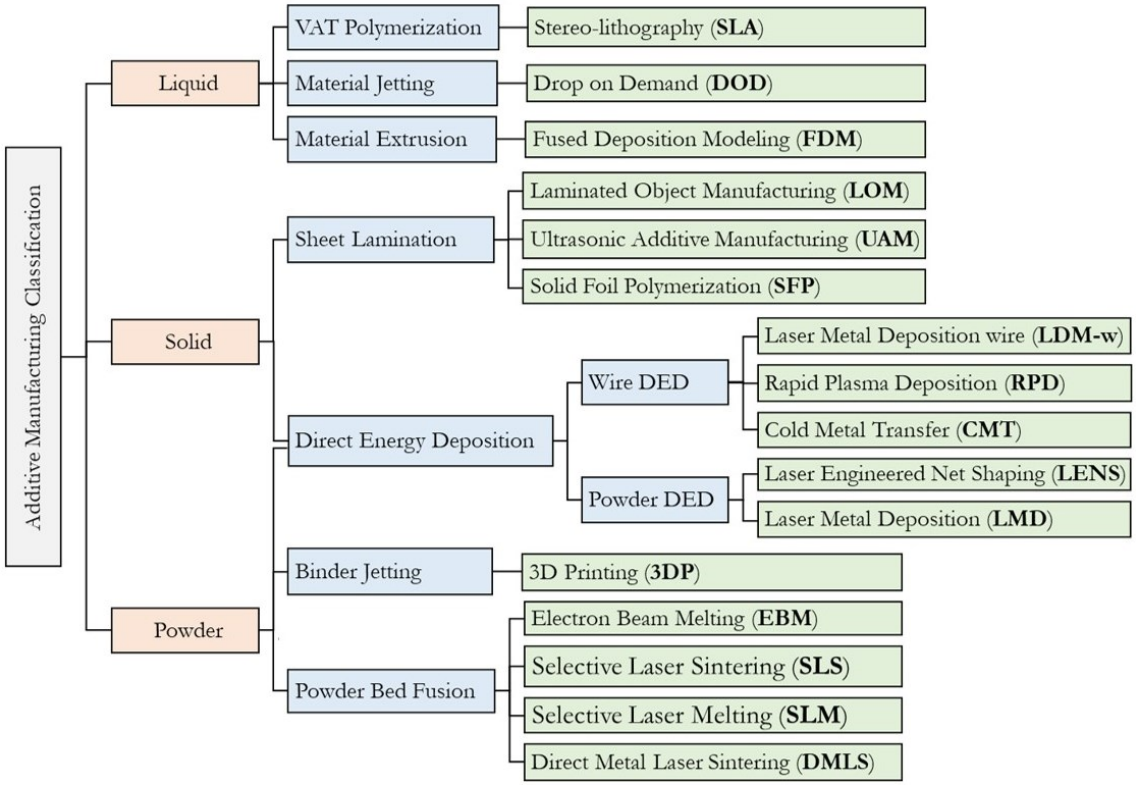
3. AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS

3D-tulostus ja viralliselta nimeltään lisäävää valmistus, englanniksi additive manufacturing tai AM, on valmistustekniikka, joka toimii vastakohtana perinteisille tekniikoille, kuten materiaalia poistaville ja muovaaville menetelmille. Lisäävässä valmistuksessa kappale tuotetaan tietokonemallin pohjalta kerros kerrokselta haluttuun geometriaan (SFS 52900 2021, s. 6). Tyypillinen lisäävän valmistuksen prosessi on Gibsonia (2015, s. 4–6) mukaillen seuraavanlainen: 1) CAD-malli (STL-tiedosto); 2) Mallin siirto asettelu tulostimen ohjelmalla; 3) Laitteiston asetukset; 4) Valmistus/tulostus; 5) Kappaleen jälkikäsittely.

3.1 Soveltuvat tulostustekniikat

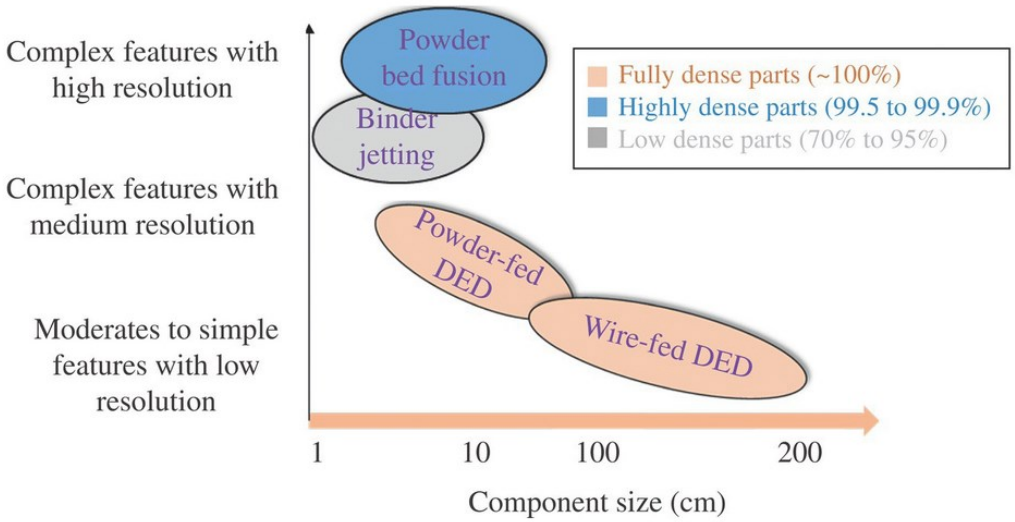
Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan kolmea yleisintä metalleille ja alumiinille käytettyä lisäävän valmistuksen tekniikkaa. Tekniikat on selitetty yleisellä tasolla, sillä eri valmistajien laitteistoissa on eroja, joita ei tässä työssä tarkastella tarkemmin.

Metallien käytetyimmät tulostus tekniikat ovat PBF (jauhepeltisulatus), DED (suorakerrostus) sekä BJT (sideaineen suihkutus). Lähes kaikilla lisäävän valmistuksen menetelmillä voidaan tuottaa metallikappaleita, mutta nämä kolme ovat ominaisuuksiensa ansiosta yleisiä metallimateriaalien kanssa työskennellessä. Muita AM-menetelmiä ovat MEX (materiaalin pursotus), MJT (materiaali suihkutus) ja SHL (kerroslaminointi). (SFS 52900 2021; Toyserkani 2022) Kuvassa 1 on esitelty eri lisäävän valmistuksen menetelmät syötettävän materiaalin olomuodon perusteella. Lisäksi vihreällä taustalla merkatut ovat eri tekniikoiden variaatioita ja alakategorioita.

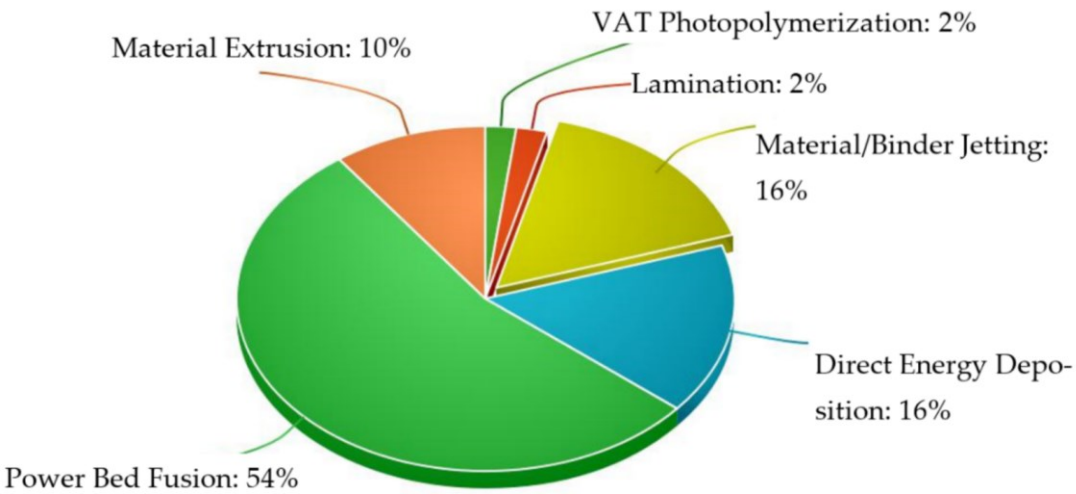


Kuva 1. *Lisäävän valmistuksen luokittelua (Mokhtarian 2019)*

Menetelmillä on merkittäviä eroja niin laitteiston ja tekniikan, kuin myös valmiin kappaleen mekaanisessa lujuudessa, koossa ja geometrian monimutkaisuudessa. Alla oleva kuva 2 näyttääkin karkean jaon mitä eroa eri menetelmillä on, sekä millaisia geometrioita niillä pystytään tuottamaan. Kuvassa 3 eri lisäävän valmistuksen markkinoiden jakautuminen eri valmistustekniikoiden kesken. Kuvista huomataankin, että korkeaan resoluutioon ja monimutkaisten geometrioiden tuottoon pystyvällä jauhepeltisulatuksella on vuoden 2020 datan perusteella vahva markkinaosuus alalla.



Kuva 2. *Tulostustekniikoiden ominaisuuksia (Toyserkani 2022)*



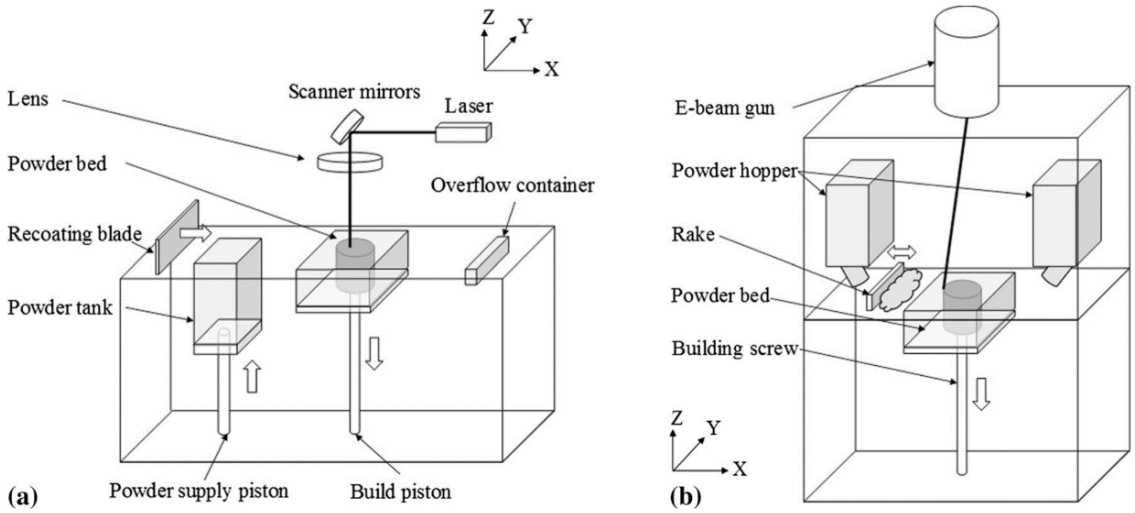
Kuva 3. *Metallien lisäävän valmistuksen markkina 2020 (Guzzomi et al. 2021)*

3.1.1 Jauhepeltisulatus PBF

Jauhepeltisulatus on todennäköisesti eniten käytetty alumiinin lisäävän valmistuksen menetelmä. Tekniikka mahdollistaa monimutkaisten geometrioiden valmistuksen ja on pinnanlaadultaan tarkka tulostus menetelmä. (Mäntyjärvi 2021) Menetelmällä pystytään tällä hetkellä valmistamaan keskikokoisia kappaleita, joiden sivun pituus on alle metrin mittainen (Toyserkani 2022). PBF-menetelmällä tuotetaan pääasiassa valmiita osia, mutta joissain tilanteissa valmiita kappaleita voidaan vielä lämpökäsitellä (Milewski 2017).

Tekniikassa kohdistettu energianlähde sulattaa tai sintraa tasaisella tasolla olevan metallijauheen, joka jäähtyessään muodostaa yhtenäisen kerroksen. Tämän valmiin kerroksen päälle levitetään tasaisesti ohut kerros metallijauhetta ja prosessi toistetaan, jolloin kerrokset liittyvät yhteen ja kappale valmistuu kerros kerrokselta. (Zhang et al. 2018)

Merkittävimmät PBF-tekniikat ovat SLM (selective laser melting), jossa energia lähteenä on lasersäde sekä EBM (elektro beam melting), jossa elektonisuihku sulattaa metallin. Menetelmät ovat periaatteltaan samakaltaisia, mutta niissä on omat heikkoutensa ja vahvuutensa. Kuvassa 4 on esitelty tekniikoiden rakenteet ja perusperiatteet. SLM-menetelmässä käytetään suojakaasua estämään metallin hapetumista ja EBM-tekniikassa valmistuskammiossa täytyy olla tyhjiö. EBM-tekniikassa prosessikammiossa käytetään korkeampaa lämpötilaa ja prosessissa tapahtuu sintteröintiä. Elektonisuihku on nopeampi kuin laser, mikä mahdollistaa teoriassa nopeamman tulostuksen. SLM-laitteissa voi kuitenkin olla useampia lasereita, joten käytännön nopeuseroa ei ole pääteltävissä pelkästään käytössä olevasta tekniikasta. (Toyserkani 2022)



Kuva 4. *Kuva PBF -laitteistosta, ja SLM oikealla ja EBM -tekniikka oikealla (Zhang et al. 2018)*

Merkittävimpiä eroja valmiissa kappaleissa on muutamia. EBM-tekniikassa valmiiseen kappaleeseen jää vähemmän sisäisiä jännityksiä, johtuen korkeammasta kammion lämpötilasta ja erilaisesta sulatustekniikasta. Tukirakenteiden tarve ei ole tästä syystä myöskään kovin suuri, mutta kappaleen puhdistaminen on työläämpään kuin SLM-tekniikassa. SLM-tekniikassa päästään yleesä hieman suurempaan tarkuuteen ja prosessi on hieman yksinkertaisempi kuin EBM-tekniikassa. Tukirakenteiden vaaditaan enemmän, millä pystytään estämään kappaleen vääntyminen valmistuksen aikaisen lämmön seurauksena. (Milewski 2017) EBM-tekniikassa rajoitteena on myös se, että

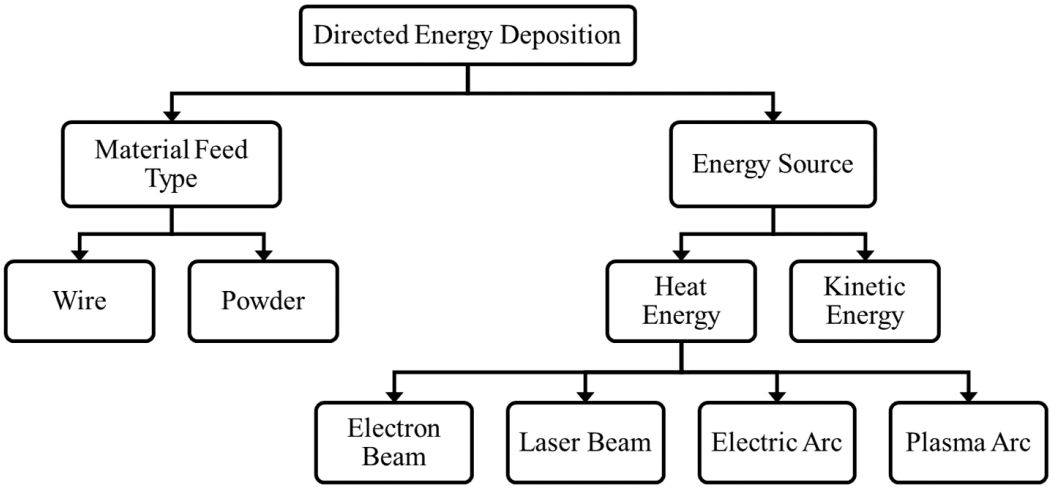
siinä käytetyn materiaalin tulee olla sähköä johtavaa. Myös paljon käytetty PBF-tekniikka on SLS (selective laser sintering), joka on muuten samanlainen kuin SLM-tekniikka, mutta siinä jauhe ei sula täysin, vaan ainoastaan sintteröityy kiinteäksi kappaleeksi. SLM-tekniikka onkin kehittyneempi versio SLS-tekniikasta. (Toyserkani 2022)

PBF-menetelmillä päästään lähelle 99,99 % tiheyttä materiaalissa ja valmiin materiaalin lujuus ominaisuudet ovat usein parempia kuin vastaavan valetun kappaleen, minkä lisäksi lujuus vertautuu taottuihin osiin. Tähän kuitenkin vaikuttaa voimakkaasti onko materiaaliin jäänyt huokoisia kohtia, joissa materiaali ei ole täysin sulanut. (Toyserkani 2022)

3.1.2 Suorakerrostus DED

Suorakerrostus eli DED on toinen hyvin yleinen lisäävän valmistuksen menetelmä jauhepelti sulatuksen rinnalla. Menetelmää käytetään kappaleiden valmistukseen ja korjaus tarkoituksiin. Se ei ole yhtä tarkka kuin PBF, mutta sillä pysytään valmistamaan isompia kappaleita. DED on nopeampi menetelmä, kuin PBF. Kuitenkin erot eri DED-menetelmien välillä ovat merkittäviä ja tyypilliset valmistusnopeudet vaihtelevat välillä 500–4000 cm^3/h. Tulostus alueen koot ovat myös vähemmän rajoittuneita ja suurimmat DED-laiteet pystyvätkin valmistamaan sivun pituudeltaan jopa kymmenien metrien mittaisia kappaleita. (Toyserkani 2022)

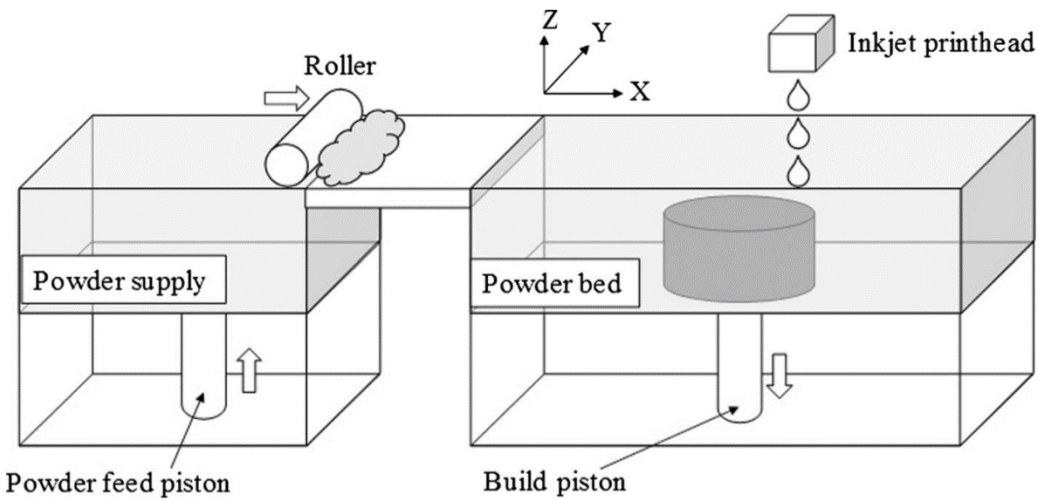
Suorakerrostus on yksivaiheinen tekniikka, eli kappaleen geometria ja lujuus ominaisuudet muodostetaan yhdessä prosessissa, jossa kohdennettu materiaalin syöttö yhdistetään kohdennettuun energianlähteeseen (SFS 52900 2021). Materiaali on joko lanka- tai jauhemuodossa ja sulaa energialähteen vaikutuksesta, mutta jähmettyy kiinteäksi välittömästi. Prosessissa käytetään suojakaasua vähentämään hapettumista, mikä parantaa laatua ja estää huokoisuuttaa. Haluttu geometria muodostetaan kerroskerrokselta tietokone ohjatusti, jolloin materiaalin syöttöä ja energianlähdettä voidaan ohjata. (Natarajan 2021) Prosessin materiaali ja energian lähteistä on erilaisia yhdistelmiä, joita esitellään kuvassa 5. Jauhetta käyttävät DED-menetelmät ovat yleensä tarkempia kuin materiaalia lankana syöttävät laiteet. Jauhe DED on kuitenkin hintavampaa kalliimman materiaalin ja hitaamman prosessin vuoksi. (Toyserkani 2022)



Kuva 5. *DED prosessien kaavio (Banellingarnen et al. 2018)*

3.1.3 Sideaineen suihkutus BJT

Sidenaineen suihkutus tekniikassa on samankaltaisuutta perinteisen 2D-tulostuksen kanssa. Käytännössä ohuelle metallijauhekerrokselle suihkutetaan yhdellä tai useammalla suuttimella sideainetta, joka liittää metallijauheen yhteen. Suutinta ohjataan suunniteltua reittiä, kunnes halutun muotoinen jauhekerros on sitoutunut yhtenäiseksi. Tämän jälkeen levitetään uusi jauhekerros, ja toistamalla tätä kappale muodostuu kerroksien liittyessä toisiinsa. Kuvasta 6 löytyy yksinkertaistettu esitys tekniikasta. Menetelmällä tuotettua kappaletta kutsutaan englanniksi green body:ksi tai green part:iksi. Tässä vaiheessa kappale pysyy muodossaan sideaineella, joka poistetaan yleensä lämpökäsittelyssä. Tämän jälkeen on lämpökäsittely, jossa metallijauhe sintrataan ja lujitetaan yhteen valmiiksi kappaleeksi.



Kuva 6. *BJT-prosessi (Zhang et al. 2018)*

Green part:in valmistus on verrattaen nopea prosessi moneen muuhun AM-menetelmään varattuna, mutta prosessi sisältää monia vaiheita. Kokonaisuudessa sideaineen suihkutus on hidas AM-menetelmä. Myöskään kappaleen kutistumiselta ei voida välttyä. (Zhang et al. 2018)Sideaineen kanssa tulostetaan kappaleen muoto, jonka jälkeen se lämmitetään korkeaan lämpötilaan ja sintteröidään kovaksi kappaleeksi. Sideaine poistuu lämmössä ja kappale kutistuu hieman. Tämä voidaan ennakoida tekemällä green part:ista tarkoituksella hieman haluttua isompi, jolloin valmis kappale on halutuissa mitoissa.

4. ALUMIINI LISÄÄVÄSSÄ VALMISTUKSESSA

Alumiini on materiaalina paljon käytössä liikenne- sekä ilmailualalla. Alumiinin käyttö materiaalina on kasvanut ja kiinnostusta hyödyntää lisäävää valmistusta alumiiniosien tuotannossa on suurta. Yleisesti lisäävän valmistuksen markkinan koko pelkästään ilmailualalla odotetaan kasvavan 20,23 % vuosien 2020 ja 2030 välillä. (Amritesh 2022) Liikenne- ja ilmailualoilla valmistetaan monimutkaisia ja paljon komponentteja sisältäviä kokonaisuuksia, minkä vuoksi alumiini on erityisesti sen hinnan, keveyden sekä lujuuden suhteen hyvä materiaali monien komponenttien valmistamiseen. (Eplus3D 2023)

Myös monessa muissa kohteessa alumiini komponentit ovat merkittävässä käytössä. Tässä kappaleessa tarkastella, millaisia etuja ja haasteita lisäävän valmistuksen tekniikat tarjoavat alumiini komponentteja tehdessä. Lisäksi tarkastellaan, missä käytössä tekniikka on teollisuudessa ja mitä tulevaisuuden näkymiä alalla on.

4.1 Lisäävän valmistuksen edut

Lisäävällä valmistuksella saavutetaan merkittäviä etuja perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. Perinteisillä menetelmillä tässä työssä viitataan koneistukseen ja valutekniikoihin. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi muutamia lisäävän valmistuksen hyötyjä ja etuja perinteisiin menetelmiin verrattuna. Yksittäisillä lisäävän valmistuksen tekniikoilla on erilaisia ominaisuuksia, mutta niitä ei tässä työssä tarkastella vaan keskitytään lisäävään valmistukseen alana ja sen tarjoamiin mahdollisuuksiin

4.1.1 Geometrian vapaus

Yhtenä merkittävimpänä lisäävän valmistuksen vahvuutena on geometrian vapautuminen. Osana tuotteen suunnitteluprosessia tulee ottaa huomioon kappaleen valmistettavuus, eli kykeneekö käytössä oleva laite valmistamaan kyseistä geometriaa. Lisäävillä menetelmillä valmistettavasta kappaleesta voidaan suunnitella geometrisesti huomattavasti monimutkaisempi kuin muita menetelmiä käytettäessä. Kappaleisiin pystytään tekemään monenlaisia motoja sekä sisäisiä rakenteita ja kanavia, jotka olisivat mahdottomia perinteisillä tekniikoilla. (Elliott & Waters 2019 s.6) Erilaisia valumenetelmiä on tähän asti hyödynnetty monimutkaisten kappaleiden, kuten polttomoottoreiden sylinterilohkojen valmistuksessa. Valutekniikat ovat kutenkin rajoittuneita monelta osin. Haasteena on esimerkiksi valmistettavan tuotteen seinämän paksuus ja geometria, jotka vaikuttavat

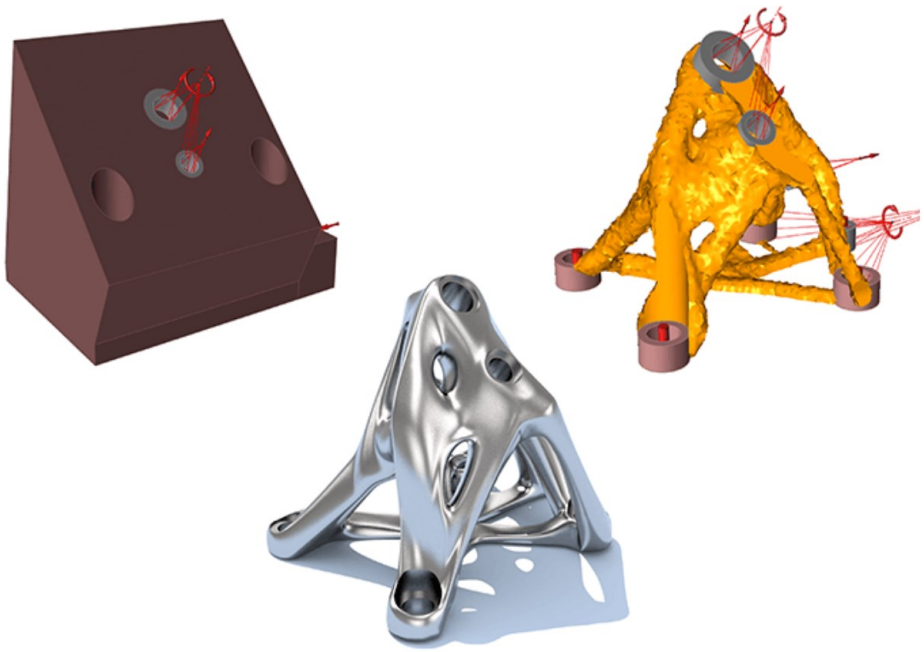
metallin virtaukseen muotissa. Vaikka haluttu geometria olisi mahdollista valmistaa, sen hinta saattaa tulla perinteisillä tekniikoilla kalliimmaksi, kun geometria monimutkaisuutta lisätään. Lisäävässä valmistuksessa geometrian monimutkaisuus ei juurikaan lisää valmistuskustannuksia tai -aikaa. Tämä mahdollistaa materiaalin tehokkaan käytön, kun kappaleista voidaan suunnitella ainoastaan tarvittavan kokoista, ja painoa sekä kestävyyttä voidaan optimoida. (Toyserkani 2022, s.47). Kuvassa 7 on AM-menetelmällä tuotettu lämmönvaihdin, jossa on hyödynnetty mahdollisuutta tuottaa monimutkainen sisäinen rakenne.

Kuva 7. *Alumiininen lisäävällä valmistuksella tehty lämmönvaihdin (Metal AM magazine 2023)*

Toinen perinteinen valmistuksen menetelmä on materiaalin poisto eli koneistus. Joiltain osin lisäävässä valmistuksessa on samoja piirteitä kuin CNC-koneistuksessa, missä kappaleen geometria työstetään tietokone ohjatusti. Kuitenkin poiketen CNC-koneistuksesta lisäävässä valmistuksessa nimensä mukaisesti lisätään materiaalia eikä poisteta. Yleisesti CNC-laiteet pystyvät poistamaan materiaalia huomattavasti nopeammin, kuin mitä lisäävän valmistuksen laitteisto pystyy tulostamaan. Kuitenkin tällaiset koneistus laitteet vaativat monesti merkittäväsi enemmän asetusaikaa kuin lisäävän valmistuksen laitteisto, jolloin ero ei ole välttämättä niin merkittävä. (Gibson 2015)

Kappaleen geometrian vapautuessa tarvittavan materiaalin määrää voidaan optimoida. Suunnitteluohjelmistolla voidaan tarkastella etukäteen kappaleeseen vaikuttuvia ulkoisia voimia, sekä miten voimat jakautuvat valmistettavan rakenteen sisällä. Tämän pohjalta materiaalia voidaan poistaa ja lisättä rakenteen eri kohtiin tarpeen mukaan. (Sulkanen 2017) Tekniikkaa kutsutaan topologian optimoinniksi ja sen käyttö on tärkeä osa lisäävä valmistusta. Ibhadode et al. (2023 s.1) kuvaa topologian optimoinnin ja lisäävän valmis-

tuksen suhdetta symbioottiseksi. Lisäävä valmistus mahdollistaa monimutkaisten geometrioiden valmistuksen, joita topologian optimointi tuottaa. Toisaalta lisäävä valmistus hyötyy keveämmistä kappaleista, jolloin niiden valmistaminen on nopeampaa. Kuvassa 8 esitellään topologian optimointi prosessi. Kuvasarjassa näytetään, kuinka kappaleen geometria muuttuu materiaalin määrää minimoitaessa. Käytännössä kappaleesta voidaan täten tehdä mahdollisimman kevyt, mistä johtuen se on myös nopeampi valmistaa.



Kuva 8. *Topologian optimointi (Sulkanen 2017)*

Vaikka lisäävä valmistus vapauttakin geometrian suunnittelua, silti tietyt muodot saattavat olla haastavia valmistaa tai kappaleen tulostus asentoon tulee kiinnittää erityistä huomiota. Tässä huomataankin, että myös lisäävässä valmistuksessa on tiettyjä rajoituksia. Haasteelliseksi muodostuvat yksityiskohdat riippuvat kuitenkin tarkemmin käytettävästä tekniikasta.

4.1.2 Joustava valmistus

Lisäävällä valmistuksella on monia etuja verrattuna perinteisiin valmistustekniikoihin kuten valamiseen, koneistukseen ja kappaleiden toisiinsa liittämiseen. Ensimmäisenä etuna monesti mainitaan nopeus ja joustavuus. Lisäävä valmistus ei itsessään ole kovin nopeaa, mutta huomioidessa asetusaika ja AM-menetelmien joustavuus tilanne muut-

tuu. Samalla laitteistolla voidaan ilman fyysisiä muutoksia tehdä hyvinkin erilaisia kappalaita ja geometrioita, jolloin lisäävä valmistus voi olla perinteisiä tekniikoita nopeampi. Tämän korostuu erityisesti pienissä sarjoissa, joissa asetusaikojen osuus koko prosessista on merkittävä. AM-menetelmiä pidetäänkin erityisesti tuotekehityksessä hyvänä menetelmänä yksinkertaisen prosessinsa ja muunneltavuutensa takia. (Bandyopadhyay & Bose 2015, s.7)

Maailmantilanteen ollessa epävarma, tarve paikalliselle tuotannolle korostuu, mikä on eduksi lisäävän valmistuksen alalle. Lyhyemmän asetusajat tuovat höytyä kohteissa, missä kappaleen geometriaa halutaan testata. Näissä tilanteissa voidaan valmistaa useita prototyyppejä, joiden ominaisuudet voivat muuttua. Kunnossapito ja huoltokohteet ovat yleensä kiireellisiä ja lisäävä valmistus tuo tälle alalle merkittäviä etuja tarjotessaan mahdollisuuden valmistaa nopeasti korvaava osa paikallisesti.

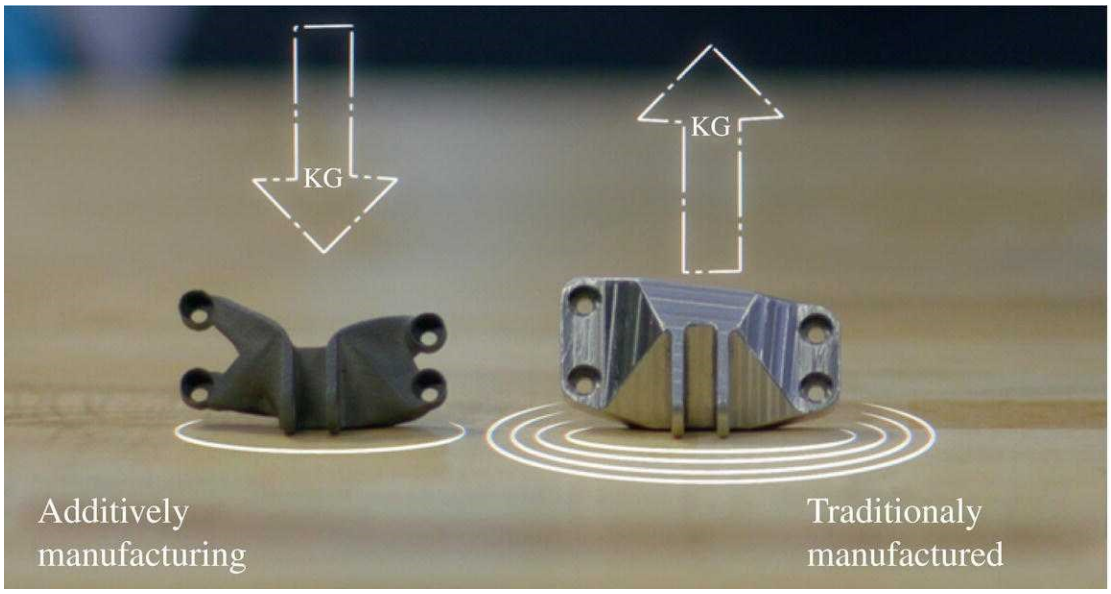
Lisäävän valmistuksen vahvuudet tulevat esiin pienissä erissä ja kohteissa, joissa tarvitaan lyhyitä asetusaikoja. Myös kustomoitavien tai tuotekehitysvaiheessa olevien osien kohdalla lisäävä valmistus on sopiva ratkaisu. Kappaleen geometriaa tai ominaisuuksia voidaan muokata ilman fyysisiä muutoksia valmistuslaitteistossa. Näin valmistettua kappaletta voidaan tarkastella fyysisesti ja tehdä seuraavasta versiosta parempi tai muuten erilainen ilman suuria kustannuksia.

4.1.3 Materiaalin tehokkaampi käyttö

Alumiinin käytön kasvaessa ja uuden alumiinin tuotannon ollessa ympäristöä kuormittavaa, on tärkeää pyrkiä käyttämään alumiinia mahdollisimman tehokkaasti. Monessa tilanteessa monimutkainen useasta komponentista koostuva kokonaisuus, joka on valmistettu perinteisillä tekniikoilla, voidaan korvata keveämmällä ja pienemmän määrän erillisiä osia sisältävällä konnaisuudella, käyttämällä lisäävää valmistusta. (Elliott & Waters 2019 s.65) Geometrian ollessa vapaa, voidaan yhdestä osasta tehdä monimutkaisempi, mikä yhdessä aiemmin mainitun topologian optimoinnin kanssa, johtaa tehokkaaseen materiaalin käyttöön. Lisäävän valmistuksen avulla osista voidaan tehdä entistä parempia, ja usein erityisesti keveyden tavoittelu on monilla aloilla tärkeää (Porsche Innovations).

Ingarao et al. (2018) arvioi lisäävällä valmistuksella tuotettujen alumiini kappaleiden yleisiä ympäristövaikutuksia. Tekstissään hän toteaa, että painon vähentämisen ja valmistettavan tuotteen käyttö aikaisten ympäristövaikutusten kautta lisäävä valmistus voi olla ympäristön kannalta parempi vaihtoehto, kuin perinteiset metodit. Tutkimuksessaan hän tarkastellee AM-menetelmillä tuotettujen kappaleiden käyttöä ilmailualalla. Olemassa

oleva kaltaisen ja saman painoisen kappaleen valmistus SLM-menetelmällä ei tuo tässä tapauksessa ympäristöhyötyjä. Onkin hyvä tiedostaa, että lisäävä valmistus ei automaattisesti tarkoita ympäristöystävällistä tuotantoa, mutta se voi mahdollistaa tuotteiden suunnittelun siten, että kokonaisuutena valmis tuote on elinkaarensa aikana parempi vaihtoehto.



Kuva 9. *Materiaalin käytön optimointi (Toyserkani 2022)*

4.1.4 Muita etuja

Hyötyjä, joita saavutetaan lisäävällä valmistuksella, on monia ja suurin osa niistä tulee tavasta, jolla kappaleita voidaan suunnitella vapaammin. Lisäävän valmistuksen rajoitteen ovat huomattavan erilaiset, kuin perinteisillä menetelmillä. Lisäävässä valmistuksessa valmistusprosessi on suoraviivainen ja sillä voidaan yksinkertaistaa monivaiheisia valmistusprosesseja (Gibson et al. 2020 s.9).

Yksinkertaisemman prosessin myötä lisäävän valmistuksen laitteisto on nopeasti mukautettavissa ja priorisoitavissa tärkeiden komponenttien tuottamiseen. Korona pandemia ja sen luomien hankintaketjuihin liittyvien haasteiden myötä monet näkevät paikallisen tuotannon tärkeänä myös tulevien kriisien kannalta. Lisäävä valmistus nähdään yhtenä vaihtoehtona paikallisen tuotannon ja kriisikestävyyden edistämiseksi. (Toyserkani 2022 s.49)

4.2 Lisäävän valmistuksen haasteet

Lisäävällä valmistuksella on luonnollisesti haasteita eikä se ole sopiva valmistustapa kaikkiin tilanteisiin. Seuraavaksi käydään läpi muutamia yleisempiä haasteita, jotka ovat yhteisiä kaikille lisäävän valmistuksen tekniikoille. Yksittäisten tekniikoiden, saati eri valmistajien laitteiden rajoitteisiin ei tässä työssä tarkemmin tutustuta. On kuitenkin hyvä tiedostaa, että suunniteltaessa komponentteja, jotka valmistetaan lisäävällä valmistuksella, täytyy ottaa huomioon tekniikka ja laitteisto, jolla tuote valmistetaan.

4.2.1 Valmistusnopeus

Yhtenä merkittävimpänä haasteena lisäävässä valmistuksessa on valmistusnopeus. Kohteissa, joissa samaa komponenttia tarvitsee valmistaa suurissa määrissä lisäävä valmistus ei ole kustannustehokas vaihtoehto. (Guzzomi et al. 2021 s.16, 22) Lisäävän valmistuksen menetelmistä DED-prosessilla voidaan valmistaa kappaleita varsin nopeasti verrattuna PBF- ja BJT-prosesseihin. Kuitenkin perinteisillä menetelmillä on merkittävä nopeus ero kaikkiin näihin verrattuna. (Toyserkani 2022) Voidaankin sanoa, että massatuotannossa lisäävän valmisuksen ei nähdä kilpailevan valmistusnopeudessa tai hinnassa perinteisten teknologioiden kanssa.

4.2.2 Alumiiniseosten heikkoudet

Kuten muussakin teollisuudessa, myös lisäävässä valmistuksessa alumiinia käytetään seostettuna muiden metallien kanssa (Altıparmak et al. 2021). Monet alumiiniseokset eivät kuitenkaan ole materiaaleina kovin helppoja hitsattavia, mikä näkyy myös huonona yhteensopivuutena AM-menetelmien kanssa. Lisäävän valmistuksen menetelmät ovat hitsauksen kaltaisia, sillä myös niissä materiaali sulaa ja jähmettyy nopeasti. Tämän takia metallien lisäävässä valmistuksessa onkin alan alkuvaiheessa keskitytty enemmän muihin metalleihin kuten titaaniin. Alumiini on kuitenkin ominaisuuksiltaan ja saatavuudeltaan hyvä materiaali useiden komponenttien valmistukseen. (Toyserkani 2022) Viime vuosina alumiinin käyttämisessä osana lisäävää valmistusta on menty eteenpäin, kehittämällä laitteistoa sekä alumiiniseoksia, jotka soveltuvat paremmin lisäävään valmistukseen (Lumley 2018).

Usein myös lisäävässä valmistuksessa käytetty tekniikka vaikuttaa, siihen millaisia alumiiniseoksia voidaan käyttää (Altıparmak et al. 2021). Magnesium ja sinkki ovat esimerkkejä sellaisista metalleista, jotka eivät sovellu alumiiniseoksiin, kun sitä halutaan käyttää

jauhepeltisulatuksessa, sillä niiden höyrystymislämpötila on melko alhainen (Mauduit et al. 2017; Altıparmak et al. 2021). Muidenkin alumiiniseosten kohdalla on nähty olevan heikkouksia ja lisävään valmistukseen soveltuvia alumiiniseoksia on löydetty huomattavasti vähemmän kuin niitä, jotka eivät tähän käyttötarkoitukseen sovi (Altıparmak et al. 2021).

Tiettyjä alumiiniseoksia valmistettaessa kappaleissa ilmenee erilaisia mikrorakenteen ja pinnanlaadun ongelmia. Laatuongelmia ovat lujuutta alentavat halkeilu, huokoisuus ja hapettuminen. (Altıparmak et al. 2021) Näitä haasteita aiheuttavat alumiinin ja sen seosten luonnollisista ominaisuuksista, joita ovat korkea lämmönjohtavuus, herkkyys hapettumiselle, laaja jähmettymisalue, sulan heikko virtaus ja alumiinin korkea heijastavuus (Kenevisi et al. 2021). Lisäksi alalta puuttuu standardeja ja käytäntöjä, joilla laatua voitaisiin analysoida (Altıparmak et al. 2021).

4.2.3 Standardien puute

Tuotekehitys vaiheessa osien tarkkuus ei välttämättä ole erityisen tärkeää ja kappaleita ei myydä asiakkaille. Kuitenkin sarjatuotannossa ja kaupallisessa käytössä valmistettavilta kappaleilta odotetaan kestävyyttä ja laatua. Lisäävän valmistuksen yleistymistä kaupallisissa tuotteissa hidastaa alalla vallitseva osittainen standardien puute. Tämä aiheuttaa haasteita mekaanisten ominaisuuksien testaukseen, tulostusparametrien asetuksessa sekä toleranssien määrityksessä. Monilla aloilla kuten ilmailualla vaaditaan tiettyä kestävyyttä käytössä olevilta komponenteilta. Tällaisilla aloilla lisäävällä valmistuksella tuotettuja kappaleita ei voida käyttää, ellei niiden laadusta voida varmistua. Kansainvälinen standardoimisjärjestö (ISO) ja amerikkalainen testaus ja materiaali yhdistys (ASTM) ovat luoneet suurimman osan alalla tällä hetkellä olevista standardeista, mutta merkittävä osa testaus- ja laatustandardeja on vasta kehityksessä. (Guzzomi et al. 2021) Vähäisen standardien määrän aiheuttamien ongelmien voidaankin olettaa vähenevän tulevaisuudessa. Kehitystyö on kuitenkin aikaa vievää. Lisäävän valmistuksen monimutkaisuuden vuoksi laadun varmistaminen saattaa vaatia uudenlaisten testausprosessien luomista, jotta valmiita alumiinituotteita pystytään käyttämään kriittisissä kohteissa, kuten lentokoneissa (Altıparmak et al. 2021).

4.2.4 Muita haasteita

Lisäävä valmistus pitää sisällään erilaisia tekniikoita, joilla on omat vahvuudet ja heikkoudet. Tätä voidaankin pitää alan yleisenä haasteena. Lisäävän valmistuksen laitteisto

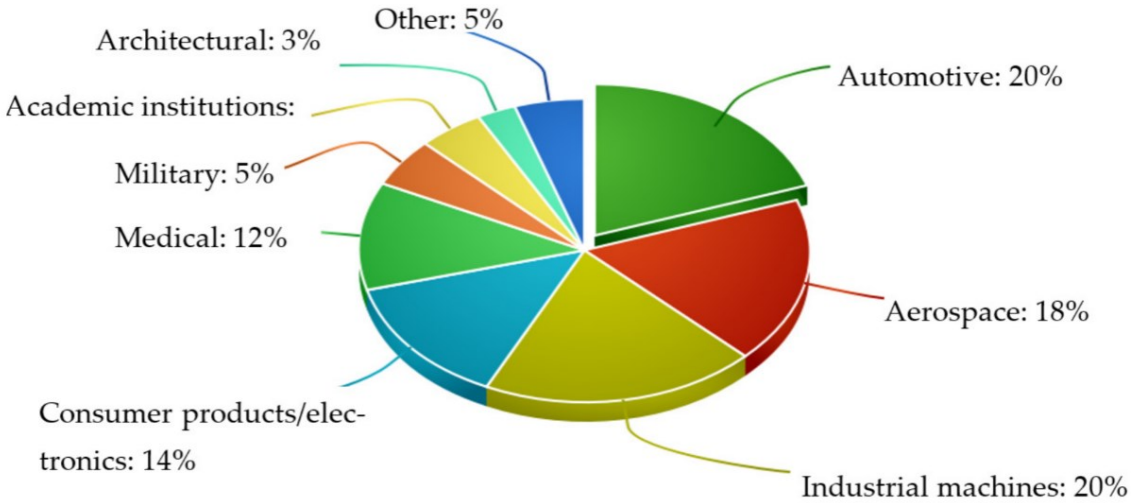
on kallista ja kullakin laitteella pystytään valmistamaa vain yhdellä tekniikalla tietyn kokoisia kappaleita. Lisäävän valmistuksen hyödyttäminen vaatiikin ymmärrystä ja osaamista alasta, sillä myös kappaletta suunniteltaessa täytyy tietää, millä lisäävän valmistuksen prosessilla se tuotetaan (Guzzomi et al. 2021 s.21).

Muita lisäävälle valmistukselle tyypillisiä heikkouksia ovat:

1. Huono pinnanlaatu verrattuna koneistukseen.
2. Tarkka vaatimus materiaalille. Vain tiettyjä seoksia pystytään käyttämään.
3. Tarve tuki rakenteille. Tyhjän päälle valmistus ei onnistu.
4. Korkea energiatarve verrattuna perinteisiin menetelmiin. (Bernard et al. 2023 s.43)

4.3 Käyttökohteet

Tällä hetkellä lisäävää valmistusta hyödynnetään eniten korkean teknologian aloilla, joissa lisäävän valmistuksen tuomat hyödyt ovat haluttuja ominaisuuksia. Erityisesti alumiinin lisäävä valmistus painottuu aloille kuten liikenne ja ilmailu, joissa komponenttien keveys on etu. Kuvassa 10 lisäävän valmistuksen käyttö eri aloilla. Alumiinin kohtuullinen hinta, keveys, lujuus ja hyvä lämmön- sekä sähkönjohtavuus tekevät sitä optimaalisen materiaalin moneen kohteeseen. Lisäävä valmistus laajentaa mahdollisuuksia, joilla materiaalia voidaan käyttää. (Amritesh 2022; Madeleine 2023)



Kuva 10. *Lisäävän valmistuksen käytön jakautuminen 2018 (Guzzomi et al. 2021)*

Esimerkkejä, joissa lisäävää valmistuksen käyttöä on tutkittu tai hyödynnetty kaupallisessa tuotteessa on monia. Muun muassa Porchen ja Mahlen yhteistyö, jossa 911 GT2 urheiluauton männät valmistettiin lisäävällä valmistuksella. Männistä pystyttiin tekemään keveämpiä, minkä takia moottorin tehoa kyettiin nostamaan. (Porsche Innovations)

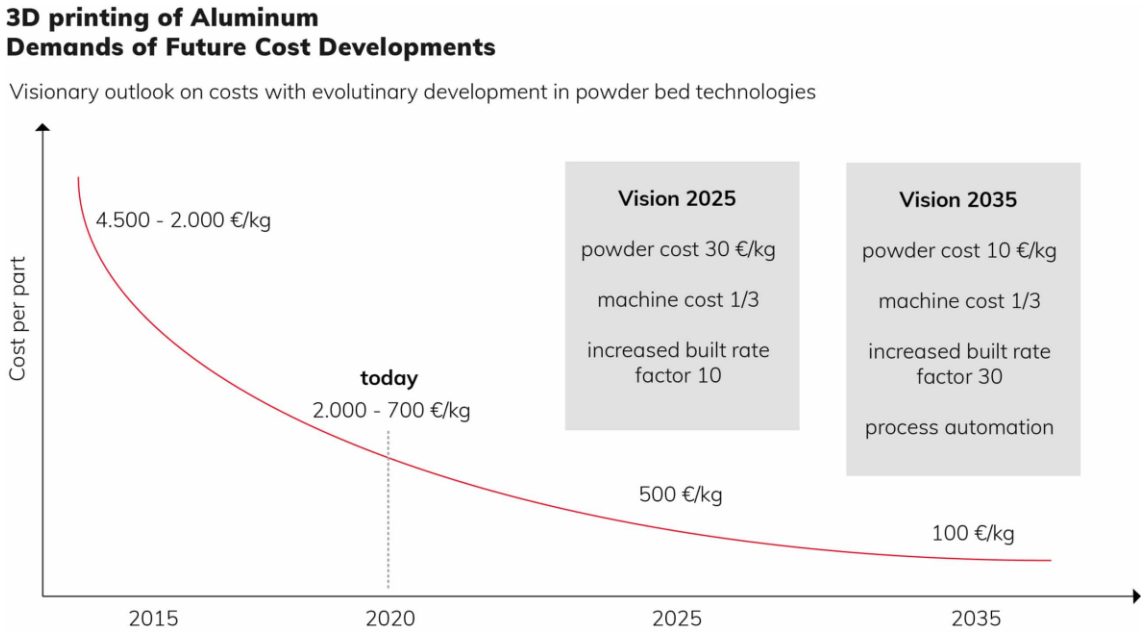
Ilmailualalla mielenkiintoinen uusia toimija Relativity Space laukaisi Terran 1 raketin vuoden 2023 marraskuussa. Laukaisu oli yrityksen ensimmäinen ja vaikka raketti tuhoutui hieman ennen kiertoradalle pääsyä, voidaan sitä pitää vähintään osittain onnistuneena. Mielenkiintoisen tapahtumasta teki se, että raketti oli valmistettu 85 % lisäävillä menetelmällä ja muun muassa raketin polttoainesäiliöt ja runko olivat tehty alumiinista lisäävällä valmistuksella. (Relativity Space 2023; Veritasium 2021; Wall 2023)

Alumiinin lisäävä valmistus on kannattava tapa tuottaa komponentteja tietyissä tilanteissa. Monissa sovelluksissa lisäävä valmistus tuo etuja, mutta on hinnaltaan merkittävästi kalliimpi kuin perinteinen tekniikat (Srivastava et al. 2023 kappale 6). Eikä tämän vuoksi ole vielä kovin laajalle levinnyt valmistusmuoto.

4.4 Tulevaisuuden näkymät

Materiaalia lisäävä valmistus on kehittyvä ala, jonka mahdollisuudet ja hyödyt ovat vasta löytymässä, kun tekniikan ja materiaalien haasteita saadaan ratkottua. Lisäävän valmistuksen odotetaan olevan merkittävässä roolissa kevyiden metallimateriaalien käytössä tulevaisuudessa (Ishimoto & Nakano 2023). Lisäävän valmistuksen alalla on nähty merkittävää kasvua, jonka johdossa on ollut erityisesti ilmailuala (Altıparmak et al. 2021).

Moni yritys on testannut eri komponenttien valmistusta lisäävän valmistuksen tekniikoilla ja demonstroinut millaisia hyötyjä tekniikka tarjoaa. Muutamat verrataan nuoret yritykset ovat toimineet alan pioneereina ja jopa luoneet oman kilpailuedun kehittämällä omaa osaamistaan alalla. Aiemmin mainitut haasteet rajoittavat lisäävän valmistuksen hyödyntämistä. Tähän mennessä kovin monet isot alojensa johtavat yritykset eivät ole suurissa määrissä ottaneet käyttöön lisäävillä tekniikoilla valmistettuja komponentteja. Merkittävänä syynä tähän on varmasti hinta. Kuvassa 11 on arvio yleisen jauhepeltisulatuksen hinnan kehityksestä. Mikäli Voxeljetin (2020) arvio pitää pakkaansa, voidaan hinnan odottaa laskevan merkittävästi, mikä todennäköisesti vaikuttaa valmistustekniikan kiinnostavuuteen.



Kuva 11. *Arvio alumiinin jauhepeltisulatuksen hinnankehityksestä 2020 (Voxeljet 2020).*

Onkin arvioitu, että lisäävä valmistus tulee olemaan kasvavassa roolissa ja monet yritykset ovat investoineet suuria summia alalle (Beamler 2018). Tosissa ennusteissa nähdään, että eritoten alumiinin lisäävä valmistus kasvaa alana ja vuonna 2030 alumiini voisi olla kolmanneksi käytetyin metalli lisäävässä valmistuksessa. (Eplus3D 2023) Investointien ja työn tekniikan haasteiden parissa tuottaessa tulosta, voidaan alumiinin lisäävän valmistuksen odottaa yleistyvän tulevaisuudessa. Tekniikka tulee todennäköisesti mahdollistamaan monimutkaisempia ja hienostuneempia kappaleita, jolloin pystytään tekemän parempia tuotteita. Valmistustekniikan alalla ei kuitenkaan ole erityisiä odotuksia, että lisäävä valmistus syrjäyttäisi perinteisisiä tekniikoita kuten koneistus- tai valutekniikat. Lisäävä valmistuksen nähdään tuovan mahdollisuuksia tuottaa uudenlaisia komponentteja kohteissa, joissa niitä tarvitaan.

5. YHTEENVETO

Alumiinin on valmistavassa teollisuudessa paljon käytetty materiaali. Erityisesti ilmailu ja liikenne aloilla käytetään suuria määriä alumiinista valmistettuja komponentteja. Alumiinin käyttö yhteiskunnassa onkin kasvanut selkeästi ja moderni teknologia yhteiskunta kulutta entistä enemmän sitä.

Ainetta lisäävä valmistus mahdollistaa nykyään uudenlaisia tapoja tuottaa alumiinikappaleita. Eri menetelmillä on suuria eroavaisuuksia niin lähtömateriaalin, kuin myös valmistusnopeuden, pinnanlaadun, sekä valmistettavien kappaleiden koon ja valmistusnopeuden suhteen. Yhteistä näille kaikille lisäävän valmistuksen tekniikoille on, että ne tarvitsevat tiettyjä alumiiniseoksia ja suuri osa olemassa olevista alumiiniseoksista ei ole lisäävän valmistuksen käyttöön soveltuvia. Viime vuosina onkin kehitetty uusia seoksia, jotka voisivat sopia paremmin alan tarpeisiin. Soveltuvien seosten myötä alumiinin lisäävä valmistus on kasvanut merkittävästi ja se on herättänyt kiinnostusta myös isoilta perinteisiltä valmistajilta. Alumiinin lisäävän valmistuksen oletetaankin kasvavan tulevaisuudessa.

Tämän työn tavoitteena oli kartoittaa, mitä ainetta lisäävien mietelmiä käytetään alumiinin kappeleiden ja tuotteiden valmistuksessa sekä siihen, mitkä ovat näiden menetelmien erot. Kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin kolmeen yleisesti käytössä olevaan alumiinin ainetta lisäävän valmistuksen tekniikkaan sekä selvitettiin, mitkä ovat yleisesti käytettyjä variaatioita näistä tekniikoista. Työssä tarkasteltiin myös, mitkä ovat lisäävän valmistuksen tekniikoiden haasteita ja mahdollisuuksia sekä otettiin katsaus siihen, miten tekniikka on käytössä tällä hetkellä, ja miten alan odotetaan kasvavan tulevaisuudessa.

Tässä työssä havaittiin, että haasteena alumiinin lisäävässä valmistuksessa on edelleen tekniikan ja materiaalin rajoitteet. Alumiini on haastava materiaali monille lisäävän valmistuksen tekniikoille sen fysikaalisten ominaisuuksien vuoksi. Eri alumiiniseoksien käyttöä lisäävässä valmistuksessa on tutkittu paljon. Materiaalikehitys onkin yksi merkittävimmistä kehityskohteista alumiinin lisäävässä valmistuksessa. Onkin olemassa useita erilaisia alumiiniseoksia, joista voidaan valmistaa laadukkaita kappaleita ja lisäävää valmistusta varten on kehitetty täysin uusia alumiiniseoksia. Yleisenä lisäävän valmistuksen haasteena on monesti sen hitaus verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin ja se soveltuu tällä hetkellä huonosti suurten kappalemäärien tehokkaaseen tuotantoon. Alalle

tuo haastetta myös standardien puute ja täten tekniikan kyvykkyys ja suorituskyky ei ole niin hyvin tunnettua.

Haasteista huolimatta alumiini kappaleiden lisäävälle valmistukselle tällä hetkellä useita käyttökohteita. Näitä käyttökohtia löytyy erityisesti liikenne- ja ilmailualalla erilaisissa moottoreissa ja rakenteissa, joissa kappaleen keveydellä on suuri merkitys. Muita alumiinin lisäävään valmistukseen houkuttelevia tekijöitä on esimerkiksi se, että lisäävä valmistus vaati merkittävästi vähemmän valmistelua hankintaketjulta ja asetusajoilta, joka puolestaan on hyödyksi kehitystä vaativissa projekteissa tai lyhyitä toimitusaikoja vaativien osien tuotannossa.

Tulevaisuuden ennusteissa alumiinin lisäävä valmistus kehittyy ja ala kasvaa. Monet yritykset investoivat ja tutkivat, miten lisäävä valmistus voisi olla heille hyödyksi. Alalla on kuitenkin jo yksinomaan lisäävän valmistukseen keskittyneitä yrityksiä, jotka tekevät alumiinista valmistettuja komponentteja kaupalliseen käyttöön. Kysyntää tällaisille osille onkin nopeita toimitusaikoja vaativilla aloilla sekä kohteissa, joissa kappalemärät eivät ole kovin suuria sekä esimerkiksi liikenne- ja ilmailualoilla, joissa kappaleiden painolla on suuri merkitys. Onkin tutkittu, miten olemassa olevia teknisiä ratkaisuja voitaisiin tehdä tehokkaammin lisäävän valmistuksen avulla. Näillä jo paljon alumiinia materiaalina käyttävillä toimialoilla onkin merkittävä potentiaali hyödyntää uutta tekniikka. Kuitenkin vasta tulevaisuus osoittaa, mitä hyötyjä ja mahdollisuuksia alumiinin lisäävä valmistus tuo.

LÄHTEET

Altıparmak, S. C., Yardley, V. A., Shi, Z., & Lin, J. (2021). Challenges in additive manufacturing of high-strength aluminium alloys and current developments in hybrid additive manufacturing. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. Vol.4(2), pp. 246–261.

Amritesh, S. (2022). Status of the Aluminum Additive Manufacturing Market. Light Metal Age Magazine. Saatavissa (Viitattu 21.3.2024): https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/3d-printing/status-of-the-aluminum-additive-manufacturing-market/

Bandyopadhyay, A. & Bose, S. (2015). Additive Manufacturing. CRC Press, UK.

Beamler. (2018). Major 3D Printing investments made by large companies in 2018. Saatavissa (viitattu 29.4.2024): https://www.beamler.com/major-3d-printing-investments-large-companies/

Bernard, A., Kruth, J-P., Cao, J., Lanza, G., Bruschi, S., Merklein, M., Vaneker, T., Schmidt, M., Sutherland, J. W., Donmez, A. & da Silva, E. J. (2023). Vision on metal additive manufacturing: Developments, challenges and future trends. CIRP journal of manufacturing science and technology. Vol.47, p.18-58.

Elliott, A. & Waters, C. (2019). Additive Manufacturing for Designers - A Primer. SAE International, USA.

Eplus3D. (2023). Analysis of Aluminum Alloy in 3D Printing Industry. Saatavissa (viitattu 4.4.2024): https://www.eplus3d.com/analysis-of-aluminum-alloy-in-3d-printing-industry.html

Frisk, H. (2020). Aluminium. Svenskt Aluminium, Stockholm.

Gibson, I. (2015). Additive manufacturing technologies ; 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Springer, USA.

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. & Khorasani, M. (2020). Additive Manufacturing Technologies. Third edition. Springer International Publishing AG.

Gibson, I., Rosen, D. W. & Stucker, B. (2009). Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer-Verlag.

Gura, D. (2010). Toxic Red Sludge Spill From Hungarian Aluminum Plant ”An Ecological Disaster”. NPR. The Two-Way. Saatavissa (viitattu 8.3.2024): https://www.npr.org/sections/thetwo-way/2010/10/05/130351938/red-sludge-from-hungarian-aluminum-plant-spill-an-ecological-disaster

Guzzomi, F., Rassau, A. & Hayward, K. (2021). Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges. Applied Sciences. Vol.11(3), pp. 1213.

Huhtaniemi, K. & Teknologiateollisuus. (2006). Raaka-ainekäsikirja. 5, Alumiinit. Teknologiainfo Teknova, Helsinki.

Ibhadode, O., Zhang, Z., Sixt, J., Nsiempba, K. M., Orakwe, J., Martinez-Marchese, A., Ero, Osazee, S., Shahriar, I., Bonakdar, A. & Toyserkani, E. (2023). Topology optimization for metal additive manufacturing: current trends, challenges, and future outlook. Virtual and physical prototyping. Vol.18 (1), Article e2181192

International Aluminium Institute. (2022). Opportunities For Aluminium In A Post-Covid Economy. Saatavissa (viitattu 22.3.2024): https://international-aluminium.org/resource/opportunities-for-aluminium-in-a-post-covid-economy/

Ingarao, G., Priarone, P. C., Deng, Y. & Paraskevas, D. (2018). Environmental modelling of aluminium based components manufacturing routes: Additive manufacturing versus machining versus forming. Journal of cleaner production. Vol.176, p.261-275

Ishimoto, T. & Nakano, T. (2023). Review — Microstructural Control and Functional Enhancement of Light Metal Materials via Metal Additive Manufacturing. Materials Transactions. Vol.64(1), pp. 10–16.

Kenevisi, M. S., Yu, Y., & Lin, F. (2021). A review on additive manufacturing of Al-Cu (2xxx) aluminium alloys, processes and defects. Materials Science and Technology. Vol.37(9), pp. 805–829.

Leirmo, J. L. (2021). High Strength Aluminium Alloys in Laser-Based Powder Bed Fusion – a Review. Procedia CIRP. Vol.104, pp. 1747–1752.

Lumley, R. (2018). Fundamentals of aluminium metallurgy: recent advances. Woodhead Publishing, Duxford, United Kingdom.

Madeleine, P. (2023). A Complete Guide to Aluminum 3D Printing. 3Dnatives. Saata vissa (viitattu 24.4.2024): https://www.3dnatives.com/en/a-complete-guide-to-aluminum-3d-printing-131220234/

Mauduit, A., Pillot, S., & Gransac, H. (2017). Study of the suitability of aluminum alloys for additive manufacturing by laser powder-bed fusion. Scientific Bulletin. Series B, Chemistry and Materials Science. Vol.79(4), pp. 219–238.

Metal AM magazine. (2023). Formula 1 approves Aheadd CP1 aluminium for additively manufactured heat exchangers. Saatavissa (viitattu 29.4.2024): https://www.metal-am.com/formula-1-approves-aheadd-cp1-aluminium-for-additively-manufactured-heat-exchangers/

Milewski, J. O. (2017). Additive Manufacturing Metal, the Art of the Possible. Additive Manufacturing of Metals. Springer Series in Materials Science. Springer International Publishing, Switzerland, Vol.258, p.7-33.

Mokhtarian, H. (2019). Product-process integrated meta-modeling using a graph-based approach: Application to additive manufacturing (Doctoral dissertation, Tampereen teknillinen yliopisto).

Mäntyjärvi, K. (2021). Metallien 3D-tulostuksen ”buumi” on alkanut Suomessa. Oulun yliopisto. Saatavissa (viitattu 28.2.2024): https://www.oulu.fi/fi/blogit/kerttu-saalasti-instituutin-blogi/metallien-3d-tulostuksen-buumi-alkanut-suomessa

Natarajan, J. (2021). Advances in Additive Manufacturing Processes. Bentham Science Publishers, Singapore.

Porsche Innovations. (2023). 3D printing technology optimises pistons for the powerful 911 GT2 RS. Saatavissa (viitattu 3.4.2024): https://media.porsche.com/mediakit/porsche-innovationen/en/porsche-innovationen/3d-printed-pistons

Riipinen, T., Kujanpää, V., Komi, E., Kilpeläinen, P., Savolainen, M., Puukko, P., Vihinen, J., Coatanea, E., & Mokhtarian, H. (2018). Industrialization of hybrid and additive manufacturing - Implementation to Finnish industry (HYBRAM). VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report No. VTT-R-06411-18

Relativity Space. (2023). The First 3D Printed Rocket. Saatavissa (Viitattu 24.3.2024): https://www.relativityspace.com/glhf

SFS-EN ISO 52900 (2021). Lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Perusteet ja sanasto. Suomen standardisoimisliitto, Helsinki.

Srivastava, A. K., Kumar, A., Kumar, P., Gautam, P. & Dogra, N. (2023). Research Progress in metal additive manufacturing: Challenges and Opportunities. International journal on interactive design and manufacturing.

Sulkanen, A. (2017). Topologian optimointi 3D-tulostuksessa. 3D-Cadsolutions. Saatavissa (viitattu 29.4.2024): https://www.an-cadsolutions.fi/topologian-optimointi-3d-tulostuksessa/

Toyserkani, E. (2022). Metal additive manufacturing. Wiley, Hoboken, New Jersey, USA.

Veritasium. (2021). The Genius of 3D Printed Rockets. Saatavissa (viitattu 24.4.2024): https://www.youtube.com/watch?v=kz165f1g8-E

Voxeljet. (2020). How classic foundries remain competitive. Saatavissa (Viitattu 30.4.2024): https://www.voxeljet.com/additive-manufacturing/case-studies/foundry/how-foundries-remain-competitive/

Wall, M. (2023). Relativity Space launches world's first 3D-printed rocket on historic test flight, §but fails to reach orbit. Space.com. Saatavissa (viitattu 24.4.2024): https://www.space.com/relativity-space-terran-1-test-launch-failure

Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y.-G., Lee, J.-H., & Zhang, J. (2018). Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. Journal of Materials Engineering and Performance. Vol.27(1), pp. 1–13.