

# Ainetta lisäävä metallituotteiden valmistus avaa uusia mahdollisuuksia

Antero Jokinen, Topi Kosonen ja Pentti Eklund

**Ainetta lisäävä valmistus (AM = Additive Manufacturing)** on tekniikka, jolla voidaan valmistaa monimutkaisia ja vaativia tuotteita ilman tuotekohtaisia muotteja ja työkaluja. Tekniikka perustuu tuotteesta tehtävään 3D-tiedostoon, jonka avulla tuote rakennetaan kerroksittain esimerkiksi jauhemaista raaka-ainetta käyttäen. Valmistettavien kappaleiden mita- ja muototarkkuus ovat hyviä ja niihin voidaan valmistaa sisäisiä muotoja, kuten onkaloita ja kanavistoja. Metalliosissa rakenne sintraantuu täysin tiiviiksi, joten tuotteiden ominaisuudet ovat erittäin hyvät.

**Metallituotteiden AM-tekniikka kehitty nopeasti maailmalla. Laitteet ovat nykyään tehokkaita ja yhä nopeampia**

## Jauhepeti- ja kerrostustekniikat

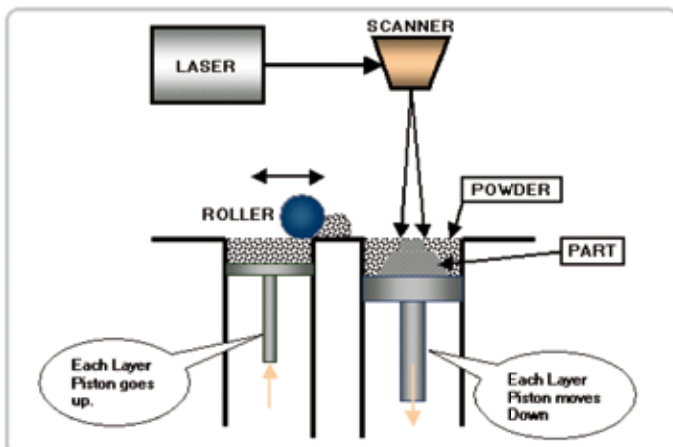
Yleisimmät metalliosien ainetta lisäävät valmistustekniikat ovat jauhepeti (Powder Bed Fusion Processes)- ja kerrostustekniikat (Beam Deposition Processes).

**Jauhepetitekniikassa** tuote rakennetaan metallijauhetta sisältävään säiliöön sintraamalla jauhetta kerroksittain lasersäteen tai elektronisuihkun avulla, kuva 1. Valmistusprosessissa lasersäde/elektronisuihku skannataan tasomaisiin osiin jaetun 3D tiedoston

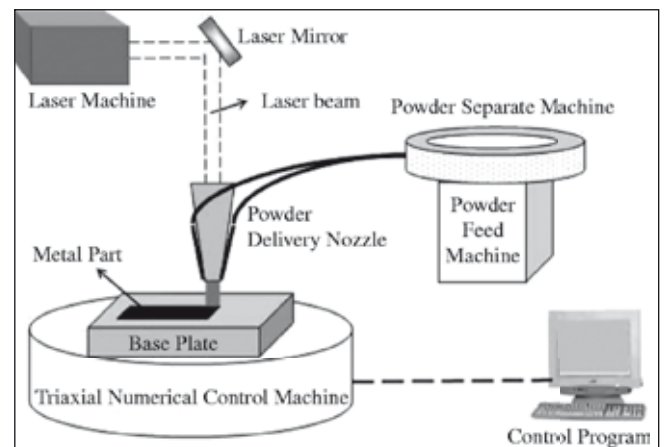
mukaisesti jauhepetiin, jolloin jauhe sintraantuu tuotteen poikkipinnan mukaisesti. Sintrauksen jälkeen säiliön pintaa lasketaan sintrauskerroksen paksuuden verran ja sen päälle tasoitetaan kaapimella uusi jauhekerros, joka sintrataan vastaavasti. Kerrokset sintraantuvat tiiviisti toisiinsa ja prosessia toistamalla jauhesäiliöön rakentuu tiivis, mita- ja muototarkka tuote. Tuotteiden mitatarkkuus riippuu jauheen partikkelikoosta, sintraavan säteen halkaisijasta ja valmistetavan kappaleen koosta. Keskimäärin se on suuruusluokkaa 0,05-0,2 mm Tuotteiden

pinnanlaatu riippuu pääosin jauheen partikkelikoosta ja on yleensä noin  $R_a$ : 20-50  $\mu$ m. Tuotteet voidaan lämpökäsitellä ja viimeistellä, kuten tavanomaiset metalliseokset.

Jauhepetitekniikkaan perustuvia laitteita ja niiden valmistajia on runsaasti maailmalla ja niiden määrä lisääntyy nopeasti. Merkittävimmät laitevalmistajat ovat muun muassa EOS GmbH, Concept Laser GmbH, ja Arcam Ab. Suurimpien kaupallisten laitteiden jauhepetisäiliön tilavuus on 630x400x500 mm (X line 1000R, Concept Laser GmbH), eli varsin suu-



Kuva 1. Jauhepetitekniikkaan perustuvan ainetta lisäävän valmistuksen periaate /1/.



Kuva 2. Kerrostustekniikkaan perustuvan ainetta lisäävän valmistuksen periaate /2/.

Taulukko 1

## MECHANICAL PROPERTIES

	Arcam Ti6Al4V, Typical	Ti6Al4V, Required**	Ti6Al4V, Required***
Yield Strength (Rp 0.2)	950 MPa	758 MPa	860 MPa
Ultimate Tensile Strength (Rm)	1020 MPa	860 MPa	930 MPa
Elongation	14%	> 8%	> 10%
Reduction of Area	40%	> 14%	> 25%
Fatigue strength* @ 600 MPa	> 10,000,000 cycles		
Rockwell Hardness	33 HRC		
Modulus of Elasticity	120 GPa		

\*After Hot Isostatic Pressing \*\*ASTM F1108 (cast material) \*\*\*ASTM F1472 (wrought material)  
The mechanical properties of materials produced in the EBM process are comparable to wrought annealed materials and are better than cast materials.

Arcam Ab:n jauhepetiteknologiaan perustuvalla EBM-menetelmällä (Electron Beam Melting) valmistetun Ti-6Al-4V-seoksen ominaisuudet verrattuna vastaavaan valettuun sekä muokattuun rakenteeseen /3/.

Taulukko 2

Material	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
LENS 316 Stainless Steel	799	500	50
316 SS Anneal bar	591	243	50
LENS Inconel® 625	938	584	38
IN 625 Annealed bar	841	403	30
LENS Ti-6Al-4V	1077	973	11
Ti-6Al-4V Annealed Bar	973	834	10

Optomec Inc.:n kehittämällä LENS-kerrostusmenetelmällä (Laser Engineered Net Shaping) kerrostustekniikalla saavutettavia ominaisuuksia /4/.

rikokoisten kappaleiden valmistus on mahdollista. Laitteiden sintrausnopeus kasvaa koko ajan mm. tehokkaampien laserlähteiden myötä. Tällä hetkellä nopeimmilla laitteilla voi sintrata noin 100 cm<sup>3</sup> materiaalia tunnissa. Lisäksi sintrauslaite voi sisältää useampia laserlähteitä, mikä nopeuttaa valmistusta.

**Kerrostustekniikassa** lasersäteeseen/elektronisuihkuun syötetään jauhetta tai lankaa, jonka avulla tuote rakennetaan kerroksittain kiinteän alustan päälle, kuva 2 (ed. sivu). Sekä alustaa että materiaalia syöttävää suutinta voidaan liikuttaa x-, y- ja z-akselin suunnassa, minkä lisäksi monissa laitteissa alustaa voidaan myös kallistaa ja kiertää. Nämä mahdollistavat monimutkaisten tuotteiden valmistuksen ilman työkaluja. Kerros-

tustekniikalla ei saavuteta yhtä hyvää mittatarkkuutta ja pinnanlaatua kuin jauhepetiteknikalla, lisäksi monimutkaisten muotojen saavuttaminen vaatii usein tukirakenteiden käyttöä. Tuotteet ovat kuitenkin tiiviitä ja niiden mekaaniset ominaisuudet ovat hyvät. Menetelmän etu jauhepetiteknikkaan verrattuna on sen soveltuvuus moniin käyttötarkoituksiin. Tekniikalla voidaan osavalmistuksen lisäksi valmistaa monimutkaisia ja vaativia yksityiskohtia perinteisiin tuotteisiin, ja sillä voidaan korjata tuotteita sekä valmistaa yhdistelmärakenteita, komposiitteja sekä myös räätälöidä materiaaleja tuotteen eri kohtiin. Suurimpien kaupallisten laitteiden kammio-koko on 900x1500x900 mm (Optomec, Inc.) ja niillä voidaan kerrostaa materiaalia suuruusluokkaa 0,5 kg tunnissa.

## Yleisimmät metalliseokset ja saavutettavat ominaisuudet

Ainetta lisäävässä metallituotteiden valmistuksessa tarjolla olevat materiaalit lisääntyvät merkittävästi ja niiden ominaisuudet paranevat koko ajan. Yleisimmät materiaalit ovat työkaluteräkset ja ruostumattomat teräkset, nikkeliseokset, koboltti-kromiseokset, titaaniseokset ja alumiiniseokset. Raaka-aineet ovat jauheita, jotka pääasiassa valmistetaan atomisoinnilla. Atomisoinnissa sulaa metallivirtaan kohdistetaan säteittäin kaasusuihkuja. Ne pirstovat sulan metallin pisaroiksi, jotka jähmettyvät nopeasti jauhepartikkeleiksi. Nopean jähmettymisen ansiosta materiaalin mikrorakenne muodostuu hienojakoiseksi ja raekoko pieneksi. Tuotteiden valmistuksessa käytettävä lasersäde/elektronisuihku mahdollistaa jauheiden nopean sintraantumisen tiiviiksi rakenteeksi, jolloin tuotteen mikrorakenne on hienojakoinen.

Edellä mainittujen seikkojen ansiosta ainetta lisäävällä valmistuksella tehtyjen tuotteiden ominaisuudet ovat useilla seoksilla vähintään yhtä hyvät kuin perinteisesti valmistettujen tuotteiden ja ominaisuuksia verrataan pääosin muokattuihin seoksiin, koska AM tekniikalla valmistettuihin tuotteisiin ei jää huokosia.

Taulukossa 1 on esitetty Arcam Ab:n jauhepetiteknologiaan perustuvalla EBM-menetelmällä (Electron Beam Melting) valmistetun Ti-6Al-4V-seoksen ominaisuudet ja verrattu niitä vastaavaan valettuun sekä muokattuun rakenteeseen. Taulukon mukaan EBM-menetelmällä valmistetun materiaalin lujuus ja sitkeys ovat paremmat kuin vastaavan muokattun seoksen ominaisuudet.

Taulukossa 2 on esitetty Optomec Inc.:n kehittämällä LENS-kerrostustekniikalla (Laser Engineered Net Shaping) saavutettavia ominaisuuksia. Kaikkien taulukossa esitettyjen seoksien (AISI 316, Inconel 625 ja Ti-6Al-4V) kohdalla sekä lujuus että sitkeys ovat paremmat kuin vastaavien muokattujen tankojen ominaisuudet.

## Ainetta lisäävä valmistus soveltuu useisiin käyttökohteisiin

Perinteisesti ainetta lisäävä metallituotteiden valmistus on käsittänyt lähinnä muottien ja työkalujen valmistuksen, joissa sillä on edelleenkin merkittäviä sovelluksia, muun muassa ruiskuvalumuoteissa. Monimutkaisia sisäisiä muotoja ja kanavistoja sisältävissä työkaluissa menetelmän edut ovat merkittäviä ja erityisesti jäähdytyskanavistoja sisältävien muottien valmistuksessa tekniikka antaa paljon mahdollisuuksia.

Ainetta lisäävä valmistustekniikka ja valmistuksessa käytettävät laitteet ja materiaalit

ovat viime vuosina kehittyneet nopeasti. Tämän ansiosta tekniikan käyttökohteet lisääntyvät merkittävästi. Kuvassa 3 on esitetty arvio metallituotteiden käyttökohteista ja niiden markkinoiden suuruudesta. Suurin volyyymi on lentokoneiteollisuudessa (10 mrd. USD) ja lääketieteen alueella (1 mrd. USD). Lentokoneiteollisuudessa titaaneosokset ovat yleisesti käytettyjä materiaaleja. Kuvassa 4 on esitetty tyypillisiä AM-tekniikalle soveltuvia lentokoneen osia. Erityisesti runkorakenteissa ainetta lisäävä valmistus tuo paljon etuja. Kuvan 4 siiven rakenneosan aihion paino on 271 kg ja siitä työstetyn valmiin osan paino on vain 4,24 kg (buy-to-fly-suhde 64). Ainetta lisäävällä valmistuksella saavutetaan merkittävät säästöt raaka-aine- ja työstökuluissa.

Lääketieteen alueella metallisiirännäiset (eli ns. implantit) ovat iso sovellusalue. Kuvassa 5 on esitetty osia, joissa AM-tekniikalla voidaan räätälöidä kiinteää ja huokoista materiaalia haluttuihin kohtiin tuotetta ja samalla optimoida rakenteen mekaaniset ominaisuudet ja biologinen yhteensopivuus tuotteen vaatimusten mukaan.

Myös autoteollisuudessa ainetta lisäävä valmistus on saamassa jalansijaa. Formula 1:n erikoissovellusten lisäksi autoissa on useita osia, joissa AM-tekniikka voi tuoda etuja, kuva 6 Esimerkiksi useita komponentteja sisältäviä osia voidaan valmistaa yhtenä osana hyvien muotoilumahdollisuuksien ansiosta.

Hitsaustekniikkaan liittyen ainetta lisäävä valmistus tarjoaa etuja pidikkeiden, kiinnikkeiden ym. jigien valmistuksessa. Lisäksi esimerkiksi kerrostustekniikalla voidaan lisätä haluttuja yksityiskohtia ja useita erityyppisiä materiaaleja hitsattuihin suurikokoisiin rakenteisiin, mikä tekee mahdolliseksi uusien materiaaliparien ja yhdistelmä rakenteiden valmistukseen sekä antaa uusia ulottuvuuksia rakenteiden muotoiluun.

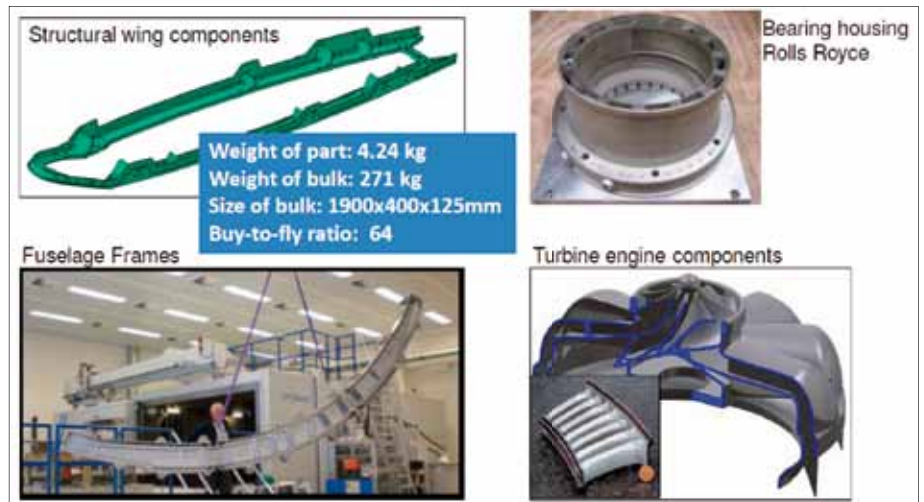
**Tulevaisuuden näkymät**

Ainetta lisäävän valmistukseen panostetaan paljon maailmalla ja yhä useammilla teollisuuden aloilla tekniikan nähdään tuovan merkittäviä etuja perinteiseen valmistukseen verrattuna. Tulevaisuudessa laitteiden teho, nopeus ja valmistettävien kappaleiden koko kasvaa edelleen ja menetelmän käyttöön soveltuvien materiaalien valikoima lisääntyy. Lisäksi AM-tuotteiden suunnittelusta ja sovellettavuudesta kertyy uutta osaamista, mikä omalta osaltaan antaa mahdollisuuksia uusien käyttökohteiden löytämiseen ja laajalaiseen soveltamiseen. Tekniikan yleistymisen myötä on oletettavissa AM-laitteiden sekä niillä valmistettujen tuotteiden valmistuskustannusten pienentyminen.

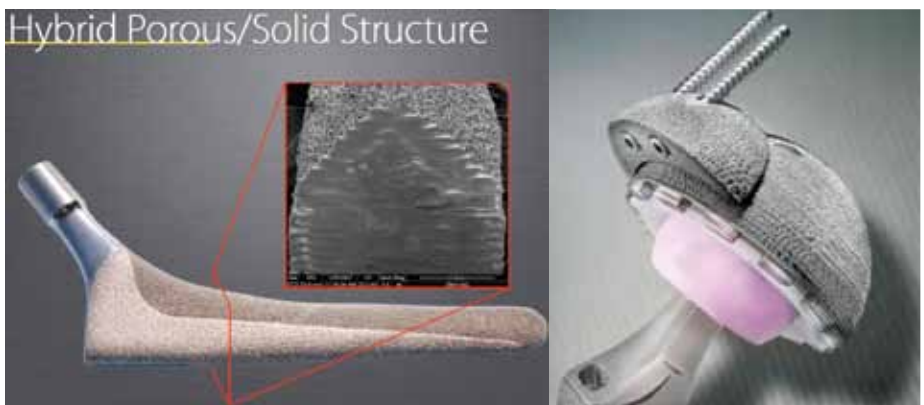
Maailmanlaajuinen pyrkiminen energiatehokkuuteen, energian kulutuksen minimointiin,



Kuva 3. AM-metallituotteiden käyttökohteita ja arvio niiden markkinoiden suuruudesta vuonna 2012 /5/.



Kuva 4. Tyypillisiä AM-tekniikalle soveltuvia lentokoneen osia /6/.



Kuva 5. AM-tekniikalla valmistettuja metallisiirännäisiä, joissa voidaan räätälöidä kiinteitä ja huokoisia yhdistelmä rakenteita tuotteilta vaadittavien ominaisuuksien mukaan /7/.

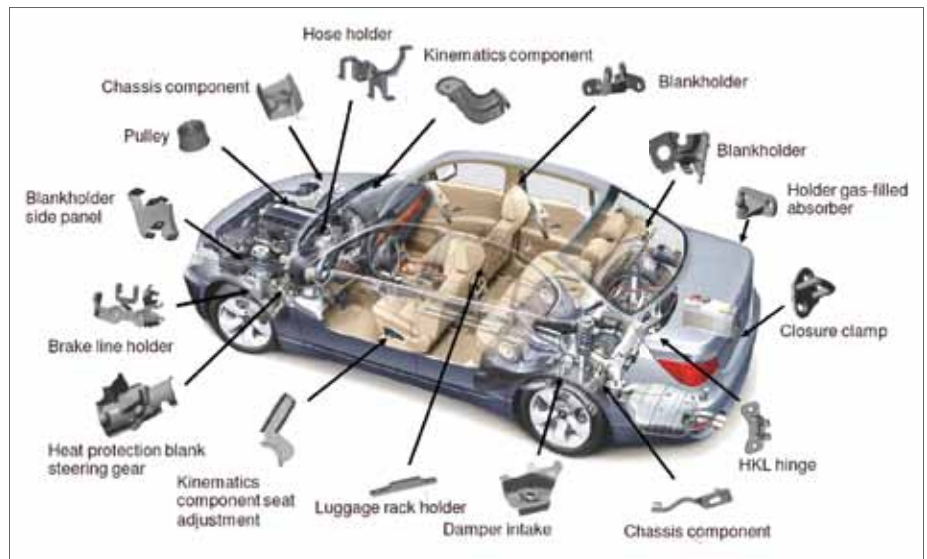
hukkamateriaalien ja päästöjen vähentämiseen edesauttavat AM tekniikan yleistymistä, koska tekniikka on energiatehokas useaan perinteiseen valmistustekniikkaan verrattuna ja prosessissa syntyvä hukkamateriaalin määrä on olematon.

Oleellinen asia AM tekniikan soveltamisessa on myös uudet ratkaisumahdollisuudet tuotteiden suunnittelussa ja valmistuksessa. Tekniikka tarjoaa suunnittelijalle lähes vapaat kädet kappaleiden muotoiluun ja tämän ansiosta menetelmän parhaat edut saavutetaan valmistamalla tuotteita, joita yksinkertaisesti muilla tekniikoilla ei voida valmistaa.

Myös Suomessa ainetta lisäävä valmistus on viime aikoina herättänyt huomiota. Sitä tutkitaan VTT:llä ja useissa korkeakouluissa ja myös yritykset ovat alkaneet miettiä, kuinka ne voivat parhaiten hyödyntää AM:n mahdollisuuksia. VTT:llä on suunnitteilla useita AM:ään liittyviä projektikokonaisuuksia, kuten Tekes-rahoitteisia yritysryhmähankkeita. Yrityshankkeissa voidaan tutkia, mitä etuja joidenkin kappaleiden valmistus AM:llä tuo mukanaan ja kuinka AM:n avulla voidaan tehostaa alihankintaverkoston ja varaosatoiminnan tehokkuutta. Enemmän tietoa suunnitteilla olevista hankkeista saa ottamalla yhteyttä kirjoittajiin.

## Lähdeluettelo

- <http://www.arptech.com.au/slshelp.htm>
- Jing Zhao, Wenbin Cao, Changchun Ge, Yongsheng Tan, Yan Zhang, Qunxing Fei, (2009) "Research on laser engineered net shaping of thick-wall nickel-based alloy parts", Rapid Prototyping Journal, Vol. 15 Iss: 1, pp.24 – 28.
- <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy.pdf>
- <http://www.optomec.com/Additive-Manufacturing-Technology/Laser-Additive-Manufacturing>
- Advances in Metal Additive Manufacturing. 14<sup>th</sup> Annual International Wohlers Conference 29.11.2012. Additive Metals: Thinking Outside The Build. G. Morris, Morris Technologies Inc.
- Advances in Metal Additive Manufacturing. 14<sup>th</sup> Annual International Wohlers Conference 29.11.2012. Development of a High Speed, Large Volume Additive manufacturing System. M. Vermeulen. Aerosud Innovation & Training Centre.
- Advances in Metal Additive Manufacturing. 14<sup>th</sup> Annual International Wohlers Conference 29.11.2012. Electron Beam Melting for Implants: Past Experiences & A Look into the Future. A. Christensen. Medical modelling Inc./Golden CO.
- Advances in Metal Additive Manufacturing. 14<sup>th</sup> Annual International Wohlers Conference 29.11.2012. High-speed Laser Additive Manufacturing LAM. I. Kelbassa, Fraunhofer Institute for Laser Technology.



Kuva 6. Ainetta lisäävän valmistuksen mahdollisuuksia autosissa /8/.

### Kirjoittajat:

Erikoistutkija Antero Jokinen, VTT: [antero.jokinen@vtt.fi](mailto:antero.jokinen@vtt.fi), 050 350 0899

Tutkija Topi Kosonen, VTT: [topi.kosonen@vtt.fi](mailto:topi.kosonen@vtt.fi), 050 320 0490

Johtava tutkija Pentti Eklund, VTT: [pentti.eklund@vtt.fi](mailto:pentti.eklund@vtt.fi), 050 595 4720