



SAVONIA



PIKAVALMISTUS 3D-TULOUSTUS

LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN PERUSTEET

■ TEKNIikka JA LIIKENNE

LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN PERUSTEET

TOIMITTANEET: Antti Alonen, Lauri Alonen ja Esa Hietikko

Lisäävän valmistuksen perusteet

Antti Alonen
Lauri Alonen
Esa Hietikko

Savonia-ammattikorkeakoulu
Julkaisutoiminta
PL 6 (Microkatu 1 B)
70201 KUOPIO
p. 044 785 5023
f. 017 255 5014
julkaisut@savonia.fi
www.savonia.fi/julkaisut

Copyright © 2016 tekijät ja Savonia-ammattikorkeakoulu

1. painos

Tämän teoksen kopioiminen on tekijänoikeuslain (404/61) ja tekijänoikeusasetuksen (574/95) mukaisesti kielletty lukuun ottamatta Suomen valtion ja Kopiosto ry:n tekemässä sopimuksessa tarkemmin määriteltyä osittaista kopiointia opetustarkoituksiin. Teoksen muunlainen kopiointi tai tallentaminen digitaaliseen muotoon on ehdottomasti kielletty. Teoksen tai sen osan digitaalinen kopioiminen tai muuntelu on ehdottomasti kielletty.

ISBN: 978-952-203-221-8 (PDF)

ISSN-L: 2242-7015

ISSN: 2242-7015

Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja D5/4/2016

Kustantaja: Savonia-ammattikorkeakoulu, ALVO-hanke

Taitto: Tapio Aalto

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	5
1.1 Edut	7
1.2 Haasteet	9
1.3 Suunnittelun näkökulma	10
1.4 Kustannus-hyöty -analyysi	12
2 PROSESSIT	18
2.1 Materiaalin pursotus	19
2.2 Materiaalin ruiskutus	22
2.3 Sidosaineruiskutusmenetelmä	24
2.4 Laminointi	25
2.5 Nesteen fotopolymerisointi	28
2.6 Jauhepetimenetelmät	31
2.7 Suorakerrostusmenetelmä	38
2.8 Hybridimenetelmät	43
3 PROSESSIEN VERTAILU	46
4 AM OSIEN JÄLKIKÄSITTELY	51
4.1 AM jälkikäsitteilyt	51
4.2 Mekaaninen jälkikäsitteily	54
4.3 Pinnoitus	55
4.4 Isostaattinen puristus (HIP, CIP)	55
5 MATERIAALIT JA NIIDEN OMINAISUUDET	56
5.1 Muovit	56
5.1.1 Isku- ja väsymiskestävyys	58
5.1.2 Kemikaalien kestävyys	60
5.1.3 Veden imeytyminen	61
5.1.4 UV-säteilyn kesto	61
5.1.5 Lämpöominaisuudet	62
5.1.6 Yleisimmät muovimateriaalit	68
5.1.7 AM muovimateriaaleja ja niiden ominaisuuksia	75
5.2 Metallit	83
5.2.1 Yleistä metalleista	83
5.2.2 Materiaaleja lisäävän valmistuksen-järjestelmä- valmistajilta	86
5.2.3 Kolmannen osapuolen metallijauhevalmistajat	97
5.3 Keraamit	101
5.4 Hiekka	102

6 LAITEVALMISTAJAT JA LAITTEISTOT	103
6.1 Kuluttajatason laitteet	104
6.2 Ammattilaistason laitteet	107
6.3 Teollisuustason laitteet	109
6.4 Lisäävän valmistuksen palveluntarjoajat	113
7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA TULEVAISUUDEN TRENDIT	116
7.1 Kehitteillä ja markkinoille saapumassa olevat järjestelmät	120
8 LÄHTEET	126

1 JOHDANTO

Lisäävä valmistus (*Additive Manufacturing, AM*), joka tunnetaan myös nimellä “pikavalmistus” tai “3D-tulostus” on ajankohtainen puheenaihe. Teknologian kehittyminen alkoi pikamallinnus-menetelmästä 1980-luvulla ja oli tuolloin pääasiassa käytössä prototyyppien tekemisessä lähinnä tuotekehitysvaiheessa. Tämä käytötapa on edelleen yksi tavallisimmista tavoista hyödyntää lisäävää valmistusta. Vaikka termiä 3D-tulostus käytetään sekä teollisuudessa että kuluttajapuolella, on sen käyttö yleisempää kuluttajakentässä yksinkertaisten ja pienikokoisten muovikappaleiden valmistuksen yhteydessä. Termi “Lisäävä valmistus” viittaa enemmän menetelmän teolliseen käyttöön. Juuri tämän osan merkityksen uskotaan kasvavan lähitulevaisuudessa merkittävästi. Lisäävä valmistus on erityisen tehokas silloin, kun kyseessä ovat monimutkaiset osat, joiden valmistaminen perinteisin menetelmin on vaikeaa tai jopa mahdotonta. Lisäävällä valmistuksella on kuitenkin omat rajoitteensa, jotka tulevat esiin erityisesti kappaleiden suunnittelun yhteydessä.

Lisäävä valmistus (*Additive manufacturing*) on virallinen termi (ASTM F2792), jota käytetään kaikissa teknologiaan liittyvissä sovelluksissa. Se on määritelty prosessiksi, joka yhdistää materiaalia perustuen 3-ulotteiseen digitaaliseen malliin, yleensä kerros kerrokselta. Menetelmä siis lisää materiaalia päinvastoin kuin perinteiset menetelmät, joissa materiaalia usein poistetaan aihioista, jotta lopullinen muoto saadaan aikaan. Englanninkielisiä synonyymejä ovat mm. *additive fabrication, additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing* ja *freeform fabrication*.

ASTM F2729 määrittelee 3D-tulostuksen menetelmänä, jossa materiaalia lisätään käyttäen hyväksi tulostuspäätä, suutinta tai muuta tulostukseen viittaavaa menetelmää. Termiä käytetään lisäävän valmistuksen synonyyminä, yleensä liittyen kuitenkin halvempiin laitteisiin, joiden kapasiteetti on rajallinen.

Siinä missä useat perinteiset valmistusmenetelmät poistavat materiaalia ja tuottavat hukkamateriaalia, lisäävässä valmistuksessa materiaalia lisätään nimensä mukaisesti ja se tuottaa vähän tai ei ollenkaan hukkamateriaalia. Useimmat lisäävän valmistuksen menetelmistä jakavat yhteisen piirteen, jolla materiaalia lisätään kerroksittain. Prosessi alkaa kolmiulotteisesta tietokonemallista, joka kuvaa valmistettavaa

kappaleita. Malli voidaan generoida esimerkiksi CAD-ohjelmistolla, 3D-skannaamalla tai magneettikuvauksella. 3D-mallin tieto muutetaan sellaiseksi, että sitä voidaan prosessoida edelleen. Tällä hetkellä pintaverkkomuotoinen STL-formaatti on yleisimmin käytössä ja on käytännössä muodostunut de facto standardiksi lisäävän valmistuksen tiedostoformaattiksi.

Huolimatta laajasta käytöstä STL on jossain määrin ongelmallinen tiedostomuoto lisäävää valmistus ajatellen ja sitä ollaankin korvaamassa tulevaisuudessa 3MF-muotoisella tiedostolla, joka on erityisesti kehitetty lisäävää valmistus ajatellen. STL-tiedostojen yleisiä ongelmia ovat malleissa esiintyvät pintaverkon virheet ja se, että kyseessä on pintamalli. Lisäävä valmistus tarvitsee monimateriaali -tulostuksen yleistymisen myötä entistä enemmän sellaista 3D-mallitietoa, jossa mallin ominaisuuksia voidaan esittää kolmiulotteisesti vokselitasolla pelkän pintatiedon sijaan. 3MF on jo käytössä useissa suuremmissa yrityksissä, jotka ovat kytköksissä lisäävään valmistukseen. Esimerkiksi Microsoft on lisännyt 3MF-tuen Windows 10 käyttöjärjestelmään. Operointi on kummallakin muodolla (3MF ja STL) vastaava: tiedosto tuodaan ohjelmistoon, joka siivuttaa sen ja kontrolloi valmistusprosesseja. [1] Tulostusprosessi on esitetty kuvassa 1.1.

Insinöörit hyödyntävät nykyään laajasti valmistettavuuden (DFMA Design for Manufacturing and Assembly) periaatteita osien ja kokoonpanojen suunnittelussa. Suunnittelusäännöt valmistettavuuteen liittyen perustuvat rajoitteisiin, joita asettavat perinteiset valmistusmenetelmät ja materiaalit. Esimerkiksi levyt, palkit ja tangot ovat yleisiä materiaaliyhdistelmien muotoja, joilla on keskeinen vaikutus myös lopputuotteen muotoihin. Perinteiset valmistusmenetelmät ja materiaalit johdattavat insinöörit suunnittelemaan yksinkertaisia geometrisia muotoja kuten suorja viivoja ja ympyröitä. Myös perinteisten CAD-ohjelmistojen käyttö samoin kuin rakenneanalyysimenetelmät suosivat yksinkertaisia muotoja.[2][3]

Yksi tärkeimmistä lisäävän valmistuksen tuomista eduista on materiaalin käytön ja sitä kautta kohteen massan pienentäminen. Tämä toteutuu, kun kappaleiden muotoja optimoidaan ja niihin lisätään esimerkiksi kennomaisia sisäisiä rakenteita. Kokoonpantavuutta voidaan myös parantaa yhdistelemällä kappaleita yhdeksi monimutkaisemmaksi, mutta samalla helpommin koottavaksi osaksi. Tärkeää on myös huomata erilaisten sisäisten rakenteiden (esimerkiksi nesteen

ja kaasun virtauskanavat, jäähdytyskanavat) toiminnan parantaminen esimerkiksi virtauksen parempana hallintana tai jäähdytyspinta-alan lisäämisenä.

1.1 Edut

Lisäävällä valmistuksella on useita etuja verrattuna perinteiseen valmistukseen.

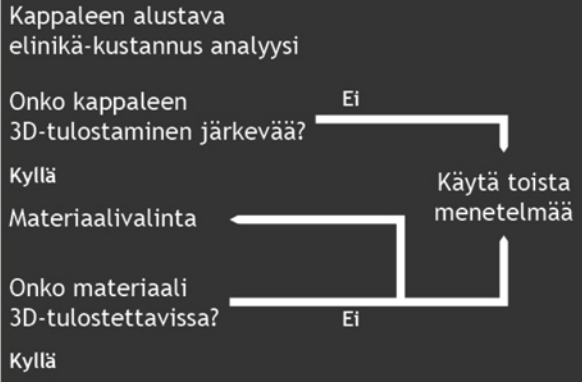
Tehokkuus ja joustavuus – lisäävän valmistuksen tehokkuus näkyy erityisesti silloin, kun kyse on pienistä tuotantomääristä, monimutkaisista kappaleista ja jatkuvista muutoksista. Suunnitelmat ovat digitaalisessa muodossa, mikä mahdollistaa muutokset vielä hyvin lähellä tuotannon aloittamista. Myös tuotevalikoiman muutos on mahdollista lyhyellä aikavälillä.

Geometrinen vapaus ja kustomointi – lisäävä valmistus antaa mahdollisuuden suunnitteluohjautuvaan tuotantoon ja optimointiin sekä toiminnallisten piirteiden integrointiin osissa, myös sarjatuotannossa.

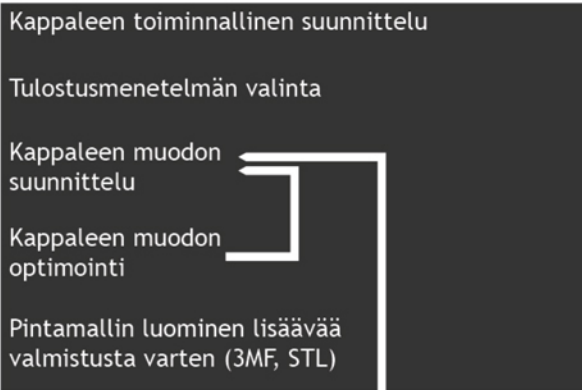
Muita etuja ovat pienempi materiaalihukka, nopeammat toimitusajat, hajautettu tuotanto sekä työkalujen ja varastoinnin pienempi tarve. Lisäävän valmistuksen myötä osa tai jopa kaikki tuotteeseen kuuluvat osat (mm. maantieteellistä räätälöintiä vaativat osat) voidaan valmistaa alueellisesti tai jopa paikallisesti. Juuri oikeaan aikaan –periaatetta noudatettaessa tarvitaan pienemmät varastot.

LISÄÄVÄ VALMISTUSPROSESSI

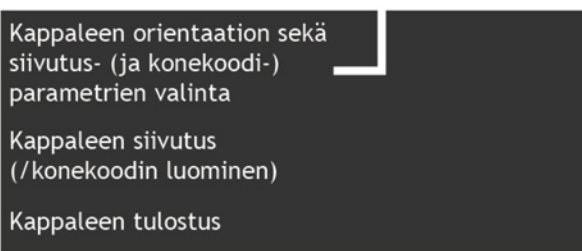
Alustava
soveltuvuus-tarkastelu



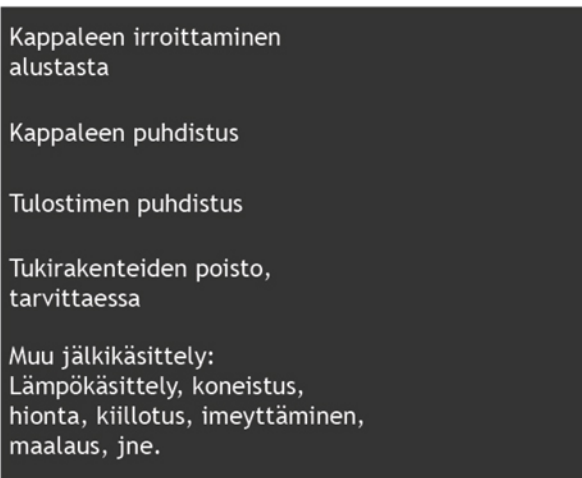
Kappaleen
esi-suunnitteluvaihe



Prosessivaihe
Kappaleen tulostus



Jälkikäsittelyvaihe
Kappaleen viimeistely



Kuva 1.1, 3D-tulostusprosessi.

Tällä hetkellä AM ei ole sopiva valmistusmenetelmä miljoonien identtisten ja yksinkertaisten kappaleiden valmistukseen. Kun järjestelmät ja teknologiat kehittyvät ja sen myötä prosessointiajat lyhenevät, AM tulee olemaan vakavasti harkittava vaihtoehto perinteisille menetelmille myös suurempien sarjojen kyseessä ollessa. Merkittävän kilpailuedun AM saa siitä, että kappaleet ovat kustomoitavissa yksilöllisesti myös suuremmissa sarjoissa ja ne voidaan tulostaa suoraan CAD-mallista ilman työkaluja ja kiinnittimiä. Näin AM voidaan hyödyntää melkein millaisen tahansa geometrian kanssa. [4]

Jo tällä hetkellä on olemassa sovellusalueita, kuten hammasproteesit, kuulokojeet sekä erilaiset implantit, jotka hyödyntävät teknologian tarjoamia mahdollisuuksia runsaasti.

On vaikea määritellä tarkasti milloin AM-tuotanto tulee olemaan ensisijainen tuotantovaihtoehto yritykselle. Pienempien sarjojen (kappaleesta riippuen esimerkiksi muutamia tuhansia kappaleita vuodessa), toiminnallisten prototyyppien ja yksilöllisten osien tehokas tuotanto on jo tätä päivää. Kun muutetaan sanonta ”*design for manufacturing*” muotoon ”*design for function*”, päästään käsiksi tulevaisuuden komponenttien kehittyneen muodon ja toiminnan kautta järjestelmien parantuneeseen suorituskykyyn. [10, 17]

1.2 Haasteet

Vaikka AM-teknologia tarjoaa useita merkittäviä lupauksia, liittyy siihen kuitenkin tiettyjä ongelmia ja haasteita, jotka ovat toistaiseksi estäneet sen yleistymisen varteenotettavaksi valmistusteknologiaksi. Ongelmia ovat aiheuttaneet esimerkiksi toistettavuus, luotettavuus, taloudellisuus, prosessointiaika ja standardien puute. Näistä taloudellisuus on vakavin uhka, koska teknologia on kallis, erityisesti silloin kun puhutaan metallien hyödyntämisestä. Toisaalta AM-prosessi voi olla myös kokonaisuutena perinteistä prosessia nopeampi silloin, kun perinteisessä prosessissa tarvitaan erikoisia kiinnittimiä ja työkaluja. [5]

Aiemmin mainittu räätälöityjä muotoja sisältävien kappaleiden toteuttaminen on selkeä AM:n etu. Haittapuolena on puolestaan se, että nykyisten CAD-ohjelmien kyky tuottaa monimutkaisia muotoja on hyvin rajallinen. Esimerkiksi monimutkaisten geometrysten muotojen, kuten

virtauskanavien, kennorakenteiden ja onttojen kappaleiden toteuttaminen nykyisillä CAD-ohjelmilla on hankalaa ja työlästä. Tosin on myös mainittava, että parhaillaan tehdään vahvaa tutkimus- ja kehitystyötä asian korjaamiseksi. Esimerkkinä tästä on suuri ohjelmistotalo Autodesk, joka on ilmoittanut investoivansa yli 100 miljoonaa dollaria AM-yrityksiin tulevina vuosina.

Ohjelmistot eivät muodostaa ainoaa osien suunnitteluun liittyvää ongelmaa. Suunnittelijat kaipaavat myös parempaa ymmärrystä kuinka erilaiset AM:n vaatimukset, kuten materiaalit ja eri tulostusmenetelmät on otettava kappaleiden suunnittelussa huomioon. On myös huomattava, että koulutus on vasta heräämässä huomaamaan lisäävän valmistuksen huomioon oppilaitosten opetussuunnitelmissa.

AM:n ripeä kasvu asettaa paineita myös teollisuuden toimitusverkostoille. Kun kasvu kiihtyy, on olemassa epäilyksiä kuinka hyvin infrastruktuuri selviää siitä. Riskeinä ovat viivytykset tulostuslaitteiden ja –materiaalien osalta, mitkä pahimmillaan voivat vaikuttaa koko alan kasvuun. Sama tilanne koskee myös asiantuntijoita. Vain harvat oppilaitokset ovat harkinneet AM-asiantuntijoiden kouluttamista. Kestää vielä useita vuosia ennen kuin nyt tai lähiaikoina aloittavat opiskelijat siirtyvät työelämään. [6]

Yksi AM-tekniikan suurimmista haasteista liittyy kustannustehokkuuteen. Ala kehittyy hyvin nopeasti, mikä tekee päätöksenteon hankalaksi erityisesti pienille ja keskisuurille yrityksille, joiden tulee hyvin tarkkaan harkita ajankohta, koska lähteä mukaan. [18]

1.3 Suunnittelun näkökulma

AM tarjoaa melkein rajoittamattoman vapauden suunnitteluun. Ongelmaksi muodostuu vain se kuinka tätä vapautta voidaan hyödyntää maksimaalisesti. Ilman perinteisten valmistusmenetelmien ja aihioiden asettamia rajoituksia suunnitteluavaruus laajenee melkein äärettömäksi. Samanaikaisesti tuotteen toiminnallisuutta voidaan integroida osaksi yksittäisiä kappaleita. Hyviä esimerkkejä näistä ovat valumuotit, joiden lämpötilan säätö saadaan optimaaliseksi sijoittamalla jäähdytyskanavat oikealla tavalla. Muotteja sopivasti muotoilemalla voidaan myös valukappaleisiin saada aikaan sisäisiä kennorakenteita ja muita muotoja, joiden avulla kappaleiden massa saadaan pienennettyä.

Koska AM tarjoaa mahdollisuuden käyttää hyväksi vapaampia muotoja osissa ja kokoonpanoissa, suunnittelijoiden tulee muuttaa ajattelu-tapaansa. Huomio tulee kiinnittää aihoiden ja valmistusmenetelmien sijasta kappaleen ja kokoonpanon optimaaliseen muotoon ja toiminnallisuuteen. Tämä ei tule olemaan helppoa useasta syystä johtuen. Ensinnäkin suunnitteluohjelmistot suosivat yksinkertaista geometri-aa (esimerkiksi suorat viivat, suorakaiteet ja ympyrät) ja vapaampien muotojen generointi on työlästä tai jopa mahdotonta. Suunnittelijat ovat myös vuosien myötä tottuneet suunnittelemaan kappaleet tuotannon lähtökohdista ja tämä kulttuuri näkyy edelleen hyvin vahvana myös koulutuksessa. Suunnittelulla on kuitenkin keskeinen rooli kap-paleiden optimaalisen muotoilun kannalta.

Suunnittelun apuna voidaan käyttää kappaleen muodon optimointiin tarkoitettuja ohjelmistoja (ns. topologian optimointiohjelmistot), joi-den avulla voidaan helpommin saada aikaan optimaalinen materiaalin käyttö. Esimerkiksi materiaalia voidaan poistaa sieltä missä jännitykset ovat matalampia, jolloin lopputuloksena on keveämpi kappale, joka on kuitenkin yhtä luja kuin alkuperäinen. Kuva 1.2 on esitetty esimerkki optimoinnin etenemisestä, kun alun perin hitsaamalla valmistettava nostokorvakon kokoonpano on muutettu yksittäiseksi, lisäävällä val-mistuksella toteutettavaksi osaksi. Tässä tapauksessa lopullinen kap-paleen massa on noin puolet alkuperäisestä. Lisäämällä kappaleisiin sisäisiä rakenteita voidaan massa/lujuus –suhdetta parantaa edelleen. Yleisesti käytössä olevat CAD-ohjelmat selviytyvät näistä haasteista varsin huonosti, mikä johtaa siihen, että AM:n kaikkia etuja ei saada täydellisesti hyödynnettyä.

Yksi tärkeimmistä AM-kappaleiden suunnitteluun liittyvistä asioista on kappaleen koko ja tilavuus. Suuremmat osat vaativat pidemmän tu-lostusajan ja erityisesti metallikappaleiden kyseessä ollessa koneaika on kallista, jolloin myös isojen kappaleiden tulostaminen tulee helpos-ti kalliiksi.



Kuva 1.2, Nostokorvakon optimoinnin eteneminen.

Yksi merkittävä kustannuksiin ja valmistettavuuteen vaikuttava tekijä on kappaleen tulostussuunta, joka tulee harkita jo suunnitteluvaiheessa. Tulostussuunta vaikuttaa merkittävästi myös pinnanlaatuun ja kappaleen mittatarkkuuteen. Negatiiviset pinnat (*overhangs*), joilla ei ole luonnollista tukea tulostussuunnassa alapuolellaan aiheuttavat useiden tulostusmenetelmien yhteydessä ongelmia tai ainakin edellyttävät erityisiä tukirakenteita, jotka on poistettava tulostuksen jälkeen. Peukalosäännön mukaan yli 45 asteen negatiiviset pinnat vaativat tukirakenteen joten niitä pyritään suunnittelussa välttämään. Toinen ongelmia aiheuttava seikka on isojen reikien yhteydessä. Vaakasuurat reiät, joiden halkaisija on suurempi kuin 7 mm vaativat yleensä tukirakenteen.

Metallista valmistettavien AM-kappaleiden tulostusta voidaan verrata päällehitsaukseen (hitsataan kerroksia toistensa päälle), joka voi aiheuttaa kappaleeseen jäännösjännityksiä. Näitä voidaan pienentää esilämmittämällä AM-valmistuskammio ja materiaali, mutta asiaan voidaan vaikuttaa myös suunnittelun avulla. Tasaisia ja ohuita seinämiä tulisi välttää. On myös hyvä sijoittaa jouheva muutos kahden eripakuisen seinämä väliin, mikä pätee myös kennorakenteiden seinämiin.

Kun lisäävänä valmistusmenetelmänä käytetään jauhepetimenetelmää, on hyvä muistaa, että jauhe on voitava poistaa myös kappaleen sisältä. [4]

1.4 Kustannus-hyöty -analyysi

Yksi suurimmista AM:n ongelmista tällä hetkellä on kustannus. Jo materiaalin kustannus voi olla satakertainen perinteiseen materiaalin verrattuna. Materiaalikustannus luonnollisesti riippuu tulostettavan osan ja tukirakenteiden yhteistilavuudesta. Myös tulostusaika kasvaa nopeasti, kun tulostettavan kappaleen koko kasvaa ja voi pahimmillaan olla useita päiviä tai jopa pidempi. Yleisesti ottaen 3D-tulostimien hinnat ovat laskemassa, mutta esimerkiksi keskimääräisen kokoisten metallikappaleiden tulostamiseen kykenevien tuotantolaitteiden hinnat alkavat noin 500 000 eurosta. Hankintakustannus voidaan luonnollisesti jakaa usealle vuodelle ja edelleen tulostettavien kappaleiden kesken. Tulostusaika on kuitenkin suurin tekijä AM-kappaleen hinnassa. Muita kustannuksia syntyy henkilötyöstä, jota tarvitaan tulostuksen esi- ja jälkitöissä.

On myös hyvä muistaa kustannuksia arvioitaessa, että hyvin harvoin on edullista valmistaa AM-menetelmällä kappaletta, joka on suunniteltu valmistettavaksi perinteisin menetelmin, koska niiden avulla menetetään usein paljon AM:n eduista. Useimmissa tapauksissa kappale kannattaa suunnitella uudelleen. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että AM-menetelmät ovat taloudellisimpia kappaleilla, jotka ovat pienikokoisia, monimutkaisia, asiakaskohtaisia muutoksia sisältäviä ja pienissä sarjoissa valmistettavia. On myös erittäin tärkeää tarkastella kustannuksia kappaleen elinkaaren eikä pelkän valmistusvaiheen osalta.

Baumers et al [7] listaavat joukon yleisiä taloudellisia näkökohtia etui-
neen ja rajoitteineen. Nämä on esitetty mukailten Taulukossa 1.1.

Taulukko 1.1. AM:n taloudelliset edut ja rajoitteet [7]

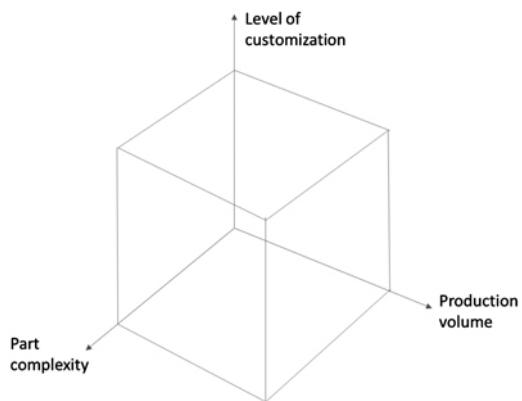
Edut	Taloudellinen vaikutus (mahdollisuudet)
Mahdollisuus valmistaa taloudellisesti geometrisesti monimutkaisia komponentteja ja tuotteita, joilla on potentiaalia parempaan käytettävyyteen ja toiminnalliseen tehoon.	Mahdollistaa monimutkaisten ja korkean toiminnallisuuden kappaleiden valmistuksen joiden huollettavuus on huomioitu ja sitä kautta taloudellisuus toteutuu koko elinkaaren aikana
Mahdollisuus tuottaa kappaleita pieninä sarjoina (jopa yksittäiskappaleita) ja pienemmin yleiskustannuksin sekä ilman työkalujen, kiinnittimien ja varustoinnin aiheuttamia kustannuksia.	Yksilöille tai sovelluksille räätälöityjä kappaleita, jotka sopivat paremmin yksilöllisiin tarpeisiin.
Rajoitteet	Taloudellinen vaikutus (rajoitteet)
Rajoitettu materiaalivalikoima.	Epäsopivien materiaalien käyttö aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia.
Hidas prosessointi.	Lisääntyvät epäsuorat (ajasta riippuvat) kustannukset.
Perinteisiin menetelmiin verrattuna huono mittatarkkuus.	Potentiaalisesti merkittäviä ja kallista jälkikäsitteilytarpeita.
Karkea pinnankarheus.	Valmistusvirheiden ja huonon laadun aiheuttamat lisäkustannukset.

Yksi yleinen tuotannon tehokkuuden arvioinnissa käytetty arvo on ns. ”*buy-to-fly*” -suhde, joka kertoo valmistuksessa käytetyn materiaalin ja lopputuotteen massojen suhteen. Perinteisin menetelmin valmistetuilla kappaleilla suhde on yleensä suuri. Tyypillinen esimerkki on Lockheed Martin F-22 -hävittäjä, jonka *buy-to-fly* -suhde on 12.2:1 (koko lentokone). Alkuperäisestä 49894 kg materiaalista vain 4082 kg jää jäljelle lopulliseen tuotteeseen ja loput (45812 kg) on työstetty pois. [8]

AM menetelmin puolestaan päästään varsin alhaisiin *buy-to-fly* -arvoihin ainakin yksittäisten osien kohdalla. Joskus jopa 1:1 on mahdollinen, tarkoittaen että tuotannossa ei synny hukkamateriaalia ollenkaan. Esimerkki AM-tuotannon eduista on Ti-6Al-4V-materiaalista valmistetun BALD (*Bleed Air Leak Detect*) kiinnittimen *buy-to-fly* -arvo. Perinteisin menetelmin valmistettaessa kappale työstetään, jolloin sen *buy-to-fly* -arvo on 33:1. AM-tuotannolla *buy-to-fly* -suhde on 1:1, jolloin saadaan myös valmistuskustannuksia pienennettyä yli 50%. [8]

Hyvin tärkeä näkökohta on myös massan ja samalla kustannusten kertautuminen. Jos ajatellaan esimerkiksi lentokonetta, yksittäisen osan painon pienentäminen voi johtaa kerrannaisvaikutusten kautta siihen, että tarvitaan hiukan pienempi moottori, hiukan vähemmän siipipinta-alaa, hiukan pienemmät laskutelineet ja pienemmät polttoainesäiliöt. Näin yhden osan painon säästäminen kertautuu monikertaisesti koko tuotteen alueelle. Elinkaarinäkökulmasta saavutetaan merkittäviä polttoainesäästöjä (ja pienempiä päästöjä) koko lentokoneen elinkaaren aikana. Sama ilmiö näkyy myös toimitusverkostoissa. Kokoverkoston kannalta valmistuskustannukset pienenevät, koska tarvitaan pienempiä varastoja, vähemmän lattiapinta-alaa ja kuljetuksia. [8]

Conner et al [9] ovat tunnistaneet kolme muuttujaa, joiden avulla voidaan arvioida AM:n mahdollisuuksia kappaleen valmistuksessa. Nämä ovat **tuotantomäärä**, **räätälöinnin aste** ja **geometrian monimutkaisuus**. Räätälöintiaste ja tuotantomäärä ovat usein kytkeytyneet toisiinsa, koska kestää pidemmän ajan tuottaa räätälöityjä tuotteita. Kuten kuvasta 1.3 havaitaan, näiden kolmen muuttujan avulla voidaan muodostaa kuutio, johon sijoittamalla kappaleen taloudellisuutta AM-valmistuksessa voidaan arvioida.



Kuva 1.3. Kuutio, joka kuvaa kappaleen tulostuksen taloudellisuutta.

Kuten aiemmin todettiin, kustannus-hyöty -analyysi on toteutettava siten, että se kattaa koko kappaleen elinkaaren raaka-aineesta kierrätykseen. Pelkkä valmistuskustannuksiin tuijottaminen voi antaa väärän kuvan tilanteesta.

Tunnettu esimerkki tästä on GE:n Leap -suihkumoottori, jota on pidetty ensimmäisenä matkustajakoneen moottorina, jossa on 3D-tulostetut polttoainesuuttimet. Suuttimen edellinen versio oli kokoonpano, jossa oli 20 osaa. AM:n avulla osien määrä saatiin supistettua yhteen. GE myös toteaa, että AM-osa on viisi kertaa kestävämpi aiempaan verrattuna. Varsinaiset säästöt saavutetaan kuitenkin moottorin elinkaarella, koska uudet moottorit säästävät 15 % polttoainekuluissa. Tämä tarkoittaa sitä, että uuden moottorin avulla saavutetaan polttoainesäästöjä 1.6 miljoonaa dollaria lentokonetta kohden vuodessa. [20, 21]

Zach Simkin ja Annie Wang (Wohler's report 2014) esittävät seitsemän skenaariota, jotka on hyvä ottaa huomioon, kun harkitaan lisäävän valmistuksen käyttöönottoa.

Taulukko 1.2. AM-valmistuksen etujen arviointia eri skenaarioiden muodossa.
Lähde: Senvol LLC, [19]

Skenaario	Kuvaus	Lisäävän valmistuksen (AM) edut
<i>Korkeat valmistuskustannukset</i>	<ul style="list-style-type: none"> Tuotteen valmistuskustannukset ovat korkeat, koska sen rakenne on monimutkainen, se aiheuttaa korkeat kiinteät kustannukset (esim. työkalut) tai tuotanto tapahtuu pieninä sarjoina. 	AM voi olla kustannustehokkaampi kuin perinteiset valmistusmenetelmät.
<i>Pitkä toimitusaika</i>	<ul style="list-style-type: none"> Kestääkö osien toimittaminen liian pitkään? Aiheuttaako odotusaika korkeita kustannuksia? Onko tarvetta lyhentää toimitusaikaa markkinoille? 	AM voi lyhentää tuotantoaikaa, koska osat saadaan nopeammin ja juuri silloin kun niitä tarvitaan.
<i>Korkeat varastointikustannukset</i>	<ul style="list-style-type: none"> Ovatko varastot hankalasti hallittavia? Onko tarvetta nimikkeille, joiden varastomäärän on oltava "varmalla puolella"? Onko riski, että varastossa on nimikkeitä, joilla ei ole käyttöä? 	AM voi mahdollistaa valmistuksen tarpeeseen perustuen ja vähentää näin varastoinnin tarvetta.
<i>Riippuvuus toimittajista</i>	<ul style="list-style-type: none"> Ovatko jotkin kriittisistä osista yksittäisen toimittajan varassa? Halutaanko toimittajariippuvuutta ja riskiä vähentää? 	AM:n avulla voidaan vähentää toimittajariippuvuutta.
<i>Etäiset kohteet</i>	<ul style="list-style-type: none"> Operoidaanko etäisissä kohteissa, joihin osien toimittaminen on hankalaa, aikaa vievää ja kallista? 	AM voi mahdollistaa paikallisen valmistuksen.
<i>Korkeat vienti- ja tuontikustannukset</i>	<ul style="list-style-type: none"> Muodostuvatko vienti- tai tuontikustannukset korkeiksi asiakkaan tai toimittajan maantieteellisen sijainnin vuoksi? 	AM voi mahdollistaa paikallisen valmistuksen lähempänä markkina-aluetta.
<i>Parannettu toiminnallisuus</i>	<ul style="list-style-type: none"> Halutaanko toiminnallisuutta parantaa tai lisätä uusia ominaisuuksia, jotka eivät ole mahdollisia toteuttaa perinteisin valmistusmenetelmin? 	AM:n avulla voidaan kappale suunnitella uudelleen siten, että sen toiminnallisuus paranee tai jopa lisätä siihen uusia ominaisuuksia.

Jos jokin taulukossa mainituista skenaarioista täyttyy, on syytä tutkia asiaa tarkemmin.

Yksi tapa selvittää kappaleen mahdollisuuksia AM:n valmistukseen on taulukossa 1.3 oleva tarkistuslista. Jotkin taulukossa mainituista kohteista ovat samoja tai samanlaisia kuin edellisessä taulukossa, mutta listan fokus on enemmän valmistustekniikassa.

Tarkistuslistan kohdat on arvioitava asteikolla (esimerkiksi 1 - 5) ja jos kaikkien kohtien keskiarvo on enemmän kuin 1/3 kokonaismäärästä, on olemassa todellinen syy harkita kyseisen osan toteuttamista AM-menetelmällä.

Taulukko 1.3. Kappaleen kustannustehokkaan AM-valmistuksen tarkistuslista.

Pienikokoisuus	Pienikokoisten kappaleiden valmistus on nopeaa ja niitä voidaan toteuttaa useita samanaikaisesti. Tulostusalue ja tulostusnopeus ovat kuitenkin tällä hetkellä rajoittavia tekijöitä.
Monimutkaisuus	Onko kappale hankala (tai mahdoton) toteuttaa perinteisillä valmistusmenetelmillä?
Räätälöintiaste	Kappaleet, jotka edellyttävät korkeaa räätälöintiastetta sopivat hyvin lisäävään valmistukseen.
Toiminnallisuus	AM:n avulla on mahdollista tuoda lisää toiminnallisuutta tai uusia ominaisuuksia
Integraatio	AM:n avulla kappaleita voidaan yhdistää ja siten helpottaa kokoonpanoa
Materiaalien käyttö	AM-valmistuksen materiaalien määrä on rajallinen
Pinnanlaatu	Jälkityöstäminen on kallista ja aikaa vievää. Jos AM-tulosteen pinnanlaatu kelpaa sellaisenaan, voidaan menetelmää harkita

2 PROSESSIT

Lisäävään valmistukseen liittyvät standardit ASTM F2729 (vedetty pois joulukuussa 2015) sekä ISO/ASTM yhteisstandardi ISO/ASTM 52900:2015 ”Additive manufacturing -- General principles – Terminology” kategorisoivat lisäävän valmistusmenetelmän prosessit seitsemään kategoriaan:

- Materiaalin pursotus (*Material Extrusion*)
- Materiaalin ruiskutus (*Material Jetting*)
- Sidosaineruiskutus (*Binder Jetting*)
- Laminointi (*Sheet Lamination*)
- Nesteen fotopolymerisointi (*VAT Photopolymerization*)
- Jauhepetimenetelmät (*Powder Bed Fusion*)
- Suorakerrostusmenetelmät (*Directed Energy Deposition*)

Kaikki lisäävät valmistusmenetelmät eivät sovi standardeissa määriteltyihin kategorioihin, tai voivat sopia useampaan kategoriaan samanaikaisesti. Tähän on syynä lisäävien valmistusmenetelmien nopea kehitys. Nopeaan kehitykseen vaikuttaa osaltaan se, että monet perinteiset valmistusmenetelmät soveltuvat lisäävään valmistukseen joko suoraan tai hieman muunneltuna, mutta vasta tietoisuuden lisääntyttyä niitä on osattu alkaa kehittämään ja soveltamaan lisäävänä valmistuksena.

Lisäksi yhdistämällä lisäävän valmistuksen menetelmiä ns. hybridimenetelmiksi toistensa tai perinteisten materiaalia poistavien menetelmien kanssa, saadaan monia hyötyjä, joita ei millään yksittäisellä menetelmällä voida saavuttaa. Nämä hybridimenetelmät eivät sovellu minkään ISO/ASTM standardin mukaisen yksittäisen kategorian alle.

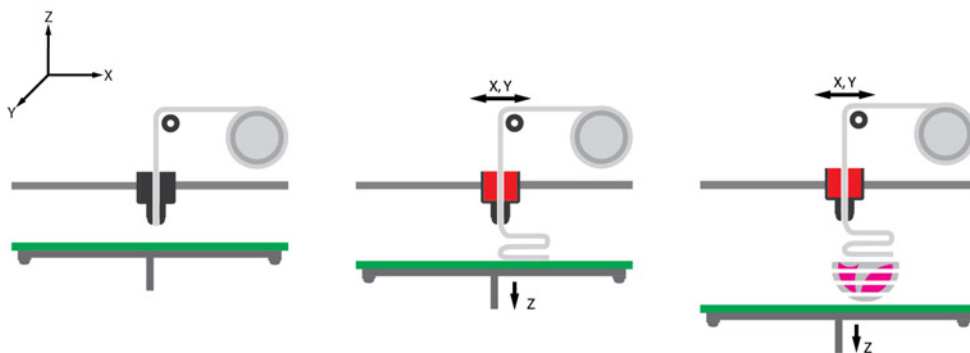
Yksi esimerkkinä kategorioihin sopimattomasta lisäävän valmistuksen menetelmästä on kylmäruiskutus (Cold Spray) prosessi, jossa metallijauheita sijoitetaan sulamispisteen alapuolella korkeilla nopeuksilla (nelinkertainen äänennopeus) korjattavan tai muodostettavan kappaleen pinnalle.

Lisätietoja:

<http://www.geglobalresearch.com/blog/cold-spray-ge-technology>

2.1 Materiaalin pursotus

Materiaalin pursotus (*Material Extrusion*) on lisäävän valmistusmenetelmän prosessi, jossa materiaalia lisätään valikoivasti suuttimen tai suuaukon kautta (kuva 2.1).



Kuva 2.1. Materiaalin pursotus -menetelmän toimintaperiaate.

Menetelmä on nykyään varsinkin kuluttajatasen laitteissa yleisimmin käytetty AM-menetelmä. Se on myös AM-menetelmistä halvin, hitain ja yksinkertaisin. Yleisin käytössä oleva menetelmä voi kuitenkin vaihtua nopeastikin, mikäli suuret yritykset kuten HP alkavat toimittaa omia kuluttajatasen 3D-tulostinlaitteita.

Materiaalia pursottavia menetelmiä voidaan verrata kuumaliimapis-toolin toimintaan, jossa termoplastista muovia pursotetaan lämmite-tytyn suuttimen läpi. Pursotettavan materiaalin täytyy olla osittain kiin-teässä muodossa pursotettaessa ja sen täytyy kiinteytyä pursotettuun muotoon. Materiaalin tulee myös liittyä kiinteästi aiemmin pursotet-tuun materiaaliin. Termoplastisten materiaalin lisäksi materiaali voi olla tahnamainen, joka voi käyttää kovettumismenetelmänä kemiallis-ta reaktiota, kuten esimerkiksi kovetin- tai liuotinainetta, reaktiota il-man kanssa tai kuivumista ajan kuluessa.

Ennen tulostusprosessin alkua 3D-mallit sijoitetaan virtuaalisen tulos-tustilavuuden sisään, joka sitten siivutetaan tulostusta varten. Siivu-tusohjelma laskee annettujen parametrien ja leikkauskuvien perusteel-la 2D-tulostusreitit jokaiselle siivulle ja tallentaa ne GCODE-tietona. GCODE sisältää tulostimelle lähetettävät lämpötilatiedot, moottorien koordinaatit (XYZ), syötettävän langan määrän, jne. Jotkut tulostimet käyttävät lämmitettyä alustaa ja esimerkiksi liimaa, jotta kappale tart-

tuu paremmin kiinni tulostuksen ajaksi. Toisissa taas käytetään esimerkiksi irrotettavia alustoja, johon tulostettu kappale tarttuu hyvin tiukasti ja josta kappale täytyy leikata irti tulostuksen jälkeen.

Kun itse tulostusprosessi aloitetaan, tulostin piirtää jokaisen kerroksen yksi kerrallaan GCODE-komentojen mukaisesti. Tulostimessa on yleensä mikrokontrolleri, joka hoitaa komentojen prosessoinnin reaaliaikaisesti.

Materiaalia pursottavaan menetelmään perustuvasta 3D-tulostimesta on versioita, joissa moottori on liitetty tulostuspään viereen, sekä versioita joissa tulostuslanka tuodaan kauempaa ohjausletkua pitkin suuttimelle. Lisäksi eroja on paljon siinä miten x-, y- ja z-akseleita liikutetaan. Muun muassa nämä erot vaikuttavat tulostusaikaan kuluttajatasen laitteissa maksimitulostusnopeuden ja kiihtyvyyksien kautta. Teollisuustason laitteissa laitteen johteet ovat parempia ja moottorit huomattavasti tehokkaampia, joten tulostuspään massalla ei ole niin suurta merkitystä.

Jos tulostettavassa kappaleessa on suuria tyhjän päällä olevia rakenteita, tarvitaan tukimateriaalia jotta kappaleen rakenne ei kärsi ja että materiaali kiinteytyy oikeaan muotoonsa. Tyhjän päällä olevat rakenteet voidaan tukea lisäämällä tukirakenteet suunnitteluvaiheessa, tai lisäämällä automaattisesti generoituja ohuita tukiseinämiä siivutusvaiheessa. Joissakin järjestelmissä on kaksi tulostussuutinta, joka mahdollistaa esimerkiksi vesiliukoisen tukimateriaalin käyttämisen.

Materiaalin pursotusmenetelmää käyttävät laitteistot (varsinkin kuluttajatasen laitteet) ovat pääosin hitaita verrattuna muihin tulostusmenetelmiin. Toisaalta pienissä, pinnanlaadultaan karkeissa yksittäiskappaleissa myös kuluttajatasen laitteet pärjäävät paremmin.

Valmistajat käyttävät materiaalia pursottavaan menetelmään perustuvista laitteistaan useita eri nimityksiä jotka on usein rekisteröity yritysten tavaramerkeiksi. Seuraavassa on lueteltu yleisimpiä käytössä olevia nimityksiä valmistajien materiaalia pursottavaan menetelmään perustuvista laitteista.

Fused Deposition Modeling, FDM

Stratasys kehitti ja otti käyttöön ensimmäisenä materiaalia pursottavan tulostusmenetelmän (FDM) vuonna 1980. Sen jälkeen myös muut yritykset ovat ottaneet käyttöön vastaavia menetelmiä eri nimillä. Käsite “*Fused deposition modeling*” ja sen lyhenne FDM ovat Stratasys Inc. tavaramerkkejä.

Lisätietoja:

<http://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>.

Fused Filament Fabrication, FFF

RepRap projektin jäsenet ottivat käyttöön termin “*fused filament fabrication*” (FFF), tarkoituksenaan luoda vapaasti käytettävä termi menetelmälle. FFF:llä tulostetut osat ovat kerroksittaisia, ja 100 % täytölläkään kappaleet eivät ole yhtä kestäviä eri tulostussuunnissa. Kappaleen tulostussuunta ja täyttökuvio vaikuttavat huomattavasti kappaleen lujuuteen.

Lisätietoja:

http://reprap.org/wiki/Fused_filament_fabrication.

Big Area Additive Manufacturing (BAAM)

Kaikki materiaalia pursottavat järjestelmät eivät suinkaan ole hitaita. BAAM on Cincinnati-yhtymän kehittämä materiaalia pursottava järjestelmä suurten kappaleiden valmistamiseen. BAAM 100 Alpha on laite, joka kykenee pursottamaan termoplastista muovia jopa 17 kg tunnissa. Oletuksena laitteen tulostusalue on 6x2,4x1,8 m ja suutinkoko 0,8 mm. Laite kykenee tulostamaan useita eri muoveja, kuten PEEK, UL-TEM sekä hiilikuituvahvisteinen ABS. BAAM käyttää materiaalinaan samoja muovipellettejä kuin ruiskuvaluteollisuus, joka tarkoittaa, että tulostusmateriaali laitteelle on suhteellisen halpaa ja sitä on helposti saatavilla.

Lisätietoja:

<http://www.e-ci.com/baam>

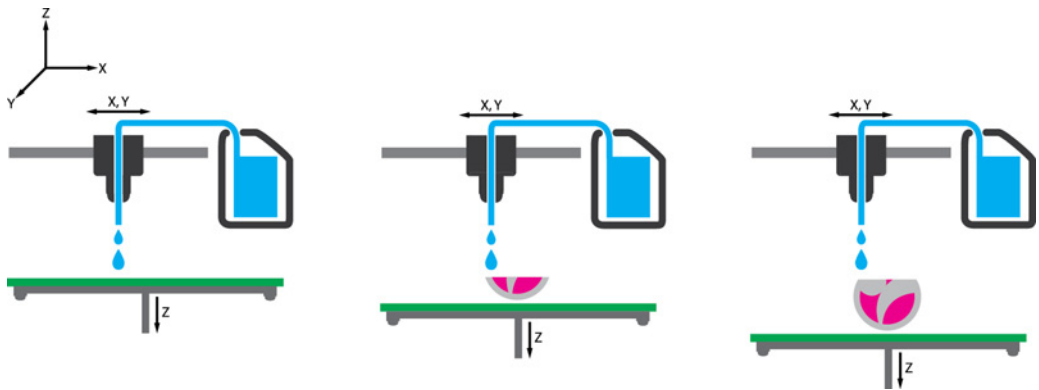
<http://www.assets.e-ci.com/PDF/Products/baam-fact-sheet.pdf>



Kuva 2.2. Cincinnati Inc. Big area additive manufacturing (BAAM).

2.2 Materiaalin ruiskutus

Materiaalin ruiskutusmenetelmä on lisäävän valmistuksen prosessi, jossa tulostusmateriaalipisaroiita sijoitellaan valikoivasti. Esimerkkiprosesseja ovat UV-kovettuva muovi ja vaha. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 2.3.



Kuva 2.3. Materiaalin ruiskutusmenetelmän toimintaperiaate.

Materiaalin ruiskutus on AM-prosessi, jossa käytetään yleisesti mustesuihkutulostimen tulostuspäitä sijoittelemaan materiaalia tulostusalueelle, tulostuspäiden liikkuessa tulostusalueen yli. Monisuutin-tulostuspäitä käytetään usein nostamaan tulostusnopeutta ja monimateriaali-tulostuksen mahdollistamiseen.

Tulostetut ratkaisut ovat yleensä fotopolymeerejä tai vahamaisia materiaaleja, joita voidaan käyttää vahamallivalumuotteina. Muun muassa Stratasys, Solidscan ja 3Dsystems ovat yrityksiä joilla on tätä menetelmää käyttävää laitekantaa.

Stratasys:in Connex järjestelmää käytetään “Digitaalisten materiaalien” luomiseen, ruiskuttamalla samaan aikaan useampaa materiaalia, jolla pyritään valmistamaan osia tai osan alueita erilaisilla ominaisuuksilla. Digitaaliset materiaalit ovat fotopolymeerejä, jotka kovetetaan UV-valolla sijoittelun jälkeen. Stratasysillä on myös Connec3-järjestelmä, jolla voidaan ruiskuttaa kolmea eri materiaalia eri suhteissa, värien ja materiaaliominaisuuksien muuttamiseksi.

Solidscapen on vuonna 1994 aloittanut yritys, joka on myynyt yli 4000 3D-tulostinta yli 80 maahan. Solidscapen laitteet tulostavat vahamalleja pienmetalliosavaluja varten käyttämällä termoplastista mustesuihkuprosessia ja korkeatarkkuuksista koneistusta joka kerroksella eliminoiden jälkikäsittelytarpeen. Stratasys osti Solidscapen vuonna 2011, mutta säilytti yrityksen itsenäisenä tytäryhtiönä.

3DSystems valmistaa 3D-tulostimia kuluttaja-, työpöytä-, ammattilais- ja tuotantotasolle, neljällä eri AM-valmistusmenetelmällä (materiaalin pursotus ja -ruiskutus, jauhepeti sekä fotopolymeerisointi). 3DSystems käyttää materiaalinruiskutusprosessistaan nimitystä “*multi-jet modeling*”. Projet 5500X on yrityksen ensimmäinen malli, joka kykenee sekoittamaan kahta materiaalia tulostuksen aikana, joka mahdollistaa mm. kappaleen ominaisuuksien muuttamisen, kuten jäykästä joustavaksi.

Direct-write

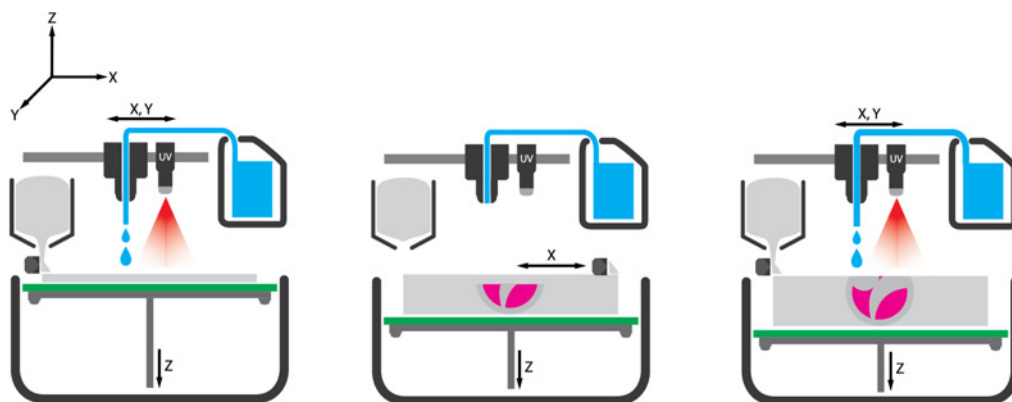
Suoratulostus-tekniikka käyttää erilaista lähestymistapaa materiaalien sijoittamiseen. Atomisoituja nanokokoisia partikkeleita suihkutetaan inertin aerosolikaasun mukana, joka fokusoidaan tarkasti kohteeseen toisella rengasmaisella kaasusuihkulla. Käytettävä materiaalikirjo on suuri ja mahdollistaa esimerkiksi elektroniikkapiirien tulostamisen.

Suoratulostus-tekniikalla on rajoituksia luotavien 3D-muotojen suhteen, koska se toimii 2,5-ulottuvuudessa. Oikeanlaisilla liikejärjestelmillä materiaalia voidaan kuitenkin sijoittaa kaareville pinnoille ja jopa kulmien taakse.

Suoratulostustekniikkaan pohjautuvia järjestelmiä käyttäviä yrityksiä ovat mm. Optomec, nScrypt ja Voxel8 (jolla suoratulostustekniikkaa on yhdistetty materiaalinpursotustekniikan rinnalle).

2.3 Sidosaineruiskutusmenetelmä

Sidosaineruiskutus on lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa nestemäistä sidosainetta sijoitetaan valikoivasti jauhemateriaalien liittämiseksi yhteen. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 2.4.



Kuva 2.4. Sidosaineruiskutusmenetelmän toimintaperiaate.

Sidosaineruiskutus on kehitetty vuonna 1993 MIT:ssä Yhdysvalloissa. Sidosaineruiskutus prosessissa nestemäistä sidosainetta sijoitetaan valikoivasti kerros kerrokselta, käyttäen jauhepetiä ”tulostusalustana”. Toimintaperiaate on samankaltainen kuin perinteisissä mustesuihkutulostimissa. Jauhepeti toimii samalla tukirakenteena tulostetuille kappaleille poistaen erillisen tulostusalustan ja tukirakenteen tarpeen.

Tätä prosessia käyttävissä laitteissa on tulostustaso, jota lasketaan kerroksittain ja joka kerta levitetään jauhekerros alustan päälle mekaanista levittäjää käyttäen. Jauhekerroksen levittämisen jälkeen 3D-mallista siivutettu läpileikkaus tulostetaan sidosaineella jauhepedin päälle. Jotkut järjestelmät käyttävät tässä mukana myös sidosaineen kovetusta, esimerkiksi käytettäessä uv-kovettuvaa sidosainetta. Tätä toistetaan kunnes kaikki tulostustyön osat on tulostettu. Joskus jauhe itsessään sisältää sidosaineen ja tulostin levittää selektiivisesti vain sidosaineen aktivoivaa liuotainainetta. Jotkut järjestelmät levittävät myös väriaineita sidosaineen mukana tai sen jälkeen, joka mahdollistaa osien tulostuksen värillisenä.

Samaa prosessia voidaan käyttää valmistamaan osia lähes mistä materiaalista tahansa, esim. muovit, metallit, hiekka, keraamit, jne. Jotkut materiaalit, kuten metallijauhe, voivat tarvita suojatun ympäris-

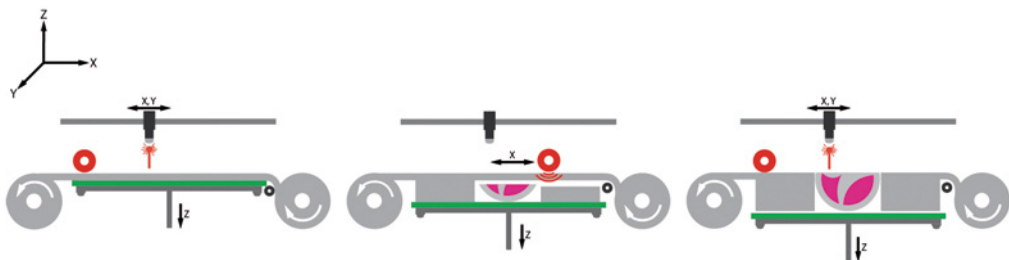
tön (esim. suojakaasulla täytetty suljettu kammio). Metallitulosteiden kanssa voidaan käyttää isostaattista kuumapuristusta (HIP) korkeamman materiaaliitiheyden saavuttamiseksi. HIP:iä käytetään yleensä vasta sintrauksen jälkeen.

Sidosaineruiskutusprosessia käytetään yleisimmin muottiteollisuudessa, esimerkiksi ExOne ja Voxeljet valmistavat 3D-tulostimia metallivalujen hiekkamuottien tulostamiseen. Molemmilla yrityksillä on yhteinen historia, sillä molemmat ovat lähtöisin samasta saksalaisesta Generis startup -yrityksestä.

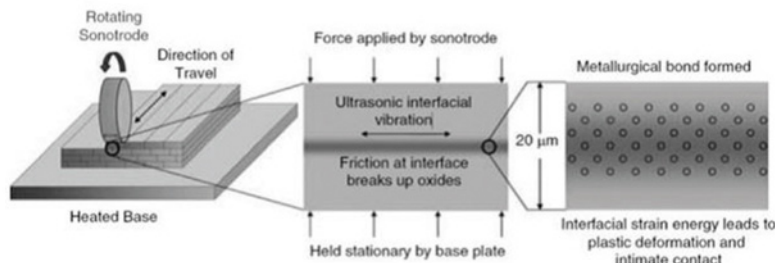
ExOnen suurimmat tulosteet sidosainemenetelmällä ovat huonekokoisia ja materiaaleihin kuuluu hiekan lisäksi myös metalleja (mm. ruostumaton teräs, pronssi, tungsten, jne) ja keraameja yms.

2.4 Laminointi

Laminointimenetelmä (*Sheet Lamination*) on lisäävän valmistuksen prosessi, jossa materiaalikalvoja yhdistetään toisiinsa kappaleen muodostamiseksi. Kalvomateriaalit voivat olla lähes mitä tahansa, kuten muoveja, paperia, komposiitteja ja myös metalleja. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 2.5.



Kuva 2.5. Laminoointimenetelmän toimintaperiaate.



Kuva 2.6. Sheet ultrasound welding. (Ek)

Metallin laminointiprosessi tapahtuu sijoittamalla metallilevyjä toistensa päälle, leikkaamalla levyt muotoonsa ja liittämällä ne yhteen. Leikkaus tehdään yleisesti laserilla tai veitsellä ja liittäminen liimamalla tai esimerkiksi ultraäänihitsauksella. Prosessijärjestys materiaalin leikkauksen, sijoittelun ja liittämisen välillä voi vaihdella.

Ultraäänellä liittäminen tapahtuu liikuttamalla ultraäänitaajuudella värähtelevää akselia levyjen päällä. Värähtelyt muuttuvat lämmöksi levyjen välissä, jolloin levyt hitsautuvat kiinni toisiinsa. Ultraäänihitsaus-laminointikoneet eivät tarvitse suljettua ympäristöä, koska liittäminen tapahtuu kappaleen sisällä, toisin kuin muissa lisäävän valmistuksen prosesseissa. Ultraääniliittämistä (*Ultrasonic Consolidation*) käytetään synonyyminä ultraäänihitsaukselle (*Ultrasonic welding*).

Laminointimenetelmässä kalvomateriaali voi olla valmiita arkkeja, kuten A4-kokoista paperia, tai esimerkiksi rullatavaraa, josta tulostin leikkaa prosessiin jätettävät osat irti ja ylimääräinen osa kelautuu poistorullalle tulostusalueen toiselle puolelle.

Ultrasonic additive manufacturing, UAM

UAM on Dawn White:n keksimä ja patentoima laminointimenetelmä. Myöhemmin 1999 Dawn White perusti Solidica Inc. yrityksen, joka on UC-teknologian kaupallinen omistaja ja järjestelmätoimittaja.

Fabrisonic LLC, EWI:n ja Solidican yhteenliittymä on valmistusteknologia yritys, joka käyttää lisääviä- ja poistavia valmistusmenetelmiä 3D-tulostuspalveluissaan. UAM menetelmässä käytetään ultraäänihitsausta kappaleen kasvattamiseksi metallikalvoista, sekä CNC työstökoneita koneistamaan kappale tarkkoihin mittoihinsa. UAM toimii avoimessa ympäristössä, eikä tarvitse erikoissuojauksia.

Yhtenä etuna muihin lisäävän valmistuksen menetelmiin nähden UAM mahdollistaa esimerkiksi metallin sisään sulautettavan anturorinnan ilman korkeaa lämpötilaa, joka voi vahingoittaa joitakin sensoreita. Sensorin sulauttaminen metallikuoren sisään voi kasvattaa huomattavasti sensorin kestoikää. Esimerkkejä onnistuneesti sulautetuista sensoreista ja materiaaleista ovat termoparit, venymäliuskat, kiihtyvyyys- ja paineanturit sekä kuituoptiikka. UAM voisi myös tarjota joissain tapauksissa esimerkiksi ratkaisun lämpölaajenemisongelmiin, käyttämällä sulautettuja muistimetalleja, jotka supistuvat määrättyissä lämpötiloissa.

UAM prosessissa ultraäänihitsaus vaatii noin 450 kg puristusvoimaa, ja aiheuttaa noin 120 °C asteen lämpötilan hitsauskohtaan. Prosessissa lämpötila pysyy riittävän matalana, jotta materiaalin metallurgia raerakenne eivät muutu ja kappaleen sisään voidaan sulauttaa elektroniikkaa.

Hitsauspään puristusvoima aiheuttaa ongelmia tyhjän päällä olevien, tukemattomien piirteiden kanssa. Tätä ongelmaa voidaan välttää mm. koneistamalla alapuoliset muodot, 3D-tulostuksen sijasta.

Lisätietoja:

http://www.ctemag.com/aa_pages/2015/150109-Hybrid.html

<http://fabrisonic.com/>

<http://ewi.org/>

<http://3dprint.com/12075/ultrasonic-3d-printing-uam/>

http://www.ctemag.com/aa_pages/2015/150109-Hybrid.html

Laminated object manufacturing, LOM

LOM on Helisys Inc. yrityksen (nykyään Cubic Technologies) kehittämä lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa liimataan peräkkäisiä liimalla pinnoitettuja paperi-, muovi- tai metallilaminaatteja yhteen käyttämällä lämpöä ja painetta, sekä leikkaamalla ne muotoon laserilla tai leikkausterällä.

Materiaali syötetään rullalta tulostusalustan yläpuolelle ja laminoidaan yhteen lämmitetyllä rullalla. Kerroksen muoto leikataan materiaalista joko laminointia ennen tai sen jälkeen ja tukimateriaaliosa leikataan valmiiksi pienemmiksi alueiksi helpompaa poistoa varten.

Järjestelmä käyttää tulostusalustaa, jota lasketaan alaspäin jokaisen kerroksen jälkeen. Samalla kun uutta materiaalia saadaan rullalta lisää, vanha ylijäämämateriaali rullautuu tulostusalueen toisella puolella olevalle ylijäämäärullalle. Prosessia toistetaan kerros kerrokselta kunnes kappale on valmis.

Tyypillisesti kerrosresoluutio määräytyy käytettävän materiaalin paksuudesta, joka vastaa yleensä yhdestä muutamaan kopiopaperin paksuutta. LOM ei vaadi suljettua ympäristöä, kuten jotkut muut lisäävän valmistuksen prosessit, mutta sillä ei voida tehdä monimutkaisia muotoja ja sillä valmistettavaa kappalekokoa rajoittaa materiaalilevyn/rullan koko.

Lisätietoja:

<http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes/>

Selective deposition laminating (SLD)

Mcor Technologies Ltd:n käyttää laminointitekniikastaan nimitystä "*Selective deposition laminating (SLD)*". SLD eroaa LOM tekniikasta materiaalin, valikoivan liiman levityksen sekä lämmitetyn painelelyn osalta.

Materiaalina käytetään etukäteen tulostettuja standardi kirje- tai A4-kokoisia kopiopapereita. Liimaa tarvitaan vain kappaleeseen kuuluvilla alueilla, sekä tukirakenteissa, joiden poistoa on helpotettu vähemmällä liimamäärällä. Lämmitetyn rullan sijasta SLD käyttää lämmitettyä puristuslevyä, jolla kerrokset puristetaan kiinni toisiinsa paremman liimauksen saavuttamiseksi. Kun kerros on liimattu kappaleen päälle, se leikataan volframikarbiditerällä muotoonsa seuraamalla kappaleen ulkoreunoja.

Mcor Technologies aloitti yhteistyön Staples -toimistovälinejätin kanssa vuonna 2012 ja tarjoaa asiakkaille mahdollisuuden 3D-tulostukseen Staples -myymälöissä.

Lisätietoja:

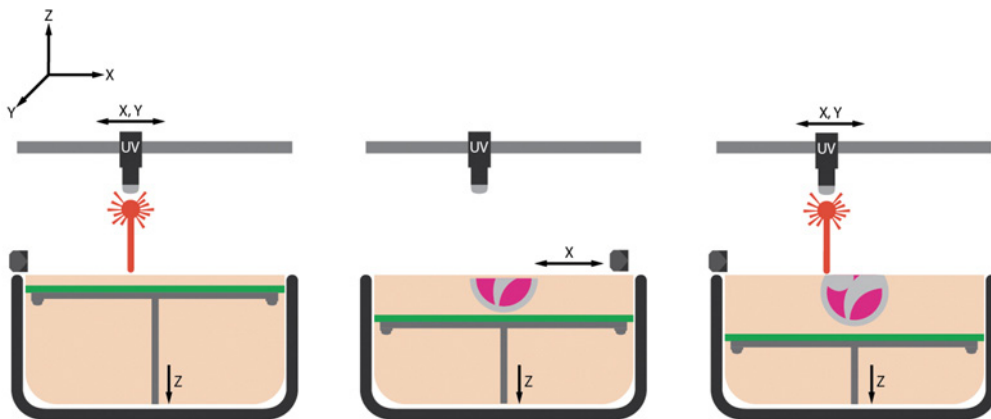
<http://mcor technologies.com/>

<http://www.cubic technologies.com/Helisis.htm>

<http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes/>

2.5 Nesteen fotopolymerisointi

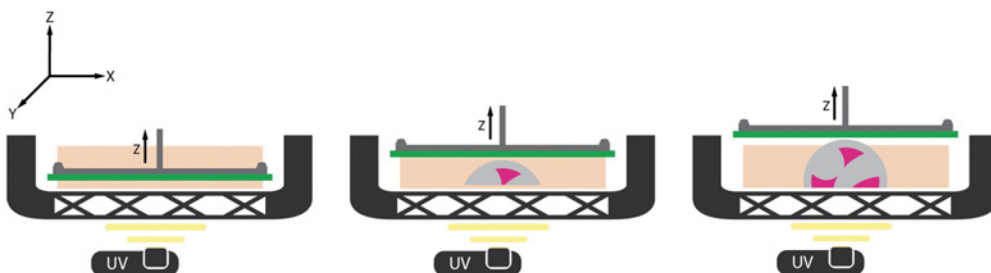
Nesteen fotopolymerisointi on lisäävän valmistuksen prosessi, jossa astiassa olevaa nestemäistä fotopolymeeriä kovetetaan valikoivasti valoaktivoituvan polymerisaation avulla.



Kuva 2.7. Nesteen fotopolymerisointi menetelmän (laskeva tulostuspeti) toimintaperiaate.

Stereolitografia, (SLA tai SL)

Stereolitografia on teknologia jossa kappale kovetetaan valikoivasti kerros kerrokselta nestemäisestä fotopolymeeristä UV-laseria käyttämällä. Riippuen laitevalmistajasta kappale tulostetaan joko tulostusalustan päälle tai alapuolelle. Järjestelmissä, joissa kappale tulostetaan tulostusalustan päälle, alustaa lasketaan kerroksittain ja nestepinta ”tasoitetaan” kappaleen päälle alustan yli liikutettavalla lastalla, jonka jälkeen kappaleen leikekuvaa vastaava alue kovetetaan UV-laserilla. Järjestelmissä, joissa kappale tulostetaan tulostusalustan alapuolelle, alusta lasketaan ensin hitaasti säiliön pohjalle, jonka jälkeen alustaa nostetaan kerros kerrokselta ylöspäin. Kappale kovetetaan UV-laserilla, tai projektorilla selektiivisesti säiliön pohjan läpi.



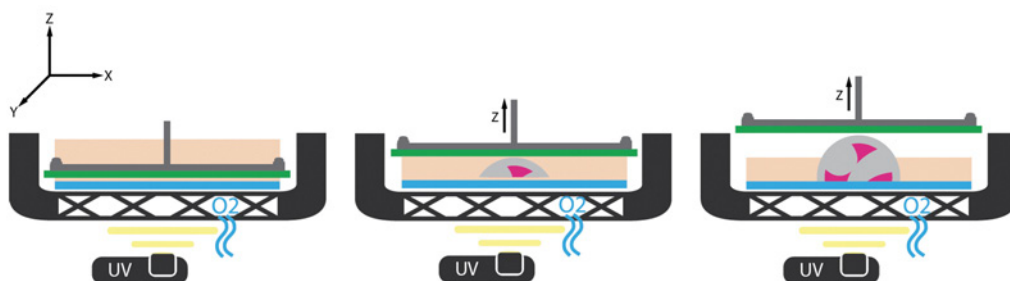
Kuva 2.8. Nesteen fotopolymerisointi menetelmän (nouseva tulostuspeti) toimintaperiaate.

Continuous Liquid Interface Production technology, CLIP

CLIP on uusi lisäävän valmistuksen järjestelmä Carbon3D yritykseltä. Carbon3D mainostaa teknologiaansa ja pyrkii haastamaan nykykäsitystä lisäävästä valmistuksesta esittämällä, että ”3D-tulostuksen suurin ongelma on, että nykyiset menetelmät eivät oikeasti ole edes 3D-tulostusta, vaan kyseessä on 2D-tulostus uudelleen ja uudelleen”.

Lisätietoja:

<http://3dprint.com/51566/carbon3d-clip-3d-printing/>

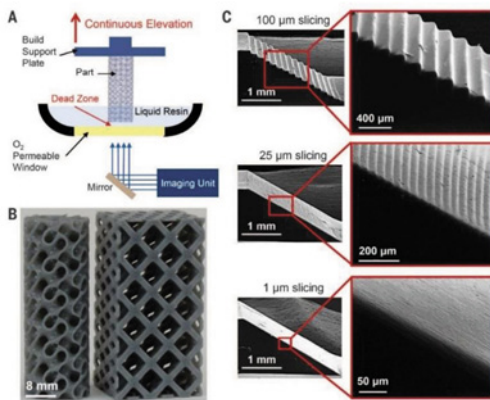


Kuva 2.9. Continuous liquid production technology, CLIP.

Vaikka CLIP prosessi toimii jotenkuten samoin kuin SLA prosessi, prosessit eroavat muutamalta kohdalta selkeästi toisistaan. Alustaa nostetaan nestesäiliöstä kuten SLA -prosessissakin, mutta kerros kerrokselta nostamisen sijaan alustaa nostetaan jatkuvasti tasaisella nopeudella. Myös valmistettavaa kappaletta kovetetaan jatkuvasti projisoimalla UV-valolla kappaleen leikekuvia altaan pohjan läpi. Tämä on mahdollista altaan läpinäkyvän ja happea läpipäästävän pohjan ansiosta. UV-valo käynnistää polymerisoitumisen ja happi estää polymerisoitumista.

Säätämällä tarkasti milloin ja kuinka paljon happea päästetään altaaseen, järjestelmä kykenee luomaan 10 mikronia korkean ”kuolleen alueen” altaan pohjalle, jossa polymerisointi UV-valon vaikutuksesta ei kykene tapahtumaan. Samaan aikaan laite nostaa alustaa jatkuvalla nopeudella ja kovettaa kappaletta jatkuvalla UV-valolla altaan pohjan läpi. Kappaleen muoto saadaan muuttamalla jatkuvasti projisoitavan valon muotoa kappaleen leikekuvien mukaisesti alustan korkeuden mukaan.

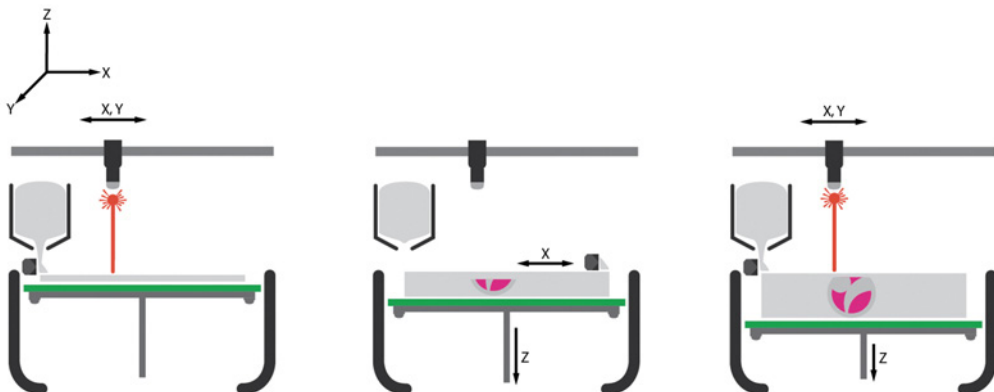
Tällä prosessilla on muutamia suuria etuja SLA prosessiin verrattuna, joista ensimmäinen on nopeus. Poistamalla mekaaniset askelmat ja kerrokset prosessi on 25 – 100 kertaa nopeampi kuin muut nykyään saatavilla olevat kaupalliset allasvalopolymerisaatio järjestelmät. Nopeuden lisäksi leikekuvat kappaleesta tehdään yhä kerroksittain, mutta kappaletta kovetetaan UV-valolla jatkuvasti, jolloin kappaleen materiaali kovettuu tasaisemmin ja materiaaliin ei synny kerrosten liitospintoja. Koska kerroksia käytetään vain projisoidun valon kanssa, vain kappaleen pinnanlaatu riippuu kerroskorkeudesta (mitä pienemmällä kerroskorkeudella, sitä tarkempia kappaleen pinnat ovat). Jos kappale siivutetaan riittävän ohuiksi kerroksiksi, myös pinnalla näkyvä porrastus häviää täysin.



Kuva 2.10. CLIP prosessi ja kappaleen pinnanlaatu (3dprint.com, sciencemag.org)

2.6 Jauhepetimenetelmät

Jauhepetimenetelmä on lisäävän valmistuksen prosessi, jossa jauhepetin alueita liitetään yhteen selektiivisesti lämpöenergialla.



Kuva 2.11. Jauhepetimenetelmän toimintaperiaate.

Jauhepetimenetelmä on vanhin ja tällä hetkellä yleisin metallitulos-
tusprosessi, menetelmää käytetään myös hyvin yleisesti muoviosien
tulostuksessa. Ensimmäinen DMLS menetelmää koskeva patentti on
rekisteröity 1971. Seuraava patentti tuli kuusi vuotta myöhemmin ja
se on hyvin lähellä nykyään käytettäviä AM prosesseja. Useat nykyi-
set prosessit jakavat saman perustoiminnan ja monet eroavat toisistaan
pelkästään prosessinimeltään, joka tekee erojen ymmärtämisestä haas-
tavaa.

Yksi syy useille eri prosessinimityksille (kuten DMLS, SLM ja DMP)
on että monet tahot ovat työskennelleet saman tai samankaltaisten pro-
sessien kanssa ja välttävät käyttämästä samoja nimityksiä, koska osa
niistä on yritysten lisensoimia tuotemerkkejä.

Kaikki prosessit joissa käytetään jauhepetimenetelmää metallien tu-
lostukseen käyttävät myös suljettua suojakaasulla täytettävää tulostus-
kammiota. Suojakaasuvaatimuksen vaihtelevat eri metallimateriaalien
välillä, esimerkiksi titaanijauheen kanssa käytetään argonia, kun taas
teräksen kanssa käytetään yleisesti typpeä.

Tulostusprosessi jauhepetimenetelmissä on seuraavanlainen:

1. Suunnittelija suunnittelee kappaleen.
2. Osa tai osat sijoitetaan virtuaalisen tulostus volyymin sisään.
3. Tulostusvolyyymi siivutetaan kerroksiksi (kerrosmäärä riippuu
kerroskorkeudesta/tarkkuudesta)
4. Jauhekerros levitetään tulostusalueelle
5. Jauhekerros sulatetaan tai sintrataan valikoivasti lasersäteellä.
6. Osat muodostuvat kerros kerrokselta, kun osioita 4 ja 5 toistetaan,
kunnes kaikki kerrokset ovat tulostettu.
7. Tulostuskammio jäähdytetään.
8. Ylimääräinen jauhe kierrätetään ja osa siitä voidaan käyttää uu-
delleen.

Järjestelmään vaikuttavat monet tekijät, kuten lämmön johtuminen ja
säteily, sulan koko, jne. Järjestelmää kontrolloidaan useita parametreja
säätämällä. Parametreja ovat esimerkiksi laserin teho, partikkelikoko,
kammion lämpötila, tuki ja lämpönielujen koko ja sijainti, sula aluei-
den etäisyys toisistaan, jne. Jotkut muuttujat ovat kriittisempiä kuin
toiset, mutta kaikki vaikuttavat yhdessä lopullisen kappaleen laatuun
ja onnistumiseen. Osa ja tukimateriaalin suunnittelu on kriittistä läm-
pökuorman ja jännityksien kannalta, jotka ovat tyypillisiä muuttujia
metallimateriaaleilla.

Yksi suuri ero järjestelmien välillä on lämmöntuonnissa, järjestelmät voivat olla sintraavia tai sulattavia.

Materiaalia sintraavissa järjestelmissä jauhepartikkeleja lämmitetään kunnes ne tarttuvat toisiinsa molekyyalitasolla. Jauhetta ei sulateta kokonaan, joka mahdollistaa huokoisuuden säätölemisen lopputuotteessa. Myös huokoisuus voi olla tärkeä ominaisuus etenkin terveydenhuollon sovelluksissa.

Sulattavat järjestelmät kykenevät suuremman lämmöntuotannon avulla sintraamisen lisäksi sulattamaan metallipartikkelit täysin, joka mahdollistaa 100 % kiinteiden kappaleiden luomisen.

Sintraamisessa tai sulattamisessa tarvittava lämpö tuodaan prosessiin esimerkiksi laser- tai elektronisäteellä.

Ennen kuin tulostettu osa voidaan ottaa pois tulostimesta, kammio on jäädytettävä ja ylimääräinen jauhe kierrätettävä. Lisäksi osat täytyy irrottaa tulostusalustasta ja poistaa kappaleista tukimateriaali sekä lämpönielut. Tämän jälkeen kappaleille voidaan tehdä jälkikäsittelyitä, joka voivat viedä paljon enemmän aikaa kuin itse tulostus.

Useat yritykset myyvät jauhepetimenetelmään perustuvia tulostimia. Joitakin tunnetuimpia järjestelmävalmistajia ovat: EOS, SLM, Concept Laser, 3DSystems, Renishaw, ReaLizer GmbH and Arcam.

LaserCusing® on Concept Laser -yrityksen käyttämä termi heidän jauhepetimenetelmästänsä, joka eroaa perusjauhepetimenetelmästä pääasiassa yrityksen kehittämän laseralgoritmin puolesta. Algoritmi perustuu satunnaisuuteen ja saarekeperiaatteeseen. Yritys mainostaa, että algoritmi mahdollistaa tarkemman kontrollin osien lämpö- ja jännitys muutoksiin.

DMLS, Direct Metal Laser Sintering

DMLS:n ensiaskeleet tapahtuivat jo 1970 luvulla ja vuonna 1984 3DSystems patentoi joitakin prosessin avaintoimintoja. 3DSystemsin lisäksi myös muut yritykset ovat tehneet tutkimusta aiheeseen liittyen, näistä esimerkkinä EOS, Fraunhofer ILT, Fraunhofer IPT, Fockele & Schwarze ja Trumpf. EOS valmisti ensimmäisen kaupallisesti saatavilla olevan DMLS laitteen vuonna 1994.

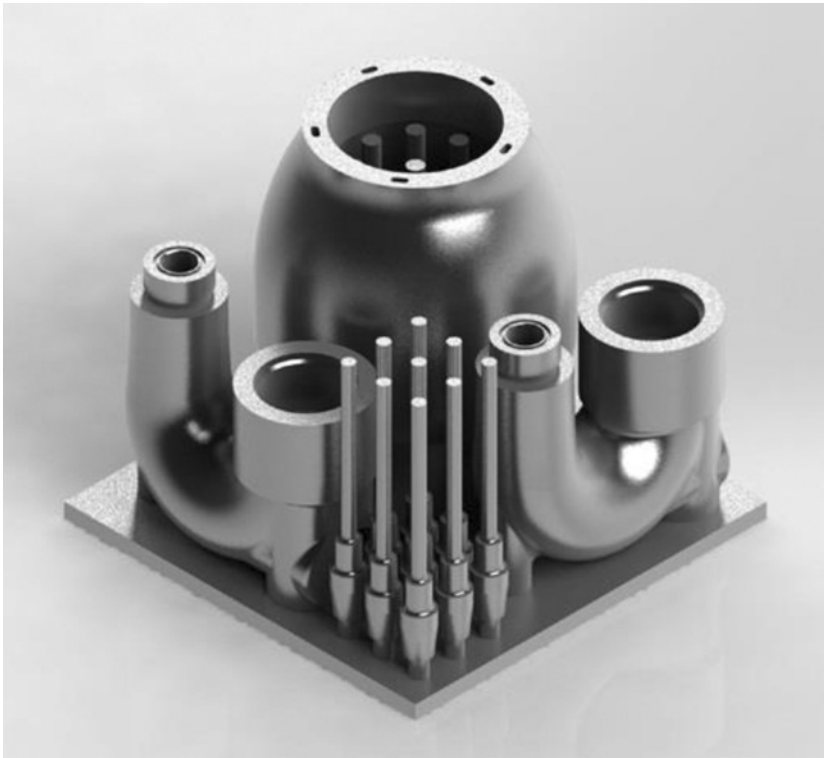
EOS osti kaikki oikeudet lasersintrausta koskeviin patentteihin 3DSystemsiltä ja muilta aiheeseen liittyen tutkimusta tehneiltä yrityksiltä vuonna 1997. Näin EOS sai haltuunsa kaikki metallin jauhepetimene-
telmää koskevat patentit, lukuunottamatta Trumpf:ia, jolla oli patentteja DMLS metallin sulatukseen liittyen. Trumpf käyttää jauhepetimene-
telmästään nimitystä "Laser metal fusion" ja siitä lyhennettä LMF.

DMLS:n voidaan sanoa olevan lähtökohta kaikille metallin jauhepetimene-
telmille, johon kaikki variaatiot perustuvat jollain tavalla. EOS on DMLS -laitteistovalmistajista vanhin ja suurin. DMLS termistä on kuitenkin mainittava, että se voi olla hyvin epäselvä, koska valmistajat käyttävät sitä kuvailemaan sekä sintraavia että sulattavia järjestelmiä.

Periaatteessa prosessia voidaan käyttää millä tahansa metalliseoksella. Yleisimmät DMLS -laitteissa käytettävät materiaalit ovat ruostumaton teräs (17-4, 15-5), maraging-teräs, cobaltti-kromi, inconel 625 & 718 ja titaani (Ti6Al4V).



Kuva 2.12. EOS M280 on viimeisin EOS jauhepetimene-
telmään perustuva tulostin.
(EOS)



Kuva 2.13. Esimerkki kappaleiden sijoittelusta tulostusalustalle.

SLM, Selective Laser Melting

SLM on Fraunhofer instituution kehittämä ja patentoima menetelmä saksassa 1995 ja DMLS menetelmään tehtyyn tutkimukseen perustuen. Vuodesta 2011 lähtien SLM menetelmään perustuvia laitteita on valmistanut ja myynyt SLM Solution GmbH.

Termi ”*Selective Laser Melting (SLM)*” tarkoittaa materiaalin sulatusta kuitulaserilla. Termiä käyttävät SLM Solution GmbH ja joskus myös muut valmistajat kuvaamaan sitä, että laite sulattaa materiaalin täysin. Menetelmä perustuu perinteisen jauhepetimenetelmän prosessiin. 3D-malli siivutetaan 20 - 200 μm 2D-kerroksiksi, jotka ladataan laitteen ohjausohjelmistolle. Ohjelmistoa käytetään laitteen parametrimäärittämiselle sekä kappaleiden tukimateriaalien luomiseen.

Suurimmat myydyt SLM-laitteet nykyään ovat 500x500 mm työalueella ja ne käyttävät 200 - 1000 W kuitulaseria lämmönlähteenään. Yleisimmät materiaalit ovat ruostumaton teräs, työkaluteräs, kobolttikromi, titaani sekä alumiini.



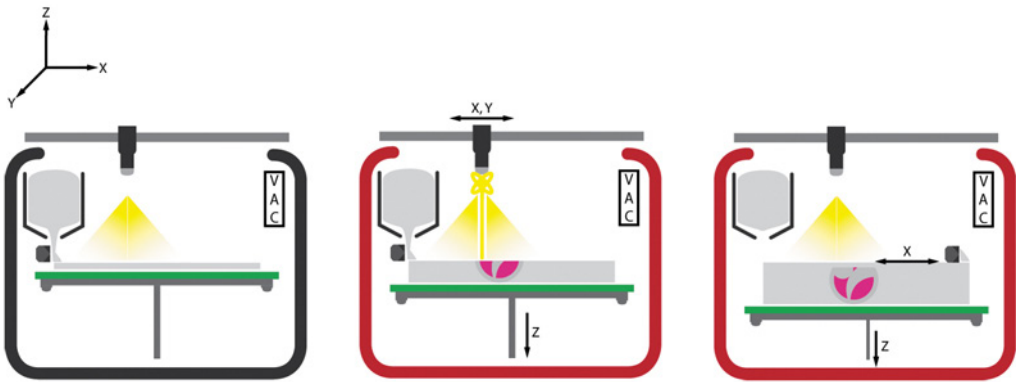
Kuva 2.14. SLM-500, SLM Solutions GmbH:n laite, jossa on laajin tulostusalue. (SLM Solutions GmbH)

DMP, Direct Metal Printing

3DSystems käyttää termiä ”*Direct Metal Printing (DMP)*” yrityksen omista metallitulostimista. Prosessi on periaatteessa DMLS-prosessi, jossa materiaali sulatetaan täysin kiinteiden kappaleiden luomiseksi. 3DSystemsin mukaan laitteiden tarkkuus on noin 20 µm kaikissa kolmessa akselisuunnassa. Suurimmilla DMP-laitteilla työalue on 250x250x300 mm ja yli 15 saatavilla olevaa eri materiaalia.

EBM, Electron Beam Melting

”*Electron Beam Melting (EBM)*” in Ruotsalaisen Arcamin kehittämä prosessi, jossa lämpö tuotetaan elektronisäteellä tyhjiössä, suojakaassussa käytettävän laserin sijasta. Lämpötilat ovat huomattavasti suurempia kuin laseria käyttävissä järjestelmissä.



Kuva 2.15. Electron beam melting prosessikuva.

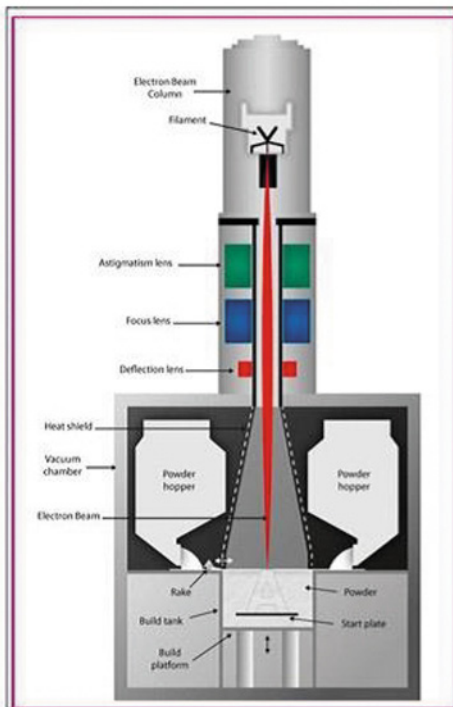
Toinen ero lasersädettä käyttäviin järjestelmiin on että, ennen kappaleen geometrian sulatusta, koko jauhekerros lämmitetään optimilämpötilaan materiaalista riippuen. Esilämmitys takaa sen että lopputuote on kohtuullisen vapaa jäännösjännityksistä ja martensiittisistä mikro-rakenteista.

EBM-tekniikkaan perustuvat laitteet eivät ole yhtä tarkkoja kuin DMLS -laitteet, mutta toisaalta ne ovat huomattavasti nopeampia. EBM -laitteiden tarkkuus on luokkaa 100 - 200 μm .

Titaania tulostettaessa jauhepeti toimii tukirakenteena kappaleelle. Titaani laajenee arviolta yhden prosentin sulattamisen aikana, joka aiheuttaa sen, että jäähtytysvaiheessa kappale irtoaa teräsalustasta itsestään, materiaalien erilaisista lämpölaajenemisista johtuen. Tämä tekee kokonaisprosessista huomattavasti nopeamman, koska kappaleen jälkikäsittely on nopeampi tai sitä ei tarvita ollenkaan.

EBM-prosessi, laitteet sekä käytettävät materiaalit ovat pitkälle suunniteltuja ja räätälöityjä mm. avaruus-, lento- ja lääketeollisuuden tarpeisiin. Indikaattorina EBM-menetelmän laajasta käytöstä terveystieteillä voidaan pitää sitä, että monet Arcamin EBM-laitteella valmistetut implantit ja nivelet ovat saaneet hyväksyntöjä eri maiden terveysturvallisuusviranomaisilta.

Arcam tarjoaa järjestelmiinsä pääasiassa titaani-, koboltti-kromi- ja inconel-materiaaleja, tosin menetelmän periaate ei rajoita käytettäviä materiaaleja näihin. Huomionarvoista on se, että Arcamin tarjoamat materiaalit, varsinkin titaanin osalta ovat halvempia kuin muilla DMLS-menetelmää käyttävillä laitevalmistajilla.

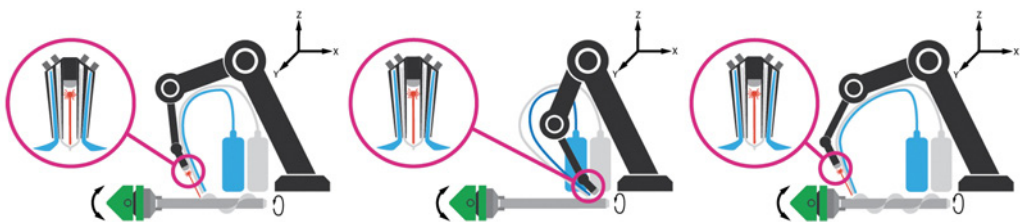


Kuva 2.16. EBM –laitteiden toimintaperiaate ja esimerkki sillä tuotetuista implanteista. (Arcam AB)

Kuvassa 2.16 on esimerkki implanttikupeista, jotka voidaan tulostaa päällekkäin ilman erillisiä tukirakenteita ja osat voidaan irrottaa helposti toisistaan jauheen poiston yhteydessä.

2.7 Suorakerrostusmenetelmä

Suorakerrostusmenetelmä on lisäävän valmistuksen prosessi, jossa kohdistettua lämpöenergiaa käytetään materiaalien yhdistämiseen, sulattamalla materiaalia samanaikaisesti sijoittamisen kanssa. Kohdistettu lämpöenergia tarkoittaa, että energialähde (kuten laser, elektronisäde, tai plasmakaari) on kohdistettu sulattamaan sijoitettavat materiaalit.



Kuva 2.17. Suorakerrostusmenetelmän toimintaperiaate.

Suorakerrostus (DED)-prosessissa käytetään kohdistettua energiaa materiaalin yhdistämiseen sulattamalla, samanaikaisesti kun materiaalia syötetään kohteeseen kerros kerrokselta.

Prosessista on olemassa useita variaatioita: Syötettävä materiaali voi olla jauhetta tai lankaa ja lämpöenergia voidaan tuottaa laser- tai elektronisäteellä tai plasmakaarella. Eri valmistajat käyttävät eri variaatioita, vaikkakin laser lämmöntuottolähteenä ja jauhe materiaalina on yleisin tekniikka. Tulostettujen kappaleiden mikrorakenne on vastaavanlainen kuin sulattavilla jauhepetimenetelmillä ja teoriassa voidaan saavuttaa myös samankaltainen tarkkuus.

Koska DED-prosessissa materiaalia sulatetaan ja syötetään vain kohdealueelle, sillä on luonnollisia rajoituksia osien tyhjän päällä olevissa muodoissa. Jauhepetimenetelmissä jauhe toimii tukirakenteina joidenkin materiaalien osalta, mutta DED-prosesseissa tällainen luonnollinen tukirakenne puuttuu. Monimutkaisten rakenteiden haasteellisuus riippuu käytettävästä DED-prosessista.

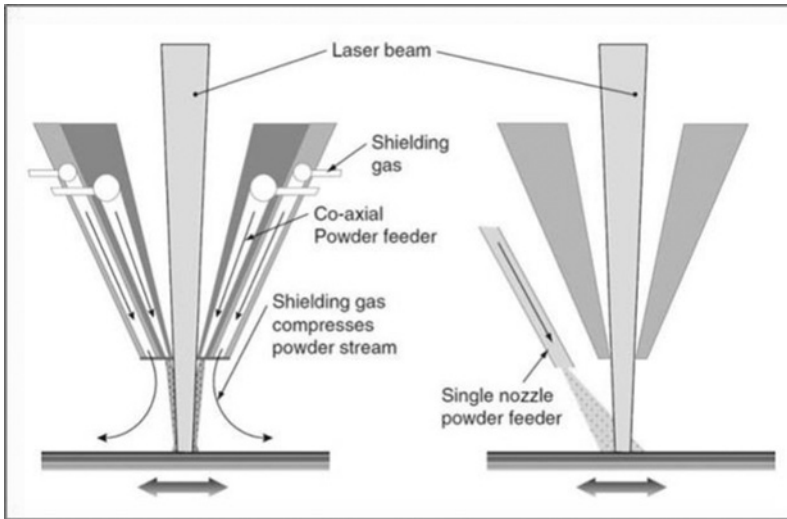
Jauhetta materiaalina käyttävät DED-järjestelmät käyttävät jauheen sijoittamisessa kaasua, mahdollistaen materiaalin lisäämisen myös muille kuin vaakasuorille pinnoille. Teoriassa jauhetta käytettäessä on mahdollista sekoittaa useampaa eri jauhetta keskenään eri suhteissa materiaaliominaisuuksien muuttamiseksi. Tämä mahdollistaisi periaatteessa kappaleen, jolla on melto sisus ja kulutusta kestävä pinta.

Toinen selkeä etu verrattuna jauhepetimenetelmiin on tulostusalue, koska materiaalia sulatetaan ja sijoitetaan vain sinne, missä sitä tarvitaan ja joissakin variaatioissa myös suojakaasu tulee prosessiin suuttimesta, suljettua kammiota ei välttämättä tarvita. Näistä tekijöistä johdettua DED-prosessilla ei ole vastaavia teoreettisia skaalausrajoituksia, kuin joillakin muilla AM-menetelmillä. Jotkut järjestelmät käyttävät DED-prosessia robottikäsiarten yhdistettynä, joka mahdollistaa suurien kappaleiden valmistamisen ja korjaamisen.

Järjestelmiä, joissa käytetään lankaa materiaalina ja plasmakaarta lämmöntuotossa, tuottaa mm. Norsk Titanium.

Lankamateriaalia elektronitykin kanssa käytäviä järjestelmiä valmistaa Sciaky Inc., jolla on myös suuri AM-laite (EBAM) 5,8x1,2x1,2 m ja tulostusnopeus 3 - 9 kg/h.

Joitakin jauhemateriaalia laserin kanssa käyttäviä laitevalmistajia ovat mm.: Optomec, DM3D, BeAM ja DMG Mori Seiki.



Kuva 2.18. Jauhemateriaalia käyttävien DED –järjestelmien toimintaperiaate. (Ek)

LENS, Laser Engineered Net Shaping

LENS on Optomec yrityksen rekisteröimä tuotemerkki kehittämälleen DED-prosessille. Järjestelmän toiminta on samankaltainen muiden jauhemateriaalia ja laseria käyttävien DED-prosessien kanssa.

LENS käyttää korkean intensiteetin laseria (0,5 - 4 kW) tulostuspäässä joka sulattaa ja sijoittaa jauheen kohdepinnalle. LENS-laitteet toimivat hermeettisesti suljetuissa kammioissa ja ne ovat tarkkuudeltaan (50 - 250 μm) lähellä jauhepetimenetelmien tarkkuutta. Tulostusalueen koko vaihtelee 100x100x100 mm:stä 900x1500x900 mm:iin.

Yritys tarjoaa myös mahdollisuutta ostaa järjestelmän osia erillisenä, joka mahdollistaa olemassa olevien CNC-järjestelmien toiminnan liisäämisen, integroimalla niihin LENS-teknologian lisäävä valmistus.

LMD, Laser Metal Deposition

TWI ja Joining technologies yritykset käyttävät DED-menetelmään pohjautuvista järjestelmistään termiä ”*Laser Metal Deposition*” ja sille lyhennettä LMD. LMD on DED-prosessi, joka käyttää jauhemateriaalia ja laseria lämpölähteenään.

Muita laitevalmistajia, jotka käyttävät DED-prosessiin pohjautuvista laitteista LMD-nimitystä, ovat mm. Trumpf ja BeAM. Trumpfin valmistamia ja myymiä LMD-laitteita ovat mm. Trumpf TruLaser Cell 3000 ja 7000. BeAM:in valmistamia ja myymiä LMD-laitteita ovat mm. BeAM Mobile ja ”BeAM Magic 2.0”.

Lisätietoja:

<http://www.trumpf-laser.com/en/products/laser-systems/3d-laser-processing-systems/trulaser-cell-series-7000.html>

<http://www.beam-machines.fr/en/products>

DMD, Direct Metal Deposition

DMD on DM3D-yrityksen rekisteröimä tuotemerkki heidän käyttämästään DED-prosessista, joka käyttää jauhemateriaalia ja lasersädettä lämpölähteenä. Yritys myös korostaa esitteissään järjestelmän mahdollisuutta säätää ja seurata sulapisteen korkeutta ja lämpötilaa.

LC, Laser Cladding

“*Laser Cladding* (LC)” on prosessi, jossa yhtä materiaalia lisätään toisenlaisen materiaalin päälle. Termiä käytetään yleisesti puhekielessä DED-prosessin sijasta, mutta sitä käytetään myös tarkoittamaan kappaleen pinnoitusta/päällystämistä.

DED-prosessit sopivat hyvin pinnoitukseen, koska prosessi voi käsitellä monia eri materiaaleja, eivätkä ne ole sidottuja kiinteisiin tulostusalueisiin. Prosessin muihin hyötyihin kuuluvat tarkka lämmöntuonnin ohjaus kohteeseen, joka nähdään pienempänä lämmölle altistuneena alueena (Heat Affected Zone, HAZ) sekä pienempänä alueena, jolla materiaalit sekoittuvat toisiinsa. Parametrinen järjestelmä mahdollistaa säädettävän kerrokorkeuden.

Hyviä kohteita LC-prosessille ovat laakerit, tiivistepinnat ja akselien liitospinnat, joiden ei tyypillisesti katsota olevan korjattavissa perinteisillä hitsausmenetelmillä.

RPM Innovations on yksi DED-menetelmiin keskittyneistä yrityksistä, joka käyttää menetelmää vapaamuotoisten kappaleiden tulostuksessa sekä metalliosien uudelleenpinnoituksessa ja korjaamisessa LC-tekniologialla. RPM Innovations on onnistuneesti korjannut LC-tekniologial-

la erilaisia materiaaleja kuten 4340, 4130 ja PH-tason ruostumattomia teräksiä. Korjatut osat ovat olleet suurnopeuksisia (12 800 kierrosta/min), korkean tehon- (3 500 hp) ja korkean tarkkuuden (toleranssi 0,0127 mm) akseleita. Korjaushinta esimerkkinä olleessa yksittäistapauksessa oli noin 65 % vähemmän kuin uudella akselilla ja korjauksessa käytettyjen materiaalien johdosta (4340 teräs pinnoitettu 420 SS) myös akselin elinikäodotus oli parempi kuin uudella alkuperäisosalla.

Lisätietoja:

<http://www.rpm-innovations.com/>

EBF, Electron beam freeform fabrication

EBF on NASAn patentoima tekniikka monimutkaisten ”*Near Net Shape* (NNS)”-muotojen luomiseen. Tekniikka käyttää huomattavasti vähemmän materiaalia ja vaatii suhteellisen vähän koneistusta perinteisiin valmistusmenetelmiin nähden. EBF:ssä metallilankaa sulatetaan elektronisäteellä palko kerrallaan, kerros kerrokselta kappaleen muodostamiseksi.

Lisätietoja:

<http://3dprint.com/66185/wire-feed-additive-manufacture/>

http://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/electron_beam.html

EBAM, Electron beam additive manufacturing

Sciaky Inc. käyttää suorakerrostusmenetelmästäan lyhennettä EBAM. Yhtiön mukaan EBAM on maailman nopein metallin 3D-tulostusprosessi 3 - 9 kg/h tulostusnopeudella. EBAM käyttää kaksoislangansyöttöjärjestelmää ja elektronisädettä tyhjiökammiossa. Kahden langan syöttö mahdollistaa kahden eri metalliseoksen yhdistämisen samassa sulatilassa, jolloin myös lopullisen metalliseoksen koostumusta voidaan muuttaa tulostuksen aikana. Toisaalta voidaan käyttää myös kahden eri langanpaksuutta, joka mahdollistaa ohuen langan käytön kun tarvitaan tarkempaa tulostusta ja paksunnan langan käytön, kun tarvitaan nopeaa materiaalin syöttöä.

EBAM järjestelmä sijoittaa metallia kerros kerrokselta, kunnes kappale saavuttaa lähes mittatarkan muotonsa (NNS). Lisäävän valmistuksen jälkeen kappale käy vielä läpi lämpökäsittelyn ja koneistusvaiheet. Prosessia rajoittaa vain sitä ympäröivän tyhjiökammion koko, ja sitä

voidaan käyttää useassa vaiheessa tuotteen elinkaarta: prototyyppi- ja tuotantokappaleiden valmistuksessa, kappaleiden korjaamisessa sekä uudelleenvalmistuksessa.

Lisätietoja:

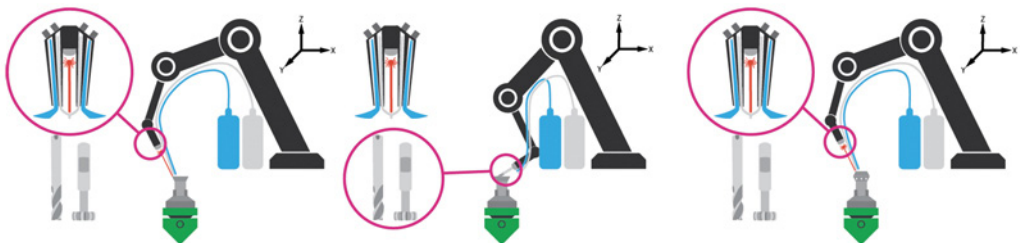
<http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>



Kuva 2.19. Sciaky Inc EBAM järjestelmä, <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology>

2.8 Hybridimenetelmät

Hybridimenetelmillä tarkoitetaan menetelmiä, joissa yhdistetään yhtä tai useampaa eri valmistusmenetelmää niin lisäävän valmistuksen kuin jälkikäsittelymenetelmienkin osalta.



Kuva 2.20. Suorakerrostus –hybridi menetelmän toimintaperiaate.

Tällä hetkellä yleisimmät myynnissä olevat hybridijärjestelmät metallin valmistuksen osalta ovat laitteita, joissa on yhdistetty jokin lisäävän valmistuksen menetelmä (esim. jauhepetimenetelmä) ja CNC-koneistuskeskus.

Hybridimenetelmät ovat kahden tai useamman lisäävän ja/tai poistavan valmistusmenetelmän yhdistelmiä. Ne voivat sisältää koneistusta, pintakäsittelyä sekä muita jälkikäsittelyksi normaalisti miellettyjä prosesseja. Yleisesti hybridiprosessi koostuu yhdestä AM-menetelmästä ja CNC-koneistuskeskuksesta. Idea hybridiprosessien takana on yhdistää parhaita ominaisuuksia eri menetelmistä, kuten pienempi materiaalinkulutus, mahdollisuus valmistaa monimutkaisempia osia, paras mahdollinen pinnanlaatu sekä tarkkuus. Lisäksi hybridiprosessit mahdollistavat yhdistettyjen prosessivaiheiden käyttämisen prosessin kannalta parhaaseen aikaan.

Jos vertaillaan hybridiprosessin ja dedikoidun lisäävän valmistuksen prosessin nopeuksia, tulee ottaa huomioon hybridiprosessin suorittamat muut työvaiheet, jotka ovat yleensä jälkikäsittelyvaiheita dedikoiduille prosesseille. Jälkikäsittelyt voivat helposti viedä enemmän aikaa kuin koko lisäävän valmistuksen prosessi ja joitakin työvaiheita (esim. koneistus) ei välttämättä voida aina suorittaa jälkikäsittelynä. Kappaleiden sisäänsä sulkemat tai hankalasti käsiksi päästävät muodot ja rakenteet voivat olla alueita, jotka voidaan koneistaa vain prosessin aikana.

Hybridiprosesseilla on myös omat rajoituksensa, esimerkiksi kappaleen sisään suljettavia alueita ei voida koneistaa jokaiselta pinnalta. Jos valmistettava kappale ei tarvitse koneistusta tai muuta jälkikäsittelyä, tai kappaleen muodosta/rakenteesta johtuen jälkikäsittely on helppoa valmistuksen jälkeen, dedikoitu lisäävän valmistuksen järjestelmä on todennäköisesti hybridijärjestelmää nopeampi.

Alla on listattu muutamia eri menetelmiin perustuvia hybridijärjestelmien toimittajia:

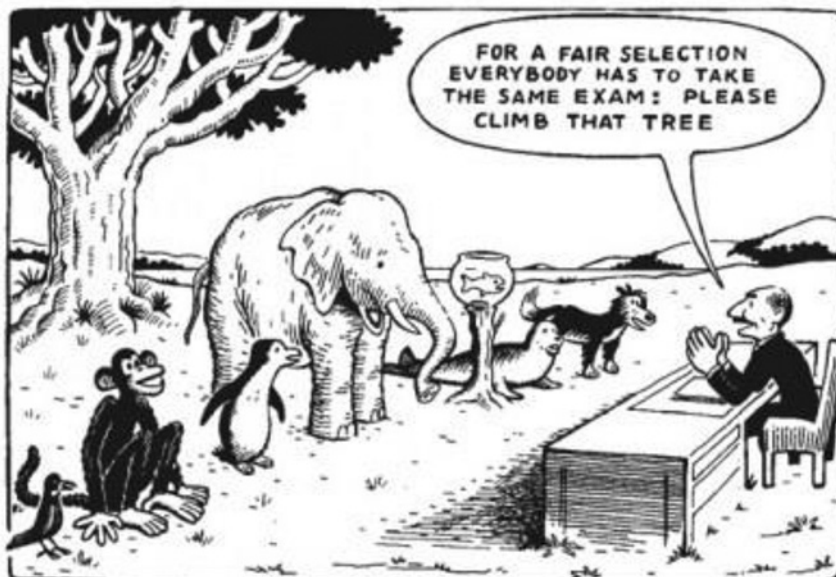
- Matsuura, Lumex Avance 25, <http://www.matsuura.co.jp/english/contents/products/lumex.html>
- DMG Mori Seiki, Lasertech 65, <http://en.dmgmori.com/products/lasertec/lasertec-shape/lasertec-65-shape>
- Mazak, INTEGREGX i-400AM, <https://www.mazakusa.com/machines/integrex-i-400am/>
- Hermle, MPA 40, http://www.hermlemachine.com/cms/en/products/product_overview/additive_manufacturing/
- Hybrid Manufacturing Technologies, AMBIT-työkalu, <http://www.hybridmanutech.com/technology.html>
- Fabrisonic LLC, SonicLayer 4000/7000, http://fabrisonic.com/Sodick,OPM250L,http://www.sodick.jp/product/tool/metal_3d_printer/index.html
- Flexible Robotic Environment (FRE), VDK 6000, <http://www.fresystems.com/product-vdk6000.cfm>
- SolidScape, , <http://www.solid-scape.com/products/3d-printers/>

3 PROSESSIEN VERTAILU

Johtuen prosessien erilaisuudesta niiden vertaaminen on hankalaa. Yksityiskohtainen ja tarkka vertaaminen ei ole myöskään kovin tehokasta, koska se edellyttäisi koko prosessin läpikäyntiä huomioiden mm. prosessointiajan, automaatioasteen, esi- ja jälkikäsittelyt ja kaikki nämä huomioiden niihin vaikuttavien parametrien arvot, jotka ovat usein vielä riippuvaisia prosessoitavista kappaleista.

Osan prosessointiaika on hyvä esimerkki siitä, miksi eri prosessien vertaaminen on hankalaa. Laitevalmistajat usein tarjoavat tietoa esimerkiksi lineaariakseleiden nopeuksista xyz-suuntaan, tulostuspään liikkeestä, pyyhkäisyajasta, tilavuusnopeudesta ja esimerkkikappaleista. Vaikka kaikki edellä mainitut arvot olisivat hyviä mittareita joissakin tapauksissa, niitä ei kuitenkaan voi käyttää hyväksi eri järjestelmien vertailuissa. Ja vaikka nopeuksia voisikin normalisoida esimerkiksi tulostustilavuusnopeuden osalta, arvoja voi käyttää vain suuntaa antavina, koska joka tapauksessa jouduttaisiin jättämään tärkeitä parametreja huomioimatta.

Tulostusnopeuteen vaikuttavia parametreja ovat esimerkiksi kerrospaksuus, materiaali, kappaleen muoto, tulostussuunta, pinnanlaatu, tukirakenteet, esi- ja jälkikäsittelyt sekä lämpökäsittelyt jne.



Kuva 3.1. Sama ongelma, kuin eri AM-prosessien vertailussa. Lähde: tuntematon.

Parempi tapa vertailuun on valita ensin soveltuva AM-prosessi hyödyntäen esimerkiksi tulostettavalle osalle asetettavia vaatimuksia ja sen jälkeen vertailla järjestelmätoimittajia, jotka tarjoavat ko. menetelmän laitteita tai palveluita. Tällä tavalla vertailu muodostuu helpommaksi ja eri vaihtoehtojen erot tulevat selkeämmin esiin. Yleissääntönä voidaan todeta, että AM-prosessin valinta on paljolti kiinni kappaleen materiaalista, koosta ja muodosta, jotka usein jo valmiiksi rajoittavat mahdollisten prosessien joukkoa muutamaaan.

Taulukossa 3.1. on esitetty muutamia yleisiä ominaisuuksia ja esimerkkisovelluksia yleisimmillä AM prosesseilla. On hyvä huomata, että jälkikäsitteilytarpeilla saattaa olla merkittävä vaikutus joihinkin ominaisuuksiin.

Taulukko 3.1. AM-prosessien vertailu yleisellä tasolla.

Prosessi	Yksityiskohdat	Edut	Haitat	Esimerkkikohteet
Materiaalin pursotus	Kerrospaksuus: > 0,08 mm Pinnanlaatu: hyvin karkea erityisesti tulostusnopeuden kasvaessa Materiaalit: kestopuovit, betoni, lasi, keramiikka, jne.	Nopea menetelmä yksittäisten tai pienten sarjojen ja prototyyppien tulostamiseen karkealla pinnanlaadulla.	Hidas tarkemman pinnanlaadun tai pienen kerrospaksuuden kyseessä ollen. Nopeilla tulostuksilla pinnan laatu jää karkeaksi.	Elektroniikkakotelot, kiinnittimet, kustomoidut kullattajatuotteet, sähköauton kori (BAAM)
Materiaalin ruiskutus	Kerrospaksuus: 0.016-0.032 mm Pinnanlaatu: sileä Tulostusnopeus: nopea Materiaalit: UV-kestävä muovi-harts, vaha	Hienot yksityiskohdat Korkea tarkkuus Mahdollisuus käyttää useita materiaaleja samaan aikaan	Materiaalin kestävyys huono Mahdollisesti herkä auringonvalolle ja kuumuudelle	Lääketieteelliset laitteet Monimutkaiset ja useasta materiaalista koostuvat prototyypit ja kohteet Kokoonpanot
Sidosaineruiskutus	Kerrospaksuus: 0.089-0.12 mm Pinnanlaatu: karkea	Mahdollisuus yhdistää useita värejä Nopea tulostus	Huokoiset kappaleet ovat heikkoja Karkea pinnanlaatu	Sopii erinomaisesti monimutkaisille kappaleille ja prototyypeille, joissa värit ovat tärkeitä.

Taulukko 3.1. AM-prosessien vertailu yleisellä tasolla. (jatkuu)

Prosessi	Yksityiskohdat	Edut	Haitat	Esimerkkikohteet
Sidosaine-ruiskutus	Tulostusnopeus: erittäin nopea Materiaalit: Mikä tahansa pulveri	Tulostetut kappaleet ovat kestäviä	Edellyttää jälkikä-sittelyä	
Laminointi	Kerrospaksuus riippuu käyte-tystä materi-aalista, joitakin rajoitteita riip-puen leikkaus ja liimausmenetel-mästä Materiaalit: Mel-kein mikä tahan-sa liuskamainen materiaali käy, yleisin on A4 -paperi.	Monivärisyy-s, nopeus, kustan-nustehokkuus, helppo materi-aalin käsittely Mahdollisuus yhdistellä eri materiaaleja Leikkausnopeus on suuri johtuen siitä, että vain ulkoreuna on leikattava	Saattaa vaatia jälkikä-sittelyitä Joissakin tapauk-sissa rajoitettu materiaalivalkoi-ma	Elektroniikka (sen-sorit koteloinnit, jne.), kutistumatto-mat osat
Nesteen fotopoly-merisointi	Kerrospaksuus: 0.06-0.15 mm Pinnanlaatu: sileä Tulostusnopeus: keskinkertainen Materiaalit: UV kovettuvat muovit	Hienot yksityis-kohdat Hyvä pinnan-laatu	Kappaleiden lujuus huono Auringonvalon ja lämmönkesto huono	Erinomainen muo-don ja sovitteiden testauksessa ja esittelyissä. Lääketieteen/ ham-slääketieteen tuotteet, elektro-niikkakotelot, taide
Jauhepeti-menetelmät	Kerrospaksuus: 0.06-0.15 mm Pinnanlaatu: karkea Tulostusnopeus: nopea Materiaalit: Pulverimaiset	Voidaan toteut-taa vahvoja ja monimutkaisia kappaleita Osia voidaan tulostaa pääl-lekkäin, koska jauhe tukee tulostettavaa rakennetta	Rosoinen pinnan-laatu Joissain tapauk-sissa rakenne on huokoinen Koko on rajoitettu	Ideaalinen tulostet-taessa kestäviä, ja toimivia kappaleita moneen tarkoituk-seen Mahdollisuus tu-lostaa napsautus-liitoksia ja liikkuvia niveliä
Suorakerros-tusmenetel-mä	Kerrospaksuus: 0,89–0,5 mm	Monimutkaiset muodot suurella geometrisella tarkkuudella	Pinnanlaatu voi vaihdella riippuen materiaalista	Olemassa olevien kappaleiden pinnoit-taminen ja korjaus

Taulukko 3.1. AM-prosessien vertailu yleisellä tasolla. (jatkuu)

Prosessi	Yksityiskohdat	Edut	Haitat	Esimerkkikohteet
Suorakerros- tusmenetelmä	Pinnanlaatu: karkea Tulostusnopeus: nopea Materiaalit: Metallipulverit, lanka	Monimateriaali- mahdollisuus Johdonmukai- set mekaaniset ominaisuudet, mikrorakenne ja metallikemia	Saattaa edellyttää jälkikäsittelyä	Uusien muotojen tulostaminen olemassa oleville kappaleille/aihi- oille
Hybridi- menetelmä	Pinnanlaatu: mitä tahansa karkeasta kiillo- tettuun Tulostusnopeus mitä tahansa hi- taasta nopeaan riippuen lisäpro- sesseista	Tarkat ja moni- mutkaiset osat Joissain tapa- uksissa ainoa menetelmä, jolla voi tuottaa esimerkiksi kap- paleita, joiden sisäisiä pintoja on koneistet- tava.	Voi olla perintei- siä menetelmiä hitaampi	Mitä tahansa riippuen proses- sista.
Kylmä- ruiskutus		Materiaalien yhdistäminen alle sulamisläm- pötilassa		Olemassa olevien kappaleiden pin- noittaminen ja korjaus Uusien muotojen tulostaminen olemassa oleville kappaleille/aihi- oille

Kun saman menetelmän eri valmistajia vertaillaan, on tärkeää ottaa huomioon ainakin seuraavat muuttujat: tulostuskammion koko, prosessointinopeus, esi- ja jälkikäsittelyjärjestelmät sekä laitteiden lämmitys ja jäähdytysajat. Ongelma sopivan AM-järjestelmän valitsemiseksi on ollut olemassa jo vuosia, ja siihen on yritetty keksiä sopivaa ratkaisua kuitenkin kovin hyvin onnistumatta.

Viimeisin ehdotus ongelman ratkaisemiseksi erityisesti metallin tulostamista jauhepetimenetelmällä on “*SLM Benchmarking Tool*”, jota on kehittänyt Fraunhofer Institute. Työkalu on edelleen kehitteillä, Fraunhofer julkaisee sen kaupallisena palveluna tai tieteellisenä julkaisuna 2016 aikana. Kyseessä on kustannusten laskentaan ja laitteiden arviointiin tarkoitettu työkalu. [24]

Lisätietoa laitteistojen ja valmistusmenetelmien vertailusta:

- <http://www.3dsystems.com/files/3d-printing-process-comparison-chart-quickparts.pdf>

- <http://www.3dsystems.com/quickparts/prototyping-pre-production/process-comparison>

- <http://www.sculpteo.com/en/3d-printing/>

- Stratasys: “The Truth About Speed”:

http://www.stratasys.com/resources/~/_media/5CA5D33C45C148F48C813DB2137EEC3C.pdf

- <http://www.tctmagazine.com/blogs/grimmblog/the-real-benefits-of-additive-manufacturing/>

4 AM-OSIEN JÄLKIKÄSITTELY

AM-jälkikäsitteilyistä tyypillisimpiä ovat tulostetun kappaleen irrottaminen tulostusalustasta, tukirakenteiden poisto, huokoisten kappaleiden täyttö toisella materiaalilla ja erilaiset lämpökäsittelyt. Useimmat AM-menetelmät eivät kykene tulostamaan kappaleita, joilla on kaikilta osin riittävän sileä pinnanlaatu tai toleranssivaatimuksia omaavia pintoja, jolloin kappaleet on vielä tulostuksen jälkeen käsiteltävä jollain ainetta poistavalla menetelmällä (*subtractive manufacturing*, SM) kuten esimerkiksi jyrsinnällä, porauksella, hionnalla tai kiillotuksella.

Yksi AM-prosessien kehityspoluista onkin juuri jälkikäsitteilyvaatimusten poistaminen. Jotkin menetelmistä jo itsessään eliminoivat jälkikäsitteilytarpeita esimerkiksi tilanteessa, jossa pulverimateriaali (esimerkiksi muovi tai titaani) tukee kappaletta tulostuksen aikana, jolloin tukirakenteita ei tarvita. Jotkin menetelmät käyttävät korkean lämpötilan ympäristöä tulostuksen aikana, jolloin vältytään esimerkiksi jäännösjännitysten poistoon tarkoitetuilta lämpökäsittelyillä. Jotkin AM-järjestelmät yhdistävät perinteisen CNC-työstön AM-prosessiin, jolloin tulostettava kappale voidaan koneistaa jo tulostusprosessin aikana.

Tällä hetkellä suurin osa sekä AM-, että SM-menetelmillä hyödynnettävistä materiaaleista ovat samoja, mutta tämä voi muuttua tulevaisuudessa, kun AM mahdollistaa useamman materiaalin sekoittamisen tulostusvaiheessa. Tämä saattaa johtaa siihen, että kappaleet tulevat hyvin koviksi ja jossain tapauksissa jopa mahdottomiksi koneistaa.

4.1 AM-jälkikäsitteilyt

Materiaalin pursotusmenetelmässä kappale **irrotetaan** tulostusalustasta esimerkiksi lastan avulla. Jos tulostuksessa on hyödynnetty Kapton teippiä tulostusalustan päällä, on kappale irrotettava varovasti, jotta teippi ei vahingoitu. Yleensä riittävän tartunnan löytäminen on suurempi haaste kuin kappaleen irrottaminen.

Kun käytetään jauhepetimenetelmää muovimateriaalin yhteydessä, jauhe sinänsä tukee tulostetta eikä erillisiä tukirakenteita tarvita. Tällöin myöskään tulostettavan kappaleen ei tarvitse olla kosketuksissa tulostusalustaan.

Metallijauheet puolestaan eivät tue kappaletta tulostuksen aikana, joten kappaleet on aloitettava suoraan alustan päältä. Näin ollen kappale sulautuu kiinni alustaan ja se on leikattava siitä irti tulostuksen jälkeen. Poikkeuksena on titaanijauhe, jonka tukemisominaisuus on joidenkin prosessien yhteydessä muita metalleja paremmat.

Sidosainemenetelmissä osa kasvatetaan jauheen sisään, jolloin se on koko prosessin ajan täysin tuettu, eikä sen tarvitse olla kontaktissa tulostusalustaan.

Useimmat AM-menetelmistä eivät kykene tulostamaan suuria negatiivisia pintoja ilman tukirakenteita, jolloin ne on tulostuksen jälkeen poistettava ennen kuin kappaletta voidaan ryhtyä käsittelemään muuten. Jos metalliosia on tarkoitus työstää tulostuksen jälkeen, **tukirakenteiden poisto** voi olla helpompaa työstön jälkeen.

Jauhepetimenetelmässä käyttämätön jauhe on poistettava kappaleesta ja sen ympäristöstä. Yleensä tämä tapahtuu paineilman avulla. Ylijäänyt jauhe voidaan useissa tapauksissa käyttää uudelleen. Joskus kappale on tässä vaiheessa vielä hauras ja kovetetaan lämpökäsittelyn avulla jauheen poiston jälkeen.

<http://www.prometal.com/en/materialization/what-is-digital-part-materialization/metal>

Imeyttäminen (*infiltration* tai *infusion*) on prosessi, jossa huokoiseen osaan imeytetään toista materiaalia. Tarkoituksena on kiinteyttää huokoinen materiaali. Jotkin AM-menetelmät käyttävät liimamaista ainetta tulostuksen ensimmäisen vaiheen aikana kappaleen muodon aikaansaamiseksi jauheesta. Myöhemmissä vaiheissa liima poistetaan ja tilalle tuodaan kestävämpi materiaali, jolloin kappale saavuttaa lopullisen lujuutensa.

Huokoisten AM-metallikappaleiden yhteydessä imeyttäminen voidaan tehdä toisella metallilla korkeassa lämpötilassa. Esimerkiksi ExOne käyttää ensin liimaa kiinnittämään ruostumatonta terästä olevan metallijauheen kappaleen muotoiseksi, jonka jälkeen ylimääräinen jauhe poistetaan ja kappale laitetaan n. 1100 asteen lämpötilaan, jossa liima palaa pois ja korvautuu pronssilla. Lopputuloksena on kappale, jossa on 60 % ruostumatonta terästä ja 40 % pronssia.

Lisätietoja:

http://www.exone.com/Portals/0/ResourceCenter/Materials/X1_MaterialData_420SS.pdf

<http://www.prometal.com/en/materialization/what-is-digital-part-materialization/metal>

Monet metallin AM-prosesseista muistuttavat hitsausta siinä mielessä, että kappaleet tehdään sijoittamalla “hitsejä” vieri viereen muodostamaan tulostuskerros. Tätä jatketaan kerros kerrokselta. Siinä mielessä useimpien AM-metallikappaleiden **hitaamisessa** ei pitäisi olla suuria ongelmia. Kuitenkin hitsauskokoontalon muodostaminen AM-kappaleista edellyttää tarkkaavaisuutta. AM-materiaalit on tarkoitettu lisäävää valmistusta varten ja niiden hitsattavuus ei välttämättä ole aina taattua kaikilla hitsausmenetelmillä. Erityisesti jos on tarkoitus hitsata kappaleita, jotka ovat eri materiaalia tai koostuvat usean materiaalin yhdistelmästä.

AM-materiaalien valmistajat tarjoavat usein tietoa myös niiden hitsattavuudesta ja koneistettavuudesta samoin kuin mekaanisista ominaisuuksista. Tämän julkaisun materiaaleja käsittelevässä luvussa on esitetty joidenkin AM-materiaalien osalta juuri mainittuja ominaisuuksia.

Kun käytetään AM-menetelmää, jossa kerrokset muodostetaan lämpöä hyväksi käyttäen, tulostettava kappale käy prosessin aikana läpi useita **lämpökäsittelyitä**. Näiden useiden ja paikallisten lämpökäsittelyiden aikana kappaleen materiaaliominaisuudet tulevat myös muokatuksi paikallisesti. Viimeinen tulostuskerros selviää pienimmillä lämpökäsittelyillä, mikä saattaa jättää siihen erilaiset ominaisuudet kuin muihin kappaleen osiin.

Parhaassa tapauksessa kappaleeseen saadaan tulostuksen aikaisilla lämpökäsittelyillä syntymään juuri haluttuja ominaisuuksia (esimerkiksi paikallista lujittumista). Toisaalta hallitsemattomat lämpökäsittelyt tulostuksen aikana voivat jättää kappaleeseen jäännösjännityksiä, jotka pahimmillaan voivat johtaa sen murtumiseen.

Pehmeäksi hehkus (*annealing*) on lämpökäsittely, joka muovaa kappaleen fyysisiä (ja joskus myös kemiallisia) ominaisuuksia siten, että sen kestävyys paranee ja kovuus vähenee, jolloin se on paremmin jatkotyöstettävissä. Se tarkoittaa kappaleen kuumentamista materiaalin rekristallisaatiolämpötilan yläpuolelle määrättyksi ajaksi ja jäähdyttä-

mällä sen jälkeen hitaasti huoneen lämpötilaan. Hehkutuksen aikana kappaleesta poistuvat usein myös jäännösjännitykset.

Pehmeäksi hehkutus sopii myös kestopuoveille. Kun muovi jäähtyy, siihen voi syntyä muodonmuutoksia, jotka edelleen aiheuttavat jäännösjännityksiä. Hehkuttamalla näistä voidaan päästä eroon. Hehkutuksen aikana kappale on kuitenkin syytä pakottaa pysymään alkuperäisessä muodossaan.

Jotkut AM-menetelmät käyttävät lämmitettyä tulostuskammiota, jotta jäännösjännitykset saataisiin minimoitua.

<http://www.prometal.com/en/materialization/what-is-digital-part-materialization/metal>

Samaan tapaan kuin muutkin kappaleet, myös AM-kappaleet voidaan **karkaista**. Karkaistuihin kappaleisiin sovelletaan usein myös lämpökäsittelyä, joka kulkee nimellä **päästö**. Sen tarkoituksena on pienentää kappaleen kovuutta ja lisätä sen sitkeyttä.

4.2 Mekaaninen jälkikäsittely

Useimmat AM-menetelmät eivät kykene tuottamaan pinnanlaadultaan tai tarkkuudeltaan riittävät vaatimukset täyttäviä kappaleita. Tässä suhteessa niitä voi verrata valuihin. Toleranssipinnat ja vastaavat pinnat on toteutettava AM-prosessin jälkeen SM-menetelmillä. Pääasiassa tällaisissa jälkikäsittelyissä voidaan hyödyntää perinteisiä SM-menetelmiä. Käytetyn materiaalin ominaisuudet, sekä mahdollisten lämpöym. käsittelyjen siihen tekemät muutokset tulisi huomioida. Monen AM-menetelmän yhteydessä puhutaan myös useamman materiaalin yhdistämismahdollisuudesta, jolla voi olla vaikutusta myös käytettävään SM-menetelmiin. AM mahdollistaa myös kappaleisiin sisäisiä rakenteita, jotka on otettava huomioon SM-menetelmiä käytettäessä.

Yksi mielenkiintoisista jälkikäsittelyistä on elektrolyyttinen kiillotus. Se on kemiallinen pinnan viimeistelytekniikka, jossa materiaalia poistetaan pinnasta ioni ionilta. Tavoitteena on tasoittaa pinnan mikrokooppisen pienet epätasaisuudet. Kiillotusprosessi paljastaa virheettömän ja metallurgisesti puhtaan pinnan. Elektrolyyttinen kiillotus ei vaikuta käsiteltävään kappaleeseen mekaanisesti, termisesti tai kemiallisesti ja se sopii lähes kaikenkokoisille ja -muotoisille kappaleille.

4.3 Pinnoitus

Pinnoituksella tarkoitetaan materiaalikerroksen lisäämistä kappaleen pinnalle. Käytännössä materiaalikerroksella voidaan tarkoittaa mitä tahansa materiaalia (maali, liima, kultaus). Joskus kappale joudutaan pinnoittamaan, koska sen pinta on kulunut tai pinnan ominaisuuksia (korroosiokestävyys, kulutuskestävyys tai kemikaalien sieto) halutaan muuten parantaa.

On myös huomattava, että AM-menetelmillä toteutetut kappaleet voivat olla hyvin huokoisia, jolloin pinnoituksella voidaan parantaa niiden käyttöominaisuuksia.

4.4 Isostaattinen puristus (HIP, CIP)

Isostaattinen puristus jakautuu kahteen tyyppiin, kuuma- ja kylmäpuristukseen. Kuumapuristusta (*Hot Isostatic Pressing*, HIP, “*Hipping*”) käytetään jauhemetallurgisten, valettujen ja sintrattujen kappaleiden tiivistämiseen kammiossa, jossa on kaasuatmosfääri, korkea paine (100 - 200 MPa) ja korkea lämpötila (900 - 1250 °C). Kaasupaine vaikuttaa kappaleeseen joka puolelta ja tihentää sen 100 %.

Lisätietoja:

<http://www.epma.com/hot-isostatic-pressing>

<http://www.bodycote.com/en/services/hot-isostatic-pressing.aspx>

Kylmäpuristuksessa (Cold Isostatic Pressing, CIP) kappale asetetaan joustavan muotin sisään ja sen jälkeen kohdistetaan siihen hydrostaattinen paine ilman lämpötilan muutosta.

Lisätietoja:

http://www.asminternational.org/web/ims/news/amp/-/journal_content/56/10192/ASMHBA0001539/BOOK-ARTICLE

http://www.mpif.org/ncrf_11/100813_cold_isostatic_pressing.pdf

<http://hubpages.com/technology/>

5 MATERIAALIT JA NIIDEN OMINAISUUDET

Lisäävässä valmistuksessa käytettävillä materiaaleilla voi olla erilaisia ominaisuusarvoja valmistajakohtaisesti vaikka niitä myydään samoilla nimityksillä. Eri materiaaleja ominaisuusarvoineen löytyy useasta lähteestä. Seuraavassa listassa on mainittu joitakin niistä.

- MATBASE, ilmainen ja riippumaton online materiaaliportaali: <http://www.matbase.com/>
- MatWeb's searchable database of material properties sisältää materiaalikortit thermoplastiic ja thermoset polymeereistä, metalleista, keramiikasta, puolijohteista, kuiduista ja muista teknisistä materiaaleista: <http://www.matweb.com/>
- CAMPUS, tietoa muovien ominaisuuksista: <http://www.campusplastics.com/>
- Prospector, tietoa muovien, metallien ja muiden materiaalien ominaisuuksista: <http://www2.ulprospector.com/>
- SpecialChem, materiaali- ja kemiallisia ominaisuuksia muoveista, elastomeereistä, pinnoitteista ja bio-kemikaaleista ja -materiaaleista: <http://www.specialchem.com/>

5.1 Muovit

Muovit ovat ryhmä polymeerimateriaaleja, joko synteettisiä tai luonnollisia, joita voidaan muovata pehmeässä muodossaan ja kovettaa haluttuun muotoon. Polymeeri on aine, joka koostuu useista toistuvista osista. Polymeeri sana on lähtöisin kahdesta kreikkalaisesta sanasta: *poly*, tarkoittaen monta ja *meros*, tarkoittaen kappaleita tai yksiköitä.

Polymeerit ovat hyvin suuria molekyyliä, joilla on pitkiä hiiliatomi-ketjuja. Polymeerit koostuvat pienemmistä yksiköistä, joita kutsutaan monomeereiksi. Monet monomeerit ovat pieniä saturoitumattomia molekyyliä, jotka on tuotettu raaka-öljyn osista. Nämä monomeerit koostuvat hiili-hiili kaksois-kovalenttisistä sidoksista. Polymerisaatio on prosessi, jossa polymeeri luodaan yhdistämällä monomeeriyksiköitä. Esimerkiksi polystyreeni (PS) on polymeeri joka koostuu styreeni-monomeereistä.

Kun kaksi tai useampi erilainen monomeeri yhdistyy toisiinsa polymerisaatiossa, yhdistelmää kutsutaan kopolymeeriksi ja sen prosessia kopolymeerisaatioksi. Esimerkiksi akryylinitriili-butadieeni-styreeni (ABS) ja iskunkestävä polystyreeni (HIPS) ovat kopolymeerejä.

Polymeereillä on ääretön määrä erityispiirteitä sekä ominaisuuksia, jotka sallivat polymeerien värjäyksen eri väreillä. Polymeerien ominaisuuksia voidaan myös parannella useilla eri lisäaineilla. Se että polymeerejä voidaan suunnitella ja toteuttaa määrättyihin käyttökohteisiin tekee muoveista uniikin verrattuna muihin materiaaleihin. Muovien raakamateriaaleja kutsutaan resiineiksi ja hartseiksi. Vaikka jokaisella polymeerillä on uniikkeja erityispiirteitä, suurimmalla osalla polymeereistä on myös joitakin yleispiirteitä.

- Ne kestävät kemikaaleja
- Ne ovat lämmön ja sähkön eristeitä
- Ne ovat kevyitä ja niillä on vaihtelevia lujuusasteita
- Niitä voidaan prosessoida useilla eri tavoilla kuiduksi, levyksi, vaahdoksi, tai valukappaleiksi.

Tämä dokumentti käsittelee pääasiassa termoplastisia muoveja, vaikka myös muita, kuten UV-kovettuvia muovihartseja käytetään esimerkiksi lisäävän valmistuksen nesteen fotopolymerisointi -menetelmässä. Kertamuovien (*thermoset*), kutsutaan suomeksi joskus myös termoplastiksi ja kestumuovien (*thermoplastic*) eli termoplastisten muovien ero on siinä, että kestumuoveja voidaan muokata lämpötilan avulla yhä uudelleen, kun taas kertamuovit säilyttävät kerran kovetetun muotonsa.

Muovien luokitteluksi ja kategorisoimiseksi on useita eri tapoja. Esimerkiksi muoviteollisuuden yhteisö ”*Society of plastics industry* (SPI)” otti vuonna 1988 käyttöön maailmanlaajuisesti käytetyn luokittelumenetelmän (SPI-koodi) muovien kierrätystä ja hävittämistä varten, niiden kemikaaliseen koostumukseen perustuen.

Tekniikan sovellutuksiin parempi tapa on kategorisoida muovit materiaaliominaisuuksien perusteella kolmeen kategoriaan: yleiset termoplastiset muovit, tekniset termoplastiset muovit ja korkean suorituskyvyn termoplastiset muovit.

Tekniset termoplastiset muovit ovat ryhmä muovimateriaaleja, joilla on paremmat mekaaniset ja tai lämpöominaisuudet kuin yleisemmin

käytetyillä yleisillä termoplastisilla muoveilla (kuten polystyreeni, PVC, polypropeeni ja polyeteeni).

Korkean suorituskyvyn termoplastiset muovit ovat ryhmä muovimateriaaleja, jotka eroavat yleisistä ja teknisistä termoplastisista muoveista pääasiassa lämpötila stabiiliudellaan mutta myös kemiallisella stabiiliudellaan, mekaanisilla ominaisuuksillaan, tuotantomäärillään sekä hinnallaan. Suurin osa korkean suorituskyvyn muoveista on erikoistunut yksittäiseen ominaisuuteen, kuten lämpöstabiiisuus, toisin kuin tekniset muovit, jotka kattavat laajemman määrän ominaisuuksia.

Ympäristötekijöihin, jotka voivat vahingoittaa muoveja kuuluvat muun muassa UV-säteily, ilmankosteus, kemikaalit, lämpötila ja hapettuminen.

Lisätietoja muoveista yleisesti:

<http://www.qualitylogoproducts.com/lib/different-types-of-plastic.htm>

<http://www.chemheritage.org/discover/online-resources/conflicts-in-chemistry/the-case-of-plastics/all-science-of-plastics.aspx>

5.1.1 Isku- ja väsymiskestävyys

Iskunkestävyys on materiaalin kyky kestää siihen kohdistuvia lyhytaikaisia suuria voimia tai iskuja. Suuri voima lyhyen ajan kuluessa vaikuttaa yleensä enemmän, kuin pienempi voima pitemmällä ajanjaksolla. Isku riippuu myös kappaleiden välisestä suhteellisesta liikenopeudesta, koska kineettinen energia ($E_k = \frac{1}{2}mv^2$) kasvaa suhteessa nopeuden neliöön.

Yksi tapa katsoa asiaa on se, että jotkut materiaalit ovat lyhemmillä ajanjaksoilla hauraampia kuin pidemmällä ajanjaksoilla. Iskunkestävyys laskee kimmokertoimen mukana, joka tarkoittaa sitä, että jäykemmillä materiaaleilla on pienempi iskunkestävyys ja joustavilla/kimmoisilla materiaaleilla on parempi iskunkestävyys.

Myös lämpötila vaikuttaa huomattavasti materiaalin iskunkestävyyteen siten, että matalissa lämpötiloissa suurin osa materiaaleista muuttuu hauraaksi.

Materiaalit voivat käyttäytyä hyvin erilaisilla staattisiin kuormituksiin verrattuna. Taipuisalla materiaalilla, kuten teräksellä on taipumus tulla hauraammaksi korkeilla voimankasvunopeuksilla ja iskun vastakkaispuolella voi esiintyä sirpaloitumista, ellei isku läpäise materiaalia. Kineettisen energian jakautuminen iskualueelle vaikuttaa myös huomattavasti lopputulokseen. Kappaleeseen ammuttu projektiili aiheuttaa puristuskuormituksen iskupisteeseen, mutta vääntörasituksen lyhyen matkan päässä. Koska suurin osa materiaaleista on heikompi jännityspuolella kuin puristuspuolella, halkeamat pyrkivät muodostumaan ja kasvamaan alueella, jossa rasitus vaihtuu puristusrasituksesta jännitykseksi.

Kaksi yleisesti käytettyä iskutestiä ovat Izod- ja Charpy isku testit. Izod iskutesti on ASTM-standardin mukainen testi materiaalien iskukestävyyden määrittämiseksi. Heilurin iskuvasaraa vapautetaan määrättyltä korkeudelta, jolloin vakio potentiaalienergia vapautuu. Vasara iskee testikappaleeseen, joka joko särkyi tai iskurin paino pysähtyy kappaleeseen. Iskuenergia määritellään testikappaleen absorboimasta energiamäärästä. Iskuenergian määrittämiseen ja lovikestävyyden määrittämiseen käytetään yleensä lovettua testikappaletta.

Testi on samankaltainen Charpy iskutestiin nähden, mutta siinä käytetään hieman erilaista testijärjestelyä. Testikappale on kiinni ulokepalkissa, Charpytestin kolmipiste taivutusjärjestelystä poiketen.

Polykarbonaatin Izod iskulujuus on 600 - 850 J/m ja lovitestillä 20 - 35 kJ/m².

Monissa teknisissä sovellutuksissa osia rasitetaan useita kertoja kappaleen murtolujuuden alapuolella. Jos kappaleeseen kohdistetaan riittävän useita rasisyklejä millä tahansa rasisvoimalla, kappale murtuu väsymisestä johtuen.

Samankaltainen väsyminen tapahtuu myös jos rasisukset ovat iskurasituksia. Jos voidaan määrittellä minimienergia, joka vaaditaan kappaleen murtamiseen, niin isku pienemmällä energialla ei aiheuta kappaleen rikkoutumista, mutta riittävä määrä näitä pienemmän energian iskuja aiheuttaa.

Tätä ilmiötä kutsutaan iskuväsymiseksi ja myös se tulisi ottaa huomioon kun valitaan materiaaleja teknisiin sovelluksiin.

Esimerkiksi polykarbonaattimuovin kohdalla kun iskujen määrä kasvaa 2:sta 20:neen, polykarbonaatin iskukestävyys on enää yksi kolmasosa alkuperäisestä arvosta.

Lisätietoja:

<http://plastics.dupont.com/plastics/pdflit/americas/design/DCI485.pdf>

5.1.2 Kemikaalien kestävyys

Muovien kemikaalisen kestävyuden osalta tiedot annetaan yleensä jonkunlaisen vastuunkiertolauseen kanssa, kuten:

“Nämä arvot perustuvat vain ja ainoastaan laboratoriotesteihin perusmateriaalilla. Materiaalista valmistetut kappaleet joutuvat usein kosketuksiin tekijöiden ja aineiden kanssa, jotka eivät tule esille laboratoriotesteissä, kuten (lämpötila, paine, materiaalin kuormitus, kemikaalien vaikutus, rakenteiden piirteet, jne.). Tästä syystä annettuja arvoja tulisi käsitellä vain viitearvoina. Kriittisissä sovelluksissa on tärkeää, että testit suoritetaan todellisuutta vastaavassa ympäristössä ja todellisuutta vastaavalla kappaleella.”

Lisävän valmistuksen osalta kemikaalien vaikutuksen ennustaminen voi olla jopa vielä vaikeampaa, varsinkin jos kemikaalilla on jonkinlainen vaikutus materiaaliin ja esimerkiksi materiaali on valmistuksesta johtuen jäänyt huokoiseksi, joka aiheuttaa sen, että kemikaali imeytyy materiaalin sisään.

Materiaalinvalmistajat antavat yleensä tiedon kemikaalikestävydestä materiaalille, mutta vaikka määrättyllä kemikaalilla ei olisi suoraan minkäänlaista vaikutusta materiaaliin, se voi yhä olla syy kappaleen pettämiseen epäsuorasti, esimerkiksi jäätyminen tai jonkun toisen kemikaalin kanssa tapahtuvan yhteisreaktion seurauksena.

Joitakin yleisiä muoveja ja niiden ominaisuuksia on listattu kappaleessa 5.1.6 “Yleisimmät muovimateriaalit”.

Kappale 5.1.7 ”AM muovimateriaaleja ja niiden ominaisuuksia” listaa muovimateriaaleja joiltakin lisävän valmistuksen materiaali ja järjestelmävalmistajilta.

Lisätietoja muovien kemikaalinkestävyydestä:

http://www.plasticsintl.com/plastics_chemical_resistance_chart.html

<https://www.buerkle.de/en/chemical-resistance.html>

<http://www.curbellplastics.com/technical-resources/pdf/chemical-resistance-plastics.pdf>

https://plasticpipe.org/pdf/tr-19_thermoplastic_pipe_for_transport_of_chemical.pdf

<http://www.rtpcompany.com/technical-info/chemical-resistance/>

5.1.3 Veden imeytyminen

Vaikka kaikki muovit imevät itseensä vettä/kosteutta, eri muovit kykenevät imemään itseensä eri määrän vettä ja veden imeytyminen voi näkyä eri muoveissa eri tavoin.

Sähköiset ominaisuudet muuttuvat kaikkein selkeimmin veden imeytymisen johdosta. Koska polyeteenin veden imeytyminen on olematon, se onkin hyvin arvostettu sähköeristeenä.

Muovit jotka imevät suurempia määriä vettä myös muuttuvat samalla ulkomitoiltaan. Kun vaaditaan mittastabilisuutta, valitaan muovimateriaali, johon imeytyy hyvin vähän vettä. Asetaali –tyypin muoveilla on niin pieni veden imeytyminen, että sillä on olematon vaikutus materiaaliominaisuuksiin.

Lisätietoja:

<http://www.tiniusolsen.com/resource-center/Plastic-Properties-013.html>

<http://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/water-absorption-24-hours>

5.1.4 UV-säteilyn kesto

Monet luonnolliset sekä synteettiset polymeerit ovat haavoittuvia ultraviolettisäteilylle. Yleisiä termoplastisia muoveja voidaan muokata UV-stabilointiaineilla tai lisä-aineilla materiaalin UV-kestävyyden parantamiseksi. Jos materiaalia ei ole käsitelty UV-stabiiliin tilaan, siitä tehdyt tuotteet voivat haljeta ja murentua UV-säteilyn vaikutuksesta. UV-stabilisointiaineet muoveissa toimivat yleensä absorboimalla UV-

säteilyn ja häivyttämällä energian matalana lämpönä. Hiilimusta on yksi aine, jota käytetään muoveissa UV-kestävyyden parantamiseksi.

Materiaalit jotka eivät ole UV-stabiileja muuttuvat sekä ulkonäön-, että molekyyliarakenteen puolesta kun niitä altistetaan UV-säteilylle. Ajan kuluessa tällainen materiaali voi muuttua hauraaksi, halkeilla, muuttua väriltään, vääntyillä, jne.

Lisätietoja:

<http://www.dotmar.com.au/uv-resistance.html>

5.1.5 Lämpö-ominaisuudet

5.1.5.1 Lasittumislämpötila (T_g)

Muovien voidaan ajatella koostuvan polymeeriketjuista, jotka kykenevät liukumaan toistensa ohi. Lasittumislämpötilaksi (*Glass transition temperature*, T_g) kutsutaan lämpötilapistettä, jossa lämpötilaa laskiessa polymeeriketjut tarttuvat toisiinsa, eivätkä kykene enää liukumaan toistensa ohi. Elastomeereillä ja joustavilla muoveilla käyttölämpötila on yleensä hieman T_g:n yläpuolella. Jotkut muovit ovat hauraita T_g:n alapuolella, kuitenkin oikeilla pehmentimillä tai lisäaineilla hauraslämpötila voi yltyä paljon T_g:n alapuolelle. Lisäksi jotkut muovit eivät tule hauraksi ollenkaan niiden erikoisrakenteesta johtuen ja kykenevät muovautumaan plastisesti rajattuun pisteeseen asti.

Lasittumislämpötilan oikea arvo riippuu huomattavasti pohja-aineena käytettävän polymeerin molekyyliarakenteesta, molekyylipainosta ja polymeerin molekyylipainojakaumasta, seokseen käytetyistä lisäaineista ja useasta muusta tekijästä.

Polymeerit joilla T_g on huoneen lämpötilaa suurempi, ovat lasittuneessa tilassa huoneen lämpötilassa. Esimerkkejä tällaisista polymeereistä ovat PS, PMMA ja PET. Nämä muovit ovat hauraita ja helppoja rikkoa huoneenlämpötilassa. PVC on lasittuneessa tilassa huoneen lämpötilassa, mutta se on erikoistapaus, koska se voidaan muovata helposti kumimaiseksi lisäämällä pehennin -aineita.

Polymeerit joilla T_g on pienempi kuin huoneen lämpötila ovat kumi-
maisessa olomuodossa huoneen lämpötilassa. Esimerkkejä tällaisista

muoveista ovat PP ja PE (useimmissa muodoissaan LD, HD, UHMW, jne.). Tällaiset muovit ovat joustavia ja vaikeasti rikottavia huoneenlämpötilassa.

Yksi merkittävimmistä erikoistapauksista on PTFE, jonka lasittumislämpötila on noin 130 °C. Perinteisten muovien kannalta ajateltuna, PTFE:n pitäisi olla haurasta huoneen lämpötilassa ja sen alapuolella. PTFE:llä on uniikki rakenne ja jopa nimellisessä sulamispisteessään n. 400 °C se on huomattavan lujaa, vastaavasti huomattavasti lasittumislämpötilan alapuolella se voi muovautua plastisesti rajatun määrän.

Minnesota Rubber and Plastics on julkaissut tuloksia, jotka demonstroivat jatkuvaa käyttöä lasittumislämpötilan yläpuolella. Sama pätee myös HDT-lämpötiloihin. On kuitenkin tärkeää muistaa, että suorituskyky riippuu lopulta käyttökohteesta. Normaalisti materiaali on pettämisvaarassa kun se alkaa pehmentyä (T_g). Siten yleisohjeena T_g:n tulee olla tärkeässä roolissa kun valitaan lämpötilan kestäväää termoplastista muovia.

Jotkut ovat sitä mieltä, että lasittumislämpötila (T_g) on tarkoitettu polymeerifyysikoiden käyttöön, sillä sitä ei ole määritelty yksittäisellä standardilla ja se voidaan mitata usealla eri menetelmällä, kuten DMA, dielektrinen spektroskopia, DCS, dilatometria, jne., jotka eivät välttämättä anna samaa arvoa.

HDT ja Vicat taas toisaalta ovat lämpötila-arvoja, jotka on määritelty standardilla ja ne riippuvat määrätystä muodonmuutoksesta.

Lisätietoja:

http://www.appstate.edu/~clementsjs/polymerproperties/plastics_low_temp.pdf

http://www.mnrubber.com/Design_Guide/5-3.html

http://www.researchgate.net/post/Hdt_vs_tg

5.1.5.2 Taipumislämpötila (HDT)

Taipumislämpötila, Englanniksi ”*Heat deflection temperature, HDT*” on lämpötilapiste, jossa polymeeri, tai muovinen testikappale muuttaa muotoaan määrätyn kuorman alla määrätyn verran. Tätä muovimateriaalin ominaisuutta käytetään useissa tuotteen suunnittelu ja valmis-

tusvaiheen näkökulmissa tuotteilla, joissa käytetään termoplastisia komponentteja.

ASTM D648 –standardi rajaa HDT-lämpötilan määrittämisen seuraavasti: Testikappaletta kuormitetaan kolmipistetaivutuksessa reunansuuntaisessa suunnassa. Testissä käytettävä ulkopuolelta tuotava kuorma on joko 0,455 MPa tai 1,82 MPa, ja lämpötilaa nostetaan 2 °C/min kunnes testikappale antaa periksi 0,25 mm. Proseduuri on samankaltainen myös ISO 75 standardissa.

HDT:n määrittämisessä esiintyviä rajoituksia ovat kappaleet, jotka eivät ole lämpötilan kannalta isotrooppisia ja varsinkin paksut testikappaleet, jotka sisältävät lämpötilagradientin. Materiaalin HDT voi myös olla hyvin sensitiivinen komponenttiin kohdistuvasta rasituksesta, joka riippuu kappaleen mitoista. Valittu poikkeama 0.25 mm (joka on 0.2 % lisärasitusta) on valittu sattumanvaraisesti, eikä sillä ole minäänlaista fyysistä merkitystä.

5.1.5.3 Vicat pehmentymispiste (VSP)

Vicat pehmentymispiste, englanniksi ”*Vicat softening point, VSP*” on tunnettu myös Vicat -kovuutena (*Vicat hardness*), Vicat pehmenemis -lämpötilana (*Vicat softening temperature, VST*) tai lämpömuodonpuutos pisteenä (*heat deformation point*). VSP on lämpötila jossa määritellyn neulan kärki uppoaa materiaaliin standardin mukaisissa testiolosuhteissa. Testiä käytetään määrittelemään materiaalien pehmentymispistettä materiaaleilla, kuten muovit, joilla ei ole tarkkaa sulamispistettä. Lämpötilapiste otetaan kohdasta, jossa tasakärkinen neula, pyöreällä tai neliön muotoisella leikkauspinnan muodolla (pinta-alaltaan 1 mm² alue), uppoaa testimateriaaliin 1 mm syvyyteen. Vicat A -testissä käytetään 10 N kuormaa ja vicat B -testissä 50 N kuormaa.

VSP:n määritteleviin standardeihin kuuluvat ASTM D 1525 ja ISO 306, jotka ovat suurelta osin toisiaan vastaavia.

5.1.5.4 Polymeerien kristallisoituminen

Polymeerit voivat kristallisoitua jäähtyessään sulatilasta, mekaanisesta venymisestä johtuen, tai liuotinaineen haihtuessa. Kristallisoituminen vaikuttaa polymeerin optisiin-, mekaanisiin-, lämpö-, ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Kristallisoitumisaste arvioidaan erilaisilla analyytisillä menetelmillä ja se on tyypillisesti 10 ja 80 % välillä, näin kristallisoituneita polymeerejä kutsutaan yleensä semikristallisiksi. Semikristallisten polymeerien ominaisuuksiin vaikuttaa kristalloitumisasteen lisäksi myös molekyyliketjujen koko ja orientaatio.

Polymeerit koostuvat pitkistä molekyyliketjuista, jotka muodostavat epäsäännöllisiä toisiinsa sotkeutuneita kiemuroita sulassa. Jotkut polymeerit säilyttävät samanlaisen epäsäännöllisen rakenteen jäähtyessään ja muuttuvat näin amorfisiksi kiinteiksi aineiksi. Toisissa polymeereissä ketjut uudelleenjärjestäytyvät polymeerin jäähtyessä ja muodostavat osittain järjestäytyneitä alueita, joiden tyypillinen koko on 1 μm luokkaa. Vaikka käytetyn energian kannalta polymeeriketjujen olisi edullisempaa järjestäytyä rinnakkain, tällaista järjestäytymistä ei tapahdu, koska sitä rajoittaa se, että molekyyliketjut ovat sulatilassa toisiinsa kietoutuneita. Tästä syystä järjestäytyneiden alueiden sisällä polymeeriketjut ovat sekä suuntautuneita, että poimuttuneita. Nämä alueet eivät siten ole kristallisia eivätkä amorfisia ja ovat siten luokiteltu semikristallisiksi. Esimerkkejä semikristallisista polymeereistä ovat lineaarinen polyeteeni (PE), polyeteeni-tereftalaatti (PET), polytetrafluorietyleni (PTFE) ja isotaktinen polypropeeni (PP).

Lasittumislämpötilan alapuolella amorfiset polymeerit ovat yleensä kovia ja hauraita, johtuen niiden molekyylien rajallisesta liikkumisesta. Lämpötilan nostaminen kasvattaa molekyylien liikkumista, josta seuraa tyypilliset kumimaiset elastiset ominaisuudet. Jatkuvan voiman kohdistaminen polymeeriin yli T_g -lämpötilassa aiheuttaa viskoelastista muodonmuutosta, toisin sanoen polymeeri alkaa ryömiä. Lämpöresistiivisyys amorfisilla polymeereillä on siten juuri lasittumislämpötilan alapuolella.

Kohtuullisen suuret molekyylien väliset voimat semikristallisissa polymeerissä estävät pehmentymisen jopa lasittumislämpötilan yläpuolella. Niiden kimmomoduuli muuttuu huomattavasti vain korkeassa (sulaminen) lämpötilassa. Se myös riippuu kristallisuusasteesta: Korkeampi kristallisuus tarkoittaa suurempaa kovuutta ja parempaa

lämpöstabiilisuutta, mutta myös hauraampaa materiaalia, kun taas amorfiset alueet tarjoavat elastisuutta ja iskunkestävyyttä. Toinen semikristallisten polymeerien piirre on niiden mekaanisten ominaisuuksien voimakas anisotropia molekyylien järjestäytymissuunnassa ja sitä vastaan.

Muovit ovat viskoelastisia materiaaleja, joka tarkoittaa, että rasituksen alla, niiden muodonmuutos kasvaa ajan kuluessa (ryömintä). Muovien elastiset ominaisuudet ovat täten eroteltavissa testin ajanjakson mukaan lyhyen ajan käyttäytymiseen (kuten vetotesti, joka kestää minuutteja), isku rasitus, käyttäytyminen pitkäaikaisessa ja staattisessa kuormituksessa, kuin myös värinän aiheuttamassa kuormitus.

5.1.5.5 Lämpölaajenemiskerroin (CTE)

Lämpölaajenemiskerroin, englanniksi (*Coefficient of thermal expansion*, CTE) kuvaa kuinka kappaleen koko muuttuu lämpötilan muuttuessa. Tarkennettuna, se mittaa suhteellista muutosta kappaleen koossa verrattuna asteen muutokseen lämpötilassa, jatkuvan paineen alaisena. Olemassa on muutamia erityyppisiä kertoimia: volymetrinen, sekä pinta-alasta tai lineaarisuunnasta riippuvainen. Käytettävä kerroin riippuu käyttökohteesta ja siitä mitkä suunnat on katsottu tärkeiksi. Lisäävän valmistuksen yhteydessä käytetään yleensä lineaarisia kertoimia kolmessa eri suunnassa XYZ.

Volymetrinen lämpölaajenemiskerroin on yleisin kerroin ja merkityksellisin nesteiden kanssa. Yleisesti ottaen aineet laajenevat tai kutistuvat niiden lämpötilan muuttuessa, siten että aine laajenee tai kutistuu kaikkiin suuntiin samalla tavalla. Aineita jotka laajenevat samalla tavalla joka suuntaan kutsutaan isotrooppisiksi. Isotrooppisilla materiaaleilla pinta-ala ja volymetrinen lämpötilakerroin ovat kaksin ja kolminkertaisia lineaariseen lämpölaajenemiskertoimeen nähden.

5.1.5.6 Sulamislämpötila (t_m)

Sulamislämpötila, englanniksi "*Melting temperature*, (t_m)" on ominaistransitiolämpötila, jossa polymeeriketjut eivät pysy yhdessä ja materiaali muuttuu kiinteästä (kristalliset materiaalit, kuten jää) tai kumi- maisesta sulaan tilaan.

5.1.5.7 Matala lämpötila

Lämpötilan ollessa alle lasittumislämpötilan (T_g) yleisimmät muovit alkavat käyttäytyä jäykkinä lasimaisina kiinteinä materiaaleina, iskunkestävyys putoaa huomattavasti ja matala energian haurasmurtumat tulevat pääasialliseksi materiaalin hajoamisen syyksi. Matalat lämpötilat eivät ole välttämättä suotuisia muovien suorituskyvyn kannalta.

Lämpötilan laskiessa saatavilla olevien termoplastisten muovien määrä laskee nopeasti. Alle -40 °C asteessa valinnat ovat jo rajallisia.

Yleisin menetelmä lasittumisvaiheen määrittelyä on määrittellä ”haurasmurtumalämpötila”. Haurasmurtumalämpötila on käyttökelppoinen arvo verratessa kilpailevia materiaaleja, mutta se on oikeasti relevantti vain testissä määritellyille materiaaleille ja tilanteille. Saatua arvoja ei tule käyttää suoraan muille muodoille tai tilanteille ja arvo ei aseta alarajaa lopputuotteen käyttölämpötilalle, se yksinkertaisesti vain kertoo missä lämpötilassa haurasmurtuma muuttuu dominoivaksi hajoamismekanismitiksi.

Standardit ASTM D746-04 ja ISO 974-2000 kuvaavat testimenetelmiä haurasmurtumalämpötilan määrittelyä muoveille ja elastomeereille. Haurasmurtuma tila ei tapahdu missään yksittäinen tarkassa lämpötilassa, minkä takia testissä tarkastellaan useita testikappaleita määrättyissä iskuolosuhteissa, jotta voidaan määrittellä lämpötila jossa haurasmurtuman todennäköisyys on 50 %. ASTM- ja ISO-standardit ovat teknisesti samanlaisia. ISO-standardi eroaa vain testikappaleiden minimimäärässä.

ASTM D 2137 on standardi kumien iskuhaurauden testaamiseen.

Lisätietoja:

http://www.appstate.edu/~clementsjs/polymerproperties/plastics_low_temp.pdf

5.1.6 Yleisimmät muovimateriaalit

Tässä kappaleessa kuvataan yleisimpien AM-muovien ominaisuuksia lähinnä autoteollisuuden näkökulmasta.

Lisätietoja löytyy mm. seuraavista osoitteista:

- [AUTOMOTIVE MATERIALS PLASTICS IN AUTOMOTIVE MARKETS TODAY (03/2010), http://www.mtf.stuba.sk/docs/internetovy_casopis/2010/3/szeteiova.pdf]
- <http://info.craftechind.com/blog/bid/391683/13-High-Performance-Plastics-Used-in-the-Automotive-Industry> (07/2014)
- <http://www.corbion.com/bioplastics/markets/automotive>

5.1.6.1 Polypropeeni (PP)

Polypropeeni kestää hyvin kemikaaleja ja on lähes täysin vettä läpäisemätön muovilaatu. Mustalla polypropeenilla on paras UV-säteilyn kestävyys ja sen käyttö yleistyy kokoajan rakennusteollisuudessa.

Käyttökohteita ovat muun muassa: autojen puskurit, kemikaalisäiliöt, kaapelien eristys, patterikotelot, pullot, bensa astiat, sisä- ja ulkomatot sekä mattojen kuidut.

Polypropeenin käyttölämpötila-alue on 0 - 135 °C ja sen HDT-lämpötila (0.45 MPa/66 psi) on 107 °C.

5.1.6.2 Polyuretaani (PUR)

Polyuretaani(PU, PUR) on solumuovi, jonka ominaisuudet vaihtelevat valitun isosyanaatin ja polyolin mukaan. Yleisiä käyttökohteita ovat mm. lämpöeristeet, patjat, istuimet, kengät, holkit, laakerit ja rullalautojen renkaat.

Polyuretaani(PU, PUR) on polymeeri, joka muodostuu reaktiossa isosyanaatin ja polyolin kesken. Polyuretaani solumuovin ominaisuudet vaihtelevat valitun isosyanaatin ja polyolin mukaan.

Polyuretaanilla on useita eri käyttökohteita monissa eri sovellutuksissa. Sitä käytetään hyvin yleisesti lämpöeristemateriaalina esimerkiksi jääkaapeissa ja rakennuksissa. Muita sovellutuksia ovat mm. kellukkeet, patjat, istuimet, kengät, holkit, laakerit ja esim. rullalautojen renkaat.

Autoteollisuudessa polyuretaania käytetään pehmeissä ja joustavissa osissa, kuten istuimissa ja ohjauspyörissä. Tehdasvalmisteisissa elementeissä polyuretaanivaahtoa käytetään myös rakenteen osana jäykistämässä kotelorakenteita tukevammasi rakennuselementiksi.

Rakennusteollisuudessa polyuretaania käytetään myös kuituvahvisteisissa profiileissa esimerkiksi ikkunan ja ovien karmeissa alumiinin tilalta.

Polyuretaanin käyttölämpötila-alue on $-40 - 80$ °C. Sillä on hyvä venyvyys, vetolujuus ja jäykkyys. Polyuretaani kestää mineraaliöljyjä, bensiiniä, rasvaa, heikkoja happoja, emäksisiä aineita, säätä ja UV-säteilyä. Valon vaikutuksesta materiaali tummuu keltaiseksi, mutta sen ominaisuudet eivät muutu.

Polyuretaani vaimentaa hyvin iskuja ja on joustavaa myös alhaisissa lämpötiloissa.

5.1.6.3 Poly-vinyl-chloride (PVC)

Polyvinyylikloridi on muovimateriaali, joka kestää hyvin kemikaaleja ja liuottimia. Sen vinyylipitoisuus antaa muoville hyvän vetolujuuden, joskin se voi myös olla joustavaa. PVC:tä saa sekä värjättyinä, että läpinäkyvänä.

Käyttökohteita ovat muun muassa: autoteollisuudessa mittaristot, sähkökaapeli kuoret, putket, ovet, vedenpitävä vaatetus sekä kemikaaliastiat

PVC:n käyttölämpötila-alue on $-32 - 82$ °C ja HDT-lämpötila (0.45 MPa/66 psi) on -32 °C.

5.1.6.4 Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)

ABS on kestävä lämpömuovattava muovilaatu. ABS muovin kestävyys ja kovuuden takia se on hyvin yleisesti käytetty muovi. Käyttökohteita ovat muun muassa erilaiset kypärät, kotitalous- ja konttorikoneet, kotelot, Lego-palikat, putket ja profiilit sekä veneet.

ABS-muovia käytetään myös henkilöautojen korien helmoissa ja puskureissa polykarbonaatin sekoitteena PC/ABS. Lisäksi tietokoneiden ja tulostinten rungot ovat tavallisesti ABS-muovia.

ABS-muovin monomeerit ovat akryylinitriili, butadieeni ja styreeni.

ABS-muovilla on hyvä sitkeyden, jäykkyyden ja sulajuoksevuuden yhdistelmä sekä hyvä pinnanlaatu ja kiilto. Sen jännityssäröilyherkkyys on vähäisempi kuin polystyreenillä. ABS-muovilla on myös pieni staattinen sähköisyys ja se kestää hyvin heikkoja happoja ja emäksiä.

ABS muovin lasittumislämpötila on noin 100 astetta ja sen UV-säteilyn kesto ilman lisäaineita on heikko.

5.1.6.5 Polyamide (PA)

Polyamidi luetaan teknisiin muoveihin, siitä valmistetaan muun muassa vaatteita, mattoja, köysiä ja erilaisia koneenosia, kuten pieniä hammaspyöriä. Polyamidien tunnettuja tuotenimiä ovat mm. NYLON ja Kevlar.

Polyamidi on polymeeri, jossa monomeerit ovat yhdistyneet amidisidoksin. Polyamideilla tarkoitetaan yleensä vain keinotekoisia polymeerejä, vaikka luonnon proteiinejakin voidaan pitää polyamideina. Polyamideista tunnetuin on 1930-luvulla kehitetty nylon.

Polyamideista valmistetaan muun muassa vaatteita, mattoja, köysiä ja erilaisia koneenosia, kuten pieniä hammaspyöriä. Vaatteissa polyamideja käytetään sellaisenaan tai sekoitteina. Polyamidivaatteet ovat kevyitä ja kestäviä mutta helposti sähköistyviä. Aromaattisista polyamideista eli aramideista voidaan valmistaa lämpöä kestäviä ja erityisen lujia tekstiilejä, kuten palomiesten suojavaatteita.

Polyamidit ovat eniten käytettyjä teknisiä muoveja. Esimerkkinä yleisesti tunnettu nylon luokitellaan kemiallisesti polyamidiksi (PA66). Polyamideja on erityyppisiä ja ne voidaankin jaotella kahteen ryhmään niiden rakenteen perusteella. PA 6, PA 11 ja PA 12 ovat polyamideja, joiden molekyyliketjut muodostuvat vain yhden tyyppisestä monomeeristä. Vastaavasti PA 66:n, PA 69:n ja PA 610:n molekyyliketjut sisältävät kahta erilaista monomeeriä. Numero polyamidi-lyhenteen jäljessä ilmaisee kuinka monta hiiliatomia molekyyliketjussa sijaitseva monomeeri sisältää.

Polyamidit imevät vettä melko paljon verrattuna muihin muoveihin. Niiden suuri veden absorptio vaikuttaa mm. ruiskuvalukappaleen dimensioihin. Polyamidien kitkakerroin terästä vasten on noin 0,25 - 0,35.

Polyamidit kestävät liuottimia hyvin, mutta niillä on huono fenolien, kreosolien ja vahvojen happojen kesto.

Lisätietoja:

http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PA_FI.pdf

5.1.6.6 Polystyrene (PS)

Polystyreeni on kestopuovi, joka on huoneenlämmössä jäykkä, mutta sitä voidaan muokata kuumentamalla. Joitakin polystyreeni tyyppien lyhenteitä: PS, GPPS, EPS, XPS, HIPS.

Polystyreeni on polymeeri, jota valmistetaan styreenistä, joka on aromaattinen hiilivety. Polystyreenin sulamispiste on 240 - 270 °C, suhteellinen tiheys 1,04 - 1,13 g/cm³.

Polystyreeni on amorfinen ja lasimainen polymeeri, joka on jäykkää, haurasta ja melko edullista materiaalia. Täyttämätöntä kiiltävää polystyreeniä kutsutaan usein kiteiseksi polystyreeniksi tai normaaliksi polystyreeniksi (PS).

Polystyreeniä on montaa eri tyyppiä, riippuen valmistusmenetelmästä ja käytetyistä lisäaineista.

Normaali polystyreeni(PS) on haurasta. Sen pintaan syntyy herkästi lovia, jotka kasvavat kuormituksen alaisena. Yleiskäyttöinen polystyreeni(GPPS) on lasinkirkas, melko hauras, mutta hyvän jäykkyyden omaava materiaali. Solupolystyreenin(EPS, XPS) fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet riippuvat mm. sen tiheydestä. XPS on Suulakepuristettua polystyreeniä ja EPS on paisutettua polystyreeniä, jota kutsutaan yleisesti myös nimellä styrox. Suuremmat vaatimukset täyttävää polystyreeniä valmistetaan kemiallisesti kopolymerisaatiolla tai sekoittamalla mekaanisesti muiden monomeerien tai kumin kanssa. Näin saadaan aikaiseksi mm. iskunkestävää polystyreeniä (HIPS), joka on styreenin ja polybutadieenin kopolymerisaation tulos. Iskunkestävällä polystyreenillä(HIPS) on parempi iskutikeus kuin normaalilla polystyreenillä. Sillä on hyvä jäykkyys, kovuus, lujuus, iskulujuus ja lämmönkestävyys.

Lisäksi polystyreeniä käytetään kopolymeereissä esim. ABS, joka koostuu akryylinitriilistä, butadieenistä sekä polystyreenistä.

Lisätietoja:

<http://global.britannica.com/science/polystyrene>, http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PS_FI.pdf

5.1.6.7 Polyethylene (PE)

Polyeteeni on maailman käytetyin muovi ja kuuluu polyolefiineihin yhdessä polypropeenin kanssa. Polyeteenillä on hyvä kemikaalin kestävyys. Polyeteenistä käytetään pääasiassa kahta eri tyyppi-nimitystä, matalatiheyksisestä polyeteenistä (LDPE) ja korkeatiheyksisestä polyeteenistä (HDPE) valmistetaan noin 30 eri tiheyksistä muovia.

Käyttökohteita ovat: lasilujitetut komposiitit GRP (auton ulkopintoja), sähköeristeet, pakkaukset sekä muut kestävyyttä vaativat kohteet.

LDPE:n käyttölämpötila-alue on -100 - 80 °C. HDT-lämpötila (0,45 MPa/66 psi) on 45 °C.

HDPE:n käyttölämpötila-alue on -100 - 120 °C. HDT-lämpötila (0,45 MPa/66 psi) on 65 °C.

5.1.6.8 Polyoxymethylene, Polyacetal (POM)

Polyasetaali on muovilaatu, jolla on hyvä jäykkyys ja myötölujuus, jotka säilyvät myös matalissa lämpötiloissa. Lisäksi POM:illa on hyvä kemikaalien ja polttoaineiden kestävyys. Sitä käytetään sekä sisä-, että ulkopuolen koristeissa, polttoainejärjestelmissä sekä pienissä hammasrattaissa.

Polyasetaalin käyttölämpötila-alue on -40 - 120 °C ja HDT-lämpötila (0,45 MPa/66 psi) 160 °C

5.1.6.9 Polykarbonaatti (PC)

Polykarbonaatti on termoplastinen muovi, jolla on hyvä sään- ja UV-säteilyn kesto. Teollisuudessa käytettävät polykarbonaattimuovit ovat jäykkiä, iskunkestäviä ja helposti työstettäviä.

Polykarbonaatin lasittumislämpötila on noin 147 °C.

5.1.6.10 Polymethyl methacrylate (PMMA)

Polymetyylimetakrylaatti, puhkielellä akryyli tai pleksilasi on läpinäkyvämpää kuin lasi, sillä on kohtuullinen vetolujuus, hyvä UV-säteilyn, sekä sään kestävyys, erinomainen optinen- ja pinnanlaatu suurella väriskaalalla. Akryyli on polykarbonaattia halvempaa, mutta myös alttiimpi naarmuuntumiselle sekä pirstaloitumiselle, joskin myös pirstaloitumattomia laatuja on saatavilla. Sitä käytetään usein kevyenä pirstaloitumis-resisttiivisenä vaihtoehtona lasille ikkunoissa, näytöissä ja suojuissa.

Akryylin käyttölämpötila-alue on 20 - 50 °C ja HDT-lämpötila (0,45 MPa/66 psi) 93 °C.

5.1.6.11 Polybutylene terephthalate (PBT)

Polybutyleenitereftalaatti (PBT) on kova ja kestävä polyesteri (PES) muovi, jolla on hyvä kemikaalin kestävyys, ja sähköiset ominaisuudet. PBT imee itseensä vain hyvin vähän vettä, sillä on erittäin hyvä vä-

sytyskestävyys ja lämpö- sekä mittastabiilius. PBT:tä käytetään usein eristeenä sähkö ja elektroniikka teollisuuksissa. Muovista on olemassa myös palonkestäviä laatuja. Autoteollisuuden käyttökohteisiin kuuluvat sumuvalojen kotelot, paneelit, kattoluukun osat, lukitusjärjestelmien kotelot, ovenkahvat, puskurit ja kaasuttimen osat.

PBT:n käyttölämpötila-alue on -40 - 120(215) °C ja HDT-lämpötila (0,45 MPa/66 psi) 150 °C.

5.1.6.12 Polyethylene terephthalate (PET)

Muovipulloissa käytetty polyetylenitereftalaatti (PET) on käytetyin polyesteri (PES) muovi, joka on samankaltainen kuin PBT. PET -muovilla on hyvä lämpö stabiilius, hyvät sähköiset ominaisuudet, pieni veden imeytyminen ja erittäin hyvät pinnan ominaisuudet. Sitä käytetään eniten synteettisissä kuiduissa ja muovipulloissa. Vaatteissa käytettynä siitä käytetään nimitystä polyesteri. Käyttökohteita autoteollisuudessa ovat tuulilasin pyyhkimen varsi ja hammasrataskotelot, etulamppujen pidikkeet, moottorin suojamuovit ja liittimet.

PET -muovin käyttölämpötila-alue on -60 - 170 °C ja sen HDT-lämpötila (0,45 MPa/66 psi) on 115 °C.

5.1.6.13 Acrylonitrile styrene acrylate (ASA)

Akryylinitriili styreeni akrylaatti (ASA) on ABS-muovia vastaava materiaali, jolla on erittäin hyvä lujuus ja jäykkyys. Sillä on myös hyvä kemikaalin kestävyys ja lämpöstabiilius, erittäin hyvä sään-, ikääntymisen- ja kellastumisen kestävyys ja korkea kiiltävyys. Muovin käyttökohteisiin kuuluvat: kotelot ja profiilit, sekä kappaleet sisä- ja ulko-käyttöön. Sekä ASA että ABS vapauttavat myrkyllisiä höyryjä tai savua korkeissa lämpötiloissa tai palaessaan.

ASA:n käyttölämpötila-alue on -120 - 60 °C ja sen HDT-lämpötila (0,45 MPa/66 psi) 90 °C.

5.1.6.14 Polylactic acid (PLA)

Polylaktidi (PLA) on uusiutuvista raaka-aineista valmistettu biohajoava termoplastinen alifaattinen polyesteri. Sen raaka-aineena voidaan käyttää esimerkiksi maissitärkkelyksestä tai sokeriruokoa. Muovia voidaan käyttää esimerkiksi 3D-tulostamisessa, ja materiaalia tukevat muun muassa Makerbot, RepRap ja suomalainen miniFactory-tulostin. Vaikka PLA onkin biohajoavaa, se on veteen liukenematonta ja sen hajoaminen vaatii lämpökompustointia. PLA:lla on hyvä UV-säteilyn kestävyys. PLA:n hauraudesta johtuen sitä ei voi suositella työkalujen kahvoihin yms. osiin jotka altistuvat iskuille.

PLA:n lasittumislämpötila on n. 50 - 60 astetta, tällä lämpötila-alueella kappaleet alkavat taipumaan tai sortumaan kasaan.

5.1.7 AM muovimateriaaleja ja niiden ominaisuuksia

Tässä kappaleessa on listattuna joitakin materiaaleja joita lisäävän valmistuksen laitevalmistajat ja materiaalivalmistajat tarjoavat. Materiaalikehitys on kiivasta joten uusia materiaaleja tulee markkinoille jatkuvasti. Osa valmistajista myös valmistaa räätälöityjä materiaaleja asiakkaan määrittämien toiveiden mukaisesti.

5.1.7.1 Stratasys

Tarjoamiensa materiaalien lisäksi Stratasys tarjoaa myös kehityspalvelua, jossa kehitetään asiakkaan tarpeisiin sopiva uusi tulostusmateriaali.

- Materiaalin ruiskutus (*Material jetting*), Polyjet
 - VeroWhitePlus, VeroBlue & VeroGray: Lämpikuultamaton, jäykkä muovi HDT-lämpötilalla @66PSI 48 °C.
 - PolyJet GreenFire: Lämpikuultamaton vihreä, jäykkä muovi polyjet materiaalien korkeimmalla HDT-lämpötilalla @66PSI 58 - 68 °C.
 - PolyJet Amber Clear: Puolilämpikuultava muovimateriaali sileällä pinnalla, jonka HDT-lämpötila on @66 PSI 48 °C.
 - Endur: Kirkas valkoinen muovi, joka jäljittelee polypropyleenin ominaisuuksia. HDT-lämpötila on @66PSI 49 - 54 °C.
 - PolyJet Flex & Overmold: Valikoima joustavia materiaaleja, joita

voidaan yhdistää VeroWhitePlus materiaalin kanssa. Materiaalien murtovenymä on jopa 220 %.

- Nesteen fotopolymerisointi (*VAT photopolymerization*)
 - SLA White: Hyvän tarkkuuden ja seinämä ominaisuuden omaava muovimateriaali, jolla kutistuma aiheuttaa vain pienen muodonmuutoksen. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI 42 °C.
 - SLA Clear: Muovimateriaali, joka jäljittelee polykarbonaatin ominaisuuksia. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI 46 °C.
 - SC 5500: Parhaimman tarkkuuden ja seinämälaadun omaava muovimateriaali, jolla on sileä pinta. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI 53 °C.
 - Somos NeXT: Standardi hartseja suuremman iskulujuuden omaava muovimateriaali, joka kestää hyvin ilmankosteutta. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI 57 °C.
 - SLA investment casting patterns: Kustomisoidun koostumuksen omaava materiaali, joka on erityisen kustannustehokasta vahamallivalu muottien valmistuksessa. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI 53 °C.
- Materiaalin pursotus (*Fused deposition modeling, Material Extrusion*):
 - ABSplus
 - ABS, Standardi muovi prototyypeille, paremmalla kestolla.
 - ABS M30, Standardi ABS muovia lujempi polymeeri, suurella väri-
valikoimalla
 - ABS EDS7, Luja termoplastinen muovi staattista sähköä hävittävil-
lä ominaisuuksilla
 - ABSi, Erinomainen lujuus; Lämpökuultava
 - ABS M30i, Bio-yhteensopiva (ISO 10993; USP Class VI) Gamma ja
EtO sterilisoitava materiaali lääketieteelliseen käyttöön
 - ASA, Haalistumaton UV-stabiili muovimateriaali, ABS muovin kal-
taisilla ominaisuuksilla
 - PC, Tarkka, kestävä, luja, RF-taajuuksille läpinäkyvä materiaali
 - PC-ISO, (ISO 10993; USP Class VI) Gamma ja EtO sterilisoitava ma-
teriaali lääketieteelliseen käyttöön
 - PC-ABS, Erinomainen lujuus, Lämpöä kestävä
 - PPSF / PPSU, Korkeita lämpötiloja, petroolia, öljyjä ja liuottimia
kestävä termoplastinen muovimateriaali
 - http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_FDM_FortusPPSF.pdf

- ULTEM 1010, Luja, lämpöä ja kemikaaleja kestävä termoplastinen muovimateriaali
 - [http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Secure/Material Specs MS/Fortus-Material-Specs/MaterialSS-FDM-ULTEM-1010-04-15.pdf](http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Secure/Material%20Specs/MS/Fortus-Material-Specs/MaterialSS-FDM-ULTEM-1010-04-15.pdf)
 - HDT (@66psi, ASTM D648): 216 °C, VST (Rate B/50, ASTM D1525): 214 °C, Tg (DSC, SSYS): 215 °C
- ULTEM 9085, Paloa hidastava (FAR 25.853; UL 94 V-0)
- Nylon 12, Korkea murtovenymä
- Jauhepetimenetelmä (*Powder bed fusion*):
 - SLS production
 - NyTek 1200 GF, Lasitäytteinen Nylon 12, jäykkyyttä vaativille osille.
 - NyTek 1200 CF, Nylon 12, staattista sähköä hävittävä muovimateriaali korkealla lujuus-painosuhteella.
 - NyTek 1200 PA, Standardi Nylon 12, hyvällä kemikaalinkestolla.
 - NyTek 1200 FR, Paloa rajoittava, savu ja myrkyllisyys (FST) sertifioitu.
 - Nytek 1100, Tiheä joustava materiaali; Erinomainen kemiallinen kestävyys.
 - FR-106, Paloa rajoittava, savu ja myrkyllisyys (FST) sertifioitu.
 - SLS prototype
 - Nylon 12 AF, Alumiinitäytteinen materiaali, erinomaisella pinnanlaadulla
 - Nylon 12 PA, Yleismateriaali
 - Nylon 12 GF, Lasitäytteinen materiaali korkealla vetomoduulilla
 - Flex TPE, Joustavuutta ja toiminnallisuutta simuloiva muovimateriaali

Lisätietoja:

<http://www.stratasys.com/materials/polyjet/compare-polyjet-materials>

<http://www.stratasys.com/materials/fdm/compare-fdm-materials>

<https://www.stratasysdirect.com/materials/laser-sintering/>

<https://www.stratasysdirect.com/materials/polyjet/>

<https://www.stratasysdirect.com/materials/stereolithography/>

<https://www.stratasysdirect.com/materials/fused-deposition-modeling/>

5.1.7.2 3DSystems

3DSystem tarjoaa yli 70 erilaista muovimateriaalia eri tulostinkategorioille (kuluttaja-, ammattilais-, ja tuotantotason laitteet).

Lisätietoa 3DSystems:in tarjoamista materiaaleista:

Kuluttajatasen materiaalit: <http://www.3dsystems.com/materials/prosumer>

Ammattilaistason materiaalit: <http://www.3dsystems.com/materials/professional>

Tuotantotason materiaalit: <http://www.3dsystems.com/materials/production>

Alla on listaus ja lyhyitä kuvauksia 3Dsystems:in tuotanto tulostin materiaaleista:

Nesteen fotopolymerisointi (Photopolymerization):

- Accura 25: Joustava materiaali korvaamaan ja simuloimaan CNC koneistettuja valkoisia polypropeeni kappaleita. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI 58 – 63 °C.
- Accura 55: Jäykkä ja kestävä muovi simuloimaan ja korvaamaan CNC -koneistettuja valkoisia ABS kappaleita. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI 55-58°C.
- Accura ABS Black (SL 7820): Materiaali korvaamaan ja simuloimaan CNC -koneistettuja mustia ABS kappaleita. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 51 °C ja lasittumislämpötila Tg on 62 °C.
- Accura Amethyst: Korkean resoluution materiaali tarkoille valu päämalleille koruteollisuutta ajatellen. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 77 °C ja lasittumislämpötila Tg on 103 °C.
- Accura CastPro: Hyvin tarkka materiaali, stabiileille vahamallivalu muoteille QuickCast teknologiaa käyttäen. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 51 °C ja lasittumislämpötila Tg on 60 - 62 °C.
- Accura CeraMax: Komposiittimateriaali stabiilien korkea-jäykkyysisten kappaleiden valmistamiseen. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 220 °C ja lasittumislämpötila Tg on 94 °C.
- Accura ClearVue Free (SL 7870): Kirkas muovimateriaali useisiin käyttökohteisiin. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 48 °C ja lasittumislämpötila Tg on 56 °C.
- Accura Peak: Jäykkä muovimateriaali kuumuutta kestävien kompo-

nenttien valmistukseen. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 153 °C ja lasittumislämpötila Tg on 85 - 90 °C.

- Accura SL 7840: Valkoinen, tarkka, kestävä ja polypropeenin kaltainen hartsi.
- Accura Xtreme White 200: Ultrakestävä valkoinen muovi korvaamaan CNC -koneistettuja polypropeeni ja ABS kappaleita. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 47 °C ja lasittumislämpötila Tg on 52 °C.
- Accura 48HTR: Lämpö ja ilmankosteus resistiivinen muovi vaativiin käyttökohteisiin. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 130 °C ja lasittumislämpötila Tg on 132 - 136 °C.
- Accura 60: Kova, kirkas läpinäkyvä polykarbonaatin kaltaisella ulkonäöllä oleva muovi. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 53 - 55 °C ja lasittumislämpötila Tg on 58 °C.
- Accura ABS White (SL 7810): Tarkka ja kestävä ABS-muovin kaltainen hartsi. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 51 °C ja lasittumislämpötila Tg on 63 °C.
- Accura Bluestone: Jäykkä stabiili nanokomposiittimateriaali korkean vaatimustason käyttökohteisiin. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 267 - 284°C ja lasittumislämpötila Tg on 78 - 81 °C.
- Accura CastPro Free (SL7800): Tarkka ja kestävä yleiskäyttöinen SL-hartsi. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 62 °C ja lasittumislämpötila Tg on 57 °C.
- Accura ClearVue: Polykarbonaatin ja ABS muovin ominaisuuksia ja ulkonäköä simuloiva muovimateriaali. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 46 °C ja lasittumislämpötila Tg on 56 °C.
- Accura e-Stone: Tarkka, kestävä hammasmuotti materiaali. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 58 - 63 °C ja lasittumislämpötila Tg on 60 °C.
- Accura Sapphire: Tulostusmateriaali korusuunnitteluun ja tuotanto-teollisuuteen. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 38 °C ja lasittumislämpötila Tg on 51 °C.
- Accura Xtreme: Kova lämpöresistiivinen muovimateriaali, jonka ulkonäkö muistuttaa polypropyleeniä tai ABS muovia. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 62 °C ja lasittumislämpötila Tg on 70 - 74 °C.

Jauhepetimenetelmä (Powder Bed Fusion):

- CastForm PS: Styreenipohjainen kertakäyttö valumuotti materiaali, joka on yhteensopiva useimpien standardin mukaisien valimo prosessien kanssa. Materiaalin lasittumislämpötila Tg on 89 °C.

- DuraForm EX Natural: Luonnonvärinen, iskunkestävä teollisuusmuovi, jonka lujuus vastaa ruiskuvalettua polypropyleeni- ja ABS-muovia. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 188 °C.
- DuraForm FR 100: Halogeeni ja antimonivapaa paloa hidastava teollisuusmuovi, joka soveltuu lentoteollisuudessa käytettävien osien valmistamiseen lisäävillä valmistusmenetelmillä, sekä osille jotka vaativat UL 94 V-0 hyväksynnän. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 194 °C.
- DuraForm HST Composite: Kuituvahvisteinen teollisuusmuovi erinomaisella jäykkyydellä, lujuudella ja lämpötilan kestolla. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 178-184 °C.
- DuraForm ProX: Erittäin vahva teollisuusmuovi, jota käytetään erinomaisia mekaanisia ominaisuuksia vaativien kestävien toiminnallisten prototyyppien valmistamiseen. Materiaali kehitettiin tuottamaan tasaisempia seinäpintoja ja ruiskuvalun kaltaista laatua, joka ylittää olemassa olevat vaihtoehdot.
- DuraForm EX Black: Musta, iskunkestävä teollisuusmuovi, jolla on ruiskuvalettua polypropyleeni- (PP) ja ABS-muovia vastaava lujuus. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 188 °C.
- DuraForm Flex: Kestävä, kumimainen materiaali hyvällä repeytymiskestävyydellä ja puhkaisulujuudella.
- DuraForm GF: Lasitäytteinen teollisuusmuovi hyvällä jäykkyydellä, parannetulla lämmönkestolla ja isotrooppisilla ominaisuuksilla. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 179 °C.
- DuraForm PA: Kestävä teollisuusmuovi, tasapainotetuilla mekaanisilla ominaisuuksilla ja tarkalla pinnanlaadulla. Materiaalin HDT-lämpötila on @66PSI: 180 °C.

5.1.7.3 EOS

Suurin osa EOS muovimateriaaleista perustuu Polyamidi 12 muoviin, joka myös tunnetaan nimellä Nylon 12. Nylon 12 mekaaniset ominaisuudet, kuten kovuus, vetolujuus ja kulumiskestävyys ovat vastaavia kuin nylon 6:lla ja nylon 66:lla.

Matala veden imeytyminen ja tiheys, 1.01 g/mL, on seurausta muovin suhteellisen pitkistä hiilivetyketjusta, joka myös antaa materiaalille sen mittastabiiliuden sekä lähes parafiinivahamaisen rakenteen. Nylon 12 kestää myös hyvin kemikaaleja ja se on epäherkkä väsymismurtumille. PA12:sen käyttölämpötila-alue on -70 - 80 °C ja sulamispiste

190 °C. Lämpötilojen kestossa jopa 300 °C lämpötilat ovat mahdollisia käyttämällä lisäaineita ja pinnoitteita.

EOS muovi materiaalit (polymeeri – täyteaine):

- Alumide (PA12-MD(Al))
 - Alumide on metallinharmaa alumiinitäyteinen polyamidi 12 jauhe, jonka ominaisuuksiin kuuluu korkea jäykkyys, metallinen ulkonäkö ja jälkikäsittelyn helppous. Laser sintratuilla Alumide kappaleilla on erinomainen mittatarkkuus, hyvin tasapainotettu tiheys-jäykkyys suhde, parannettu lämmönjohtuminen ja niiden jälkikäsittely on helppoa.
 - HDT (@66 psi/0.45 MPa): 175 °C, VST (50 °C/h 50N): 169 °C, MT (20 °C/min): 176 °C
- CarbonMide (PA12-CF)
 - Kivihiilen musta, hiilikuitutäyteinen polyamide 12 materiaali, jolla on erinomainen jäykkyys ja maksimoitu paino-lujuus suhde. CarbonMide materiaalista lasersintratuilla kappaleilla on erinomainen jäykkyys, lujuus ja kovuus. Lisäksi kappaleet ovat kevyitä ja sähköä johtavia.
 - MT (20 °C/min): 176 °C
- EOS PEEK HP3 (PEEK)
 - EOS PEEK HP3 kuuluu Polyaryletherketone (PAEK) muovien ryhmään. Tämä puoli-kristallinen termoplastinen materiaali kehitettiin alun perin EOS:in uudelle korkean lämpötilan järjestelmällä EOSINT P 800. Lasersintratut kappaleet saavuttavat jopa 95 MPa vetolujuuden ja jopa 4400 MPa kimmokertoimen (Yong's modulus). Nämä arvot ovat jopa 100 % korkeampia kuin tähän mennessä markkinoita dominoineilla PA 12 and PA 11 materiaaleilla. Materiaalin jatkuva käyttölämpötila on alkaen 180 - 260 °C astetta riippuen käyttökohteesta, 180 °C (mekaaninen dynaaminen), 240 °C (mekaaninen staattinen) ja 260 °C (elektroniikka). Materiaalin ominaisuuksia ovat: erinomainen suorituskyky korkeissa lämpötiloissa, korkea kulutuskestävyys, merkittävä kemikaalien kestävyys, erittäin hyvä palonkesto (sekä savu ja myrkyllisyys käyttäytyminen), hyvä hydrolyysin kestävyys, potentiaalinen bioyhteensopivuus ja sterilisoitavuus.
 - HDT (@1.80 MPa): 165 °C, MT (20 °C/min): 372 °C
- PA 1101 (PA11)
 - PA 1101 on valkoinen polyamidi 11 jauhemateriaali, joka on optimoitu lasersintrauskäyttöön. Materiaali on tehty uudistuvista raaka-aineista (risiiniöljy). Materiaalin ominaisuuksia ovat elas-

tisuus, korkea iskunkestävyys ja murtolujuus sekä erinomainen kemikaalien kestävyys (varsinkin hiilivedyt, aldehydit, ketonit, substraatit ja suolat, alkoholit, polttoaineet, pesuaineet, öljyt ja rasvat). Materiaalin tyypillisiä käyttökohteita ovat: mekaanisesti kuormitetut toiminnalliset prototyypit ja pitkä-ikäiset sarjoitetut osat (kuten saranat), sisustan törmäyskestävyyden kannalta tärkeät osat autoteollisuudessa (osat eivät sirpaloidu) ja etenkin pienistä keskikokoisiin osiin ohuet seinämät ja säleikkörakenteet.

- Materiaalilla on solumyrkyllisyyteen liittyen DIN EN ISO 10993-5 mukainen hyväksyntä. Ennen käyttöä kohteissa joissa hyväksyntä tulee kyseeseen, on syytä varmistaa, missä muodossa materiaali on saanut kyseisen hyväksynnän (jauhe, huokoinen kappale, pintakäsittely kappale vai kaikki näistä).

* HDT (@0.45 MPa): 180 °C, MT (20 °C/min): 201 °C

- PA 1102 black (PA11)

- PA 2105 (PA12)

- PA 2200 Balance 1.0 (PA12)

- Lasersintraatut kappaleet omaavat muun muassa korkean lujuuden ja jäykkyyden, hyvän kemikaalien kestävyuden ja erinomaisen pitkä-ikäisen tasalaatuisen käyttäytymisen. Kappaleet voidaan viimeistellä usein eri tavoin, esimerkiksi metallisointi, polttomaalaus, värähtelyhionta, kastovärjäys, liimaus, jauhe pinnoitus ja nukkaruiskutus.

- VST (50 °C/h 50N): 163 °C, MT (50 °C/min): 176 °C

- PA 2200 Performance 1.0 (PA12)

- PA 2200 Speed 1.0 (PA12)

- PA 2200 Top Quality 1.0 (PA12)

- PA 2200 Top Speed 1.0 (PA12)

- PA 2201 (PA12)

- PA 2202 black (PA12)

- PA 2210 FR (PA12 FR)

- PA 2241 FR (PA12)

- PA 3200 GF (PA12-GF)

- PA 3200 GF on valkeahkoa lasitäytteistä polyamidi 12 jauhetta, jonka ominaisuuksiin kuuluu erinomainen jäykkyys yhdistettynä hyvään murtovenymään.

- Materiaalista valmistetuilla lasersintraatuilla osilla on korkea jäykkyys, mekaaninen kulutuskestävyys, mittatarkkuus ja yksityiskohteresoluutio, hyvä lämpökuormitettavuus ja prosessoitavuus, erinomainen pinnanlaatu ja pitkäikäinen käyttäytyminen. Tyypillisiä käyttökohteita materiaalista valmistetuille osille ovat käyttöosat

autojen moottorialueilla, syvävetomuotit tai muut käyttökohteet, joissa vaaditaan erityistä jäykkyyttä, korkeaa taipumislämpötilaa ja hyvää kulumiskestävyyttä.

- HDT (@66 psi/0.45 MPa): 157 °C, VST (50 °C/h 50N): 166 °C, MT (20 °C/min): 176 °C

- PrimePart PLUS PA 2221 (PA12)
- PrimePart ST PEBA 2301 (TPA)
- PrimeCast 101 (PS)
- PrimeCast 101, Harmaa polystyreeni pohjainen muovijauhemateriaali, joka soveltuu erityisen hyvin vahamallivaluihin sen erinomaisen mittatarkkuuden, korkean pinnanlaadun ja Matalan sulamispisteen puolesta. Polystyreeni on hyvin yleinen helposti muokattavissa oleva muovilaatu, jolla on huono UV-kestävyys. Tyypillisesti PrimeCast materiaalia käytetään kertakäyttömuottien valmistuksessa kipsi ja keraamikuorien valuprosesseissa. Materiaali on optimoitu jättämään minimaalisesti tuhkaa polttamisen yhteydessä. Toinen käyttökohde materiaalille on päävalumuottien valmistus alipainevaluprosessille, on kuitenkin suotavaa imeyttää osiin esimerkiksi epoksia jotta kapaleesta tulee tiivis, ennen alipaineprosessia.

Lisätietoja:

<http://www.eos.info/material-p>

<http://eos.materialdatacenter.com/eo/en>

<http://www.3dformtech.fi/3d-tulostus/materiaalit>

<http://www.3dformtech.fi/lataukset/Material-Data-PA2200.pdf>

<http://www.matbase.com/material-categories/natural-and-synthetic-polymers/engineering-polymers/material-properties-of-polyamide-12-nylon-12-pa-12.html#properties>

5.2 Metallit

5.2.1 Yleistä metalleista

Metallit ovat nopeasti kasvava alue teollisessa 3D-tulostuksessa. Riippuen lisäävän valmistuksen menetelmästä käytettävä materiaali voi olla jauhetta, lankaa tai levyjä.

Jotkut lisäävän valmistuksen prosessit voivat käyttää minkälaista jauhemateriaalia tahansa, kun taas toiset vaativat jauheelta tietynlaista partikkelimuotoa ja kokoa. Tästä syystä laitevalmistajat työskentelevät

tiivisti materiaalivalmistajien kanssa, jopa niin, että laitevalmistajat ovat ostaneet materiaalivalmistus-yrityksiä osaksi omaa yritystään, materiaalin saatavuuden takaamiseksi.

Jauhemateriaalit

Jauhemateriaalin partikkelikoko ja muoto riippuvat sen valmistukseen käytettävistä prosesseista. Näitä prosesseja ovat mm. vesi- ja kaasuatomisointi.

Vesiatomisointiprosessia käytetään reagoimattomille materiaaleille ja se on kaikkein yleisin ja halvin tekniikka metallijauheiden tuottamiseen. Sulaa metallia valutetaan suuttimesta kammioon ja sulaan metallivirtaan ruiskutetaan vettä korkealla paineella toisesta suuttimesta. Tämä lisää prosessiin lisää energiaa yhdistettynä nopeaan jäähtymiseen, joka synnyttää kovia ja epäsäännöllisen muotoisia jauhepartikkeleita. Epäsäännöllinen muoto on vähemmän haluttu lisäävän valmistuksen menetelmiä käytettäessä, koska se kasvattaa virtausaikaa ja mahdollisesti vähentää pakkaustiheyttä. Kuitenkin myös vesiatomisointiprosessissa on mahdollista tuottaa pyöreitä partikkeleita ja optimoida partikkelikoko lisäävän valmistuksen tarpeisiin optimaalisissa olosuhteissa.

Kaasuatomisoituja jauhemateriaaleja suositaan yleensä lisäävässä valmistuksessa vesiatomisoitujen jauheiden sijaan, jonka takia kaasuatomisointi on yleisin tekniikka jauhemateriaalien valmistuksessa lisäävää valmistusta varten. Prosessissa metallijauhe sulatetaan kammiossa, jossa on ilmaa, inerttiä kaasua tai tyhjiö. Sula metalli pakotetaan suuttimen läpi ja kaasua (ilma, typpi, helium tai argon) suihkutetaan korkealla nopeudella sulaan metalliin, joka hajottaa sen pieniksi pisaroiksi. Rajapintajännitykset metallipisaroiden ja kaasun välillä pyöristää pisarat luonnollisesti ja pisarat jäähtyvät pudotessaan atomisointitornin pohjalle, josta jauhe kerätään talteen.

Kaasuatomisointia käytetään eniten rauta, nikkeli ja koboltti seoksille, mutta prosessi käy myös alumiini ja titaani seoksille. Kaasuatomisointiprosessista on olemassa muutamia variaatioita, kuten plasma-atomisointi, elektrodi-induktio-sulatus-kaasu-atomisointi ja keskipakoisatomisointi.

Plasma-atomisointia käytetään korkealaatuisen ja erittäin pyöreäpartikkelisen jauheen luomisessa, mutta prosessi on rajoittunut seoksiin, jotka voidaan muovata lankamateriaaliksi, koska prosessissa metalliseos sulatetaan langasta.

Elektrodi-induktio-sulatus-kaasuatomisointi soveltuu kaikille seoksille, mutta se on kaikkein edullisin ratkaisu reaktiivisten, kuten titaani-seosten kanssa. Tanko materiaalia pyöritetään ja sulatetaan induktiokelalla ennen sen valuttamista kaasuvirtaan atomisointikammioon. Prosessi on halpa, puhdas ja hyvä prosessi pienille erille, sekä pienten jauhepartikkelien luomiseen.

Keskipakoisvoima-atomisointi on hyvä vaihtoehto kaasua ja plasma-atomisoinnin välillä. Se soveltuu parhaiten suurille vähemmän reaktiivisille seosserille, joilla on matala sulamispiste, mutta sillä voidaan myös tuottaa jauheita nikkelpohjaisista supermetalliseoksista.

Vaikka kaikki metallijauheet eivät ole erittäin reaktiivisia ilman kanssa, jauheiden reaktiivisuus kasvaa korkeissa lämpötiloissa, jonka takia lisäävän valmistuksen menetelmät, jotka sintraavat tai sulattavat metallijauheita, käyttävät myös inerttiä suojaavaa kaasua.

Lankamateriaalit

Kuten metallijauheiden kanssa, metallilankaa käytetään korkean lämpötilan prosesseissa, joka aiheuttaa tarpeen suojaakaasulle.

Levy materiaalit

Laminointiprosessissa metalleja ei joko lämmitetä, tai lämmitetyt alueet jäävät metallilevyjen väliin suojaan, jonka takia suojaakaasu ei ole välttämätön tämän materiaalimuodon kanssa.

Yleiset metallin ominaisuudet

Tämä raportti ei pyri esittämään kaiken kattavaa tietoa metallien ominaisuuksista. Metallien ominaisuuksista raportissa esitetään vain veto- ja murtolujuus- ja murtovenymäärvoja.

Vetolujuus (*Tensile strength* tai *Ultimate strength*) (R_m) [MPa] on maksimijännitys, jonka materiaali kestää venytettäessä tai vedettäessä ennen pettämistä. Jotkut materiaalit pettävät terävästi ilman plastista muodonmuutosta, jota kutsutaan haurasmurtumaksi. Toiset mellomat materiaalit kokevat plastista muodonmuutosta ja mahdollisesti kuroutumista ennen murtumaa.

Myötölujuus (*Yield strength*) (R_e) [MPa] on jännitys jossa rasitettu materiaali lopettaa elastisen käyttäytymisen ja alkaa myötäämään. Joh-tuen myötöpisteen mittaamisen rajoituksista, teollisuudessa määritellään yleensä toinen myötöpiste, jossa pysyvä muodonmuutos voidaan mitata. Tämä piste tunnetaan käsitteenä ”*myötöpiste tietyllä etäisyydellä*”. Myötöpiste 0,2 % muodonmuutoksen jälkeen ($R_{p0.2}$) on yleisin materiaalivalmistajien ja suunnittelijoiden käyttämä myötölujuusarvo. Elastinen raja-arvo on suurin voima jolle materiaali voidaan altistaa siten, että kun voima vapautetaan välittömästi, materiaali palaa alkuperäiseen kokoonsa ja muotoonsa.

Murtovenymä (*Elongation at break*) (A), on suhde muuttuneen pituuden ja alkuperäisen pituuden välillä kappaleen murtumisen jälkeen. Se kertoo materiaalin kyvystä vastustaa muodonmuutoksia ilman murtumista.

Lisätietoja:

<http://3dprintingindustry.com/2015/09/17/a-look-into-powder-materials-for-metal-3d-printing/>

<http://materion.com/~media/Files/PDFs/Alloy/Newsletters/Technical%20Tidbits/Issue%20No%2047%20-%20Yield%20Strength%20and%20Other%20Near-Elastic%20Properties.pdf>

5.2.2 Materiaaleja lisäävän valmistuksen -järjestelmävalmistajilta

Tässä kappaleessa listataan joitakin LV-järjestelmävalmistajien metallimateriaaleja ja niiden materiaaliominaisuuksia. On tärkeää myös huomioida, että vaikka valmistajalla ei olisi materiaalia, joka täyttää halutut kriteerit, suurin osa valmistajista luo uusia materiaaleja annettujen vaatimusten mukaisesti.

5.2.2.1 ARCAM

Arcam hankki omistukseensa AP&C materiaalivalmistajan tuotannon helmikuussa 2014. Tätä ennen AP&C oli toiminut Arcamin avaintoimittajana titaanijauheen osalta vuodesta 2006 lähtien.

AP&C metallijauheet tehdään plasma-atomisointi teknologialla ja jaetaan tarkkoihin partikkelikokojakaumiin (PSD) käyttämällä ultraääni väristimellä avustettuja RST -siivilöitä. Tämän lisäksi alle 25 µm partikkelit voidaan poistaa käyttämällä kaasulajittelutekniikkaa. Pienten partikkelien poistaminen reaktiivisilla metallijauheilla kuten titaanilla voi parantaa kappaleen lopullista kemiallista koostumusta sekä hienojakoisen metallijauheen virtausominaisuuksia.

AP&C toimittaa teknillisesti puhdasta titaania (CP-Ti) ja Ti-6Al-4V jauhe materiaaleja viidellä eri partikkelijakaumalla. AP&C voi myös atomisoida kustomoituja materiaaleja, kuten erikois-titaaniseoksia, nikkeli- ja koboltti supermetalliseoksia, niobiumia, molybdeeniä, zirkoniumia, tantaalia ja näiden seoksia.

Lisätietoja:

<http://advancedpowders.com/arcam/>

<http://advancedpowders.com/plasma-atomization-technology/our-technology/>

5.2.2.2 Concept Laser

Concept Laser yrityksellä on organisaation sisäinen metallografia ja materiaalintestauslaboratorio, jossa materiaalin laatu tarkastetaan ennen toimitusta asiakkaalle. Materiaalitestit sisältävät:

- Materiaalirakenteen testaus (koostumus ja partikkelikokojakauma, yms.)
- Vetolujuus materiaalin staattisten ja mekaanisten ominaisuuksien selvittämiseksi
- Uusien materiaalien kehitys ja teolliset sovellutukset
- Täydentävät laatutestaukset kolmannen osapuolen materiaaleille ennen asiakkaalle toimitusta
- Kattavat analyysit testi kappaleiden valmistuksesta ennen laitteistojen toimitusta asiakkaalle

Concept laser toimittaa mm. seuraavia materiaaleja:

- Stainless Steel CL 20ES
 - Ruostumaton teräs (jauhe), 1.4404 mukainen kemiallinen koostumus, X 2 CrNiMo 17 13 2, 316L / SUS 316
- Aluminum alloy CL 30AL / CL 31AL
 - Alumiiniseos (jauhe), kemiallinen koostumus: (CL 30AL): DIN EN 1706 AlSi12(a) / ADC 12, (CL 31AL): DIN EN 1706 AlSi10Mg(b)
- Titanium alloy CL 41TI ELI
 - Titaaniseos TiAl6V4 ELI (jauhe), kemiallinen koostumus ja seostus: ASTM F136-02a (ELI Grade 23)
- Commercially Pure Titanium CL 42TI
 - Teknillisesti puhdas titaani (jauhe), kemiallinen koostumus: ASTM F67 ja ASTM B348 (Grade 2)
- Hot-work steel CL 50WS
 - Kuumatyöstöteräs 1.2709 (jauhe)
- Bronze alloy CL 80CU
 - Pronssiseos (jauhe)
- Stainless hot-work steel CL 91RW
 - Ruostumaton kuumatyöstöteräs (jauhe)
- Precipitation hardening stainless steel CL 92PH
 - Erkauttamiskarkaistu ruostumaton teräs (jauhe) (17-4 PH), kemiallinen koostumus: ASTM A564 / A564M – 13 UNS S17400 / SUS 630
- Nickel-based alloy CL 100NB
 - Nikkelipohjainen seos (jauhe) (Inconel 718), kemiallinen koostumus: ASTM B 637 UNS 07718
- Nickel-based alloy CL 101NB
 - Nikkelipohjainen seos (jauhe) (Inconel 625), kemiallinen koostumus: ASTM B446-03 UNS N06625
- CoCrW-alloy powered by Dentaurem remanium® star CL
 - CoCrW-seos (jauhe), kemiallinen koostumus: DIN EN ISO 9693 / DIN EN ISO 22674, Type 5
- Titanium alloy powered by Dentaurem rematitan® CL
 - Titaani seos (jauhe), kemiallinen koostumus: DIN EN ISO 9693 / DIN EN ISO 22674, Type 4

5.2.2.3 SLM

SLM toimittaa mm. seuraavia metallijauheita: ruostumaton teräs, työkaluteräs, alumiini, titaani, koboltti-kromi, inconel ja supermetalli-seokset. SLM toimittaa asiakkailleen myös muita jauhemateriaaleja asiakkaan toiveiden mukaan.

Taulukko 5.1. SLM- metallimateriaalit, minimiarvot veto(Rm)- ja murtolujuuksille (Rp0.2 %) sekä murtovenymälle(A)

Minimiarvot	Rm [MPa]	Rp0.2 [MPa]	A [%]
1.4540 (15-5PH)	1050	1000	12
1.4404 (316L)	605	511	31
1.2344 (H13)	1730	-	-
1.2709	989	804	9
Hastelloy X	748	567	14
Inconel 625	920	666	31
Inconel 718	952	622	25
Inconel 939	974	694	26
CoCr (F75)	1030	815	-
AlSi12	389	191	5,1
AlSi10Mg	386	216	5
AlSi7Mg	277	132	3,3
TiAl6V4	1229	1055	6
TiAl6Nb7	>972	>865	>10
Reintian	>290	>180	>20

Lisätietoja:

http://www.stage.slm-solutions.com/index.php?index_en

5.2.2.4 Stratasy

Stratasy toimittaa asiakkailleen erilaisia metallijauheita, joihin kuuluu mm: ruostumaton teräs, alumiini, Inconel, titaani ja koboltti-kromi. Myös räätälöityjä seoksia kehitetään ja toimitetaan asiakkaan vaatimusten mukaan.

Taulukko 5.2. Stratasy:in metallimateriaalit, minimiarvot veto(Rm)- ja murtolujuuksille (Re) sekä murtovenymälle(A)

Minimiarvot	Rm [MPa]	Re [MPa]	A [%]
Stainless Steel			
17-4 PH	930	450	20
Stainless Steel 316L	510	430	25
Aluminum AlSi10Mg	300	235	1
Inconel 625	850	565	37
Inconel 718	930	584	26
Titanium Ti64	1090	950	9
Cobalt Chrome			
CoCrMo	1050	700	20

Lisätietoja:

<https://www.stratasysdirect.com/>

<http://www.stratasys.com/solutions/stratasys-advanced-materials>

<https://www.stratasysdirect.com/materials/direct-metal-laser-sintering/>

5.2.2.5 3DSystems

Taulukko 5.3. 3DSystems:in metallimateriaalit, minimiarvot veto(R_m)- ja murtolujuuksille (R_e) sekä murtovenymälle (A).

Minimiarvot	R_m [MPa]	R_e [MPa]	A [%]
Maraging steel	1060	810	8
Aluminum AlSi12	220	160	16
CoCrMo	1160	800	13

Maraging-teräs on korkealujuuksinen ja -kovuuskainen materiaali, jolla on hyvä korroosio- ja kulumiskestävyys. Se on helposti lämpökäsiteltävissä ja sillä on hyvä hitsattavuus ja koneistettavuus. Materiaalia käytetään kulutuskestävyyttä vaativiin sekä korkean suorituskyvyn teollisiin kappaleisiin, mm. työkaluissa sekä ruiskuvalu-, valu- ja suulakepuristusmuoteissa.

Alumiiniseos AlSi12 on kevyt materiaali, jolla on suuri lujuus-painosuhde ja hyvät lämpöominaisuudet. Sitä käytetään teollisen tason prototyyppi- ja tuotantokappaleissa sekä varaosissa, auto-, avaruus-, ja ilmailuteollisuudessa. Se sopii hyvin myös ohutseinämäisille osille, kuten lämmönvaihtimille.

CoCrMo seos on korkealujuuksista materiaalia, hyvällä elastisuudella ja korroosiokestävyydellä. Materiaalilla on myös korkea lämmön- ja erinomainen kulutuskestävyys. Sitä käytetään turbiinien ja moottorien osissa, mekaanisissa osissa jotka vaativat kulutus- ja korroosiokestävyyttä, ohutseinämäisissä tai yksityiskohtaisissa kappaleissa, sekä suunnittelu ja kellosepän tuotteissa.

Lisätietoja:

<http://www.3dsystems.com>

http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/maraging_steel_us_0615_web.pdf

http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/alsi12_alloy_us_0615_web.pdf

http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/cocrmo_alloy_us_0615_press.pdf

5.2.2.6 EOS

EOS valmistaa ja myy metallijauhemateriaaleja mm: maraging teräs, ruostumaton teräs, nikkeli- ja koboltti-kromi seoksista, titaanista ja alumiinista.

Lisätietoja:

- http://www.eos.info/additive_manufacturing

- <http://www.eos.info/material-m>

Taulukko 5.4. EOS:in metallimateriaalit, minimiarvot veto(R_m)- ja murtolujuuksille (R_e ja $R_{p0.2}$ %) sekä murtovenymälle (A).

Minimiarvot	R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_e [MPa]	A [%]
MaragingSteel MS1	1000	900	-	6
StainlessSteel GP1 (17-4)	850	-	530	25
StainlessSteel PH1	1150	-	865	10
StainlessSteel 316L	485	-	380	25
NickelAlloy IN625	827	414	-	30
NickelAlloy IN718	930	584	-	22
NickelAlloy HX	680	520	-	21
CobaltChrome MP1 + SR	1000	550	-	20
CobaltChrome SP2	1350	850	-	3
Titanium Ti64	930	860	-	10
Titanium Ti64ELI	860	795	-	10
Aluminium AlSi10Mg	335	215	-	10

Lyhyt materiaalikuvaus:

- **Maragingteräs:**

- EOS MaragingSteel MS1: 18 Mar 300/1.209
 - MS1 on martensiittisesti karkenevaa terästä, jonka koostumus vastaa US 18 % Ni Maraging 300, European 1.2709 and German X3NiCoMoTi 18-9-5 luokitteluja. Tällainen teräs on ominaisuuksiltaan erittäin lujaa ja kovaa. Kappaleet ovat helposti koneistettavissa tulostuksen jälkeen, ja voidaan helposti jälkikäsitellä kovuudeltaan yli 50 HRC arvoon ja niillä on erittäin hyvä kiilloitettavuus.

- **Ruostumaton teräs:**

- EOS StainlessSteel GP1: 17-4/1.4542
 - GP1 kemiallinen koostumus vastaa US 17-4, European 1.4542 and German X5CrNiCuNb16-4 luokitteluja. Tällä teräksellä on hyvät mekaaniset ominaisuudet, etenkin venyvyys laserprosessoidussa tilassa ja sitä käytetään laajasti erilaisissa tekniikan sovelluksissa. Materiaali soveltuu toiminnallisiin metalli prototyypikappaleisiin, pienerä tuotantoon, yksilöllisiin tuotteisiin ja varaosiin.
 - GP1 materiaalista valmistettuja osia voidaan koneistaa, kipinätyöstää, hitsata, kuulapuhaltaa, kiillottaa ja pinnoittaa.
- EOS StainlessSteel PH1: 15-5/1.4540
 - PH1 on esiseostettu ruostumatonta terästä hienojakoisena jauheena, jonka kemiallinen koostumus vastaa DIN 1.4540 ja UNS S15500 luokitteluja.
 - Materiaalilla on hyvä korroosionkestävyys ja erinomaiset mekaaniset ominaisuudet, etenkin erkauttamiskarkaistussa muodossaan. Tämän tyyppistä terästä käytetään laajasti useissa erilaisissa terveysalan-, avaruusalan- ja tekniikan sovelluksissa. Tyypillisiä käyttökohteita ovat osat, jotka vaativat korkeaa korroosionkestoa, sterilisoitavuutta tai erityisen suurta kovuutta ja lujuutta.
 - Materiaalin käyttökohteisiin kuuluvat funktionaaliset metalliset prototyypit, pienerä ja yksilölliset tuotteet, sekä varaosat. Standardi prosessiparametreina käytetään kokonaan sulatusta, 20 ?m kerroskorkeudella. Standardi parametrejä käyttämällä mekaaniset ominaisuudet ovat hyvin samankaltaisia kaikissa suunnissa. PH1 materiaalista valmistettuja osia voidaan koneistaa, kipinätyöstää, hitsata, kuulapuhaltaa, kiillottaa ja pinnoittaa.
- EOS StainlessSteel 316L: 1.4404/UNS S31673
 - 316L materiaalista valmistettujen osien kemiallinen koostumus

vastaa ASTM F138 “Standard Specification for Wrought 18Cr-14Ni-2.5Mo Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implants (UNS S31673)”-luokitusta. Tällaisilla ruostumattomilla teräksillä on piirteinä hyvä korroosionkesto, sekä todistus siitä, että materiaalissa ei ole liukenevia ainesosia solumyrkyllisinä pitoisuuksina.

- 316L materiaalista valmistettuja osia voidaan koneistaa, kipinätyöstää ja kiillottaa suoraan valmistuksen jälkeen tai poistaa jännitystasoja (AMS2759) tarvittaessa. Liuoshehkus ei ole välttämätön, koska valmistuksen jälkeiset mekaaniset ominaisuudet ovat halutuissa arvoissa (ASTMA403). Osat eivät ole ideaalilämpötila alueellaan 427 °C - 816 °C välillä, jossa tapahtuu kromi karbidien saostumista. Kerroksittaisesta valmistuksesta johtuen kappaleilla on tietynlaista anisotrooppisuutta, joka voidaan nähdä mekaanisissa ominaisuuksissa.
- Materiaalin käyttökohteita ovat mm. elämäntapa/kuluttaja-kellot, muut korut, silmälasikehykset, koristeet, toiminnalliset osat elektroniikka koteloinneissa ja tarvikkeissa. Lisäksi materiaalia käytetään lähes kaikilla teollisuuden aloilla korroosionkestävänä perusmateriaalina.

- **Nikkeliseokset:**

- EOS NickelAlloy IN 718: Inconel 718, UNS N07718, AMS 5662, mat. #2.4668
- IN718 on nikkelpohjainen lämpöä kestävä metalliseos. Materiaalin koostumus vastaa UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664, W.Nr 2.4668, ja DIN NiCr19Fe19NbMo3 luokitteluja. Tällaisen erkauttamiskarkaistun nikkeli-kromi seoksen ominaisuuksiin kuuluu hyvä veto-, väsymislujuus sekä ryömintä- ja puhkeamislujuus aina 700 °C lämpötiloissa. Seoksella on myös erinomainen korroosionkestävyys. Materiaali on ideaalinen korkean lämpötilan käyttökohteisiin, kuten kaasuturbiini- instrumentaatio-, energiantuotanto ja prosessiteollisuuden osat, jne. Materiaalilla on myös erinomaiset kylmäominaisuudet ja potentiaalia kylmyydenkestoa vaativiin sovelluksiin.
- IN718 materiaalista valmistetut osat voidaan helposti karkaista erkauttamiskarkaisu -jälkikäsitteilyllä. Osia voidaan koneistaa, kipinätyöstää, hitsata, kuulapuhaltaa, kiillottaa ja pinnoittaa sekä suoraan valmistuksen jälkeen että erkauttamiskarkaistussa tilassa. Kerroksittaisesta valmistusmenetelmästä johtuen osat ovat anisotrooppisia.

- EOS NickelAlloy IN625: Inconel 625, UNS N06625, AMS 5666F, mat. #2.4856 etc.
 - Erkautumis ja lämpöresistiivisen nikkeli-kromi seoksen IN625 kemiallinen koostumus vastaa UNS N06625, AMS 5666F, AMS 5599G, W.Nr 2.4856, DIN NiCr22Mo9Nb koostumuksia. Sen ominaisuuksiin kuuluu korkea veto-, ryömintä- ja puhkaisulujuus. IN625 materiaalilla oletetaan olevan hyvä korroosionkesto. Materiaali soveltuu myös monimutkaisten osien valmistukseen korkean lämpötilan kohteisiin joissa vaaditaan suurta lujuutta.
 - IN625 materiaalista valmistetut osat voidaan lämpökäsitellä ja materiaaliominaisuudet voivat vaihdella tietyissä rajoissa. Osia voidaan koneistaa, kipinätyöstää, hitsata, kuulapuhaltaa, kiillottaa ja pinnoittaa sekä suoraan valmistuksen jälkeen että lämpökäsiteltynä. Kerroksittaisesta valmistuksesta johtuen osilla on tietty anisotropia.
- EOS NickelAlloy HX: UNS N06002
 - HX nikkelseos on lämpöä ja korroosiota kestävä metalliseos jauhe, joka on tarkoitettu EOSINT M 280 järjestelmälle. Materiaali on nikkeli-kromi-rauta-molybdeenin seos hienojakoisena jauheena, jonka koostumus vastaa UNS N06002 luokittelua. Tämän tyyppisellä seoksella on ominaisuutena korkea lujuus ja hapettumiskestävyys myös korkeissa lämpötiloissa. Materiaalia käytetään usein paikoissa joissa lämpötila voi nousta jopa 1200 °C saakka. Materiaalin käyttökohteita löytyy avaruusteollisuudesta, mm. kaasuturbiinin osat.
 - HX Materiaalista valmistetut osat voidaan lämpökäsitellä ja materiaaliominaisuuksia voidaan vaihdella määrätyn alueen sisällä. Osia voidaan koneistaa, kipinätyöstää, hitsata, kuulapuhaltaa, kiillottaa ja pinnoittaa sekä suoraan valmistuksesta, että liuotushehkutuksen jälkeen.

- **Koboltti-kromi seokset:**

- EOS CobaltChrome MP1: CoCrMo super alloy, UNS R31538, ASTM F75
 - MP1 on koboltti-kromi-molybdeenin pohjainen supermetalliseos. Tämän supermetalliseoksen ominaisuuksiin kuuluu erinomaiset mekaaniset ominaisuudet, kuten lujuus ja kovuus jne. Materiaaliominaisuuksiin kuuluvat myös korroosio- ja lämpötila-kestävyys. Tämän kaltaisia seoksia käytetään yleisesti terveydenhuollon sovelluksissa, kuten hammashoito ja implantit (yleinen Euroopassa, mutta vähemmän yleinen Pohjois-Amerikassa). Käyttökohteita

siin kuuluvat myös korkean lämpötilan tekniset sovellukset, mm. lentokoneiden moottorit.

- MP1 materiaalista valmistettuja kappaleita voidaan koneistaa, kiipinätyöstää, hitsata, kuulapuhaltaa, kiillottaa ja pinnoittaa tarvittaessa.
- EOS CobaltChrome SP2: CoCrMo super alloy
 - SP2 on erikois-koboltti-kromi supermetalliseos hammaskruunujen ja siltojen valmistamiseen. Materiaali on CE -sertifioitu hammasteollisuuden käyttöön (CE 0537). Tällä vakiintuneella hammasproteesimateriaalilla on ollut huomattavaa kysyntää viime vuosina ja se on hyvin kustannustehokas verrattuna arvokkaisiin metalliseoksiin.
 - Materiaalin jälkikäsittelystä löytyy tarkempia tietoja valmistajan sivuilta.

- **Titaani:**

- EOS Titanium Ti64 is a Ti6Al4V alloy
 - Tämä hyvin tunnettu kevyt seos omaa erinomaiset mekaaniset ominaisuudet ja korroosiokestävyyden sekä pienen ominaispainon ja bioyhteensopivuuden.
 - EOS Titanium Ti64 materiaalista valmistetut osat omaavat ISO 5832-3, ASTM F1472 ja ASTM B348 luokitteluja vastaavan kemiallisen koostumuksen.
 - Tämä materiaali on ideaalinen moniin korkean suorituskyvyn teknisiin sovelluksiin, esimerkiksi lentoteollisuudessa ja moottoriurheilussa sekä bioyhteensopivien implanttien valmistuksessa. Kerroksittaisesta valmistuksesta johtuen osilla on tietty anisotropia, jota voidaan vähentää tai poistaa kokonaan sopivilla lämpökäsittelyillä.
- EOS Titanium Ti64ELI: Ti6Al4V ELI (extra-low interstitials)
 - Materiaalin erinomaisista mekaanisista ominaisuuksista, korroosiokestävyydestä sekä korkeasta puhtaudesta johtuen kevytmetalliseos Ti64ELI sopii vaativiin teollisiin käyttökohteisiin. EOSINT M 280 metalli järjestelmässä materiaalia voidaan käyttää korkeaa resoluutiota vaativiin sovelluksiin. Materiaalia käytetään yleisesti terveydenhuollon sovelluksissa. Kemiallisen koostumuksen ja teknisten ominaisuuksien puolesta Ti64ELI vastaa ASTM F 136 luokittelun vaatimuksia.

- **Alumiini:**

- EOS Aluminium AlSi10Mg

- Materiaali on tyypillinen valuseos hyvillä valuominaisuuksilla ja sitä käytetään tyypillisesti kappaleisiin, jotka ovat ohutseinämäisiä ja geometrisesti monimutkaisia. Materiaalilla on hyvä lujuus, kovuus ja dynaamiset ominaisuudet, jonka puolesta se soveltuu myös osille joita altistetaan suurille kuormituksille. AlSi10Mg seoksesta valmistetut osat ovat ideaalisia käyttökohteissa, joissa vaaditaan sekä hyviä lämpöominaisuuksia että keveyttä, esimerkiksi moottoriurheilu ja avaruusteollisuus.
- Materiaalista valmistettuja osia voidaan koneistaa, kipinätyöstää, hitsata, kuulapuhaltaa, kiillottaa ja pinnoittaa tarvittaessa.

5.2.2.7 ExOne

ExOne:n järjestelmät tukevat ainakin 16 eri jauhemateriaalia: kolmea hiekkamateriaalia, yhtä lasimateriaalia ja kahtatoista metallimateriaalia (316 and 420 stainless-steel/bronze matrix, 316 and 17-4 stainless-steel, IN alloy 625 and 718, iron-bronze matrix, iron-chrome-aluminum, chromite, cobalt-chrome, bonded tungsten and Tungsten carbide).

Table 5.5. ExOne metal materials, minimum values for tensile- and yield strengths and for elongation at break.

Min values	Rm [MPa]	Rp0.2 [MPa]	Re [MPa]	A [%]
SS 316 + Bronze	407	234	-	8
SS 420 + Bronze + A	492	427	-	7
Iron + Bronze	407	255	-	17
IN 625	669	290	-	41

ExOne SS 316 ja SS 420 ruostumaton teräs-pronssi-osia voidaan hitsata silikoni-pronssipuikkoa ja TIG-hitsausta käyttämällä. Karkaistut osat voidaan koneistaa perinteisesti, karkaisemattomilla katso ExOne:n suositukset.

Rauta-pronssi-materiaaleja voidaan koneistaa perinteisin menetelmin ja hitsata käyttämällä silikoni-pronssitankoa ja TIG-hitsausta.

IN Alloy 625 -materiaalilla on Inconel-materiaalille tyypillinen koneistettavuus ja sitä voidaan hitsata käyttämällä kaasu-volframi-kaari-hitsausta tai elektronisädehitsausta.

Lisätietoja:

<http://www.exone.com/Resources/Materials>

http://www.exone.com/Portals/0/ResourceCenter/Materials/X1_MaterialData_420SS.pdf

http://www.exone.com/Portals/0/ResourceCenter/Materials/X1_MaterialData_316SS.pdf

http://www.exone.com/Portals/0/ResourceCenter/Materials/X1_MaterialData_Iron.pdf

http://www.exone.com/Portals/0/ResourceCenter/Materials/X1_MaterialData_AlloyIN625.pdf

5.2.3 Kolmannen osapuolen metallijauhevalmistajat

Markkinoilla on lisäävän valmistuksen laitevalmistajia jotka sallivat ainoastaan valmistajan omien metallijauheiden käytön valmistamissaan laitteissa, valmistajan takuun menetyksen uhalla. Osa laitevalmistajista puolestaan ei itse tarjoa laitteiden käyttämää materiaalia vaan luottaa metallijauhevalmistajien tarjoamiin materiaaleihin. Markkinoilla on useita jauhevalmistajia joiden lukumäärästä, erilaisista valmistusprosesseista sekä laatujärjestelmistä johtuen metallijauheiden laatu ja hinta voi vaihdella hyvinkin paljon. Seuraavassa on listattu joitakin markkinoilla toimivia metallijauheiden valmistajia.

Sandvik Osprey

Yhtenä johtavista korkean suorituskyvyn kaasuatomisoidun metallijauheen valmistajista Sandvik Osprey on kehittänyt useita kaasuatomisoituja metallijauheita erityisesti lisäävän valmistuksen sovelluksiin.

Sandvik Osprey tarjoaa metallia myös muissa muodoissa, kuten tanko, ontto tanko, HIP -tuote, liuska, putki (putki, tuubi, saumaton) ja lanka.

Lisätietoja:

<http://smt.sandvik.com/en/products/metal-powder/additive-manufacturing/>

<http://smt.sandvik.com/en/products/osprey-ce-alloys-and-metal-powders/>

<http://smt.sandvik.com/en/products/metal-powder/list-of-materials/>

ATI Powder Metals

ATI:n metallijauheet tehdään kaasuatomisointiprosessilla. Yritys mainostaa olevansa maailman johtava tehtäväkriittisten metallien kehittäjä ja valmistaja yli viiden vuosikymmenen ajan. ATI:n metallijauheisiin kuuluvat: titaani, titaaniseokset sekä nikkeli- ja kobolttipohjaiset supermetalli seokset.

Lisätietoja:

<https://www.atimetals.com/businesses/powdermetals/Documents/PowderBrochure.pdf>

<https://www.atimetals.com/businesses/powdermetals/Pages/default.aspx>

Carpenter

Carpenter Powder Products (CPP) on yksi maailman suurimmista kaasuatomisoitujen metallijauheiden toimittajista. Carpenter tarjoaa metallia myös lanka ja nauhamuodossa.

Lisätietoja:

<https://www.cartech.com/toolsteelspowder.aspx>

Erasteel

Erasteel valmistaa metallijauheita useita eri prosesseja käyttäen: tyhjiö induktio sulatus (VIM) kaasuatomisointi, korkeapaine vesiatomisointi ja keskipakoisvoima-atomisointi pyörivän plasma elektrodi yksikön ja HIP -prosessin kanssa. Erasteel tarjoaa metalleja myös pyöreänä tankona, esikarkaistuna HSS materiaalina, litteinä tankoina, profiilitankoina, profiilireunoina, liuskoina ja levyinä.

Lisätietoja:

<http://www.erasteel.com/content/powder-metallurgy>

<http://www.erasteel.com/content/product-forms>

LPW Technology

LPW Technology tarjoaa useita metallijauheita, jotka on kehitetty erityisesti Laser Metal Deposition (LMD), Selective Laser Melting (SLM) ja Electron Beam Melting (EBM) lisäävän valmistuksen menetelmille.

Jauhemateriaalit on optimoitu tuottamaan luotettavia ja laadukkaita tuotteita.

LPW tarjoaa jauhemateriaaleja alumiinista, koboltista, nikkelistä, teräksestä, titaanista ja volframi-karbideista. LPW tarjoaa useilla eri menetelmillä valmistettuja jauhemateriaaleja, joilla kaikilla on omat etunsa ja heikkoutensa. Käytettyjä menetelmiä ovat kaasuatomisointi, vesiatomisointi, plasma-atomisointi, elektrodi induktio sulatus kaasuatomisointi ja keskipakoisvoima-atomisointi.

Lisätietoja:

<http://www.lpwtechnology.com/>

<http://www.lpwtechnology.com/technical-information/powder-production/>

TLS

TLS on saksalainen yritys, joka on erikoistunut erityisesti reaktiivisten ja korkeassa lämpötilassa sulavien metalleihin ja seoksiin. Metallijauheiden valmistuksessa he käyttävät elektrodi-induktio-sulatuskaasuatomisointia.

Valmistusprosessista johtuen metallijauheet ovat erittäin puhtaita ja partikkelimuodoltaan pyöreitä. Jauheet ovat vapaita keraamijäännöksistä ja ne sisältävät hyvin vähän happea. TLS atomisoi reaktiivisia materiaaleja, kuten titaania, titaaniseoksia, metalliyhdisteitä (esim. TiAl) ja sirkonia. Lisäksi TLS kykenee valmistamaan jauheita lähes kaikista metalleista ja seoksista, joiden sulamispiste voi olla aina ~2600 °C asti. Muita saatavilla olevia materiaaleja ovat alumiini, alumiiniseokset, kulta, kupari, magnesium, nikkeli, nikkelseokset, platina, harvinaiset maametallit, teräs ja vanadiini.

Lisätietoja:

http://www.tls-technik.de/e_1.html

GKN Hoeganaes

Hoeganaes on globaali, metallijauheita valmistava yritys. Yritys on yksi johtavista metallijauheiden kehittäjistä ja on ollut taustavoimana jauhemetallurgian teollisuuden kasvussa jo 65 vuotta. Hoeganaes on auttanut kasvua useilla uusilla teknologioilla, mukaan lukien käytön laajentaminen lisäävän valmistuksen sovelluksiin.

Lisätietoja:

<http://www.gkn.com/hoeganaes/products/Pages/default.aspx>

HC Starck

HC Stark on saksalainen yritys, joka aloitti toimintansa vuonna 1920 metallien ja malmien kauppayhtiönä. Nykyään H.C. Starck on yksi johtavista toimittajista volframi, molybdeeni, tantaali, niobium, renium, korkealaatuisten keraamien ja lämpöruiskutusjauheiden osalta.

H.C. Starck tarjoaa valikoiman vesi- ja kaasuatomoitettuja korkeaseostettuja metallijauheita, jotka on kaupallistettu AMPERSINT® tuotenimen alle. Korkeaseostetut metallijauheet sisältävät koboltti-, nikkeli- ja rauta pohjaisia seoksia, jotka on optimoitu innovatiivisille prosessiteknologioille. Asiakkaiden vaatimuksista yritys voi valmistaa tarkasti määriteltäviä AMPERSINT® jauheita, mm. äärimmäisen pienellä happi- ja hiilipitoisuuksilla. HC Stark on myös joustava materiaalmäärän suhteen, valmistusmäärä voi olla pienestä kokeiluerästä massatuotantoon.

Lisäävässä valmistuksessa käytettäviin AMPERSINT® jauheseoksiin kuuluvat mm. Ni-SA 625, Ni-SA 713, Ni-SA 718, Ni-SA 939, NiCrFe-Mo (HX), NiCoWCr (M004, M247), FeNiCoMo (18Ni300), 304L, 316L, 15-4PH, 17-4PH, 317F, CoCr (F75 ja kustomisoitu), Co HFA 1, Co HFA 6, Co HFA 12 and Co HFA 21. Muut standardi seokset ja kustomisoidut tuotantoratkaisut, kuin myös W, Mo, Ta, Nb ja niiden seokset ovat mahdollisia asiakkaan pyynnöstä.

Lisätietoja:

<https://www.hcstarck.com/en/home.html>

https://www.hcstarck.com/en/products/ampersintreg_atomized_metal_powders/additive_manufacturing.html

Praxair

Praxair on globaali yritys, jolla on noin 27000 työntekijää yli 50 maassa ja yritys on mukana lähes kaikilla teollisuudenaloilla. Praxair on mm. suurin teollisuuskaasujen toimittaja Pohjois- ja Etelä-Amerikassa. Lisäävän valmistuksen tarpeisiin yritys valmistaa korkealaatuisia metallijauheita ja korkean puhtaustason ilmakehän kaasuja. Metallijauheiden atomisointiprosessina yritys käyttää tyhjiö induktio sulatus kaasuatomointi (argon) -prosessia.

Lisätietoja:

<http://www.praxair.com/industries/additive-manufacturing-3d-printing>

Oerlikon metco

Oerlicon metco on globaali yritys joka toimii lähes kaikilla teollisuuden aloilla. Yritys toimittaa korkealaatuisia metallijauhemateriaaleja käyttämällä useaa eri valmistusprosessia, kuten inertti kaasuatomiointi, mekaaninen metallipinnoitus ja nestemetallurgia. Tuotteiden kemiallinen koostumus ja partikkelikoko jakauma on tarkasti kontrolloitu optimaalisen tuloksen saavuttamiseksi.

Oerlikonin metallic-lämpöruiskutusjauheet ovat hyväksytyjä maailmanlaajuisesti johtavilla laitevalmistajilla.

Lisätietoja:

<http://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-materials/thermal-spray-materials/metals-alloys-composites-blends/>

Nanosteel

NanoSteel valmistaa rauta-pohjaisia seoksia pinnoitteisiin, kalvoihin, jauhemetalleihin ja levyteräksiin. Autoteollisuudelle NanoSteel on kehittänyt patentoituja korkean lujuuden teräslaatuja, tuotteiden keventämiseksi. Öljy-, kaasu-, kaivos- ja energiantuotantoyrityksille NanoSteel on toimittanut metallipinnoitteita pidentämään tuotteiden elinikää suurimmassa osassa teollisuuden ääriolosuhteista. Teollisuuskäyttöön yritys on hakemassa kelpoisuuksia lisäävän valmistuksen metallijauhe portfoliolle.

Lisätietoja:

<https://nanosteelco.com/products/additive-manufacturing/>

5.3 Keraamit

Lithoz ja 3DCeram tarjoavat keraamitäytteistä fotopolymeeri-hartsimateriaalia. Jälkikäsitteilynä tehtävä sulatusuunikäsittely tuottaa 100 % keraamisen osan.

3D Systems ja Graphite Additive Manufacturing tarjoavat Accura CeraMAX materiaalia, joka on keraami-vahvistettua fotopolymeeri-hartsiliuosta.

ExOne toimittaa yhtä lasimateriaalia sidosaineruiskutusmenetelmään perustuvaan järjestelmäänsä natron kalkki (*soda lime*) -lasi.

Viridis3D tarjoaa keraamijauhemateriaaleja sidosaineruiskutusmenetelmään perustuvissa prosesseissa käytettäväksi.

Lisätietoja:

<http://oliviervanherpt.com/functional-3d-printed-ceramics/>

<https://i.materialise.com/materials/ceramics>

<http://www.shapeways.com/materials/ceramics>

<http://www.sculpteo.com/en/materials/>

https://www.hcstarck.com/en/products/advanced_ceramics.html

5.4 Hiekka

Voxeljet valmistaa sidosaineruiskutusmenetelmää käyttäviä 3D-tulostimia. Tulostimissa käytettäviä materiaaleja ovat mm. PMMA muovi ja kvartsihiekkä.

Hetitec Oy on erikoistunut metallivaluissa käytettävien hiekkavalumuottien valmistukseen 3D-tulostamalla tilauksesta. Yritys tulostaa hiekkamalleja myös muihin mahdollisiin sovelluksiin. Hetitec käyttää Voxeljetin 3D-tulostimia mallien valmistuksessa. Hetitec Oy:n toimitilat ovat Valkeakoskella Suomessa.

ExOne valmistaa sidosaineruiskutusmenetelmään perustuvia 3D-tulostimia. ExOnen järjestelmät tukevat neljää eri hiekkamateriaalia: kvartsihiekkä(Silica-sand), sirkoni(Zircon), kromiitti(Chromite) ja keraamihiekkä(Cerabeads). Muita järjestelmien tukemia materiaaleja ovat erilaiset metalliseokset sekä karbidit. Tulostetut hiekkakappaleet ovat valmiita muottikäyttöön heti tulostimesta pois otettuna.

Lisätietoja:

<http://www.voxeljet.de/en/>

<http://hetitec.com/>

<http://www.exone.com/Resources/Materials>

6 LAITEVALMISTAJAT JA LAITTEISTOT

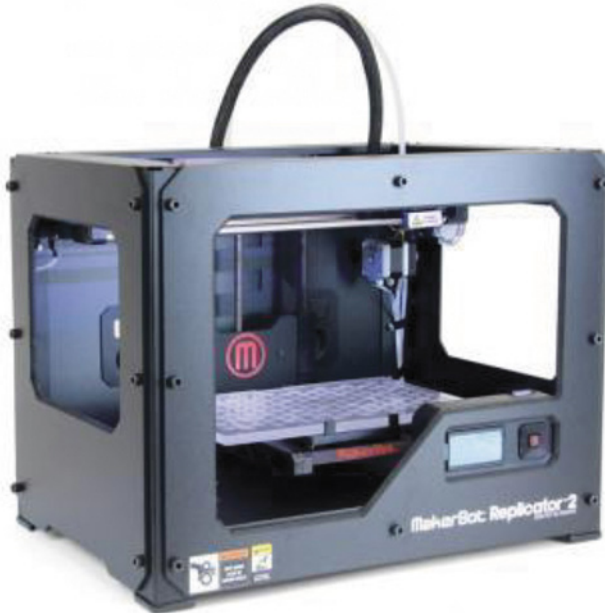
Markkinoilla on tarjolla laaja valikoima erilaisia laitteistoja eri kohderyhmien tarpeita silmällä pitäen. Järjestelmät eroavat toisistaan mm. niiden käyttämien valmistusmenetelmien osalta, laitteiston ja tulosalueen koolta sekä hinnaltaan. Nopeasti kehittyvät valmistusmenetelmät tuovat markkinoille jatkuvasti uusia laitevalmistajia ja laitteita. Osa laitevalmistajista on keskittynyt tietyille markkinasegmentille (esim. kuluttajalaitteet), tietyn kohderyhmän laitteisiin (esim. hammashuollon laitteet) ja toimivat usein lähinnä yhden valmistusmenetelmän parissa (esim. materiaalia pursottavat muovitulostimet). Toisaalta markkinoilla on myös useita isoja laitevalmistajia jotka toimivat kaikilla markkinasegmenteillä, palvelevat lähes kaikkia asiakasryhmiä ja jotka käyttävät useita valmistustekniikoita rinnakkaisissa tuoteperheissään.

Laitevalmistajien yleisesti käyttämä tapa kategorisoida lisäävän valmistuksen (3D-tulostuksen) laitteistot on jaotella ne markkinasegmenttien ja kohderyhmien perusteella kolmeen kategoriaan: Kuluttajalaitteisiin, ammattilaislaitteisiin ja teollisuuslaitteisiin:

- Kuluttajatasen laitteet, “*Personal 3D Printers*”
 - Näitä halvimman kategorian 3D-tulostimia kutsutaan usein myös työpöytäprinttereiksi (“*Desktop 3D Printers*”) fyysisen kokonsa vuoksi.
 - Hintaluokka: < 5000 €
 - Kohderyhmä: kuluttajat, harrastajat
- Ammattilaistason laitteet, “*Professional 3D Printers*”
 - Hintaluokka: 5000 – 50 000€
 - Kohderyhmä: ammattilaiset, teollisuus
- Teollisuustason laitteet, “*Industrial 3D Printers*”
 - Hintaluokka: > 50 000€
 - Kohderyhmä: teollisuus

Monet AM-laitevalmistajat, jotka valmistavat laitteita useille kohderyhmille, käyttävät samantapaista jaottelua. Esimerkkinä tällaisesta valmistajasta on Stratasys, joka luokittelee valmistansa laitteet kolmeen kategoriaan: “*Idea Series*”, “*Design Series*” ja “*Production Series*”.

6.1 Kuluttajatason laitteet



Kuva 6.1. Esimerkki kuluttajatason laitteesta: MakerBot Replicator 2, (“Desktop 3D Printer”).

Kuluttajatason laitteet ovat 3D-tulostimia jotka on suunnattu nimenomaan kuluttajille ja ovat hintaluokaltaan alle 5 000 €. Pääosin hintaluokasta johtuen niiden ominaisuudet ovat joiltakin osin rajoitettuja. Julkisuudessa niistä käytetään usein myös termiä työpöytäprintterit, ”Desktop 3D printer”, koska ne ovat kooltaan työpöydälle sopivia ja muistuttavat siten perinteisiä tulostimia.

Tällä hetkellä suurin osa näistä laitteista on pursotustekniikkaan ja avoimeen ”RepRap”-projektiin pohjautuvia laitteita. ”RepRap”-projekti oli ensimmäinen muovin 3D-tulostin, jonka kuka tahansa saattoi rakentaa vapaasti saatavilla olevien ohjeiden perusteella. Tämän hetken kuluttajatason laitteet ovat enemmän tai vähemmän parannettuja versioita alkuperäisestä RepRap-projektin laitteistosta.

Kuluttajatason markkinat ovat kuitenkin kasvaneet viime vuosina ripeästi, ja useilta laitevalmistajilta on tullut tälle kohderyhmälle laitteita jotka perustuvat myös muihin AM-tulostusmenetelmiin, kuten stereolitografia ja lasersintraus. Toistaiseksi suurin osa näistä laitteista on hinnaltaan kalliimpia kuin 5 000 €, ja niitä markkinoidaan enemmän

harrastajille ja ammattilaisille. Toisaalta osa paremmista pursotustekniikkaan perustuvista kuluttajatason laitteista on myös hinnoiteltu 5 000 – 10 000 € välille. Yleensä näiden pursotustekniikkaan perustuvien laitteistojen korkeampi hinta on perusteltu suuremmalla tulostusalueella tai muulla ominaisuudella joka poikkeaa yleisestä tarjonnasta.

On tärkeää ymmärtää ero kuluttajatason laitteiden ja teollisuustason laitteiden välillä. Kuluttajatason laitteet voivat soveltua hyvin tiettyihin käyttötarkoituksiin, kuten prototyyppien valmistukseen tai valmistusmenetelmään tutustumiseen, mutta teollisuustason laitteistoihin verrattuna niissä on suuri ero laadussa ja luotettavuudessa. Tämä ero on yleensä selvästi havaittavissa valmistusnopeudessa, lopputuotteen laadussa ja laitteiden hinnassa.

Monet kuluttajatason laitevalmistajat markkinoivat tuotteitaan liioitellen vähintäänkin hieman niiden kapasiteettia, luotettavuutta ja käytön helppoutta. Tämä voi olla yksi syy siihen, miksi jotkin teollisuudenalat ovat hitaita ymmärtämään lisäävän valmistuksen potentiaalin ja vaikutuksen omaan liiketoimintaansa. Koska kuluttajapuolen laitteistoihin liittyy paljon hypeä, on helppo tehdä oletamus että sama hype pätee myös teollisuustason laitteisiin.

Hinta on yksi määräävistä tekijöistä kuluttajatason laitteiden kysynnän takana, ja usein kuluttajatason laitteistoja ostavat myös yritykset. Suuri hintaero kuluttajatason ja teollisuustason laitteiden välillä tarkoittaa sitä, että yritysten on helpompi ostaa kuluttajatason laitteisto 3D-tulostuksen opettelua ja harjoittelua varten. Monet suunnittelussa esiintyvät haasteet ovat samat riippumatta siitä minkä hintaisella 3D-tulostuslaitteistolla kappale loppujen lopuksi valmistetaan, olettaen että valmistustekniikka pysyy samana. Eri valmistustekniikkaan perustuvat laitteistot vaativat niiden teknisten ominaisuuksien, haasteiden ja rajoitteiden opettelun sillä esimerkiksi suunnitteluperiaatteet jotka koskevat pursottavaa muovitulostusta eivät ole täysin samat kuin suunnitteluperiaatteet jotka koskevat jauhepetitulostusta.

Useimmat pienet kuluttajatason laitevalmistajat käyttävät siivutus- ja tulostusohjelmalla yleisesti jaossa olevia ilmaisohjelmistoja joista tunnetuimpia ovat Repetier-Host ja Cura. Suuret laitevalmistajat kuten MakerBot (Stratasys) ja 3DSystems käyttävät yleensä omia, suljettuja ohjelmistojaan.

Seuraavaksi on lueteltu tämän hetken suurimpia laitevalmistajia kuluttajatasen 3D-tulostusmarkkinoilla:

- MakerBot (Stratasys)
 - <http://www.makerbot.com/>
 - MakerBot, yksi kuluttajatasen laitteiden markkinajohtajista, myytiin Stratasys –yritykselle 2013. MakerBot on myynyt maailmanlaajuisesti jo yli 50.000 3D-tulostinta.
 - MakerBot tarjoaa erilaisia versioita “MakerBot Replicator” –laitteestaan kuluttajille ja ammattilaisille. Kaikki MakerBot –laitteet perustuvat materiaalia pursottavaan menetelmään (material extrusion).
 - Hintaluokka: 1 500 – 6 500 €
- 3D Systems
 - <http://www.3dsystems.com/3d-printers/desktop>
 - Markkinajohtaja kaikissa kolmessa kategoriassa (kuluttajalaitteet, ammattilaislaitteet, teollisuuslaitteet). 3D Systems käyttää kuluttajatasen laitteistaan nimitystä “Desktop 3D Printers”.
 - Yleisimmin tunnetut kuluttajatasen laitteet ovat versioita valmistajan pursotusmenetelmään perustuvasta 3D Systems Cube –laitteesta sekä nesteen fotopolymerisointiin perustuvasta Projet –laitteistosta.
 - Hintaluokka: 1 200 - 5 000 €
- Ultimaker
 - <https://ultimaker.com/>
 - Ultimaker on yksi alan tunnetuista pioneereista sekä “Cura” -ohjelmiston julkaisija. Cura on ilmainen ohjelmisto siivutukseen ja 3D-tulostukseen. Ohjelmisto on maailmalla laajasti käytössä eri laitevalmistajien toimesta.
 - Ultimaker tarjoaa kuluttajapuolella eri versioita “Ultimaker” 3D-tulostimestaan.
 - Hintaluokka: 1 200 – 2 500 €
- 3DFactories
 - <http://www.3dfactories.com/>
 - Laitevalmistaja, joka tarjoaa kuluttajamarkkinoille muutamaa erilaista versiota materiaalia pursottavaan tekniikkaan perustuvasta 3D-tulostimesta. 3DFactories on mukana listauksessa, sillä sen laitteita on useissa suomalaisissa oppilaitoksissa.
 - 3DFactories kutsuu laitteitaan nimellä ”easy3DMaker” ja ”profi3DMaker”.
 - Hintaluokka: 2 000 – 5 000 €

- Minifactory
 - <http://www.minifactory.fi/>
 - Suomalainen laitevalmistaja, joka tarjoaa kuluttaja- ja harrastelijamarkkinoille muutamaa erilaista versiota materiaalia pursottavaan tekniikkaan perustuvasta 3D-tulostimesta. Minifactory on mukana listauksessa, sillä sen laitteita on useissa suomalaisissa oppilaitoksissa.
 - Minifactory tarjoaa halvan peruslaitteiston lisäksi myös ominaisuuksiltaan edistyneempää ”Minifactory Innovator” –laitetta.
 - Hintaluokka: 1 500 – 1 000 €
- Formlabs
 - <http://formlabs.com/>
 - Formlabs on tunnettu 3D-tulostusalalla johtuen onnistuneesta Kickstarter-kampanjasta, jolla yritys onnistui hankkimaan kolme miljoonaa dollaria Form 1 3D-tulostimen kehitystä varten.
 - Formlabs tarjoaa kahta stereolitografiaan perustuvaa mallia kuluttajamarkkinoille: Form1+ and Form2.
 - Hintaluokka: 3 000 – 3 300 €

6.2 Ammattilaistason laitteet



Kuva 6.2. 3DSystems ProJet 260C Professional 3D Printer.

Suurimmat erot ammattilaistason ja kuluttajatason laitteiden välillä ovat lopputuotteen pinnanlaatu, valmistusnopeus ja hinta. Lisäävän

valmistuksen prosessit joita käytetään ammattilaistason 3D-tulostimis-
sa voivat olla toimintaperiaatteeltaan samoja kuin kuluttajatason lait-
teissa mutta laitteissa käytettävät komponentit ovat laadukkaampia ja
ne on paremmin mitoitettu kestävään jatkuvaa käyttöä. Eroa löytyy
myös siitä, että ammattilaistason laitteistot hyödyntävät useampia eri-
laisia lisäävän valmistuksen valmistustekniikoita ja menetelmiä, koska
hinta ei ole ainoa määräävä tekijä laitteiden kohderyhmälle.

Ammattilaistason laitteistolla voidaan valmistaa osia erilaisista poly-
meereistä. Vaikka metallitulostimien tulosta ammattilais- ja kuluttaja-
käyttöön on puhuttu jo pitkään, kestää teknisesti toimivien, laadultaan
riittävien laitteiden markkinoille saapumiseen vielä vuosia.

Markkinajohtajat tässä kategoriassa ovat samat kuin kuluttajatason
laitteissa, mutta markkinoilla on huomattava määrä keskikokoisia
laitevalmistajia. Ammattilaistason laitteiden markkinat ovat laiteval-
mistajille houkutteleva alue, sillä laitteiston ominaisuudet ovat usein
määräävämpi tekijä kuin hinta. Tästä johtuen myös laitevalmistajien
katteet ovat paremmat.

Useat laitevalmistajat myyvät laitteiden lisäksi myös omia, standardoi-
tuja materiaaleja, joiden he takaavat toimivan hyvin laitteidensa kans-
sa. Jotkin laitevalmistajat jopa kieltävät täysin kolmannen osapuolen
materiaalien käytön laitteissaan takuun raukeamisen uhalla. Tähän on
useita syitä – materiaalien myynti tuo laitevalmistajille hyvän tuoton
ja tulostusmateriaalien hallinta helpottaa laadunvarmistusta.

Suurimpia markkinoilla toimivia ammattilaistason laitteiden valmis-
tajiä ovat mm.

- 3D Systems

- <http://www.3dsystems.com/3d-printers/professional/overview>

- Markkinajohtaja kaikissa kolmessa kategoriassa. 3D Systems kut-
suu ammattilaiskäyttöön suunnattuja laitteiston tyyppinimellä
“Projet”. Projet –sarjan laitteet perustuvat yrityksen kehittämään
lisäävän valmistuksen menetelmään joka perustuu materiaalin
ruiskutustekniikkaan ja jota 3D Systems kutsuu nimellä “multi-jet
modeling”.

- Hintaluokka: 5 000 € - 50 000€

- Stratasys

- <http://www.stratasys.com/3d-printers/design-series>

- Maailman suurimpia 3D-tulostusalan yrityksiä joka omistaa lukui-

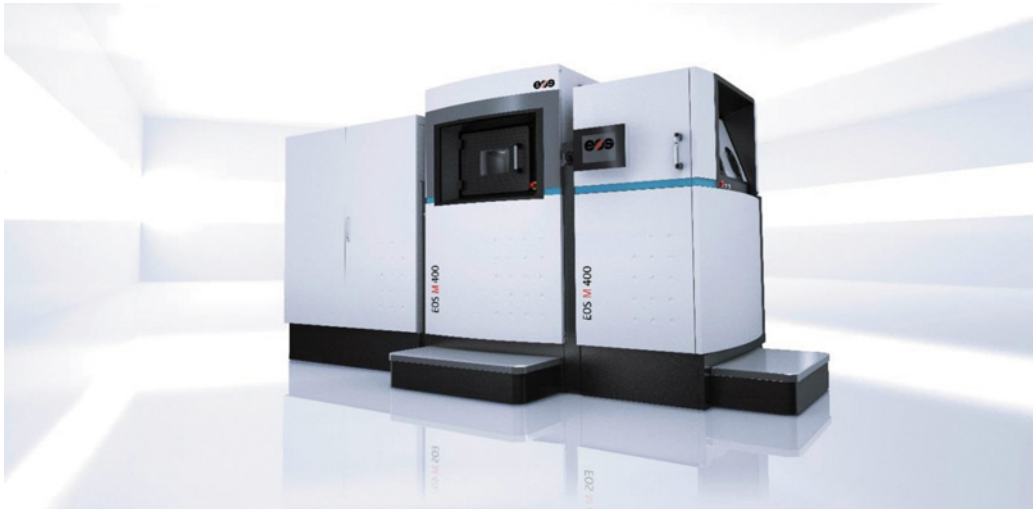
sia alaan liittyviä patenteja. Stratasys käyttää “Design Series” –nimitystä ammattilaiskäyttöön suunnatuista laitteistaan. Sarjan laitteista Objet –laitteet käyttävät valmistusmenetelmänä materiaalin ruiskutustekniikkaa (material jetting), ja Dimension –laitteet puolestaan materiaalin pursotusmenetelmää.

- Yritys tunnetaan Objet ja Dimension –laitteistaan.
- Hintaluokka: 5 000 € - 50 000 €

- Solidscape

- <http://www.solid-scape.com/>
- Solidscapen 3D-tulostuslaitteet ovat erikoistuneet erittäin tarkkoihin valutuotteisiin koruteollisuudessa, lääketeollisuudessa, teollisuudessa ja hammashuollossa.
- Solidscapen laitteet ovat hybridilaitteita, joissa yhdistyy materiaalin pursotustekniikka ja koneistus.
- Stratasys hankki Solidscapen omistukseensa 2011. Yritys jatkaa kuitenkin itsenäisenä toimijana osana Stratasys-konsernia.
- Hintaluokka: 25 000€ - 56 000€

6.3. Teollisuustason laitteet



Kuva 6.3. EOSINT M 400, Teollisen mittakaavan laitteisto metallikappaleiden valmistukseen.

Teollisuustason järjestelmät ovat paljon muutakin kuin vain suuremmat versiot ammattilais-tason 3D-tulostimista. Teollisella tasolla on käytössä käytännössä kaikki lisäävän valmistuksen valmistusmenetelmät useissa erityyppisissä järjestelmissä. Teolliset laitteet suunnitellaan

toistuvaan, korkealaatuiseen ja vakioituun tuotantoon ammattilaista-soa nopeammilla tuotantonopeuksilla. Koska esi- ja jälkikäsitteilyvai-heilla on merkittävä vaikutus tuotantonopeuteen, on teollisiin järjes-telmiin usein tarjolla erilaisia lisäävän valmistuslaitteen yhteyteen tulevia optioita, joilla näitä vaiheita voidaan tehostaa. Yleisimpiä tar-jottuja optioita ovat lämpökäsittely ja jauheenkierrätys.

Teollisia järjestelmiä on tarjolla sekä muovin että metallin lisäävään valmistukseen. Markkinajohtajat kuten 3D Systems, Stratasys ja EOS tarjoavat järjestelmiä sekä muovin että metallin valmistukseen, mut-ta suurin osa markkinoilla olevista toimijoista erikoistuu ainoastaan muoviin tai metalliin. Yleisimmin käytössä olevat teolliset lisäävän valmistuksen tekniikat ovat muoville jauhepetitekniikka, materiaalin ruiskutus ja nesteen fotopolymerisointi (stereolitografia). Metallin li-säävässä valmistuksessa yleisimmin käytössä oleva tekniikka on jau-hepetitekniikka, mutta muutaman viime vuoden aikana laitevalmis-tajat ovat julkistaneet useita suorakerrostusmenetelmään perustuvia laitteita.

Tällä hetkellä teolliset lisäävän valmistuksen laitteet ovat itsenäisiä, erillisiä työkoneita cnc -työstökeskusten tapaan. Tulevaisuudessa li-säävän valmistuksen laitteet rakennetaan modulaariseen tapaan joka mahdollistaa niiden syvemmän integroinnin osaksi valmistusproses-seja. Jotkin laitevalmistajista ovat jo esitelleet lisäävän valmistuksen järjestelmiä jotka mahdollistavat keskitetyt esikäsitteilyt ja jälkikäsitte-lyt useiden laitteiden kesken.

Monet laitevalmistajista tarjoavat laitteen lisäksi asiakkaille myös mahdollisuuden ostaa valmistusmateriaali suoraan laitevalmistajalta, jolloin he pystyvät paremmin takaamaan lopputuotteen laadun. Erityi-sen yleistä tämä on metallin osalta, mutta monet suurista laitevalmis-tajista muovipuolella toimivat samoin. Joitain poikkeuksia tähän ovat Euroopan markkinoille saapuvat uudet laitevalmistajat (erityisesti Aa-siasta), jotka käyttävät kolmannen osapuolen tarjoamia materiaaleja. Esimerkkejä materiaalin valmistukseen ja toimitukseen erikoistuneista kolmansista osapuolista ovat Sandvik tai Höganäs. Koska materiaalin laadulla on suuri merkitys lopputuotteen laatuun, täytyy materiaalin hankintaan, kuljetukseen ja varastointiin kiinnittää erityistä huomiota. Jauhepohjaisten valmistusmenetelmien materiaalihinnat ovat yleensä hintaluokassa 60 – 140 €/kg muoville/polymeereille ja 60 - 500 €/kg metallimateriaaleille.

Teollisten AM-valmistuslaitteiden hinnat ovat suhteellisen korkeita ja riippuvat mm. laitteiston käyttämästä valmistusmenetelmästä, järjestelmän spesifikaatiosta (mm. nopeus) ja valmistusmenetelmässä käytettävästä materiaalista. Esi- ja jälkikäsitteilyjärjestelmät (kuten jauheen käsittely, lämpökäsittelykammiot, jauheen kierrätysjärjestelmät, yms.) voivat nostaa valmistusjärjestelmän kokonaishintaa 20 - 40 %. Järjestelmät myydään yleensä huolto- ja ylläpitosopimuksella joiden vuosittaiset kustannukset voivat olla jopa 10 – 15 % hankintahinnasta.

Seuraavassa listauksessa on lueteltu joitain teollisen tason järjestelmätoimittajia:

- Stratasys (muovit)
 - <http://www.stratasys.com/3d-printers/production-series>
 - Stratasys tarjoaa teollisen tason järjestelmiä kategorianimellä “Production Series”. Tuoteryhmä pitää sisällään eri versioita Stratasys:in “Connex” (materiaan ruiskutus), “Fortus” (materiaalin pursotus) sekä ”Objet” (materiaalin ruiskutus) laitteistoista.
 - Connex –järjestelmä mahdollistaa samanaikaisen multimateriaalitulostuksen maksimissaan kolmella eri materiaalilla.
 - Stratasys ei tällä hetkellä tarjoa lisäävän valmistuksen laitteistoja metallille, mutta tarjoaa metallin tulostuspalveluja osana “Stratasys direct manufacturing” –palveluyksikön toimintaa.
 - Hintaluokka: 100 000 € -
- EOS (muovit, metallit)
 - http://www.eos.info/systems_solutions
 - EOS tarjoaa joukon teolliseen valmistukseen tarkoitettuja AM –laitteita sekä muovien että metallien valmistukseen: EOSINT P -sarjan laitteet muoveille, ja EOSINT M -sarjan laitteet metallin valmistukseen.
 - EOS on yksi lisäävän valmistuksen pioneereistä. EOS käyttää metallin jauhepetitekniikkaan pohjautuvasta valmistusmenetelmästään nimitystä DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*).
 - Tarjoaa laajoja huoltosopimuksia jotka sisältävät huollon, koulutuksen ja materiaalin toimituksen. Huoltosopimusten kustannukset voivat olla 10 - 15% järjestelmän hankintahinnasta.
 - Hintaluokka: 150 000 € - 2 000.000 €
- 3DSystems (muovit, metallit)
 - <http://www.3dsystems.com/3d-printers/production/overview>
 - 3D Systems tarjoaa laajan valikoiman lisäävän valmistuksen laitteita teolliselle sektorille. Järjestelmät perustuvat nesteen fotopolymerisointiin (ProJet) sekä jauhepetitekniikkaan (ProX).
 - Hintaluokka: 100 000 € -

- SLM Solutions (metallit)
 - http://www.stage.slm-solutions.com/index.php?index_en
 - Yksi laserpohjaisen jauhepetitekniikan pioneerejä, käyttää jauhepetitekniikkaan pohjautuvista järjestelmistään nimitystä “Selective Laser Melting”.
 - Tarjoaa valikoiman teollisia jauhepetitulostimia metalliosien lisäävään valmistukseen.
 - Hintaluokka: 250 000 – 2 000 000 €
- Concept Laser (metallit)
 - Perustettu vuonna 2000, Concept Laser keskittyy teolliseen metallin lisäävään valmistukseen ja on kehittänyt oman, jauhepetitekniikkaan pohjautuvan valmistusmenetelmänsä jota kutsuu nimellä ”LaserCusing™”.
 - Vuoteen 2015 mennessä Concept laser on myynyt yli 350 järjestelmää ympäri maailmaa tehden siitä yhden merkittävistä laitetoimitajista metallin lisäävän valmistuksen saralla.
 - Tarjoaa järjestelmästä neljää eri versiota joiden erona on pääosin tulostuskammion koko ja laserien lukumäärä.
 - Hintaluokka: 250 000 € - 2 000.000 €
- Arcam (metallit)
 - <http://www.arcam.com/>
 - Ruotsalainen Arcam tuli teollisille lisäävän valmistuksen markkinoilla vuonna 2002 kehittämällään EBM (Electron Beam Melting) järjestelmällä, joka on elektronisuihkupohjainen jauhepetitekniikkaan pohjautuva järjestelmä.
 - Tarjoaa kolmea eri versiota järjestelmästä keskittyen palvelemaan pääosin ilmailuteollisuutta ja lääketieteellisuutta.
 - Hintaluokka: 250 000 € -
- Matsuura (metallit)
 - <http://www.lumex-matsuura.com/english/>
 - Matsuura tarjoaa Lumex avance 25, hybridijärjestelmää (lisäävä valmistus + koneistus) joka perustuu jauhepetitekniikkaan. Hybridijärjestelmä mahdollistaa valmistuvan kappaleen koneistuksen kesken prosessin mahdollistaen mittatarkkojen ja viimeistelyjen pintojen valmistamisen myös osien sisäpinnoille.
 - Hintaluokka: ~660 000 €
- DMG Mori Seiki (metallit)
 - <http://uk.dmgmori.com/products/lasertec/lasertec-shape/lasertec-65-shape>
 - Tarjoaa Lasertec 65 hybridijärjestelmää (lisäävä valmistus + koneistus) joka perustuu suorakerrostusmenetelmään.
 - Hintaluokka: ~1 500 000 €

Yksi viimeaikojen mielenkiintoisista uutuuksista teollisen lisäävän valmistuksen tarpeisiin on hollantilaisen Additive Industries –laitevalmistajan ”MetalFab1” –järjestelmä. Laitevalmistaja on esitellyt konseptitasolle järjestelmää viimeisen kahden vuoden ajan ja aikoo aloittaa toimitukset vuoden 2016 aikana. Toimintaideana on ollut rakentaa modulaarinen, teollisen mittakaavan lisäävän valmistuksen laitteisto joka voidaan helposti integroida osaksi tuotantoa. Modulaarinen järjestelmä pitää sisällään mm. kaksi tulostuskammiota, lämpökäsittelykammion, jauheenpoistoyksikön ja 8-paikkaisen välivaraston joka mahdollistaa järjestelmän keskeytymättömän toiminnan viikonlopun yli.

Lisätietoja:

<http://additiveindustries.com/Industrial-am-systems/Metalfab1>

Muita teollisen mittakaavan laitevalmistajia ovat mm.: Exone, Voxeljet, Beam, InssTek, Fabrisonic and Sciaky.

Lisätietoja:

<http://fabrisonic.com/>

<http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/metal-additive-manufacturing-systems>

<http://www.voxeljet.de/en/>

6.4 Lisäävän valmistuksen palveluntarjoajat

Yksi lisäävän valmistuksen haasteista on se, että vaikka valmistusmenetelmä tarjoaakin ennennäkemättömiä mahdollisuuksia kappaleiden suunnittelulle, teollisen tason laitteistot ovat kalliita ja vaativat erikoisosaamista. Lisäksi alan nopea kehitystahti ”vanhentaa” kalliita laitteita huomattavan nopeasti. Tästä johtuen markkinoilla on selvää kysyntää palveluntarjoajille sekä yritysten että kuluttajien puolelta.

Suomesta löytyy useita palveluntarjoajia muovin 3D-tulostamiselle, mutta vuonna 2015 vain yksi kaupallinen toimija metallin tulostuspalvelulle (AM Finland Oy). Metallin tulostamista pienemmässä mittakaavassa ja erityisesti siihen liittyvää osaamista ja suunnittelupalvelua tarjoavat myös VTT, Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto sekä Oulun PMC.

Euroopassa tilanne on jo selvästi erilainen, sillä tarjolla on lukuisa joukko alihankkijoita joilla on pitkä kokemus metallin ja muovin lisäävästä valmistuksesta. Osa on keskittynyt täysin lisäävään valmistukseen, ja osa tarjoaa myös muita aiheeseen liittyviä palveluita kuten suunnittelu, neuvonta, jälkikäsitteily, piensarjatuotanto jne. Suurimmilla alihankkijoilla on käytössään kymmeniä teollisen tason laitteistoja niin muovin kuin metallinkin valmistamiseen.

Haasteita tulostuspalveluntarjoajan valinnalle aiheuttaa se, että laitekanta ja osaamistaso voi vaihdella hyvinkin paljon. Palveluntarjoajat, jotka käyttävät ”harrastelijatason” laitteita eivät kykene tarjoamaan samantasoista palvelua ja lopputuotteen laatua kuin ne palveluntarjoajat, joilla on käytössään teollisen mittakaavan laitteistoja.

Maailmanlaajuisesti löytyy muutamia selvästi muita suurempia palveluntarjoajia: Shapeways, i.Materialise sekä Stratasys Direct Manufacturing, joista viimeisin tosin palvelee lähinnä Pohjois-amerikan teollisuutta. Yritykset kutsuvat tarjoamaansa palvelua ”Online 3D Printing Services” ja tarjoavat sekä yrityksille että kuluttajille ammattimaista palvelua lähes kaikilla tulostusmateriaaleilla ja 3D-tulostuksen menetelmillä. Tämän lisäksi sekä Shapeways että i.Materialise tarjoavat kuluttajille ja pienyrityksille mahdollisuuden myydä omia 3D-tulostettavia tuotteitaan yritysten nettiportaalien kautta siten, että loppuasiakkaat ostavat tulostuspalvelun yrityksiltä jotka maksavat tuotteesta provision sen oikeuksien omistajalle. Tämä on mahdollistanut ennennäkemättömät mahdollisuudet myydä suunnitelmia ja tuotteita niin muotoilijoille kuin harrastajillekin.

Shapeways perustettiin vuonna 2007 ja on tällä hetkellä yksi maailman suurimmista, ellei suurin, yksityinen palveluntarjoaja alalla. Vuonna 2015 Shapeways valmisti 181000 osaa kuukaudessa asiakkaille ympäri maailmaa ja sen nettiportaalia käytti 23000 kauppiasta omien tuotteidensa myymiseen. Suuret volyymit mahdollistavat teollisten laitteiden tehokkaan käytön joka puolestaan näkyy asiakkaille edullisina hintoina.

Sekä Shapeways että i.Materialise perustavat toimintansa digitaalisen palveluportaalin ympärille ja laajaan laitekantaan, ”3D-tulostustehtaan”. Asiakkaat voivat ladata valmistettavat tuotteet portaaliin ja valita käytettävän materiaalin jonka jälkeen toimintaympäristö ilmoittaa asiakkaalle automaattisesti tuotteen valmistuskustannuksen. Markki-

noilla on myös muita vastaavalla tavalla toimivia kilpailijoita, esimerkiksi Sculpteo sekä Meltwerk.

Lisätietoja:

<http://www.shapeways.com/>

<https://i.materialise.com/>

<https://www.stratasysdirect.com/>

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA TULEVAISUUDEN TRENDIT

Lisäävä valmistus on ollut erittäin näkyvästi esillä eri medioissa viimeisten vuosien aikana. Erityisesti huomiota ovat saaneet kuluttajamarkkinoille suuntautuneet laitteet ja niillä valmistetut tuotteet. Sitä on nimitetty myös “kolmanneksi tuotannon vallankumoukseksi”, koska se siirtää suunnittelun näkökulman valmistettavuudesta (“mikä on paras suunnitelma valmistuksen kannalta?”), toiminnallisuuteen (“mikä on paras suunnitelma toiminnan kannalta?”).

Lisäävä valmistus on olennainen osa tuotannon digitalisaatiota, mahdollistaen tuotteiden geometrisesti vapaamman suunnittelun sekä varastoimisen digitaalisessa muodossa ja valmistamisen vain tarpeeseen. Huolimatta siitä, että se suuntaa suunnittelun näkökulman lopputuotteen toiminnallisuuteen, on valmistettavuus edelleen otettava huomioon hyvinkin erilaisten AM-menetelmien johdosta.

Tutkimuslaitos Gartner ennustaa uusien teknologioiden kehitymisastetta Gartner Hype Cycle -käyrällä, jossa teknologia kulkee ”hypekäyrän” läpi ennen vakiintumistaan varteenotettavaksi teknologiaksi. Kuluttajille suunnatut 3D-tulostinlaitteet (“*Consumer 3D Printing*”) on ollut viime vuosien ajan hypekäyrän huipulla (“*Peak of inflated expectations*”), ja vielä 2015 kuvaajassakin sangen korkealla tarkoittaen sitä että kuluttajilla on epärealistiset odotukset teknologian mahdollisuuksista.[25]

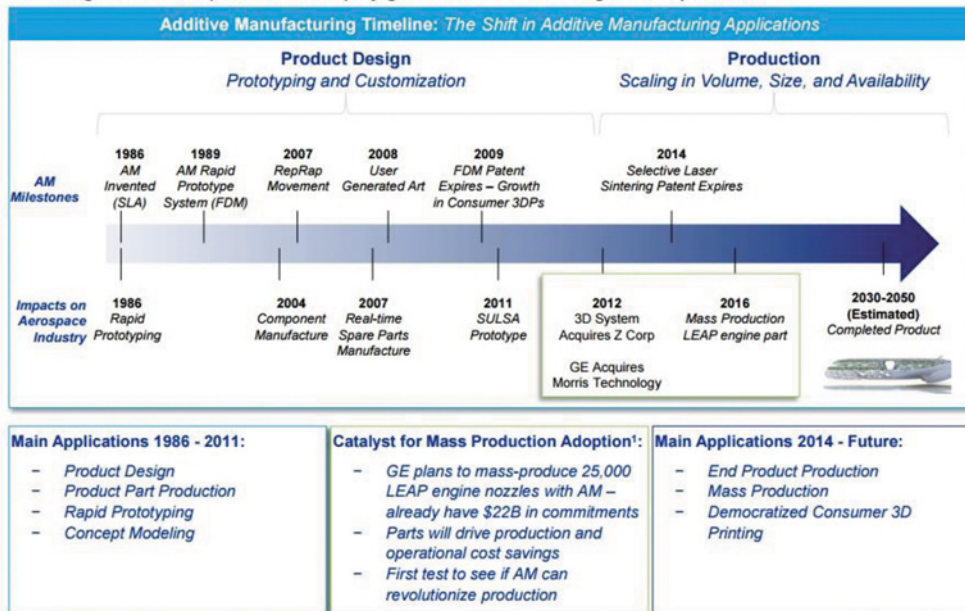
Teollisuuden 3D-tulostus (*Enterprise 3D Printing*) on puolestaan ohittanut pahimman hypevaiheen ja on puolivälissä matkalla kohti vakiintunutta käyttöä. Sama ilmiö näkyy myös selvästi erilaisilla valmistustekniikan messuilla ja teollisuuden kasvuennusteissa. Suuret yhtiöt kuten GE tai Boeing ovat jo hyödyntäneet teknologioita vuosia ja keskisuuret yritykset ovat viime vuosien aikana alkaneet seurata perässä.

Lisäävää valmistusta on aiemmin kutsuttu nimellä “pikavalmistus” tai “*rapid prototyping*”, koska kymmenisen vuotta sitten sitä käytettiin lähinnä prototyyppien valmistukseen. Tämä pitää edelleenkin osin paikkansa, mutta fokus on siirtymässä koko ajan enemmän prototyyppien valmistuksesta massatuotantotyyppiseen lopputuotteiden valmistukseen. Materiaaliteknologian kehittymisen myötä useat valmistajat ovat testanneet ja sertifioineet suunnitteluohjeita ja materiaaleja erityisesti AM:n kanssa käytettäväksi. Seuraavassa kuvassa on ennuste (Deloitte

Services LP:n mukaan) AM:n käyttöönoton aikajänteestä. Sen mukaan menee vain karkeasti 10 vuotta kun AM on käytössä kokonaisten tuotteiden valmistuksessa. Ennuste vaikuttaa realistiselta kun tiedetään, että jo tänään on olemassa jonkin verran teollisuutta, joka toteuttaa tuotteensa AM:n avulla.

Additive Manufacturing Adoption Timeline

Additive Manufacturing has been slowly gaining traction, specifically within design, however, new technologies have the potential to amplify growth and extend usage within production



Deloitte

- 5 -

© 2014 Deloitte Services LP

Kuva 7.1. AM-sovellusten aikajana. [26]

Tällä hetkellä teollisuus on monella alalla siirtymävaiheessa, jossa lisäävää valmistusta ollaan ottamassa käyttöön tuotannossa. Lisäävän valmistuksen potentiaali on ainakin osittain havaittu ja etsitään keinoja siihen mikä on paras ja tuottavin tapa integroida se osaksi toimitus/tuotantoketjua. Tässä yhteydessä useat yritykset ovat havainneet, että lisäävän valmistuksen suurin etu ei välttämättä olekaan perinteisen tuotannon korvaaminen, vaan sen tuominen täydentämään nykyistä tuotantoa ja nopeuttamaan olemassa olevia tuotantoprosesseja.

Esimerkkinä teollisuusyrityksen odotusarvosta lisäävälle valmistukselle, General Electric (GE), yksi maailman suurimmista lisäävän valmistuksen käyttäjistä, laajentaa jatkuvasti valmistusmenetelmän käyttöä toiminnassaan. Parhaillaan alle 10 % GE:n valmistusprosesseista hyödyntää lisäävää valmistusta, mutta yritys arvioi että kymmenessä

vuodessa osuus kasvaa 20 – 25 % ja kahdessakymmenessä vuodessa se voi vaikuttaa jollain tasolla jopa yli 50 % yrityksen tuotannosta.[27]

Lisäävän valmistuksen mahdollisuudet vaikuttavat osaan valmistusprosesseista huomattavasti enemmän kuin toisiin. Työkaluvalmistus on esimerkki valmistusprosessista, jossa AM voi korvata suuren osan perinteisistä valmistusmenetelmistä koska se mahdollistaa nopeasti räätälöityjen ja geometrisesti vapaiden tuotteiden valmistamisen. Jotkin suuret autoteollisuuden toimijat käyttävät lisäävää valmistusta jo merkittävään osaan työkaluvalmistuksen, kiinnitinvalmistuksen ja muotinvalmistuksen tarpeista.[28]

Toistaiseksi teollisuudessa on kuitenkin useita rajoituksia lisäävän valmistuksen käytölle jotka hidastavat valmistusmenetelmän laajamittaista käyttöönottoa.

Osien koko on vielä yksi merkittävimmistä rajoitteista. Suurimmassa osassa teollisia AM-järjestelmiä mahdollista osakokoa rajoittaa huomattavasti AM-järjestelmän tulostuskammion koko, erityisesti metalliosien valmistuksessa.

Kone ja materiaalikustannukset – on vieläkin, ja tilanne tuskin muuttuu lähitulevaisuudessa, kustannustehokkaampaa valmistaa massa tuotteita perinteisillä valmistusmenetelmillä kuin lisäävän valmistuksen keinoin.

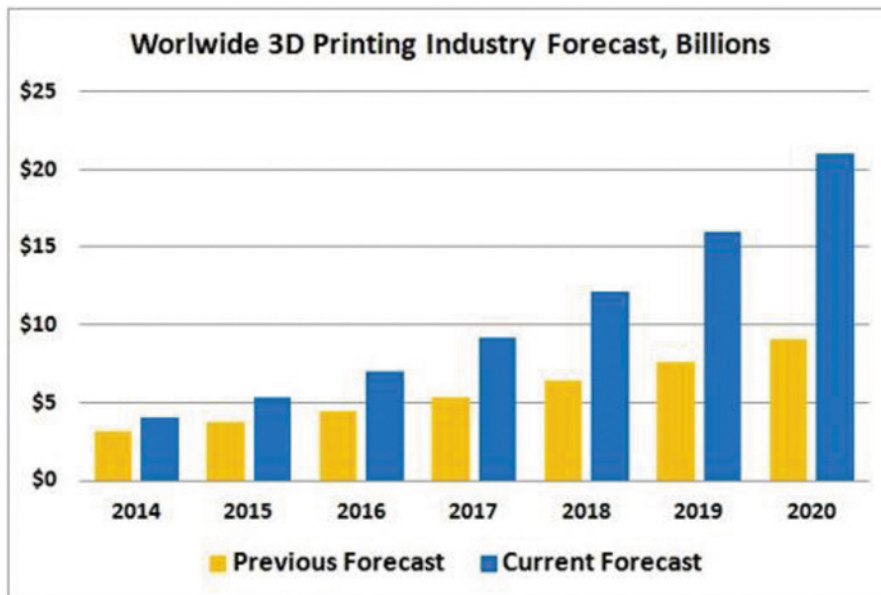
Lopputuotteen laatu – mikäli lopputuotteen laatu vaatii mittatarkkoja ja pintoja, on todennäköistä, että osia joudutaan jälkikäsittelemään tai koneistamaan valmistuksen jälkeen. Tämä voi olla haastavaa (monimutkaiset geometriat), vaikeaa (materiaaliominaisuudet) ja kallista. Monimutkaiset geometriat voivat vaatia monimutkaisia ja kalliita jälkikäsitteilymenetelmiä ja on huomioitava, että osa materiaaleista soveltuu erityisen hyvin lisäävään valmistukseen nimenomaan sen takia, että niiden jälkikäsitteily on haastavaa. Mikäli tällaista materiaalia täytyy kuitenkin lopuksi jälkikäsitellä, menetetään osa lisäävän valmistuksen hyödystä.

Laitevalmistajat tarjoavat useita eri hybridijärjestelmiä, joiden avulla on mahdollista valmistaa mittatarkkoja lopputuotteita suoraan AM-prosessin yhteydessä. Hybridijärjestelmä kuitenkin tarkoittaa muiden prosessien integroimista lisäävän valmistuksen yhteyteen (esim. koneistus), joka taas puolestaan tarkoittaa sitä, että valmistusnopeus hidastuu.

Jotkin edellä mainitusta rajoitteista tulee poistumaan lisäävän valmistuksen kehityksen ja uusien, parannettujen valmistusprosessien myötä. Yksi lisäävää valmistusta pitkään hyödyntäneistä suuriyrityksistä, Siemens, ennustaa, että lisäävän valmistuksen (3D-tulostus) kustannukset tulee laskemaan 50 % ja valmistusnopeus kasvaa 400 % seuraavan viiden vuoden kuluessa.[29]

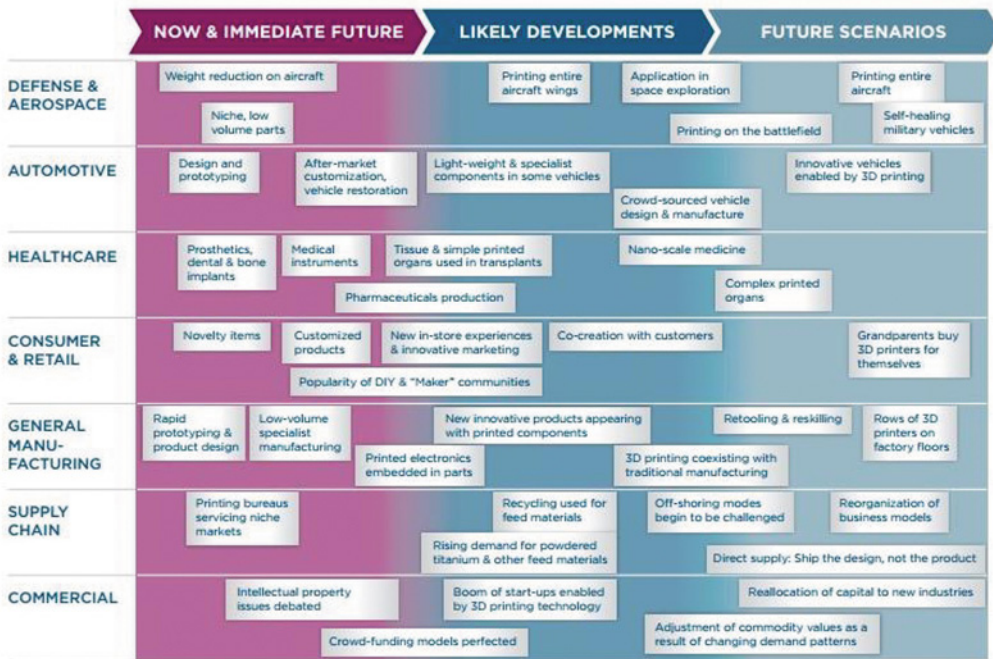
Kokonaisvaltainen strategia tarkastelukulmana on yrityksen kannalta paras tapa lähestyä lisäävän valmistuksen käyttöönottoa toiminnassa. Tuotteeseen, tuotantoprosessiin ja koko yrityksen ekosysteemiin liittyvät kysymykset tulisi ottaa huomioon strategiassa. Lisäävä valmistus tuo paljon uusia mahdollisuuksia ja vaihtoehtoja siihen miten, milloin ja missä tuotteita sekä osia valmistetaan. Mikä on paras sekoitus uutta ja vanhaa tuotantomenetelmää tuotantoprosessin kannalta?

Lisäävän valmistuksen huomiotta jättäminen ei ole vaihtoehto yhdellekään kilpailukykyisenä itseään pitävälle yritykselle. Perustuen useisiin lähteisiin lisäävän valmistuksen markkinoiden kasvuvauhdista viimeisen viiden vuoden ajalta sekä ennustetusta kasvuvauhdista lähivuosille, teollisuuden tarve lisäävälle valmistukselle voi saavuttaa jopa 20 % vuosittaisen kasvuvauhdin.[26]



Kuva 7.2. Ennustettu kasvuvauhti 3D-tulostusteollisuudella, Wohler’s Report 2014.

Johtopäätöksenä lisäävän valmistuksen soveltuvuudesta teollisuuden tarpeisiin CSC tarjoaa hyvän arvion siitä, minkälaiset mahdollisuudet ovat saavutettavissa. CSC:n kuvaaja julkaistiin syksyllä 2012 osana “3D printing and the future of manufacturing” –raporttia. Nykyinen lisäävän valmistuksen tilanne ja käyttö sijoittuvat kuvaajassa “now & immediate future” (nyt ja lähitulevaisuus) sekä “likely developments” (todennäköiset kehityssuunnat) alueiden välimaastoon.[30, 31]



Source: CSC

Kuva 7.3. 3D-tulostuksen vaikuttavuus, “3DPrinting Impacts” (CSC, 2012).

7.1 Kehitteillä ja markkinoille saapumassa olevat järjestelmät

Lisäävä valmistus on ollut kiivaan kehitystyön alla viimeiset kymmenen vuotta ja uusia AM –järjestelmiä kehitetään jatkuvasti. Suurin osa tutkimuksesta ja kehityksestä kohdistuu luonnollisesti nykyisten järjestelmien ja menetelmien tehostamiseen, esim. valmistusnopeuden kasvattamiseen, suurempaan tulostusalueeseen, sekä laserien määrän lisäämiseen jauhepetitulostimissa. Myös täysin uusia lisäävän valmistuksen menetelmiä, prosesseja ja laitteistoja on kehityksen alla. Seuraa-

vaksi kuvataan lyhyesti viimeaikojen mielenkiintoisimpia kehityksen alla olevia järjestelmiä ja markkinoille saapumassa olevia järjestelmiä.

Bertha

- Cincinnati Incorporated –yrityksen “*Big Area Additive Manufacturing*”, BAAM, on materiaalin pursotukseen perustuva järjestelmä suurella tulostusalueella ja –nopeudella: tulostusalueen koko on 213x396x91 cm ja tulostusnopeus jopa 18 kg tunnissa. Tulostusnopeutta voi hahmottaa sillä, että laitteella voidaan valmistaa kokonainen runko yhteisörahoituksen voimin kehitetystä “Strati” -sähköautosta kahden päivän kuluessa. Cincinnati Inc on jo myös aloittanut seuraavan sukupolven laitteiston suunnittelun – siinä tulostusalue tulee olemaan 243x609x182 cm ja tulostusnopeus 2,5 kertaa aiempaa nopeampi, ollen jopa 45 kg/tunnissa.
- Lisätietoja:
<http://www.e-ci.com/>
<http://3dprintingindustry.com/2015/03/19/bertha-plans-to-3d-print-4000x-faster-1000x-bigger-50x-cheaper-than-the-competition/>

CLIP - Continuous Liquid Interface

- Carbon3D on startup-yritys joka valmistaa 3D-tulostimia teollisuudelle. Yritys sai vuonna 2015 100 miljoonaa dollaria rahoitusta jonka voimin se aikoo saattaa kehittämänsä CLIP-valmistusmenetelmän prototyypivaiheesta tuotantoon.
- Yritys toi markkinoille vuoden 2016 aikana M1-tulostimen hinnoitellen sen muista markkinoilla olevista tekijöistä poiketen vuosihinnalla, 40 000 € per vuosi + mahdolliset lisäoptiot, joita joutuu hankkimaan aluksi jonkin verran. Vuosimaksu mahdollistaa sen, että yritys sitoutuu laitteen hankintaan minimissään muutamaksi vuodeksi, mutta on sen jälkeen mahdollinen hankkimaan uudemmaa tekniikkaa tilalle.
- Yrityksen kehittämä menetelmä perustuu nesteen fotopolymerisointiin uudella tavalla, mahdollistaen jatkuvan valmistusprosessin joka nostaa valmistusnopeutta merkittävästi.
- Lisätietoa CLIP-menetelmän toimintaperiaatteesta löytyy valmistusmenetelmien osiosta, kappaleesta “Nesteen fotopolymerisointi”
- Lisätietoja:
<http://carbon3d.com/>

HP multi jet fusion

- HP ilmoitti elokuussa 2014 aikovansa tulla 3D-tulostuksen markkinoille omalla laitteellaan, ja aloittaa laitteiston myynnin 2016 vuoden loppuun mennessä.
- HP:n “*multi jet fusion*”-tekniikka sisältää ominaisuuksia ainakin kolmesta lisäävän valmistuksen menetelmästä. Se muistuttaa toiminnaltaan materiaalin ja sidosaineen ruiskutusmenetelmiä sillä laite ruiskuttaa sidos- ja muokkausainetta jauhepedillä sijaitsevan perusaineen päälle liikkeessaan pedin yli ensimmäisen kerran. Toisella ylityskerralla laitteisto sulattaa lämmönlähteen avulla halutut kohdat jauhepedistä ja viimeistelee kerroksen valmistuksen. Oletettavasti lämpöä ei kohdenneta ainoastaan haluttuihin kohtiin, vaan sidos- ja muokkausaineen avulla yhdistetään jauhepartikkelit niiltä kohdilta, mihin niitä on ruiskutettu. Järjestelmä on modulaarinen, tarkoittaen että tulostuslaitetta voidaan skaalata eri kokoluokkiin tarpeen mukaisesti.
- Tulostusnopeuksien vertailuja varten HP esitteli tuhannen muovirattan valmistusta muutamalla vaihtoehtoisella lisäävän valmistuksen menetelmällä. HP:n valmistusmenetelmällä erän valmistus kesti kolme tuntia, lasersintrauksella 38 tuntia ja materiaalin purotusmenetelmällä 83 tuntia.
- Lisätietoja:
<http://www8.hp.com/us/en/commercial-printers/floater/3Dprinting.html>
<http://3dprintingindustry.com/2014/11/12/hp-multi-jet-fusion-ip/>

High speed sintering (HSS)

- HSS on uusi lisäävän valmistuksen menetelmä jonka Loughboroughn yliopisto on kehittänyt ja patentoinut. Prosessi on toimintaperiaatteeltaan yhdistelmä jauhepetitulostusta ja sidosaineruiskutusta ja pitää sisällään joitain yhteneväisyyksiä HP:n multijet fusion – menetelmän kanssa. Tulostuspäät suihkuttavat infrapuna-absorboituvaa muistettu jauhepedille, jonka jälkeen koko jauhepeti lämmitetään infrapunalämmittimellä. Infrapuna-absorboituvan musteen avulla ainoastaan musteella ruiskutetut alueet altistuvat riittävälle määrälle lämpöä sulattamaan jauheen.
- HSS on potentiaalisesti lasersintrausta nopeampi ja halvempi menetelmä ja toimiessaan kykenisi kilpailemaan ruiskuvalujen kanssa nopeudessa ja kappaleen hinnassa.
- Lisätietoja:
<http://www.lboro.ac.uk/microsites/enterprise/e2hs/technology/high-speed-sintering.html>

Selective laser printing (SLP)

- SLP on lisäävän valmistuksen menetelmä jota kehittävät Englannissa Renishaw Plc, De Montfort yliopisto sekä Warwickin yliopisto. The SLP prosessi sijoittaa elektrostaattisesti kuivaa, ei-johtavaa, väriainekasetin tapaista jauhetta (rakennusmateriaali ja tukimateriaali) käyttäen teollista lasertulostustekniikkaa. Jokainen valmistuva kerros sintrataan infrapunasaäteilyn avulla.

Aeroswift, suuren kapasiteetin metallijärjestelmä

- Aeroswift on uusi suuren nopeuden ja suurten volyymien käsittelyyn tarkoitettu AM-järjestelmä metallimateriaaleille. Järjestelmä on kehitetty Etelä-Afrikassa yhteistyössä CSIR National Laser Centerin ja Aerosud ITC:n kanssa. Aeroswift hyödyntää jauhepetimenetelmää, jossa on 5 kW laser ja rakennuskammion koko 2x0,6x0,6 m. Laite on kehitetty siten, että se mahdollistaa suurten ja monimutkaisten kappaleiden samoin kuin pienemmistä kappaleista koostuvat isommat eräkoot esimerkiksi lentokoneiteollisuuden tarpeisiin.
- RAPDASA:n (*Rapid Product Development Association of South Africa*) mukaan Aeroswift on tällä hetkellä maailman suurin ja nopein jauhepetimenetelmää käyttävä järjestelmä.
- Aeroswift on tarkoitettu erityisesti titaanin hyödyntämiseen, koska Etelä-Afrikalla on suuret titaanivarat. Airbus ja Boeing kehittävät jatkuvasti lentokoneita, joissa käytetään mm. komposiitteja massan keventämiseksi. Komposiittien haasteena on mm. yhdistäminen alumiiniin, koska seurauksena voi olla korroosio-ongelmia. Titaanin kanssa tällaisia ongelmia ei ole.
- Lisätietoja:
<http://www.rapdasa.org/sitevisit.aspx>
http://www.csir.co.za/enews/2015_Oct/21.html

Matterfab

- Matterfab on startup, joka kehittää metallijauheeseen perustuvaa menetelmää, jonka oletetaan olevan merkittävästi edullisempi kuin nykyiset järjestelmät. Tavoitteena on madaltaa liiketoiminnallisia esteitä laskemalla laite-, tuki- ja materiaalikustannuksia. Yrityksen laite tulisi olemaan ensimmäinen USA:ssa tuotettu jauhepetimenetelmään perustuva laite.
- Lisätietoja:
<http://3dprint.com/9592/matterfab-reveals-their-affordable-metal-3d-printer-an-order-of-magnitude-cheaper/>

Aurora Labs

- Aurora Labs kehittää metallin tulostamiseen tarkoitettuja jauhepetimenetelmiä. Vuonna 2014 yrityksellä oli kerättynä 300 k\$ joukkorahoitusta tarkoituksena kehittää metallin 3D-tulostin, jonka hinta on alle 4,5 k\$. Tämä hanke kuitenkin keskeytettiin epäilyn johdosta, että oikeudet karkaavat joukkorahoittajalle. Menetelmän, jota yritys kehittää, on mainostettu olevan yli 100 kertaa nykyisiä menetelmiä nopeampi. Tämä on noteerattu mm. NASAssa ja muissa isoissa yrityksissä. Marraskuussa 2015 yrityksellä oli ennakkotilattavissa kaksi 3D-tulostinmallia, joiden hinnat olivat 33 k\$ ja 43 k\$.
- Lisätietoja:
<http://www.2045.com/news/33342.html>
<https://au.news.yahoo.com/thewest/business/a/29412321/nasa-calls-on-3-d-printer-maker/>
<http://shop.auroralabs3d.com/>

Fonon Company

- Fonon Company on vuonna 2001 perustettu kuitu- ja CO₂- laserlaitteiden valmistaja.
- Fonon 3D FUSION™ tai 3D Laser Metal Sintering (3D-metallitulostus) on lisäävän valmistuksen menetelmä (*NANO Powder Manufacturing*), jonka kohderyhmänä on lääketieteellinen teollisuus, muottien valmistus ja korjaus, puolustus-, avaruus- sekä muu korkean teknologian teollisuus ja elektroniikka.
- Malli 3DF150 – (3D Fusion™ 150) jauhepetiin perustuva menetelmä käyttää kahta sintrauspäätä, jotka voivat toimia itsenäisesti tai master-slave-tilassa. Järjestelmän tehokkuus vaihtelee 5 - 20 cm³/h ja se rakennetaan aina asiakkaan vaatimusten mukaisesti tavoitteena saada aikaan mahdollisimman suuri tehokkuus juuri asiakkaan kohdetta ajatellen.
- Lisätietoja:
<http://www.fonon.us/laser-cutting-laser-marking/3d-metal-printing/>

Stratasys & HASCO, Rapid tooling / Using 3DPrinted molding inserts

- Stratasys ja muottivalmistaja HASCO julkaisivat uuden menetelmän pienten sarjojen valettujen prototyyppien ruiskuvalumuottien tuottamiseen syyskuussa 2015. Menetelmän uskotaan parantavan ruiskuvalumuottien valmistuksen nopeutumista ja halpenemista. K3500 nopean vaihdon muottijärjestelmä sekä Stratasys 3D tulostin mahdollistavat erilaisten mallien nopean vaihdon.

- Lisätietoja:

<http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/10699/New-HASCOStratasys-Hybrid-System-3D-Prints-Inserts-For-Injection-Molded-Prototypes.aspx>

8 LÄHTEET

- [1] P. Reeves, “Additive Manufacturing – A supply chain wide response to economic uncertainty and environmental sustainability.” .
- [2] E. Hietikko, “Design for Additive Manufacturing – DFAM,” *Int. J. Eng. Sci. IJES*, vol. Vol 3, no. Issue 2, p. 6.
- [3] R. Hague, I. Campbell, and P. Dickens, “Implications on design of rapid manufacturing.”.
- [4] “Applications for Additive Manufacturing technology,” *Met. Addit. Manuf.*
- [5] D. B. Kim, P. Witherell, R. Lipman, and S. C. Feng, “Streamlining the additive manufacturing digital spectrum: A systems approach,” *Addit. Manuf.*, vol. 5, pp. 20–30, Jan. 2015.
- [6] “3D Printing - Opportunities, Challenges, and Policy Implications of Additive Manufacturing.”.
- [7] M. Baumers, P. Dickens, C. Tuck, and R. Hague, “The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, Apr. 2015.
- [8] “Aerospace Workshop Planning Session.” Oak Ridge National Laboratory, September 2010.
- [9] B. P. Conner, G. P. Manogharan, A. N. Martof, L. M. Rodomsky, C. M. Rodomsky, D. C. Jordan, and J. W. Limperos, “Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services,” *Addit. Manuf.*, vol. 1–4, pp. 64–76, Oct. 2014.
- [10] Wohlers Report. (2015). “3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry.”
- [11] ASTM (F2792–12a) Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, http://www.astm.org/FULL_TEXT/F2792/HTML/F2792.htm

[12] Stucker B., University of Louisville, Additive Manufacturing Technologies: The Potential Democratization of the Production of Physical Goods

[13] Kruth J-P., Powder bed Fusion Additive Manufacturing, KU Leuven university, Belgium, <http://nsfam.mae.ufl.edu/Slides/Kruth.pdf>

[14] Ek K.: Additive Manufactured Material, Master of Science Thesis, KTH Industrial Engineering and Management, Stockholm, 2014

[15] Eggemoen., Norsk Titanium, Norsk Titanium Components – Innovative technology for Titanium component production, Titanium Day at Eggemoen Aviation & Technology Park, 2012

[16] RPM Innovations, Laser Cladding technology, Retrieved (11/2015) from <http://www.rpm-innovations.com/>

[17] Composite manufacturing. (15/10/2015). “Pros and Cons of Additive Manufacturing” Retrieved (11/2015) from <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2014/10/pros-cons-additive-manufacturing/>

[18] Autodesk press release. (30/10/2014). “Autodesk Announces \$100 Million Spark Investment Fund, the World’s First 3D Printing Investment Program”. Retrieved (11/2015) from <http://news.autodesk.com/press-release/corporate-sustainability/autodesk-announces-100-million-spark-investment-fund-worlds-f>

[19] Wohlers Report. (2014). “3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry.”

[20] Andrew Zaleski, Fortune (March 5, 2015), “GE’s bestselling jet engine makes 3-D printing a core component”, Retrieved (11/2015) from <http://fortune.com/2015/03/05/ge-engine-3d-printing/>

[21] Tomas Kellner, GE Reports (Oct 10, 2014), “A Short Flight for a Jet, A Giant Leap for a Jet Engine”, Retrieved (11/2015) from <http://www.gereports.com/post/99568939810/a-short-flight-for-a-jet-a-giant-leap-for-a-jet/>

[22] Ralf Becker, (15-18.11.2015), “Biomedical and industrial processing applications of additive technologies”, Formnext, International exhibition and conference on additive technologies

[23] SKL State key laboratory for manufacturing systems engineering, (11/08/2015), Report on ISO/TC 261 “Additive Manufacturing” Conference, Retrieved (11/2015) from <http://sklms.xjtu.edu.cn/english/new-show.php?id=37>

[24] Dr. Kristian Arntz, Fraunhofer IPT, (15-18.11.2015), “How to assess and implement additive technologies/”, Formnext, International exhibition and conference on additive technologies

[25] Stamford, Conn., Gartner, Press release, (18/8/2015), “Gartner’s 2015 Hype Cycle for Emerging Technologies Identifies the Computing Innovations That Organizations Should Monitor”, “2015 Hype Cycle Special Report Illustrates the Market Excitement, Maturity and Benefit of More Than 2,000 Technologies”, Retrieved (11/2015) from <http://www.gartner.com/newsroom/id/3114217>

[26] Dr. Mark J. Cotteleer, Deloitte Services LLP (1/10/2014), ”3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth”, Retrieved (11/2015) from <http://www.forbes.com/sites/louiscolombus/2015/03/31/2015-roundup-of-3d-printing-market-forecasts-and-estimates/>

[27] Gillian Rich, Investors.com, (10/7/2013), “GE: 3D Printers To ‘Touch’ Half Of Its Manufacturing”, Retrieved (11/2015) from <http://news.investors.com/100713-674161-ge-sees-3d-printers-in-its-manufacturing.htm>

[28] Martin Friedrich, (15-18.11.2015), “Using AM in automotive; moving additive from R&D to production”, Formnext, International exhibition and conference on additive technologies

[29] Sandra Zistl, Siemens, (1/10/2014), “Additive manufacturing – 3DPrinting: Facts & Forecasts”, Retrieved (11/2015) from <http://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/industry-and-automation/Additive-manufacturing-facts-and-forecasts.html>

[30] CSC, Fall 2012, ”3D Printing and the Future of Manufacturing”, Retrieved (11/2015) from http://www.csc.com/innovation/insights/92142-3d_printing_and_the_future_of_manufacturing

[31] Harvard Business Review, (5/2015), ”The 3-D Printing Revolution”, Retrieved (11/2015) from <https://hbr.org/2015/05/the-3-d-printing-revolution>

LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN PERUSTEET

Lisäävä valmistus (*Additive Manufacturing*, AM, 3D-tulostus) on noussut varteenotettavaksi valmistusmenetelmäksi perinteisten valmistusmenetelmien rinnalle. Sitä on nimetty jopa “tuotannon kolmanneksi vallankumoukseksi”, koska se siirtää suunnittelun näkökulman valmistettavuudesta toiminnallisuuden mahdollistaen tuotteiden geometrisesti vapaamman suunnittelun, varastoinnin digitaalisessa muodossa ja valmistamisen vain tarpeeseen. Huolimatta siitä, että lisäävä valmistus suuntaa suunnittelun näkökulman lopputuotteen toiminnallisuuteen, on valmistettavuus edelleen otettava huomioon hyvin erilaisten menetelmien ja käytettävien materiaalien johdosta.

Lisäävää valmistusta on aiemmin kutsuttu nimellä “pikavalmistus” tai “*rapid prototyping*”, koska kymmenisen vuotta siten sitä käytettiin pääasiassa pelkästään prototyyppien valmistukseen. Tämä pitää edelleenkin osin paikkansa, mutta fokus on siirtymässä koko ajan enemmän prototyyppien valmistuksesta lopputuotteiden valmistukseen. Materiaaliteknologian kehittymisen myötä useat valmistajat ovat testanneet ja sertifioineet suunnitteluohjeita ja materiaaleja erityisesti lisäävän valmistuksen kanssa käytettäväksi.

Tässä julkaisussa luodaan yleiskuva lisäävään valmistukseen, sen menetelmiin, materiaaleihin ja laitevalmistajiin. Julkaisu on syntynyt Savonian toteuttamassa ALVO-hankeessa.



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020

Pohjois-Savon liitto tukee
maakunnan
menestystä



KUOPIO