



SAVONIA



■ TEKNOLOGIA- JA YMPÄRISTÖALA

DEADMAN-TUTKIMUS- HANKKEEN LOPPURAPORTTI

KOKEMUKSIA METALLIKAPPALEIDEN AINETTA LISÄÄVÄSTÄ VALMISTUKSESTA

KIRJOITTAJAT **Antti Alonen, Esa Hietikko, Mikko Hoffren, Matti Kesonen
ja Arto Urpilainen**

DEADMAN –TUTKIMUSHANKKEEN LOPPURAPORTTI

Kokemuksia metallikappaleiden ainetta
lisäävästä valmistuksesta

Kirjoittajat

Antti Alonen
Esa Hietikko
Mikko Hoffren
Matti Kesonen
Arto Urpilainen

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 © 2015 tekijät ja Savonia-ammattikorkeakoulu

Tämän teoksen kopioiminen on tekijänoikeuslain (404/61) ja tekijänoikeusasetuksen (574/95) mukaisesti kielletty lukuun ottamatta Suomen valtion ja Kopiosto ry:n tekemässä sopimuksessa tarkemmin määritellyä 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 978-952-203-202-7 (painettu)

ISBN 978-952-203-203-4 (PDF)

ISSN-L: 1795-0848

ISSN: 1795-0848

Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja D4/3/2015

Kustantaja: Savonia-ammattikorkeakoulu, DeadMan-tutkimushanke
Ulkoasu ja taitto: Tapio Aalto

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	5
2 AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS	7
2.1 Ainetta lisäävä valmistus – kolmas teollinen vallankumous(ko) ...	7
2.2 Ainetta lisäävän valmistuksen edut ja rajoitteet	8
2.3 AM verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin	16
3 METALLIEN AINETTA LISÄÄVÄT VALMISTUSMENETELMÄT	18
3.1 Yleistä metallien AM-valmistuksesta	18
3.2 Metallien AM-menetelmät	20
3.2.1 Jauhepetimenetelmät (Powder Bed Fusion)	21
3.2.2 Suorakerrostusmenetelmät (Directed Energy Deposition)	28
3.2.3 Sidosaineen suihkutusmenetelmät (Binder Jetting)	32
3.2.4 Laminointimenetelmät (Laminated Object Modeling)	33
3.3 Laitteistovalmistajia	35
4 AM-KAPPALEIDEN SUUNNITTELUPERIAATTEET	36
4.1 Yleistä	26
4.2 AM-kappaleen suunnittelusta	36
4.3 Yleisimmät käytössä olevat AM-menetelmät ja menetelmäkohtaiset suunnitteluperusteet	37
4.3.1 Jauhepetitekniikka (Powder bed fusion)	37
4.3.2 Suorakerrostusmenetelmät (Directed Energy Deposition)	43
4.3.3 Sidosaineen suihkutusmenetelmät (Binder Jetting)	43
4.3.4 Valaminen 3D-tulostettuihin muotteihin	44
5 METALLISTEN AM-MATERIAALIEN OMINAISUUDET	46
5.1 Hankkeessa tutkitut materiaalit	46
5.1.1 Pinnankovuus	46
5.1.2 Mikrorakenne	48
5.1.3 Jälkikäsittely	50
5.2 Väsymislujuus	51
5.3 Kappaleiden sisäiset rakenteet	58
6 AM-KUSTANNUSTEN ARVIOINTI	66
6.1 AM-kappaleiden suunnittelukustannukset	69
6.2 AM-kappaleiden valmistuskustannukset	69
6.3 Kustannusmallit	72

7 KOKEMUKSIA CASE-KAPPALEISTA	79
7.1 Samesor –case kappale - muotorulla	79
7.2 Ponsse –case kappale - putkimutka	81
7.3 Hydroline –case kappaleet: pääty ja varsi	83
7.4 Case-kappaleiden kilpailutus ja hankinta	86
7.5 Eurooppalaisia palveluntarjoajia	88
8 YHTEENVETO	90
9 LÄHDELUETTELO	92

1 JOHDANTO

Pohjois-Savon teknologiateollisuus pohjautuu vahvasti vientivetoiseen hyötyajoneuvoteollisuuteen ja sen toimitusverkostoihin. Viimeaikoina teollisuuden kilpailukykyä on kehitetty useissa hankkeissa mm. parantamalla toimitusverkostojen tuottavuutta LEAN-ajattelun mukaiseksi sekä kehittämällä tuotteiden valmistettavuutta ja niiden tuoterakenteita modulaarisemmiksi ja massaräätälöintiin sopiviksi. Näillä saroilla on vielä paljon tehtävää, mutta uusiakin tuulia on haisteltava.

Yksi keskustelluimmista ajatuksista maailmalla on tällä hetkellä ainetta lisäävä valmistus (*Additive Manufacturing, AM*). Saman teknologian yhteydessä puhutaan myös pikavalmistuksesta (*Rapid Prototyping*), joka on nimensä mukaisesti viitannut enemmän prototyyppien tuottamiseen sekä muovista valmistettavien kappaleiden kotona tapahtuvasta 3D-tulostuksesta. Uuden termin mukainen ajattelumalli johdattelee kuitenkin suoranaiseen komponenttien teolliseen valmistukseen ja perinteisten valmistusmenetelmien korvaamiseen. Lähtökohtana on pidetty sitä, että ainetta lisäävä valmistus on vapaampi erilaisten valmistusmenetelmien aiheuttamista rajoitteista. Pidemmälle vietyinä tämä ajatus johtaa jopa siihen, että perinteisessä insinöörikoulutuksessa joudutaan suuntautumaan enemmän kappaleiden optimaaliseen muotoiluun.

Ainetta lisäävää valmistusteknologiaa on tutkittu paljon jo parin vuosikymmenen ajan ja siitä on olemassa paljon tutkimustietoa. Sen sijaan kyseisellä menetelmällä teollisesti tuotettavien komponenttien suunnittelua on tutkittu varsin vähän. Suunnittelulla on merkittävä rooli uudenlaisten komponenttien valmistuksessa erityisesti materiaalin käytön optimoinnissa ja osien muotoilun ja käytettävyyden parantamisessa. Voidaan myös ajatella, että suunnittelemalla osat oikein voidaan materiaalikustannuksissa säästää ja parantaa osien kokoonpantavuutta ja asiakaslähtöisyyttä niin paljon, että kalliimman valmistusmenetelmän lisäkustannukset voidaan kompensoida tai jopa kääntää voitoksi.

Tässä raportissa on kuvattu Savonia-ammattikorkeakoulun konealan toteuttama tutkimushanke *Design for Additive Manufacturing (DeAd-Man)*, joka käynnistyi vuoden 2014 alussa ja päättyy maaliskuun lopussa 2015. Hankkeessa tutkittiin ainetta lisäävän valmistuksen teknologialla tuotettavien metallimateriaalisten komponenttien suunnittelussa

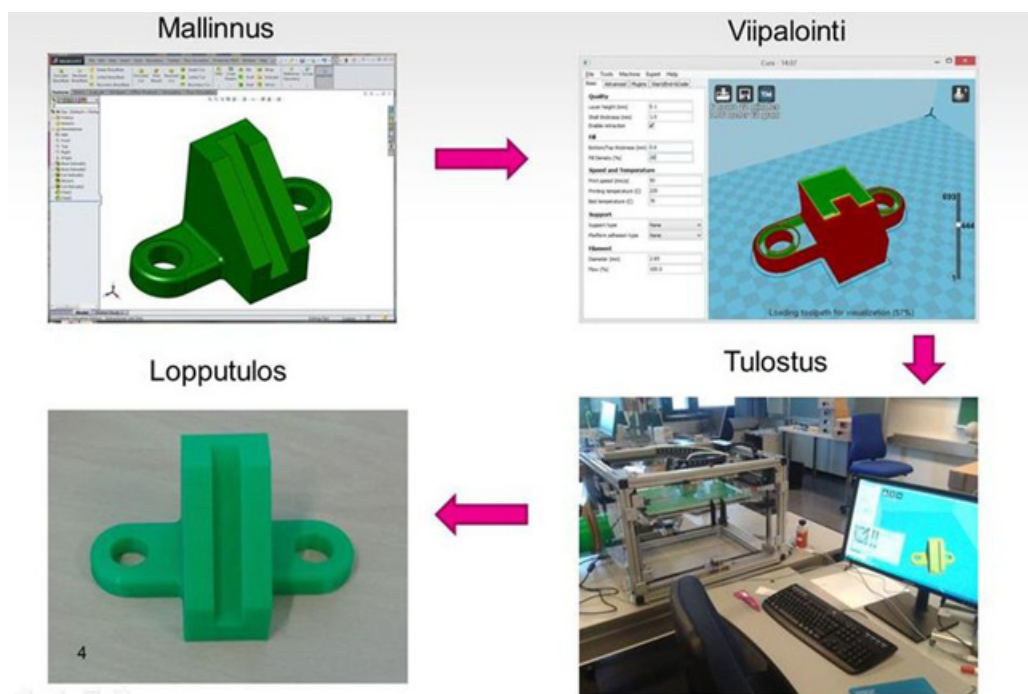
käytettäviä periaatteita, menetelmiä ja työkaluja. Lisäksi hankkeessa tutkittiin ainetta lisäävällä menetelmällä valmistettujen materiaalien mekaanisia ominaisuuksia.

Hankkeessa tutkimus fokusoitui paikallisen teollisuuden käyttämiin tyypillisiin kappaleisiin, joiden voitaisiin ajatella soveltuvan ainetta lisäävään valmistukseen. Hankkeeseen osallistui kolme metalliteollisuusyritystä, joiden todellisista kappaleista muodostui hankkeen testikappalevalikoima. Nämä kappaleet suunniteltiin uudelleen ja tilattiin tulostettuina yhteistyökumppaneilta. Testikappaleiden lisäksi yhteistyökumppaneilta tilattiin materiaalitestausta varten erä koesauvoja.

2 AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS

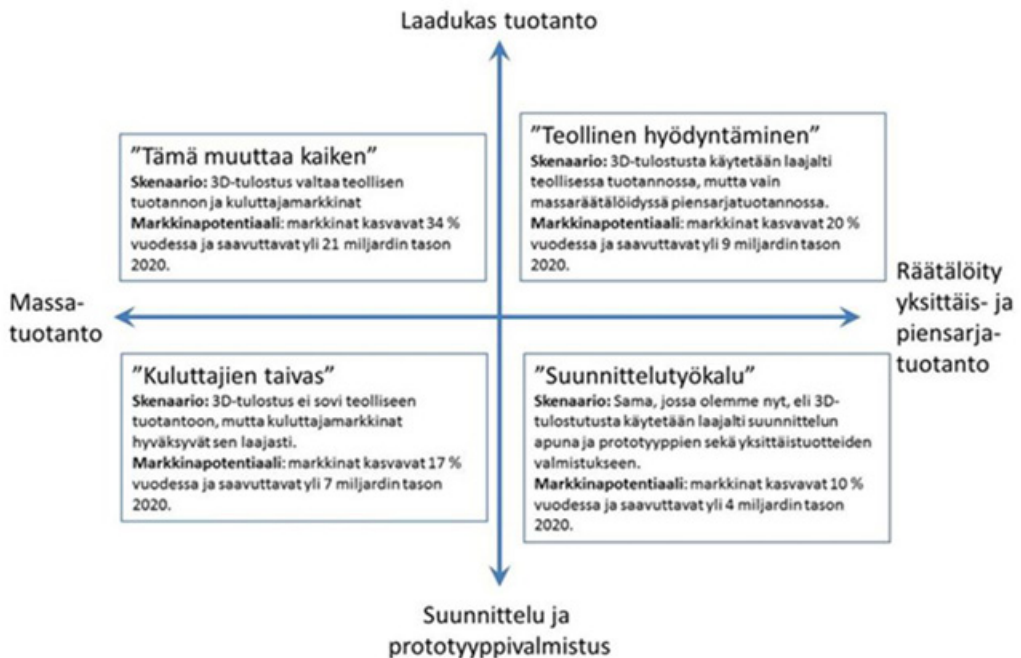
2.1 Ainetta lisäävä valmistus – kolmasteollinen vallankumous (ko)

Ainetta lisäävä valmistus (*Additive Manufacturing, AM*) on valmistustekniikka, joka erilaisilla menetelmillä rakentaa valmistettavan kohteen liittämällä materiaalia yhteen kerros kerrokselta. Tästä tulee myös valmistusmenetelmän nimitys: verrattuna perinteisiin materiaalia poistaviin menetelmiin, kappale muodostuu materiaalia lisäämällä. Kolmiulotteiset kappaleet valmistetaan suoraan CAD-mallin pohjalta. Ainetta lisäävästä valmistuksesta käytetään yleisesti myös nimitystä pikavalmistus ja puhekielessä nimitystä 3D-tulostus. Valmistus voidaan toteuttaa useilla menetelmillä, joista kaupallisessa käytössä ovat esimerkiksi stereolitografia, lasersintraus ja erilaiset pursotusmenetelmät. Yhteistä kaikille menetelmille on kuitenkin se, että ainetta lisätään kerros kerrokselta (kuva 2.1).



Kuva 2.1. Ainetta lisäävän valmistuksen prosessin eteneminen.

Cotteleer esittelee neljä erilaista skenaariota siitä miten ainetta lisäävä valmistus voi muuttua tulevien vuosien aikana. Nämä skenaariot on esitetty kuvassa 2.2 mukaillen.



Kuva 2.2. Neljä skenaariota ainetta lisäävän valmistuksen kehityskulusta tulevaisuudessa.

Vuoteen 2012 mennessä oli myyty jo 70 000 kuluttajakäyttöön tarkoitettua 3D-tulostinta. AM-teknologian ympärillä pyörivän liiketoiminnan volyymien on ennustettu kasvavan yli 10 miljardiin dollariin vuoteen 2021 mennessä [Additive manufacturing]. Ainetta lisäävää valmistusta onkin luonnehdittu kolmanneksi teolliseksi vallankumoukseksi. Se kuitenkin jakaa mielipiteitä ja voidaan nähdä sekä mahdollisuutena että uhkana.

2.2 Ainetta lisäävän valmistuksen edut ja rajoitteet

Ainetta lisäävä valmistus poistaa suuren osan geometrisista rajoituksista, joita perinteiset valmistusmenetelmät asettavat. Tämä mahdollistaa monimutkaisten ja käyttötarkoitukseen optimoitujen muotojen käytön. Jotta valmistuksesta saataisiin kaikki hyöty irti, on myös suunnittelijoiden osattava irtautua perinteisistä suunnittelufilosofioista.

Tästä seuraa merkittäviä muutoksia lähinnä insinöörien suunnittelu-työhön, joka on sadan vuoden ajan nojautunut perinteisiin valmistusmenetelmiin. [Williams & Seepersad] [Hague et All]. Toisaalta AM tuo mukanaan uusia haasteita, jotka liittyvät mm. negatiivisiin pintoihin ja kerrokselliseen rakenteeseen.

Kun ihminen seisoo paikallaan, yksikään suoraviivainen elementti ei tue häntä. Luut ovat poikkileikkaukseltaan epämääräisiä ja muuttuvat pituuden funktiona. Lisäksi luiden sisäosa ei ole kiinteää vaan huokoista rakennetta. Sen sijaan insinöörien suunnittelemat osat ovat suoria ja homogeenisia, koska niiden valmistaminen olisi muuten liian kallista ja hankalaa. Jos verrataan ihmisen sääriluuta ja vastaavaa teollisesti valmistettua komponenttia, viimeksi mainittu häviää sekä kustannuksissa, massassa että lujuus/massa-suhteessa.

Kun katselee ympärilleen, voi helposti huomata sellaiset asiat, joita insinööri on ollut mukana suunnittelemassa. Niissä on 90 asteen kulmia. Tämä on seurausta työstökoneista, joilla suorat kulmat ovat helpoimpia toteuttaa. Syynsä on myös suunnittelutyökaluilla, joilla suorakulmaiset muodot ovat helpoimpia toteuttaa ja mitata. Kun käytetään ainetta lisäävää valmistusta, suorat kulmat ja suoraviivaiset muodot voidaan unohtaa, koska ne eivät ole yhtään sen helpompia valmistaa kuin jouhevät muodot. Toinen vahvat perinteet omaava muoto on ympyrä. Erityisesti reiät on perinteisesti toteutettu poraamalla, jolloin niihin syntyy pakostakin ympyrämäinen muoto. Itse asiassa ympyrä on hankala muoto AM:n kannalta varsinkin, jos sen suunta on vaakatasossa. Parempia aukkomuotoja ovat kolmio tai monikulmio.

Insinöörit on koulutettu suunnittelemaan suoraviivaisia muotoja. AM:n kanssa tekemisissä ollessa on kuitenkin tärkeämpää, että he kiinnittäisivät enemmän huomiota toiminnallisiin tarpeisiin ja reuna-ehtoihin. Riittää, että insinöörit asettavat tavoitteet rakenteen toimivuudelle, lujuudelle, kustannuksille ja valmistusajalle ja loput jätetään ohjelmistojen toteutettavaksi.

Yksi AM:n keskeisimmistä tavoitteista on laajentaa perinteisten valmistusmenetelmien toistettavuutta ja luotettavuutta yksittäistuotannon ja räätälöitävien kappaleiden suuntaan. Vaikka joidenkin kappaleiden osalta AM:n kustannuskilpailukyky on jo perinteisiä valmistusmenetelmiä parempi, ollaan laajassa mitassa vielä kaukana tavoitteista. Lääketieteen sovelluksissa ollaan jo tietyissä kohteissa hyvin pitkällä esimerkiksi erilaisten implanttien osalta.

AM:n etuja ovat mm. työkalujen tarpeettomuus. Ainetta lisäävää valmistusta lähinnä oleva kilpailija on luonnollisesti valu, jonka yhteydessä kappaleen muotoilu on varsin vapaata. Valuissa tarvitaan kuitenkin joko kallis valumalli ja/tai kallis muotti, joiden suunnittelu ja valmistaminen on aikaa vievää. AM:n yhteydessä jäävät pois myös tuotannon katkokset mahdollisessa valumallin tai -muotin rikkoutumistapauksessa samoin kuin valumallien ja -muottien varastointi- ja huoltokustannukset.

Tuotemiksin nopeat muutokset ovat mahdollisia AM-tekniikkaa hyödynnettäessä. Kaikki AM-tekniikalla tuotettavat osat voivat olla erilaisia. Toisaalta, vaikka varsinaisia työkaluja ei AM:n yhteydessä tarvitakaan, joudutaan kuitenkin tekemään tiettyjä esi- ja jälkikäsitteilyvaiheita. AM:n käyttö vähentää myös keskeneräistä tuotantoa, koska osat voidaan tulostaa *Just-In-Time* -periaatteella. AM-osia voidaan myös tulostaa yhdellä kertaa niin paljon kuin niitä tulostusalueelle mahtuu. Varastoja vähentämällä vapautuu pääomaa ja kustannukset pienenevät. Kun AM:N avulla perinteiset skaalaedut vähenevät, ei tarvita enää suuria teollisuuskeskittymiä, vaan tuotanto voidaan siirtää lähelle kulutusta.

Edellä mainittujen etujen lisäksi suuri merkitys on sillä, että tulostettavat kappaleet voidaan suunnitella erityisesti tulostamista varten. Esimerkiksi kokoonpanon osien määrän pienentäminen vaikuttaa välittömästi valmistuskustannuksiin. Samoin käytettävän materiaalin määrä voidaan optimoida tilanteen mukaan, jolloin säästetään materiaalikustannusten lisäksi myös painossa.

AM on selkeästi kallis tapa tuottaa osia ainakin, jos katsotaan koneiden ja materiaalien hintoja. Jos katse käännetään kuitenkin yksittäisen tulostustapahtuman sijasta tuotteen koko elinkaareen ja kokonaisvaltaisesti tuotantokustannuksiin, voidaan päästä toisenkinlaiseen lopputulokseen. Esimerkiksi lentokoneen osa, jonka valmistuskustannukset perinteisellä valmistusmenetelmällä ovat 100 € ja AM-tekniikalla 1.000 € ei kuulosta lupaavalta. Jos osan massaa saadaan pienennettyä esimerkiksi 15 % tämä voi johtaa 10 vuoden käyttöiän aikana jopa 10.000 € operointi- ja huoltokustannusten vähentämiseen. Vastaavallaisia kustannuksiin vaikuttavia, mutta ei mitattavissa olevia hyötyjä, voidaan löytää myös tuotteen parempana käytettävyytenä sekä asiakkaiden tyytyväisyyden ja sitoutuvuuden lisääntymisenä.

AM on vaihtoehto tuotteiden teolliseen valmistukseen, jos valmistusmäärät ja tuoteominaisuudet ovat sopivia. Esimerkiksi muovimuotin kustannus kohoaa helposti 10 000 euroon. Jos sarjan koko on esim. tuhat kappaletta, muotin kustannus kappaletta kohden on vielä 10 euroa.

Reeves jakaa AM:llä valmistettavat kappaleet seuraaviin luokkiin:

1. **Massapersonoidut kappaleet** – niissä geometria määräytyy täysin yksittäisen asiakkaan mukaan. Tällaisia ovat esimerkiksi korvakuulokkeet ja hammasimplantit tai itse suunnitellut korut.
2. **Massaräätälöidyt kappaleet** – näissä loppukäyttäjä voi itse kustomoida kappaleen haluamallaan tavalla. Tällaisia ovat esimerkiksi tietokonepelien avattaret.
3. **Hajautettu valmistus** – koska AM ei tarvitse työkaluja, kiinnittimiä eikä muotteja, voidaan valmistus toteuttaa melkein missä tahansa. Tällöin voidaan esimerkiksi lyhentää kuljetusmatkaa ja -kustannuksia kulutuspaikalle.
4. **Tilauspohjainen tuotanto** – tuote valmistetaan vasta sen jälkeen kun se on tilattu ja toimitetaan suoraan asiakkaalle. Valmistaminen voidaan toteuttaa useissa paikossa ympäri maailman, jotka sijaitsevat lähellä asiakasta.
5. **Kotituotanto** – valmistamalla tuotteet suoraan kotona voidaan merkittävästi lyhentää tuotteen toimitusketjua ja -aikaa myyjältä kuluttajalle.

Ainetta lisäävällä valmistuksella saavutettavia etuja:

1. Monimutkaisuus ei lisää kustannuksia
2. Ainehukka on vähäistä
3. Kappaleiden geometria voi olla vapaa työstökoneiden ja aihioiden rajoituksista
4. Asetusajat ovat pienet
5. Valmistustaitoa ei tarvita (ainakaan yhtä paljon kuin perinteisillä menetelmillä)
6. Laitteistot ovat pienikokoisia ja siirrettäviä
7. Valmistusmateriaalien kirjo on runsas
8. Tuotteet voidaan valmistaa tarpeen mukaan ilman välivarastoja tai varaosavarastoja.
9. Yksittäinen tehdas voi valmistaa periaatteessa äärettömän määrän erilaisia komponentteja ilman asetusten tai työkalujen muutoksia. Ja kustakin osasta voidaan tuottaa helposti variantteja muuttamatta valmistusmenetelmiä
10. Tuotanto ja jakelu voidaan sijoittaa lähemmäs asiakasta ilman suuria investointeja.

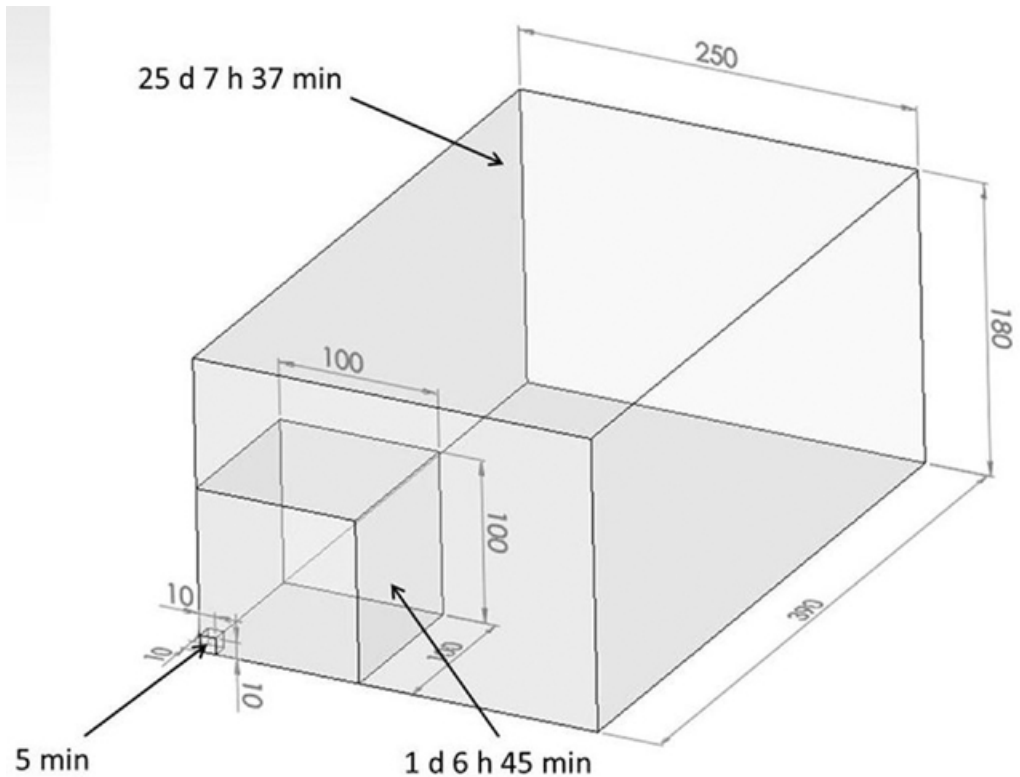
11. Tuotanto voidaan vetää pois halvan työvoiman maista sinne, missä kulutuskin tapahtuu.
12. AM:n avulla voidaan usein pienentää kokoonpanon osien määrää rakentamalla monimutkaisempia osia.

Design for Manufacturability (DFM) on ollut jo pitkään suunnittelufilosofia, jonka perusteella valmistuskustannuksia voidaan alentaa merkittävästi ottaen huomioon valmistusmenetelmän asettamat rajoitukset. Vaikka ainetta lisäävässä valmistuksessa kappaleen muoto voidaan valita perinteisiä valmistusmenetelmiä vapaammin ilman että tarvitsee ottaa huomioon valmistuksessa käytettävien laitteiden asettamia rajoitteita, on kuitenkin pidettävä mielessä tiettyjä käytännön haasteita, joita AM asettaa. Tällaisia ovat esimerkiksi [3D Design...]:

1. Valmistettavassa osassa ei voi olla hyvin ohuita seinämänpaksuuksia. Tyypillisesti pienin toteutettavissa oleva seinämänpaksuus on menetelmästä riippuen n. 0,25 – 2,5 mm.
2. CAD-malli konvertoidaan tulostusta varten STL-formaattiin usein liian tiukalla resoluutiolla, jolloin mallin koko ja käsittelyaika kasvavat tarpeettomasti. CAD-mallin eheys on myös useassa tapauksessa ongelma, koska tulostus vaatii onnistuakseen yksikäsitteiset ja jouhevasti toisiinsa liittyvät geometriset alkiot.
3. Tulostuksen pinnan laatu ei ole sellaisenaan aina riittävän hyvä kerroksellisuudesta johtuen.
4. Tulostettavassa osassa ei saa olla umpinaisia ontokoiksi tarkoitettuja piirteitä, joista tukimateriaalin tai jauheen poistaminen on mahdotonta.
5. Kokoonpanoihin tuleviin osiin on suunniteltava riittävän väljät toleranssit, koska AM ei kykene kovin tarkkaan lopputulokseen. Monissa tapauksissa osat joudutaan valujen tapaan jälkikäsittelymään esimerkiksi koneistamalla ennen kokoonpanoa.
6. Vaikka periaatteessa AM:n avulla voidaan tulostaa kokonaisuuk-
sia, joissa on toistensa suhteen liikkuvia osia, ovat nämä useille menetelmille hyvin haasteellisia.

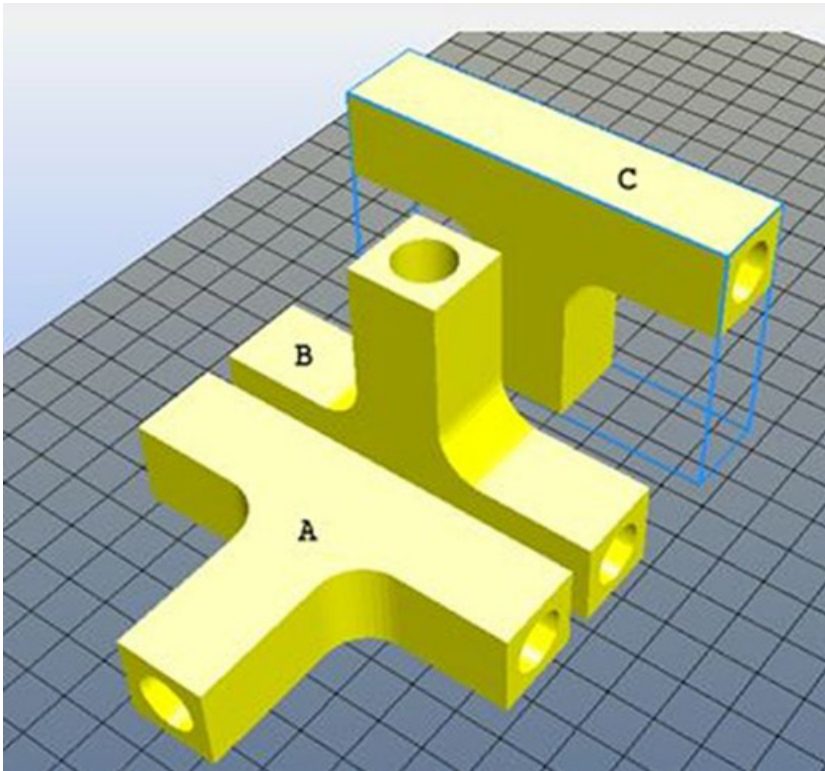
3D-tulostuksessa kappaleen muotoa rajoittavia tekijöitä on useita, ensimmäisenä kappaleen koko. 3D-tulostimen resoluutio eli erotuskyky määrää pienimmät mahdolliset muodot ja yksityiskohdat. Koko vaikuttaa myös mekanismien tekemiseen. Esimerkiksi Shapeways-netti-
kaupassa pienimmät valmistettavat tuotteet ovat tilavuudeltaan 3,00 x 3,00 x 3,00 mm ja suurimmat 762 x 393 x 393 mm.

Ainetta lisäävässä valmistuksessa kappaleen koko vaikuttaa voimakkaasti tulostusaikaan ja sitä kautta myös kappaleen kustannuksiin, koska koneaika on kalliiden tulostimien johdosta merkittävä kustannuserä. Kuvassa 2.3 on vertailtu tulostusaikoja erikokoisilla kappaleilla käytettäessä Profi3DMaker -muovitulostinta 0,2 mm kerrospaksuudella ja 50 % täyttöasteella. Ajat ovat suuntaa antavia ja ne on arvioitu käyttäen Cura-ohjelmistoa.



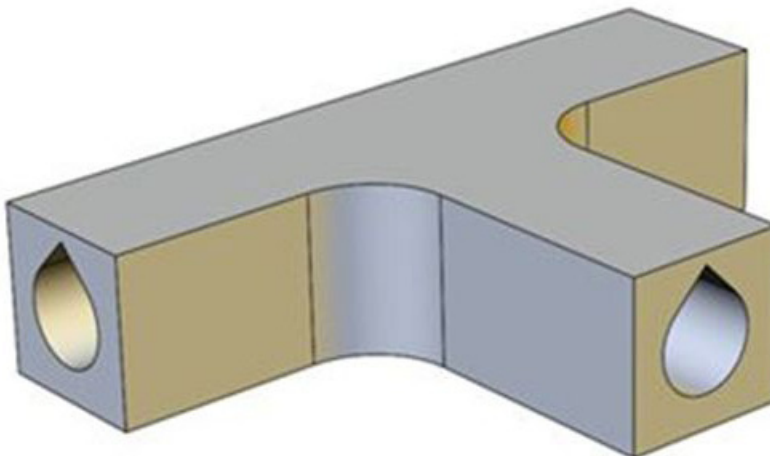
Kuva 2.3. Erikokoisten suorakulmaisten särmiöiden tulostusaikoja.

Toisena tärkeänä suunnittelukriteerinä on kappaleen muoto ja tulostussuunta. Valitsemalla kappaleen muoto ja tulostussuunta oikein voidaan välttää tukirakenteita. Tukirakenteita tarvitaan yleensä kun kappaleessa on tulostussuuntaan negatiivisia (roikkuvia) pintoja. Useimmilla tulostusmenetelmillä ei ole mahdollista tulostaa tyhjän päälle, jolloin tällaisiin kohtiin tarvitaan tukimateriaalia. Tukirakenteet joudutaan irrottamaan tulostuksen jälkeen. Kuvassa 2.4 olevassa esimerkissä kappale on asetettu kolmeen tulostusasentoon. A-asennossa kappaleessa on negatiivisia pintoja vain vaakasuorissa rei'issä. B-vaihtoehdossa negatiivisia pintoja on vähemmän ja C-vaihtoehdossa eniten.

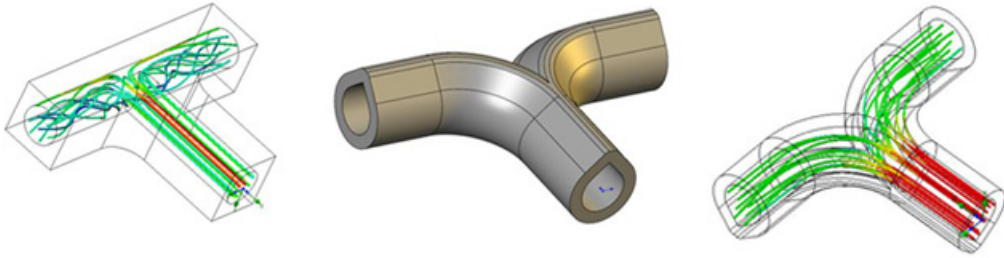


Kuva 2.4. Tulostussuunnalla on voimakas vaikutus kappaleen kustannuksiin.

Yksi tapa välttää reikiin muodostuvia tukirakenteita on pisaramuoto (esimerkki kuvassa 2.5). Kappaleen pinnanlaatua ei voi printtauksessa saada täysin sileäksi, vaan kappale joudutaan tarkkoja pintoja vaadittaessa koneistamaan tulostuksen jälkeen. Muodon avulla voidaan myös parantaa huomattavasti esimerkiksi nestevirtauksia (kuva 2.6).



Kuva 2.5. Pisaramuoto helpottaa vaakasuorien reikien tulostamista.



Kuva 2.6. Muotoilulla voidaan parantaa mm. virtausominaisuuksia.

Itse asiassa AM voidaan yhdistää myös muihin valmistusmenetelmiin, jolloin puhutaan termistä ”*Automated Fabrication*”. Sen pääprosessit ovat ainetta poistava, ainetta lisäävä ja ainetta muovaava valmistus. [Burns]

Monialaisuuden merkitys korostuu AM:n suunnittelutoiminnassa, koska monimutkaisilla geometrioilla ja muodoilla saavutetaan optimaalinen materiaalin käyttö ja kustannustehokkuus. Tällöin voidaan ajatella, että esimerkiksi muotoilija suunnittelee osan muodot toiminnallisesti ja visuaalisesti järkeviksi, insinööri analysoi kappaleen ominaisuudet (mm. kestoikä, muodonmuutokset käyttötilanteessa, tarkkuus ja yhteensopivuus kokoonpanossa) ja liiketaloustieteilijä analysoi kappaleen kustannusrakenteen ja asiakastarpeen toteutumisen.

Innovaatiokyvyllä ja sen kehittämällä on myös suuri merkitys, koska perinteisten valmistusmenetelmien asettamat rajoitteet voidaan suurelta osin unohtaa.

Ehkä AM:n lisääntyvän käytön pahimpana esteenä ovatkin asenteet. ”*Olemme aina tehneet näin*” ja ”*Miksi korjata jotain joka ei ole rikki ja toimii*”. Nämä asenteet on usein sidottu tiukasti yritysten kulttuuriin, joka tunnetusti on erittäin hankala asia muuttaa (”*Kulttuuri syö strategian aamupalaksi*”).

2.3 AM verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin

AM <-> CNC-koneistus

AM voittaa seuraavissa:

- CNC-koneistus on ainetta poistava menetelmä, jossa aihioista jää lopputuotteeksi vain tietty osa.
- AM on parempi monimutkaisten piirteiden valmistuksessa. Esimerkiksi sisäiset muodot, syvät reiät ja aukot ovat hankalia CNC-koneille.
- AM on nopeampi monimutkaisilla ja pienillä kappaleilla.
- AM tarvitsee vähemmän ja alemman koulutuksen saanutta työvoimaa. Yksi henkilö voi valvoa useita tulostimia.
- AM tarvitsee paljon vähemmän asetuksia ja kiinnittimiä.
- AM ei tarvitse työkaluja.

CNC-koneistus voittaa seuraavissa:

- AM-tuloste on yleensä pinnaltaan varsin karkea ilman jatkokäsittelyä Ra-arvon ollessa jossain 100 - 600 välillä. CNC-kone pystyy paljon sileämpään pintaan.
- AM-osien koko on yleensä rajattu aika pieneksi (esim. 200 x 200 x 250 mm³). CNC-kone voittaa tässä suhteessa.
- Toleranssit - AM pystyy tulostamaan n. +/- 0,1 - 0,5 mm tarkkuudella, kun taas CNC-koneella päästään jopa +/- 0,01 tarkkuuteen.

AM <-> Valu

AM voittaa seuraavissa:

- AM ei tarvitse valumalleja eikä muotteja. Itse asiassa AM-menetelmin voidaan valmistaa sekä valumallit että muotitkin.
- Valuissa pitää olla tietty sarjakoko, jotta muottikustannus yhtä osaa kohden jää inhimilliseksi. Myös valumallin ja muotin suunnitteluun ja valmistukseen kuluu usein paljon aikaa.
- Valuissa tulee olla päästöjä, AM ei tarvitse sellaisia.
- Seinämänpaksuudet ovat usein kriittisiä valuissa (valun jähmettyminen). AM voi tuottaa millaisia seinämänpaksuuksia tahansa (tietyin rajoituksin).
- Terävät kulmat valuissa aiheuttavat ongelmia.
- Valuissa on pohdittava jakosaumojen kohdat. AM:ssä sellaista ei tarvita.

Valu voittaa seuraavissa:

- AM-tuloste on yleensä pinnaltaan varsin karkea ilman jatkokäsittelyä. Kestomuotteja käytettäessä valun pinta saadaan sileämmäksi.
- Sarjakoon kasvaessa AM ei pysty kilpailemaan kustannustehokkuudessa.
- Suurikokoisten kappaleiden valmistaminen onnistuu valamalla selvästi paremmin.

AM <-> Hitsattavat levyrakenteet

AM voittaa seuraavissa:

- Levyleikkeissä syntyy materiaalihukkaa.
- AM-kappaleissa on vähemmän hitsauksen tarvetta (jos ollenkaan).
- AM-kappaleissa ei tarvitse ottaa (siinä määrin) huomioon lämpötilan vaikutuksia rakenteeseen.
- AM-kappaleeseen saadaan suoraan halutut muodot, levyrakenteissa joudutaan taivuttamaan esimerkiksi särmäämällä.
- AM:ssä ei tarvita kiinnittimiä.

Levyrakenteet voittavat seuraavissa:

- Suurikokoisten kappaleiden valmistaminen on nopeampaa ja halvempaa.
- Sarjakoon kasvaessa AM ei pysty kilpailemaan kustannustehokkuudessa.

3 METALLIEN AINETTA LISÄÄVÄT VALMISTUSMENETELMÄT

3.1 Yleistä metallien AM-valmistuksesta

Metallien AM-menetelmiä on useita, ja ne voidaan luokitella eri kategorioihin niiden käyttämien materiaalien tai toimintaperiaatteiden pohjalta. Eri laitteita vertaillaessa ongelmia tuo se, että useat laitevalmistajat ovat keksineet ja rekisteröineet laite- ja prosessinimiä valmistusmenetelmilleen ja laitteilleen. Menetelmien rekisteröinti tuote/tavaramerkeiksi on estänyt muita valmistajia käyttämästä samoja termejä, josta syystä samalla toimintaperiaatteella toimivia laitteita kutsutaan useita eri termejä käyttäen.

Termien standardisointia silmällä pitäen ”ASTM International Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies” määritteli ja hyväksyi listan AM-valmistusprosessien kategorioista tammikuussa 2012. Lista hyväksyttiin vuonna 2013 ISO ja ASTM -järjestöjen yhteisstandardiksi (ISO / ASTM 52921–13). Metallien osalta valmistusmenetelmät on luokiteltu standardissa taulukon 3.1. mukaisesti.

Taulukko 3.1. Metallien AM-valmistusmenetelmät.

Menetelmät	Englanninkielinen nimi	Valmistajien käyttämiä termejä mm.	Toimintaperiaate lyhyesti
Jauhepetimenetelmät	Powder bed fusion	SLS, DMSL, SLM, EBM	Jauhepedille levitetty materiaali yhdistetään tai sulatetaan halutuilta kohdin lämpöenergian avulla. Lämpöenergia voidaan tuottaa kuitulaserilla tai elektronisuihkulla.
Suorakerrostusmenetelmät	Directed energy deposition	LBMD, LMD, LENS	Kohdistettu lämpöenergia sulattaa jauhemaisen materiaalin välittömästi asettamisen aikana. Lämpöenergia voidaan tuottaa kuitulaserilla tai elektronisuihkulla.
Sidosaineruiskutusmenetelmät	Binder Jetting	3DP	Jauhemainen materiaali liimataan/yhdistetään nestemäisen sidosaineen avulla
Laminointimenetelmät	Sheet Lamination	LOM	Materiaaliarkit/levyt ladotaan päällekkäin ja yhdistetään.

Eri valmistusmenetelmillä on luonnollisesti vaikutusta myös siihen, mitä materiaaleja laitteilla voidaan käyttää tuotteiden valmistuksessa. Yleisimmät materiaalit metallin AM-valmistuksen alkuajoista lähtien ovat olleet titaani ja ruostumaton teräs. Titaani on kevyt, luja sekä bioyhteensopiva materiaali ja soveltuu siten hyvin sekä lentokoneteollisuuden tarpeisiin että lääketieteen sovelluksiin. Kyseiset teollisuuden alat ovatkin AM-menetelmien ensimmäisiä isomman mittakaavan hyödyntäjiä.

Käytännössä suurin osa markkinoilla olevista AM-menetelmien metallimateriaaleista on erilaisia metalliseoksia jotka eroavat hieman ominaisuuksiltaan perinteisistä materiaaleista. Materiaalien ominaisuuksista kerrotaan tarkemmin tämän raportin luvussa ”Metallisten AM-materiaalien ominaisuudet”.

Markkinoilla olevissa metallien AM-tulostimissa ei yleensä voi käyttää eri materiaaleja samanaikaisesti poikkeuksena jotkin suorakerrostuslaitteistot. Eri materiaalit vaativat erilaisia prosessiympäristöjä ja suojaasuja. Materiaalien vaihtaminen laitteistoon on yleensä hankalaa koska jauhetekniikoihin perustuvien laitteiden käyttämien jauheiden partikkelikoot ovat pieniä ja kontaminaatioriski siten suuri. Osa laitteistovalmistajista onkin erikoistunut esimerkiksi titaanin tulostukseen eikä edes tarjoa mahdollisuutta muihin materiaaleihin. Vastaavasti osa valmistajista tarjoaa laitteilleen esimerkiksi alumiini- ja teräsmateriaaleja, mutta ei titaanin tulostusmahdollisuutta.

Useat laitevalmistajat myös sitovat käyttäjänsä laitteistotakuun raukeamisen uhalla käyttämään vain laitevalmistajan tarjoamia materiaaleja, jotka ovat poikkeuksetta kalliita. Tiukkaa rajoitusta perustellaan usein laadunvalvonnalla joka osittain pitää kyllä paikkansa. Vastaavaa, laadukasta materiaalia on kuitenkin mahdollista ostaa markkinoilta huomattavasti halvempaan hintaan mikäli muiden kuin laitevalmistajien materiaalien käyttö on sallittua ja laitteiston käyttäjät ovat riittävän päteviä huomioimaan tarvittavat asiat.

Suoraan metallimateriaalia aineena käyttävien menetelmien lisäksi AM-menetelmiä hyödynnetään myös metallituotteiden valmistamisessa perinteisin menetelmin. Yhtenä esimerkkinä tällaisesta toiminnasta on kertakäyttöisten hiekkamuottien valmistus 3D-tulostamalla ja niiden käyttäminen metallivalukappaleiden valmistukseen. Tämä on jo laajasti käytössä oleva metallituotteiden valmistusta palveleva

AM-menetelmä johtuen siitä että se tarjoaa merkittäviä etuja muottien valmistusnopeuteen ja kustannuksiin mutta on kuitenkin lopputuotteen valmistuksen (valun) kannalta perinteinen menetelmä eikä vaadi suurta muutosta tuotteiden suunnitteluprosessiin ja periaatteisiin.

Metallin 3D-tulostaminen on merkittävästi monimutkaisempaa kuin nyt jo laajasti tunnettu muovin tulostaminen. Sulatettava materiaali on raskaampaa ja käytettävät lämpötilat korkeampia vaatien hyvää materiaalien ominaisuuksien tuntemista. Lisäksi mm. tukirakenteet ja metallin lämpölaajeneminen asettavat omia vaatimuksiaan tuotteiden muotojen suunnittelussa. Suunnitteluperiaatteista kerrotaan enemmän kappaleessa ”AM-kappaleiden suunnitteluperiaatteet”.

Viime vuosina on tullut markkinoille entistä kehittyneempiä tulos-
timia joissa on panostettu paitsi tulostusnopeuteen, myös muuhun toiminnallisuuteen. Esimerkiksi DMG Morin Lasertec 65 D sekä Matsuuran Lumex Avance-25 ovat laitteita, joissa AM-valmistustekniikan yhteyteen on integroitu työstökeskus. Näin lopputuote on valmistuksessaan mittatarkka ja toisaalta pinnanlaatu saadaan halutulle tasolle jo tulostusprosessin aikana. 3D-tulostettujen kappaleiden paras puoli on vapaa muotoilu, joten mikäli sisäpuolisia pintoja halutaan koneistustarkkuuteen, on koneistus tehtävä jo kappaleen tulostuksen aikana. Valmiiseen kappaleeseen voi olla mahdotonta päästä enää koneistuksen keinoin käsiksi.

3.2 Metallien AM-menetelmät

Taulukossa 3.2 on keskitytty tällä hetkellä markkinoilla oleviin, metalleja materiaalinaan käyttäviin AM-menetelmiin, laitteisiin ja valmistajiin. Menetelmien yhteydessä mainitaan myös valmistajien nimiä koska osa tekniikoista (esim. EBM) on tiettyjen valmistajien kehittämisiä ja patentoimisia, joten kaikki markkinoilla olevat, kyseistä valmistusmenetelmää käyttävät laitteet ovat heidän tuotteitaan.

Kappaleiden valmistamisen lisäksi AM-menetelmillä on mahdollista korjata ja muokata jo olemassa olevia kappaleita, mahdollistaen korjaustoimenpiteiden merkittävän nopeuttamisen. Tämänkaltaiset sovellukset ovatkin yksi merkittävistä tutkimusalueista tällä hetkellä. Esimerkkinä tällaisesta sovelluksesta on Siemensin kaasuturbiinin kärjen ”korjaustulostus”, jossa jo olemassa oleva kaasuturbiinin kärki kun-

nostetaan AM-menetelmän avulla toimintakuntoiseksi. AM-menetelmän avulla kärjen kunnostukseen tarvittava aika on laskenut yli 90% perinteiseen tapaan verrattuna. Lisäksi AM-tekniikan käyttäminen korjauksen yhteydessä mahdollistaa vanhan turbiinin kärjen muuttamisen uudempaan versioon samassa yhteydessä tarkoittaen sitä, että merkittävästi nopeutuneen korjauksen lisäksi vanhat turbiininkärjet saadaan samalla kertaa paremmiksi.

Taulukko 3.2. Metallin AM-valmistusmenetelmiä ja valmistajia.

Materiaali	Menetelmä	Valmistajan termi	Lyhenne	Laitevalmistaja
Jauhe	Powder Bed Fusion	Selective Laser Melting	SLM	SLM Solutions
		Direct Metal Laser Sintering	DMLS	EOS, Stratasys,
		Direct Metal Printing	DMP	3DSystems
		Electron Beam Melting	EBM	Arcam
Jauhe tai lanka	Directed Energy Deposition	Laser Engineered Net Shaping	LENS	Optomec
		Laser Metal Deposition	LMD	Mori Seiki
		Laser Cladding	LC	Joining Technologies, Trumpf
Jauhe	Binder Jetting	3D - Printing	3DP	ExOne
Levy	Sheet Lamination	Laminated Object Modeling	LOM	

3.2.1 Jauhepetimenetelmät (Powder Bed Fusion)

Jauhepetiin perustuva menetelmä on vanhin ja yleisin käytössä oleva metallin tulostusmenetelmä. Ensimmäinen DMLS -menetelmään liittyvä patenti haettiin jo vuonna 1971 ja seuraava, toimintaperiaatteeltaan hyvin nykyisten järjestelmien kaltainen, kuusi vuotta myöhemmin. Menetelmästä on useita nimeltään erilaisia, mutta toiminnaltaan samankaltaisia variaatiota eri valmistajilta ja niiden välisten eroavaisuuksien ymmärtäminen voi olla haastavaa.

Jauhepetimenetelmiin perustuvien laitteiden valmistajien käyttämien eri termien (kuten DMLS, SLM ja DMP) käytön taustalla on yksinkertaista se, että menetelmiä kehittämässä on ollut useita tahoja jotka välttävät käyttämästä samoja termejä tekijänoikeudellisista syistä.

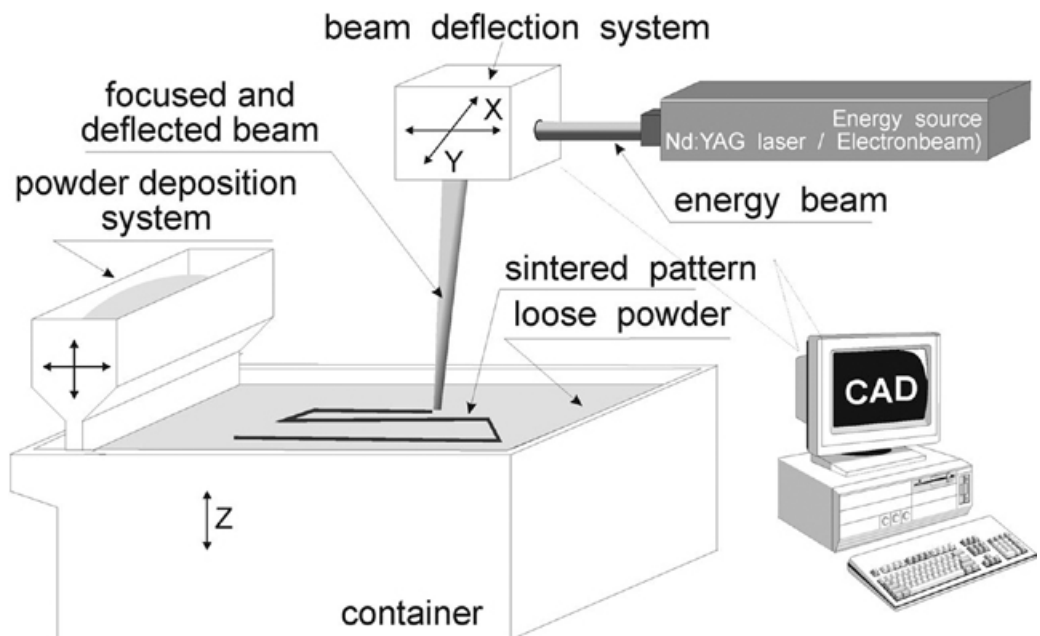
Kaikissa jauhepetimenetelmissä tulostus tapahtuu tulostuskammiossa, joka täytetään suojakaasulla. Eri materiaalit asettavat suojakaasulle eri

vaatimuksia. Titaanin tulostamisessa suojakaasu on argon, kun taas teräksen tulostuksessa käytetään yleensä typpeä.

Käytännössä kaikki jauhepölymenetelmät noudattavat seuraavaa prosessia:

1. Suunnittelija suunnittelee osan
2. Suunniteltu osa siivutetaan ohjelmalla tasoihin (tasomäärä riippuu halutusta tarkkuudesta)
3. Tulostimen tulostusalueelle levitetään jauhetta
4. Lasersäteen avulla muodostetaan haluttu osamuoto (sulatus/sintraus)
5. Osa muodostuu taso kerrallaan kun kohtia 3 ja 4 toistetaan kunnes haluttu osa on valmistunut
6. Ylijäävä jauhe kierrätetään

Järjestelmän toimintaan vaikuttavat useat eri tekijät ja sitä ohjataan erilaisilla parametreilla, esim. lasersäteen teho, jauheen partikkelikoko, kammion lämpötila, tukirakenteiden määrä ja sijainti, sulatettavien kohtien välinen matka, jne. Jotkin parametrit ovat kriittisempiä kuin toiset, mutta kaikki vaikuttavat lopputuotteen laatuun ja onnistumiseen. Haastetta parametrien hallintaan tuo metallimateriaaleille tyypilliset suuret lämpökuormat ja jännitykset joita pyritään hallitsemaan oikeanlaisella kappaleen muotojen suunnittelulla sekä tukirakenteiden avulla.



Kuva 3.1. Jauhepölymenetelmien toiminnan perusperiaate. (Kruth)

Jauhepetimenetelmien toiminnan osalta periaatteellinen ero on jauheeseen kohdistettavan lämmöntuoton välillä: järjestelmät voivat olla sintraavia tai sulattavia. Materiaalin sintraukseen pohjautuvissa järjestelmissä jauhetta ei sulateta täysin vaan sitä lämmitetään pisteeseen, jossa jauhe saadaan kiinnittymään molekyyllitasolla. Koska materiaalia ei sulateta täysin, mahdollistaa menetelmä lopputuotteen huokoisuuden säätelyn. Ominaisuudesta on luonnollisesti erityisesti hyötyä lääketeollisuuden tarpeisiin valmistettavissa kappaleissa.

Materiaalin sulattavissa järjestelmissä on puolestaan mahdollista, paitsi edellä mainittu toiminnallisuus, myös materiaalin sulatus. Tämä tarkoittaa että materiaali on mahdollista sulattaa täysin, jolloin lopputuotteeksi muodostuu yhteinen, tiivis osa.

Menetelmiä tarkastellessa valmistajien käyttämä DMSL-termi on erityisen hämäävä sillä vaikka ”*Direct Metal Laser Sintering*” tarkoittaa kirjaimellisesti sintrausta, niin käytännössä valmistajat käyttävät termiä myös materiaalia täysin sulattavien järjestelmien kanssa.

Tulostuksen jälkeen täytyy menetelmässä ottaa huomioon myös se, että kammion täytyy jäähtyä ennen kuin tulosteisiin päästään käsiksi. Lisäksi valmiit kappaleet täytyy irrottaa alustasta (*build plate*), poistaa käytetty tukimateriaali sekä suorittaa kappaleiden tarvitsema jälkikäsitteily. Jälkikäsitteilyyn kuluva aika voi olla merkittävästi suurempi kuin varsinaiseen tulostukseen käytetty aika.

Jauhepetitekniikkaan perustuvia järjestelmiä myyviä yrityksiä on markkinoilla useita. Tunnetuimmat näistä ovat EOS, SLM, Concept Laser, 3DSystems, Renishaw, ReaLizer GmbH ja Arcam.

Seuraavaksi lueteltujen metallin valmistusmenetelmien lisäksi asiaan perehtyvä törmää todennäköisesti myös LaserCusing® -menetelmään, joka on Concept Laser -yrityksen käyttämä termi omalle jauhepetitekniikkaan perustuvalla valmistusmenetelmälle. Concept Laserin laitteiden toimintaperiaate on muuten perinteinen jauhepetitekniikka, mutta laserin sulatuksessa käytetään yrityksen kehittämää satunnaisuuteen ja ”saarekeperiaateeseen” pohjautuvaa älykästä algoritmia. Yritys mainostaa että algoritmin avulla voidaan paremmin hallita kappaleeseen syntyviä jännitteitä ja lämpötilamuutoksia.

DMLS, Direct Metal Laser Sintering

DMLS-tekniikan alkuaskeleet otettiin jo 1970-luvulla ja vuonna 1984 3D Systems patentoi menetelmään liittyviä osa-alueita. 3D Systemsin lisäksi aihepiiriin liittyvää tutkimusta ovat tehneet mm. EOS, Fraunhofer ILT, Fraunhofer IPT, Fockele & Schwarze, ja Trumpf. Ensimmäinen kaupallinen DMLS-laitteisto valmistettiin EOS:in toimesta 1994.

EOS hankki kaikki oikeudet 3D Systems:in ja muiden tutkimusta tehneiden tahojen lasersintraukseen liittyviin pantteihin vuonna 1997. Näin yritys hallitsi kaikkia lasersintraukseen liittyviä patenteja, sillä poikkeuksella että Trumpf hallitsi DMLS-patenteja metallin sulatukseen liittyen.

Yleistäen voidaan sanoa että DMLS on metallin 3D-tulostukseen liittyvän jauhepetitekniikan pohja johon myöhemmin kehitetyt variaatiot tavalla tai toisella pohjautuvat. DMLS-laitteiden valmistajista suurin (ja vanhin) on EOS.

Periaatteessa menetelmään sopii mikä vain metalliseos, mutta yleisimmät materiaalit DMLS laitteille ovat ruostumaton teräs (17-4, 15-5), maragingteräs, kobolttikromi, inconel 625 & 718, titaani (Ti6Al4V).



Kuva 3.2. EOS M280 on uusin versio EOSin yleisimmästä jauhepetitekniikkaan pohjautuvasta tulostimesta. (Lähde: EOS)



Kuva 3.3. Esimerkki kappaleiden asemoinnista tulostusalustalle.

SLM, Selective Laser Melting

SLM kehitettiin ja patentoitiin Fraunhofer Instituutissa Saksassa vuonna 1995 ja pohjautuu DMLS-menetelmään liittyvään tutkimukseen. Vuodesta 2011 lähtien SLM-valmistusmenetelmään perustuvia laitteita on valmistanut ja myynyt SLM Solutions GmbH.

Valmistusmenetelmä tarkoittaa kirjaimellisesti materiaalin sulattamista kuitulaserin avulla. Valmistusmenetelmään viittaavaa termiä SLM käytetään teollisuudessa SLM Solution GmbH -yrityksen myymien laitteiden lisäksi joskus myös muiden valmistajien laitteissa joiden tarkoitetaan sulattavan materiaalin täydellisesti.

Toiminnaltaan menetelmä noudattaa perinteisen jauhepetitekniikan periaatteita. 3D-kuva pilkotaan 20-200 μm paksuihin 2D-tasoihin, ja viipaloitu kuva ladataan laitteiston hallintaohjelmaan. Hallintaohjelmassa määritellään laitteiston parametrit ja luodaan kappaleelle tukirakenteet.

Suurimmissa SLM-laitteissa markkinoilla tällä hetkellä on noin 500*500 mm kokoinen työalue ja lämmönlähteenä yksi tai useampi 200-1000 W kuitulaser. Yleisimmät materiaalit ovat ruostumaton teräs, työkaluteräs, kobolttikromi, titaani ja alumiini.



Kuva 3.4. SLM-500, tulostusalueeltaan suurin SLM Solutions GbmH:n myymä järjestelmä. (Lähde: SLM Solutions GmbH)

DMP, Direct Metal Printing

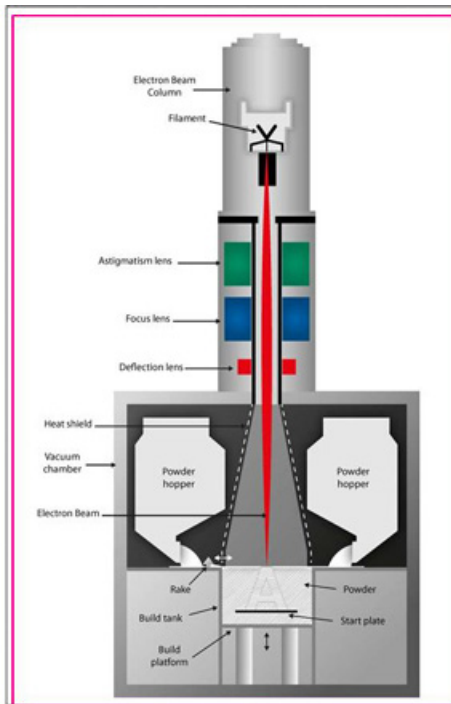
Direct Metal Printing on termi jota 3D Systems -laitevalmistaja käyttää metallitulostimiensa tekniikasta. Käytännössä kyseessä on DMLS-menetelmä, tosin materiaali sulatetaan täysin joten lopputuotteista tulee täysin tiiviitä. 3D Systems ilmoittaa pääsevänsä menetelmällä noin 20 mikrometrin tarkkuuteen kaikilla kolmella akselilla. Suurimpien laitteiden valmistusala on 250*250*300 ja laitteistoon on saatavilla yli 15 eri materiaalia.

EBM, Electron Beam Melting

Electron Beam Melting on ruotsalaisen Arcamin kehittämä menetelmä, jossa lämmöntuonti aineen sulatusta varten tapahtuu lasersäteen ja suojakaasun sijaan elektronisuihkulla tyhjiössä. Käytettävät lämpötilat ovat selvästi korkeampia kuin laseria käyttävissä järjestelmissä.

Toinen eroavaisuus laserpohjaisiin järjestelmiin on se, että ennen kappaleen geometrian sulatusta myös koko kammiossa oleva jauhekerros lämmitetään optimaaliseen lämpötilaan käytetystä materiaalista riippuen. Jauhekerroksen lämmitys mahdollistaa sen, että valmistettavaan kappaleeseen ei jää jännityksiä eikä sen mikrorakenteeseen martensiittisiä rakenteita.

EBM-tekniikkaan perustuvat laitteet eivät ole yhtä tarkkoja kuin DMLS-laitteet, mutta toisaalta ne ovat ainakin vielä toistaiseksi moninkertaisesti nopeampia. EBM laitteistot pääsevät noin 100-200 μm tarkkuuteen.



Kuva 3.5. EBM -laitteistojen toimintaperiaate, laitteella valmistetut acetular hip cup -keino-nivelet/implantit. (Lähde: Arcam AB)

Titaanin osalta lämmitetty jauhepeti toimii valmistuvan kappaleen kannalta tukirakenteen tavoin mahdollistaen ilman varsinaisia tukirakenteita tapahtuman valmistusprosessin. Titaani laajenee sulattaessa noin prosentin verran joka mahdollistaa sen, että jäähtymisen yhteydessä kappale irtoaa teräksisestä rakennus-alustasta itsestään. Tämä lisää laitteiston käyttöä tuotannossa entisestään koska jälkikäsitteilyyn ei kulu paljon aikaa.

Kuvassa 3.5 on esitetty laitteella valmistettuja ”*acetular hip cup*” eli lonkkaimplanteja jotka voidaan laitteistolla tulostaa päällekkäin ilman tukirakenteita. Kappaleet irtoavat toisistaan helposti jauhetta poistaessa paineilman avulla.

Valmistusmenetelmä ja laitteisto ovat pitkälle muutamalle teollisuudenalalle räätälöityjä. Laitteistolle tarjottavat materiaalit palvelevat erityisesti avaruus-, ilmailu- sekä lääketieteellisuuden tarpeita. Menetelmän laajasta käytöstä terveysalalla kertoo se, että Arcamin EBM-laitteilla valmistettavat implantit ja tekonivelet ovat saaneet hyväksyntöjä eri maiden terveysturvaviranomaisten puolesta.

Arcam tarjoaa laitteistoilleen pääosin titaani, kobalttikromi ja inconel-materiaaleja vaikkakin menetelmään sopivat periaatteessa myös muut materiaalit. Materiaalitarjonnan yhteydessä on myös mainittava se, että Arcamin tarjoamat materiaalit ovat halvempia kuin DMLS-menetelmiin pohjautuvien laitteistojen valmistajat yleensä tarjoavat.

3.2.2 Suorakerrostusmenetelmät (Directed Energy Deposition)

Suorakerrostusmenetelmässä kohdistettua lämpöenergiaa käytetään yhdistämään materiaalia (sulattamalla) samalla kun materiaalia syötetään kohteeseen kerros kerrokselta.

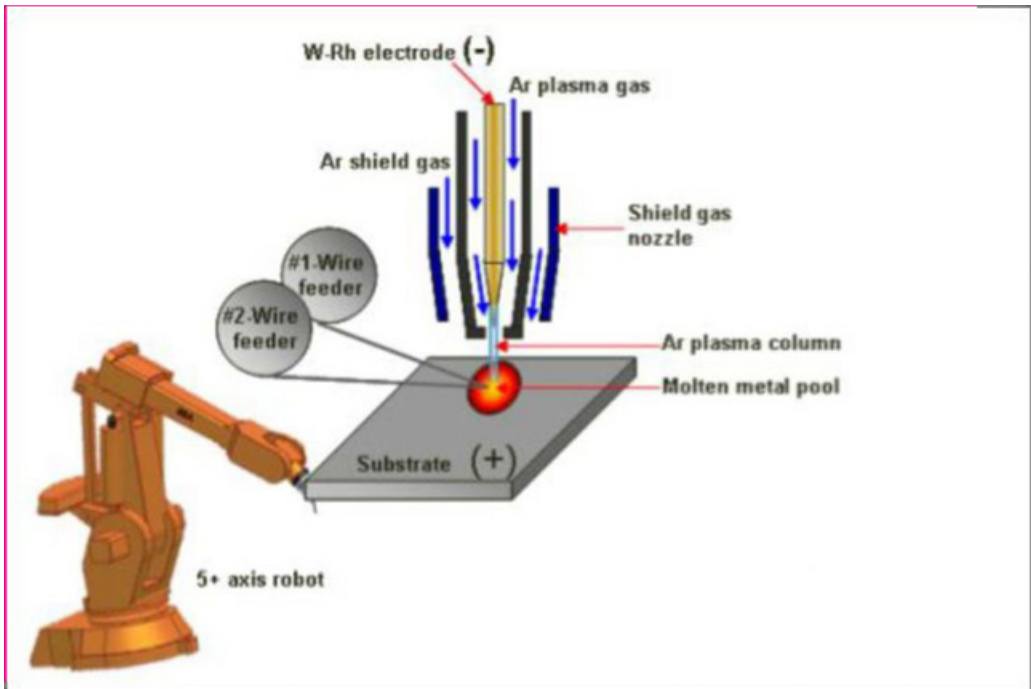
Menetelmästä on eri variaatioita, mm. syötettävä materiaali voi olla jauhemaista tai lankaa, ja lämpöenergia voidaan tuottaa laserilla, plasmakaarella tai elektronisäteellä. Eri laitevalmistajat käyttävät erilaisia variaatioita menetelmästä, joskin lasersäteen käyttö lämmönlähteenä ja jauhemaisen materiaalin käyttö on yleisin käytössä oleva tekniikka. Menetelmällä valmistuvien kappaleiden mikrorakenne on samankaltainen kuin jauhepetimenetelmissä ja teoriassa menetelmällä on mahdollista päästä myös vastaavaan tarkkuuteen.

Koska menetelmässä syötetään ja sulatetaan materiaalia vain kohdealueelle, on sillä luontainen rajoite kappaleiden negatiivisten muotojen kanssa. Jauhepetiteknikoissa jauhe toimii joillain materiaaleilla tukimateriaalina mutta suorakerrotusmenetelmässä tämänkaltainen luonnollinen tukirakenne puuttuu. Monimutkaisten muotojen aiheuttamat haasteet vaihtelevat riippuen siitä minkälaista variaatioita suorakerrostusmenetelmästä käytetään.

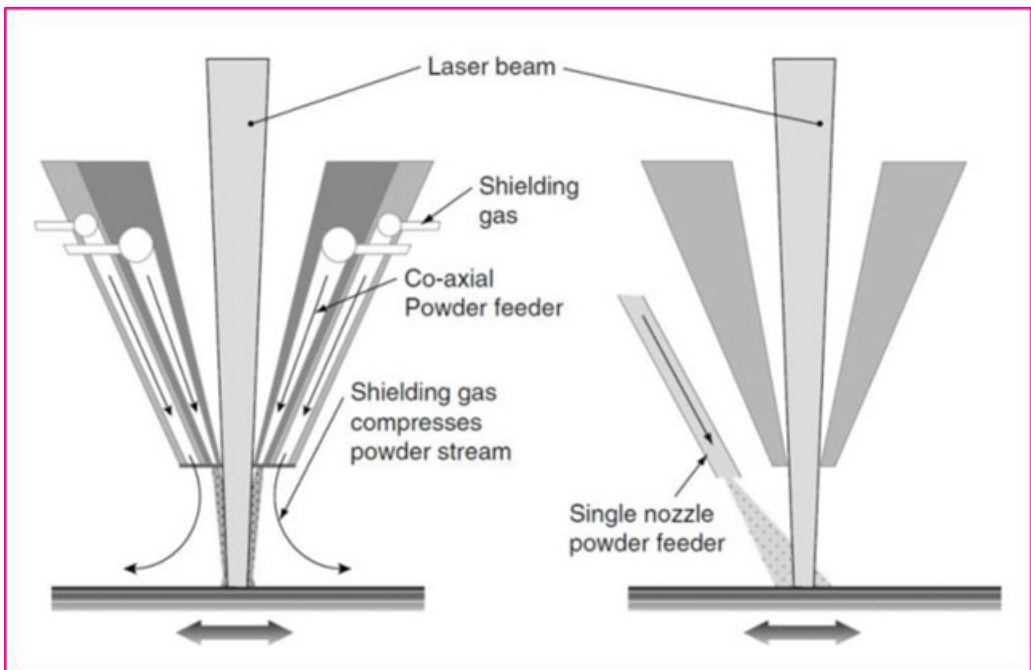
Jauhetta käyttävissä DEP-laitteissa jauheen sijoitus kaasun avulla mahdollistaa tulostuksen myös ei-horisontaalisille pinnoille. Periaatteessa menetelmä mahdollistaa myös eri materiaalien käyttämisen samanaikaisesti käyttämällä useita jauhesuuttimia ja säätelämällä jauheiden syöttönopeutta. Tämä voisi tarkoittaa esimerkiksi sitä, että menetelmällä valmistetaan metallikappale jolla on muokattava runko-osa mutta hyvin kulutusta kestävä pinta.

Toinen selkeä etu jauhepetiteknikoihin verrattuna suorakerrostusmenetelmissä on puolestaan tulostusalue. Koska materiaalia sulatetaan ja sijoitetaan vain haluttuihin kohtiin, ei tulostuskammio ole rajoittava tekijä. Joissain laitteistoissa ei välttämättä vaadita edes erillistä suljetua kammiota vaan tulostuspäässä on kanavat myös suojakaasulle, jota johdetaan sulatettavaan pisteeseen.

Koska materiaalin valmistuksella ei ole välttämättä tarvetta tulostuskammionle, ei menetelmän skaalautuvuudella ole samanlaista teoreettista rajaa kuin jauhepetiteknikoissa. Markkinoilla onkin järjestelmiä joissa DEP-tekniikkaan pohjautuva tulostuspää on yhdistetty käsivar-sirobottiin mahdollistaen hyvinkin suurten kappaleiden valmistamisen ja/tai olemassa olevien suurten kappaleiden korjauksen.



Kuva 3.6. Lankaa käyttävien DEP –menetelmien toimintaperiaate. (Lähde: Norsk Titanium Components, Titanium Day June 27, 2012 Eggemoen)



Kuva 3.7. Jauhetta käyttävien DEP -menetelmien toimintaperiaate. (Ek)

Lankamaista materiaalia ja plasmakaarta sen sulatukseen käyttävään tekniikkaan pohjautuvien laitteistojen valmistaa mm. Norsk Titanium. Lankamaista materiaalia ja elektronisädetä sulatukseen käyttäviä järjestelmiä puolestaan valmistaa ja myy Sciaky Inc, jonka suurimman AM-laitteiston (EBAM) tulostusalueen koko on jopa 5.8m x 1.2m x 1.2m ja materiaalin tulostusnopeus 3-9 kg tunnissa.

Jauhetekniikkaa ja laseria käyttäviä laitteistovalmistajat ovat mm: Optomec, DM3D, BeAM, DMG Mori.

LENS, Laser Engineered Net Shaping

LENS-menetelmä on Optomec-yrityksen rekisteröimä tavaramerkki suorakerrostusmenetelmään pohjautuvalle järjestelmälleen. Järjestelmä on toiminnaltaan samankaltainen kuin muutkin jauhetta sekä laseria käyttävät, suorakerrostusmenetelmään pohjautuvat järjestelmät.

Menetelmässä käytetään suurteholaseria (500W-4kW) tulostuspäässä, jolla sulatetaan ja sijoitetaan jauhemainen materiaali tulostusalueelle. LENS-laitteiden resoluutio (50-100 μm) on samaa luokkaa kuin jauhepeptimenetelmillä ja ne toimivat hermeettisesti suljetuissa kammioissa. Laitteiston resoluutio vaihtelee mallista riippuen 85 - 250 μm ja tulostusalueen koko 100*100*100 mm:stä aina 900*1500*900 mm saakka.

Lisäksi valmistaja tarjoaa mahdollisuutta hankkia laitteisto osina ja integroida LENS-tekniikkansa jo olemassa olevaan CNC -järjestelmään ja siten laajentaa laitteiston toiminnallisuus myös AM-valmistukseen.

LMD, Laser Metal Deposition

LMD, Laser Metal Deposition on termi, jota käyttävät mm. TWI sekä Joining Technologies -yritykset puhuessaan suorakerrostusmenetelmään perustuvista järjestelmistään. Tekniikaltaan LMD on jauhemainen suorakerrostusmenetelmä jossa käytetään lasersädetä materiaalin sulatukseen.

DMD, Direct Metal Deposition

DMD®, Direct Metal Deposition, on DM3D Technology -yrityksen rekisteröimä tavaramerkki. Tekniikaltaan DMD on jauhemainen suorakerrostusmenetelmä jossa käytetään lasersädettä materiaalin sulatukseen. Yritys myös painottaa esitteissään mahdollisuutta hallita ja monitoroida sulatuspisteen korkeutta ja lämpötilaa.

LC, Laser Cladding

LC, eli *Laser Cladding* tarkoittaa nimensä mukaisesti prosessia, jossa yhtä materiaalia lisätään toisen materiaalin pinnalle. *Laser Cladding* -termiä käytetään yleisesti suorakerrostusmenetelmistä puhuttaessa. Termillä kuitenkin tarkoitetaan myös pelkästään kappaleen pinnoitusta (*cladding* = verhouk).

Suorakerrostusmenetelmät soveltuvat hyvin pinnoitukseen koska menetelmällä on mahdollista käyttää ja käsitellä suuri määrä erilaisia materiaaleja. Menetelmällä on myös muita etuja, mm. tarkkaan kontrolloitu lämmöntuonti kohteeseen joka mahdollistaa pienemmän lämpöalueen (HAZ, *Heat Affected Zone*) muodostumisen kappaleeseen sekä pienemmän materiaalin sekoittumisen. Parametrinen järjestelmä mahdollistaa säädettävän kerrospaksuuden.

Pinnoitettavia kappaleita voivat olla kappaleet, joita ei perinteisin menetelmin kannata pinnoittaa uudelleen, esim. laakerit, akselit, yms.

3.2.3 Sidosaineen suihkutuskäytännöt (Binder Jetting)

Metallien tulostuksen yhteydessä termillä 3DP, eli ”3D Printing”, viitataan yleensä ”*Binder jetting*” -menetelmään eli sidosaineen kerroksittaiseen suihkutukseen jauhepedillä. Käytännössä toimintaperiaate on lähellä perinteisten mustesuihkutulostinten toimintaa.

Menetelmää käyttävissä laitteissa on tulostusalue, jonka päälle levitetään jauhetta mekaanisella lastalla määrätyn kerrokorkeuden verran. Sitten tulostusalueen päällä liikutetaan tulostuspäätä, joka suihkuttaa sidosainetta määrättyihin kohtiin. Jauheen levitystä ja sidosaineen suihkutusta toistetaan kunnes koko kappale on saatu tulostettua.

Tekniikka on käytössä paljon myös muiden materiaalien tulostukseen. Yleisin käyttäjäkunta on valumuottien valmistajat, kun esimerkiksi hiekkamuotti tulostetaan metallivaluja varten. Metallitulostinten osalta tekniikkaa hyödyntäviä tulostimia valmistaa mm. ExOne sekä Voxeljet. Kyseisillä yritysillä on takanaan yhteistä historiaa sillä molemmat yritykset olivat aikanaan yksi ja sama yritys.

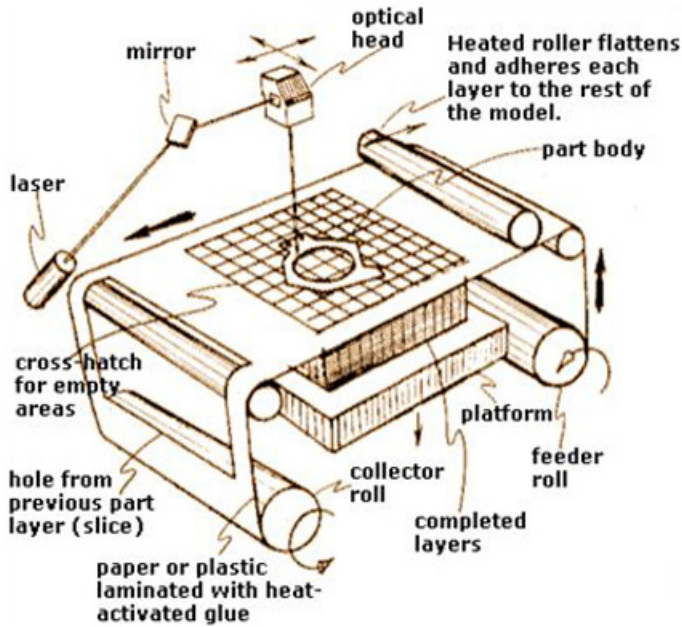
Laitevalmistajista Binder Jetting -menetelmää hyödyntää mm. ExOne. Metallimateriaalina ExOnen tulostimilla on mm. ruostumaton teräs+pronssi.

3.2.4 Laminointimenetelmät (Laminated Object Modeling)

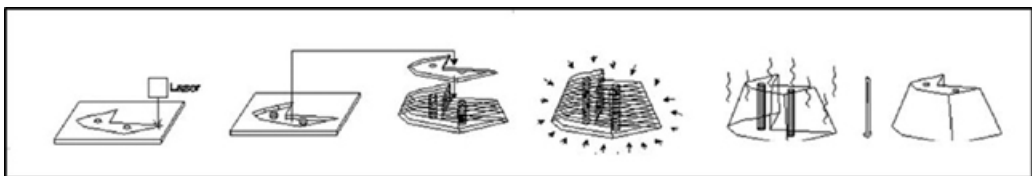
Laminointimenetelmissä kappale muodostuu laserilla leikatuista, yhteen laminoiduista kerroksista. Materiaaleina yleensä termoplastiset muovit (esim. PVC), paperi, erilaiset komposiitit mutta myös metallit.

Metallin laminointimenetelmässä metallilevyt sijoitetaan päällekkäin, leikataan haluttuun muotoon ja yhdistetään toisiinsa. Leikkaus tehdään yleensä joko laserin tai työstämisen avulla ja yhdistäminen liima-aineiden tai hitsauksen (esim. ultraäänihitsaus) avulla.

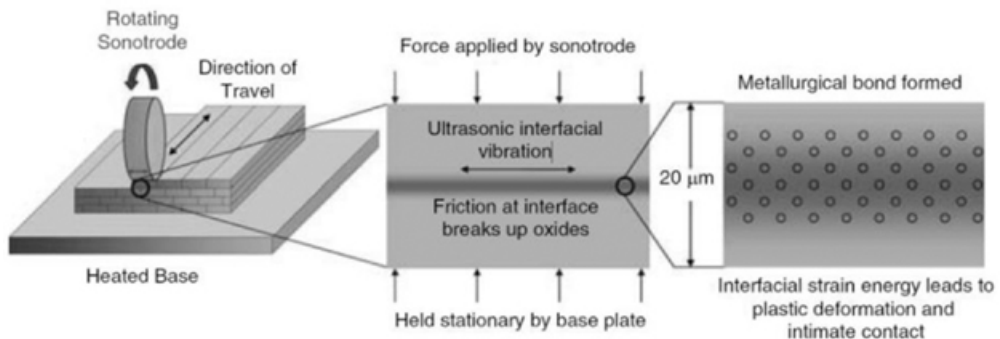
Levyjen kiinnitys ultraäänihitsauksen avulla toimii siten, että levyn päällä kulkee rulla joka lähettää mikrovärinöitä levyihin. Mikrovärinät muuttuvat levyjen välissä lämmöksi. Ultraäänihitsausta käyttävät laminointikoneet eivät tarvitse suljettua tilaa sillä toisin kuin muissa AM-menetelmissä, kerrosten yhdistyminen tapahtuu kappaleen sisällä joten sulatettava materiaali ei joudu ympäristön kanssa tekemisiin. Ultraäänihitsauksesta käytetään myös termiä Ultrasonic Consolidation, UC.



Kuva 3.8. Laminointimenetelmän laserleikkausosion toimintaperiaate yleisimmille materiaaleille. (Lähde: http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/lom.cfm)



Kuva 3.9. Laminointiprosessin toimintaperiaate. (Stucker)



Kuva 3.10. Laminointimenetelmän ultraäänihitsauksen toimintaperiaate metallikapaleella.(Ek)

3.3 Laitteistovalmistajia

Taulukkoon 3.3 on kerätty yleisimpiä metallin AM-laitteistoja tarjoavia laitevalmistajia.

Taulukko 3.3. Yleisimmät metallin AM-laitteistojen valmistajat.

Valmistusmenetelmä	Valmistaja
Jauhepeti, (DMLS)	EOS
Jauhepeti, (DMP)	3D Systems
Jauhepeti, (SLM)	SLM Technologies
Jauhepeti, (DMLS)	Concept Laser
Jauhepeti, (EBM)	Arcam
Suorakerrostus, (LDW)	DMG Mori
Suorakerrostus, (LMD)	Joining Technologies
Suorakerrostus, (LENS)	Optomec
Suorakerrostus, (LMD)	DM3D
Suorakerrostus, (MPD)	BeAM

4 AM-KAPPALEIDEN SUUNNITTELUPERIAATTEET

4.1 Yleistä

Metallisia tuotteita on perinteisesti valmistettu ainetta poistavilla menetelmillä, esimerkkeinä sorvaus tai jyrsintä. Niissä ahiosta poistetaan ainetta lastuamalla halutun muodon saavuttamiseksi. Osa materiaalista jää tuotteeseen, osa taas poistuu prosessista lastuna. Yleisesti käytetään myös muovaavia menetelmiä – takominen, rullamuovaus, vetäminen... – joissa ainetta muokataan muuttamatta sen määrää prosessissa. Ainetta lisäävä valmistus (AM) poikkeaa edellä mainituista menetelmistä siten, että ahiota ei ole. Kappale luodaan kerroksittain tuomalla uutta materiaalia tarvittaviin kohtiin. Prosessin erilaisuudesta johtuen AM-tekniikalla valmistettuihin kappaleisiin ei voida soveltaa tavanomaisten valmistustekniikoiden suunnittelusääntöjä. Seuraavassa käydään lyhyesti eri AM-menetelmiä ja niiden suunnittelusääntöjä.

Tekstissä annetut tiedot ovat suuntaa antavia ja laitteistosta, materiaalista sekä tulostajasta riippuvaisia ja ne kannattaa tarkistaa tapauskohtaisesti.

4.2 AM-kappaleen suunnittelusta

Ainetta lisäävässä valmistuksessa kaiken perusta on suunnitteluohjelmalla luotu kolmiulotteinen malli. Malli konvertoidaan kunkin ohjelman käyttämästä natiivifomaatista tulostimen ohjelmiston ymmärtämään muotoon, joka yleisesti on stl-formaatti. Stl (stereolitografia) on tiedostomuoto, jossa kappaleen pinta jaetaan kolmioihin. Käännösvaiheessa voidaan stl-tiedoston resoluutiota muuttaa, huonompiresoluutiainen malli muodostuu suuremmista kolmioista ja on täten karkeampi laadultaan, mutta tiedostokooltaan pienempi ja laskentavaiheessa kevyempi. Paremmalla resoluutiolla tehty stl on vastaavasti yksityiskohtaisempi, mutta kooltaan suurempi ja raskaampi laskea. Resoluutioon ja sen säätämiseen omassa mallinnusohjelmassa kannattaa perehtyä etukäteen.

Mallia luotaessa on tietenkin huomioitava tulostusmenetelmän rajoitteet, mutta mallin on täytettävä muitakin mallinnusteknisiä vaatimuksia:

- Mallilla pitää olla tilavuus ja vain yksi tilavuus. Vaikka kokoonpano on käännettävissä stl-muotoon, sitä ei suositella.
- Mallin pitää olla yhtenäinen. Jos malli on huonosti suunniteltu tai käänös stl-formaattiin tehty väärillä parametreilla, saattaa malli ”vuotaa”, eli sen pintalaput eivät ole toisissaan kiinni. Kukin mallin särmä saa rajoittua korkeintaan kahteen pintaan. Viallinen malli aiheuttaa virheitä tulosteeseen tai estää tulostamisen kokonaan.

Vaikka stl-tiedostojen muokkaamiseen on olemassa useita ohjelmistoja, on silti suositeltavampaa muokata 3D-malli mallinnusohjelmassa valmiiksi kuin korjata tulostustiedostoa.

4.3 Yleisimmät käytössä olevat AM-menetelmät ja menetelmäkohtaiset suunnitteluperusteet

4.3.1 Jauhepetitekniikka (Powder bed fusion)

Jauhepetitekniikalla tarkoitetaan menetelmää, jossa jauhepedille kerroksittain levitetty hienorakenteinen (raekoko 20...50 µm) metallipulveri sulatetaan kerros kerrokselta halutuilta kohdin lämpöenergian avulla. Lämpöenergia voidaan tuottaa kuitulaserilla tai elektronisuihkulla. Prosessi tapahtuu yleensä suojakaasuatmosfäärissä. Tuloste rakentuu erilliselle rakennusalustalle, josta lopullinen kappale irrotetaan mekaanisesti. Jauheen sulatustavasta ja laitteen valmistajasta riippuen tekniikkaa kutsutaan nimellä *Selective Laser Melting* (SLM), *Direct Metal Laser Sintering* (DLMS), *Direct Metal Printing* (DMP) tai *Electron Beam Melting* (EBM). Käytettävien materiaalien kirjo on laaja: ruostumattomat teräkset, alumiinit, titaani jne.

4.3.1.1 Suunnittelussa huomioitavaa

Kappaleen koko

Jauhepetitekniikalla toimivat AM-laitteet ovat yleensä työalaltaan pieniä, Suomessa suurimmat ovat luokkaa 250x250x250 mm. Työalueen korkeudesta on vähennettävä tulostusalustan paksuus, jonka minimi-

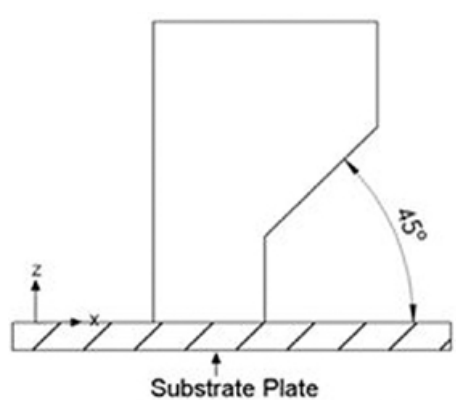
paksuus on luokkaa 20 mm. Eurooppalaiset toimijat tarjoavat suurempiakin työalueita.

Kappaleen massa

Perinteisissä ainetta poistavissa tuotantomenetelmissä kappaleen muoto muodostuu poistamalla ainetta aihioista tarvittavista kohdista. Materiaalin kulutus jakautuu valmiin kappaleen ja lastun kesken. Koska ainetta lisäävässä menetelmässä vastaavasti ainetta lisätään haluttuihin kohtiin, materiaalia kulutetaan periaatteessa vain valmiin kappaleen tilavuuden verran. Mitä suurempi kappaleen tilavuus ja massa on, sitä kauemmin kappaleen valmistus kestää. Tämä aiheuttaa turhia kustannuksia. Jos kappaletta kevennetään suunnittelemalla siihen onttoja rakenteita, on jokaiseen onteloon suunniteltava tyhjennyskanava ylimääräisen metallijauheen poistamiseksi rakenteen sisältä.

Overhang

”Tyhjän päälle ei voi tulostaa!” Prosessista johtuen tulostettava kerros on aina tuettava jotenkin. Kun tulosteen pystyseinämä ylittää tietyn kulman, ohut metallipulveri ei pysty kannattelemaan sulaa metallia jolloin tulosteen muodostuminen ei ole enää täysin hallittavissa. Kulmasta käytetään termiä ”overhang”.

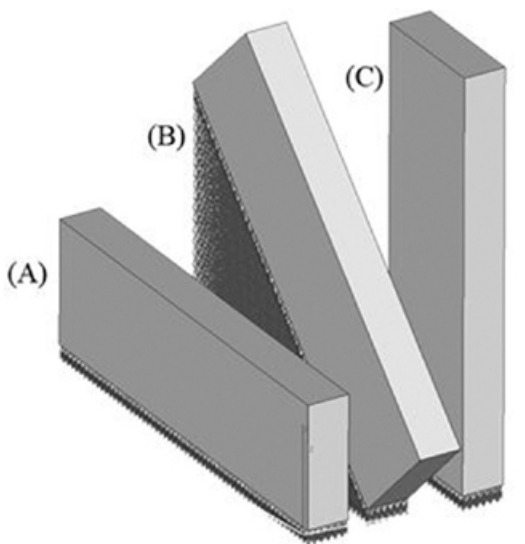


Kuva 4.1. Overhang (Lähde: ” The Development of Design Rules for Selective Laser Melting”)

Yleisesti alle 45° kulmat on tuettava tukirakenteilla. Tukirakenne muodostuu samasta materiaalista kuin itse kappale ja se on mekaanisesti irrotettava kappaleesta. Tukirakenteet vaikuttavat suuresti kappaleen jälkikäsittelyaikaan. Siksi kappaleen muodoilla ja tulostusasunnoilla on suuri vaikutus kappaleen läpimenoaikaan ja kokonaiskustannuksiin. Overhang on jossain määrin materiaalikohtainen.

Tulostusasento

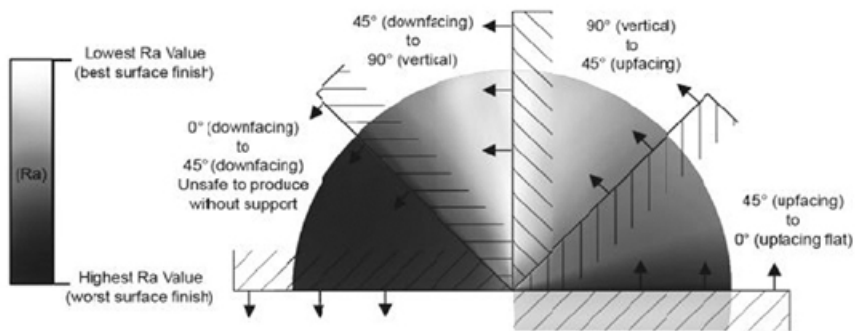
Tulostusasentoa valittaessa joudutaan usein tekemään kompromisseja kappaleen korkeuden, pinnanladun ja tukirakenteiden kesken. Kuvassa 2 esitetään kolme vaihtoehtoista tulostusasentoa samalle kappaleelle. Vaihtoehto (A) on mataluutensa vuoksi nopein tulostettava ja tulostukseen tarvitaan vähiten metallijauhetta. Koko alasivu on tuettava tukimateriaalilla, joka aiheuttaa sen, että alapinnan pinnanlaatu on huono. Vaihtoehdossa (B) tarvitaan vähiten tukimateriaalia ja on yleiseltä pinnanlaadultaan paras. Tämä vähentää jälkikäsittelyn tarvetta. Kappaleen korkeus on suuri, joka näkyy kasvaneena koneaikana ja tulostuksessa tarvittavan jauheen määrä on suurin.



Kuva 4.2. Tulostusasentojen vertailua (Lähde: ” The Development of Design Rules for Selective Laser Melting”)

Pinnanlaatu

Materiaalin rakeisuudesta ja kappaleen rakentumisesta kerroksittain seuraa, että pinnanlaatu on varsin karkea, ulkonäöllisesti se muistuttaa kuulapuhallettua pintaa. Kirjallisuudessa mainitaan, että parhaassa tapauksessa tulosten pinnanlaadussa saavutetaan Ra17. Huonoimmillaan päästään laatuun Ra34. Kuva 4.3 näyttää yhteyden tulostusasennon ja pinnanlaadun välillä. Paras pinnanlaatu saavutetaan pysty-suorilla seinämillä.



Kuva 4.3. Tulostusasento vs. pinnanlaatu (Lähde: The Development of Design Rules for Selective Laser Melting)

Jälkikäsittely, työvarat

Tulostusasento määrää myös kappaleen mittatarkkuuden. Kirjallisuudessa mainitaan erilaisia suositeltavia työvaroja tulosten eri pinnoille.

Yläpintojen mittatarkkuus on yleisesti hyvä, mutta epätasainen. Kappaleeseen suositellaan tarvittaessa jätettäväksi 0,3 mm työvara kappaleen pinnan oikaisua varten. Jos halutaan varmistaa, että kappaleen pinnassa ei ole huokosia tai muita materiaalivirheitä, suositellaan kappaleeseen vähintään 0,7 mm työvaraa.

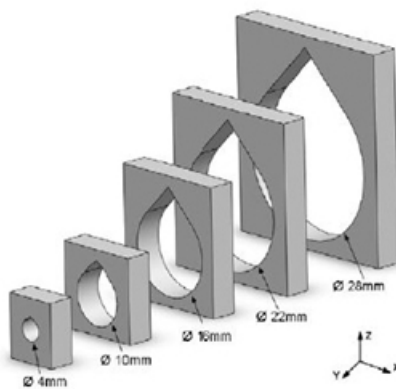
Kappaleen sivuilla saavutetaan yleisesti $\pm 0,05$ mm muototoleranssi. Jos pinnanlaatua halutaan parantaa, riittää sivupintoihin 0,12 mm työvara. Kappaleen alapuolisiin pintoihin suositellaan mitoitetun jopa 0,8 mm työvarat.

Seinämävahvuudet

Suosittelaa, että kappaleen rakenteisiin ei suunnitella alle 0,4 mm paksuisia seinämiä.

Reikien tulostaminen

Vaakasunnassa pienin luotettavasti tulostuva pyöreä reikä on halkaisijaltaan 1 mm. Vastaavasti suurin ilman tukirakenteita tulostettavissa oleva pyöreä reikä on halkaisijaltaan 7 mm. Tätä suuremmat reiät on tuettava tai ne on muotoiltava pisaramaisiksi 45° kattokulmalla. Kummassakin tapauksessa reiän yläosan pinnanlaatu kärsii.

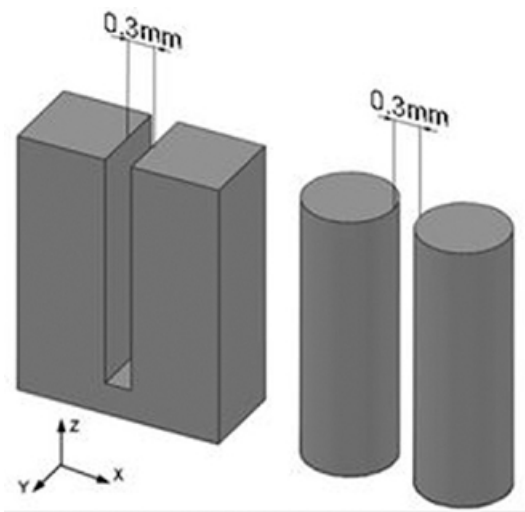


Kuva 4.4. Vaakareikien muotoilu. (Lähde: The Development of Design Rules for Selective Laser Melting)

Tulostetun reiän mittatarkkuus on riittävä hyvä käytettäväksi kierteen alkureikänä. Halkaisijan on tällöin oltava pienempi kuin 7 mm, koska pisaranmuotoiseen reikään kierteen tekeminen ei ole mahdollista. Suurempia kierteitä tarvittaessa kannattaa pieni aloitusreikä porata suuremmaksi ja kierteyttää se. Pienemmät kuin halkaisijaltaan 0,7 mm pystysuuntaiset reiät eivät tulostu.

Yksityiskohtien toistuminen

Alle 0,3 mm jaolla olevien yksityiskohtien tulostamista ei suositella.



Kuva 4.5. Yksityiskohtien tulostuminen. (Lähde: The Development of Design Rules for Selective Laser Melting)

Lujuusominaisuudet

Valmistusprosessista johtuen tulosteen lujuusominaisuudet eivät ole aivan yksiselitteisesti ennustettavissa. Tulostusmateriaalin valmistajat antavat yleisesti tulosteelle eri lujuusarvot eri tulostussuunnille Z-akselin suuntaisen lujuuden ollessa heikoin. Myös lujuuden luvatut vaihteluvälit ovat suuret. Esimerkiksi tulostinvalmistaja EOS lupaa omalle 316L-materiaalilleen myötörajaksi XY-tasossa 530 ± 60 MPa ja Z-tasossa 470 ± 90 MPa. Tämä on yksi huomioitava lisäparametri kappaleen tulostussuuntaa valittaessa. (Lähde: <http://www.eos.info/material-m>)

Massakeskittymät, lämmön vaikutus

Koska metallien ainetta lisäävässä valmistuksessa kappaleeseen tuodaan paljon lämpöä, pitää sen vaikutukset huomioida tulostusprosessissa. Jauhe lämmitetään paikallisesti yli materiaalin sulamispisteen, joka esimerkiksi 316L ruostumattomalla teräksellä on luokkaa 1400 °C. Lämpö poistuu kappaleesta pääasiassa johtumalla. Jos kappaleen poikkipinta-ala muuttuu radikaalisti, on mahdollista, että tulostuksessa syntyvä lämpö ei ehdi poistumaan kappaleesta riittävän nopeasti. Tämä aiheuttaa tulosteeseen

sa muodonmuutoksia ja/tai lämpöjännityksiä, jotka voivat aiheuttaa tulostuksen epäonnistumisen. Kappaleen muotoilussa on siis vältettävä suuria poikkipinta-alan muutoksia tai lämmön poistuminen on varmistettava erityisillä ”heat sinkeillä”, lämpöä siirtävillä lisärakenteilla.

4.3.2 Suorakerrostusmenetelmät (Directed Energy Deposition)

Suorakerrostusmenetelmissä ainetta syötetään tulostettavaan kappaleeseen vain tarvittaviin kohtiin. Materiaali tuodaan joko jauheena tai lankana suuttimen läpi, jossa se kuumennetaan laserilla tai elektronisuihkulla ja ruiskutetaan suojakaasun mukana kerroksittain kappaleeseen. Suutinta ohjataan 4- tai 5-akselisesti. Perinteisesti suorakerrostusmenetelmiä on käytetty korjauksiin ja pinnoituksiin. Nykyään myös ns. free form -tulostus on yleistynyt. Siinä kappale rakennetaan kokonaan ruiskuttamalla metallia haluttuun muotoon. Uusimmissa tekniikoissa menetelmään on yhdistetty myös perinteinen kara pyöriviä työkaluja varten. Tämä mahdollistaa kappaleen pinnanlaadun ja mittatarkkuuden parantamisen tulostamisen yhteydessä.

Suunnitteluperiaatteita

Suoratulostusmenetelmillä kappaleen geometrian määrää käytännössä tulostimen akseleiden rajoitteet. Ruiskuttamisen pitää tapahtua Z-akselin suuntaisesti. Menetelmässä päästään 0,1 – 5 mm seinämävahvuuksiin ja 0,1 – 0,2 mm kerrosvahvuuksiin yhdellä ruiskutuksella. Materiaalia voidaan tuoda kappaleeseen luokkaa 1 kg/h. Tämä tekee suoratulostusmenetelmistä jopa 10 kertaa nopeamman kuin jauhepeptimenetelmistä.

4.3.3 Sidosaineen suihkutuksen menetelmät (Binder Jetting)

Tässä menetelmässä kappale muodostetaan kerroksittain ruiskuttamalla ruostumattomaan metallijauheeseen erillistä sidosainetta. Kappale sintrataan uunissa ja sen jälkeen siihen imeytetään pronssia korvaamaan sidosaine.

Sintrattu kappale on ennen pronssin imeyttämistä erittäin hauras ja suurin osa suunnittelun rajoitteista johtuu tästä. Kappaletta on pystytävä siirtelemään ja käsittelemään ilman sen hajoamista.

Suunnittelussa huomioitavaa

Rakenteessa ei saa olla alle 3 mm vahvuisia seinämiä. Mitä suurempi kappale, sitä vahvemmat seinämät siinä pitää olla kappaleen romah-
tamisen estämiseksi. Hyvin pienissä (alle 30x30x30 mm) kappaleissa
seinämänvahvuus voi tuennasta riippuen olla minimissään 1,5 – 2 mm.
Seinämänvahvuuden olisi pysyttävä kappaleessa mahdollisimman va-
kiona. Koska prosessissa kappale lämpenee ja jäähtyy voimakkaasti,
näin estetään lämpöjännitykset ja kappaleen mahdollinen halkeilu.

Menetelmä resoluutio on luokkaa 0,8 – 1 mm, eli pienet yksityiskohdat
eivät toistu tulosteessa.

Infuusiomenetelmän tarkkuus ei ole kovin hyvä, kappaleen mittatark-
kuus on luokkaa $\pm 2,5\%$. Tarkkojen reikien tulostamista ei suositella.

Jos kappale on ontto, siinä pitää olla aukotus jauheen poistamiseksi
sen sisältä. Suositeltava tyhjennysaukon halkaisija on minimissään 7
mm.

Sisäkkäisiä ja toisiinsa liittyviä osia ei tällä menetelmällä voi valmis-
taa.

4.3.4 Valaminen 3D-tulostettuihin muotteihin

Eräs metallien AM-tekniikoita läheisesti sivuava menetelmä on hiek-
kavalumuottien valmistus 3D-tulostamalla. Menetelmän etu on, että
muotti voidaan valmistaa suoraan valettavan kappaleen 3D-mallista il-
man erillisen työkalun valmistusta. Muotti voidaan valmistaa useam-
masta osasta ja jakotasot voidaan valita vapaammin kuin perinteisellä
menetelmällä muotteja valmistettaessa. Muottiin ei tarvitse suunnitel-
la erikseen päästöjä.

Menetelmässä laatikkoon levitetään kerros kerrokselta hiekkaa, joka
halutuilta kohdilta kovetetaan kaksikomponenttisella sidosaineella.
Aineen toinen komponentti on hiekassa itsessään ja toinen kompo-
nentti suihkutetaan haluttuun kohtaan hiekkaan. Hiekkatulosteessa
ei tarvitse huolehtia overhangeista, koska hiekka jaksaa kannatella tu-
losteen painon. Tulosteen kerrosvahvuus on 0,3 mm, joka käytännös-
sä on myös tulosteen pienin resoluutio. Suomessa kyetään kooltaan

1060x600x500 mm tulosteisiin, suurimmat tulostimet Saksassa ovat tilavuudeltaan jopa 8m³.

Suunnittelussa huomioitavaa

Muotin suunnittelu lähtee valettavan kappaleen suunnittelusta. Kun on todettu, että kappale on valettavissa, käytetään samaa 3D-mallia muotin suunnitteluun. Muotin valmistaja yleensä huolehtii muotin ja sen valukanavien yms. suunnittelusta.

5 METALLISTEN AM-MATERIAALIEN OMINAISUUDET

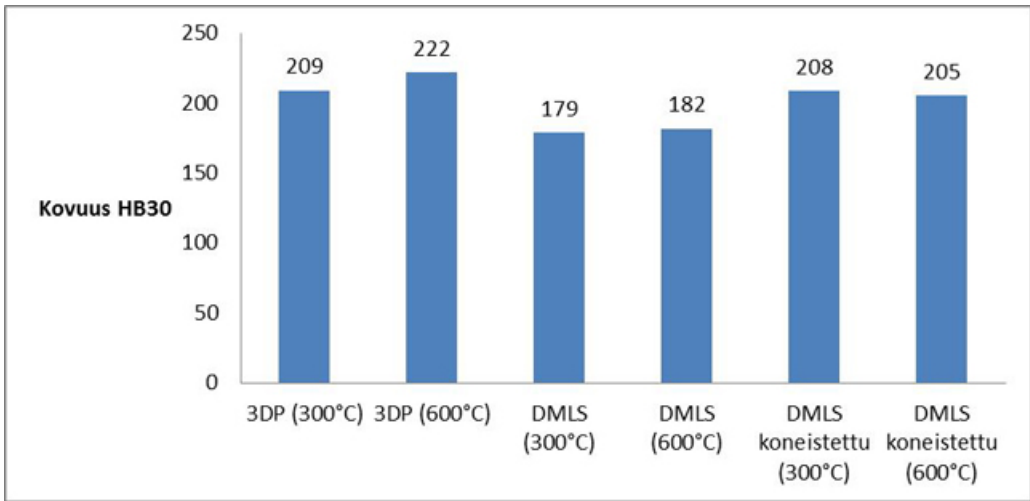
5.1 Hankkeessa tutkitut materiaalit

Hankkeessa tutkittiin kahta AM-teräslaatua. Kiinnostuksen kohteena olivat lähinnä terästen mekaaniset ominaisuudet staattisissa ja dynaamisissa kuormitustilanteissa. Nämä kaksi materiaalia tulostettiin menetelmillä DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*) ja 3DP (*3D Inkjet Powder Printing*). Materiaaleina olivat vastaavassa järjestyksessä AISI-standardin mukaiset ruostumattomat teräkset EOS 316 L ja 420 SS + Bronze. Tämän luvun tekstit perustuvat kahteen hankkeessa tehtyyn opinnäytetyöhön, joista löytyy tarkempia tietoja asiasta (Kesonen, Hofren).

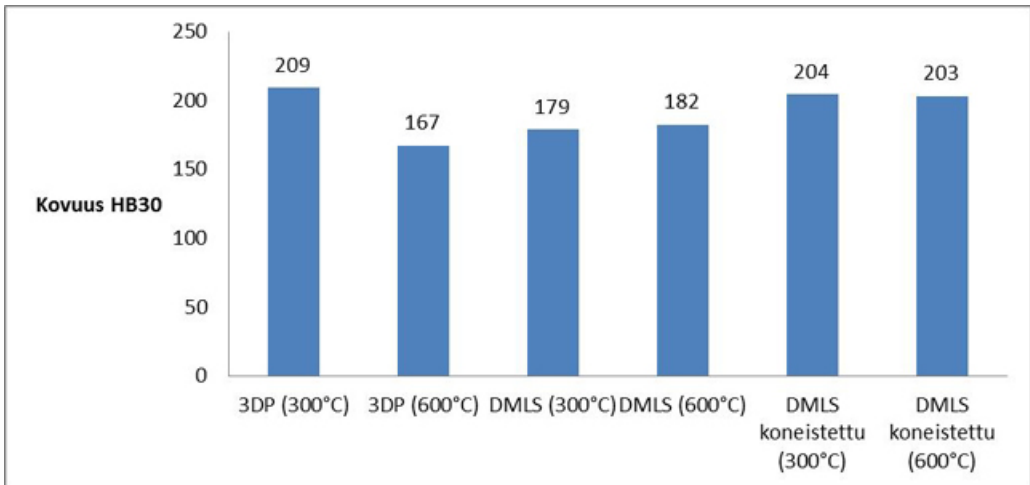
5.1.1 Pinnankovuus

Materiaaleille suoritettiin pinnankovuusmittaukset Brinellin-asteikolla. Kovuusmittauksissa haluttiin tutkia erityisesti lämpökäsittelyn vaikutusta DMLS ja 3DP-tekniikoilla tuotettuihin kappaleisiin. Testaukset toteutettiin Brinellin-asteikolla (HB30). Testit tehtiin kuudelle koekappaleelle ennen ja jälkeen lämpökäsittelyn. Puolet kappaleista lämpökäsiteltiin uunissa 300 °C lämpötilassa ja puolet 600 °C lämpötilassa. Kaikkien kappaleiden pitoaika uunissa oli 30 min.

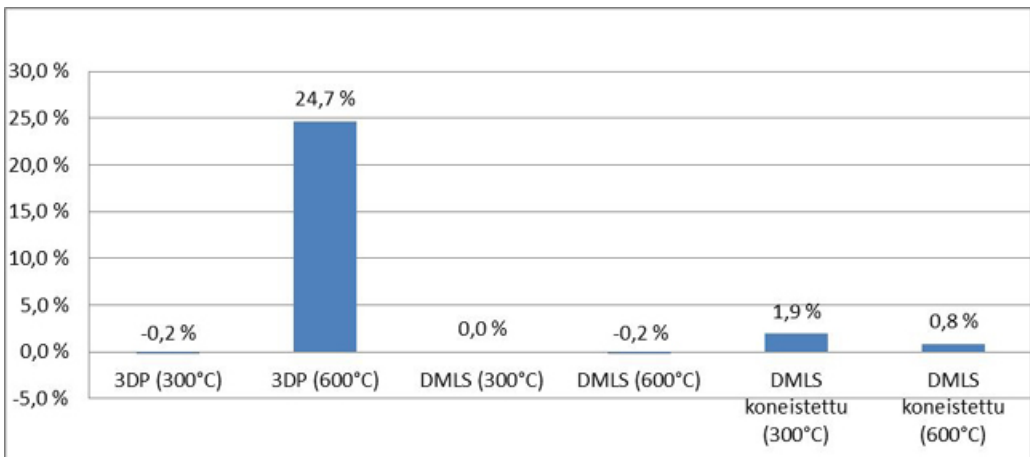
Kuvissa 5.1, 5.2 ja 5.3 nähdään testien tulokset ja prosentuaalinen muutos pylväsdiagrammeina. Arvot laskettiin viiden mittauksen keskiarvosta, josta on jätetty pois suurin ja pienin mittaustulos. Tuloksista huomataan, että suurin muutos pinnankovuudessa on tapahtunut 3DP-tekniikalla valmistetussa kappaleessa, joka lämpökäsiteltiin 600 °C lämpötilassa. Koekappaleen pinta pehmeni 24,7 % arvosta 222 HB30 arvoon 167 HB30. DMLS-tekniikalla valmistetuille kappaleille ei ole näkyvissä muutosta kovuudessa, kun taas koneistetuissa DMLS-koekappaleissa on nähtävissä pinnankovuuden vähenemistä. Tämä on kuitenkin vain hyvin vähäistä, 300 °C käsitellyssä kappaleessa 1,9 % ja 600 °C käsitellyssä kappaleessa 0,8 %.



Kuva 5.1. Kovuus ennen lämpökäsittelyä.



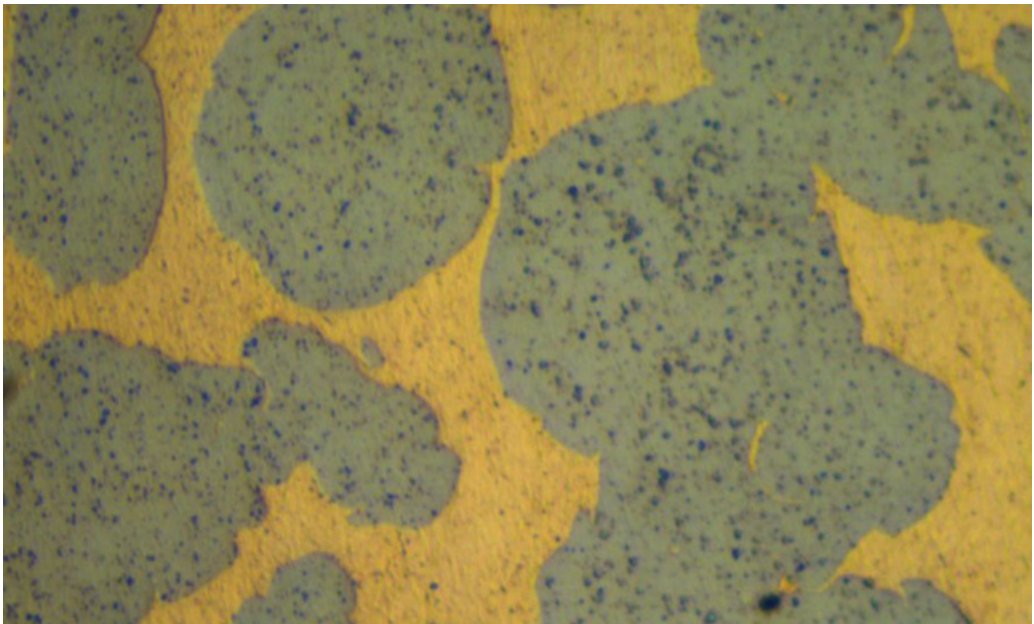
Kuva 5.2. Kovuus lämpökäsittelyn jälkeen.



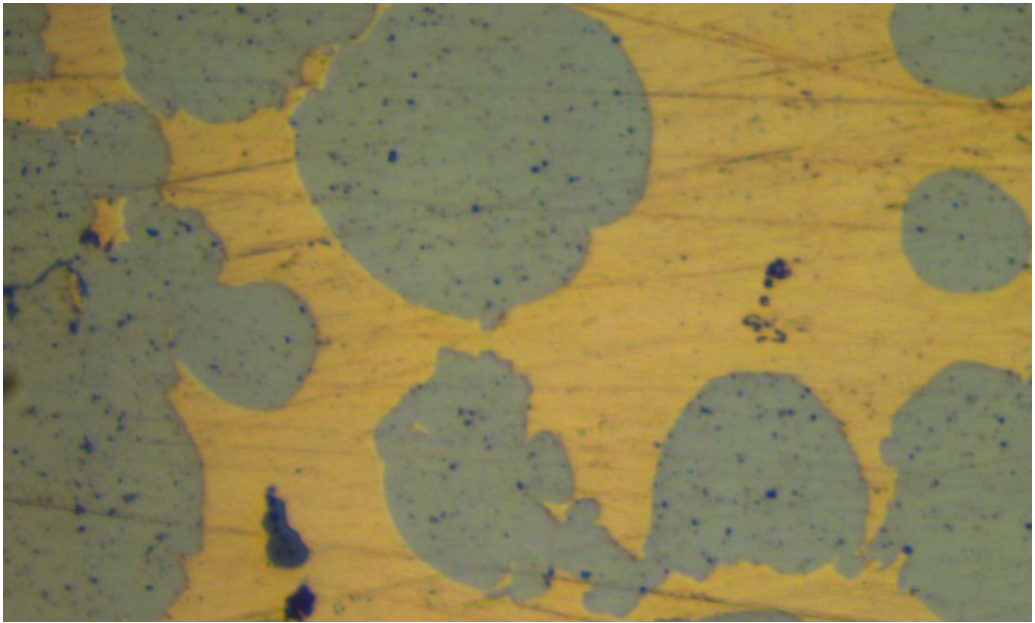
Kuva 5.3. Lämpökäsittelyn aiheuttama muutos kovuuteen.

5.1.2 Mikrorakenne

Kovuuden lisäksi mielenkiintoa herätti erityisesti materiaalin SS420+pronssi mikrorakenne. Alla olevissa kuvissa 5.4 ja 5.5 nähdään kahden hieen mikrorakenne. Kuvat on otettu 40-kertaisella suurennoksella materiaaliteknisellä mikroskoopilla. Hieet ovat valmistettu 3DP-tekniikalla tuotetusta kappaleesta. Kuvassa 5.4 oleva mikrorakenne on lämpökäsittelmättömästä kappaleesta ja kuvassa 5.5 kappale on lämpökäsitelty 600 °C lämpötilassa 30 min pitoajalla. Mikrorakennekuvinä näkyvät pronssilla täyttyneet huokoiset kellertävän värisinä harmaana näkyvän 420SS-matriisin ympäröimänä. Pronssialueiden muodot selittyvät sintrausvaiheen jättämän huokoisuuden täyttymisellä. Lämpökäsittelyn hieen mikrorakenteessa nähdään raerajojen sulautumista toisiinsa verrattuna käsittelmättömään mikrorakenteeseen, jossa raerajat erottuvat selkeästi toisistaan.

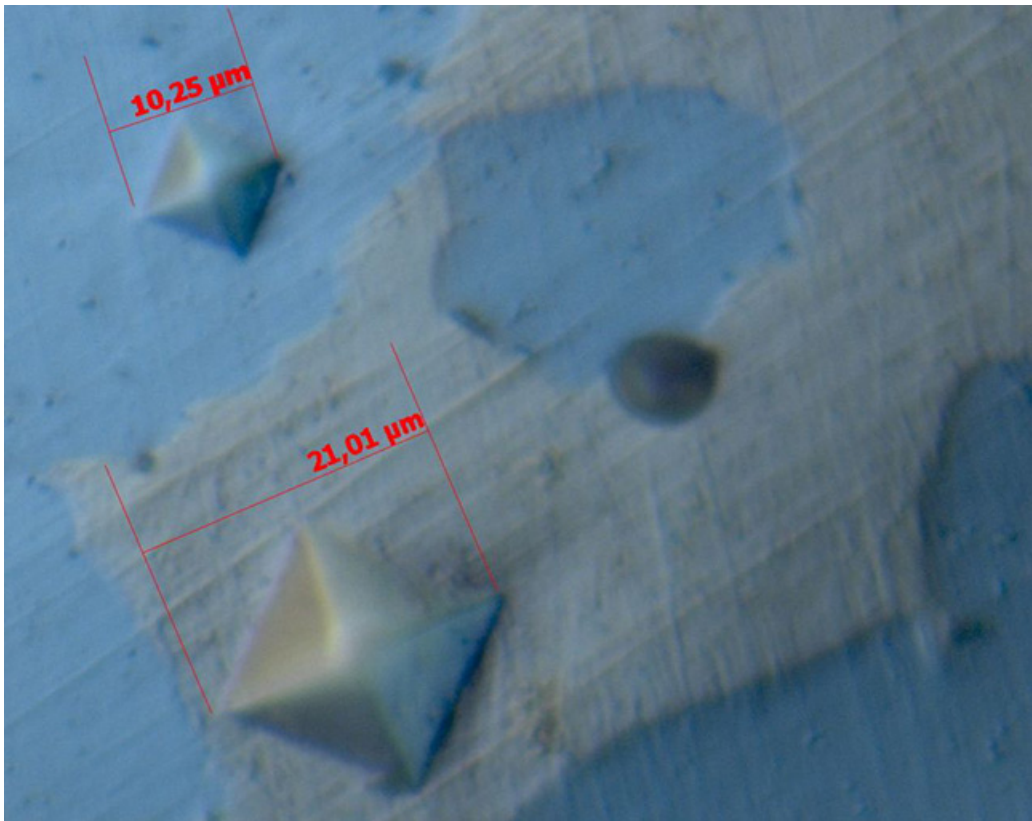


Kuva 5.4. Mikroskooppikuva SS420 + pronssi -materiaalista ennen lämpökäsittelyä.



Kuva 5.5. Lämpökäsitelty kappale.

Lämpökäsitellystä hieestä otettiin Vickersin kovuusmittaukset (kuva 5.6) 27 g kuormituksella. Suurempi painauma syntyi pronssille, mikä olikin oletettavaa. Pronssin painauma oli yli kaksi kertaa suurempi kuin 420SS-ruostumattoman teräksen painauma. Vickersin kovuudeksi saatiin pronssille 111 ja 420SS-ruostumattomalle teräkselle 467.



Kuva 5.6. Vickersin kovuusmittauksen jäljet hieessä.

5.1.3 Jälkikäsittely

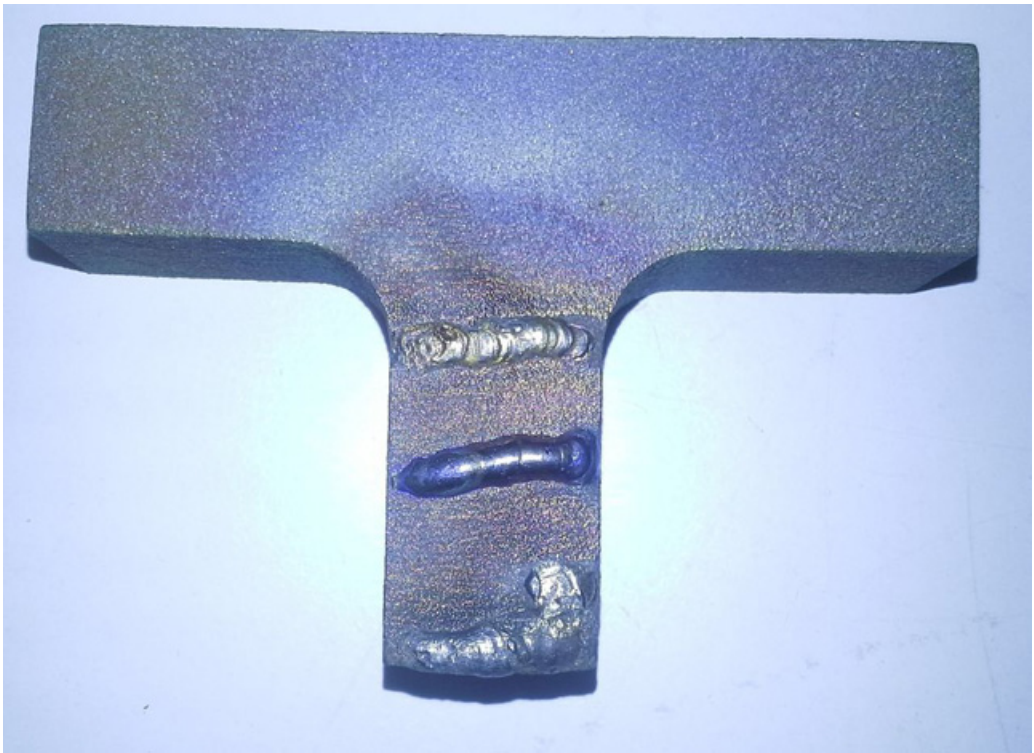
Tutkimuksessa jouduttiin 3DP- ja DMLS- tekniikalla tuotettuja koe-kappaleita työstämään koneistamalla, sekä lisäksi 3DP-tekniikalla tuotettuun osaan kokeiltiin hitsaamista TIG-hitsausprosessilla. 3DP-valmistusprosessissa materiaalina ollutta 420SS+pronssi työstettiin koneistamalla. Koneistuksessa ei huomattu mitään muuta ongelmaa kuin muokkauslujittuminen. DMLS-valmistusprosessissa käytettiin materiaalina 316L haponkestävää ruostumatonta, jonka koneistamisessa ei huomattu mitään poikkeavaa.

Materiaalia 420SS+pronssi olevaa kappaletta hitsattiin koemielessä TIG-hitsausprosessilla kolmella eri lisäaineella:

- OK 13.09 Rakenneteräs
- OK Tigrod 316 LSi Ruostumaton teräs
- OK Tigrod 19,72 Titaani

Tavalliselle rakenneteräkselle tarkoitettu lisäainelanka toimi hyvin hitsauksessa ja samoin titaania oleva lisäainelanka. Ruostumattomalle teräkselle tarkoitettu lisäainelanka tuotti hitsauksen aikana mustaa kuonaa hitsin päälle, joka arveltiin johtuvan materiaaliin imeytetystä pronssista.

Kuvassa 5.7 ylin hitsi on perinteistä rakenneteräkselle sopivaa lisäainetta, keskimmäinen ruostumattomalle teräkselle sopivaa ja alin on titaani lisäaineella hitsattu.



Kuva 5.7. Hitsauskokeet 3DP-tekniikalla valmistetulle koepalalle (420ss+pronssi).

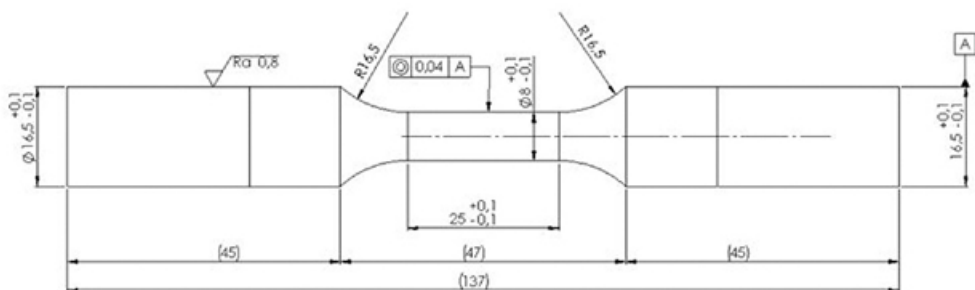
5.2 Väsymislujuus

Ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettujen metallisten kappaleiden väsymisominaisuudet olivat erityisen mielenkiinnon kohteena, koska alkuolettamuksen mukaan kerroksellisen rakenteen epäiltiin vaikuttavan eniten juuri väsymislujuuteen. Väsymislujuutta testattiin aksiaalisessa veto-puristusväsytyksokokeessa. Ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettuja koekappaleita tilattiin 12 kpl, joista kuutta testattiin suoraan

ilman mitään jatkotoimenpiteitä. Kuusi kappaletta koneistettiin Ra 0,8 μm pinnankarheuteen. Väsymisteorian mukaisilla laskutoimituksilla arvioitiin DMLS-tekniikalla tuotettujen testikappaleiden väsymisikää. 3DP-tekniikalla tuotettuihin kappaleisiin ei määritetty teoreettista väsymisikäarviota, koska kyseessä oli komposiittimateriaali. Tutkimuksessa verrattiin 3DP-tekniikalla tuotettujen kappaleiden väsymistä DLMS-tekniikalla tuotettujen kappaleiden väsymiseen ja DMLS-tekniikalla valmistettujen kappaleiden pinnankarheuden vaikutusta väsymiseen.

Standardi SFS-ISO 1099 esittää ohjeet väsytykokeiden suorittamiselle aksiaalisella väsytykokeella. Testattavan kappaleen muodon tulee olla poikkileikkaukseltaan pyöreä tai suorakulmio. Testauskappale kiinnitetään aksiaalisesti kuormitettavaan testauslaitteistoon, jossa voidaan määrittää halutun tyyppinen jännitysjakso ja jännityksen suuruus, joilla kappaletta kuormitetaan. Koetta jatketaan niin pitkään, että testauskappale hajoaa tai saavutetaan ennalta laskettu väsymiskestoikä.

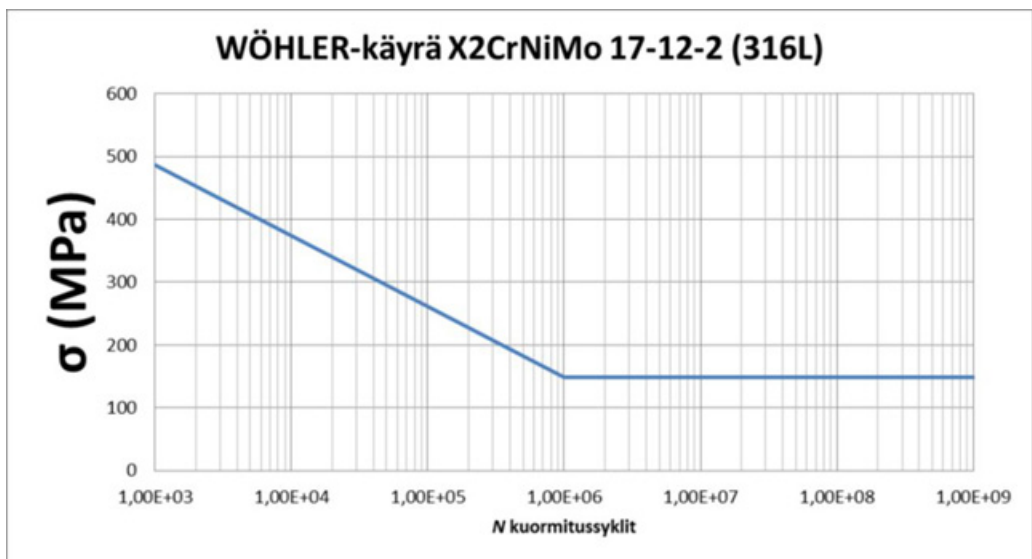
Koekappaleet mitoitettiin standardin mukaisesti siten, että poikkileikkaus on pyöreä ja halkaisijaltaan 8 mm (kuva 5.8). Testausmateriaalit olivat samat kuin edellä eli DMLS-tekniikalla toteutettu X2crNiMo 17–12-2 (DIN 1.4404) EOS 316L, joka on yleinen ruostumaton haponkestävä teräs sekä 3DP-tekniikalla tuotettu 420 SS+pronssi. DMLS-tekniikalla tuotetut testikappaleet valmistettiin EOSINT M-sarjasta tehdyllä development 3D-tulostimella Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa. 3DP-tekniikalla tuotetut kappaleet tilattiin belgialaiselta i.materialise -yritykseltä.



Kuva 5.8. Väsytestisauvojen mitat.

Väsymisteorian mukaisesti materiaalille 316 L laskettiin teoreettinen redusoitu väsymislujuus-käyrä (Wöhler-käyrä). Redusoinnissa käytettiin kappaleen koon, kuormitustyyppin ja pinnanlaadun kertoimia. Käyrä on esitetty kuvassa 5.9.

Jotta AM-kappaleita voitaisiin paremmin verrata tavallisesta materiaalista valmistettuihin kappaleisiin, otettiin vertailumateriaaliksi tavallinen kylmävedetty 316 L. Materiaalille suoritettiin ensin vetokokeet, joissa tarkennettiin materiaalin murtolujuus. Vetokokeista saatiin murtolujuudeksi n. 609 MPa, jonka perusteella teoreettiseksi väsymisiäksi saatiin 23681 kuormitusyksiä.



Kuva 5.9. Materiaalien AISI 316 L teoreettinen redusoitu väsymislujuusikäyrä.

Vertailumateriaalin väsymistestaukset suoritettiin kahdella koesauvalla (kuva 5.10) kuormittaen sinimuotoisella voimalla (16 kN voima-amplitudi, 10 Hz taajuus ja keskijännitys 0). Sauvat rikkoutuivat 17900 ja 16000 syklin kohdalla.



Kuva 5.10. Vertailumateriaalista valmistetut testisauvat.

Vaikka 3DP-tekniikalla valmistetuille testikappaleille ei laskettu teoreettista väsymislujuutta, haluttiin kuitenkin määrittää materiaalin todellinen murtolujuus ja murtovenymä vetokokeella. Murtolujuuksiksi saatiin 581 MPa ja 554 MPa. Nämä ovat n. 17 % pienemmät kuin valmistajan ilmoittama 682 MPa. Murtovenymäksi saatiin kummassakin tapauksessa 0 % (valmistajan ilmoittama arvo 2,3 %). 3DP-tekniikalla valmistettu 420ss+pronssi-materiaali käyttäytyy siis hyvin hauraasti ja murtumatyyppi vetokokeissa oli selkeästi haurasmurtuma. Molemmissa vetokoesauvoissa murtuminen tapahtui ainepaksuuden muutoskohdasta.

3DP-tekniikalla valmistettuja veto-puristuskoesauvoja tilattiin 3 kappaletta (kuva 5.11). Ensimmäisessä väsytestauksessa pidettiin sama voima-amplitudi (16 kN), jota oli käytetty vertailumateriaalina olevan 316L väsymistestauksessa. Kahdessa muussa testissä voimaa kasvatettiin hieman (17 kN). Ensimmäisessä testissä kokeiltiin myös erilaisten taajuuksien vaikutusta. Kolmessa testissä aikaansaadut murtumaan johtaneet syklimäärät olivat 56692, 62700 ja 91500. Kaikki sauvat murtuivat ainepaksuuden muutoskohdasta.



Kuva 5.11. SS420 + pronssi –materiaalista valmistetut testisauvat.

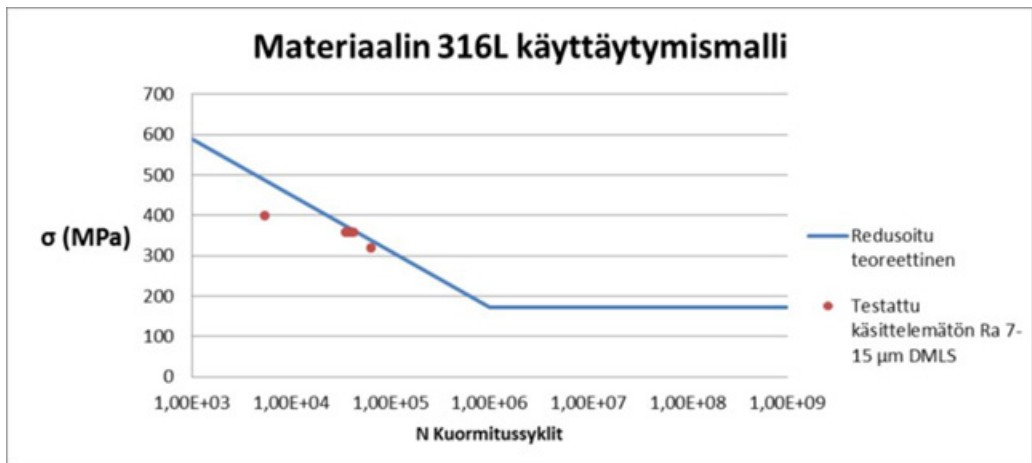
DMLS-tekniikalla tuotettuja koesauvoja oli yhteensä 13 kappaletta, joista yksi oli tarkoitettu staattiseen vetokokeeseen. Kuuteen veto-puristuskoesauvaan ja yhteen vetokoesauvaan (kuva 5.12) oli jätetty koneistusvarat.



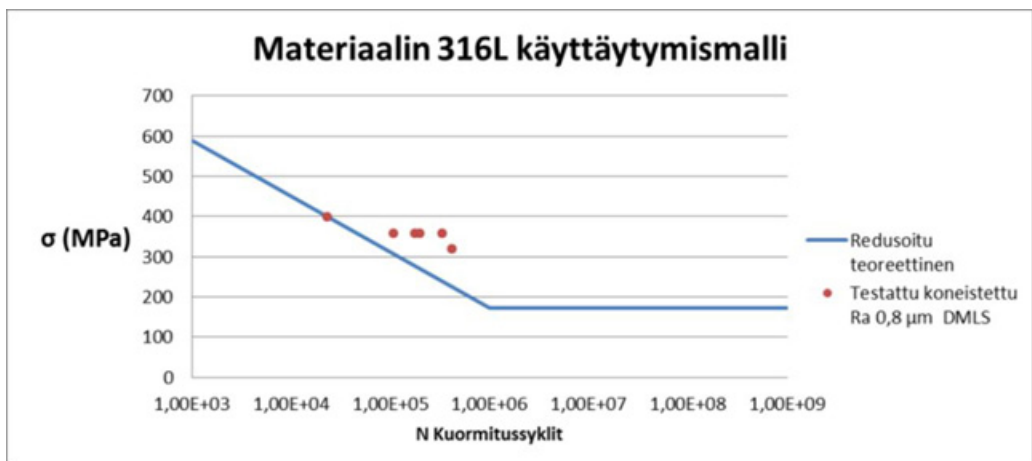
Kuva 5.12. DMLS 316 L –materiaalista valmistetut testisauvat koneistusvaralla.

Koneistusvaralla olevat DMLS-tekniikalla tuotetut veto-puristuskoesauvat koneistettiin pinnankarheuteen Ra 0,8 µm. DMLS-tekniikalla tuotetuista veto-puristussauvoista 6 kappaletta valmistettiin suoraan oikeisiin mittoihin ja olivat jälkikäsittelemättömiä. Tarkoituksena oli verrata pinnan karheuden vaikutusta DMLS-tekniikalla tuotetuissa veto-puristuskoesauvoissa. DMLS-tekniikalla pystyttiin kappaleet valmistamaan suoraan pinnankarheuteen Ra 7-15 µm. DMLS-tekniikalla valmistetulle vetokoesauvalle suoritettussa vetokokeessa saatiin murtojuuudeksi 654 MPa ja murtovenymäksi 32,5 %. Vastaavat valmistajan ilmoittamat arvot ovat 540 +/-55 MPa ja 50 +/-20 %.

DMLS-koesauvojen väsymistestaukset suoritettiin kolmella eri voima-amplitudilla, jotta kyettiin asettamaan testitulokset teoreettiselle väsymislujuskäyrälle. Testitulokset on merkitty teoreettiselle redusoidulle väsymislujuskäyrälle kuvissa 5.13 ja 5.14.



Kuva 5.13. Materiaalin EOS 316 L testitulokset suhteessa teoreettiseen.



Kuva 5.14. Koneistetun materiaalin EOS 316 L testitulokset suhteessa teoreettiseen.

Hankkeessa oli tarkoitus tutkia DMLS- ja 3DP-valmistustekniikoilla tuotettujen kappaleiden väsymisominaisuuksia ja saada alustava arvio, voidaanko DMLS- ja 3DP-tekniikoilla valmistettuja teräsosia käyttää väsyttävässä kuormituksessa teollisuudessa. Olettamuksena oli, että ainetta lisäävällä valmistuksella tuotetut kappaleet eivät kestä niin hyvin väsyttävää kuormitusta kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä. Testaustulokset kuitenkin osoittivat, että ainetta lisäävällä valmistuksella tuotetut testikappaleet kestivät jopa paremmin väsyttävää kuormitusta kuin perinteisellä valmistusmenetelmällä tuotetut.

Perinteiset teoreettiset väsymisiän määrittäminen menetelmät eivät sovellu 3DP-valmistusprosessilla tuotettuihin rakenteisiin. DMLS-testikappaleiden väsymisiät noudattivat osittain perinteisen teoreettisen väsymisiän määrittäminen menetelmän antamia tuloksia. 3DP-tekniikalla tuotetut testikappaleet osoittivat testitulosten hajonnalla sen, että 3DP-valmistusprosessi ei ole tasalaatuinen rakenteissa, joita kuormitetaan väsyttävällä kuormituksella. Syyksi hajonnalle 3DP-valmistusprosessissa arvioitiin infuusiossa tapahtuvaa imeytysmateriaalin imeytysprosessin kontrolloimattomuutta ja lämpötilaa, joita infuusiossa joudutaan käyttämään. Yleensä väsyttävään kuormitukseen pyritään välttämään materiaaleja, joissa on kaksifaasirakenne. Infuusio ja siihen tarvittava lämpötila vaikuttavat materiaalinominaisuuksiin huomattavasti.

DMLS-tekniikalla tuotetuissa testikappaleissa pinnankarheudella oli huomattava merkitys tulosten hajonnassa sekä väsymisiässä. DMLS-testikappaleissa hajonta kasvoi, kun pinnankarheuden merkittävyys pieneni ja sisäisen rakenteen merkitys kasvoi. Väsytyksiässä oli kuitenkin suuri kasvu DMLS- testikappaleissa, joissa oli koneistettu pinta. DMLS-tekniikalla tuotettujen testikappaleiden testaukset paljastivat sen, että DMLS-valmistusprosessi on tasalaatuisempi kuin 3DP-valmistusprosessi rakenteissa, joihin kohdistuu väsyttävää kuormitusta. DMLS- ja-3DP valmistettujen testikappaleiden tulokset väsyttävässä kuormituksessa olivat yllättävät. Väsymiskestävyyttä pystytään 3DP- ja DMLS- tekniikalla valmistetuissa rakenteissa parantamaan mm. pintakäsittelyllä ja lämpökäsittelyllä. Perinteiseen kylmävedetystä aiheista valmistettuun testikappaleisiin verrattuna 3DP- ja DMLS-valmistusprosessin tuomat materiaalinominaisuudet parantavat väsymiskestävyyttä. 3DP- ja DMLS-tekniikalla tuotetut rakenteet soveltuvat osittain teolliseen käyttöön, jossa kuitenkin DMLS-tekniikka soveltuu laajemmin sen tasalaatuisuutensa takia.

5.3 Kappaleiden sisäiset rakenteet

Yksi ainetta lisäävän valmistuksen tuomista mahdollisuuksista on kappaleiden sisäisten rakenteiden luominen. Kappaleen sisäiset rakenteet mahdollistavat kappaleen painon ja kestävyuden optimoinnin. Vähemmän tunnettu mahdollinen sovelluskohde on sisäisten varmuusristikkojen luominen kappaleisiin. Hankkeessa mielenkiinnon kohteena olivat AM-kappaleen sisällä olevat ristikko- ja kennorakenteet erityisesti väsymislujuuden kannalta.

Ainetta lisäävä valmistus mahdollistaa kappaleen muodon optimoinnin sen funktion mukaan. Jäähdytys-, kaasu- ja nestekanavat voidaan suunnitella virtaukselle optimaalisiksi. Myös kappaleen sisäinen rakenne voidaan optimoida esimerkiksi painon tai rasituksen mukaan. Menetelmillä on myös rajoitteensa. Laitekohtaista minimisoinninpaksuutta on syytä käyttää. Minimisoinninpaksuus vaihtelee 0,1 – 3 mm välillä AM-tekniikasta ja laitteesta riippuen. Valmistaja ilmoittaa tämän omissa menetelmätiedoissaan.

Toinen huomiota vaativa tekijä on onttojen kappaleiden jauheenpoisto, mikäli AM-tekniikka käyttää jauhepetiprosessia. Jauhepetiprosessia käyttävissä menetelmissä käytettävä metallijauhe tarvitsee poistumisaukon kappaleeseen, mikäli kappaleessa on käytössä sisäisiä onttonnuksia. Näitä voivat olla esimerkiksi kenno- ja ristikkorakenteet. Jauheenpoiston on syytä olla kooltaan yli millimetrin kokoinen, mutta mitä suurempi poisto, sitä helpompi jauhe on poistaa.

Tekniikoissa joissa käytetään infuusioprosessia, on syytä noudattaa aineenpaksuuksien tasapaksuisuutta. Paksut muodot lämpenevät ja jäähtyvät ohuita muotoja hitaammin, joka aiheuttaa kappaleeseen sisäisiä jännitystiloja ja jopa halkeamia tai säröjä. 3DP-tekniikalla tuotetuissa vetosauvoissa tämä ilmiö nähtiin käytännössä molempien vetosauvojen katketessa aineenpaksuuden muutosalueella.

Lisäksi DMLS-, EBM- ja LENS-tekniikkoja käyttäessä on syytä pyrkiä välttämään alle 30 asteen riippuvia pintoja, jolloin tukimateriaalia täytyy käyttää, sillä tukimateriaalin käyttö luo hukkamateriaalia ja sen poistaminen vaatii jälkikäsitteilyä. 30 asteen kulma pätee ruostumattomille teräksille, mutta vaihtelua on paljon käytettävästä materiaalista riippuen. Titaanilla vastaava kulma on 20-30 astetta, alumiinilla 45 astetta ja koboltti kromilla 30 astetta. Reikien valmistuksessa kuuden

millimetrin halkaisijaa suuremmat reiät on tuettava tukimateriaalilla tai muotoiltava pisaran muotoiseksi. Muita huomioitavia seikkoja ovat terävien sivujen välttäminen, tarpeettoman paksut aineenvahvuudet välttäminen ja pyöristämättömät kulmat. Jälkikäsitteily on huomioitava suunnittelussa koneistus- ja kiillotusvaroina, jos mitat ovat tarkasti toleroituja.

Tyypillisin tapa varautua kappaleen väsymiseen on käyttää äärettömän eliniän periaatetta. Tämä on myös vanhin suunnitteluperiaate. Äärettömän eliniän periaatteessa kappale suunnitellaan siten että jännitykset jäävät väsymisrajan alapuolelle. Yleisin käyttökohteille tälle periaatteelle ovat osat, kuten akselit, joita kuormitetaan miljoonia kertoja.

Safe life -periaatteessa kappale on suunniteltu kestämään äärellinen määrä kuormitusjaksoja. Kappale poistetaan käytöstä ennen kuormitusjaksojen täyttymistä. Sovelluksia ovat esimerkiksi paineastiat, laakerit ja suihkumoottorit.

Fail safe -periaatteessa rakenne suunnitellaan siten, ettei murtumista tapahdu ilman ennakkovaroitusta. Fail safe -periaate on käytössä esimerkiksi lentokoneteollisuudessa, jossa perinteisen varmuuskertoimen lisäämä paino osissa on haitallista, ja jopa vaarallista.

Damage tolerant -periaate on kehitetty edelleen Fail safe -periaatteesta. Periaate sopii sitkeille metalleille niiden hitaan särön etenemisen vuoksi. Säröt pyritään paljastamaan ennen murtumaa esimerkiksi ”vuoto ennen murtumaa” -tilanteella jossa särö paljastuu putkiston tai paineastian alkaessa vuotaa. Väsymiskestävyyttä voidaan parantaa myös siirtämällä voimia, jouhevilla geometrioilla, materiaalin valinnalla, sekä kappaleen viimeistelyn avulla.

Kaikkien rasiustyyppien kuormittaessa kappaletta eri tavoin, voidaan geometriaa muokkaamalla pyrkiä saamaan rasitus puristusjännitykseksi. Puristusjännitys on väsymiskestävyyden kannalta edullinen, koska särönkasvun vaatimaa vetoa ei synny. Tukirakenteita suunniteltaessa tämä voidaan toteuttaa asettamalla tuet rasitettavan pinnan alapuolelle, jolloin veto muuttuu puristukseksi. Taivutusta voidaan vähentää keskeissymmetriaa käyttämällä, jolloin ylimääräiseltä taivutukselta mahdollisesti vältytään.

Epäjatkuvuuskohdat, kuten terävät kulmat, olakkeet, lovet ja pienet pyöristykset aiheuttavat jännityskeskittymiä, joista särön ydintyminen alkaa. Näissä kohdissa jännitys on muita kohtia huomattavasti suurempi. Kun näitä muotoja vältetään, saadaan kappaleen väsymiskestävyttä parannettua.

Materiaalia valittaessa hienorakeisuus vaikuttaa eniten väsymiskestävyteen. Käyttämällä sitkeitä metalleja, kuten austeniittista ruostumaton terästä, voidaan väsymisreaktiota hidastaa. Kuulapuhaltaminen ja karkaiseminen parantavat väsymiskestävyttä aiheuttamalla puristusjännitystä. Kuulapuhalluksessa kuulat tekevät kappaleeseen pieniä lommoja, aiheuttaen puristusta lommon ympärillä. Materiaalin tilavuutta kasvattava karkaisu aiheuttaa puristustilan kappaleen pinnassa. Pinnan laatua parantamalla voidaan kappaleen väsymisikää kasvattaa huomattavasti. Pinnanlaadun merkitys kasvaa etenkin teräksen lujuuden kasvaessa.

Ristikko- ja kennorakenteet ovat saaneet uusia sovelluksia ainetta lisäävän valmistuksen myötä sisäisissä rakenteissa ja tukirakenteissa. Kenno- ja ristikkorakenteita käytetään tyypillisesti kohteissa, joissa halutaan keveyttä, ja joissa kappaleeseen kohdistuvia rasituksia voidaan arvioida. Ristikkorakenteiden tyypillisiä käyttökohteita ovat nosturit, sillat, hallirakennukset ja korkeat tukirakenteet, kun taas kennoja käytetään esimerkiksi huonekalujen sisuksissa.

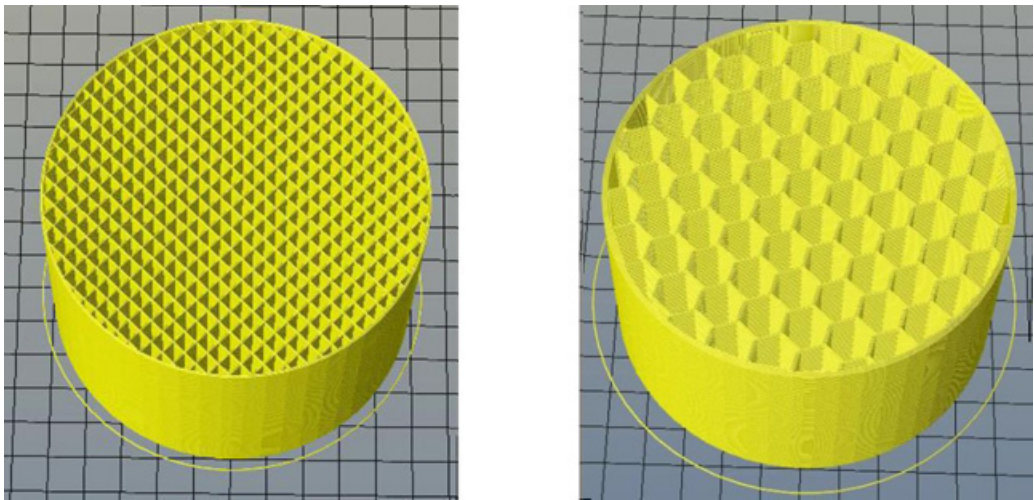
Useat AM-tekniikalla tuotetut ristikkorakenteet muistuttavat muodoltaan suuren mittakaavan ristikkorakenteita. AM-tekniikka mahdollistaa suurien ristikkorakenteiden pienentämisen tarvittaessa millimetrin osiin. Ristikkorakenteen muodostamiseen on ohjelmistoja, jotka rakentavat ristikon kappaleeseen rasitusten sijaintien ja tyyppien mukaan tai tasaiseksi verkoksi koko kappaleeseen. Yksi näistä ohjelmista on Within Medical. Within Medical on pääsääntöisesti proteesien valmistusta varten kehitetty ohjelmisto. Tästä huolimatta Within Medical tarjoaa laajat mahdollisuudet kappaleen sisäisten kenno- ja ristikkorakenteiden hyödyntämiseen. Ohjelmasta löytyy myös rakenneoptimointia varten kehitetty versio, Within Enhance, johon on yhdistetty myös FEM-analyysiominaisuuksia.

Käyttäessä ainetta lisäävää valmistusta, voidaan kennorakenteita hyödyntää kappaleen keventämiseksi. Perinteisesti kennorakennetta hyödynnetään laajassa mittakaavassa huonekaluteollisuudessa. Kennole-

vy koostuu kahdesta levystä, sisäisestä kennostosta ja reunalevyistä. Esimerkiksi kennorakenteen käyttäminen huonekaluissa keventää huonekalua yli kolmasosan täydestä aineesta tehtyyn verrattuna, samalla säilyttäen tarvittavan puristuskestävyyden ja jäykkyyden. Keveys parantaa myös kappaleen käsiteltävyyttä.

AM-tekniikoita käytettäessä kennorakenne on yksi yleisimmistä täyttötavoista sen säästäessä materiaalia, ja antaen silti tarvittavan jäykkyyden. Eniten kennorakenteesta hyötyvät suuttimia käyttävät koneet, sillä kennorakenne nopeuttaa kappaleen valmistusta huomattavasti suuttimen liikeradan kutistuessa

Kennorakenteen muodostaminen 3D-malliin voidaan tehdä automaattisesti esimerkiksi Slic3r- tai Cura-ohjelmalla. Ohjelmasta pystyy valitsemaan rakenteen täyttöprosentin ja vaipan paksuuden.

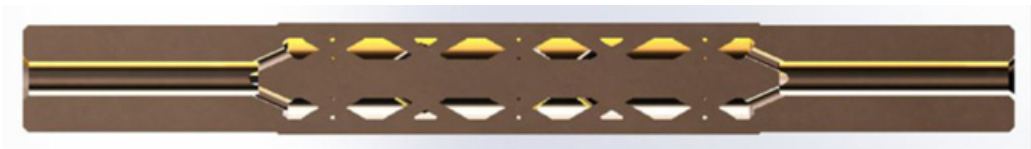


Kuva 5.15. Ohjelmallisesti generoitu kennorakenne, vasemmalla Cura, oikealla Slic3r.

Hankkeessa oli tarkoitus selvittää, onko väsymismurtuman etenemistä mahdollista pysäyttää sisäisiä rakenteita hyödyntäen. Testikappaleeksi valittiin akseli, jonka sisälle rakennettiin monitasoinen ristikkorakenne. Monitasoristikon käytön avulla säröltä pyrittiin katkaisemaan mahdollisuus edetä kiinteää ainetta pitkin koko kappaleen läpi. Särön puhkaistua vaipan, joutuisi se ydintymään uudelleen ristikkorakenteeseen, jonka jälkeen viimeinen murtuva osa rakenteesta olisi sen ydin.

Perinteisen kennorakenteisen kappaleen kaikki pisteet ovat yhteydessä toisiinsa kaksikulotteisella pinnalla. Kokeiden keskittyessä tutkimaan voidaanko särön eteneminen katkaista, oli kennorakenteen kaksikulotteinen muoto haitallinen ja kokeisiin sopimaton. Täten kennorakenne hylättiin sisäisenä rakenteena, koska se antaa särölle selkeän kulureitin koko rakenteen läpi. Kennorakenteet kestävät myös heikosti vetojännitystä. Tämä supistaa mahdollisuuksia käyttää kennorakennetta monikuormitteisissa kappaleissa.

Kokeeseen materiaaliksi valittiin 3DP-tekniikalla valmistettava 420SS/pronssi. Ainetta lisäävä valmistus huomioitiin testikappaleessa jauhepetiprosessin vaatimukset täyttävillä jauheenpoistorei'illä. Lisäksi sisäinen ristikko suunniteltiin siten että 30 asteen sääntö säilyy läpi koko kappaleen. Kappale tehtiin symmetriseksi ja se oli mahdollista valmistaa kohtisuorassa jauhepetiin nähden ilman tukirakenteita. Kuvassa 5.16. on esitetty testikappaleen tietokonemallin leikkaus.



Kuva 5.16. Testikappaleen tietokonemallin leikkaus.

Testikappaleen 3D-mallia hyödyntäen toteutettiin FEM-analyysi. Analyysi paljasti ensimmäisestä mallista useita epäjatkuvuuskohtia, jotka saatiin korjattua. Toinen kierros paljasti lisää epäjatkuvuuskohtia, joihin puututtiin mallissa. Rakenneoptimointia jatkettiin, kunnes kaikki epäjatkuvuuskohdat oli saatu poistettua kappaleen sisäisestä ristikosta.

Rakenneoptimoinnin jälkeen edettiin alustavaan FEM-analyysiin. Analyysin avulla etsittiin sopivat raja-arvot kokeelle ja arvioitiin miten monitasoinen ristikko käyttäytyy ulomman kerroksen murtuessa. Analyysista saatujen tulosten perusteella arvioitiin, että mikäli särö rikkoisi ulkoisen vaipan, ei se siitä huolimatta etenisi kappaleen ytimeen asti, ja lopullinen murtuma estyisi. Myös ydintymisen arvioitiin alkavan vaipan murtumisen jälkeen uudelleen. Ydintymisen ollessa noin 90 % väsymismurtumaan johtavasta prosessista, pidentäisi sisäinen rakenne arvioiden mukaan kappaleen elinikää huomattavasti väsyttävässä kuormassa.

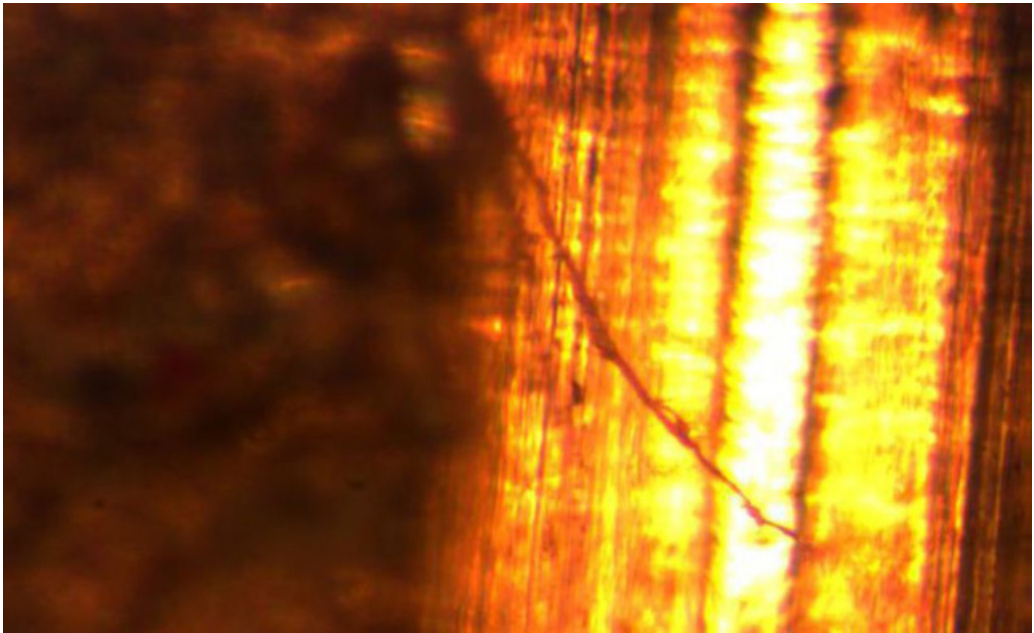
Lopullinen FEM-analyysi jaettiin kolmeen osaan. Ensimmäisessä tapauksessa kappaleen keskelle mallinnettiin 0,5 mm syvä ura, josta särön etenemisen oli määrä alkaa myös empiirisessä testissä.

Toisessa tapauksessa vaippa poistettiin keskeltä ja tarkasteltiin sisäiseen ristikkoon tulevaa jännitystä. Kolmannessa tapauksessa vaipasta poistettiin keskeltä vain puolet, synnyttäen taivutusta keskelle mallia. Kaikissa tapauksissa kappaleeseen kohdistettiin staattista vetoa 3 kN verran.

3DP-koekappaleen väsytykskoe suoritettiin Walter + Bai AG:n LFV 500-HH -kuormituskehällä. Kappaleeseen tehtiin vetävä esijännitys, jonka jälkeen aloitettiin kuormittaminen ensin 5 kN veto-puristustykyttämällä, joka myöhemmin kasvatettiin 10 kN. Koekappaletta kuormitettiin yhteensä 20 000 sykliä särön kasvattamiseksi (molemmilla voimilla 10 000 sykliä).

Testin jälkeen koekappaleelle tehtiin kaksi tunkeumanestetarkastusta. Ensimmäisessä tarkastuksessa tunkeumaneste suihkutettiin sisäpinnalle ja kehite ulkopinnalle. Tällä tavalla tarkastettiin, onko kappaleeseen syntynyt läpimeneviä säröjä. Tarkastus osoitti, että kappaleeseen ei ollut syntynyt testin aikana läpimeneviä säröjä.

Toisessa tarkastuksessa tunkeumanestetettä suihkutettiin kappaleen ulkopinnalle, ja pinnan pesemisen jälkeen samalle pinnalle suihkutettiin kehite. Tarkastuksessa keskityttiin uran läheisyyteen suurimman teoreettisen jännityksen ollessa urassa. Tarkastuksessa ilmeni materiaalin huokoisuus. Ulkopintaan imeytyi paljon tunkeumanestetettä. Tarkastuksen yhteydessä löydettiin yksi särö uran ylälaidasta. Tämä erottui selkeästi koneistetun uran ollessa tiiviimpi pinnaltaan, jolloin tunkeumanestetettä ei imeytynyt itse aineen huokosiin vain ainoastaan säröihin. Tunkeumanestetetarkastuksen löytö tarkastettiin stereomikroskoopilla. Löydetty särö osoittautui makrosäröksi (kuva 5.17).



Kuva 5.17. Tunkeumanestetarkastuksessa paljastunut >1,2 mm makrosärö.

Stereomikroskoopilla löydettiin useita muitakin säröjä kappaleesta, jotka kaikki osoittautuivat mikrosäröiksi. Osa näistä säröistä löydettiin uran keskeltä, mutta suurin osa löytyi kuitenkin uran reunalta. Suurin osa säröistä kasvoi uraan päin.

Alkuperäinen väsytestin kuormitus oli rajusti alimitoitettu. On todennäköistä, että löydetty säröt syntyivät vasta, kun voima tuplattiin. 420SS/pronssin väsymisikää ei voida arvioida käyttämällä rautametalleille suunnattuja kaavoja.

Koekappaleen säröistä 4/9 säröistä oli ydintynyt uran reunalle ja 5/9 uran reunan sisäpuolelle, joista kaksi oli ydintynyt keskelle uraa. Tästä voidaan päätellä, että FEM-analyysistä saadut arviot pitävät maksimijännityksen paikannuksen puolesta paikkaansa. Koneistettu pinta oli muuta kappaleen pintaa sileämpi, johtaen väsymiskestävyyden kannalta kestävämpään uraan. Tämä nähdään säröjen hajonnassa. Koneistuksen yhteydessä syntynyt muokkauslujittuminen on todennäköisesti myös vaikuttanut tähän hajontaan, 420SS/pronssin ollessa voimakkaasti muokkauslujittuvaa. Varsinaista empiiristä tietoa sisäisen rakenteen väsymiskestävyydestä ja särön ydintymisestä saatiin suppeasti, sillä vaipassa ei ollut läpimeneviä säröjä. Yksikään palkki ristikossa ei testin aikana kuitenkaan murtunut, vaikka 3DP-tekniikalla tehdyn

kappaleen sisäpinnan pinnanlaatu oli heikko. Pinnanlaadun heikkouden takia on epätodennäköistä, että 3DP-tekniikalla valmistetun kappaleen sisäiset rakenteet kestävät väsyttävää kuormitusta merkittäviä aikoja vaipan murruttua. Sisäpinnassa on myös paljon otollisia paikkoja ydintymille ylimääräisen jauheen muodostamien kiteiden liitospinnoissa.

6 AM-KUSTANNUSTEN ARVIOINTI

AM-kustannusten arvioinnissa tulee ottaa huomioon että vaikka tuote olisi mahdollista toteuttaa AM-valmistusmenetelmillä, se ei vielä tarkoita että se olisi taloudellisesti järkevää. Yleisellä tasolla puhuessa AM-menetelmien katsotaan olevan taloudellisesti kannattavia sellaisten osien valmistamisessa jotka ovat pienikokoisia, monimutkaisia rakenteeltaan ja joita valmistetaan pieniä määriä.

Arvioidessa jonkin osan valmistuksen kannattavuutta AM-menetelmillä, vaatii se valmistuskustannusten ja kustannusrakenteen analysoinnin lisäksi koko toimitusketjun ja siinä olevien kustannustekijöiden huomioon ottamista. Ennen kuin tehdään syvällisempää analyysia valmistuskustannuksista ja kustannusrakenteista olisi hyvä tehdä kärkeän tason tarkastus siitä, onko osan AM-valmistamisesta edes odotettavissa niin paljon hyötyjä että tarkempaan tarkasteluun on aihetta.

Zach Simkin ja Annie Wang esittelevät mm. Wohlerin raportissa 7 skenaariota joista vähintään jonkun tulisi toteutua jotta osaa kannattaa edes miettiä AM-valmistusmenetelmillä valmistettavaksi.

Taulukko 6.1. AM-valmistettavuuden arviointiskenaariot. (Lähde: Senvol LLC, Wohlers Report 2014)

Skenaario	Kuvaus	AM-valmistuksen etuja
Kalliit valmistuskustannukset	- Tuotteella on kalliit valmistuskustannukset johtuen monimutkaisesta rakenteesta, korkeista kiinteistä kustannuksista (esim. työkalut) tai pienestä valmistusmäärästä	AM voi olla kustannustehokkaampi vaihtoehto
Pitkä toimitusaika	- Onko valmistuminen riippuvainen osista, joilla on pitkä toimitusaika? - Ovatko seisokkikustannukset erittäin kalliita? - Halutaanko nopeuttaa tuotteen läpimenoaikaa markkinoille?	AM voi mahdollistaa nopeamman osien tuottamisen ja sitä kautta toimitusajan lyhentämisen
Korkeat varastointikustannukset	- Onko varastointimäärät hankalasti hallittavia? - Täytyykö tuotetta varastoida varmuuden vuoksi? - Vanheneeko tuotteita varastoon?	AM voi mahdollistaa tarpeeseen valmistamisen ja vähentää varastointitarvetta
Riippuvaisuus yhdestä tavarantoimittajasta	- Onko kyseessä kriittinen tuote jolla on vain yksi toimittaja? - Halutaanko pienentää riippuvaisuutta ja riskiä?	Osan suunnittelu AM-menetelmällä valmistettavaksi mahdollistaa useat toimittajat
Syrjäiset toimipisteet/ käyttöpaikat	- Toimitaanko alueilla joihin on hankalaa, aikaa vievää tai kallista toimittaa osia?	AM voi mahdollistaa valmistuksen paikan päällä
Korkeat tuonti- tai vientikustannukset	- Onko tuotteen tuonti- tai vientikustannukset suuria?	AM voi mahdollistaa paikallisen tuotannon lähellä markkina-alueetta.
Parannettu toiminnallisuus	- Halutaanko tuotteen ominaisuuksia parantaa tai luoda kokonaan uusia ominaisuuksia?	AM voi mahdollistaa tuotteen ominaisuuksien parantamisen tai tuoda täysin uusia ominaisuuksia

Mikäli tuote sattuu johonkin näistä kategorioista, olisi syytä tehdä perusteellisempi kannattavuusanalyysi.

Lisäksi kannattaa huomioida AM-tekniikoiden ja valmistuslaitteiden kehityskaari varsinkin metallin tulostuksen osalta. Kappaleet jotka on suunniteltu AM-tulostettaviksi voivat olla entisestään kustannustehokkaampia tulevaisuudessa koneiden valmistusnopeuksien jatkuvasti kasvaessa ja hintojen laskiessa. Jatkuvasti meneillään oleva valmistuskoneiden ja -laitteiden kehitys hyödyttää automaattisesti AM-suunniteltujen osien kannattavuutta sillä suurella todennäköisyydellä osia ei tarvitse enää suunnitella uudelleen.

Mikäli päätetään tehdä tarkempi tarkastelu siitä, kannattaako joku tuote siirtää AM-valmistettavaksi, on seuraavaksi vuorossa valmistuskustannusten analysointi.

Senvol LLC esitteli pikavalmistuskonferenssissa 2014 kustannusten määrittämisessä käytettävää algoritmia, jossa säästöt ja kustannukset on jaettu eri moduuleihin joissa otetaan huomioon mm. seuraavia asioita:

1. Suunnittelu

- Suunnittelun ja uudelleensuunnitteluun aika ja kustannukset
- Nopeus loppukäyttäjän testaukseen

2. Valmistus

- Valmistusaika ja kustannukset (ml. työkalukustannukset, työvoima, materiaali, työkonestikustannukset, läpimenoaika, koneaika, valmistusmäärä jne)
- Päätös siitä valmistataanko itse, vai ulkoistetaanko valmistus
- Laatutestauksen tai sertifiointin kustannukset

3. Toimitusketju

- Kuljetus- ja logistiikkakustannukset sekä niihin kuluva aika
- Maahantuonti- ja maastavientikustannukset (esim. verot, tullit, tariffit)
- Inventaario-, varastointi- ja pääomakustannukset
- "Vaihtoehtokustannukset" mikäli osan toimitus ei onnistu ajoissa

4. Varaosat ja vanhentuneisuus

- Varaosien hankkimisen ja toimittamisen aika ja kustannukset
- Osien vanhenemiskustannukset, saatavuusongelmat mikäli laitteiston elinkaarta jatketaan
- Yksintoimittajuusriskit ja "elinikäiset" hankintatilanteet

6.1 AM-kappaleiden suunnittelukustannukset

Suunnittelu aiheuttaa merkittävän kustannuserän jo ennen kuin tuote saadaan edes tuotantokelpoiseksi. Eri valmistustekniikat aiheuttavat hieman erilaisia vaatimuksia tulostettaville tuotteille ja mm. tarvittaville tukimateriaaleille. Tuotteen suunnittelu ei itsessään ole välttämättä riittävä, vaan ennen AM-tuotantoon siirtämistä saatetaan tarvita vielä tulostustestejä esimerkiksi eri tulostusasentojen vaikutuksesta kappaleen ominaisuuksiin. Lisäksi useissa tapauksissa tarvitaan myös jonkin tason sertifiointi jolla varmistetaan että valmistettavien tuotteiden laatu pysyy vakiona.

6.2 AM-kappaleiden valmistuskustannukset

Suurin AM:n ongelmista on sen kalleus valmistusmenetelmänä. Tämä johtuu suurelta osin siitä, että tulostimet ja tulostettavat materiaalit ovat kalliita. Koneen hankintahinta luonnollisesti jakautuu usealle vuodelle ja sitä kautta yksittäiselle tulostettavalle kappaleelle. Tulostettava materiaali on selkeästi suoranainen kustannuserä, joka riippuu kappaleen ja tarvittavien tukirakenteiden tilavuudesta. Erilaisia kustannusmalleja on kehitetty vuosien mittaan: jotkut niistä ovat hyvinkin yksityiskohtaisia, toiset ylimalkaisempia.

AM-menetelmillä valmistettavien kappaleiden valmistuskustannukset voidaan arvioida laskemalla yhteen materiaalin ja koneajan aiheuttamat kustannukset sekä asetus- ja viimeistelytoimenpiteisiin kuluvaan työajan kustannukset.

AM-kustannuksia on tarkasteltava koko tuotteen elinkaaren ajalta eikä vain tuijotettava pelkkiin valmistuskustannuksiin. Tuotteen elinkaari voidaan jakaa eri osiin kuvan 6.1 mukaisesti.



Kuva 6.1. Tuotteen elinkaaren vaiheet.

Kustannuksia tulee katsoa tuotteen loppukäyttäjän kannalta, jolloin näkökulma on tuotteen ostohinnassa (osto tapahtuu yleensä jakelu- ja käyttövaiheiden välissä) sekä käyttövaiheen ja kierrätyksen aiheuttamissa kustannuksissa. Käyttäjän kannalta luonnollisesti merkitsee eniten kumulatiivisten kustannusten ja saavutetun hyödyn suhde. Jotta kustannuksia voitaisiin vertailla, on elinkaaren ajalle sijoittuvat kustannukset diskontattava nykyhetkeen.

Perinteisessä tuotekehityksessä valmistusmyötäisellä suunnittelulla (DFMA) on ollut merkittävä asema tuotteen valmistuskustannusten alentamisessa. Siinä kuitenkin useimmiten tarkastellaan pelkästään valmistusvaihetta, jolloin saattaa käydä niin, että halvemmalla valmistettava osa voi elinkaarikustannusten osalta ollakin kalliimpi. DFMA-menetelmissä pyritään optimoituun tulokseen, joka on mahdollisimman lähellä ideaalista, loppukäyttäjän tarpeet mahdollisimman hyvin täyttävää tuotetta.

Valmistuskustannuksissa tarkastellaan yleensä materiaaleja, koneaika, esivalmistelu- ja jälkikäsitteilyaikaa ja kiinteitä kustannuksia ideaalisina ja hyvin rakentuneina kustannuksina. Todellisuudessa prosessiin sisältyy myös ennalta arvaamattomista ongelmista johtuvia viivytyksiä, kuten tulostusten odottamaton keskeytyminen, materiaalin odottaminen, tulostiedostoissa olevien virheiden korjaaminen jne. Nämä voivat todellisuudessa muodostaa merkittävän osan kustannuksista.

Käytännössä kaikissa metallin AM-valmistusmenetelmissä materiaallilla on merkittävä vaikutus lopputuotteen hintaan. Vaikka materiaalia yleisesti ottaen käytetään vähemmän AM-valmistetuissa kappaleissa (yksi yleisimmistä hyödyistä ja tavoitteista on kappaleiden keventäminen), jauhemaiset materiaalit ovat toistaiseksi selvästi perinteisiä raaka-aineita kalliimpia. Materiaalikustannuksia laskiessa on otettava materiaalin määrän lisäksi huomioon myös jälkikäsitteilyssä poistettava määrä (mm. tulostusalue ja tukirakenteet). Jotkin yleisesti käytettävät materiaalit, esim. titaani, ovat paitsi kallista raaka-ainetta myös hankalia työstää.

Ilmailu- ja avaruusteknologian alalla käytetään materiaalina paljon titaania sekä muita erittäin lujia metalliseoksia (esim. Inconel, yms.). Niinpä materiaalin hankintakustannukset ovat merkittäviä ja mitä vähemmän raaka-ainetta hukataan, sen enemmän säästetään rahaa valmistusvaiheessa ja jälkikäsitteilyssä.

Suunnittelun ja valmistusmenetelmien tehokkuutta kappaleen valmistuksessa voidaan arvioida käyttämällä ns. ”buy-to-fly”-suhdelukua, jolla kerrotaan valmiin lopputuotteen paino verrattuna sen valmistuksessa käytetyn raaka-aineen painoon. Perinteisellä tavalla valmistettavissa kappaleissa on suhteellisen yleistä törmätä suuriinkin buy-to-fly suhdelukuihin. Tyypillinen esimerkki on esimerkiksi Lockheed Martin F-22 -hävittäjän 12.2:1 buy-to-fly ratio (koko hävittäjälle), joka tarkoittaa että noin 49894 kg painosta vain 4082 kg jää lopputuotteeseen ja loput (45812 kg) työstetään pois. (Aerospace)

AM-menetelmien avulla valmistettujen kappaleiden osalta puolestaan buy-to-fly arvossa on mahdollista päästä hyvin alas, joissain tapauksissa jopa lähes 1:1, tarkoittaen että tuotteen valmistusprosessissa ei hukata raaka-ainetta juuri ollenkaan.



Kuva 6.2. Lockheed Martin Joint Strike Fighter –hävittäjän BALD-kiinnike. (Case Study)

Esimerkkinä AM-valmistuksen vaikutuksesta buy-to-fly lukemiin on kuvan 6.2 Ti-6Al-4V materiaalista valmistettavasta BALD (Bleed Air Leak Detect) –kiinnikkeestä. Kappale valmistetaan perinteisin menetelmin aihioista koneistamalla ja lopputuotteen buy-to-fly lukema on 33:1. AM-valmistustekniikalla (EBM) valmistettuna kyseisen kiinnikkeen buy-to-fly ratio on 1:1 mahdollistaen yli 50% pudotuksen valmistuskustannuksiin.

Buy-to-Fly ratio vaikuttaa merkittävästi tuotteen materiaalikustannuksiin mutta myös kerrannaisvaikutuksina valmistusprosessin, toimitusketjun ja tuotteen elinkaaren eri vaiheissa. Mikäli tuotteen valmistukseen kuluu vähemmän materiaalia kuin aiemmin, vähentää se usein myös jälkikäsitteilyyn ja viimeistelyyn kuluvaan aikaan ja työkustannusta, nopeuttaen tuotteen läpimenoaikaa. Lisäksi kevyemmästä lopputuotteesta on usein hyötyä myös tuotteen lopullisessa käyttötarkoituksessa.

Lisäksi valmistuskustannuksia arvioidessa tulisi ottaa huomioon myös se, että tulostuslaitteiden käytöllä ja käyttöasteella on huomattava vaikutus kappaleen loppuhintaan. Näin ollen kappaleen tulostussuunnalla ja tulostusalueen maksimaalisella hyödyntämisellä saadaan parannettua kappaleen valmistuskustannuksia.

6.3 Kustannusmallit

Seuraavassa on esitetty kustannusmalli, joka on kehitetty tässä raportissa kuvatussa hankkeessa. Sen avulla voidaan saada alustava näkemys tulostettavan kappaleen kustannuksista.

Materiaalikustannus:

Kappaleen massa joko tiedetään tai saadaan kaavasta

$$m = V \cdot \rho$$

missä

V = tilavuus

ρ = tiheys

Materiaalikustannus saadaan näin kaavasta

$$C_m = C_k \cdot m \cdot (1 + h)$$

missä

C_m = Materiaalikustannus

C_k = Tulostusmateriaalin kilohinta

m = tulostettavan kappaleen massa (sisältäen myös tukirakenteen massan)

h = hukkaprosentti (kertoo kuinka paljon metallijauheesta menee hukkaan).

Koneaikakustannus:

Koneaika riippuu monesta tekijästä. Esimerkiksi kuinka paksuja kerroksia tulostetaan ja kuinka monta kappaletta tulostusalueella on. Alustalle sijoitettavista kappaleista korkeimman tulostus määrää pitkälle koneajan. Yhden kerroksen tekemiseen tarvittava aika vaihtelee suuresti myös käytettävästä menetelmästä ja kerrospaksuudesta riippuen. Käytännössä aika vaihtelee sekunneista aina useimpiin minuutteihin. Tässä kuvattua laskentamallia käytettäessä on valittava parametreihin pohjautuva keskimääräinen aika.

Koneaika saadaan kaavasta:

$$t_m = \frac{h_h \cdot s_t}{t_s}$$

missä

t_m = koneaika

h_h = korkeimman tulostettavan kappaleen korkeus

s_t = tulostuskerroksen paksuus

t_s = ainekerroksen lisäämiseen kuluva aika (pyyhkäisy aika)

Koneaikakustannus on merkittävä kustannus, joka muodostuu tulostimen hankintahinnasta.

Hankintahinta jaetaan yhtä suuriin eriin investoinnin pitoajalle korko ja jäännösarvon nykyhinta huomioiden. Pitoajan jälkeen laitteesta saatava myyntihinta diskontataan nykyhetkeen.

Vuosittainen kustannus saadaan kaavasta:

$$A = C_{n/i} \cdot \left[H - \frac{JA}{(1+i)^n} \right]$$

missä

$C_{n/i}$ = annuiteettitekijä

H = hankintahinta

i = laskentakorkokanta

n = investoinnin pitoaika

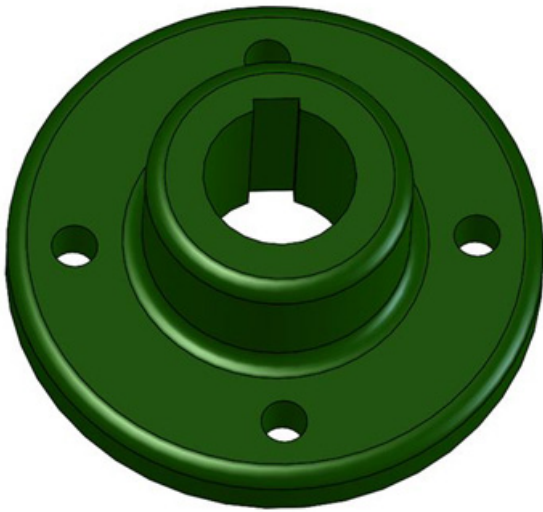
JA = investoinnin jäännösarvo

Annuiteettitekijä saadaan kaavasta:

$$C_{n/i} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Esimerkiksi, jos koneen hankintahinta on 600 000 €, pitoaika 5 v, laskentakorkokanta 8 % ja jäännösarvo 50 000 €, on annuiteettitekijä 0,25 ja vuosittainen konekustannus 141 751 €. Jos edelleen arvioidaan koneen tuotantokäyttöajaksi 8 h vuorokaudessa ja teholliseksi ajaksi 70 %, saadaan tuntikustannukseksi 115 €.

Koneaikakustannus saadaan kertomalla koneaika koneaikakustannuksella. Henkilötyökustannuksia syntyy esimerkiksi tulostuksen suunnittelusta, koneen operoinnista ja viimeistelystä. Merkittävä osa viimeistelytyöstä liittyy tukirakenteiden poistoon. Metallitulosteet on myös irrotettava tulostusalustasta.



Kuva 6.3. Esimerkkikappale.

Oletetaan, että tarkoituksena on tehdä kuvan 6.3. mukainen kappale. Ajatellaan aluksi, että tuloste tehdään ABS-muovista. Materiaalin kilohinta on tällöin n. 40 euroa. Kappaleen massa on 0,32 kg ja korkeus tulostussuunnassa 55 mm. Lisäksi oletetaan, että kerrospaksuus on 0,2 mm ja keskimäärin yhden kerroksen lisäämiseen kuluu aikaa kaksi minuuttia. Koska tämän kappaleen tulostaminen ei vaadi tukirakenteita, voidaan hukkaprosentti pitää pienenä (5 %).

Tulostin on halpa (luokkaa 500 €), jolloin koneajan hinta on lähes merkityksetön. Kuvassa 6.4. on esitetty kuvankaappaus Excel-sovelluksesta, jonka mukaan yksittäisen kappaleen valmistuskustannukset ovat n. 39 euroa. Kappale on tässä tapauksessa sen verran kookas, että yhtä useampaa tulostusalustalle ei mahdu. Ruiskupuristamalla tehtynä kappaleen hinta riippuu luonnollisesti voimakkaasti valmistusmäärästä. Pienillä määrillä AM voittaa, koska muottikustannus on ruiskuvalussa merkittävä kertakustannus. SolidWorks Costing -sovelluksella laskettu vastaava koneistamalla valmistettava yksittäinen kappale maksaisi n. 48 euroa.

Materiaalikustannus/kpl	13,44 €	
Tulostusaika [h]	9,17	Kokonaistulostusaika
Koneaikakustannus/kpl	0,93 €	
Työkustannus	25,00 €	
Kustannukset yhteensä	39,37 €	
Kate [%]	25,00 %	
Hinta	49,21 €	
Syöttöarvot		
Kappaleen massa [kg]	0,32	
Kappaleen tilavuus [mm ³]		
Materiaalin tiheys [kg/cm ³]		
Hukkaprosentti [%]	5,00 %	Sisältäen tukirakenteet
Materiaalin hinta [€/kg]	40	
Kerrospaksuus [µm]	200	
Kappaleen korkeus [mm]	55	
Pyyhkäisy aika [s]	120	
Koneen hankintahinta [€]	500000	
Käyttötunnit elinkaarella [h]	4800	
Tulostettavia kappaleita	1	
Työaika [h]	0,5	
Työaikakustannus [€/h]	50	
Koneaikakustannus [€/h]	0	

Kuva 6.4. Excel-sovellus.

Oletetaan seuraavaksi, että kappale tehdäänkin ruostumattomasta teräksestä ja että materiaali maksaa 100 euroa/kg. Nyt myös koneaika nousee merkittävään asemaan, koska tulostimen hinta on niin paljon suurempi (Oletus tässä 500.000 euroa, pitoaika 5 v ja jäännösarvo 0 euroa). Pyyhkäisy aika on selvästi pienempi, arviolta 30 sekuntia keskimäärin. Kappaleen valmistuskustannukset ovat nyt n. 389 euroa (kuva 6.4). Vastaavasti koneistamalla tehty kappale maksaisi n. 250 euroa.

Materiaalikustannus/kpl	105,84 €	
Tulostusaika [h]	2,29	Kokonaistulostusaika
Koneaikakustannus/kpl	232,94 €	
Työkustannus	50,00 €	
Kustannukset yhteensä	388,78 €	
Kate [%]	25,00 %	
Hinta	485,97 €	
Syöttöarvot		
Kappaleen massa [kg]	2,52	
Kappaleen tilavuus [mm ³]		
Materiaalin tiheys [kg/cm ³]		
Hukkaprosentti [%]	5,00 %	Sisältäen tukirakenteet
Materiaalin hinta [€/kg]	40	
Kerrosaksuus [µm]	200	
Kappaleen korkeus [mm]	55	
Pyyhkäisy aika [s]	30	
Koneen hankintahinta [€]	500000	
Käyttötunnit elinkaarella [h]	4800	
Tulostettavia kappaleita	1	
Työaika [h]	1	
Työaikakustannus [€/h]	50	
Koneaikakustannus [€/h]	102	

Kuva 6.5. Ruostumattomasta teräksestä valmistettavan kappaleen kustannukset.

Jotta saataisiin käsitys myös siitä, miten paljon useamman kappaleen samanaikainen tulostaminen vaikuttaa, kuvitellaan, että niitä mahtuisi alustalle kerrallaan neljä. Tällöin yhden kerroksen lisäämiseen arvioitaisiin kuluvan metallitulostuksessa 60 sekuntia ja viimeistelytöihin 1,5 h, jolloin yhden kappaleen valmistuskustannukset olisivat 218 euroa (kuva 6.6).

iMaterialise-palvelusta tilattaessa ko. kappaleet maksaisivat ABS-materiaalista 399 € ja ruostumattomasta teräksestä 1368 €. Korkeampaan hintaan vaikuttaa se, että edellä kappaleiden tulostus on laskettu hyvin karkealla kerrosaksuudella.

Laskentamallin antamia tulostusaikoja voidaan myös verrata todellisiin lähteessä toteutettujen tulostustestien perusteella. Siinä on tulostettu ruostumattomasta teräksestä eri menetelmillä samaa testikappaletta, jonka tilavuus on 29490 mm³, korkeus 24 mm ja kerrosaksuus 0,05, 0,03 ja 0,02 mm. Vastaavat tulostusajat olivat 354, 677 ja 545 minuuttia, mistä näkyy myös menetelmän vaikutus. Laskentamallin antamat tulostusajat ovat vastaavassa järjestyksessä 240, 400 ja 600 minuuttia.

Materiaalikustannus/kpl	26,46 €	
Tulostusaika [h]	4,58	Kokonaistulostusaika
Koneaikakustannus/kpl	116,47 €	
Työkustannus	75,00 €	
Kustannukset yhteensä	217,93 €	
Kate [%]	25,00 %	
Hinta	272,41 €	
Syöttöarvot		
Kappaleen massa [kg]	2,52	
Kappaleen tilavuus [mm ³]		
Materiaalin tiheys [kg/cm ³]		
Hukkaprocentti [%]	5,00 %	Sisältäen tukirakenteet
Materiaalin hinta [€/kg]	40	
Kerrospaksuus [µm]	200	
Kappaleen korkeus [mm]	55	
Pyyhkäisy aika [s]	60	
Koneen hankintahinta [€]	500000	
Käyttötunnit elinkaarella [h]	4800	
Tulostettavia kappaleita	4	
Työaika [h]	1,5	
Työaikakustannus [€/h]	50	
Koneaikakustannus [€/h]	102	

Kuva 6.6. 4 kappaleen tulostuserä ruostumattomasta teräksestä.

7 KOKEMUKSIA CASE-KAPPALEISTA

Kuten aiemmin on jo todettu, hankkeessa tutkittiin Pohjois-Savon teollisuudesta kerättyjä case-kappaleita. Rajallisten resurssien johdosta näitä voitiin ottaa vastaan vain kolmelta yritykseltä, jotka olivat Hydroline Oy, Ponsse Oyj sekä Samesor Oy. Testikappaleita oli yhteensä neljä ja kaikissa niissä oli tavoitteena massan ja hukkamateriaalin säästö. Lisäksi kahdessa testikappaleessa haettiin myös virtausominaisuuksien parannusta. Varsinaisten testikappaleiden lisäksi toteutettiin myös joukko testisauvoja, joiden avulla tutkittiin materiaalien mekaanisia ominaisuuksia. Näistä on kerrottu tarkemmin tämän raportin luvussa 5.

Kappaleet suunniteltiin uudelleen siten että niiden käytössä hyödynnetään AM-valmistustekniikkaa. Kaikista kappaleista tehtiin useita suunnitteluversioita sitä mukaa kun tulostuksen kannalta havaittiin niissä ongelmia. Tulostusten kanssa tehtiin tiivistä yhteistyötä Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston kanssa.

Alun perin ajatuksena oli toteuttaa kaikki testikappaleet kotimaisten yhteistyökumppaneiden kautta. Tämä ajatus osoittautui ongelmalliseksi, minkä johdosta tilattiin lopulta kaikki kappaleet testisauvoja lukuun ottamatta eurooppalaisilta yhteistyökumppaneilta. Tästä oli lopulta se etu, että samalla saatiin luotua kontaktit uusiin kumppaneihin ja saatiin kokemuksia myös erilaisista metallimateriaaleista.

Hankkeen aikana kartoitetut eurooppalaiset palveluntarjoajat, heidän laitteistonsa tulostusalueet sekä mahdolliset materiaalit on eritelty omassa osiossaan tässä raportissa. Listatuista palveluntarjoajista case-kappaleiden tulostuksessa käytettiin seuraavia: iMaterialise, Citim ja FKM Laser Sintering.

7.1 Samesor –case kappale - muotorulla

Case -kappale on prototyyppi/hahmotelma siitä, mitä rullamuovauskoneen muotorulla voisi mahdollisesti olla. Muotorullia on yhdessä koneessa kymmenistä satoihin kappaleisiin. Yrityksessä on lähdetty miettimään sitä, voisiko AM-valmistustekniikka tuoda uusia mahdollisuuksia rullan rakenteisiin. Prototyypillä tutkitaan mahdollisuutta merkittävään painonsäästö rullan massassa mikä voisi mahdollistaa pienemmän energiankäytön.

Kappaleen halkaisija on n. 160 mm ja korkeus n. 185 mm. Lujuuslaskennan perusteella kappaleessa on periaatteessa mahdollista säästää yli 80 % massasta ilman että muotorullan tekniset ominaisuudet kärsivät. Koneistamalla tehtäessä aihion massa on 33 kg, josta koneistuksen jälkeen lopputuotteeseen jää noin 14,5 kg. ”Buy-to-fly”-suhdeluku (tuotteen valmistamisessa käytetty materiaalmäärä verrattuna lopputuotteeseen jäävään materiaalin) on noin 2.3:1.

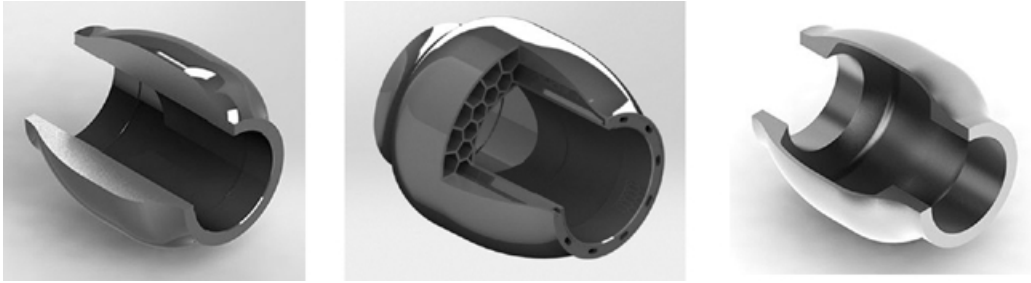
AM-valmistustekniikalla valmistettu, rakenteeltaan ontto muotorulla painaa vain 5,9 kg joten valmistusmenetelmää vaihtamalla on mahdollista päästä merkittävään painonsäästöön. Koko rullamuovauskoneen osalta hyöty voisi olla moninkertainen, koska rullia on koneessa paljon ja tehontarpeen vähentyessä myös moottorien ja tukirakenteiden massoja voitaisiin pienentää.

Nähtäväksi jää, riittääkö AM-tulostetun materiaalin kovuus käyttötarkoitukseen. Muotorullien materiaalina perinteisesti käytetty nitrattu rakenneteräs soveltuu kulutuskestävyydeltään hyvin käyttötarkoitukseen. AM-tulostetun materiaalin kulutuskestävyydestä ei ole vielä käytännön kokemuksia.

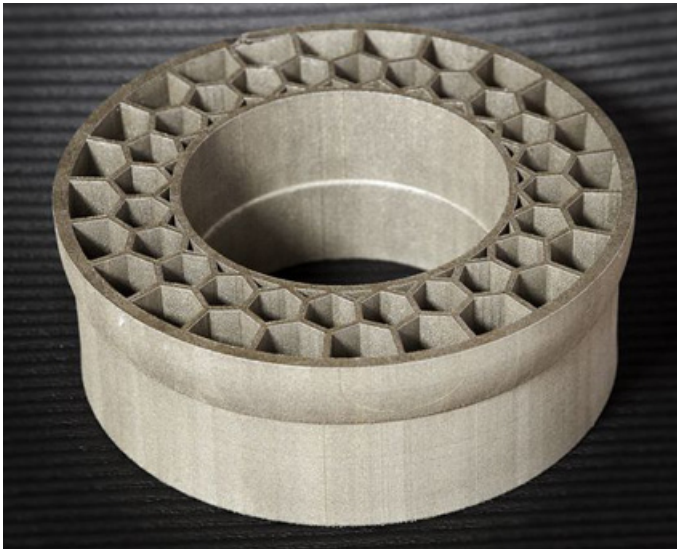
Tulostuksessa tehtiin yhteistyötä Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston kanssa mutta laitteistoteknisistä ongelmista johtuen lopullinen tuloste tilattiin belgialaiselta iMaterialise -yritykseltä. Materiaalina on SS 420 + pronssi.

Tulokset

- Projektin aikana kappaleesta tehtiin useita eri versioita, mm. kappaleen sisäpuolisen rakenteen osalta kokeiltiin kennorakennetta. Lujuuslaskennan kautta päädyttiin lopuksi siihen, että osa ei tarvitse kappaleen sisäpuolista tukirakennetta vaan kuorimainen malli riittää käyttötarkoitukseen!
- Painoeroa AM-menetelmällä valmistetun muotorullan ja perinteisesti valmistetun muotorullan välillä on n. 60%
- Valmistuskustannus ostopalveluna yhdelle kappaleelle on n. 6000€.



Kuva 7.1. Muotorullan suunnittelukuvat: lähtötilanne, tukirakenteena kennorakenne, ilman tukirakennetta.



Kuva 7.2. Epäonnistunut muotorulla. Keskeytynyt tuloste oli kennorakenteeseen pohjautuva. (Kuva: Kari Solehmainen)

Valitettavasti lopullinen case-kappale ei ollut vielä saapunut alihankkijalta tämän raportin julkaisuvaiheessa josta johtuen lopullisen valmiin lopputuotteen kuvaa ei saatu raporttiin mukaan.

7.2 Ponsse-case kappale - putkimutka

Case-kappale on prototyyppi jota ei ole aiemmin valmistettu. Kyseessä on osa hydraulilinjaa, ja prototyypin tavoitteena on mm. virtauksen parantaminen. Kappaleen tekeminen normaaleilla valumenetelmillä voisi olla haastavaa.

Kappaleen koko on n. 160 * 75 * 150 mm. AM-valmistusmenetelmiä hyödyntämällä on mahdollista toteuttaa uusia toiminnallisuksia kappaleeseen. Tästä johtuen kappaleen AM-valmistettavuutta ja niihin liittyviä kustannuksia on syytä tutkia tarkemmin.

Tulostuksessa tehtiin tiivistä yhteistyötä Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston kanssa mutta laitteistoteknisistä ongelmista johtuen lopullinen tuloste tilattiin saksalaiselta FKM Laser Sintering (FKM Sinter-technik GmbH) -yritykseltä. Kappaleen materiaalina on ruostumaton teräs (1.4404).

Tulokset

- Kappaleen ulkopuolista geometriaa suunniteltiin useamman keran uusiksi ja paremman tulostettavaksi. Haastetta tuotti mm. se, että kappaleen täytyy kestää suurta painetta josta johtuen perustäräksen seinämävahvuus täytyy olla suurempi kuin aluksi ennakoitiin.
- AM-tulostettu kappale on noin 21% kevyempi alkuperäiseen kuvaan verrattuna
- Valmistuskustannus ostopalveluna yhdelle kappaleelle on noin 2800 €.



Kuva 7.3. Putkimutkan suunnittelukuvat: lähtötilanne, kevennetty ja lopullinen.



Kuva 7.4. Testikappale 25% mittakaavassa. (Kuva: Tuomas Purtonen / LUT)

Valitettavasti lopullinen case-kappale ei ollut vielä saapunut alihankkijalta tämän raportin julkaisuvaiheessa, josta johtuen lopullisen valmiin lopputuotteen kuvaa ei saatu raporttiin mukaan.

7.3 Hydroline –case kappaleet: pääty ja varsi

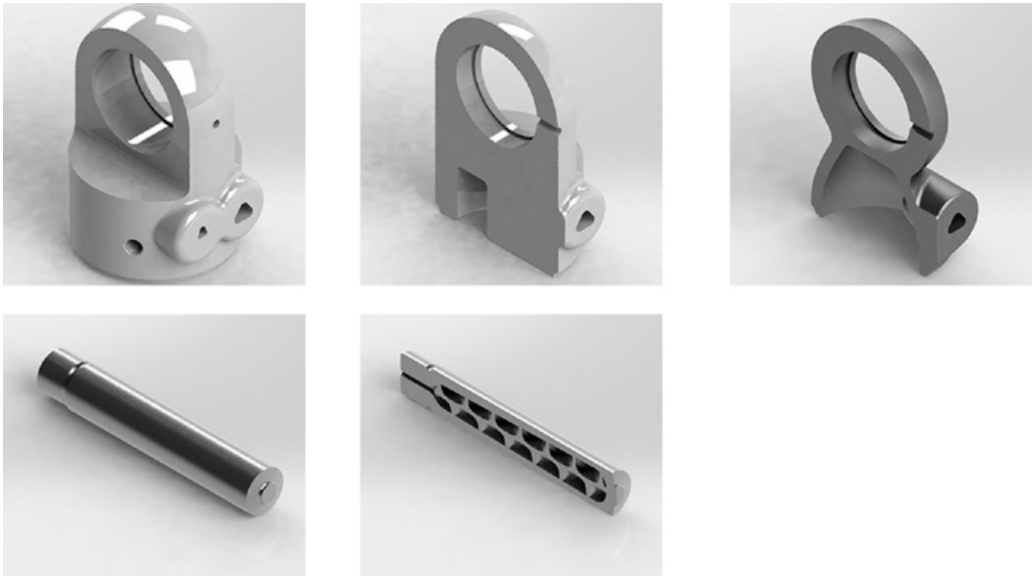
Hydroline toimitti projektin tarpeita varten kaksi case –kappaletta joista toinen on prototyyppikappale jota ei ole aiemmin valmistettu ja toinen varsimainen kappale jota halutaan saada kevyemmäksi. Tavoitteena oli tutkia osien valmistettavuutta AM-menetelmällä. Uudella valmistusmenetelmällä tavoiteltiin kappaleille painonsäästöä että uusia toiminnallisuuksia. Lisäksi haluttiin kokeilla AM-valmistetun osan materiaaliominaisuuksia, sen soveltuvuutta käytännössä sekä mm. hit-sattavuutta.

Case –kappale pääty on halkaisijaltaan n. 90 mm ja sen korkeus on n. 140 mm. Prototyypin rakenne on monimutkainen josta syystä päätettiin tehdä siitä yksinkertaisempi versio case -kappaleeksi. Näin haluttiin varmistaa se, että kappale on varmasti ylipäättään valmistettavissa AM-menetelmillä ja haluttuihin tavoitteisiin on mahdollista päästä. Case –kappaleen myötä yritys saa varmuuden siitä että prototyypin suunnittelua AM-valmistettavasti kannattaa tutkia jatkossakin. Lopullinen tuloste tilattiin saksalaiselta Citim-yritykseltä. Kappaleen valmistuksessa AM-menetelmillä ei ollut ongelmia ja materiaalina oli ruostumaton teräs (1.4542).

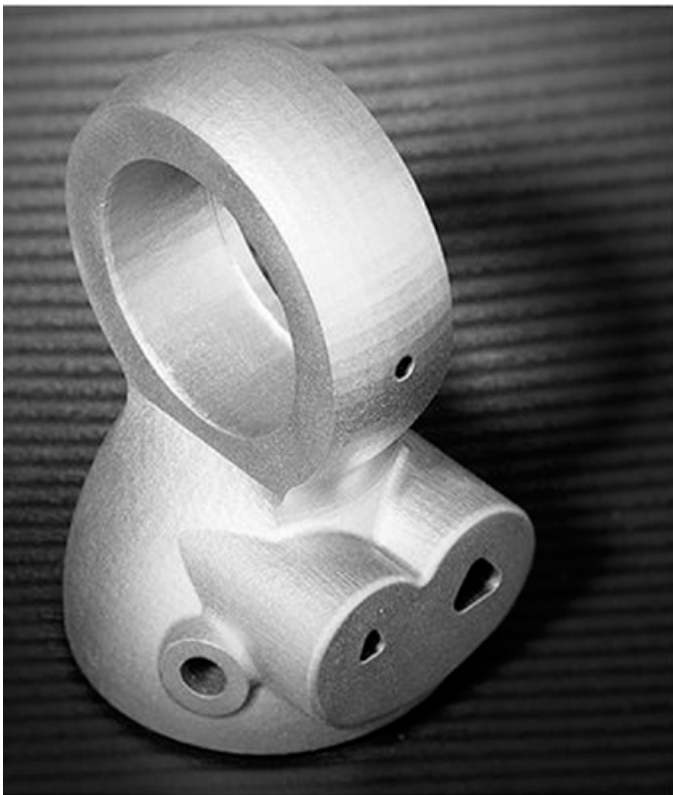
Toinen case –kappale (varsi) on halkaisijaltaan n. 40mm ja sen pituus on n. 240 mm. Lopullinen tuloste tilattiin iMaterialise –yritykseltä. Kappaleen materiaalina on SS420+pronssi.

Tulokset

- Päädyn osalta tuloksena syntyi AM-tulostettu case -kappale jolla voidaan testata haluttuja asioita. Yritys hoitaa case –kappaleen koneistuksen ja toiminnallisuuden testauksen itse. Kappaleen ulkomuotoa suunniteltiin uudelleen useampaan otteeseen pyrkien maksimoimaan AM-valmistettavuuden hyödyt.
- Mitattavissa olevat erot, pääty
 - Painoero: AM-valmistettu kappale on 30 % kevyempi alkupe räiseen verrattuna.
 - Valmistuskustannus yhdelle kappaleelle ostopalveluna: noin 3000 €/kpl
- Varren osalta kevennettiin rakennetta sen verran kuin on mahdollista ilman että kappaleen lujuusominaisuudet heikkenee liikaa.
- Mitattavissa olevat erot, varsi
 - Painoero: AM-valmistettu kappale on 18% kevyempi alkupe räiseen verrattuna.
 - Valmistuskustannus ostopalveluna yhdelle kappaleelle on noin 700 €.



Kuva 7.5. Case -kappaleiden suunnittelukuvia.



Kuva 7.6. Lopullinen, AM-valmistettu pääty. (Kuva: Kari Solehmainen)

7.4 Case-kappaleiden kilpailutus ja hankinta

Hankkeessa tutkittavien case -kappaleiden valmistus toteutettiin ostopalveluna. Ensimmäisen vaiheen osille (muotorulla, putkimutka) toteutettiin kilpailutus kotimaisten toimijoiden kesken keväällä 2014. Suomessa oli sillä hetkellä kaksi metallin tulostinta, Lappeenrannan Teknillisellä Yliopistolla sekä Oulu PMC Osuuskunnalla. Vastaukset tarjouspyyntöihin saatiin vasta loppusyksystä, jolloin selvisi että Oulun tulostin on poissa toiminnasta.

Kotimaisten toimijoiden lisäksi kartoitettiin tulostintarjoajia Euroopasta niiden www-sivujen perusteella. Tarjouspyyntöjä lähetettiin useille eurooppalaisille toimijoille jotka mainostivat sivuillaan metallin tulostuspalveluja. Vastauksia saatiin kuitenkin vain kahdelta toimijalta. Alustavan kartoituksen perusteella ensimmäisen tulostuserän hintahaarukka oli erittäin suuri, 10.000 - 39.000 euroa.

Valitettavasti eurooppalaisten toimijoiden hintakartoituksen yhteydessä saatiin vain yksi virallinen tarjous kaupalliselta tarjoajalta. Useiden yritysten osalta ei saatu ollenkaan vastausta, ja jotkut yritykset kieltäytyivät tarjoamasta palvelua kun ilmeni että kyseessä on julkinen projekti, jonka lopputulokset ja hintatietoja julkaistaan.

Tämä oli hämmentävän varovaista ottaen huomioon että kieltäytyjien joukossa oli mm. 3T RPD Ltd, joka on yksi englannin tunnetuimmista AM-toimijoista. Luonnollisesti tästä voi vetää johtopäätöksen että yrityksillä oli epäily kappaleiden tulosten laadusta tai siitä että heidän oma hintatasonsa on selvästi markkinahintoja korkeampi.

Ensimmäisen erän osalta case-kappaleiden valmistus ostettiin Lappeenrannan Teknilliseltä Yliopistolta. Tulostuslaitteistossa ilmenneiden teknisten ongelmien vuoksi päätettiin toteuttaa loppuvuodesta 2014 / alkuvuodesta 2015 uusi tarjouspyyntökierros eurooppalaisille palveluntarjoajille. Tällä kertaa lähtökohta oli selvästi parempi, sillä marraskuussa 2014 pidettyjen Euromold –messujen yhteydessä oli kerätty alan toimijoiden yhteystietoja ja keskusteltu heidän myyjiensä kanssa. Uuden tarjouskierroksen tarjoukset olivat selkeästi kilpailukyysisempiä kuin syksyn kartoituksen perusteella saadut tarjoukset.

Euromold-messuilla on ollut jo vuosia maine yhtenä merkittävimmistä 3D-tulostuksen liittyvistä tapahtumista maailmassa ja messuille osallistuminen oli erittäin hyödyllistä alan toimijoiden selvittämisessä. Messuilla näkyi vain muutama syksyn internet –kartoituksessa selvitetty yritys ja niiden hintataso oli selvästi yleistä markkinahintaa korkeampi. Koska suurin osa kysynnästä on vielä toistaiseksi painottunut sairaanhoito- ja ilmailualoilla, oli myös useiden yritysten painopiste näillä aloilla. Tämä näkyy luonnollisesti myös palvelujen hinnoissa.

Euromold -messuilla esillä olevat yritykset olivat hyvin ammattimaisia ja niiden toiminnasta oli selvästi havaittavissa että kyseessä ei ole marginaalinen ilmiö, vaan metallin AM-valmistuksella on runsaasti ammattimaisia palveluntarjoajia euroopassa. Jostain syystä alan yrityksillä ei kuitenkaan ole erityisen hyvä näkyvyys internetissä ja varsinkin saksalaisten yritysten kanssa on lieviä hankaluuksia kommunikoida englanniksi.

Voidaankin vetää suoraan johtopäätös että mikäli suomalainen yritys haluaa vakavissaan tutustua metallin am-valmistukseen, kannattaa suunnata suoraan euroopan palveluntarjoajien pariin esim. Euromold –messujen kautta. Lisäksi yritysten kannattaa jo etukäteen suunnitella tuotteita paremmin AM-valmistusmenetelmiin sopiviksi sekä tiedostaa ne piirteet kappaleista jotka ovat tuotteen kannalta kriittisiä. On hyvin todennäköistä että palveluntarjoaja ehdottaa muutoksia kappaleen geometriaan tulostuksen helpottamiseksi.

Hankkeen aikana suomeen saapui kaksi uutta metallitulostinta, AM Finland Oy:lle lahteen, ja VTT:lle Otaniemeen. AM Finland tarjoaa tulostuspalveluja metallitulostimella, jonka tulostuspinta-ala on 90 x 90 x 80 mm. Näin pieni tulostusalue on teollisuuden tarpeisiin turhan pieni ja AM Finlandin painottaakin tarjontaansa dentaali- ja koruteollisuuden tarpeisiin.

VTT hankki loppuvuodesta 2014 SLM 125 –metallitulostimen, jolla voi tulostaa myös alumiinia ja titaania. Sen tulostusalue on 125 x 125 x 75 mm.

7.5 Eurooppalaisia palveluntarjoajia

Tässä on listattuna hankkeen aikana kartoitetut eurooppalaiset AM-valmistukseen liittyvät toimijat ja niiden metallin AM-valmistuksen laitetietoja. Kaikki palveluntarjoajat eivät ilmoittaneet tulostusalueitaan ja tietojaan laitteistoistaan. Useat palveluntarjoajista tarjoavat myös AM-valmistuksen oheispalveluja kuten kappaleiden jälkikäsittely.

iMaterialise

- <http://i.materialise.com/>
- Materiaalit
 - teräs (SS420+pronssi), Kulta, Hopea, Pronssi

Weihbrech Lasertechnik GmbH

- <http://weihbrecht.de/>

Citim

- <http://www.citim.de/en/>

FKM Laser Sintering

- <http://fkm-lasersintering.de/en/>
- Materiaalit
 - AlSi10Mg, Ruostumaton teräs: 1.4404, 1.4542, Hot working steel 1.2709, Direct Metal 20 (bronze alloy), Inconel 718
- Tulostusalueen koko
 - 250 x 250 x 310 mm
- Keskimääräinen toimitusaika: 4-6 päivää

SpeedPart

- <http://www.speedpart.de/>

Poly-Shape

- www.poly-shape.com/en/
- AM-laitteisto
 - TRUMPF Trumaform 250, EOS M270, EOS M280, Concept Laser M2, Concept Laser M1, Concept Laser XLine 1000R, SLM Solutions SLM280, SLM Solutions SLM500, Arcam Q20
- Tulostusalueen koko (max)
 - 630 x 400 x 500 mm

- Materiaalit
 - Al, AlSi7Mg06, AlSi10Mg, Ti64, Ti40, Inconel 718, Inconel 625, Inconel 617, Nimonic C263, Ruostumaton teräs: 316L, 17-4Ph, Maraging steel, CrCoInconel
- Keskimääräinen toimitusaika: 2-3 viikkoa

8 YHTEENVETO

Metalli on tulostusmateriaalina merkittävästi haastavampi kuin muovi. Odotettavissa on kuitenkin selvä laitetarjonnan ja kilpailun kasvu – jo nyt markkinoille on tulossa useita halvempia laitteistoja metalliteknikkaan liittyen. Markkinoilla jo olevilla valmistajilla on kuitenkin vahva jalansija varsinkin ilmailu- ja terveydenhuoltoaloilla koska laitteistojen ja valmistusmenetelmien hyväksyminen vaativiin käyttötarcoituksiin vie runsaasti aikaa.

Valmistusmenetelmien ja laitteiden kehitys on ollut nopeaa myös metallien am-puolella. Vuonna 2013 voimaan tullut standardi AM-menetelmien terminologiasta helpottanee yleisen tietoisuuden lisääntymistä AM-valmistuksen mahdollisuuksista myös metallin valmistusmenetelmien osalta ja eri menetelmien eroavaisuuksien ymmärtämistä.

Teknistä kehitystä nopeuttaa jatkossa keskeisten patenttien raukeaminen myös metallin AM-menetelmien puolella. Kun vuonna 2009 raukesi keskeisiä muovitulostuksen FDM-patentteja, tuli kuluttajamarkkinoille lyhyessä ajassa suuri määrä uusia laitteistovalmistajia joiden mukana myös mahdollisten tulostusmateriaalien kirjo kasvoi huomattavasti. Metallin valmistuksen osalta ei kuitenkaan tulla näkemään yhtä nopeaa ja suurta hyppäystä sillä laitteiden fyysinen koko, tekniset ominaisuudet (suojakaasut, laserit, yms.) sekä materiaaliominaisuuksiin liittyvät haasteet käytännössä estävät laitteistojen myynnin ja käyttämisen suoraan kuluttajamarkkinoilla.

Alan asiantuntijoiden keskuudessa vallitsee kuitenkin laaja näkemys siitä, että AM-menetelmien patenttien raukeaminen vauhdittaa laitteistokehitystä merkittävästi myös metallin valmistuksen osalta. Muutaman vuoden sisällä (2014-2016) raukeaa useita keskeisiä metallin valmistukseen liittyviä AM-menetelmien patentteja.

Viime vuosien aikana tulostusnopeudet ovat moninkertaistuneet ensimmäisiin laitteisiin verrattuna ja kehitystä sen osalta on odotettavissa edelleen. Tulostusnopeuden kasvamisen lisäksi markkinoille on tullut useampia laitevalmistajia jotka ovat yhdistäneet CNC-koneiden ja AM-valmistuslaitteiden toiminnallisuudet samaan laitteeseen. Nämä hybridilaitteet tulevat olemaan seuraava suuri askel metallien tulostuksessa. Tällä hetkellä kappaleiden jälkikäsitteilyyn kuluu yleisesti ottaen paljon aikaa varsinkin jauhepetimenetelmään perustuvissa lait-

teissa. Koneistuksen yhdistäminen samaan laitteeseen mahdollistaa sen että kappaleet ovat valmiita ja mittatarkkoja siinä vaiheessa kun ne otetaan koneesta ulos.

Tässä raportissa kuvatun tutkimuksen keskeinen havainto on se, että testikappaleiden osalta metallin AM-tulostuksella ei vielä tällä hetkellä voida saavuttaa kustannuskilpailukykyä. Tätä ei kuitenkaan voida täysin yleistää, koska on mahdollista, että joidenkin kappaleiden osalta erityisesti elinkaarikustannuksia tarkasteltaessa tämä saattaa hyvinkin olla mahdollista. On myös pidettävä mielessä, että kappaleiden kustannuksiin eniten vaikuttava tekijä, eli tulostusaika (ja tulostinlaitteiden hinta) on kehityksen myötä radikaalisti pienenevä lähivuosina.

Tutkimuksessa mukana olleet testikappaleet maksoivat yhteistyökumppaneilta tilattaessa huomattavasti enemmän kuin etukäteen osattiin odottaa. Myös ennalta arvaamattomat ongelmatilanteet tulostuksessa sekä kappaleiden moninkertainen uudelleensuunnittelu tulostuksen onnistumisen varmistamiseksi aiheuttivat viivytyksiä, joiden vuoksi mm. hankkeen aikataulua jouduttiin pidentämään kolmella kuukaudella.

AM-materiaalien osalta alkuolettamuksena oli, että näistä materiaaleista AM-menetelmällä valmistetut kappaleet eivät kestä niin hyvin väsyttävää kuormitusta kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä toteutetut. Testaustulokset kuitenkin osoittivat, että ainetta lisäävällä valmistuksella tuotetut testikappaleet kestivät jopa paremmin väsyttävää kuormitusta kuin perinteisellä valmistusmenetelmällä tuotetut. Tulosta ei kannata kuitenkaan rankasti yleistää, koska tutkimuksessa testikappaleita oli hyvin rajallinen määrä.

Vaikka tilanne metallien osalta näyttää tällä hetkellä ongelmalliselta, on vahva syy epäillä, että se tulee muuttumaan lähivuosina positiivisempaan suuntaan. Sen vuoksi aihepiiriin on syytä suhtautua vakavasti mieluummin aikaisin kuin liian myöhään.

9 LÄHDELUETTELO

3D Design and additive manufacturing/rapid prototyping, <http://www.rapmanusa.com/3d-design-and-additive-manufacturingrapid-prototyping/>.

Additive manufacturing: opportunities and constraints. A summary of a roundtable forum held on 23 May 2013 hosted by the Royal Academy of Engineering.

Aerospace Workshop Planning Session: Summary Report, Oak Ridge National Laboratory, September 2010.

Burns M.: The Freedom to Create, Technology Management, v 1, # 4, 1995, p 157..63

Case Study: Additive Manufacturing of Aerospace Brackets, Advanced Materials & Processes, March 2013

Cotteleer M.: 3D opportunity for production: Additive manufacturing makes its (business) case, Deloitte Review Issue 15, <http://dupress.com/articles/additive-manufacturing-business-case/>

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

Hague R., Mansour S., Saleh N.: Design opportunities with rapid manufacturing, Assembly Automation, Volume 23, Number 4, 2003 pp. 346–356.

Hague R, Campbell I, Dickens P: Implications on design of rapid manufacturing, Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part C: J. Mechanical Engineering Science.

Hoffren M.: Ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettujen metallikappaleiden sisäisten kenno- ja ristikkorakenteiden vaikutus väsymiskestävyyteen, https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/83516/Hoffren_Mikko.pdf?sequence=1.

Kesonen M.: Ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettujen metallisten kappaleiden väsyminen, https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/86615/Kesonen_Matti.pdf?sequence=1.

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

Norsk Titanium (2012), Norsk Titanium Components – Innovative technology for Titanium component production, Titanium Day at Egemoen Aviation & Technology Park, 2012 June 27, Egemoen.

Reeves, P.: Additive Manufacturing – A supply chain wide response to economic uncertainty and environmental sustainability.

Shellabear M., Nyrhilä, O.: “DMLS – Development history and state of the art”, LANE 2004 conference, 21-24.9.2004

Senvol LLC, Rapid Conference 2014, Determining Cost-Effectiveness of Additive Manufacturing

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

Thomas D., “The Development of Design Rules for Selective Laser Melting”, Ph.D. Thesis, University of Wales Institute, Cardiff, 2009

Using AM for gas turbine repair, Metal Powder Report, Volume 69, Issue 6, 11-12/2014, pages 36-37

Williams C., Seepersad C. C.: Design for additive manufacturing curriculum: A Problem- and Project-based Approach.

Wohlers Report 2014, 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Associates, 2014

DEADMAN-TUTKIMUSHANKKEEN LOPPURAPORTTI

KOKEMUKSIA METALLIKAPPALEIDEN AINETTA LISÄÄVÄSTÄ VALMISTUKSESTA

Ainetta lisäävällä valmistusteknologialla (AM, 3D-tulostus) teollisesti tuotettavien komponenttien suunnittelulla on merkittävä rooli materiaalikäytön optimoinnissa ja osien muotoilun ja käytettävyyden parantamisessa. Tässä raportissa kuvatussa tutkimushankkeessa selvitettiin ainetta lisäävän valmistuksen teknologialla tuotettavien metallimateriaalisten komponenttien suunnittelussa käytettäviä periaatteita, menetelmiä ja työkaluja. Lisäksi hankkeessa tutkittiin ainetta lisäävällä menetelmällä valmistettujen materiaalien mekaanisia ominaisuuksia.

Tutkimus fokusoitui paikallisen teollisuuden käyttämiin tyypillisiin kappaleisiin, joiden voitiin ajatella soveltuvan ainetta lisäävään valmistukseen. Hankkeeseen osallistui kolme metalliteollisuusyritystä, joiden todellisista kappaleista muodostui hankkeen testikappalevalikoima. Nämä kappaleet suunniteltiin uudelleen ja tilattiin tulostettuina yhteistyökumppaneilta.

