

AM-prosessin integrointi tuotantoon – metalliosien valmistuksen työvaiheet

Kirjoittajat: Antti Vaajoki, Sini Metsä-Kortelainen

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi AM-prosessin integrointi tuotantoon – metalliosien valmistuksen työvaiheet	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Tekes PL 69 00101 Helsinki	Asiakkaan viite Tekes 40160/14; Dno 1852/31/2014
Projektin nimi AM-teknologiasta uutta liiketoimintaa	Projektin numero/lyhytnimi 101201/AM-liito
Raportin laatija(t) Antti Vaajoki, Sini Metsä-Kortelainen	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 30
Avainsanat Jälkikäsittely, lisäävä valmistus, SLM	Raportin numero VTT-R-03327-16
Tiivistelmä <p>Metallien AM-prosessin (jauhepetimenetelmä) tuotannolliseen käyttöönottoon ja tuotantoon integroimiseen liittyy paljon erilaisia työvaiheita. AM-laitehankintaa suunniteltaessa onkin olennaista ottaa huomioon kaikki ne työvaiheet, jotka tarvitaan haluttujen osien valmistamisessa. Lähes aina tarvitaan tiettyjä työvaiheita jauhepetivalmistuksessa kuten tukien poisto, mutta toisaalta osa työvaiheista määräytyy sen mukaan, millaisia vaatimuksia lopputuotteille on asetettu mm. pinnanlaadun ja mittatarkkuuden suhteen. Tässä raportissa kuvataan jauhepetimenetelmällä tapahtuvan metallien lisäävään valmistukseen liittyvät työvaiheet.</p> <p>AM-prosessin työvaiheet voidaan jakaa ennen varsinaista valmistusprosessia tapahtuviin ohjelmointiin ja suunnitteluun liittyviin tehtäviin, itse AM-valmistukseen sekä valmistuksen jälkeisiin toimenpiteisiin. Varsinaiseen valmistusvaiheeseen liittyvät olennaisesti materiaalien kuten jauheiden hallinta sekä itse prosessiin liittyvät tekijät. Varsinkin metalliosien AM-valmistukseen liittyy suuri joukko erilaisia jälkikäsittelyprosesseja, joista tarpeelliset valitaan käytettyjen materiaalien ja valmistusprosessin sekä valmistettävien osien vaatimusten mukaan. Laadunvalvonta on myös tärkeä osa AM-valmistusprosessia. Laadunvalvonta jakautuu valmistusmateriaalien, itse valmistusprosessin sekä jälkikäsittelyyn lopputuotteen laadunvalvontaan.</p> <p>Hyvän AM-prosessin suunnittelun ja toteutuksen sekä laadunvalvonnan tavoite on, että lopputuotteet ovat niille kohdistettujen vaatimusten mukaisia, ja että tuotanto on tehokasta ja kannattavaa.</p>	
Luottamuksellisuus	Julkinen
Espoo 20.9.2016	
Laatija  Antti Vaajoki Tutkija	Tarkastaja  Antero Jokinen, Erikoistutkija
	Hyväksyjä  Pasi Puukko, Tutkimustiimin päällikkö
VTT:n yhteystiedot VTT, Antti Vaajoki, PL 1000, 02044 VTT	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) VTT, alkuperäinen Tekes ja projektin yritykset, pdf kopio	
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>	

Alkusanat

Raportti kokoaa yhteen Tekesin, VTT:n ja yritysten rahoittaman ”AM-teknologiasta uutta liiketoimintaa (AM-liiketoiminta)” tutkimushankkeen kolmannen työpaketin keskeisen sisällön. Kolmannessa työpaketissa tutkittiin AM:n tuotannollista käyttöönottoa ja integrointia tuotantoprosessiin.

Raportissa on kuvattu AM-metalliosien valmistukseen olennaisesti liittyvät työvaiheet sekä niiden järjestys (ns. geneerinen malli). Valmistukseen läheisesti liittyvän suunnittelun vaiheet on esitetty erillisessä TP2:n raportissa. Raportin liitteenä ovat lyhyet työvaiheiden kuvaukset sekä kooste kuulapuhalluksen vaikutuksesta metallikappaleen pinnanlaatuun.

Espoo 16.8.2016

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat	2
1. Johdanto.....	4
2. Jauheen hallinta.....	6
2.1 Jauhemateriaalin valinta ja hankinta / valmistus	6
2.2 Jauheen seulonta ja kuivaus.....	6
2.3 Jauhesäiliön täyttö ja kiinnitys AM-koneeseen	6
2.4 Jauheen kierrätys ja hävittäminen.....	7
2.5 Jauheen laadunvalvonta	7
3. AM-kappaleen valmistus.....	7
3.1 Tulostusalustan valmistelu ja kiinnitys.....	7
3.2 Tiedoston siirto koneeseen ja ajon käynnistys	7
3.3 Tulostuksen laadunvalvonta	7
3.4 Kappaleen poisto koneesta.....	8
3.5 Tulostuskammion puhdistus	8
4. Jälkikäsitteilyt.....	9
4.1 Jauheenpoisto	9
4.2 Lämpökäsitteilyt.....	10
4.3 Kappaleen irrotus alustasta ja tukien poisto	11
4.4 Koneistus.....	11
4.5 Rae- & kuulapuhallus.....	12
4.6 Abrasiivisen virtauksen menetelmä (<i>Abrasive flow method, AFM</i>)	13
4.7 Magneettiabraasio (Magnetic Abrasive Finishing, MAF)	14
4.8 Massaviimeistely (<i>mass finishing</i>).....	14
4.9 Käsinhionta.....	15
4.10 Kiillotus manuaalisesti	16
4.11 Jälkilaserointi	16
4.12 Mikrotööstöprosessi, <i>micro-machining process</i> MMP.....	17
4.13 Terminen purseenpoisto, <i>Thermal Energy Method</i> TEM.....	17
4.14 Kemiallinen ja sähkökemiallinen kiillotus.....	18
4.15 Hybridilaitteet.....	19
4.16 Robotisointi.....	20
4.17 HIP-käsitteily (isostaattinen kuumapuristus)	21
4.18 Peittäus	21
4.19 Infiltointi	21
4.20 Plasmakäsitteily.....	22
4.21 Pinnoitus / maalaus	22
5. Lopputuotteen laadunvalvonta	22
6. Yhteenveto	24
Lähdeviitteet.....	24
Liitteet	30

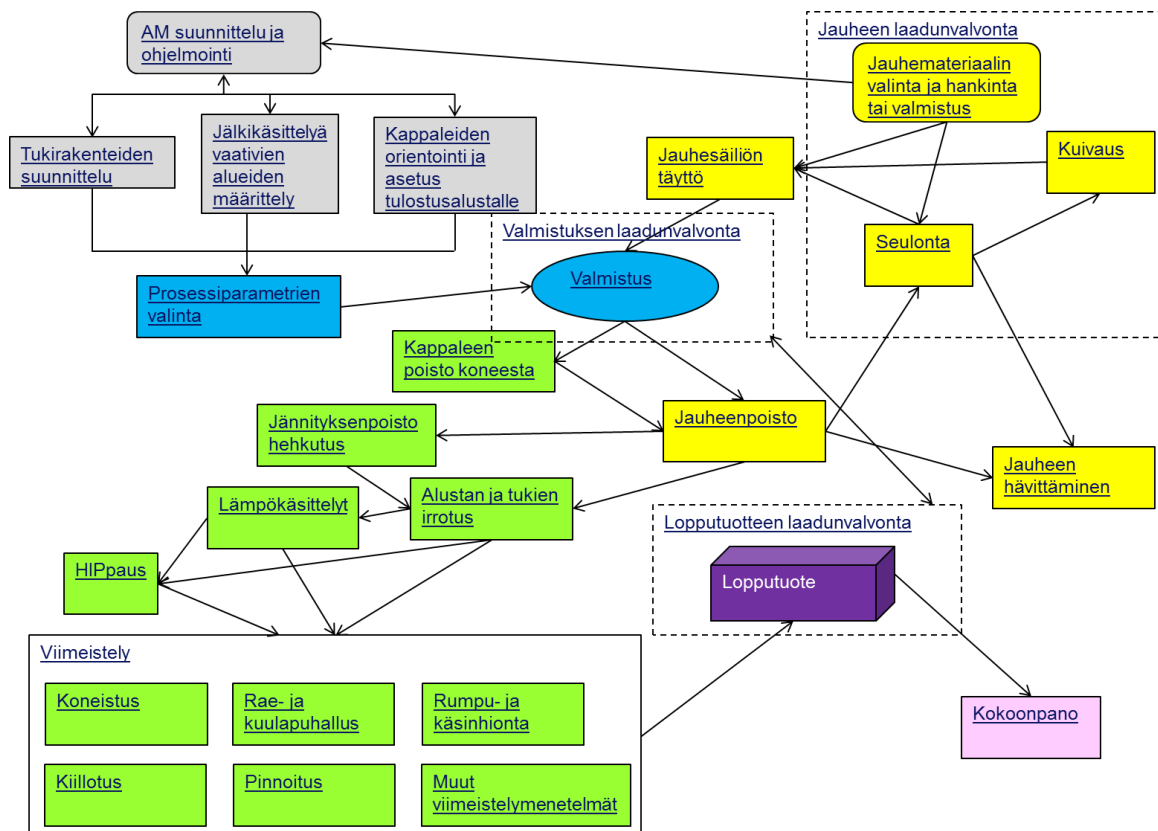
1. Johdanto

AM (Additive manufacturing) -prosessi käsittää ennen varsinaista valmistusprosessia olevat ohjelmointiin ja suunnitteluun liittyvät tehtävät, itse valmistuksen ja valmistuksen jälkeiset tehtävät. Varsinaiseen valmistusvaiheeseen liittyvät olennaisesti materiaalien kuten jauheiden hallinta sekä itse prosessiin liittyvät tekijät. Varsinkin metalliosien AM-valmistukseen liittyy myös suuri joukko erilaisia jälkikäsittelyprosesseja, joista tarpeelliset valitaan käytettyjen materiaalien ja valmistusprosessin sekä valmistettävien osien vaatimusten mukaan. Laadunvalvonta on myös tärkeä osa AM-valmistusprosessia. Laadunvalvonta jakautuu valmistusmateriaalien, itse valmistusprosessin sekä jälkikäsittelyyn lopputuotteen laadunvalvontaan. Tässä raportissa kuvataan metallien lisäävää valmistusta jauhepetimenetelmällä ellei erikseen ole mainintaa muusta valmistusprosessista.

Metallien AM-prosessiin jauhepetimenetelmällä liittyvät työvaiheet sekä niiden viitteellinen järjestys on esitetty alla (kuva 1 ja kuva 2). Tässä raportissa on kuvattu tarkemmin jokainen itse prosessiin ja jälkikäsittelyyn liittyvä työvaihe. Osa työvaiheista on automatisoitavissa, mistä kerrotaan tarkemmin työvaihekuvausten yhteydessä. AM-kappaleen suunnittelusta kerrotaan tarkemmin AM-liito työpaketti 2:n raportissa [1].



Kuva 1. AM-prosessin työvaiheet (metallien AM-valmistus jauhepetimenetelmällä).



Kuva 2. AM-prosessin työvaiheet ja niiden järjestys (metallien AM-valmistus jauhepetimenetelmällä).

2. Jauheen hallinta

2.1 Jauhemateriaalin valinta ja hankinta / valmistus

AM-valmistukseen tarvittava prosessia varten räätälöity jauhemateriaali hankitaan useimpien AM-koneita valmistavien yritysten kautta. Laitetoimittajat ovat testanneet jauhemateriaaleja ja toimittavat jauheiden mukana myös suuntaa-antavat prosessiparametrit. Sopivia jauheita voidaan hankkia myös muilta jauhetoimittajilta tai valmistaa itse. Tarvittava jauhe valitaan AM-prosessilla valmistettavan kappaleen loppukäyttökohteen vaatimusten mukaan. Tyypillisesti materiaalivalinnassa joudutaan tekemään kompromisseja, sillä AM-prosessiin soveltuva materiaalivalikoima on vielä huomattavasti suppeampi kuin mitä perinteisille valmistusprosesseille (valut, taonta) löytyy.

Kaasu-atomisointi on yleisin tapa valmistaa metallijauheita jauhepetimenetelmää varten. Atomisointi-prosessi tuottaa muodoltaan pyöreitä jauhepartikkeleita, jotka soveltuvat hyvän juoksevuutensa ansiosta parhaiten jauhepetimenetelmässä käytettäviksi [2]. Atomisointiparametreilla voidaan vaikuttaa myös partikkelien kokoon, joka tyypillisesti jauhepetimenetelmässä vaihtelee 10–50 µm välillä.

Yleisesti ottaen kaikki metallimateriaalit, joita voidaan hitsata, ovat hyviä kandidaatteja jauhepetimenetelmällä valmistettaviksi [3]. AM-valmistukseen tarkoitettujen jauhemateriaalien määrä kasvaa vuosi vuodelta. Tällä hetkellä kaupallisesti saatavilla on mm. erilaisia teräksiä, työkaluteräksiä, titaania, titaaniseoksia, alumiinia, alumiiniseoksia, nikkeliseoksia, kobolttikromiseoksia, kupariseoksia sekä jalometalleja [4].

2.2 Jauheen seulonta ja kuivaus

AM-prosessiin käytettävän jauheen pitää olla laadukasta ja riittävän kuivaa. Tuotantoon tarkoitetuissa AM-laitteissa jauhe kiertää laitteen sisällä varsin suljetussa systeemissä, jossa seulonta tapahtuu automaattisesti eikä jauhe pääse juurikaan altistumaan kosteudelle.

Manuaalisissa koneissa AM-prosessissa ylimenosäiliöön kertynyt jauhe seulotaan ennen uudelleenkäyttöä erillisessä seulassa prosessissa syntyneiden agglomeraattien poistamiseksi. Optimaalisin on seula, jossa jauhe saadaan seulottua ja lisättyä jauhesäiliöön suojakaasussa ilman altistusta ympäristölle. On kuitenkin mahdollista, varsinkin manuaalisia seuloja käytettäessä, että jauhe pääsee kostumaan seulonnan aikana, jolloin jauheen kosteutta tulee mitata ja jauhetta kuivata seulonnan jälkeen jauhemateriaalista riippuen joko tavallisessa tai vakuumi-uunissa. Jauheen kosteuden tulisi mieluiten olla alle 10 %, jotta jauhe juoksee ja levittyy hyvin tulostusalustalle.

2.3 Jauhesäiliön täyttö ja kiinnitys AM-koneeseen

Uusi jauhe tai seulonnan ja kuivauksen kautta kierrätetty jauhe siirretään jauheensyöttösäiliöön, joka kiinnitetään AM-koneeseen ennen ajon käynnistämistä. Automaattikoneissa kierrätetty jauhe siirtyy automaattisesti seulan kautta jauheensyöttösäiliöön, johon lisätään myös uutta jauhetta kulutuksen mukaan.

Jauhemateriaalin vaihtaminen AM-koneeseen on suhteellisen iso ja työläs operaatio, sillä kaikki jauheen kanssa tekemisissä olleet koneen osat pitää puhdistaa huolellisesti. Aikaa materiaalinvaihtoon kuluu tyypillisesti muutamasta tunnista pariin päivään konetyypistä riippuen. Onkin tärkeää suunnitella AM-tuotantoprosessi niin, että materiaalinvaihtoja tehdään mahdollisimman harvoin. Joissakin tapauksessa materiaalinvaihto on niin iso operaatio, ettei se kannata ollenkaan. Isoissa AM-tuotantolaitoksissa onkin usein käytössä ns. yhden materiaalin koneita, jolloin materiaalia ei tarvitse vaihtaa ollenkaan, ja koneeseen lisätään vain uutta jauhetta sitä mukaa, kuin prosessissa sitä kuluu.

2.4 Jauheen kierrätys ja hävittäminen

Jauhe kiertää sekä automaattisissa että manuaalisissa AM-koneissa erittäin tehokkaasti, ja hävitettäväksi joutuu oikeastaan vain seulaan kertynyt jauhefraktio sekä kappaleen poiston yhteydessä imuriin kertynyt kierrätettäväksi kelpaamaton (palanut jne.) jauhe. Hävitettäväksi tarkoitettu jauhefraktio toimitetaan ongelmajätelaitokselle.

Imuriin kertyneen jauheen säilytyksessä pitää olla huolellinen, sillä mm. alumiini muodostaa veden kanssa vetyä, mistä voi seurata vaaratilanteita. Myös erilaisten jauheiden keskinäiset reaktiot hävitettävän jauhefraktion varastoinnissa tulee huomioida.

2.5 Jauheen laadunvalvonta

On tärkeää valvoa AM-prosessissa käytettävän jauheen laatua, sillä huonolaatuinen jauhe johtaa todennäköisesti epäonnistuneeseen valmistusprosessiin. Alkuaineanalyysillä voidaan varmistaa, että jauheen kemiallinen koostumus on juuri sellainen kuin pitää. Jauheen kemiallisella koostumuksella on vaikutusta mm. sulamislämpötilaan, mekaanisiin ominaisuuksiin, hitsattavuuteen ja lämmönjohtavuuteen [2].

Jauheen partikkelikokojakaumaa voidaan mitata mm. optisilla menetelmillä. Vertailua eri jauhe-erien kesken kannattaa myös tehdä. Jauheen partikkelikokojakauma vaikuttaa AM-prosessissa mm. jauheen juoksevuuteen, jauhepedin tiheyteen, jauheen sulattamiseen vaadittavan energian määrään sekä tulostetun kappaleen pinnankarheuteen [2].

Muita jauheen laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat jauheen mahdollinen hapettuminen, jauheen ikä, prosessissa kiertäneen jauheen osuus sekä jauheen juoksevuus, johon vaikuttavat mm. kosteus, partikkelien muoto sekä kokojakauma.

3. AM-kappaleen valmistus

3.1 Tulostusalustan valmistelu ja kiinnitys

AM-laitteeseen kiinnitetään ennen valmistusta tulostusalusta, jonka päälle kappale tulostetaan. Jauhepetimenetelmässä tulostusalusta tulee kiinnittää siten, että alustan yläpinta on mahdollisimman samassa kulmassa suhteessa jauheenlevittimeen, jotta jauhekerroksen paksuus on tasainen koko alustalla. Jos tulostusalustaa on käytetty aiemmin, pitää edellisestä ajosta alustaan mahdollisesti jäänyt sintrautunut jauhe koneistaa pois. Ennen kiinnitystä alusta on hyvä puhdistaa esimerkiksi pyyhkimällä isopropanoliin kastetulla liinalla. Alustan kiinnityksen jälkeen tehdään laitekohtaiset ajovalmistelut, joihin kuuluvat tyypillisesti mm. tulostusalustan korkeuden säätö oikealle tasolle ja ensimmäisen jauhekerroksen levitys.

3.2 Tiedoston siirto koneeseen ja ajon käynnistys

Tulostustiedosto voidaan siirtää suunnittelun jälkeen tulostuslaitteeseen esimerkiksi muistitikun avulla. Tiedoston lataamisen jälkeen on hyvä vielä tarkistaa, että ladattu malli näyttää olevan kunnossa kerroksittain, eikä esimerkiksi kappaleita ole asetettu ajotiedostossa toisensa päälle. Tämän jälkeen käynnistetään ajo tulostuslaitteesta.

3.3 Tulostuksen laadunvalvonta

AM-laitteilla on vielä haasteita toiminnassa ja luotettavuudessa, mikä heikentää lopputuotteiden laatua. Kappaleen metallurgiset ja mekaaniset ominaisuudet määräytyvät valmistuksen aikaisesta metallisulan homogeenisuudesta riippuen. Useat AM-valmistetun kappaleen pinnan virheistä aiheutuvat sulan (*melt pool*) dynamiikasta. Metallijauheen vääränlainen sulami-

nen aiheuttaa virheitä sulaan ja johtaa huokosiin ja halkeamiin. Laadunvalvonnan kannalta tärkeitä piirteitä on kerrosten välinen homogeenisuus, osan geometria, lopullisen kappaleen jännityksien kestävyys ja eheys. Kaikkien näiden hallitseminen on monimutkainen haaste. Toistaiseksi AM-prosessia on hallittu usein yrityksen ja erehdyksen kautta sekä kokeellisin menetelmin, mutta toiveissa on ollut kehittää laitteisto jauheen vaiheittaisen sulamisen monitoroimiseen. Kokeellisista menetelmistä voidaan mainita varsinaisen AM-kappaleen valmistamisen yhteydessä valmistetut vetosauvat ja testinapit, joista voidaan mitata ajokohtaisesti erilaisia lujuusarvoja sekä analysoida mikrorakennetta ja tiiveyttä. [5,6]

Kun laadunvalvontamenetelmää käytetään prosessin aikana (*IPQA in-process quality assurance*), vältytään prosessin jälkeiseltä tarkistukselta (*PPQA, post-process quality assurance*), mikä nopeuttaa tuotantoa. Valmistuksen jälkeiseen tarkistukseen liittyy myös haasteita, joten valmistuksen aikaisen laadunvalvonnan merkitys korostuu. Sulan lämpötilan ja profiilin infra-punamittausta kehitetään ja saatavilla on jo suurnopeuskameroita valmistuksen monitorointiin. Automaattisia viantunnistusalgoritmeja pitää kuitenkin kehittää vielä. Monitorointiteknikan liittäminen valmistuslaitteiston yhteyteen voi vaatia myös laitteen modifiointia. [5,7,8]

Yksinkertaisemmista prosessin aikana käytettävistä monitorointisysteemeistä esimerkkinä on kuvioidun valon (*structured light*) käyttö. Tällainen menetelmä on käytössä mm. NASA:lla ja sen avulla voidaan varmistaa jo prosessin aikana, että AM-kappaleen dimensiot ovat oikeat. Monimutkaisemmista systeemeistä esimerkkinä on mm. Sigma Labs:n kehittämä PrintRite3D-paketti. Paketissa on mukana mm. SENSORPAK-laitteisto, joka koostuu akustisista, optisista ja termisistä prosessidatankeruulaitteista. Lisäksi mukana on mm. tilastollinen analyysityökalu INSPECT, jonka avulla 3D-laitteiston toistettavuutta tarkastellaan. INSPECTiin on verrattu samoilla prosessiparametreilla aloitettujen tulostusten prosessinaikaisia eroja ja tallennettu olosuhteet jotka tuottavat laadukkaita osia. Tämän avulla voidaan ohjata esim. lasersäde käynnistymään vasta kun ennalta määrätyt vaatimukset täyttyvät. Muitakin menetelmiä prosessinaikaiseen laaduntarkkailuun on kehitteillä mm. EOSTATE MeltPool Monitoring ja Concept Laser QMmeltpool 3D. [5,7,9–11]

3.4 Kappaleen poisto koneesta

Kun ajo on valmistunut, aloitetaan kappaleen poisto. Käsin tyhjennettävissä laitteistoissa ensimmäisenä vaiheena on ylimääräisen jauheen kaavinta ja harjaus ylimenosäiliöihin, jolloin mahdollisimman paljon jauhetta saadaan uudelleen käyttöön. Tätä ennen voi olla hyvä poistaa kammioista selkeästi palanutta jauhetta esimerkiksi jauheimurin avulla. Jos tulostuskammiossa pystyy operoimaan esimerkiksi laitteiston suojahansikkaan avulla, kannattaa kammio pitää avoinna mahdollisimman vähän aikaa, vain työkalujen kammioon lisäämisen ajan, jotta jauhe säilyy mahdollisimman kuivana.

Kun ylimääräinen jauhe on saatu poistettua tulostetun kappaleen ympäriltä, poistetaan tulostusalusta laitteistosta ja kappale puhdistetaan vielä irtonaisesta jauheesta imuroimalla ja esim. paineilman avulla. Erityisesti tukirakenteisiin saattaa jäädä paljonkin irtonaista jauhetta, joka ei lähde kovin helposti pois vain imuroimalla.

3.5 Tulostuskammion puhdistus

Tulostusalustan poiston jälkeen myös tulostuskammio puhdistetaan jauheesta. Uudelleen käytettävissä oleva jauhe kaavitaan ylimenosäiliöihin ja loput imuroidaan pois. Tiivistepinnat on hyvä pyyhkiä (isopropanoli) ja puhdistaa laserin suojalasi. Näin kammio on valmiina seuraavan tulostusajon valmisteluja varten.

Automatisoiduissa laitteissa on mahdollista, että koko tulostuskammio on vaihdettavissa puhdistukseen, kappaleen poistoon ja jälkikäsitteilyjä varten. Tällöin itse AM-laite saadaan nopeammin uudestaan käyttöön, kun tilalle sijoitetaan toinen valmisteltu kammio tulostusta varten.

4. Jälkikäsitteilyt

Ainetta lisäävässä valmistuksessa kappaleiden jälkikäsitteily on tärkeässä osassa. Suurin osa AM-kappaleista tarvitsee jälkikäsitteilyä, jotta niitä voidaan käyttää kohteissa, joihin ne on suunniteltu. Jälkikäsitteilyn tarpeen määrittävät mm. käytetty AM-tekniikka, käyttökohteiden ja käyttökohteen asettamat mekaaniset ja esteettiset vaatimukset. Tyypillisesti jälkikäsitteily on jäänyt pienemmälle huomiolle AM-prosessiin verrattuna, vaikka se on vähintään yhtä tärkeä prosessivaihe AM-prosessin toiminnallisuuden ja mahdollisuuksien kannalta. [3,4,12,13]

Jälkikäsitteilyä tarvitaan yleensä irrottamaan tukirakenteet tulostetuista osista ja kompensoimaan AM-prosessin aiheuttamia seurauksia tai jotta saavutetaan tiettyjä ominaisuuksia, joita AM-prosessi yksistään ei kykene tuottamaan. AM-kappaleet, jotka on tulostettu metalleista, vaativat tyypillisesti kohtuullisen paljon työtä ennen kuin kappale on valmis käyttökohteeseensa. Työn määrä riippuu käyttökohteesta, käytetystä materiaalista ja menetelmästä. Mahdollinen jälkikäsitteilyiden tarve kannattaa huomioida jo CAD-mallin suunnittelussa mm. suunnitteleamalla kappaleen geometria niin, että jälkikäsitteilytarve on mahdollisimman vähäinen – useiden jälkikäsitteilyvaiheiden käyttö vähentää AM-valmistuksesta saatavia etuja. Suunnitteluvaiheessa tulee ottaa huomioon myös tarvittavat työstövarat ja suunnitella geometria niin, että jälkikäsitteily on mahdollista suorittaa käytettävissä olevilla menetelmillä. [4]

Nykyisillä jälkikäsitteilyillä on mahdollista ratkaista useimmat kappaleiden tekniset vaatimukset. Vaatimukset jälkikäsitteilymenetelmälle riippuvat kuitenkin hyvin paljon käytetystä prosessista ja esimerkiksi optimaalinen pinnan viimeistely voi vaihdella riippuen käytettävästä lasersintrausmateriaalista. Jälkikäsitteilymenetelmän valintaan vaikuttaa myös kunkin menetelmän toimivuus, poistettavan materiaalin määrä, kustannus ja vaadittu kappaleen pinnanlaatu. Jälkikäsitteilymenetelmät, joita käytetään perinteisen valmistustekniikan yhteydessä, eivät välttämättä ole yhtä tehokkaita AM-valmistuksessa. [4,14]

Tulostetun kappaleen pinnankarheuteen vaikuttaa käytetty AM-menetelmä, materiaali, partikkelikoko, kerrospaksuus, kappaleen orientaatio tulostuksen aikana ja tukirakenteiden määrä. Laserkäyttöisissä jauhepetimenetelmissä tulostettujen kappaleiden pinnankarheus on n. Ra 8–20 µm, joka ei useinkaan ole riittävän hyvä esimerkiksi muotteihin. [3]

Jälkikäsitteilyä on myös mahdollista käyttää kilpailuetuna, jos AM-valmistuksen palveluntarjoaja haluaa erottua joukosta. Tehokkaan ja tarkan jälkikäsitteilyn ansiosta tuotteesta on mahdollista pyytää korkeampaa hintaa kuin heikomman laadun tuotteesta. [3]

4.1 Jauheenpoisto

AM-kappaleet, jotka valmistetaan jauhemenetelmillä, vaativat jauheenpoistoa valmistuksen jälkeen. Valmistuksen aikana jauheesta on hyötyä ja lopputuotteeseen kuulumaton jauhe tukee kappaletta. Ylimääräinen jauhe toimii luonnollisena tukena. Valmistuksen jälkeen irtonainen jauhe pitää kuitenkin poistaa huolella. Jauheen poistaminen on tärkeää, koska esimerkiksi lämpökäsiteltäessä irtonainen, kappaleeseen kuulumaton jauhe saattaa kiinnittyä kappaleeseen tai jäädä sen sisään tehden kappaleen käyttökelvottomaksi. Irtonainen jauhe saattaa myös olla riski turvallisuudelle (henkilöturvallisuus, palovaara yms.). [3,4]

Tyypillisesti manuaalisissa AM-laitteistoissa kappale poistetaan laitteesta jauheineen kuutiona ja jauheenpoisto tehdään erillisellä työpisteellä tai vaihtoehtoisesti suurin osa jauheesta poistetaan kappaleen ympäriltä jo AM-laitteen valmistuskammiossa, kuten edellä luvussa 3.4 on esitetty.

Jauheenpoistomenetelmä riippuu kappaleiden muodosta ja geometrisistä piirteistä sekä käytettävästä AM-menetelmästä. Monimutkaisissa sisäpuolisissa muodoissa paineilma- tai ulträänipuhdistuslaitteisto voi olla tarpeen. Jauhepeti- ja laserlaitteistoissa käyttämätön jauhe säilyy jauhemuodossa ja sen poistaminen on melko yksinkertaista tapahtuen tyypillisesti harjojen ja muiden yksinkertaisten työkalujen avulla. Myös hienojakoisen jauheen imurointiin

kehitettyt laitteet ovat hyödyllisiä. Sintrautuneen tai kappaleen sisään kiinni jääneen jauheen poistoon voidaan käyttää puun työstöön tai hampaiden puhdistukseen tarkoitettuja työkaluja. EBM-prosessissa käyttämätön jauhe on puolikiinteässä tilassa ja kappaleet pitää erottaa toisistaan kuulapuhaltamalla. Kuulapuhalluksessa käytettävä materiaali on samaa kuin kappaleen valmistusmateriaali. [3,4,12]

Jauheenpoisto helpompaa, kun kappale on sen kokoinen, että sitä voidaan nostaa käsin ja pyöritellä. Poisto saattaa kuitenkin olla huomattavasti haastavampaa, jos kappaleen koko kasvaa merkittävästi. Jauheenpoisto halkaisijaltaan pienistä, alle 2 mm rei'istä, voi olla hankalaa ja kappaleen sisäpuoliset onkalot ja kolot voivat vaatia huomattavan paljon työstöaikaa jauheenpoistossa [3,12]. Jauheenpoistossa pitää kiinnittää huomiota työturvallisuuteen ja suojarusteisiin, koska hienojakoiset jauheet voivat olla erittäin haitallisia terveydelle. Myös hienojakoisen jauheen mahdolliseen paloherkkyyteen pitää kiinnittää huomiota.

Irtoton jauheen poistoon on kehitetty myös automaatiota. Laitteet voivat olla erillisiä tai integroitu AM-laitteen kammioon. On oletettavaa, että tulevaisuudessa yhä useammassa jauhepetimenetelmään perustuvassa laitteistossa on automaattinen jauheenpoisto osan valmistuksen jälkeen. Automaattinen jauheenpoisto voidaan toteuttaa mm. täryn ja imun avulla. Automaattisista jauheenpoistolaitteistoista esimerkkinä on mm. SLM Solutionsin laitteisto, jossa koko valmistuskammio saadaan irti tulostettuine osineen ja jauheineen, ja jauheenpoisto voidaan tehdä erillään valmistuslaitteesta. Tällöin saadaan tulostuslaitteen käyttöaikaa hyödynnettyä tehokkaammin. [3,15,16]

4.2 Lämpökäsittelyt

Kun AM-kappaleet on puhdistettu ja ylimääräinen materiaali poistettu, on usein lämpökäsittelyiden vuoro. Lämpökäsittelyitä käytetään vähentämään kappaleiden jäännösjännityksiä ja tuomaan parempia mekaanisia ominaisuuksia muodostamalla kappaleeseen haluttu mikrorakenne. Lämpökäsittelyt saatetaan tehdä useassa vaiheessa, jolloin ensin suoritetaan jännityksenpoistohehkus ennen kappaleen irrottamista tulostusalustasta, tämän jälkeen irrotus ja mahdolliset työstöt, joiden jälkeen tehdään jälleen lämpökäsittely.

Lämpökäsittelyprosesseja on lukuisia ja oikean lämpökäsittelyalueen valinta riippuu useasta tekijästä mm. kappaleen materiaalista, koosta, geometrisistä muodoista, vaadittavista mekaanisista ominaisuuksista ja käytetystä AM-menetelmästä. Usein käytössä on perinteiset lämpökäsittelyparametrit kullekin materiaalille. Tapauksiin, joissa halutaan säilyttää hienojakoinen mikrorakenne ja vähentää jännityksiä sekä parantaa sitkeyttä, on kuitenkin kehitetty tiettyjä erityisiä lämpökäsittelymenetelmiä. Lämpökäsittely tulisi suorittaa tyhjiössä tai inertissä ympäristössä pinnan hapettumisen estämiseksi tai vähentämiseksi. [3,4,17]

Eräs tyypillinen lämpökäsittelysykli sisältää kolme vaihetta: jännityksenpoistohehkus vähentämään valmistuksen aikana syntyneitä jäännösjännityksiä, kuumaisostaattinen puristus (HIP) mikrohalkeamien ja huokoisuuden poistoon sekä erkautuskarkaisu lujittamaan, tai tekemään materiaalista kovemman tai homogeenisemmän. Lämpökäsittely muuttaa lähes aina materiaalin mikrorakennetta ja näin ollen lämpökäsittelyn kappaleen mekaaniset ominaisuudet poikkeavat lämpökäsittelemättömän, tulostustilaisen kappaleen ominaisuuksista. Tietyt AM-laittevalmistajat, jotka tarjoavat myös jauheita antavat ohjeistuksia lämpökäsittelyistä. Esimerkiksi EOS:lla on ohjeistus käsittelylämpötiloista ja -ajoista tarjoamilleen jauheille. Lämpökäsittelyn jälkeen kappaleesta pitää useimmiten puhdistaa hapettunut pintakerros esimerkiksi hiekka- tai kuulapuhaltamalla. Lisäksi, tämän jälkeen kappaleen pinta voi tarvita lisäksi peittäuskäsittelyn. [4,17]

4.3 Kappaleen irrotus alustasta ja tukien poisto

Useissa AM-menetelmissä kuten jauhepetimenetelmässä, tulostuksen yhteydessä on tarpeen käyttää tukirakenteita. Ilman tukia tai riittämättömillä tukirakenteilla valmistetut kappaleet saattavat mm. kieroutua termisten jännitysten takia ja olla käyttökelvottomia. Elektronisuihkusulatuksessa (EBM) tarvitaan vähemmän tukia, koska korkeamman valmistusprosessin lämpötilan takia jäännösjännitykset ovat pienempiä. [3,4]

Tuet poistetaan tyypillisesti lämpökäsittelyn jälkeen ja poisto vaatii usein manuaalista työtä. Valmistettaessa kappaleita jauhepeti- (*PBF, powder bed fusion*) tai materiaalin ja lämmön kohdistusmenetelmillä (*DED, direct energy deposition*) metalliset ja keraamiset tuet ovat usein liian vahvoja poistettaviksi käsin. Kappaleet, joissa käytetään metallisia tukia, irrotetaan tyypillisesti käyttäen lankasahausta. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää esim. vannesahaa, kulmahiomakonetta, jyrsinkonetta tai vastaavaa laitetta. Lankasahausta voidaan käyttää tukien irrottamisen lisäksi myös AM-kappaleen pintojen työstämiseen. Esimerkiksi EBM-menetelmällä valmistettujen kappaleiden pinnanlaadusta voidaan lankasahauksella saada parempi kuin tulostustilaisen kappaleen pinnanlaatu. Lankasahaus ei kuitenkaan sovellu hyvin monimutkaisille kappalegeometrioille. [4,12,18]

Rakennettujen tukien (*synthetic supports*) poistoon vaikuttaa kappaleen orientaatio suhteessa kasvatussuuntaan. Esimerkiksi valmistettaessa ohut kappale vaakatasossa voi tukirakenteisiin kuuluva materiaalilavuus olla suurempi kuin itse kappaleeseen. Tuet vaikuttavat myös kappaleen pinnanlaatuun, koska tyypillisesti tukien poiston jälkeen kappaleeseen jää jälkiä tuista. Nämä asiat pitääkin huomioida kappaleen ja kappaleen orientoinnin suunnittelussa. Kappaleen poiston jälkeen myös alusta pitää koneistaa tai tasoittaa muilla menetelmillä ennen seuraavaa ajoa. [3,12]

4.4 Koneistus

Perinteistä koneistusta, kuten sorvausta tai jyrsintää, voidaan käyttää parantamaan tulostetun kappaleen pinnan toiminnallisia ominaisuuksia tai ulkonäköä. Tyypillisesti koneistusta käytetään kuitenkin mittatarkkuus- ja pinnanlaatuvaatimusten täyttämiseen. Esimerkiksi metallisten AM-kappaleiden reiät, pinnan, kierteet ja kierresovitteet ovat esimerkkejä tarkkuutta vaativista kohteista. [4,12]

Perinteinen koneistus soveltuu parhaiten avoimille, tasaisille pinnoille. Kaarevien pintojen kanssa voidaan käyttää tietokoneohjattua koneistusta. Kehittynyt CNC-jyrsintä ei ole välttämätön AM-tulostuksen yhteydessä, mutta siitä on hyötyä, koska tulostetut kappaleet ovat usein monimutkaisia. Myöskään mm. pyöreiden reikien, jotka ovat yleisiä osissa ja työkaluissa, tekeminen ei ole tehokasta eikä reikien pyöreys ole riittävän hyvällä tasolla manuaalisten jyrsintätyökalujen avulla, joten reikien tunnistamiseen ja työstöön on parempi käyttää automatisointia. Tyypillisesti tulostettujen metalliseosten työstössä voidaan käyttää perinteisiä työstötyökaluja sekä ajo- ja syöttönopeuksia. Koneistus saattaa kuitenkin aiheuttaa muokauslujittumista, mikä pitää ottaa huomioon suunnittelussa. [3,4,19]

Erittäin monimutkaisten AM-kappaleiden koneistus, jossa käytetään usein kulmikkaita työkaluja, on haastavaa. Pehmeiden ja taipuisien työkalujen avulla työstömahdollisuuksia saadaan kuitenkin hieman laajennettua. Koneistuksen etuina AM-kappaleen työstössä on mm. mahdollisuus saavuttaa pinnakarheudeltaan peilipintoja sekä kappaleita hyvillä geometrisillä toleransseilla. Monimutkaisten kappaleiden kohdalla on myös mahdollista työstää koneistamalla ainoastaan kappaleen kriittiset pinnat, jotka vaativat parempaa pinnanlaatua, ja jättää muut osat kappaleesta esimerkiksi tulostustilaisiksi. Suunnitteluvaiheessa koneistusvarat kannattaakin lisätä ainoastaan näihin kriittisiin kohtiin ja rajoittaa koneistus vain näihin. Koneistusta käytetään lisäksi ns. hybridilaitteissa, joista on lisää informaatiota jäljempänä. [3,20]

Koneistuskeskusta voidaan hyödyntää AM-valmistettujen kappaleiden kiillotuksessa perinteisen tavan lisäksi käyttämällä kappaleen muotoa mukailevaa työkalua. Tällainen tekniikka

tunnetaan nimellä *shape adaptive grinding*, SAG ja se soveltuu mm. kaareville geometrioille, joita voi olla vaikea hioa perinteisin menetelmin. SAG-menetelmässä akseliseen koneistuskeskukseen on kiinnitetty työkalu, jossa on työstettävää pintaa mukaileva elastinen osa. Elastisen osaan on kiinnitetty hiovaksi aineeksi timanttipartikkeleita jäykkiin hartsipelletteihin upotettuina. Menetelmää on käytetty mm. AM-titaanikappaleiden kiillotukseen ja pinnankarheutta on saatu alennettua huomattavasti lähtien arvosta Ra n. 5 μm aina Ra n. 0.01 μm asti. [21,22]

4.5 Rae- & kuulapuhallus

Eräs menetelmä AM-kappaleen jälkikäsitteilyyn on kappaleen puhaltaminen joko abrasiivisilla rakeilla tai pyöreillä kuulilla. Raepuhallus tai hiekkapuhallus (*shot blasting*) on abrasiivinen prosessi, jossa kappaleen pinnasta poistuu materiaalia. Tätä prosessia käytetään mm. kappaleen pinnan puhdistamiseen. Esimerkiksi jauhepetiteknikalla valmistettujen kappaleiden pinnasta saadaan irrotettua osittain sulanut jauhe. Tähän voidaan käyttää myös kuulapuhallusta (*shot peening*), joka on yleensä enemmän metallisten pintojen kylmämuokkausta. Tällöin abraasion sijaan pintaan törmäävät kuulat kompaktoivat kappaleen pintaa. Tällä prosessilla voidaan parantaa tulostetun kappaleen pinnanlaatua, vähentää jännityskeskittymiä kappaleen pinnan läheisyydessä ja saadaan parannettua kappaleen väsymislujuutta. Rae- tai kuulapuhallusta voidaan käyttää myös lämpökäsittelyssä syntyneen oksidikerroksen poistamiseen kappaleen pinnalta. [12]

Kuulapuhalluksen avulla kappaleen pinnankarheutta on mahdollista vähentää huomattavasti tulostustilaiseen verrattuna. Esimerkiksi pinnankarheudesta Ra n. 14 μm kuulapuhalluksella on päästy pinnankarheusarvoon Ra n. 2,5 μm (83 % pudotus). Puhalluksessa valittavina prosessiparametreina on mm. materiaali, raekoko, partikkelien nopeus ja iskukulma. AM:llä valmistettujen kappaleiden jälkikäsitteilyyn käytetään tyypillisesti micropeeningiä, jossa ammuttava partikkeli on kuulakooltaan pienempää. Prosessointiparametreilla on havaittu olevan suuri merkitys lopputulokselle ja parhaat pinnankarheusarvot saadaan yleensä suurilla puhalluspaineilla. Peilikirkkaan pinnan saavuttamiseksi kuulapuhalluksen lisäksi tarvitaan kuitenkin muitakin menetelmiä. Kuulapuhalluksessa käytetään pääasiassa kuulia (metallinen, lasinen ym.) ja raepuhalluksessa ammus voi olla muodoltaan terävämpi (hiekkä, alumiinioksidi, lasikuula, polymeerikuula, pähkinänkuori ym.). Edellä mainittujen materiaalien lisäksi puhallukseen saatetaan käyttää samaa materiaalia kuin mistä kappale on valmistettu. Tätä käytetään erityisesti EBM-menetelmän yhteydessä, kun kappale puhdistetaan osittain sintrautuneesta jauheesta. Kuulapuhallus, kuten hiekkapuhalluskin, soveltuu parhaiten avoimille tai puolivoimille pinnoille eikä sitä voi käyttää monimutkaisten sisäisten muotojen ja kanavien kanssa. Lisäksi erittäin herkät mm. ohuet tankomaiset muodot voivat olla alttiita rikkoutumiselle kuulapuhalluksen yhteydessä. [3,12,14,23-25]

Kevyellä kuulapuhalluksella teräskuulalla saadaan aikaan mattapinta. Keraamikuulalla puhallettaessa pinta saadaan kiiltävämmäksi (ks. kuva 3). Kuulapuhallus tasoittaa kappaleen pintaa ja poistaa ei-toivottuja teräviä kulmia ja kerrosmaisessa tulostuksessa vinoihin pintoihin syntynyttä porrasmaista rakennetta (*stair stepping*) [3]



Kuva 3. Reunoilla keraamikuulilla puhalletut kappaleet (kirkkaammat) ja keskellä teräskuulilla puhallettu kappale (tummempi).

Kuulapuhalluksella saadaan metallikappaletta muokattua ja synnytettyä puristusjännitystilä, joka on hyödyllinen. Peeningin aiheuttaman jäännösjännityksen voimakkuutta on mahdollista mitata Almen-testiliuskan avulla. Kuulapuhallus ja sen synnyttämä puristusjännitystilä voi kasvattaa kappaleen väsymiseliniäkää 0–1000 % riippuen mm. kappaleen geometriasta ja materiaalista, kuulan materiaalista ja laadusta sekä kuulapuhalluksen intensiteetistä ja peit-toasteesta. Työstökarkenevissa materiaaleissa, kuten titaanissa ja nikkelseoksissa, kuulapuhalluksen aiheuttama kylmätyöstö voi kuitenkin pienentää kappaleen pinnan sitkeyttä niin paljon, että pintaan jää hauras kerros. [12,26,27]

Kuulapuhalluksessa voidaan käyttää useampia prosessiaskeleita työstettäessä lasersintra-tuja kappaleita. Eri vaiheita ovat mm. kompaktointipuhallus (*compaction, peening*) teräskuulalla, puhallus keraamikuulalla (*peening*) ja siloituspuhallus orgaanisella rakeella (*smoothing*). Orgaanisen rakeen puhaltamista voidaan käyttää myös ennen kompaktointia puhdistamaan kappaleen pinta. [14]

Kompaktointia varten kappaleelle pitäisi suunnitteluvaiheessa jättää työstövaraa n. 40–50 μm ja kiillotusta (abradiivinen kuluminen) varten n. 10–30 μm [14]. Kiillotuksen vaatima työstövara kannattaa kuitenkin määrittää käytettäville menetelmille ja laitteistoille erikseen harjoitus-kappaleen avulla. Jos kuulapuhallusta ei ole automatisoitu, puhalluksen tekijällä on suuri rooli puhalluksen lopputuloksen ja yhtenäisyyden kannalta. Esimerkiksi liian voimakkaasti tai liian pitkään samaan kohtaan tehdyt työstöt voivat vaikuttaa kappaleiden dimensioihin ja esim. terävät reunat saattavat pyöristyä. Tasalaatuisen lopputuloksen aikaansaamiseksi ja manuaalisen työn kustannusten alentamiseksi kuulapuhallus saattaa olla kannattavinta automatisoida robotiikan avulla.

4.6 Abrasiivisen virtauksen menetelmä (*Abrasive flow method, AFM*)

Monimutkaisten muotojen takia sisäpuoliset kolot ja tietyt pinnat ovat vaikeita työstettäviä AM-tulostetuissa kappaleissa. Näiden työstöön on kehitetty muutamia menetelmiä. Yksi näistä on abrasiivisen virtauksen menetelmä (*AFM, abrasive flow method*), joka on saatavissa Extrude Hone -yritykseltä. AFM on menetelmä sisäpuolisten pintojen tasoittamiseen ja kiillotukseen sekä kontrolloitujen säteiden tekemiseen. Sitä voi tosin hyödyntää myös vaikeapääsyisten reikien, rakojen ja reunojen työstössä. Tässä menetelmässä abrasiivinen aine syötetään paineen avulla työstettävään pintaan. [4,12]

AFM-prosessissa käytetään jäykkää nestemäistä tai pastamaista virtausta, jossa on abrasiivisia partikkeleita tasoitusta ja kiillotusta varten. Työstävää väliainetta työnnetään edestakaisin rei'issä ja onkaloissa. Prosessi ei ole kovin joustava vaihteleville muodoille tai dimensioille, ja esimerkiksi reikien pitää olla halkaisijaltaan ainakin 0.2 mm, jotta työstö toimii. On huomioitavaa, että sokeiden reikien prosessointi ei ole mahdollista. Menetelmä ei ole massaviimeistelyprosessi vaan jokainen kappale pitää työstää erikseen. Hyvänä puolena on, että virtaava aine voidaan räätälöidä kunkin tulostusmateriaalin ja kappaleen käyttökohteen mu-

kaan, ja tällä menetelmällä on mahdollista saavuttaa hyvä pinta muutoin vaikeapääsissä kohteissa. Tyypillinen pinnankarheuden parannus on Ra 8–16 µm:stä karheuteen Ra 3–4 µm, ja menetelmän avulla saavutettava paras pinnanlaatu on mainittu olevan n. Ra 0,05 µm. Prosessi on käytössä mm. lentokone-, avaruus- ja ajoneuvosektoreilla. [28–32]

4.7 Magneettiabraasio (Magnetic Abrasive Finishing, MAF)

MAF on prosessi, joka käyttää magneettikenttää kovien magneettisten abrasiivisten partikkelien liikuttamiseen lieteympäristössä. Partikkeleilla voi olla metallinen ydin, joka reagoi magneettikenttään tai partikkelit voivat olla kokonaan metallisia esimerkiksi irrallisia rautarakeita. MAF-prosessissa merkittäviä parametreja materiaalin poistamiseen ja lopputulokseen on kiillotusnopeus, abrasiivinen materiaali, raekoko, määrä ja abrasiivin valmistusprosessi. Menetelmää voidaan kutsua kontaktittomaksi kiillotukseksi, koska abrasiiviset partikkelit aiheuttavat vain hyvin vähän vahinkoa käsiteltävälle pinnalle. MAF-menetelmässä purseenpoistoon tarvittava laitteisto riippuu kappaleen geometriasta, mutta laitteiston ei tarvitse olla mitoiltaan kovin tarkka tai jäykkä hyvän lopputuloksen saamiseksi. Menetelmän etuna on, että irrallaan olevat, magneettikentän ohjaamat abrasiivit muodostavat harjamaisen työkalun joka ei tarvitse säätöä pituussuunnassa kulumisen edetessä toisin kuin esimerkiksi CNC-koneistuksessa. Toinen etu on, että kappaleen pintaan aiheutuneet vauriot eivät ole yhtä syviä kuin esimerkiksi hionnassa, läppäyksessä tai hoonauksessa, koska menetelmään liittyvät voimat ja energia ovat vähäiset. Magneettiabraasiota voidaan käyttää usean vaiheen prosessina ja esimerkiksi ruostumattoman teräskappaleen (AISI 304) pinnankarheus saatiin Ra 7 µm:stä pienemään arvoon Ra 0.03 µm kahdessa tunnissa. Paras menetelmällä saavutettava pinnankarheusarvo on ilmoitettu olevan n. Ra 0.01 µm. [33]

4.8 Massaviimeistely (*mass finishing*)

Massaviimeistelymenetelmät ovat kiinnostavia abrasiivisia jälkikäsittelymenetelmiä AM-kappaleille. Massaviimeistelymenetelmät ovat usein monivaiheisia prosesseja. Hyvinkin karkeat pinnat saadaan kiillotettua kirkkaiksi prosessoimalla ensin karkealla abrasiivilla ja sen jälkeen hienommilla. Massaviimeistelyssä osien käsittely tapahtuu astiassa ja mukana on yleensä abrasiivinen tai ei-abrasiivinen aines, vesi ja yhdisteitä. Massaviimeistelyssä liike tuotetaan tyypillisesti astiaan ja tämä liike saa hiovan aineen painautumaan ja hieroutumaan työstettävien kappaleiden pintaan. Tällöin kappaleiden pinnat, purseet, reunat ja kulmat tulevat käsiteltyä. Kun työstäviä kontakteja on useita, kappaleet hioutuvat ja kiillottuvat siten, että syntyvät työstöjäljet ovat tyypillisesti suuntautuneina satunnaisesti. [34–36]

Kun useita kappaleita käsitellään astiassa samanaikaisesti, saattavat kappaleet vuorovaikuttaa myös keskenään. Kappaleiden välistä kontaktia voidaan vähentää kiinnittämällä kappaleet tai vähentämällä kappaleiden määrää suhteessa työstävään väliaineeseen. Kappaleiden ja väliaineen suhde voi vaihdella tilavuudeltaan 1:15 ja 4:1 välillä. [34,35]

Massaviimeistelyllä voidaan suorittaa sekä hionta että kiillotus useille osille samanaikaisesti. Käytettävä väliaine voi olla keraaminen, synteettinen, plastinen tai orgaaninen (kuten murskattu saksanpähkinä tai maissintähkä), ja sen geometria voi olla jokin haluttu tai satunnainen. Väliaineen valinta riippuu työstettävän kappaleen materiaalista sekä itse kappaleesta. Usein väliaineena on partikkelien ja veden lisänä myös erityisesti suunniteltu lisäaineyhdistelmä. Näiden lisäaineiden (nestemäiset tai jauhemaiset) valinnalla ja määrällä voi olla kriittinen vaikutus prosessiin. Ne voivat vaikuttaa menetelmän viimeistelynopeuteen, antaa ruostesuojausta, helpottaa jälkipuhdistusta tai vähentää vaahtoutumista ja kasautumista. Massaviimeistely ei välttämättä takaa lopputuotteelle korkealaatuista pintaa, mutta yleensä pinnan ominaisuudet paranevat. Menetelmän etuna on, että jälkikäsittelykustannukset voivat olla merkittävästi pienemmät kuin muilla menetelmillä. [34,35]

Esimerkkejä massaviimeistelyprosesseista ovat: rumpuhionta, täryhionta, keskipakoisrumpuhionta, keskipakokiekkohionta ja akselihionta. Perinteisessä rumpuhionnassa abrasiivi

saadaan liikkeelle rummun pyörimisliikkeellä. Täryhionnassa rummussa on pyörimisliikkeen lisäksi tärinä, jonka ansiosta työstö on parempi ja tasalaatuisempi. Astian muoto voi poiketa tynnyrimäisestä, mikä antaa suuremman kineettisen energian abrasiiveille.

Keskipakoisrumpuhionta (*CBF, centrifugal barrel finishing*) on eräs suuren energian viimeistelyprosesseista. Näihin prosesseihin kuuluvat myös keskipakoiskiekkö-, akseli-, täryallas- ja astiahiontalaitteistot, jotka toimivat korkeilla taajuuksilla ja amplitudeilla. Keskipakoisrumpuhionnassa rummut on kiinnitetty jalustaan, joka pyörii vastakkaiseen suuntaan rumpujen pyörimisliikkeeseen nähden. Jalustan pyöriminen korkealla kierrosnopeudella kehittää korkean keskipakoisvoiman rumpuun (jopa 50 kertaa maan painovoima) ja materiaali rumpujen sisällä pakkautuu tiiviiksi massaksi. Rumpujen pyörimisliike saa työstävän aineen liukumaan kappaleiden pinnalla ja pinta hioutuu ja silottuu. Korkean keskipakoisvoiman ansiosta käsittelysyklit ovat lyhyempiä, usein alle 15 minuuttia purseenpoistossa ja viimeistelyssä. [35]

CBF:ssä käytettävät abrasiiviset rakeet ovat usein paljon pienempiä kuin rakeet rumpu- ja täryprosesseissa. Purseenpoisto voidaan tehdä kovilla, vain vähän hiovilla partikkeleilla ja jatkohionta yksinkertaisesti vaihtamalla pienempään nopeuteen. Keskipakoisrumpuprosessi saa aikaan tasalaatuisia, toistettavia tuloksia, hyvän pinnanlaadun (n. Ra 0,025–0,1 μm) ja tuottaa hyvän toleranssin myös haurailta kappaleilla. Keskipakoisrumpuprosessissa on mahdollista syntyvän sileän pinnan lisäksi saada aikaan puristusjännityksiä kappaleen pintaan, jolloin väsymiselinikä kasvaa. CBF-prosessi ei ole halvin saatavilla olevista massaviimeistelymenetelmistä. Jos tärylaitteistoilla saadaan aikaan tyydyttäviä tuloksia alle 1–2 h aikana, niin sen on mainittu olevan taloudellisessa mielessä kannattavampi prosessi. [35]

Keskipakoiskiekkomenetelmässä sylinterin tai kulhon muotoisen astian pohjassa on kiekko joka pyörii. Tämä kiekko työntää väliainetta ylöspäin astian sisäseiniä vasten ja väliaine paa astian pohjalle keskeltä. Näin muodostuu jatkuva liike. Keskipakoiskiekkoviimeistelyssä keskipakoisvoimat ovat n. 10 kertaa painovoiman suuruiset. Tämän menetelmän sanotaan antavan 5–10 kertaa nopeamman hiontatuloksen kuin perinteiset tärylaitteistot. [35]

Akselihionta tapahtuu kiinnittämällä osat akselin päähän ja akseli upotetaan abrasiiviseen liuokseen. Akseli voi olla paikallaan oleva, pyörivä, kiertävä tai oskilloiva. Abrasiivinen liuos voi olla tärähtelevää, paikallaan olevaa, kohdistettu työkaluun pyörittimen avulla tai koko astia voi pyöriä. Menetelmässä kappaleiden välisiä kontakteja ei ole, koska kaikki työstettävät kappaleet on kiinnitetty akseliin. Huonona puolena on, että kukin kappale pitää kiinnittää erikseen, mikä lisää manuaalista työtä. Vaihtoehtoisesti kiinnitys ja irrotus on mahdollista automatisoida robotin avulla.

Massaviimeistelyprosesseja voidaan nopeuttaa esimerkiksi aineilla, joita käytetään kemiallisesti kiihdytetyssä metallin poistoissa. Näitä aineita voi käyttää perinteisissä pyörivissä rummuissa ja keskipakoislaitteistoissa. Kiihdyttävä vaikutus toimii siten, että yhdisteet heikentävät metallin pintaa kemiallisesti ja abrasiivinen väliaine poistaa heikentyneen, kemiallisesti reagoineen kerroksen. Tämä prosessi soveltuu ainakin ruostumattomalle teräkselle ja alumiinille, ja se on hyödyllinen monimutkaisten kappalegeometrioiden ja herkkien osien, joissa on syviä reikiä tai onteloita, viimeistelyyn. Tällaista prosessia voi käyttää esimerkiksi ensimmäisenä askeleena ennen sähkökemiallista kiillotusta. Prosessi vaatii kuitenkin tarkkailua ja laitetta käyttävän henkilön turvallisuuteen ja jätteenkäsittelyyn pitää kiinnittää huomiota. Toisaalta prosessista tuleva abrasiivisen liejun määrä on vähäisempää kuin perinteisessä prosessissa. [35]

Massaviimeistelymenetelmien etuina on automaattisuus ja huokea hinta. Haittapuolena taas on terävien kulmien ja pienten yksityiskohtien pyöristyminen ja helppo vahingoittuminen. [17]

4.9 Käsinhionta

AM-kappaleita voidaan käsitellä valmistuksen jälkeen myös hiomalla. Lasersintrattujen kappaleiden manuaalinen hionta on verrattavissa perinteisen työkaluvalmistuksen viimeistely-

menetelmiin. Hiontaa ja kiillotusta käsin on käytetty perinteisesti prototyyppien valmistuksen yhteydessä. Abrasiivisella hionnalla on mahdollista saada aikaan hienolaatuisempaa pintaa kuin esimerkiksi hiekkapuhaltamalla. Perinteinen abrasiivinen hionta soveltuu hyvin, kun hiottava pinta on tasainen tai kaareva ja siihen päästään helposti käsiksi. Näihin pintoihin voidaan käyttää manuaalisia ja sähköviiloja. Ultraääniviilat taas soveltuvat kapeisiin muotoihin ja vaikeasti päästäviin paikkoihin paremmin. AM-kappaleet ovat usein muodoltaan monimutkaisia ja niiden hionta käsin on vaikeaa tai mahdotonta. Huonona puolena käsin hiottaessa on edellä mainitun lisäksi se, että kukin kappale pitää työstää yksittäin. Käsinhionta ei siis välttämättä sovellu kustannuksiansa puolesta useimmille tuotantoprosesseille, ja huomioitavaa on myös se, että menetelmällä saavutettava pinnanlaatu riippuu tekijästä. [4,17,37]

Ennen manuaalista hiontaa suositellaan kappaleen kuulapuhallusta. Hiontavaiheessa ennen kuin siirrytään hienompaan raekokoon, tulee kappale huuhdella huolellisesti alkoholilla (esim. isopropanoli), jotta suuremmat partikkelit eivät pääse kulkeutumaan mukana. Aiempien vaiheiden karkeammat rakeet voivat aiheuttaa yksittäisiä naarmuja muilta osin hienoon pintaan. Mikäli näin kuitenkin pääsee tapahtumaan, pitää edellinen vaihe toistaa uudelleen. Vaihtoehtoisesti puhdistukseen voi käyttää jarrulevyjen puhdistukseen tarkoitettua ainetta. [14,17]

Jos kappale on tarkoitus infiltroida myöhemmin tai kappaleessa on tarkoitus käyttää materiaaleja, jotka ovat herkkiä öljyjäämille, tulee hionnan ja kiillotuksen aikana välttää käyttämästä hiontaneiteistä tai muita voiteluaineita. Öljyjäämät huokosissa voivat aiheuttaa infiltroinnin epäonnistumisen johtaen epätiiviseen kappaleeseen. Näissä tapauksissa työstönesteestä tulee käyttää ainoastaan alkoholia. [14]

4.10 Kiillotus manuaalisesti

AM-kappaleita voidaan kiillottaa käyttäen abrasiivisia partikkeleita tai kiillotuslaikkoja. Karkeita partikkeleita käytetään suurella nopeudella poistamaan vikoja kuten kuoppia, koloja, viivoja sekä naarmuja, ja hienoja partikkeleita poistamaan jäämiä ja tasoittamaan pintaa entisestään. Kiillotus suoritetaan tyyppillisesti käsin, mutta myös CNC-koneita voidaan käyttää monimutkaisten osien kiillotukseen. [12]

Jos kappale on kuulapuhallettu ja hiottu ennen kiillotusta, pitää ensimmäisessä vaiheessa poistaa kuulapuhalluksen aiheuttama pintarakenne. Paras menetelmä kiillotukseen riippuu kappaleen geometriasta ja kiillottajan taidoista. Eräs vaihtoehto ensimmäisen kerroksen poistoon on käyttää karkeaa sähköviilaa (*EDM file*) alumiinioksidin kanssa. Tämän jälkeen pinnanlaatua voidaan parantaa hiomapaperin avulla. Monimutkaisille kappaleille voidaan käyttää ultraäänisysteemiä keraamisten kuituviilojen kanssa tai paineilmaaviilaa boorinitridikärjellä (cBN) ja iskun pituudella 0,3–0,5 mm. Ultraäänisysteemin erittäin lyhyen iskunpituuden ansiosta kappaleen pinnassa ei ole enää uria tai naarmuja ja usein tämä keskitasoinen kiillotus on riittävä. Saavutettu pinnanlaatu, kun käytetään raekokoa 600, on Ra 0,8 µm (Rz 3,8 µm). [14]

Jos pinnanlaadusta halutaan vielä kiiltävämpi, voidaan käyttää hiontatahnoja tai -pastoja. Timanttipastoilla on mahdollista saavuttaa esimerkiksi pinta, jonka karheus on Ra 0,03 µm (Rz 0,2 µm). Riippuen AM-kappaleessa käytetystä materiaalista tämä saattaa olla myös paras mahdollinen pinnanlaatu, jos materiaalissa on tulostuksen jälkeen pintahuokoisuutta. Näin on esimerkiksi, kun kappale on valmistettu DirectSteel 20 -jauheesta, jota käytetään esim. ruiskuvalumuottimateriaalina. Timanttipastojen käyttö on kannattavaa ainoastaan silloin, kun pinta on työstetty riittävän hienoksi. Pinta ei myöskään saisi olla huokoinen, jotta pasta ei tunkeudu huokosiin ja aiheuta ongelmia myöhemmissä prosessivaiheissa. [14]

4.11 Jälkilaserointi

AM-kappaleen ominaisuuksia on mahdollista parantaa myös jälkilaseroinnin avulla. Laserkiillotuksen avulla on mahdollista parantaa pinnankarheutta ja vähentää huokoisuutta, ja mene-

telmä on kemikaalivapaa vaihtoehto metallien kiillotukselle. Muita etuja on, että automatisoidun laserkiillotuksen lopputulos ei ole riippuvainen operaattorista ja tulokset ovat toistettavia. Menetelmään ei myöskään liity työkalun kulumista. Laserkiillotusprosessissa lasersäteen energia kohdistetaan kappaleen pintaan ja pinnan topografian piikit sulavat. Tämä sula siirtyy topografian kuoppiin ja laaksoihin ja alkuperäinen pinta silottuu. Kiillotusprosessi voidaan automatisoida ja laser liittyy esimerkiksi viisiakseliseen työstökoneeseen tai robottiin. Työstöä voidaan kontrolloida käyttäen kappaleen CAD-tiedostoja. Menetelmä toimii periaatteessa kaikille lasersintrattaville materiaaleille, mutta prosessoitava pinta pitää olla paikassa, jossa se on optisesti käsiteltävissä. Laserlähteen ja prosessoitavan pinnan välisen matkan pitää olla esteetön eikä työstö ole mahdollista kohteissa, joihin laservalo ei pääse. Tällaisia ovat mm. pienet aukot ja onkalot. Lisäksi AM-kappaleiden monimutkainen geometria voi tuoda omia rajoitteitaan. [12,17,38-40]

Karkeille pinnoille käytetään jatkuvatoimisia lasereita. Kappaleille, joiden pinnankarheus on pienempi (muutama mikrometri), käytetään pulssitettua laseria. Pulssin kesto pulssilaserissa on muutamia satoja nanosekunteja. Sulatuksen syvyys molemmilla lasertekniikoilla on n. 100 nm:stä 100 µm:iin. Aiemmin laserkiillotuksen huonona puolena on ollut vaihtelevat kiillotustulokset eikä menetelmä ole aiemmin kyennyt kilpailemaan perinteisten kiillotusmenetelmien kanssa. Kehitystä näiden suhteen on kuitenkin tapahtunut. [39]

Laserkiillotuksen on mainittu parantavan AM-kappaleiden pinnankarheutta huomattavasti. Fokusoidun laserin kapea intensiteettialue saattaa asettaa haasteita karkean pinnan kiillotamiseen ja menetelmän käyttö voi viedä aikaa. Prosessoinnissa yksittäiset jauhepartikkelit voivat poikkeuttaa laservaloa ja häiritä prosessia. Tätä voidaan kompensoida tekemällä kiillotus useammalla laserpyyhkäisyllä. Esimerkiksi viidellä kiillotuspyyhkäisyllä ruostumattoman teräksen (AISI 316L) pinnankarheus on saatu pienennettyä alkuperäisestä Ra 21 µm:stä 96 %:ia arvoon Ra 0,79 µm. Alkuperäinen pinnankarheus vaikuttaa merkittävästi saavutettavissa olevaan pinnankarheuteen. Laserkiillotuksen nopeus riippuu käytettävästä laitteistosta. Laitteistot ovat kehittyneet ja metallien kiillotuksessa prosessointiaika voi olla luokkaa 0,3–6 cm²/min. [38,40]

Eräs kaupallinen laite, joka on kehitetty AM-kappaleiden jälkikäsitteilyyn laserilla, on nimeltään Hyproline. Laite pystyy puhdistamaan ja työstämään samanaikaisesti jopa 100 kappaletta samassa sessiossa. Tällöin päivässä pystytään työstämään jopa 10000 kappaletta. Optimoiduilla parametreilla pinnankarheuden on ilmoitettu parantuvan n. 90 %. Laite soveltuu ruostumattoman teräksen ja titaanin työstöön. Laite ei ole pelkästään jälkityöstöön vaan sillä voi myös valmistaa AM-kappaleita, minkä johdosta sitä on käsitelty jäljempänä hybridilaitteiden yhteydessä. [41]

4.12 Mikrotyöstöprosessi, *micro-machining process* MMP

Mikrotyöstöprosessi (MMP) yhdistää kemiallisen reaktion ja fluidivirtauksen aiheuttaman materiaalipoiston kappaleen pinnalla. Prosessissa yhdistyvät mekaaniset ja fysikaaliset prosessit sekä katalyytti, joka aktivoi mikrotyöstöteknologiaa. Mikrotyöstöprosessilla voidaan saada erittäin hyviä pinnanlaatuja poistamalla selektiivisesti tiettyjä pinnankarheuksia. Menetelmän avulla on mahdollista saada aikaan peilipintaa muistuttava pinnanlaatu. Kalliin hintansa takia prosessin käyttö on ollut rajoittunut metallikappaleisiin, mutta se on sovellettavissa myös muovikappaleisiin. Prosessissa tarvitaan asetusten säätämistä kunkin kappaleen geometrialle erikseen, joten sitä on tyypillisesti käytetty useiden samanlaisten kappaleiden sarjoille tai arvokkaille kappaleille. [4,12]

4.13 Terminen purseenpoisto, *Thermal Energy Method* TEM

Termisessä TEM-menetelmässä hyödynnetään metaanikaasun polttoa purseenpoistoon hapetusreaktion avulla. Työstettävä kappale sijoitetaan kammioon, johon johdetaan paineistettu poltettava kaasu. Kaasu sytytetään, jolloin lämpötila nousee räjähdysmäisesti hetkellisesti

(muutaman millisekunnin ajaksi) yli 3000 °C:een. Nopean lämpöaallon aikana pienet purseet ylittävät itsesyttymislämpötilan ja hapettuvat suuremman kappaleen säilyessä vahingoittumattomana. Menetelmän etuna on, että kaasut ympäröivät purseet riippumatta kappaleen geometriasta. Muita etuja on mm. alhainen prosessointikustannus, korkea tuotantovauhti ja toistettavat tulokset. Termistä purseenpoistoa käytetäänkin usealla teollisuudenalalla ja menetelmää hyödynnetään mm. myllytyksen ja tärinää hyödyntävien ja manuaalisten purseenpoistolaitteiden sijaan, joissa haasteena on epäsäännöllisempi ja arvaamattomampi lopputulos. Menetelmässä kappaleen pinnalle muodostuu hapettuneiden purseiden muodostama heikosti kiinnittynyt oksidikerros, joka ei ole kiinnittynyt kemiallisesti. Tämä kerros voidaan poistaa purseenpoistoa seuraavan lämpökäsittelyn, pinnoitusprosessin tai upotuspuhdistuksen aikana. [29,42]

4.14 Kemiallinen ja sähkökemiallinen kiillotus

AM-kappaleissa on usein pintoja ja muotoja, joita on vaikea tai mahdoton työstää perinteisin työstömenetelmin. Tällaisiin kohteisiin pinnanlaadun parantamiseksi soveltuvat kemialliset tai sähkökemialliset menetelmät.

Kemiallisessa kiillotuksessa kappale on nestemäisessä liuoksessa, joka syövyttää epätasaisen pinnan huippuja. Tyypillisesti kemiallisen kiillotuksen prosessivaiheisiin kuuluu pinnan puhdistus (pölyn ja irrallisten jauhepartikkelien poisto), kemiallinen kiillotus, loppupuhdistus (kiillotuskylvyn jäämien poisto) ja metallipinnan kuivaus. Ruostumattomalle teräkselle syövytykseen käytetään esim. etikka-, fosfori-, suola- tai typpihappoa. Alumiinikappaleiden kiillotukseen voidaan käyttää esim. fosfori-, rikki-, typpi-, boorihappoa tai kuparinitraattia. Titaania voidaan kiillottaa kemiallisesti fluorivety- tai typpihapolla. [43]

Kemiallisen kiillotuksen lisäksi lasersintrattujen kappaleiden työstöön voidaan kiiltävän pinnan aikaansaamiseksi käyttää sähkökemiallista kiillotusta. Sähkökemiallisessa kiillotuksessa prosessi poistaa kappaleesta uloimman kerroksen ja mahdollisesti pintakerrokseen jääneet epäpuhtaudet, jotka voivat aiheuttaa pinnanalaista korroosiota. Sähkökemiallisen kiillotuksen etuna on kyky prosessoida pieniä ja mekaanisesti hauraita osia. Menetelmässä työstettävät kappaleet upotetaan liuokseen ja niihin johdetaan tasavirtaa. Menetelmä vaatii kemikaalien ja identtisen katodin käyttämistä kiillotuksen onnistumiseksi. [28,38,44,45]

Sähkökemiallisella kiillotuksella on useita etuja verrattuna kemialliseen kiillotukseen. Kylpyjen kemia on usein yksinkertaisempaa ja aineet vähemmän myrkyllisiä. Sähkökemiallinen kiillotus voidaan usein myös tehdä matalammassa lämpötilassa ja prosessointiajat ovat lyhyempiä. Menetelmä toimii kaikille lasersintratuille materiaaleille ja sen avulla saadaan aikaan hyviä pintoja mm. lääketieteiden sovelluksiin. Huonona puolena kemialliseen kiillotukseen verrattuna on usein monimutkaisempi laitteisto (virtalähde, johdotus, anodi–katodi-järjestelmä) ja tarve pinnan näkyvyydelle (*line-of-sight*) katodin läheisyydessä. [17,24,28]

Sähkökemiallisen kiillotuksen onnistuminen riippuu työstettävän pinnan laadusta. Sähkökiillotusta käytetään pääasiassa peilikirkkaiden pintojen aikaansaamiseksi pinnoista, jotka ovat jo hyvin sileitä ennen sähkökemiallista kiillotusta. Menetelmän poistama materiaalmäärä riippuu liuoksesta, lämpötilasta, virrantiheydestä ja kiillotettavasta metallista. Jos lopputulokseksi halutaan erittäin hienoja pintoja, kappaleet pitää ensin kiillottaa esimerkiksi mekaanisilla menetelmillä ennen sähkökiillotusta. Tämän on todettu pitävän paikkansa AM-kappaleille. [28,37,45,46]

Eräs menetelmä, joka hyödyntää sähkökemiallisen kiillotuksen ja mekaanisen kiillotuksen etuja on sähkökemiallinen harjaus (*electrochemical brushing*), jossa elektrolyyttiliuoksessa on lisäksi abrasiivisia partikkeleita. Abrasiiviset partikkelit työstävät kappaleen pinnasta oksidikerroksen, kun työstävänä työkaluna toimiva elektrodi liikkuu pinnan lähellä. Tällä menetelmällä päästään parempiin pinnanlaatuihin kuin pelkästään sähkökemiallisella kiillotuksella. Haittapuolena on, että menetelmä soveltuu parhaiten tasaisille pinnoille. Monimutkaisten kappaleiden kiillottamista varten työstävä elektrodi pitää suunnitella erikseen. [47]

Toinen sähkökemiallisen kiillotuksen erityissovelluksista on elektrolyyttinen plasmakiillotus. Perinteiseen sähkökemialliseen kiillotukseen verrattuna siinä käytetään merkittävästi korkeampaa sähköpotentiaalia ja ympäristöystävällisempiä kemikaaleja, jotka eivät perustu vahvoihin happoihin vaan halpuihin suolaliuoksiin. Menetelmää voidaan käyttää mm. ruostumatoman ja matalahiilisen teräksen, kuparin sekä messingin työstämiseen. [48,49]

4.15 Hybridilaitteet

AM-valmistukseen liittyvissä hybridilaitteissa yhdistyvät tyypillisesti perinteinen koneistus ja ainetta lisäävä valmistus. Hybridilaitte voi olla esimerkiksi perinteinen koneistuskeskus, johon on lisätty työkalu ainetta lisäävää valmistusta varten. CNC-koneet ovat yleensä tuttuja yrityksille ja uudet hybridilaitteet mahdollistavatkin kevyemmän askeleen ainetta lisäävään valmistukseen. Tällöin kokonaisuus ei ole niin vieras kuin esim. jauhepetimenetelmän käyttöönotto suoraan tuotannon yhteyteen.

Hybridilaitteessa kappaleen koneistus tapahtuu samassa kammiossa kuin valmistus. Koneistus voidaan suorittaa esimerkiksi 20 kerroksen valmistuksen jälkeen. Tällöin mm. muotinvalmistuksessa hybridikoneen etuna on mahdollisuus työstää muotin sisäpuolinen vesijäähdytyskanavisto muotin tehokkuuden lisäämiseksi. Tällöin jo muotin suunnitteluvaiheessa voidaan tehdä malliin parannuksia, kun työstöä ei tarvitse tehdä jälkikäteen. Lisäksi muotin valmistusaikaa saadaan lyhennettyä ja valmistuskustannuksia pienennettyä merkittävästi verrattuna perinteiseen muottivalmistukseen. [50]

Tyypillisesti hybridilaitteen AM-valmistus tehdään laserpinnoittamalla (*laser cladding*), elektronisuihkusulatuksella (*electron beam melting*) tai termistä ruiskutusta (*thermal spraying*) käyttäen. Vaihtoehtoisesti hybridilaitte voi käyttää AM-kappaleen tekoon myös jauhepetiteknikkaa lasersulatuksen avulla. Jauhepetiteknikkaan verrattuna aiemmin mainittujen menetelmien avulla on helpompi lisätä materiaalia olemassa olevaan kappaleeseen. Lisäksi nämä menetelmät mahdollistavat usein osaltaan myös isommat kappalekoot. Usein jauhepetitimenetelmiin perustuvien laitteiden mahdollistama kappalekoko on vielä toistaiseksi suhteellisen pieni. Mahdollisena haittapuolena voidaan kuitenkin mainita valmistustarkkuus, joka on heikompi kuin jauhepetitimenetelmällä. Tätä voidaan kuitenkin kompensoida hybridilaitteen ainetta poistavalla mahdollisuudella, jolloin on mahdollista optimoida valmistustehokkuutta ja -tarkkuutta. [3]

Eräs toinen laserpinnoitus-, suihkusulatus- tai ruiskutustyyppisen hybridilaitteen huono puoli jauhepetitimenetelmään verrattuna on laadunvarmistukseen käytettävän testikappaleen valmistamisen aiheuttama lisätyö. Testikappaleen valmistaminen oikean kappaleen lisäksi vaatii koneelta enemmän liikeratoja ja käyttää enemmän aikaa. Jauhepetitimenetelmässä jauhekerros levitetään koko kammion alalle joka tapauksessa ja lisätyö testikappaleen tekemiseen tulee ainoastaan laserin lisääntyneenä ratana. [51]

Jauhepetiteknikkaa käyttävästä hybridilaitteesta esimerkkinä on Matsuuran valmistama LUMEX Avance-25, joka yhdistää jauhepetiteknikan lasersintrauksella CNC-koneistukseen. Laitteessa on mahdollista vaihtaa koneistusterää valmistusprosessin aikana. [50]

Useat muut koneistustyöasemien valmistajat ovat lisänneet CNC-koneisiinsa mahdollisuuden ainetta lisäävään valmistukseen ja vanhoihin CNC-laitteisiinkin on mahdollista lisätä ainetta lisäävä työstöpää, joka voidaan ottaa käyttöön samassa koneistussyklissä. Erään tällaisen työstöpään on kehittänyt Hybrid Manufacturing Technologies. Tämä lisää metallimateriaalia laserin avulla (*laser cladding*). Tällainen ainetta lisäävä työstöpää ei sovellu kovin hyvin tiiviiden ja kiinteiden metallikappaleiden valmistukseen vaan paremmin valmiiden pintojen päälle valmistamiseen kuten esimerkiksi yksityiskohtaisten vakainten lisäämiseksi akseliin. Vastaa- via ainetta lisäävän valmistuksen työkaluja/paketteja tarjoaa mm. Optomec [52,53,54]

Muita hybridilaitteita on mm. Mazak INTEGRIX i-400AM, jossa kuitulaser sulattaa metallijauheen, DMG Morin Lasertec 4300 3D ja Lasertec 65 3D, IBARMIA Add&Process sekä

Hermelen MPA 40. Myös koneistuslaittevalmistaja Hurco on ollut kiinnostunut hybriditekniikasta ja on vuonna 2014 hakenut patenttia hybridilaitetekniikkaan liittyen, mutta hybridilaitteistoa ei heiltä ole vielä saatavilla. [55-61]



Kuva 4. Ainetta lisäävä työkalu koneistuslaitteessa. [62]

Täysin toisenlainen lähestymistapa hybridivalmistukseen liittyen on aiemminkin mainittu Hyproline-laite, jossa 3D-valmistus ja työstö laserilla tehdään ikään kuin tuotantomaisesti liukuhihnalla. Laitteisto tai tuotantolinja mahdollistaa 100 erillisen, erilaisen kappaleen valmistamisen linjan liukkuessa 1–2 m/s. AM-tulostus, pintakäsittelyt laserilla ja kappaleiden poistotulosustalta tapahtuvat automaattisesti. Laitteistossa saadaan myös verrattua tulostettua kappaletta CAD-malliin ja laadunvarmistus tehtyä jo prosessin aikana. Linja voidaan koostaa moduuleista kuhunkin tuotantoprosessiin sopivaksi. Valmistetun kappaleen pinnankarheuden on sanottu olevan niinkin hieno kuin 0,5 μm . [41,63,64]

4.16 Robotisointi

Robotisointia voidaan ainetta lisäävässä valmistuksessa käyttää mm. kappaleen poistamiseen AM-laitteesta. Tällä hetkellä suuri osa lasertulostuslaitteistoista on kuitenkin sellaisia, että kappale poistetaan tulostimesta käsin. AM-valmistusta on mahdollista automatisoida enemmän tulevaisuudessa, jolloin robotti voi poistaa tulostusalustan laitteesta ja suorittaa jälkikäsittelyt esim. erillisessä asemassa automaattisesti. Myös lopputarkastus on mahdollista automatisoida.

Eräs automaattisuuden tähtäävä laitteisto on Additive Industries:n MetalFAB1, jossa on jauhepetimenetelmän lisäksi modulaarisena lämpökäsittely-yksikkö. Lisäksi saataville on tulossa mm. kappaleen irrottamiseen ja jälkikäsittelyyn soveltuvia moduuleita. Moduuleita voidaan lisätä tarpeiden mukaan. Tulostusalustat käsitellään automaattisesti. Lisäksi laitteeseen on mahdollista lisätä myös toinen jauhepetiysyksikkö, jossa voidaan käyttää toista jauhemateriaalia ja välttää kammioiden ja jauhelinjoiden puhdistukselta tai kontaminaatoriskiltä. Laite on vuoden 2016 alkupuolella vielä beta-testausvaiheessa. [65]

Myös muut laitevalmistajat ovat kehittäneet prosessin automatisointia, jolloin kappaleiden valmistus tuotantomittakaavassa olisi kustannustehokkaampaa. Esimerkkinä tällaisista laitteistoista ovat mm. EOS M400 ja SLM 500, johon on saatavissa jauheenkäsittelyn yhteydessäkin mainittu irrotettava tulostuskammio. [16,66]

Toistaiseksi AM-laittevalmistajat ovat keskittyneet tyyppillisten valmistusta seuraavien vaiheiden automatisointiin kuten jauheenpoistoon ja lämpökäsittelyyn. Myös muut vaiheet kuten tukien irrotukset ja esim. kuulapuhallukset olisi mahdollista automatisoida, mutta täysin val-

miita ratkaisuja tähän ei vielä ole. Erillisiä ratkaisuja kuitenkin löytyy ja esim. kuulapuhallus-robottiratkaisuja valmistaa mm. Blastman [67]

Robotiikan ylipäättään uskotaan kuitenkin lisääntyvän tuotantoympäristöissä. Sen avulla voidaan säästää työvoimakustannuksissa ja robotiikka voisi mahdollistaa myös eurooppalaisen tuotannon hintakilpailussa. Uutena vaihtoehtona on mainittu mm. vuorovaikutteinen robotiikka, jossa ihminen työskentelee samanaikaisesti samassa tilassa robotin kanssa jopa fyysisessä kontaktissa. Tätä voitaisiin käyttää hyödyksi mm. suurten, teolliseen tuotantoon valmistettujen kappaleiden siirtelyssä, missä kappaleet painavat useita satoja kiloja. Vuorovaikutteisen robotiikan avulla myös työstöpintojen ja -ratojen opettaminen robotille helpottuu, mikä mahdollistaa ketterämmän piensarjatuoannon. [68]

4.17 HIP-käsittely (isostaattinen kuumapuristus)

Isostaattista kuumapuristusta (HIP, *hot isostatic pressing*) voidaan käyttää lasersintraamalla, sulamenetelmällä, valamalla tai jauhemetallurgisesti valmistettujen kappaleiden huokoisuuden vähentämiseen. Tiheämmällä materiaalilla mm. väsymiskestävyys ja sitkeys ovat parempia. AM-kappaleen HIP-käsittely poistaa materiaalista huokokset riippumatta niiden määrästä tulostustilaisessa kappaleessa ennen prosessia, kunhan vaatimus kappaleen kaasutiiviistä pinnasta täyttyy. Isostaattista kuumapuristusta varten kappaleen pinta voi myös olla tarpeen tiivistää, jotta paineen välittävä kaasu ei pääse kappaleen sisäpuolisiin huokosiin vaan vaikuttaa kappaleen ulkopuolelta. Vaihtoehtoisesti AM-kappale voidaan myös kapseloida. Jos käytössä on mahdollisuus isostaattiseen kuumapuristukseen, on AM-valmistusta mahdollista nopeuttaa tulostamalla kappale huonommalla laadulla (huokoisempi kappale), jolloin HIP-käsittelyllä voidaan tiivistää kappale ja saada näin aikaan aika- ja kustannussäästöjä verrattuna parempilaatuisen AM-kappaleen tulostukseen hyvällä laadulla ja hitaammin. Isostaattista kuumapuristusta voidaan käyttää metallisille, keraamisille, polymeerisille ja joillekin komposiittimateriaalikappaleille. Tyypillisiä metallimateriaaleja, joita HIP-käsitellään, ovat pikateräkset ja ruostumattomat teräkset, titaani-, alumiini- ja nikkeliseokset. [10,12,69,70]

4.18 Peittaus

Peittaus on oksidien tai metallisten epäpuhtauksien poistamista happokylvyn avulla. AM-kappaleisiin oksidikerros saattaa muodostua esimerkiksi lämpökäsiteltäessä kappale uunissa, jossa ei ole suojakaasua. Peittausahpona käytetään rikki-, suola-, fosfori-, typpi-, fluori- vetyhappoa tai näiden seoksia. Peittaus on mahdollista tehdä myös elektrolyttisellä peittauksella. Kylpyjen lisäksi voidaan käyttää myös sivellin- tai ruiskupeittausta. Epäpuhtauksien poistamisen lisäksi peittausliuos saattaa sisältää mm. korroosioinhibiittejä, jolloin kappaleen korroosionkestokin paranee. [71,72]

4.19 Infiltointi

Infiltointi on tärkeää, kun valmistetaan metallisia kappaleita sideaineruiskutusmenetelmällä. Infiltoinnin avulla saadaan pienennettyä kappaleen huokoisuutta vaikuttamatta kappaleen mittatarkkuuteen. Menetelmässä infiltointi tehdään uunissa missä infiltoitu aine virtaa kapillaari-ilmion avulla valmistetun kappaleen huokosiin osiin. Infiltointia voidaan käyttää myös ei-metallisissa kappaleissa parantamaan tiiveyttä, tekemään ohutseinäisistä lasersintraatuista ja FDM-tulostetuista kappaleista veden- ja kaasunläpäisemättömiä tai käyttää kappaleiden värjäykseen. Jos kappale on tarkoitus infiltoida, pitää ottaa huomioon, että aiemmissa työstövaiheissa ei käytetä aineita (öljyt yms.), jotka voivat tunkeutua huokosiin jääden sinne ja estäen onnistuneen infiltoinnin. [4,12,14]

4.20 Plasmakäsittely

Muovien matalan pintaenergian takia niitä on vaikea liittää ja pinnoittaa. Ratkaisuna tähän voidaan muovit plasmakäsitellä. Plasmakäsittelyä käytetään tyypillisesti muoveille ennen liimaamista, maalaamista tai pinnoitusta parantamaan adheesiota ja kostutusta. Plasmakäsittelyä voidaan käyttää myös metalleille ja liittämisen edesauttamisen lisäksi käsittelyllä voidaan poistaa orgaaniset epäpuhtaudet pinnoilta. Plasmakäsittelytekniikka on mahdollista integroida tuotantolinjaan helposti ja kustannustehokkaasti. Tantecon on erikoistunut 3D-tulostettujen kappaleiden plasma- ja koronakäsittelyyn. [73]

4.21 Pinnoitus / maalaus

Tulostettujen kappaleiden pinnanlaatua on mahdollista parantaa lisäämällä kappaleeseen materiaalia pinnoittamalla. Pinnanlaadun lisäksi pinnoittamisella voidaan täyttää myös kappaleen esteettisiä vaatimuksia. Tähän tarkoitukseen voi soveltua myös kappaleen maalaus tai värjäys. Värjäys voidaan suorittaa mm. kastamalla kappale värjäysliuokseen. Tämä voi olla erityisen tehokas jauhepetimenetelmällä valmistetuille kappaleille, joilla on luontaista huokoisuutta ja tehokas absorptio. Jos kappale halutaan maalata, voi olla parempi tiivistää osa ennen maalausta. Yksi vaihtoehto silottaa ja värjätä kappaleen pinta on jauhepinnoitus. Jauhepinnoituksella on tyypillisesti tekninen tai suorituskykyyn liittyvä vaatimus esimerkkinä matalakirkainen PTFE-pinnoite. [4,12]

Tulostettujen kappaleiden monimutkainen muoto voi asettaa haasteita pinnoitusmenetelmälle. Pinnoitusmenetelmistä, jotka eivät tarvitse suoraa näkölinjaa pinnoitettavaan kohteeseen, ja jotka mahdollistavat suuren pinnoitusvolyymien sekä tuottavat vähän lisäarvoa itse tuotteelle, pidetään soveltuvana tai kustannustehokkaana yleensä vain sähköpinnoitusta (*electroplating*). Menetelmän heikkona puolena on, että jos kappaleessa on teräviä kulmia, niin niissä virrantiheys kasvaa ja pinnoite muodostuu paksummaksi. Sähköpinnoitusta käytetään mm. lentoteollisuudessa antamaan kevyille muoviosille ulkonäkö, joka vastaa korkealaatuista tuotetta. Sähköpinnoituksella voidaan kuitenkin antaa osille lisää lujuutta muodostamalla tukiranka kappaleen päälle tai estää sähköisten signaalien pääsy kappaleeseen tai sen ulkopuolelle pinnoitteen sähköjohtavien ominaisuuksien ansiosta. Lisäksi esimerkiksi kromauksella saadaan kappaleen lujittamisen lisäksi parannettua kulumisenkestoa. [3,34]

Monimutkaisille kappaleille sähköpinnoituksen lisäksi toinen soveltuva menetelmä on kemiallinen pinnoittaminen (*electroless plating*). Sen etuna on tasainen pinnoitekerros riippumatta kappaleen terävistä muodoista. Kemiallisesti voidaan pinnoittaa mm. kromia, nikkeliä ja kuparia. [3,74]

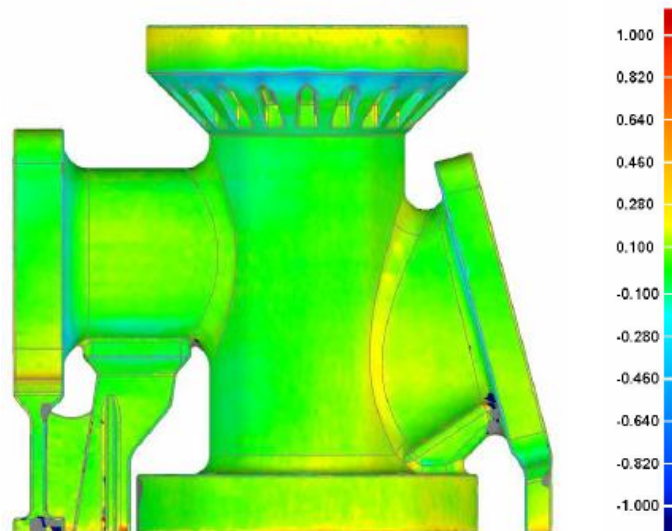
Muita mahdollisia vaihtoehtoja ovat tyhjöpinnoitusmenetelmät. Näistä esimerkiksi kemiallinen kaasufaasipinnoittaminen (*CVD, chemical vapour deposition*) soveltuu monimutkaisten kappaleiden pinnoittamiseen. Sitä ei kuitenkaan voi käyttää pinnankarheuden parantamiseen ja se on menetelmänä monimutkaisempi ja kalliimpi kuin edellä mainitut. Toinen tyhjöpinnoitusmenetelmä on fysikaalinen kaasufaasipinnoitus (*PVD, physical vapour deposition*). PVD:n etuna on mm. hyvä tarkkuus ja CVD:hen verrattuna vähempi kemikaalien käyttö. PVD-menetelmä ei muuta kappaleen geometriaa tyypillisen pinnoitepaksuuden ollessa 2–5 µm. Tyhjöpinnoitteiden rajoitteina on hidas prosessi ja suhteellisen kallis hinta. [17,74]

5. Lopputuotteen laadunvalvonta

Kuten aiemmin edellä on mainittu, 3D-tulostuslaitteilla on haasteita toiminnassa ja luotettavuudessa, mikä heikentää tuotteiden laatua. Kappaleen metallurgiset ja mekaaniset ominaisuudet määräytyvät valmistuksen aikaisesta metallisulan homogeenisuudesta riippuen. Mikäli käytössä ei ole ollut valmistuksen aikaista laadunvalvontamenetelmää tai kappaleelle on tehty jälkikäsitteilyitä, joiden laatu halutaan tarkastaa, voi ennen kappaleen kokoonpanoa tai

käyttöönottoa olla tarpeen tehdä lopputuotteen laadunvalvonta. Lopputarkastus voidaan tehdä yksinkertaisin menetelmin käyttäen työntömittaa ja jalustulkkia tai kehittyneemmin joko koordinaattimittauksen, valkoisen valon tai laserskannauksen avulla. Lisäksi voidaan käyttää erilaisia ainetta rikkomattomia menetelmiä. Käytettävä menetelmä tulisi valita kappaleen laatuvaatimusten perusteella. Kukin menetelmä poikkeaa toisistaan monimutkaisuuden sekä vaadittavan ajan ja kustannusten osalta. [4,5]

Yksinkertaisilla menetelmillä, kuten työntömitalla, voidaan havaita selkeitä virheitä mitoissa, mutta esimerkiksi laserskannaus antaa selkeämmän kuvan kappaleen mahdollisista vääristymisistä. Laserskannauksen avulla onkin kohtuullisen helppoa havaita esim. kappaleen kiertumista jäännösjännitysten johdosta, kun skannattua kappaletta päästään vertaamaan suoraan CAD-malliin. Esimerkki laserskannatun kappaleen ja CAD-mallin vertailusta on esitetty kuvassa kuva 5. Tulostetun kappaleen mittojen tarkkoihin mittauksiin laserskannerin antama tulos voi olla liian epätarkka ja tällöin käyttöön voidaan ottaa esimerkiksi koordinaattimittauskone. Voikin olla, että tulostetusta kappaleesta muodostetaan laserskannauksella yleiskuva, jonka perusteella koordinaattimittaus kohdistetaan ainoastaan tiettyyn kohtaan kappaletta. Tällöin on mahdollista saada myös ajallista hyötyä, koska koordinaattimittaus on usein hitaampaa kuin laserskannaus. Joissain hybridilaitteissa koordinaattimittaus onnistuu jo itse laitteessa, kun työkaluissa on valittavissa sopiva mittakärki. Tällöin esimerkiksi jokin kriittinen pinta (mm. tasomaisuuden osalta) saadaan mitattua jo kappaleen ollessa kiinni valmistuslaitteessa.



Kuva 5. Esimerkki tulostetun kappaleen laserskannauksen ja CAD-mallin vertailusta. Värikartta kertoo poikkeaman CAD-malliin verrattuna (väriskaalan mitat millimetreinä).

Ainetta rikkomattomia tarkastusmenetelmiä (NDT, *nondestructive testing*) käytetään kappaleessa esiintyvien virheiden ja epäsäännöllisyyksien havaitsemiseen. Ainetta rikkomattomia tarkastusmenetelmiä voidaan käyttää valmistuksen aikaisen prosessin monitorointiin tai valmistuksen jälkeen kappaleiden tarkastukseen. Ainetta rikkomattomat menetelmät ovat tärkeitä mm. NASA:lle, joka valmistaa kalliita, uniikkeja kappaleita. Eräs näistä menetelmistä on fluoresoivan tunkeumanesteen käyttö (FPI, *fluorescent penetrant inspection*). AM-prosessin tuottama kerrosmainen rakenne saattaa aiheuttaa vääriä tulkintoja tunkeumanesteen käytössä ja kerrosten rajapinnat tulisikin pyrkiä erottamaan mm. haitallisesta mikrosäröilystä. AM-prosessin uutuudesta johtuen tarkkaa tarkastusmäärittystä ei ole vielä tehty. Tarkastusmenetelmien laitevalmistajat ovat kuitenkin alkaneet ymmärtää AM-valmistuksen luonnetta ja useita tekniikoita on alettu muokata tai kehittää erityisesti AM-teknologiaa silmälläpitäen. Muita ainetta rikkomattomia menetelmiä on ultraääni-, pyörrevirta- ja radiologiset mittaukset sekä tietokonetomografiaskannaus. Näitä menetelmiä voidaan käyttää sisäisten halkeamien, hu-

kosten tai sisäpuolisiin muotoihin jääneen jauheen havaitsemiseen. Kappaleen paksuus ja muodot voivat kuitenkin vaikeuttaa vikojen havaitsemista. Monimutkaisille kappaleille lupavimman tekniikan on mainittu olevan röntgentomografia. [4,8,9,75]

Perinteiset ainetta rikkomattomat menetelmät kuten pyörrevirtojen tai tunkeumanesteiden käyttö eivät sovellu hyvin työstämättömien AM-kappaleiden laadun tutkimiseen karkeiden pintojen takia. Myös tietokonetomografian käytöllä on omat haasteensa. Useat organisaatiot (mm. NASA, SpaceX, ESA, Lockheed Martin, Boeing) ovatkin kehittämässä uusia menetelmiä AM-kappaleiden laadunvalvontaan. Lähiaikojen suunnitelmana NASA:n testausosastolla (NNWG, *Nondestructive Evaluation Working Group*) on kehittää NDT-menetelmät laukaisussa käytettävien AM-osien sertifiointille ja laatuhyväksynnälle. Pidemmän aikavälin tavoitteena on kehittää laadunvalvontamenetelmät osille, joita käytetään avaruudessa. [9,76]

6. Yhteenveto

AM-kappaleet saattavat vaatia huomattavan paljon jälkikäsittelyä valmistuksen jälkeen. Kukin kappale kannattaa käsitellä käyttökohteesta ja sen asettamista vaatimuksista riippuen parhaiten soveltuvalla menetelmällä. Monimutkaisen geometrian omaaville kappaleille jälkikäsittelymenetelmät ovat pääasiallisesti vielä manuaalisia, mutta myös automaattinen jälkikäsittely kehittyä, kun AM-laitteet yleistyvät tuotannossa.

Lähdeviitteet

1. Kokkonen P, Salonen L, Virta J, Hemming B, Laukkanen P, Savolainen M, Komi E, Junttila J, Ruusuvoori K, Varjus S, Vaajoki A, Kivi S, Welling J. 2016. Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process. RESEARCH REPORT VTT-R-03160-16.
2. EPMA Introduction to additive manufacturing technology. [Online]. [viitattu 2016 06 09]. Saatavilla: http://www.epma.com/doc_details/427-additive-manufacturing-technology-brochure.
3. Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive Manufacturing Technologies - 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing 2nd edition New York: Springer-Verlag New York; 2015.
4. Wohlers Report. 2014.
5. Smith J. Sigma Labs' In-Process Technology to Overcome Barriers in Metal 3D Printing. [Online].; 2015 [viitattu 2015 08 07]. Saatavilla: <http://3dprint.com/67882/sigma-labs-eta-3d-print/>.
6. Bremen S, Meiners W, Diatlov A. Selective Laser Melting - A manufacturing technology for the future? Laser Technik Journal. 2012 May; 9(2).
7. Cola M. In-Process Quality Assurance(tm) a Process Monitoring and NDI Tool for Additive Manufacturing. Additive World Conference, Industrial 3D Printing Conference, 4.-5.3.2015, Eindhoven, Netherlands. 2015.
8. Anonymous. Inside Metal Additive Manufacturing. [Online].; 2015 [viitattu 2015 05 04]. Saatavilla: <http://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/non-destructive-testing-of-additively-manufactured-components-challenges-ahead>.

9. OSMA. NASA OSMA Web site. [Online].; 2015 [viitattu 2015 4 27]. Saatavilla: <https://sma.nasa.gov/news/articles/newsitem/2015/03/04/nasa-explores-nde-options-for-evaluating-additively-manufactured-parts>.
10. Metal AM, Winter 2015, Vol 1, No 4. [Online].; 2015 [viitattu 2016 02 19]. Saatavilla: http://www.metal-am.com/assets/userfiles/metal-am/Magazines/Vol_1_No_4_Winter_2015_dp.pdf.
11. Concept Laser. In-situ Quality Assurance with QMmeltpool 3D from Concept Laser. [Online].; 2015 [viitattu 2016 03 01]. Saatavilla: <http://www.conceptlaserinc.com/in-situ-quality-assurance-with-qmmeltpool-3d-from-concept-laser/>.
12. Purtonen T. Post processing in additive manufacturing. Lappeenranta University of Technology. Additive Manufacturing Lecture #7. 2013.
13. Diegel O. 3D Printing Examining the Myths. 2015. 3D-tulostus, Materiaalia lisäävä valmistus, FIRPA ry:n vuosiseminaari, 28.4.2015, Espoo.
14. EOS. Application Notes - Surface Finishing of DMLS Parts.
15. SLM Solutions NA, Inc. New advancements released on the Selective Laser Melting® System: SLM® 500HL. [Online].; 2015 [viitattu 2016 3 7]. Saatavilla: <https://www.youtube.com/watch?v=bl0OdSsMDok>.
16. Ritt SSSG. Update on latest developments in SLM 500-Technology, the fastest production machine so far. [Online].; 2014 [viitattu 2016 3 7]. Saatavilla: https://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=OnhJ5h7dpKc.
17. EOS. Basic Training chapter 12 - Post-processing of DMLS parts.
18. Chan KS, Koike M, Mason RL, Okabe T. Fatigue life of titanium alloys fabricated by additive layer manufacturing techniques for dental implants. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 2013; 44(2): p. 1010-1022.
19. Alonen A, Hietikko E, Hoffren M, Kesonen M, Urpilainen A. Deadman-tutkimushankkeen loppuraportti, Kokemuksia metallikappaleiden ainetta lisäävästä valmistuksesta. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu; 2015. Report No.: ISBN 978-952-203-203-4.
20. Hybridmanutech. Hybrid Manufacturing Technologies - News - Additive Reaches a New Level of Precision: World's First Grinding Machine with Additive. [Online].; 2015 [viitattu 2015 09 18]. Saatavilla: <http://www.hybridmanutech.com/news.html>.
21. Beaucamp AT, Namba Y, Charlton P, Jain S, Graziano AA. Finishing of additively manufactured titanium alloy by shape adaptive grinding (SAG). Surface Topography: Metrology and Properties 3 (2), 2015.
22. Inside Metal Additive Manufacturing blog, Mechanical finishing of additively manufactured metal parts. [Online].; 2016 [viitattu 2016 08 02]. Saatavilla: <http://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/mechanical-finishing-of-additively-manufactured-metal-parts>.
23. Leinonen J. Kuulapuhallus metallien kylmämuokkausmenetelmänä, Opinnäytetyö, Kajaanin ammattikorkeakoulu. 2012.

24. Ruffner T. Direct Metal Laser Sintering, Surface Finish & Finishing of DMLS - (Direct Metal Laser Sintering) Parts. [Online].; 2010 [viitattu 2015 09 10]. Saatavilla: <http://directmetallasersintering.blogspot.com/2010/04/surface-finish-finishing-of-dmls-direct.html>.
25. Calignano F, Manfredi D, Ambrosio EP, Iuliano L, Fino P. Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013; 67(9-12): p. 2743-2751.
26. Mega Mechatronics. Shot Peening Process Optimization - Critical Applications. [Online].; 2014 [viitattu 2015 11 24]. Saatavilla: https://www.youtube.com/watch?v=Rx_koGMhrS0.
27. Lambda Technologies Group - Surface Enhancement - Shot Peening. [Online].; 2015 [viitattu 2015 06 03]. Saatavilla: <http://www.lambdatechs.com/shot-peening.html>.
28. Metal-AM. Metal AM.com - Secondary finishing processes. [Online]. [viitattu 2015 09 21]. Saatavilla: http://www.metal-am.com/introduction_to_metal-additive_manufacturing/Secondary.
29. Kennametal - Extrude Hone. Extrude Hone Brochure. [Online]. [viitattu 2016 02 17]. Saatavilla: <http://www.gradning.com/images/digidocs/capabilities.pdf>.
30. Micro Technica Technologies. ADVANCED TECHNOLOGY, MicroStream® - Abrasive Flow Machining (AFM). [Online]. [viitattu 2015 09 25]. Saatavilla: http://www.micro-technica.de/abrasive_flow/Abrasive_Flow_Machining.html.
31. Extrude Hone AFM. Extrude Hone AFM, Surface finishes and materials. [Online]. [viitattu 2015 09 25]. Saatavilla: <http://www.extrudehoneafm.com/process/surface-finishes-and-materials/>.
32. Argawal S. Slideshare, Abrasive Flow Machining, Process Principle, Parameters and Capabilities. [Online].; 2013 [viitattu 2015 09 25]. Saatavilla: <http://www.slideshare.net/sagaragarwal7/abrasive-flow-machining-afm>.
33. Gillespie LK. Cutting Tool Engineering Magazine, Alluring Deburring, Volume 60, Issue 4. [Online].; 2008 [viitattu 2015 09 25]. Saatavilla: <http://www.ctemag.com/pdf/2008/0804-Magnetic.pdf>.
34. Jermann M. Choosing a finishing method for additive manufacturing - Eight options for improving your 3D printed part's look and performance. [Online].; 2014 [viitattu 2015 09 16]. Saatavilla: <http://www.makepartsfast.com/2014/03/6782/choosing-finishing-method-additive-manufacturing/>.
35. MFSA. Quality metal finishing guide - Mass finishing. [Online]. [viitattu 2015 09 18]. Saatavilla: <http://infohouse.p2ric.org/ref/28/27905.pdf>.
36. Marcus S. Mass Finishing: What is it All About?, Products Finishing. [Online].; 2011 [viitattu 2015 08 06]. Saatavilla: <http://www.pfonline.com/articles/mass-finishing-what-is-it-all-about>.
37. Löber L, Flache C, Petters R, Kühn U, Eckert J. Comparison of different post processing technologies for SLM generated 316L steel parts. Rapid Prototyping Journal. 2013; 19(3): p. 173-179.
38. Rosa B, Mognol P, Hascoët Jy. Laser polishing of additive laser manufacturing surfaces. Journal of Laser Applications. 2015; 27(S2): p. S29102-1 - S29102-7.

39. Pauli A. Faster and Smoother Thanks to Laser Polishing, Laser Technik Journal 5/2014. [Online].; 2014 [viitattu 2015 09 29]. Saatavilla: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/latj.201400044/pdf>.
40. Mingareev I, Bonhoff T, El-Sherif AF, Meiners W, Kelbassa I, Biermann T, et al. Femtosecond laser post-processing of metal parts produced by laser additive manufacturing. Journal of Laser Applications. 2013; 25(5): p. 052009-1-052009-4.
41. Alec. www.3ders.org, 3D printer and 3D printing news. [Online].; 2015 [viitattu 2015 09 25]. Saatavilla: <http://www.3ders.org/articles/20150915-tno-hyproline-could-clean-and-polish-100-metal-3d-printed-parts-simultaneously.html>.
42. Extrude Hone. Extrudehone.com. [Online]. [viitattu 2016 02 18]. Saatavilla: <http://extrudehone.com/products/thermal-energy-method-tem>.
43. Łyczkowska E, Szymczyk P, Dybała B, Chlebus E. Chemical polishing of scaffolds made of Ti-6Al-7Nb alloy by additive manufacturing. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2014; 4.
44. Felix C. Additive Manufacturing - A closer look at electropolishing. [Online].; 2013 [viitattu 2015 09 21]. Saatavilla: <http://www.additivemanufacturing.media/articles/a-closer-look-at-electropolishing>.
45. Hensel KB. Electropolishing. In Tucker RE, editor. Universal Metal Finishing Guidebook.: David Hopwood, Elsevier; 2013. p. 830.
46. Teixeira AF. Development of an Electropolishing Method for Titanium Materials. 2011. The Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University Montreal, Quebec, Canada.
47. Chen YZ, He EY, Chen Z. Investigations on precision finishing of space curve meshing wheel by electrochemical brushing process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013; 67(9-12): p. 2387-2394.
48. PlasmaCraft. [Online]. [viitattu 2015 09 25]. Saatavilla: <http://plasmacraft.net/electrolyte-plasma-processing-how-it-works>.
49. Composites and Coatings Group, University of Cambridge. The Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process. [Online]. [viitattu 2015 09 25]. Saatavilla: <http://www.ccg.msm.cam.ac.uk/research-areas/the-plasma-electrolytic-oxidation-peo-process>.
50. Langenhorst G. MoldMaking Technology - Laser Sintering and Milling Working Together. [Online].; 2014 [viitattu 2015 05 22]. Saatavilla: <http://www.moldmakingtechnology.com/articles/laser-sintering-and-milling-working-together>.
51. Zelinski P. Panel Discusses Promise and Challenges of Both Additive and Hybrid Machines, Modern Machine Shop Blog. [Online].; 2015 [viitattu 2016 04 13]. Saatavilla: <http://www.mmsonline.com/blog/post/panel-discusses-promise-and-challenges-of-both-additive-and-hybrid-machines>.
52. Zelinski P. Additive Manufacturing - Highlighting Hybrid Manufacturing. [Online].; 2015 [viitattu 2015 07 02]. Saatavilla: <http://www.additivemanufacturinginsight.com/articles/highlighting-hybrid-manufacturing>.

53. Hybrid Manufacturing Technologies. AMBIT multi-task tools. [Online].; 2016 [viitattu 2016 03 31]. Saatavilla: <http://www.hybridmanutech.com/technology.html>.
54. Optomec. Hybrid Manufacturing. [Online]. [viitattu 2016 03 31]. Saatavilla: <http://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-core-applications/hybrid-manufacturing/>.
55. Mazak Corporation. Mazak INTEGRIX i-400AM. [Online]. [viitattu 2016 03 24]. Saatavilla: <https://www.mazakusa.com/machines/integrix-i-400am/>.
56. DMG MORI. NEW: LASERTEC 4300 3D – Additive production of 3D components to finished parts quality. [Online].; 2015 [viitattu 2016 03 31]. Saatavilla: http://www.dmgmori.com/webspecial/journal_2015_2/en/wp-lasertec.htm.
57. DMG Mori. ALL IN 1: Laser Deposition Welding & Milling -additive Manufacturing in Milling quality. [Online].; 2016 [viitattu 2016 03 31]. Saatavilla: <http://fi.dmgmori.com/products/lasertec/lasertec-additivemanufacturing/lasertec-65-3d>.
58. www.3ders.org. DMG Mori using 3D printer, CNC mill hybrid to produce Porsche parts. [Online].; 2016 [viitattu 2016 03 31]. Saatavilla: <http://www.3ders.org/articles/20160312-dmg-mori-using-3d-printer-cnc-mill-hybrid-to-produce-porsche-parts.html>.
59. IBARMIA. Additive Manufacturing - IBARMIA - Add & Process. [Online].; 2015 [viitattu 2016 3 7]. Saatavilla: https://www.youtube.com/watch?v=w35JxXn_nV4.
60. New machine combines 3D printing and machining. Metal Powder Report. 2015; 70(3): p. 150-151.
61. Molitch-Hou M. Hurco Files Patent for Hybrid CNC-Based 3D Printing. [Online].; 2014 [viitattu 2016 03 31]. Saatavilla: <http://3dprintingindustry.com/2014/07/15/hurco-files-patent-hybrid-cnc-based-3d-printing/>.
62. Zelinski P. Modern Machine Shop, blog - 3 Reasons Why Additive Manufacturing Belongs on a Machine Tool. [Online].; 2015 [viitattu 2015 07 02]. Saatavilla: <http://www.mmsonline.com/blog/post/3-reasons-why-additive-manufacturing-belongs-on-a-machine-tool>.
63. Molitch-Hou M. New Hyproline System Capable of High-Speed Mass Customization of Metal 3D Printed Parts, 3D Printing Industry. [Online].; 2016 [viitattu 2016 05 09]. Saatavilla: <http://3dprintingindustry.com/2016/02/25/new-hyproline-system-capable-of-high-speed-mass-customization-of-metal-3d-printed-parts/>.
64. Alec 3o. TNO's EU-backed Hyproline mass production 3D printing project successfully completed. [Online].; 2016 [viitattu 2016 05 09]. Saatavilla: <http://www.3ders.org/articles/20160225-tnos-eu-backed-hyproline-mass-production-3d-printing-project-successfully-completed.html>.
65. Additive Industries. MetalFAB1: Integrated Industrial Additive Manufacturing Equipment. [Online]. [viitattu 2016 03 24]. Saatavilla: <http://additiveindustries.com/Industrial-am-systems/Metalfab1>.
66. EOS GmbH Electro Optical Systems. EOS M 400 - Industrial 3D Printing System for Metal Manufacturing. [Online].; 2013 [viitattu 2016 05 10]. Saatavilla: <https://www.youtube.com/watch?v=8QA3Url1XJs>.

67. Blastman Robotics Ltd. BLASTMAN ROBOT. [Online]. [viitattu 2016 05 10]. Saatavilla: <http://www.blastman.com/>.
68. Heikkilä T. Vuorovaikutteinen robotiikka – avain piensarjatuotannon automaatio-ongelmiin?, VTT For Industry blog. [Online].; 2016 [viitattu 2016 05 10]. Saatavilla: <https://vttforindustry.com/2016/04/05/vuorovaikutteinen-robotiikka-avain-piensarjatuotannon-automatio-ongelmiin/>.
69. Agarwala M, Bourell D, Beaman J, Marcus H, Barlow J. Post-processing of selective laser sintered metal parts. Rapid Prototyping Journal. 1995; 1(2): p. 36-44.
70. Anonymous. Inside Metal Additive Manufacturing. [Online].; 2014 [viitattu 2015 05 04]. Saatavilla: <http://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/post-processing-of-am-metal-components-hiping>.
71. Työterveyslaitos. KAMAT-tietokortti - Metallin happopeittaus. [Online]. [viitattu 2016 04 05]. Saatavilla: <http://www.ttl.fi/partner/kamat/tietokortteihin/Documents/Metallinhappopeittaus.pdf>.
72. ESAB. Peittausopas ruostumattomien terästen hitseille. [Online].; 2004 [viitattu 2016 04 05]. Saatavilla: http://www.esab.fi/fi/fi/support/documentation/educational/upload/peittausopas_2004.pdf.
73. Anonymous. Leading Manufacturer of Surface Treatment Systems - Surface Treatment using Plasma Treatment and Corona Treatment. [Online]. [viitattu 2015 05 11]. Saatavilla: <http://www.tantec.com/>.
74. Schlesinger M. Electroless and Electrodeposition of Silver. In Schlesinger M, Paunovic M. Modern Electroplating, 5th Edition. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA; 2010. p. 131-138.
75. Anonymous. Inside Metal Additive Manufacturing - X-ray detection limits in Hastelloy X components made with Selective Laser Melting. [Online].; 2015 [viitattu 2015 06 1]. Saatavilla: <http://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/x-ray-detection-limits-in-hastelloy-x-components-made-with-selective-laser-melting>.
76. Tampi T. 3D Printing Industry. [Online].; 2015 [viitattu 2015 04 27]. Saatavilla: <http://3dprintingindustry.com/2015/04/26/nasa-to-evaluate-and-standardize-am-parts-with-innovative-nde-methods/>.

Liitteet

LIITE 1. Metsä-Kortelainen, S. & Vaajoki A. 2016. AM-prosessin integrointi tuotantoon – metalliosien valmistuksen työvaiheet. Työvaiheiden lyhyet kuvaukset, PowerPoint-setti. Jakelu: VTT, Tekes ja projektin yritykset.

LIITE 2. Vaajoki, A., Metsä-Kortelainen, S. & Eklund, P. 2016. Kuulapuhalluksen vaikutus tulostetun metallikappaleen pinnanlaatuun. Luottamuksellinen, kunnes artikkeli "The effect of micropeening on the surface roughness of SLM printed metal specimens" on julkaistu. Jakelu: VTT, Tekes ja projektin yritykset.