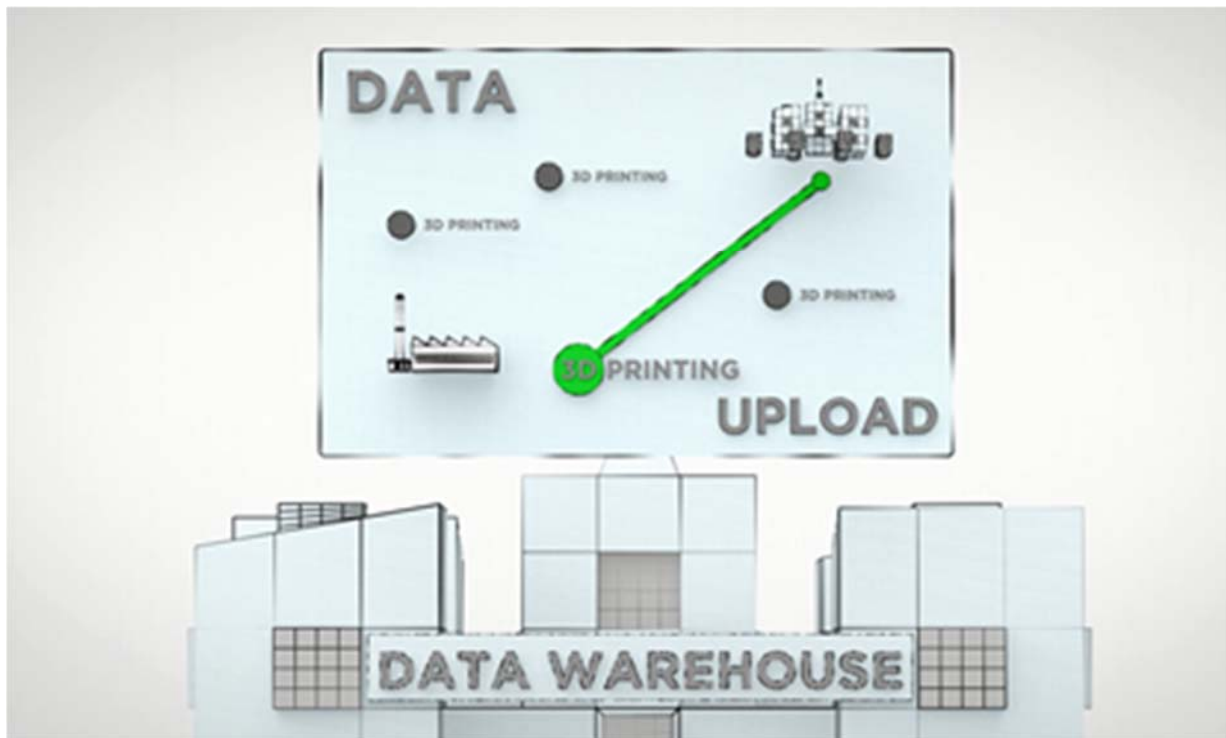


Digitaaliset varaosat



Mika Salmi, Jouni Partanen, Jukka Tuomi, Sergei Chekurov, Roy Björkstrand, Eero Huotilainen,
Kirsi Kukko, Niklas Kretschmar, Jan Akmal, Kalle Jalava, Satu Koivisto, Matti Vartiainen
Aalto-yliopisto

Sini Metsä-Kortelainen, Pasi Puukko, Ari Jussila, Tuomas Riipinen, Joni Reijonen,
Hannu Tanner, Markku Mikkola
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Otsikko	Digitaaliset varaosat Raportti on Aalto-yliopiston ja Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n yhteisjulkaisu		
Tekijät	Mika Salmi, Jouni Partanen, Jukka Tuomi, Sergei Chekurov, Roy Björkstrand, Eero Huutilainen, Kirsi Kukko, Niklas Kretschmar, Jan Akmal, Kalle Jalava, Satu Koivisto, Matti Vartiainen Aalto-yliopisto Sini Metsä-Kortelainen, Pasi Puukko, Ari Jussila, Tuomas Riipinen, Joni Reijonen, Hannu Tanner, Markku Mikkola Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy		
ISBN	ISBN 978-952-60-3745-5 http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-3745-5		
Julkaisuaika	Maaliskuu 2018		
Kieli	Suomi, raportista on tehty myös englanninkielinen käännös		
Sivumäärä	62 s.		
Projektin nimi	Digitaaliset varaosat		
Rahoittajat	Innovaatorahoituskeskus Tekes, Aalto-yliopisto, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy ja projektiin osallistuneet yritykset		
Yhteystiedot	<table><tr><td>Mika Salmi Aalto-yliopisto PL 14300, 00076 Aalto +358 50 512 2746 mika.salmi@aalto.fi</td><td>Sini Metsä-Kortelainen Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy PL 1000, 02044 VTT +358 40 525 7815 sini.metsa-kortelainen@vtt.fi</td></tr></table>	Mika Salmi Aalto-yliopisto PL 14300, 00076 Aalto +358 50 512 2746 mika.salmi@aalto.fi	Sini Metsä-Kortelainen Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy PL 1000, 02044 VTT +358 40 525 7815 sini.metsa-kortelainen@vtt.fi
Mika Salmi Aalto-yliopisto PL 14300, 00076 Aalto +358 50 512 2746 mika.salmi@aalto.fi	Sini Metsä-Kortelainen Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy PL 1000, 02044 VTT +358 40 525 7815 sini.metsa-kortelainen@vtt.fi		

Esipuhe

Tämä raportti on kooste Aalto-yliopiston ja Teknologian tutkimuskeskus VTT:n johtaman ja toteuttaman Digitaaliset varaosat -tutkimusprojektin tuloksista. Projektin päätavoitteena oli luoda digitaalisten varaosien liiketoimintakonsepti ja rakentaa edellytykset toimivalle verkostolle, selvittää 3D-tulostusprosesseilla valmistettujen varaosien suoritus- ja kilpailukykyä nyt ja tulevaisuudessa, tehostaa ja nopeuttaa varaosien tuotantoa ja jakelua uudella toimintamallilla sekä rakentaa digitaalisten varaosien tiekartta.

Tutkimuksessa kerätiin tietoa yritysten nykyisestä tilanteesta ja tulevaisuuden mahdollisuuksista erilaisten työpajojen, haastatteluiden, kansainvälisten tutkijavaihtojen, kyselytutkimusten ja demonstraatiokappaleiden avulla. Projektin puitteissa järjestettiin kaksi erilaista työpajaa sekä loppuseminaari, joihin osallistui yhteensä 175 henkilöä useasta kymmenestä yrityksestä. Lisäksi haastateltiin yli kymmentä suomalaista yritystä monesta eri näkökulmasta sekä tutustuttiin yritysten varaosiin liittyvään liiketoimintaan. Projektin tutkijoita oli kansainvälisessä vaihdossa Politecnico di Milanossa Italiassa, Münchenin teknillisessä yliopistossa Saksassa, sekä EIT Digitalin Münchenin toimipisteellä Saksassa. Hankkeen aikana toteutettiin kansainvälinen kyselytutkimus yrityksille digitaalisten varaosien nykytilanteesta, tulevaisuudesta ja haasteista sekä alan tutkijoille suunnattu kysely 3D-tulostuksen kehitysnäkymistä. Kyselyistä saadun tiedon perusteella voitiin arvioida digitaalisten varaosien nykytilanne; miten ja millä nopeudella kehitystä tapahtuu ja mitkä ovat tulevaisuuden tärkeimmät kehityskohteet. Demonstraatiokappaleiden avulla havainnollistettiin 3D-tulostuksella toteutettujen varaosien valmistusprosessia, selvitettiin teknologioiden nykyistä suoritus- ja kilpailukykyä ja vertailtiin tuloksia perinteisesti valmistettuihin osiin.

Hanke alkoi 1.1.2016 ja päättyi 31.12.2017. Projektia rahoittivat ja ohjasivat Aalto-yliopiston ja VTT:n lisäksi Innovaatorahoituskeskus Tekes, 3D Online Factory Oy, 3DTech Oy, ABB Oy Drives, AM Finland Oy, Hetitec Oy, Kone Oyj, Laserle Oy, Materflow Oy, Grano 3D Oy, Patria Aviation Oy, Raute Oyj, Rolls-Royce Oy Ab, Sacotec Components Oy ja Wärtsilä Finland Oy. Hankkeen yhteistyökumppanina toimi Teknologiateollisuus ry.

Projektissa mukana olleet yritysten edustajat ja erityisesti ohjausryhmän jäsenet sekä ja erilaisiin tilaisuuksiin osallistuneet henkilöt antoivat arvokasta tietoa ja jakoivat näkemyksiään digitaalisten varaosien nykyisestä tilanteesta sekä tulevaisuuden mahdollisuuksista. Hankkeen toteutus olisi jäänyt varsin yleiselle tasolle ilman tätä merkittävää yritysten panosta, emmekä olisi päässeet pureutumaan varaosamaailman koukeroihin riittävän perusteellisesti. Haluammekin esittää kyseisille henkilöille suuret kiitokset ja toivomme, että hankkeessa luoto tutkimustieto ja tämä raportti antavat hyvän lähtökohdan viedä digitaalisia varaosia eteenpäin erilaisissa yrityksissä ja organisaatioissa.

Espoossa 1.3.2018

Projektin tutkijat

Sisältö

Esipuhe	1
Sisältö	2
1. Mitä ovat digitaaliset varaosat?	3
2. Varaosien nykytilanne	5
Varaosien valmistus	5
Huoltotoiminta	5
Nykyisen toimintamallin haasteet	6
3. Digitaalisten varaosien nykytilanne	8
3D-tulostus digitaalisten varaosien mahdollistajana	8
3D-tulostettavien varaosien tunnistaminen ja luokittelu	10
3D-tulostuksen kustannusten arviointityökalu	13
Digitaalisten varaosien vaatimukset	15
4. Tapaustutkimuksia digitaalisista varaosista	19
Lämpölevy	19
Istukkarengas	23
Kiinnitystappi ja materiaalitestit	26
Pienoishelikopterin lapakeskiö	30
Ruohotrimmerin käynnistysratas	31
Älykkäät varaosat	32
Elektroniikkakotelo	34
5. Digitaalisten varaosien vaikutukset toimintamalleihin ja järjestelmiin	37
Verkosto- ja liiketoimintamallit	37
Yhteistyö, kompetenssit ja johtaminen	40
ICT-järjestelmät	40
6. Digitaalisten varaosien tulevaisuus	43
3D-tulostuksen kehittyminen – ennuste	43
Digitaalisten varaosien tulevaisuudennäkymät	45
Tulevaisuuden varaosakonseptit	46
Digitaalisten varaosien tiekartta	47
7. Yhteenveto	48
8. Liitteet	49
Liite 1. Digitaaliset varaosat -projektin demonstraatio-osat.	50
Liite 2. Inconel 718 mikrorakennekuvat.	56
Liite 3. Inconel 718 SEM kuvat.	59
Liite 4. Digitaaliset varaosat -projektin julkaisuja.	62

1. Mitä ovat digitaaliset varaosat?

Kasvava osa monen suomalaisen yrityksen liiketoiminnasta syntyy omien ja kilpailijoiden myymien laitteiden huollosta ja tähän linkittyvästä muusta palveluliiketoiminnasta. Varsinkin suhdanneherkillä aloilla palveluliiketoiminnan merkitys on ymmärretty suhdanteita tasaavana toimintona ja sen osuutta liiketoiminnasta pyritään kasvattamaan edelleen. Alkuperäisen valmistajan (OEM, Original Equipment Manufacturer) varaosat näyttelevät keskeistä roolia huoltotoiminnassa. Perinteisesti varaosia on valmistettu varastoon vaihtelevan suuruisia eriä, mistä johtuen varaosia joudutaan varastoimaan pitkiäkin aikoja. Varaosiin sitoutuu paljon pääomaa ja on hyvin hankalaa ennakoita, milloin ja miten paljon varaosia tarvitaan. Näin on mahdollista, että osa valmistetuista varaosista jää kokonaan käyttämättä. Monet suomalaiset yritykset valmistavat pitkälle räätälöityjä tuotteita, mikä kasvattaa varaosien määrää entisestään ja sitä kautta tuo haastavuutta varastohallintaan. Yhä nopeutuvassa kehityksessä on myös mahdollista, että varastossa olevat varaosat eivät ole enää riittävän suorituskykyisiä siinä vaiheessa, kun niitä tarvitaan. Usein yrityksillä on myös velvoite tarjota huoltopalvelua koneisiin ja laitteisiin, jotka ovat jo niin vanhoja, että niihin ei ole varaosia enää olemassa. Nykyisellään näiden osien valmistaminen on kallista ja hidasta, varsinkin jos niiden valmistaminen vaatii ensin työkalujen ja muottien tekemisen.

Digitalisoituminen on megatrendi, jonka merkitys valmistavassa teollisuudessa tulee lisääntymään voimakkaasti. Teollisuuden digitalisoitumisen myötä syntyy jatkuvasti uusia liiketoimintamahdollisuuksia sekä työtapoja ja perinteinen teollisuuden toimijakenttä muuttuu radikaalisti. Etenkin uuden teknologisen kehityksen, kuten 3D-tulostuksen, ympärille muodostuu uusia liiketoimintamahdollisuuksia.

Digitaaliset varaosat on konsepti, jossa varaosat ja niihin liittyvä tieto siirretään ja säilytetään digitaalisesti, ja jossa varaosan valmistus tapahtuu esimerkiksi 3D-tulostamalla tarpeen mukaan, yleensä lähellä loppukäyttäjää. Tällä hetkellä ainakin noin 5 % yritysten varaosista soveltuu digitaalisiksi varaosiksi. Digitaalisilla varaosilla voidaan tehostaa varaosapalveluliiketoimintaa sekä saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä: varaosien saatavuus paranee, toimitusajat lyhenevät sekä yksittäiskappaleiden tai pienten sarjojen valmistamisesta tulee kustannustehokasta. Valmistuskustannusten ohella tärkeää on hahmottaa myös seisokkiajan kustannus, joka voi muodostua niin merkittäväksi, ettei itse varaosan hinnalla ole juuri merkitystä.

Digitaalisten varaosien valmistaminen on tarvittaessa hyvin nopeaa, koska työkaluja ei tarvita ja kaikki tieto osasta on saatavilla digitaalisessa muodossa. Digitaalinen varaosa ei vie tilaa fyysisestä varastosta. Varaosia voidaan valmistaa hajautetusti, jolloin toimitusajat ja kuljetusmatkat lyhenevät. Digitaaliset varaosat voivat vähentää myös tullaukseen liittyviä kustannuksia ja työpanosta. Digitaalinen valmistus mahdollistaa osien muokkaamisen tarpeen mukaan, joten erilaisia tuoteversioita tai päivityksiä voi olla lukemattomia määriä. Varaosa saatetaan myös suunnitella uudelleen 3D-tulostukselle optimoituna, sillä kullakin valmistustekniikalla on oma kustannusoptimaalinen rakenne.

Suomen 3D-tulostusyhteisöissä tehdään kasvavassa määrin erilaisia varaosia (auton osat, koneiden ja laitteiden osat, kuluttajatuotteet). Syitä 3D-tulostuksen käytölle ovat tiettyjen tuotteiden tyyppiviat, varaosien huono tai olematon saatavuus sekä personoitujen osien tarve. Yleensä

valmistetaan yksittäisiä osia tai useampia osia varastoon, mutta myös piensarjoja on tehty ja niiden valmistamiseen pyritään.

Potentiaalisimpia ajureita digitaalisille varaosille lähitulevaisuudessa ovat kriisivalmiuden parempi ylläpito, perinteisten valuosien valmistaminen nopeasti ja kustannustehokkaasti, älyn integrointi osiin, piensarjavalmistus sekä optimoitujen osien valmistaminen. Vanhojen laitteiden ja koneiden hitaasti kiertävien varaosien 3D-tulostus nähdään erityisen kiinnostavana, mutta toteutusta rajoittaa se, että osista ei ole olemassa 3D-malleja, joiden tekeminen vaatii työtä ja resursseja. Digitaalisiin varaosiin siirtymistä edistävät 3D-tulostuksen kokorajoitteiden väheneminen, tulostusnopeuden kasvu, tulostusmateriaalien laajempi valikoima ja edullisemmat hinnat sekä sertifioidut tulostusmateriaalit, -laitteet ja jopa -operaattorit. Digitaalisten varaosien verkoston kautta voidaan taata laajempi materiaalien ja osien saatavuus.

Digitaalisen varaosat -konsepti ei tuo pelkästään vaihtoehtoja pienille sarjoille tai yksittäiskappaleille soveltuvaa valmistustapaa vaan sen ansaintalogiikka voi poiketa tunnetusta. Fyysisen varaosan sijaan myyntiartikkeleina voivat mm. olla valmistusinformaatio tai digitaalisten varaosien laadunvarmennus. Digitaaliset varaosat mahdollistavat myös uusien toimijoiden, kuten 3D-tulostuspalveluyritysten mukaantulon globaaliin varaosaliiketoimintaan. On myös mahdollista, että ns. disruptiiviset toimijat tulevat mukaan varaosaliiketoimintaan samoin kuin muilla digitalisoituneilla aloilla on käynyt. Disruptiiviset toimijat voivat ryhtyä välittämään niin osien valmistamiseen liittyvää tietoa kuin valmistuspalveluita, mikä mullistaa koko varaosaliiketoiminnan ja siihen liittyvän logistiikan sekä transaktiotavat.

Tarkastelemme tässä raportissa varaosaliiketoiminnan nykytilannetta, 3D-tulostuksen mahdollisuuksia varaosien valmistuksessa ja digitaalisten varaosien vaikutuksia toimintamalleihin ja järjestelmiin. Tavoitteena tuoda esiin toiminnot ja tekijät, joihin digitaalisilla varaosilla on suurimmat vaikutukset ja keskeisimmät hyödyt.

2. Varaosien nykytilanne

Varaosien valmistus

Yleisesti suurin osa varaosista valmistetaan alihankintana, mutta strategisesti tärkeitä osia tai osia, joihin liittyy tärkeitä suunnittelutietoja, ei haluta antaa yrityksestä ulos valmistettavaksi. Erityisesti kriittisiksi luokiteltujen alkuperäisosien kopiointi saattaa muodostua riskiksi. Osa varaosista valmistetaan samalla kun valmistetaan varsinaiset tuotteet ja osa tehdään erillistilauksena myöhemmin. Prosessiin saattaa liittyä myös valmistusprosesseissa tarvittavien työkalujen säilytys ja omistus. Pääsääntöisesti varaosien valmistukseen tarvittavat erikoistyökalut, kuten muotit, ovat OEM:n omistuksessa. Kaikkia alihankkijalla olevia työkaluja ei kuitenkaan ole kartoitettu, joten on epäselvää, paljonko työkalumassaa yleensä on olemassa. Työkalujen ja tuotekuvien puuttuessa tulee varaosien valmistamisesta ongelmallista.

Yksittäisiä varaosia, joita tarvitaan kiireellisesti, valmistetaan itse tai lähellä sijaitsevilla alihankkijoilla. Suuri osa varaosista on kuitenkin vakiokomponentteja, joita valmistetaan OEM-tyyppisesti suurissa tuotantolaitoksissa pitkienkin ketjujen päässä. Tällöin varaosamyyntiä harjoittavan yrityksen osuudeksi arvoketjusta jää nimikkeistön hallinta, laadun verifiointi ja tuotevastuu. Ongelmallista varaosavalmistuksessa ja myynnissä on myös se, että joskus OEM- tai jälkimarkkinaosia käytetään huolloissa ohi laitteen myyneen yrityksen oman varaosaliiketoiminnan.

Laitteeseen asennettavat komponentit voivat ketjuuntuneesta valmistuksesta johtuen olla kohutuullisen laajoja, kokonaisen teknisen toiminnon suorittavia kokoonpanoja. Tällöin myös varaosa on logistiikasta ja nimikkeiden hallinnasta johtuen sama kokoonpano, vaikka kokoonpanosta olisi rikkoutunut vain pieni osa. Tällaiset laajemmat kokonaisuudet on osin valmistettu järjestelminä. Järjestelmävalmistuksessa päämies antaa tarvittavan speksin ja toimittaja suunnittelee ja valmistaa laitteen. Tällöin myös varaosiin liittyvä tietotaito on alihankkijalla.

Huoltotoiminta

Suurten laitosten kanssa tehdään huoltosopimuksia, joissa laitteen valmistaja takaa myydyin laitteen toimivuuden oman huolto- ja korjaustoimintansa kautta. Taustalla on investointiliiketoiminnan tulorakenteen vakauttaminen tasaisella huoltoliiketoiminnalla.

Huoltovarmuuden takaamiseksi laitoksille perustetaan omia varaosavarastoja, joiden kustannusmerkitys ei ole täysin sama muun varaosakannan kanssa. Näitä osia varastoimalla varmistetaan ansaintalogiikan toimivuus sopimuksissa, jotka perustuvat toimintavarmuuden takaamiseen. Hieman vastaavaa periaatetta esiintyy huoltoagenttien omatoimisissa dokumentoimattomissa varaosavarastoissa, joissa huoltomiehet säilövät tietyn määrän tarpeelliseksi katsomiaan osia, joita tietävät tarvitsevansa tulevaisuudessa.

Nykyisen toimintamallin haasteet

Prosessin pysähtyminen ja odottamattomat rikkoontumiset

Tehtaan tai tuotantoprosessin pysähtyminen voi aiheuttaa todella suuria tuotantomenetyksiä. Tällaisissa tapauksissa varaosan hinta menettää nopeasti merkityksen ja toimitusajasta tulee tärkein tekijä. Rikkoutumisiin varaudutaan varastoimalla tietty määrä tunnetusti kriittisiä osia. Hankalia ovat erityisesti ennakoimattomat rikkoontumiset (VED Vital, Essential and Desirable varastointiluokittelu), jolloin osaa ei ole varastossa ja osan saaminen voi kestää kuukausia. Pitkät toimitusajat liittyvät usein sarjatuotantotyyppisiin osiin, joiden hankinta yksittäiskappaleina saattaa edellyttää toisen osan tuotantoprosessin alasajoa. Yllättävistä osien rikkoontumisista seuraavat suuret taloudelliset menetykset saattavat johtaa kiiretilanteisiin, joissa tapahtuu uusia virheitä. Kiiretilanteessa saatetaan esimerkiksi vahingossa tilata tai toimittaa väärä osa. Kiire voi myös osaltaan aiheuttaa osien valmistuksessa laatupoikkeamia.

Toimitusajat

Varastoista löytyvät varaosat pystytään pääosin toimittamaan nopeasti muutamassa päivässä tai viikossa mihin tahansa. Sen sijaan varastoista uupuvien osien toimitusajat vaihtelevat noin viikosta jopa vuoteen. Varaosat saatetaan myös keräillä yhdeksi lähetykseksi, jolloin kaikki osat odottavat viimeisenä saapuvaa myöhässä olevaa osaa. Pitkät toimitusajat saattavat johtua osan valmistuksessa käytettävästä sarjatuotantoprosessista, jonka kapasiteetti on myyty täyteen vuodeksi eteenpäin, eikä tuotantoväleihin ei helposti oteta pientoimituksia. Pääasiassa sovituisissa toimitusajoissa pysytään hyvin silloin, kun osa on varastossa tai jos se saadaan nopeasti valmistettua itse tai alihankkijoiden toimesta. Joissain tapauksissa myös oma organisaatio ja sen logistiikkaprosessit saattavat olla toimitusaikaviiveiden takana.

On mahdollista, että kolmannen osapuolen tiettyä komponenttia ei ole enää saatavilla, jolloin joudutaan käyttämään korvaavia tuotteita tai uudelleensuunnittelua. Uudelleensuunnittelua tehdään modernisointimielessä satunnaisesti jo ennakkoon, mutta kokonaisuuteen suhteutettuna toiminta on vähäistä.

Minimierät

Monelle tilattavalle osalle tai komponentille saattaa olla määritetty minimi tilausmäärä. Tämä koskee etenkin kestopuoteilla suursarjaprosesseissa valmistettavia kappaleita tai esimerkiksi harvinaisella värikoodilla valmistettuja kappaleita. Kappaleita tarvitaan ehkä vain muutamia, mutta minimi tilausmäärä on vähintään satoja tai tuhansia. Vaikka tilausarvo ei absoluuttisesti olisi suuri, kumuloituu sidottu pääoma kuitenkin kokonaisuutena varaston hyllyille.

Varaosien halpavalmistus

Yleisimmistä varaosista ilmaantuu markkinoille kopiotuotteita, joiden hinta ja laatu vaihtelevat. Kopio-osat ovat haitallisia nykyisten varaosaliiketoimintamallien kannalta, sillä ne heikentävät korkean katteen omaavien alkuperäisosien myynnin kannattavuutta. Kopioinnin vähentämiseksi osiin voidaan tietoisesti suunnitella sellaisia yksityiskohtia, jotka estävät muiden kuin alkuperäisosien käytön. Myös takuuehdoilla, laatuerojen korostamisella tai muuten sopimusteitse voidaan rajoittaa kopio-osien käyttöä.

Alaskirjaukset

Varaosavarastoihin liittyy aina alaskirjauksen riski. Varaosien tarve on mahdollisesti arvioitu liian suureksi ja tuotteiden vanhetessa varaosat joudutaan hävittämään. Jotkut osat (esimerkiksi tiivisteet, elektroniikka, akut) vanhenevat ajan kuluessa, joten niillä on siten rajattu varastointi-ikä. Myös ohjelmistoja sisältävät komponentit voivat vanhentua ohjelmiston osalta, mistä seuraa, että ohjelmistoja voidaan joutua päivittämään. On myös olemassa varaosia, jotka joudutaan virroittamaan säännöllisin väliajoin, jotta niiden sisältämät elektroniset komponentit eivät vaurioidu säilytyksessä.

Vanhojen tuotteiden tuki

Monissa tuotteissa valmistaja lupaa saatavuustakuun, toisin sanoen varaosien olevan saatavilla tietyn sovitun ajanjakson. Aika voi vaihdella muutamista vuosista useisiin kymmeneen vuosiin. Monella yrityksellä pitkä saatavuusaika johtaa korkeaan tuotevarianttien määrään erityisesti tilanteissa, joissa yritykseen on yhdistetty muita yrityksiä. Monista vanhoista varaosista ei ole olemassa enää suunnittelutietoja tai ne ovat erittäin hankalasti ja työläästi saatavissa. Osa näistä tiedoista voi myös olla alihankkijoilla, joita ei ole enää olemassa. Osan dokumentoimattomuus voi johtaa käsityönä tehtävän kopion tekemiseen paikallisesti.

Sertifikaatit, dokumentointi ja nimikehallinta

Monet osat tai niiden valmistajat ovat sertifioituja tiettyjen vaatimusten mukaan. Tämä rajaa osien toimittajaksi ne yritykset, joilla on vaadittu sertifikaatti. Osien dokumentointi ja hallinta voi olla vaativaa tilanteissa, joissa varaosien määrä on kasvanut suureksi. Perinteisesti tietoa on säilytetty mikrofilmeillä, mutta digitaaliset tietojärjestelmät ovat pitkälti syrjäyttämässä niitä. Vanhojen varaosien tiedot saattavat siltikin löytyä vain mikrofilmeiltä. Saman osan eri versiot saattavat esiintyä useilla nimikkeillä, mikä kasvattaa turhaan varaosakantaa.

Nimikkeitä hallinnoidaan tyypillisesti keskitetysti ERP-järjestelmissä (Enterprise Resource Planning), joissa nimikkeeseen on liitetty vaihteleva määrä informaatiota. Mikäli varaosakantaa hallinnoidaan erillisessä järjestelmässä, on nimikkeet ja informaation alijoukko kopioitu sinne ERP-järjestelmästä. Esimerkiksi valmistusinformaation löytäminen tämän tyyppisestä järjestelmästä on tyypillisesti vaikeaa. Varaosien nimikkeissä on päällekkäisyyksiä, jotka periytyvät tuotesuunnittelusta. Nämä päällekkäisyydet kohdistuvat usein halpoihin vakiokomponentteihin (tappeihin, sokkiin), joiden nimikkeistömäärä on luonnollisesti hyvin laaja.

Varastoihin sitoutunut pääoma

Varaosaliikeytoiminnassa pyritään yleisesti keskitettyyn varastointiin, jossa suurin osa varaosista löytyy päävarastosta. Varastoihin sitoutuu merkittävä määrä pääomaa, minkä vuoksi varastoitavien tuotteiden määrä pyritään pitämään mahdollisimman pienenä, mutta kuitenkin sellaisena, että toimitusajat pysyvät suunniteltuina. Koska tulevaisuuden ennakointi on vaikeaa, on keskittyneessä varastomallissa aina riski, että joidenkin osien toimitusajat ovat pitkiä ja toisaalta alaskirjauksia joudutaan tekemään. Osien keskittäminen ja osien tilausbyrokratia johtavat tilanteisiin, joissa myös huollolla on omia pieniä oheisvarastoja, joista löytyvät useimmin tarvittavat varaosat. Huollon oma varasto voi olla tarkoituksenmukainen nopeasti tarvittavien osien kanta tai sitten epävirallinen, huoltomiesten parhaaksi näkemä käytänte.

3. Digitaalisten varaosien nykytilanne

3D-tulostusta hyödynnetään yhä enemmän lopputuotteiden valmistamisessa, mikä on seurausta 3D-tulostuslaitteiden kehittämisestä sekä materiaalivalikoiman laajentumisesta. Maailmalla on myös jo joitakin yrityksiä mm. Daimler ja Deutsche Bahn, jotka ovat ryhtyneet hyödyntämään 3D-tulostusta varaosien valmistamisessa.

Varaosia on kuitenkin vain harvoin tarkoitettu valmistettavaksi 3D-tulostamalla, mikä aiheuttaa joitakin haasteita etenkin valmistukseen liittyvien prosessien automatisoinnissa: 3D-tulostettaviksi soveltuvia osia voi olla vaikea löytää varaosakirjastoista, valmistukseen liittyvä tieto on puutteellista, osan valmistamiseen joudutaan käyttämään korvaavia materiaaleja ja varsinkin metallisosien jälkikäsittelyprosessit pitäisi voida huomioida jo 3D-mallia laadittaessa tai muokattaessa.

Tämän johdosta nykytilanteessa 3D-tulostettavia varaosia on lähestyttävä erityisestä näkökulmasta – on selvittävä osien soveltuvuus tälle valmistusmenetelmälle, tarkasteltava uudelleensuunnittelun mahdollisuudet sekä arvioitava valmistustavan vaihtamisen taloudelliset vaikutukset. Alla taustoitetaan teknologia- ja materiaalivalinnan merkitystä sekä selvitetään tapoja ja keinoja tehdä jälkikäteisarviointia varaosan 3D-tulostettavuudesta.

3D-tulostus digitaalisten varaosien mahdollistajana

3D-tulostusteknologiat

Erilaisiin 3D-tulostusteknologioihin perustuvia tulostuslaitteita on kaupallisesti saatavilla runsaasti, ja markkinoille tulee koko ajan lisää tarjontaa sekä ajoittain uusia innovaatioita. Suurin osa laitteista soveltuu tällä hetkellä vain yhden materiaalityypin (pääasiassa metallit, muovit tai keraamit) tulostamiseen. Toinen tyypillinen piirre on, että osien viimeistelyyn liittyvät jälkikäsittelyt tehdään vielä pääsääntöisesti erillisissä prosesseissa. Markkinoilla on myös hybridilaitteita, joissa ainetta lisäävä sekä ainetta poistava teknologia on yhdistetty samaan laitteeseen. Varaosien valmistamisessa 3D-tulostamalla onkin tunnettava tarkasti käytettävä 3D-tulostusteknologia, joka pitkälti määrittelee käytettävissä olevat materiaalit sekä tulostettujen kappaleiden laadun.

Yleisimmin käytetyt teknologiat metallin 3D-tulostuksessa ovat jauhepetisulatus sekä suorakerrostus. Jauhepetisulatuksessa osa valmistetaan kerros kerrokselta jauhepedissä, jossa jauheen sulattamiseen käytetään joko laseria tai elektronisuihkua. Suorakerrostuksessa materiaalia syötetään samanaikaisesti energian kanssa joko jauheena tai lankana, joka sulatetaan laserin, elektronisuihkon tai valokaaren avulla. Kaksivaiheisena prosessina käytetään myös teknologioita, jossa metallijauheesta muodostetaan eri tavoin hauras/harva rakenne, joka tiivistetään metallikappaleeksi jälkikäsittelyuunissa. Lisäksi on esitelty termiseen ruiskutukseen perustuva teknologia. Edellä mainituista teknologioista jauhepetisulatus on tällä hetkellä yleisemmin käytössä erityisesti siksi, että sen etuina suorakerrostukseen nähden ovat tulostettujen kappaleiden parempi mittatarkkuus ja pinnanlaatu sekä mahdollisuus valmistaa todella monimutkaisia muotoja. Suorakerrostus soveltuu etenkin suurikokoisten kappaleiden valmistamiseen, koska sen etuina ovat korkea tulostusnopeus ja mahdollisuus yhdistää eri materiaaleja.

Muovimateriaalien tulostamiseen on useita eri teknologiakonstruktioita. Tunnetuin lienee materiaalin pursotus (FDM, Fused Deposition Modeling), jossa yleisimmin muovilankaa (filamenttia) sulattamalla ja ohjaamalla geometrian mukaan muodostetaan kappale kerros kerrokselta. Tuotantomielessä tärkein teknologia on (muovin) jauhepetisulatus. Siinä muovijauhetta sulatetaan valikoidusti ja muodostetaan kappale täysin ilman jälkikäsittelyä vaativia tukirakenteita, mikä on suuri etu kappalekohtaisten kustannusten alentamisessa. Hieman vastaavanlaisesti voidaan tehdä kappaleita muovijauheesta ruiskuttamalla sidosainetta. Tällöin kappale ei muodostu sulattamalla vaan kemiallisen reaktion kautta. Kolmas hieman erilainen ja erityisesti viime vuosien kehitysharppausten johdosta potentiaalinen teknologia on valokovetus altaassa (ent. SLA stereolithography). Prosessissa nestemäistä valokovettuvaa polymeeriä kovetetaan UV-valolla valikoidusti muodostaen kappale. Ns. CLIP-innovaatio (Continuous Liquid Interphase Printing) on nopeuttanut prosessia huomattavasti, mikä yhdistettynä menetelmän verrattain helppoon automatisointiin on johtanut robotisoitujen minitehtaiden esittelyyn. Rakennuskammion koko on materiaalin pursotus- ja valokovetus altaassa -teknologioissa helposti skaalattavissa suureksikin.

3D-tulostusmateriaalit

3D-tulostuslaitteille on tarjolla monenlaisia, lähinnä muovi- ja metallimateriaaleja, joita on kuitenkin tarjolla huomattavasti vähemmän kuin materiaaleja, joita perinteisillä valmistusteknologioilla voidaan prosessoida. 3D-tulostettaessa varaosia, joudutaankin tällä hetkellä usein valitsemaan korvaava materiaali, joka on mahdollisimman paljon alkuperäisen materiaalin kaltainen. On myös huomioitava, että vaikka 3D-tulostusmateriaalivalikoimasta löytyisikin täysin alkuperäistä vastaava materiaali, voivat 3D-tulostettujen osien ominaisuudet poiketa monella tapaa alkuperäisestä esim. valamalla tehdyn osan ominaisuuksista, sillä 3D-tulostusteknologiat tuottavat kappaleisiin aivan omanlaisensa mikrorakenteen sekä pinnanlaadun.

Metallitulostimille on tällä hetkellä tarjolla erilaisia kaupallisia materiaaleja, jotka ovat suurimmilta osin rauta-, alumiini-, nikkeli-, kupari-, koboltti- ja titaanihohjaisia seoksia. Jauhepetisulatuksessa jauheen oikea kokojakauma sekä partikkeleiden muoto ovat tärkeitä tekijöitä juoksevuuden ja tulostuslaadun takaamiseksi, minkä vuoksi lähes kaikki jauheet valmistetaan kaasuatomisoimalla. Haasteita lasersulatukselle asettavat jauhepetilaitteiden laserin aallonpituutta voimakkaasti heijastavat materiaalit, kuten puhdas kupari ja alumiini. Heijastumista voidaan kompensoida nostamalla laserin tehoa, joskin tämä ratkaisu toimii vain suuritehoisilla lasereilla. Tutkimuskäyttöön on jo myös kehitetty jauhepetilaitteita, joissa käytetään lyhyemmän aallonpituuden omaavaa vihreää laseria, jota esimerkiksi puhdas kupari heijastaa huomattavasti vähemmän.

3D-tulostuksessa käytettäviä muovimateriaaleja on lukematon joukko, sillä polymeerien ominaisuuksia voidaan säätää kemiallisella koostumuksella monipuolisesti. 3D-tulostettavat muovit jakaantuvat karkeasti kolmeen päätyyppiin: lankoihin, pulverimaisiin ja nestemäisiin UV-kovettuviin polymeereihin. Materiaalin pursotuksessa yleisimmät muovit (lanka) ovat ABS tai PLA. Nämä tarjoavatkin riittävät ominaisuudet koneenrakennuksessa yleisimmin käytettyihin kohteisiin, mutta saatavilla on hyvin monenlaisia seoksia, kuten hiili- tai puukuituja seostettuina muovilankoihin monipuolistaen niin esteettisiä kuin teknisiä ominaisuuksia. Tässä teknologi-

assa on materiaalinvalinnassa huomioitava materiaalin taipumus anisotrooppisiin lujuusominaisuuksiin: tyypillisesti z-suuntainen lujuus on pienempi kerrosten delaminoitumisesta johtuen.

Muovin jauhepetisulatuksessa käytetyt materiaalit ovat yleisimmin erilaisia polyamideja, joilla on poikkeuksellisen pieni kiinteä-sula –lämpötilaporras, mikä on menetelmälle edullinen ominaisuus. Myös polyamideja seostetaan erilaisten teknisten ominaisuuksien saavuttamiseksi. Seosaineina voi käyttää erilaisia täyteaineita, kuten esimerkiksi alumiinia. Sekä materiaalin pursotukseen, että jauhepetimenetelmään on saatavilla myös korkeiden ominaisuuksien muoveja kuten PEEK ja ULTEM. Valokovettuvia polymeerejä on myös laaja kirjo – pehmeistä koviin ja läpinäkyvistä värjättyihin. Tyypillisesti muovimateriaalien vetolujuus on 25–50 MPa, mutta esimerkiksi PEEK ylittää 95 MPa:iin.

3D-tulostusprosessien laadunvarmistus

Kehitys 3D-tulostustekniikoiden saralla on nopeaa, mikä näkyy laitteissa muun muassa lisääntyneenä tulostusnopeutena, tulostuskammion koon kasvuna sekä laadunhallintajärjestelmien saatavuutena. Laadunhallinta onkin yksi merkittävimmistä 3D-tulostusteknologioihin liittyvistä kysymyksistä, sillä lopputuotteiden laadunvarmistus on edellytys teolliselle tuotannolle. Laadunhallinnan tulee kattaa koko prosessiketju materiaalin valmistuksesta tulostetuille kappaleille tehtäviin jälkikäsittelyihin. Haasteelliseksi laadunvarmistuksen tekee 3D-tulostukseen liittyvien prosessiparametrien suuri määrä ja niiden keskinäinen vuorovaikutus. 3D-tulostustekniikoille ei ole vielä olemassa yhtenäisiä ja yksiselitteisiä laadunhallinnan menettelytapoja, mutta teknologioiden kehittyminen ja standardointi ovat lisänneet laadunhallintaan liittyviä mahdollisuuksia. Julkaistuja standardeja on jo useita, ja niiden määrä kasvaa jatkuvasti ASTM- ja ISO-standardoimisjärjestöjen perustamien lisäävään valmistukseen erikoistuneiden työryhmien ansiosta.

Suurimmat jauhepetilaitteiden toimittajat ovat kehittäneet prosessimonitorointijärjestelmiä, joilla mahdolliset viat voidaan havaita valmistusprosessin aikana. Jauhepetiä voidaan monitoroida prosessin aikana mittaamalla sulavyöhykkeen emittoimaa säteilyä esimerkiksi fotoilmäsimen, spektrometrin, CCD-kameran tai lämpökameran avulla. Mitattu säteily muutetaan algoritmien avulla laadunhallinnassa käytettäväksi informaatioksi. Eri tekniikoilla saadaan informaatiota prosessista liittyen esimerkiksi sulavyöhykkeen geometriaan, lämpötilaan sekä laserin intensiteettiin. Nykyiset monitorointijärjestelmät ovat toiminnaltaan passiivisia, eli ne eivät tee muutoksia prosessiparametreihin automaattisesti. Adaptiiviset monitorointijärjestelmät, jotka reagoivat havaittuihin valmistusvikoihin automaattisesti, ovat kehitteillä olevaa teknologiaa ja seuraava askel laadunhallinnassa.

3D-tulostettavien varaosien tunnistaminen ja luokittelu

Oleellista digitaalisen varaosaliiketoiminnan kannalta on tunnistaa potentiaaliset, 3D-tulostukselle soveltuvat osat yritysten varaosakirjastoista. Varaosan 3D-tulostettavuuden arviointi voidaan jakaa kahteen pääkriteeriin: onko osa teknologisesti mahdollista 3D-tulostaa ja onko 3D-tulostaminen myös liiketaloudellisesti kannattavaa. Merkittävimmät teknologiset rajoitteet ovat varaosan materiaali ja koko. Vain yhdestä materiaalista koostuva metallinen tai muovinen osa voidaan 3D-tulostaa luotettavasti loppukäyttöön soveltuvasti. Saatavilla olevien 3D-tulostimien

rakennuskammioiden koko määrittää tulostettavan kappaleen maksimimitat ja mitä pienempi osa, sen nopeampaa ja halvempaa 3D-tulostaminen on. Lisäksi osasta tulee olla 3D-malli, mutta mallin puuttuminen ei ole ylitsepääsemätön este, sillä sen voi aina tehdä esimerkiksi 3D-skannaamalla tai piirustusten avulla. 3D-tulostuksella saavutettavat toleranssit ja pinnanlaatu eivät välttämättä ole riittävät jokaiseen sovellukseen, jolloin 3D-tulostettua osaa pitää jälkityöstää esimerkiksi koneistamalla.

Varaosan 3D-tulostettavuuden liiketaloudellista kannattavuutta arvioidessa pelkkä valmistuskustannuksen vertailu johtaa harhaan. Varaosan kustannukset koostuvat osan valmistus- tai ostohinnan lisäksi mm. varastoinnista, kuljetuksesta, työkalukustannuksista ja osan puuttuessa tai toimituksen kestäessä siitä, että laite on epäkunnossa (seisokkiaika). Kustannukset eivät ole ainoa merkittävä tekijä, sillä varaosapalvelun pitäminen korkeatasoisena on myös tärkeää. Perinteisessä varaosien toimitusketjussa joudutaankin tekemään kompromisseja, sillä korkea palvelutaso edellyttää suurta ja kallista varaosavarastoa. Siirtyminen digitaliseen toimitusketjuun, jossa varaosat varastoidaan, lähetetään digitaalisesti ja 3D-tulostetaan tarpeen mukaan lähellä loppukäyttäjää, mahdollistaa yhtäaikaisesti kustannusten vähentämisen (varastointi, kuljetus, työkalut ja joissain tapauksissa valmistus) sekä palvelun tason parantamisen (nopea toimitus ja laaja saatavuus).

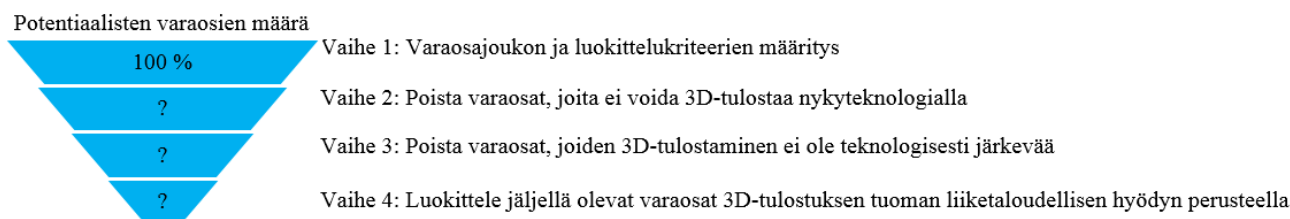
Merkittävin haaste potentiaalisten digitaalisten varaosien tunnistamisessa suuresta varaosajoukosta on arviointiin tarvittavan datan määrä ja laatu. Kaikkea tarpeellista varaosiin liittyvää dataa ei välttämättä ole, tai paremminkin data ei ole järjestelmällisesti saatavilla. Tieto löytyy jostakin paperista tai tiedostosta, mutta tällaisen hajanaisen ja rakenteeltaan epäyhtenäisen datan löytäminen ja käyttäminen ovat vaikeaa. Lisäksi 3D-tulostuksella saavutettavat hyödyt eivät aina ole varaosakohtaisesti mitattavissa. Datan keräämiseen kuluva aika ja vaiva olisi kohtuuton, kun tavoitteena on tehdä alustavaa tutkimusta korkeimman 3D-tulostuspotentiaalin omaavien osien löytämiseksi. Näin ollen osien tunnistamiseen käytettävät arviointikriteerit määräytyvät ja rajoittuvat yrityskohtaisesti helposti saatavilla olevan, varaosakohtaisesti tietokantoihin tallennetun datan mukaisesti.

Knofiuksen et al. (2016)¹ tekemässä tutkimuksessa on kehitetty menetelmää, jolla voidaan tunnistaa 3D-tulostettavat osat suuresta varaosajoukosta ja sitä on testattu lentoteollisuudessa toimivassa yrityksessä. Tutkimuksen tuloksena oli, että 15.3 prosenttia kyseisen yrityksen varaosista olisi teknologisesti mahdollista 3D-tulostaa ja edelleen 2.8 % näistä olisi myös liiketaloudellisesti kannattavaa 3D-tulostaa.

Digitaaliset varaosat -projektissa 3D-tulostettavien varaosien tunnistamista testattiin kahden yrityksen varaosiin soveltuvin osin saman tyyllisellä metodilla kuin Knofiuksen et al. (2016) tutkimuksessa. Yritykset ovat globaalisti toimivia teknologiaalitevalmistajia, joissa tuotteiden elinkaaret ovat vuosikymmeniä, ja näin ollen huolto ja varaosat ovat merkittävä osa yritysten liiketoimintaa. Yrityksen A tutkittava varaosajoukko oli 198638 erillistä nimikettä ja Yrityksen B 17182 nimikettä. Luokitteluprosessi eteni neljässä vaiheessa (kuva 1).

¹ Knofius, N., Van der Heijden, M. & Zijm, W. 2016. *Selecting parts for additive manufacturing in service logistics. Journal of Manufacturing Technology Management*, 27(7), pp. 915-931.

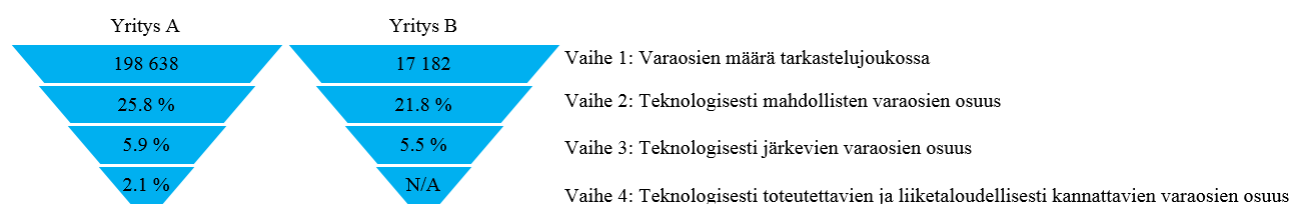
Digitaaliset varaosat



Kuva 1. 3D-tulostettavien varaosien luokitteluprosessi.

Teknologisten luokittelukriteereinä käytettiin materiaalia ja osan kokoa. Useimmiten materiaalitieto ei kuitenkaan ollut eksplisiittistä, vaan yrityskohtaisista materiaaliyhmittelyistä ja tulli-koodeista pääteltyä. Kokotietona käytettiin painoa ja dimensioita, mutta suurimmalle osalle osista näitä tietoja ei ollut helposti saatavilla. 3D-mallin saatavuuteen, toleransseihin, geometriaan, jälkityöstön tarpeisiin tai materiaaliominaisuuksiin ei tutkimuksessa kyetty ottamaan laajasti kantaa järjestelmällisen datan puutteen vuoksi.

Ensimmäisen materiaali- ja kokoperustaisen karsinnan jälkeen tunnistettiin, että jäljellä olevassa varaosaryhmässä on vielä paljon osia, joita ei voida 3D-tulostaa ja sellaisia osia, joiden valmistaminen 3D-tulostamalla olisi teoriassa mahdollista, mutta ei järkevää (erittäin yksinkertaiset osat tai standardigeometriat). Geometriaan sekä materiaaliin (useasta materiaalista koostuvat mekaaniset osat) päästiin paremmin käsiksi valokuvien perusteella vaiheessa kolme. Valokuvia ei kuitenkaan ollut saatavilla kaikille tässä vaiheessa jäljellä oleville varaosille. Yrityksen A tapauksessa valokuva-analyysin otanta oli noin 30 % ja Yrityksen B tapauksessa noin 15 %. Otannasta saatu tulos ekstrapoloitiin kattamaan koko jäljellä oleva varaosajoukko, olettaen valokuvattomien osien jakautuvan samoissa määrin ryhmiin tulostettava, ei tulostettava tai 3D-tulostus ei järkevä valmistusmenetelmä, kuin valokuvalliset varaosat jakautuivat. Lopuksi luokiteltiin jäljellä olevat varaosat 3D-tulostuksen taloudellisen potentiaalin mukaan seitsemään eri ryhmään. Vain varaosat, jotka vaiheessa 3 tunnistettiin nimiketasolla valokuvan perusteella potentiaalisiksi, olivat otantana vaiheen 4 analyysissä. Otannan suuruus myös vaiheessa neljä oli näin ollen n. 30 %, jonka perusteella tulos ekstrapoloitiin kattamaan koko jäljellä oleva varaosajoukko. Luokittelukriteereinä käytettiin varaosan nykyistä ostohintaa, varaston täydennysaikaa, vuotuista kulutusta ja minimitilaiseräkkoa. Kuva 2 havainnollistaa saadun tuloksen jokaisen karsintavaiheen jälkeen. Vaihetta 4 ei suoritettu Yritykselle B.



Kuva 2. Luokittelun tulokset kohdeyrityksissä.

Tehdyn tutkimuksen perusteella kohdeyrityksissä jopa 20–25 prosenttia varaosista olisi teoriassa 3D-tulostettavissa. Osuus laskee noin 5–6 prosenttiin, kun poistetaan erittäin yksinkertaisen tai standardin geometrian omaavat osat. Tässä noin viiden prosentin joukossa suurin yhteinen ryhmä on valetut, kohtalaisen monimutkaisen geometrian omaavat muovi- ja metalliosat.

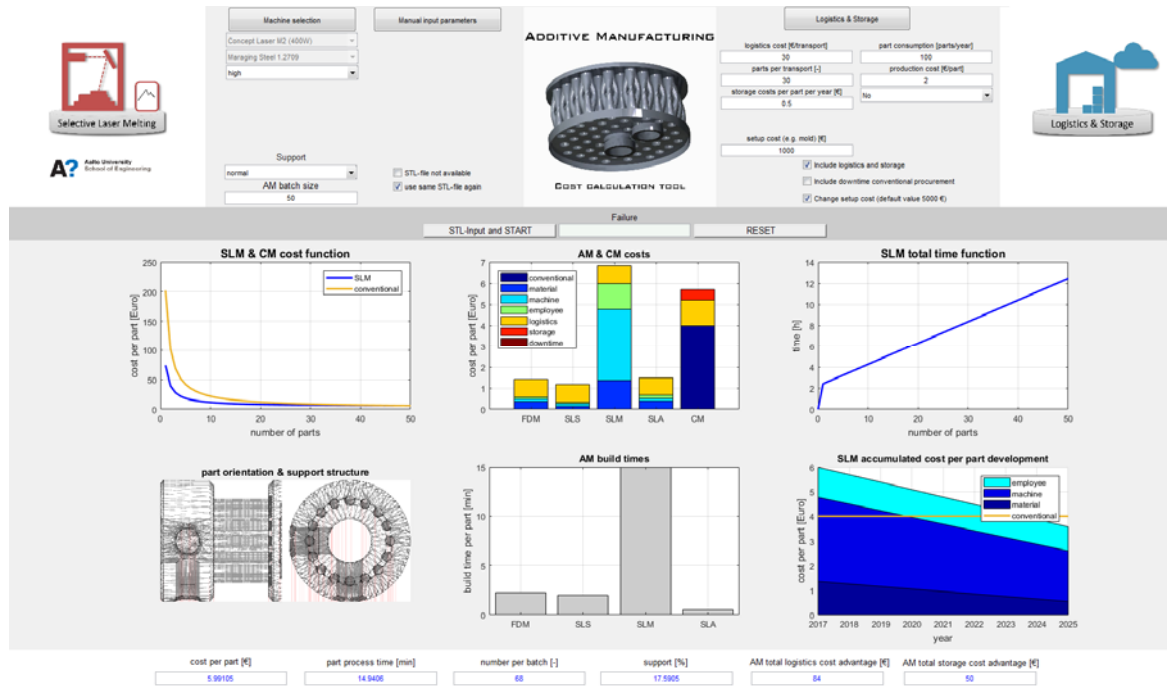
Lopulta arvioitiin Yrityksen A 3D-tulostettujen varaosien taloudellista kannattavuutta ja päädyttiin siihen, että noin 2 prosenttia varaosista, olisi kannattavaa niin teknologisesti kuin taloudellisesti valmistaa 3D-tulostamalla. Yrityksen A tapauksessa tämä vastaa yli neljää tuhatta erillistä nimikettä. Kun näistä muutamia nimikkeitä tarkasteltiin vielä yksityiskohtaisemmin, arvioitiin taloudellisesti kannattavien 3D-tulostettavien varaosien määrän olevan vielä suurempi, mikäli mahdollista säästöä varastointikustannuksissa ja valettuihin osiin liittyviä muotikustannuksia olisi voitu käyttää laajasti arviointikriteerinä. Hyvin todennäköisesti myös vaiheessa 3 yksinkertaisen geometrian perusteella hylätyistä osista löytyisi taloudellisesti kannattavia osia, mikäli näiden taloudellista kannattavuutta tarkasteltaisiin tarkemmin. Toisaalta on perusteltua olettaa, että mikäli kaikkia teknologisia arviointikriteerejä olisi voitu käyttää, kuten toleransseja ja jälkityöstön tarvetta, olisi tämä vastaavasti pienentänyt tässä tutkimuksessa teknologisesti potentiaalisiksi luokiteltujen varaosien osuutta. Näin ollen luokittelussa tunnistettaisiin uusi erillinen varaosaryhmä: osat jotka voidaan 3D-tulostaa, mutta jotka vaativat lisätoimenpiteitä kuten jälkityöstöä tai uudelleensuunnittelua.

Varaosiin liittyvää tietoa tulisi yrityksissä tallentaa kattavammin ja järjestelmällisemmin, jotta teknologisesti mahdolliset ja taloudellisesti kannattavat 3D-tulostettavat varaosat voidaan tulevaisuudessa tunnistaa helpommin, nopeammin ja tarkemmin. Tänä päivänä läheskään kaikista varaosista ei vielä ole 3D-mallia, joka tarvitaan viimeistään siinä vaiheessa, kun osaa ryhdytään 3D-tulostamaan.

Malliperustaisesta tuotemäärittelystä (MBD, Model-Based Definition) on viime vuosina puhuttu paljon seuraavana kehitysaskeleena PLM (Product Lifecycle Management) maailmassa. Mikäli kaikki osaan liittyvä tieto olisi MBD:n mukaisesti yhdessä paikassa (3D-mallissa) rakenteellisesti ja yhteneväisesti tallennettuna, helpottaisi tämä tulevaisuudessa merkittävästi myös 3D-tulostettavien varaosien tunnistamista. Tämä pätee etenkin teknologisesti mahdollisten osien tunnistamiseen, mutta mahdollistaisi myös 3D-tulostuksen kustannusten ja toimitusaajan määräävän valmistusaajan arvioimisen tarkasti 3D-mallin perusteella.

3D-tulostuksen kustannusten arviointityökalu

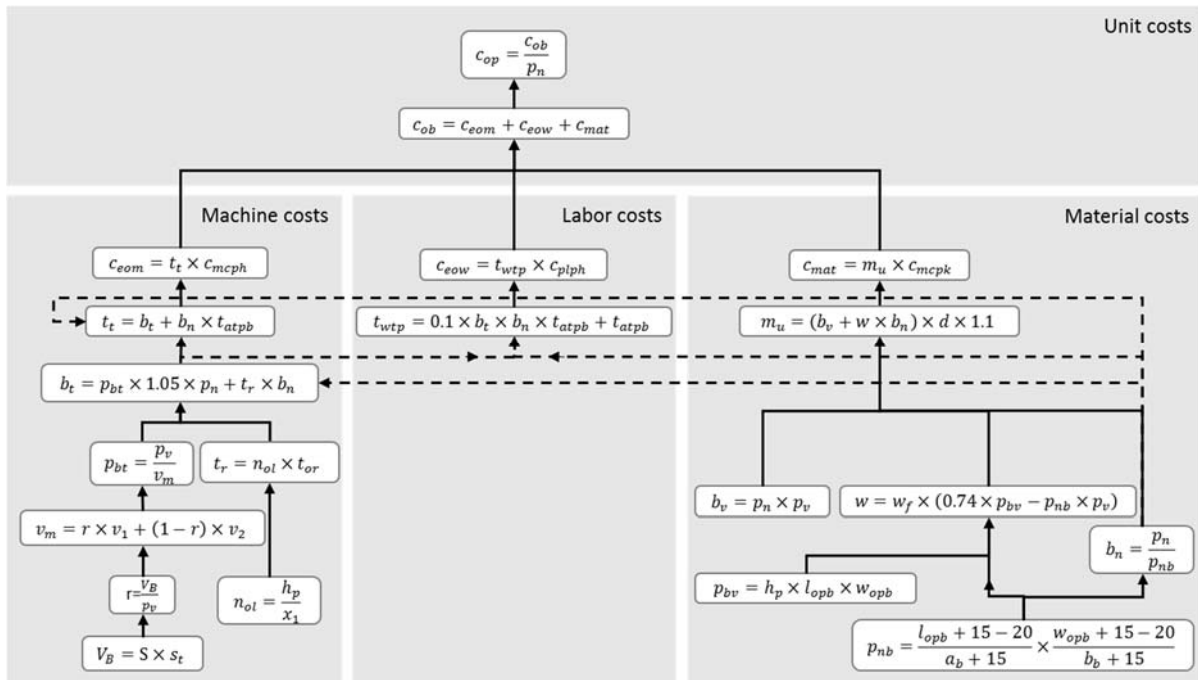
Perinteisesti ja 3D-tulostamalla valmistettujen varaosien kustannusten vertailua varten kehitettiin projektissa työkalu (<http://amdsp.org.aalto.fi/>). Tämä kustannusten arviointityökalu, joka on tehty Matlab-ympäristössä (MathWorks, Natick, MA, Yhdysvallat), on esitetty alla (kuva 3). Työkalu antaa käyttäjälle jauhepetisulatuksella valmistettavan metalliosan kustannus- ja valmistusaika-arvion suoraan STL-tiedoston perusteella. Tarkasteltava osa asetetaan automaattisesti tukirakenteiden kannalta optimaaliseen asentoon, ja myös tukirakenteiden tulostus lisätään laskelmaan. Käyttäjä voi valita, minkä laitevalmistajan laitteen tai materiaalin (AlSi₁₀Mg, työkaluteräs, titaani) mukaan laskelma tehdään, ja työkalu sallii myös valmistukseen liittyvien ominaisuuksien säätämisen. Lisäksi varaosien perinteiset kappale-, muotti-, varastointi- ja kuljetuskustannukset voidaan syöttää työkaluun. Näin ollen työkalu tekee mahdolliseksi vertailun 3D-tulostettujen ja perinteisin menetelmin valmistettujen kappaleiden välillä, soveltuen erityisesti digitaalisten varaosien yhteydessä käytettäväksi.



Kuva 3. Käyttöliittymä 3D-tulostuksen sekä perinteisten valmistusmenetelmien kustannuksia ja tulostusaikaa arvioivalle työkalulle.

Syötettyjen tietojen pohjalta työkalu antaa kuusi kuvaajaa. ”SLM- ja CM”- kustannusfunktio vertaa hintaa per osa käyttäen vertailuteknologioina metallien jauhepetisulatusta ja perinteistä valmistusta. Kuvaaja ”AM- ja CM-kustannukset” näyttää osakohtaiset ja välilliset kustannukset muiden 3D-tulostusmenetelmien (materiaalin pursotus, muovin jauhepetisulatus, valokovetus altaassa) osalta. Myös perinteisen valmistusmenetelmän osan valmistuskustannus (CM) on lisätty kuvaan. Muihin kuvaajiin on sisällytetty metallien jauhepetisulatusprosessin kokonaisaikafunktio, osan ja tukirakenteen asento, edellä mainittujen valmistusmenetelmien valmistusajat ja arvio siitä, miten osakohtaiset kustannukset kehittyvät tulevaisuudessa.

Kuva 4 esittää metallien jauhepetisulatuksen algoritmin osana kustannusten arviointityökalua. Lopulliset kustannukset jakautuvat koneaika-, työ- ja materiaalikustannuksiin. Työkalu ottaa esimerkklaskelmassa huomioon muun muassa koneen poiston (8v), jauheen keskimääräisen pakkaussuhteen (74 %), jauheen kierrätysasteen (jopa 95 %) ja koneen seuranta-ajat (10 % tuotantoajasta).



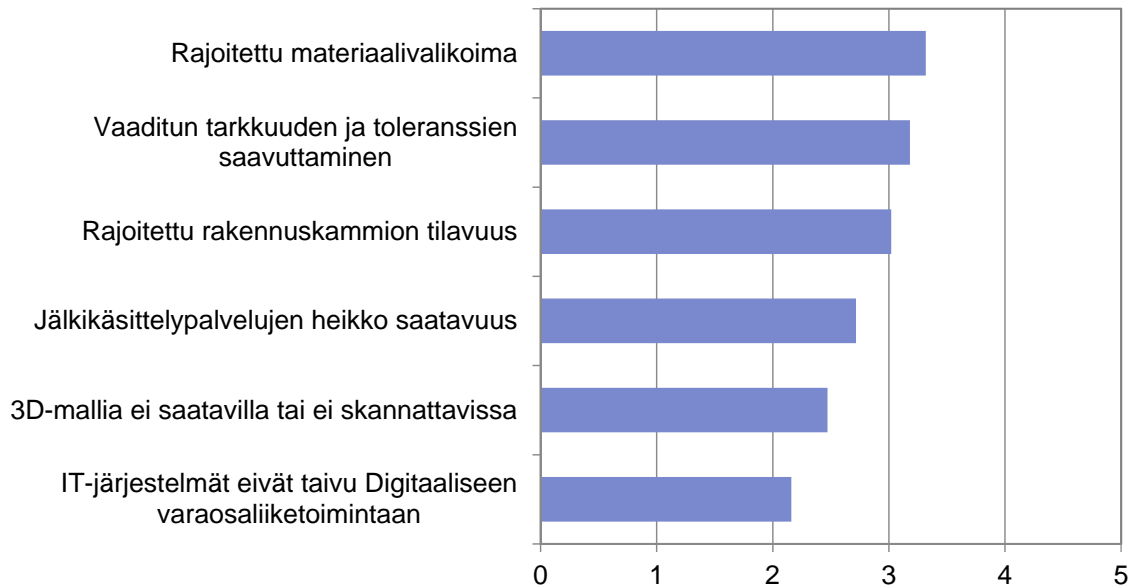
Kuva 4. Metallien jauhetekniikan kustannustyyppikohtaiset funktiot.

Digitaalisten varaosien vaatimukset

Digitaalisten varaosien laajempi käyttöönnotto edellyttää 3D-tulostettavien osien tunnistamista varaosakirjastoista, mutta se myös asettaa omat vaatimuksensa 3D-tulostusprosesseille ja niissä käytettäville materiaaleille, kaikille muille valmistus- ja viimeistelyprosessien vaiheille sekä etenkin laadunvarmistukselle. Nyökkisääntönä voidaan pitää sitä, että 3D-tulostetun varaosan laadun tulisi olla vähintään yhtä hyvä, ellei parempi kuin perinteisesti valmistetun vastaavan varaosan laadun. Myös mallien tai edelleen osien omistajuuteen liittyvät IPR-kysymykset vaativat pelisääntöjen rakentamista sekä teknisten ratkaisujen kehittämistä.

Projektissa toteutetun kyselyn perusteella (kuva 5) suurimmat tekniset esteet 3D-tulostettujen varaosien käyttöönotolle ovat materiaalivaihtoehtojen vähäisyys, valmistuskammion rajoitettu koko, ja se että tarkkuusvaatimukset ja toleranssit eivät täyty. Lisäksi 3D-tulostettujen kappaleiden kestävydestä (myös pitkäaikaiskestävyys) ei ole saatavilla riittävästi tutkimustietoa. Muita digitaalisten varaosien hyödyntämistä rajoittavia tekijöitä ovat ainakin vielä toistaiseksi suhteellisen korkeat 3D-tulostettujen osien kustannukset, riittävän yksityiskohtaisten 3D-mallien tekemisen vaikeus ja materiaaleihin sekä itse valmistusprosesseihin liittyvät hyväksyntöjen puutteet.

Mitkä ovat merkittävimmät tekniset haasteet Digitaalisiin varaosiin liittyen (5 = merkittävin)?



Kuva 5. 3D-tulostettujen varaosien tekniset rajoitteet. (N=51)

Varaosat ja niihin liittyvä tieto

Perustavanlaatuisen haaste 3D-tulostetuille varaosille on se, että alkuperäinen osa on yleensä suunniteltu valmistettavaksi perinteisillä menetelmillä. Tämä luonnollisesti heikentää 3D-tulostuksen asemaa vertailussa perinteisten valmistusmenetelmien kanssa. 3D-tulostuksen vahvuuksia voidaan hyödyntää parhaiten silloin, kun osat on alun perin suunniteltu 3D-tulostettaviksi.

Varaosakirjastoista löytyvän tiedon perusteella voi olla hyvin hankalaa valmistaa osa 3D-tulostamalla ilman merkittävää työpanosta, sillä vain harvoista osista on saatavilla tulostamisen kannalta oleelliset 3D-mallit ja muu valmistustieto kuten materiaalitieto tai todelliset toleranssi-vaatimukset. Uusien osien suunnittelussa tulisikin jo ottaa huomioon vaihtoehto, että osa voitaisiin valmistaa myös 3D-tulostamalla, mikä helpottaisi jatkossa siirtymistä digitaalisiin varaosiin. Vanhojen laitteiden ja koneiden hitaasti kiertävien varaosien kohdalla joudutaan muokkaamaan varaosakirjastossa oleva tieto sellaiseksi, että kaikki oleellinen valmistustieto saadaan sellaiseen muotoon, jossa on otettu huomioon 3D-tulostuksen vaatimukset. On otettava huomioon, että vanhojen osien piirustukset on laadittu silmällä pitäen perinteisiä valmistusmenetelmiä ja niissä saavutettavia toleransseja. Siirryttäessä 3D-tulostukseen, pitäisi toleranssi-vaatimukset määritellä mahdollisesti uudelleen, jotta tiedettäisiin, mitkä pinnat todellisuudessa vaativat tarkkoja toleransseja. Näin mm. välttyttäisiin siltä, että 3D-tulostetun metalliosan kaikki pinnat jälkikoneistetaan turhaan. Kaikki valmistustieto lämpökäsittelyineen ja todellisine toleranssi-vaatimuksineen pitäisi saada mukaan 3D-malliin, jotta varaosien valmistamisesta tulisi sujuvaa.

Monesti yritysten digitaalisten varaosien käyttöönottoa rajoittavat 3D-tulostustekniikoiden ja niiden käyttömahdollisuuksien vähäinen tunnettuus. Suunnittelijat eivät tunne digitaalisia valmistusmenetelmiä riittävän hyvin ja perinteet ohjaavat valmistamaan niin kuin on aina ennenkin tehty. Suunnittelijoilla saattaa myös olla se käsitys, että 3D-tulosteiden laatu on sitä mitä se on ennen jälkikäsitteilyä ja – työstöä, vaikka niillä voidaan merkittävästi parantaa ominaisuuksia. Yritysten kannattaakin nyt panostaa 3D-tulostusosaamisen kehittämiseen. Osaamista voidaan hyödyntää laajalti myös ilman, että se suoraan kytkeytyy varaosaliiketoimintaan. Tulevaisuudessa on myös mahdollista lisätä 3D-tulostettavien varaosien määrää osien uudella suunnitellulla, joka huomioi paremmin 3D-tulostuksessa saavutettavan pinnanlaadun ja muut vaatimukset. Esimerkiksi on mahdollista päästä eroon joistakin hyvin kriittisistä liitospintojen toleransivaatimuksista siten, että valmistetaan kokoonpano suoraan kertaprosessina 3D-tulostamalla. Toleranssien lisäksi 3D-mallin tekemisessä piirustusten pohjalta tarvittaisiin tietoa osaan liittyvästä kokoonpanosta sekä lujuusvaatimuksista varsinkin, jos on tavoitteena muokata tai keventää osaa paremmin 3D-tulostusprosessille sopivaksi. On siis myös pidettävä mielessä, että jos jotakin osaa muokkaa, voi se vaikuttaa koko laitteen tai kokoonpanon käyttäytymiseen, eli suunnittelijoilla on oltava riittävästi tietoa ja osaamista.

Seuraava rajoite liittyy tiedonsiirtoon toimitusketjun eri toimijoiden välillä. Tällä hetkellä suurin osa tiedoista, kuten 3D-suunnittelutiedoista, vaihdetaan sähköpostin ja muiden manuaalisten kanavien avulla. Prosessin pitää olla automatisoidumpi, jotta päästään hyödyntämään täysimittaisesti digitaalista 3D-tulostusprosessia toimitusketjussa.

Laatu ja laadun hallinta

3D-tulostetun osan laatuun vaikuttavat muun muassa valittu 3D-tulostusprosessi ja siinä käytettävä materiaali, hyvin monet tulostusparametrit ja erilaiset jälkikäsitteilyt, kuten varsinkin metalliosilla lämpökäsittelyt, koneistukset ja viimeistelyt. Jokainen 3D-tulostusteknologia tuottaa hieman erilaista rakennetta, tiiveyttä, lujuutta ja pinnanlaatua, ja vertailukelpoista tutkimustietoa edellä mainituista ei kattavasti ole olemassa. Myös eri teknologiaryhmien tai jopa samalla laitteella valmistettujen kappaleiden välillä on havaittu laatueroja.

Ainoa luotettava keino varmentaa 3D-tulostetun kappaleen laatu on tähän mennessä ollut kappaleen tulostaminen samassa ajossa. Varsinkin metallipuolella on kuitenkin laajoja kehityspanoksia laitettu prosessin laadunvarmennukseen. Jatkossa tulisikin tavoitella tilannetta, jossa 3D-tulostettu varaosa tulostetaan sertifioitujen prosessien mukaisesti, ja koko prosessin laadunvalvontaan on kehitetty menetelmät.

Lämpökäsittelyillä on suuri merkitys metallikappaleiden ominaisuuksiin. 3D-tulostamalla tehdyt metallikappaleet poikkeavat mikrorakenteeltaan esimerkiksi valamalla tehdyistä kappaleista, mistä johtuen usein joudutaan myös todennäköisesti räätälöimään käytetyt lämpökäsittelyprosessit uudelleen, jotta lopputuotteen laatu vastaisi alkuperäistä varaosaa. 3D-tulostusprosesseihin pitäisi liittää automaattisia jälkikäsitteilyprosesseja, jotta 3D-tulostettujen varaosien valmistus olisi kannattavaa sekä ajankäytöllisesti että kustannustehokkuuden kannalta. Hyvin järkevää todennäköisesti olisi, jos sekä 3D-tulostus että kaikki tarvittavat jälkikäsitteilyt voitaisiin tehdä samassa paikassa. Tällöin koko valmistusprosessiketju olisi jo 3D-mallia muokattaessa tiedossa, ja myös laadunhallinta ja -varmistus olisi yksinkertaisempaa.

3D-mallien suojaus ja vastuukysymykset

Myös 3D-malli, jonka avulla osa voidaan tulostaa, tulee voida suojata. Tähän voidaan käyttää samantapaisia digitaalisia keinoja, joita esimerkiksi musiikkiteollisuus käyttää. Alalle onkin tullut joitain kaupallisia toimintoja kuten Grow Software Limited:n secure.AM., jonka tuotteen kytkeytyn 3D-mallin avulla osa voidaan esimerkiksi tulostaa vain kerran. Erityinen ongelma näissäkin on: kenelle jää vastuu tulostuksen onnistumisesta? Jos vastuu on 3D-tulostajalla, joutuu hän ostamaan uuden 3D-mallin tulostuksen keskeytyessä. Jos vastuu taas on 3D-mallin eli digitaalisen varaosan myyjällä, voidaan osasta monistaa useampia kappaleita. Ilmeistä on, että vain tulostuslaitteeseen sinetöity ”tulostustarkkailija” voi aukottomasti estää väärinkäytökset.

Kuten musiikkiteollisuus, myös valmistava teollisuus tulee digitalisoituvassa maailmassa väistämättä – kehityspolusta riippumatta – kohtaamaan digitaalisuuden mahdollistaman kopioinnin ja tiedonvälityksen helppouden. On tärkeää sovittaa uusi tilanne omaan liiketoimintaan tai jopa rakentaa kokonaan uudentyyppistä liiketoimintaa. Haasteena on tällöin tulostuslaadun varmistaminen, hajautetun tulostuksen ansaintalogiikat ja –mallit ja uuden toiminnan huomiointi jo tuotekehitysvaiheesta / tiedonhallinnasta alkaen.

Sertifiointi ja vastuukysymykset

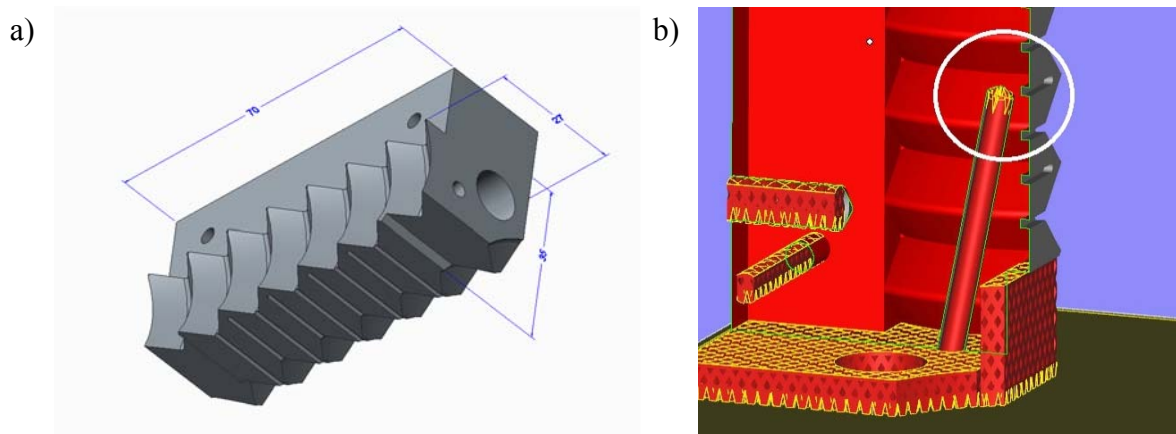
Varsinkin henkilöturvallisuutta koskevissa laitteissa valmistajan tuotevastuu ja joskus jopa erilaisten sertifiointi- tai luokituslaitosten hyväksyntä uusille osille on välttämätön. Huolto-osiin nämä instanssit eivät useinkaan enää ota kantaa, mutta erilaiset katsastus-, vastuu- ja tarkastuskäytänteet määrittävät laitteen turvallisuuden. Nämä käytänteet eivät useinkaan suoranaisesti puutu osien laatuun. Ryhdyttäessä valmistamaan 3D-tulostamalla osia, joiden käyttöön liittyy henkilöturvallisuus, on tärkeää määritellä, kenelle vastuu esimerkiksi osan puutteellisesta toiminnasta kuuluu. On myös mietittävä, miten ja millä menetelmin osien laatu määritellään ja miten sitä valvotaan.

4. Tapaustutkimuksia digitaalisista varaosista

3D-tulostuksen mahdollisuuksia ja haasteita varaosien valmistamisessa selvitettiin tarkemmin demonstraatiokappaleiden kautta. Demonstraatioille suoritettava tarkastelu sisälsi perinteisen valmistustavan ja 3D-tulostuksen vertailun osien valmistuskustannusten, valmistusnopeuden ja saatavuuden kannalta. Muita tarkasteltavia seikkoja olivat materiaalin saatavuus ja vertailukelpoisuus perinteisiin materiaaleihin. Projektissa valmistetut demonstraatiot on koottu liitteeseen (Liite 1). Tässä luvussa kuvataan tarkemmin muutaman osan valmistuksen vaiheet.

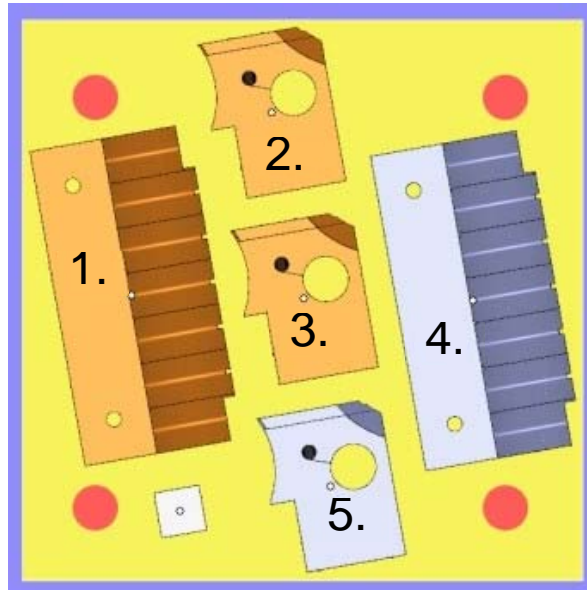
Lämpölevy

Lämpölevy on viilun valmistuksessa käytettävän märkäsaumurin osa, jonka tehtävä on teipin kuumentaminen ja katkaiseminen. Lämpölevyn 3D-malli on esitetty seuraavassa kuvassa (kuva 6a). Lämpölevy lämmitetään sisään asennetun vastuksen avulla, ja teräväksi hiottu särmä katkaisevat teipin. Suunnitteluvaiheessa tärkeäksi kriteeriksi asetettiin materiaalin kovuus, jotta särmät pysyisivät terävinä. Alkuperäinen osa oli valmistettu Arne työkaluteräksestä, jota ei ole saatavilla 3D-tulostukseen. Lämpölevyn valmistamista demonstroitettiin metallin jauhepetisulatusmenetelmällä sekä 3D-tulostamalla vahamalli ja hyödyntämällä tarkkuusvalua. Materiaaliksi valittiin jauhepetisulatukseen H13-työkaluteräs ja tarkkuusvaluun 42CrMo4 nuorrutusteräs, sillä näillä materiaalin kovuudet ovat lämpökäsittelyiden jälkeen lähellä Arnea.



Kuva 6. a) Lämpölevyn 3D-malli, b) 3D-malliin tehty muokkaus.

Lämpölevyt 3D-tulostettiin sekä pystyyn että vaakaan, jotta orientaation mahdollista vaikutusta tulostettavuuteen voitiin arvioida. Osaan kappaleista lisättiin 0,2 mm koneistusvara särmiin (kuva 7), jotka myöhemmin hiottiin teräviksi. Ainoa 3D-malliin tehty muokkaus työstoarojen lisäksi oli sisäisiin kanaviin tehdyt pyöristykset tulostettavuuden parantamiseksi (kuva 6b). Tarkkuusvalussa vahamalliin lisättiin työstovara 0.2 mm päälipinnalle, sekä poistettiin kierreiät ja pitkittäisreikä. Vahamalli myös skaalattiin valukutistuman mukaan.



Kuva 7. Lämpölevyjen 3D-tulostusasettelu. Kappaleet 1–3 ilman työstövaroja ja kappaleiden 4–5 särmiin lisätty 0,2 mm työstövara.

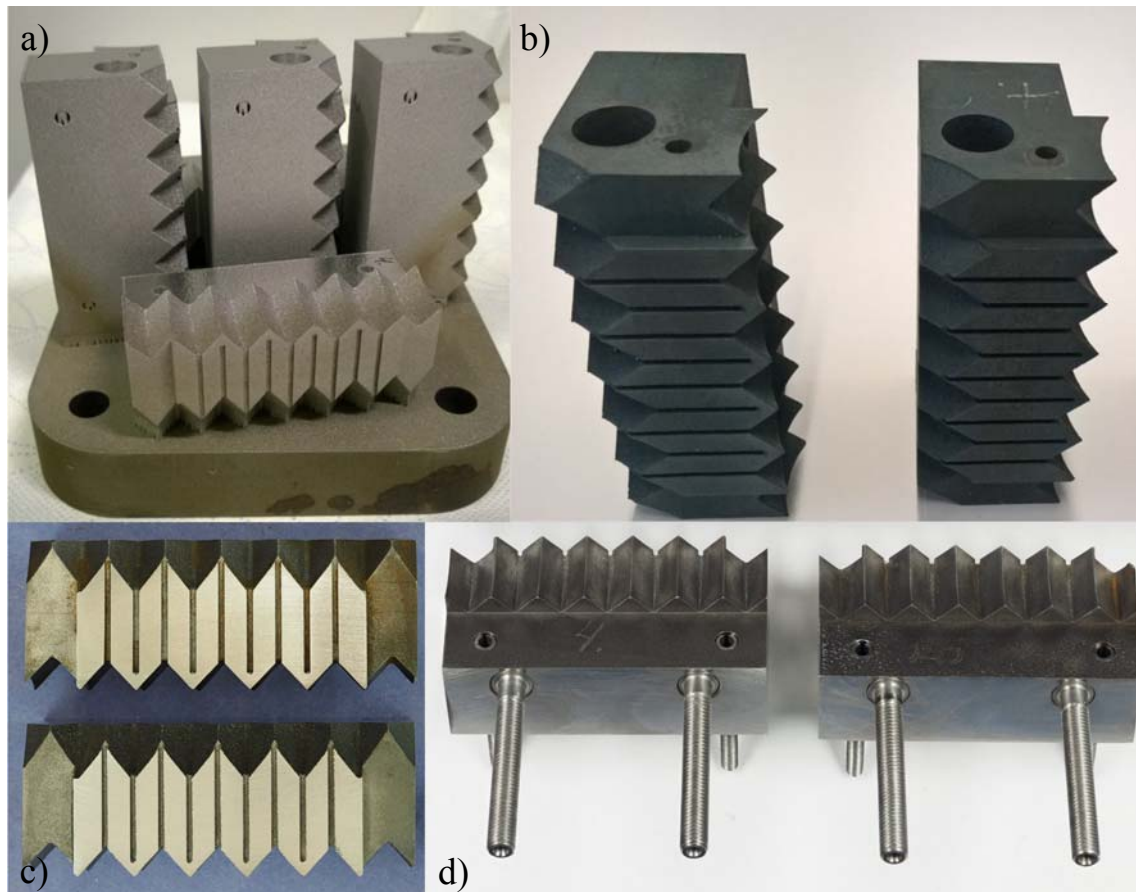
Viisi lämpölevyosaa valmistettiin SLM Solutions 125HL jauhepetisulatuslaitteistolla. Kappaleiden 3D-tulostuksen työvaiheet olivat:

1. Kappaleiden tulostaminen SLM 125HL jauhepetisulatuslaitteella
2. Lämpökäsittely: jännitystenpoistohehkus
3. Kappaleiden irrotus alustasta lankasahalla, tukirakenteiden poistaminen ja esityöstö
4. Lämpökäsittely: karkaisu ja päästö
5. Pintojen kuulapuhallus
6. Särmien teroitus hiomalla
7. Kierteiden valmistaminen kipinätyöstöllä, vaarnaruuvien lisääminen

3D-tulostetun vahamallin kautta tarkkuusvaletun kappaleet työvaiheet:

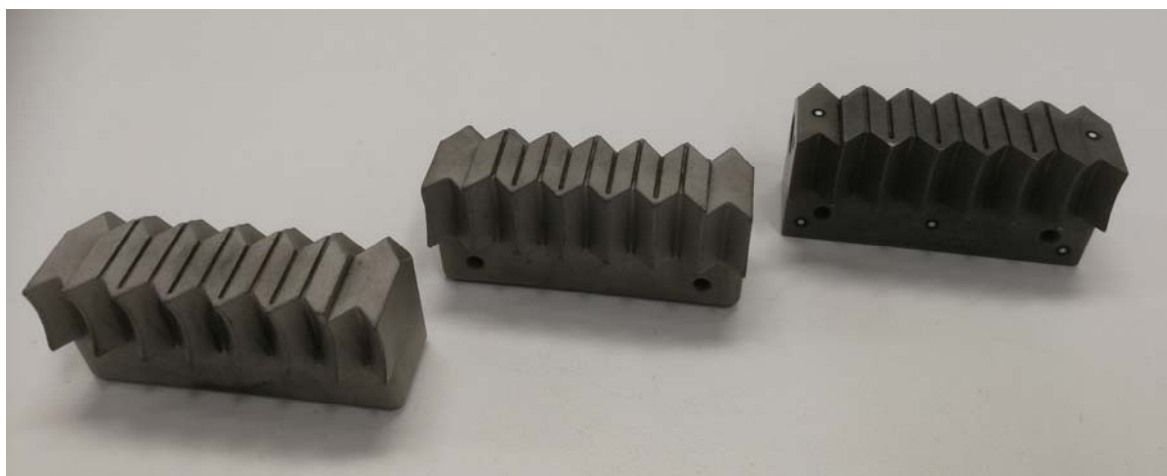
1. Vahamallien tulostaminen
2. Tukivahan liuotus
3. Keraamisen kuoren kasvatus
4. Valaminen & pehmeäksi hehkus
5. Hiekkapuhallus
6. Viimeistelykoneistus
7. Lämpökäsittely: karkaisu / nitraus

3D-tulostettujen kappaleiden koneistusvaiheessa ilmeni vaikeuksia kierteiden valmistamisessa johtuen materiaalin kovuudesta, minkä vuoksi päädyttiin ratkaisuun, jossa kierteille jyrssiin suuremmat reiät ja reikiin prässättiin kierteitetty holkit. Holkit kuitenkin pettivät testausvaiheessa, sillä puristusliitos ei ollut riittävän luja. Kappaleet korjattiin kipinätyöstämällä kappaleeseen kierteet ja kiinnittämällä kierteisiin vaarnaruuvit (kuva 8).



Kuva 8. Lämpölevy 3D-tulostuksen eri vaiheissa: a) tulostustilassa, b) esityöstetty ja lämpökäsitelty, c) kuulapuhalluksen ja hionnan jälkeen, d) valmiit kappaleet.

Tarkkuusvalettujen kappaleiden koneistaminen sujui ongelmitta. Valamisen jälkeen porattiin lämmityselementin reikä, sekä reiät ruuveille. Myös kappaleen päälipinta koneistettiin. Tämän jälkeen kappaleet karkaistiin, jonka jälkeen kovuudeksi mitattiin 55 HRC. Kappaleista tehtiin myös nitrattu versio, jossa ydinaineen kovuus laski 43.5 HRC:hen, mutta pinnan mikrokovuus nousi 59.7 HRC:hen. Kova pinta kestää paremmin kulumista. Kappaleet lämpökäsittelyn jälkeen on esitetty seuraavassa (kuva 9).



Kuva 9. Lämpölevyosat tarkkuusvalun eri vaiheissa: Vasemmalla valettu, keskellä koneistettu ja nitrattu, oikealla koneistettu ja karkaistu.

Alkuperäisen ja 3D-tulostamalla valmistetun kappaleen valmistusta ja ominaisuuksia on vertailtu seuraavassa taulukossa (taulukko 1).

Taulukko 1. Perinteisen ja 3D-tulostetun lämpölevyn vertailu.

	Alkuperäinen	3D-tulostettu	3D-tulostettu vahamalli ja tarkkuusvalu
Materiaali	Arne työkaluteräs	H13 työkaluteräs	42CrMo4 nuorrutusteräs
Vuotuinen menekki	10 kpl		
Valmistusmenetelmä	Työstämällä koneellisesti lattatangosta	Jauhepetisulatus SLM Solutions 125HL	Materiaalinsuihkutus Projet 3600W + tarkkuusvalu
Jälkikäsittelyt	Jännitystenpoisto-hehkus Lopputyöstö Karkaisu ja päästö Hionta	Jännitystenpoistohehkus Tukirakenteiden poisto Koneistus Karkaisu ja päästö Hionta	Pehmeäksi hehkus Hiekkapuhallus Viimeistelykoneistus Lämpökäsittely karkaisu / nitraus Hionta (ennen nitrausta)
Valmistusnopeus	Koneistus – 12h / 5kpl Lämpökäsittelyt – 8h	Tulostusaika – 34h / 5kpl Koneistus – Ei tarkkaa arviota Lämpökäsittelyt – noin 10h	Tulostusaika – 4h / 6kpl Koneistus – 30 min / kpl Lämpökäsittelyt – noin 12 h
Toimitusaika	3 vko	1–2 vko	1–2 vko
Valmistuskustannus	264€	Tulostuskustannus ~ 110€ /kpl (SLM 280HL tai vastaava) + koneistukset & lämpökäsittelyt	Tulostuskustannus ~ 30€ / kpl Tarkkuusvalu ~ 15–60 € / kpl Koneistukset ~ 90 € / kpl Lämpökäsittely (600€ / panos = n. 800kg)
Minimi erä-koko	1 kpl	1 kpl	1 kpl
Mekaaniset ominaisuudet	Kovuus – 58-60 HRC	Kovuus – 48 HRC	Kovuus – karkaistu 55 HRC nitrattu – 59.7 HRC (mikro)

Tulostuskustannuksia arvioitiin erillisen laskurin avulla. Laskurin lähtöarvoina käytettiin todellisia materiaali-, työvoima- sekä laitekustannuksia sekä prosessiparametreja (tulostusnopeus). Lisäksi metallin 3D-tulostuksen kappalekohtainen hinta keskikokoisella ja suurella jauhepetisulatuslaitteella arvioitiin siten, että tulostusalusta tulee täyteen kappaleita.

Metallista tulostetuille kappaleille tehtiin karkaisu ja päästö, joiden tarkoituksena on parantaa materiaalin mekaanisia ominaisuuksia. Kappaleiden kovuus jäi kuitenkin tavoitteesta (55 HRC), mikä viittaa siihen, että lämpökäsittelyssä saavutettu mikrorakenne ei ollut optimaalinen. Kovuutta voidaan kuitenkin lisätä optimoimalla lämpökäsittelyn pitoajat, lämpötilat sekä jäähtymisnopeudet. Mainituista koneistamiseen liittyneistä haasteista johtuen demonstraatiokappaleen valmistus sisälsi ylimääräisiä työvaiheita (holkitus, kipinätyöstö), jotka voidaan välttää tekemällä kappaleille pehmeäksi hehkus ennen koneistuksia.

Kaksi metallista 3D-tulostettua lämpölevyä toimitettiin asiakkaalle testiin, jossa lämpölevyt asennettiin manuaalitoimisen koeteippauslaitteen ylä- ja alapuristimiin. Testausvaihe rajattiin

muutamaan tuhanteen teippaukseen, joka on riittävä määrä vakavimpien puutteiden havaitsemiseksi. Teippauksia tehtiin ensin kolmen päivän aikana märkään viiluun 2640 kpl ja sen jälkeen yhtenä päivänä kuivaan viiluun 1154 kpl. Kokonaismäärä 3794 puristusta vastaa noin 3,5 tunnin hyvätahtista jatkuvaa ajoa oikealla linjalla. Lyhyellä testillä koekappaleiden toiminnassa ei havaittu minkäänlaista eroa verrattuna perinteisillä menetelmillä tuotettuihin lämpölevyihin.

Tarkkuusvaletuista kappaleista testattiin sekä karkaistu lämpölevy että nitrattu versio. Teippauksia tehtiin yhteensä 2626 kpl, mikä vastaa noin 2,5h ajoa oikealla linjalla. Koekappaleiden toiminnassa ei havaittu suurta eroa perinteisillä menetelmillä tuotettuihin lämpölevyihin verrattuna. Repäisysärmien ja kärkien tylsyys aiheutti huononäköistä repäisyjälkeä, mutta vaikutus laitteen repäisykykyyn oli kuitenkin oletettua pienempi. Karkaistun levyn särmät olisi ollut mahdollista teroittaa puristus pintaa hiomalla, jolloin repäisyjälki olisi saatu kuntoon. Nitratun kappaleen hionta olisi todennäköisesti mahdollista tehdä myös nitrauksen jälkeen kerran, mutta ei kuitenkaan kovin monta kertaa johtuen kovan pinnan ohuudesta. Särmät ja kärjet olisi ollut myös mahdollista teroittaa ja hioa ennen lämpökäsittelyitä.

Istukkarengas

Istukkarengas (seetirengas) on moottorin sylinterikannessa oleva rengas, jota vasten venttiili painautuu ollessaan kiinni. Tiiveyden takaamiseksi istukkarenkaan kontaktipintojen tulee olla tarkkaan koneistettuja. Kappale kuuluu käytössä lähinnä kontaktipinnoilta, joihin suurin kuormitus kohdistuu (kuva 10a). Istukkarengas valittiin demonstraatioksi, jossa osa korjattiin kahdella tavalla: tulostamalla uusi puolisko kuluneen tilalle jauhepetisulatuksella ja suorakerrostamalla uusi pinta kuluneen tilalle.

Varaosan korjaus jauhepetisulatuksella sisälsi seuraavat työvaiheet:

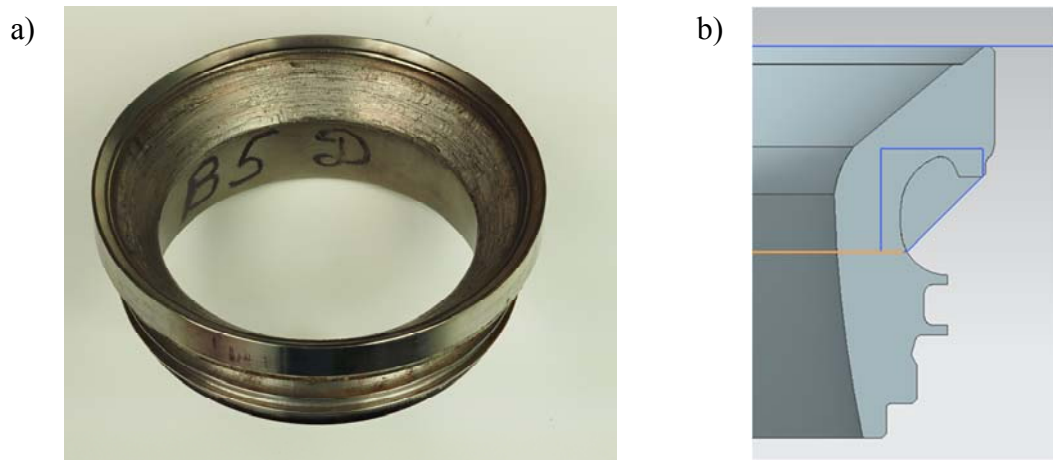
1. Tukirakenteiden suunnittelu
2. Kuluneen puoliskon irrottaminen lankasahalla
3. Tulostusalustan koneistaminen istukkarenkaan puoliskolle sopivaksi
4. Tukirakenteiden tulostaminen tulostusalustaan
5. Kappaleen tulostaminen
6. Tukirakenteiden irrotus kappaleesta ja alustasta
7. Koneistus toleransseihin

Suorakerrostukselle työvaiheet olivat seuraavat:

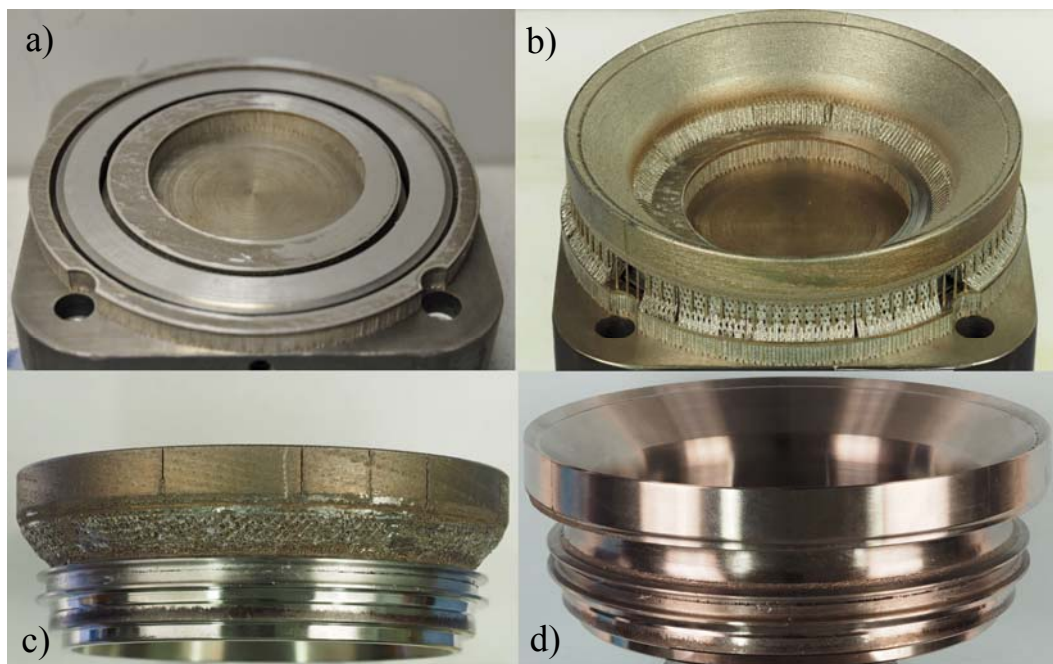
1. Kappaleen esilämmitys noin 500 °C
2. Suorakerrostus TIG hitsauksella – stelliitti 21
3. Jäähdytys uunissa
4. Viimeistelykoneistus

Jauhepetimenetelmässä kulunut osa sahattiin lankasahalla kahtia 22mm korkeudelta ja tulostusalustaan koneistettiin ura, johon osa sovitettiin (kuva 11a). Tulostettavuuden parantamiseksi alkuperäistä 3D-mallia muokattiin siten, että koneistettavaksi tarkoitettu geometria tulostettiin 45 asteen kulmaan (kuva 10b). Valmistusta kokeiltiin ensin ilman tukirakenteita, mutta suurien lämpögradienttien vuoksi kappaleeseen muodostuneet jäännösjännitykset olivat niin suuria, että ne aiheuttivat kappaleen murtumisen. Kappale tulostettiin lopulta kahdessa vaiheessa: ensimmäisessä vaiheessa alustalevyyn tehtiin tukirakenteet kappaleen yläpinnan korkeudelle

(kuva 11a) ja toisessa vaiheessa tehtiin varsinainen kappale sekä loput tukirakenteet (kuva 11b). Tukirakenteet johtivat lämmön pois kappaleesta, jolloin suuria jäännösjännityksiä ei päässyt muodostumaan. Lopuksi tukirakenteet poistettiin (kuva 11c) ja kappale koneistettiin toleransseihin (kuva 11d).



Kuva 10. a) Alkuperäinen kulunut istukkarengas, b) alkuperäiseen 3D-malliin tehdyt muokkaukset.



Kuva 11. Seetirengas valmistusprosessin eri vaiheissa: a) sahattu puolisko asetettuna koneistetulle tulostusalustalle, b) tulostustilainen kappale, c) tukirakenteet irrotettuna, d) valmis kappale.

Suorakerrostuksessa kappale esilämmitettiin noin 500°C asteeseen materiaalin tarttumisen parantamiseksi. Esilämmitetty kappale siirrettiin huoneenlämpöön ja kappaleen pinnalle lisättiin reilu kerros Stelliitti 21 -materiaalia TIG-hitsausmenetelmällä (kuva 12). Jäähdytys suoritettiin uunissa hitaasti. Vertailupalasta mitattiin kovuus, joka oli noin 463 HV.



Kuva 12. Alkuperäinen seetirengas, kappale suorakerrostuksen jälkeen ja viimeistelty kappale.

Alkuperäisen ja 3D-tulostamalla korjattujen kappaleiden valmistusta ja ominaisuuksia on vertailtu seuraavassa taulukossa (taulukko 2).

Taulukko 2. Perinteisen ja 3D-tulostettujen istukkarenkaiden vertailu.

	Alkuperäinen	Jauhepetisulatus	Suorakerrostus
Materiaali	CrNi 58/42	Inconel 718	Stelliitti 21
Vuotuinen menekki/vaihtoväli	~6000 kpl / 20000–30000h		
Valmistusmenetelmä	Koneistus	Jauhepetisulatus SLM Solutions 125HL	TIG-hitsaus
Jälkikäsittelyt	Lämpökäsittely	Tukien irrotus Koneistus Lämpökäsittely*	Koneistus
Valmistusnopeus		Tulostusaika - 22,5h / 1kpl Koneistus – Ei tarkkaa arviota	Suorakerrostus 15 min Koneistus 30 min
Toimitusaika	3 vko	2 vko	1 vko
Valmistuskustannus	90€	Tulostuskustannus ~ € /kpl – ei arviota + koneistukset & lämpökäsittelyt * - ei arviota	Suorakerrostus 30 € Koneistus 45 €
Minimi eräkoko	75 kpl	1 kpl	1
Mekaaniset ominaisuudet	Kovuus – 400–475 HV10	Kovuus – 350 HV5	Kovuus 463 HV

*Demonstraatio-osaa ei lämpökäsittely

Demonstraatioiden avulla osoitettiin, että istukkarenkaan korjaaminen jauhepetisulatuksella tai suorakerrostuksella on toteutettavissa. Jauhepetisulatus sisältää useita työvaiheita ja on sen vuoksi aikaa vievää ja vaatii hyvää suunnittelua. Korjaaminen voisi olla potentiaalinen ratkaisu sellaisilla osilla, joilla on pieni vuotuinen menekki, joiden valmistaminen on kallista, ja joiden valmistaminen perinteisin menetelmin toisi lisäkustannuksia esimerkiksi uusien muottien valmistuksen.

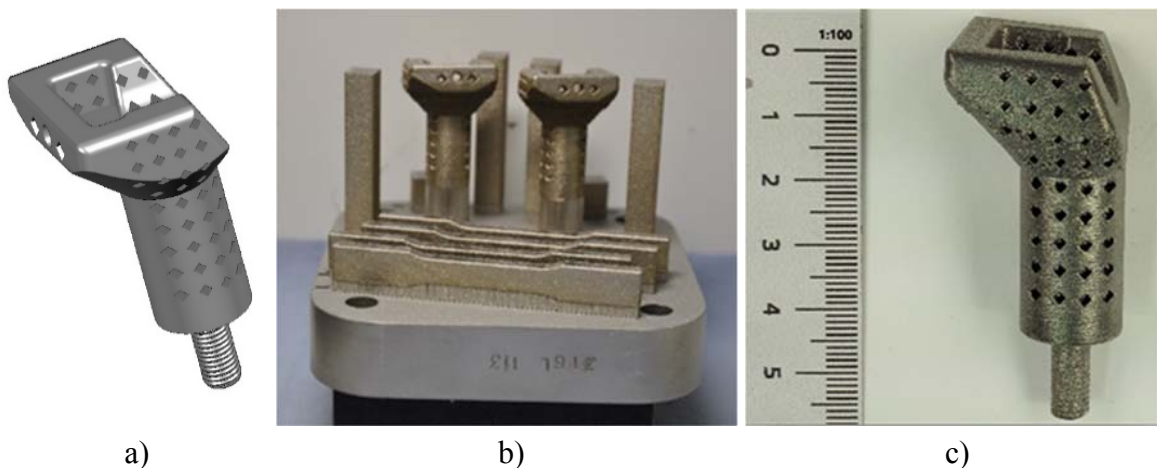
Kiinnitystappi ja materiaalitestit

Kiinnitystappi on korkeissa lämpötiloissa käytettävä kriittinen komponentti, joka altistuu myös sykliselle kuormitukselle. Materiaalilta vaaditaan täten hyviä lujuusominaisuuksia korkeissa lämpötiloissa. Alkuperäinen osa oli valmistettu Inconel 718 superseoksesta, joka on myös kaukallisesti saatavilla oleva materiaali jauhepetisulatuslaitteille. Kiinnitystapista ei ollut olemassa 3D-mallia, minkä vuoksi malli tehtiin 3D-skannauksen avulla. Skannattua mallia paranneltiin vielä CAD ohjelmalla. 3D mallista tehtiin kolme eri versiota: 1) kierteet suoraan skannatusta ja korjatusta mallista, 2) CAD-ohjelmalla tehdyt kierteet ja 3) kierteiden tilalle lisätty koneistusvara. Kiinnitystappien valmistus sisälsi seuraavat työvaiheet:

Työvaiheet:

1. 3D-mallin luominen skannaamalla alkuperäinen osa
2. Tukirakenteiden ja kierteiden suunnittelu sekä ajotiedoston luonti
3. Kappaleiden tulostaminen SLM 125HL lasersulatuslaitteella
4. Lämpökäsittely: jännitystenpoistohehkutus
5. Kappaleiden irrotus alustasta
6. Lämpökäsittely: Kuuma isostaattinen puristus (HIP, Hot Isostatic Pressing)
7. Lämpökäsittely: Liotushehkutus + Erkautuskarkaisu
8. Koneistus
9. Pintojen kuulapuhallus

Kiinnitystapin 3D-malli ja kappaleet tulostustilaisina sekä kuulapuhallettuna on esitetty seuraavassa kuvassa (kuva 13). Kiinnitystapit tulostettiin pystyyn vaadittavien tukirakenteiden minimoimiseksi. Pystyyn tulostaminen mahdollistaa kappaleiden lukumäärän maksimoimisen tulostusalustalle sekä helpottaa tukien irrottamista.



Kuva 13. Kiinnitystappi valmistusprosessin eri vaiheissa: a) Alkuperäinen 3D malli, b) tulostustilaiset kappaleet, c) tukirakenteet irrotettu ja kuulapuhallettu.

Lämpökäsittelyt

Inconel 718 -materiaali saa lujuutensa pääasiassa austeniittiseen γ -faasiin liuenneista seosaineista (liuoslujuuttuminen) sekä siihen erkautuvista γ' ja γ'' -faaseista. Optimaaliset lujuusominaisuudet edellyttävät, että eri faaseja on materiaalissa oikeassa suhteessa, johon pyritään oikeanlaisten lämpökäsittelyiden avulla.

Hyvä mekaaninen lujuus ja eritoten väsymislujuus ovat tärkeitä useissa Inconel 718 -materiaalin sovelluskohteissa. Perinteisesti valamalla sekä myös jauhepölymenetelmällä valmistettujen kappaleiden mikrorakenteeseen jää huokoisuutta, jotka edistävät säröjen muodostumista ja alentavat lujuusominaisuuksia. Tämän vuoksi tehdään usein kuuma isostaattinen puristus (HIP, Hot Isostatic Pressing) -käsittely, jossa sisäiset huokokset poistetaan hehkuttamalla kappaletta sopivassa lämpötilassa ja korkeassa paineessa. HIP-käsittelyn jälkeen tehdään kaksi lämpökäsittelyä: liuotushehkutus ja erkautuskarkaisu. Liuotushehkutuksessa aiemmissa prosessointivaiheissa materiaaliin erkautuneet faasit liuotetaan tasaisesti mikrorakenteeseen. Erkautuskarkaisussa materiaalia lujittavat faasit ja karbidit erkautetaan austeniittiseen faasiin.

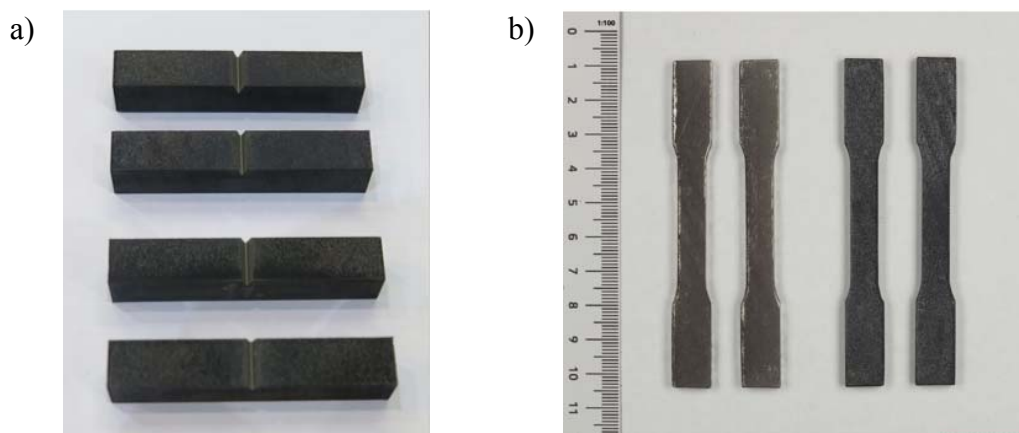
Kiinnitystapeille tehtiin lämpökäsittelyt noudattaen ASTM:n standardia: F3055-14a Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N07718) with Powder Bed Fusion. Standardissa on määritelty lämpötilat ja pitoajat jännitystenpoistohehkutukselle sekä HIP käsittelylle. Jännitystenpoisto tehtiin kappaleiden ollessa kiinni tulostusalustassa. Liuotushehkutus sekä erkautuskarkaisu tehtiin noudattaen SAE AMS 2774 standardia.

Lämpökäsittelyt:

1. Jännitystenpoistohehkutus: 1065 °C / 1,5 h, nopea jäähdytys Ar-suojakaasussa.
2. HIP: 1165 °C / 4h / 100MPa, jäähtyminen hitaasti uunin mukana
3. Liuotushehkutus (tyhjiöuunissa): 970 °C / 1h, nopea jäähdytys
4. Erkautuskarkaisu (tyhjiöuunissa): 720 °C / 8h, jäähdytys 2 tunnissa 620 °C:een, jossa pito 8 h, nopea jäähdytys

Mekaaniset ominaisuudet

Mekaanisten ominaisuuksien selvittämiseksi tulostettiin vetokoesauvoja staattisia vetokokeita varten sekä iskutitkeyssauvoja Charpy-V iskukokeita varten (kuva 14). Lisäksi näytteistä mitattiin pintakovuudet (Vickers, HV5). Vetokokeet tehtiin noudattaen SFS-EN ISO 6892-1:2016 standardia käyttämällä vakiovenymän muutosnopeutta 2 % prosenttien venymään asti, jonka jälkeen siirryttiin käyttämään vakiosiiirtymän nopeutta. Mitatut mekaaniset ominaisuudet on koottu seuraavaan taulukkoon (taulukko 3). Referenssinä on käytetty ASTM F3055-14a standardissa ilmoitettuja lujuusarvojen minimivaatimuksia.



Kuva 14. 3D-tulostetut a) Charpy-V iskutitkeyssauvat, b) vetokoesauvat.

Taulukko 3. Vetokokeiden, kovuusmittausten ja iskukokeiden tulokset (keskiarvo \pm keskihajonta).

Näytteiden lukumäärä	Lämpökäsittely	Kimmo moduuli (Gpa)	Myötö-lujuus Rp0.2 (Mpa)	Murto-lujuus Rm (Mpa)	Murto-venymä (%)	Kovuus (HV5)	Charpy-V Murtoenergia (J)
2 kpl	Jännitystenpoisto	205 \pm 6	864 \pm 53	1130 \pm 15	14 \pm 7	394 \pm 5	
2 kpl	Jännitystenpoisto + HIP	213 \pm 6	827 \pm 1	1121 \pm 2	20 \pm 1	295 \pm 3	42 \pm 8
3 kpl	Jännitystenpoisto + HIP + Liuotus-hehkutus + Erkautuskarkaisu	207 \pm 8	1153 \pm 18	1331 \pm 12	9 \pm 1	448 \pm 6	17 \pm 8
Referenssi	ASTM F3055-14a (Luokka D)		\geq 940	\geq 1240	\geq 12		

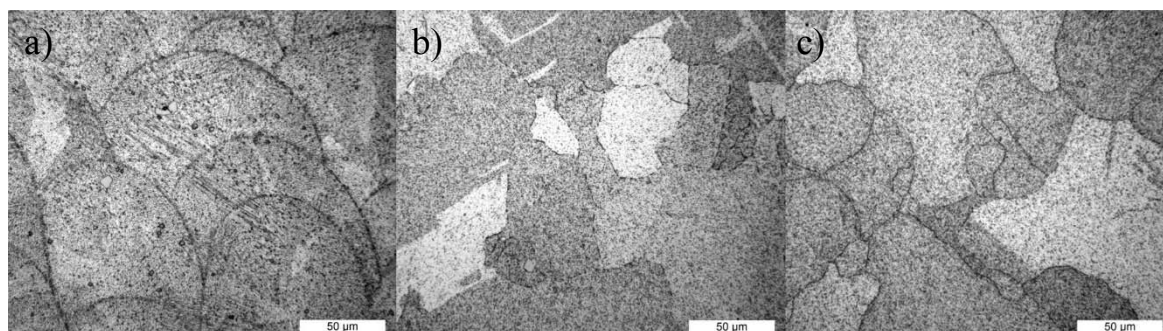
Lopullisten lämpökäsittelyiden jälkeen 3D-tulostetuilla kappaleilla on korkea lujuus, mutta murtovenymä jää hieman standardin mukaisesta minimivaatimuksesta.

Mikrorakenne

Mikrorakenteen tutkimista varten tulostettiin 3kpl 1 \times 1 \times 3cm³ sauvoja. Sauvoista valmistettiin hieet valo- ja elektronimikroskoopilla tehtävää mikrorakennepäätöstä varten. Yksi sauva jätettiin tulostustilaiseksi ja kaksi sauvaa lämpökäsiteltiin, joista toiselle tehtiin jännitystenpoisto + HIP-käsittely ja toiselle lisäksi liuotushehkutus sekä erkautuskarkaisu. Näytteet syövytettiin ennen mikroskooppitarkastelua. Kuvat näytteistä ennen ja jälkeen syövytyksen on koottu liitteeseen (Liite 2). Poikkileikkeistä otettujen kuvien perusteella voidaan todeta, että huokoisuus saatiin poistetuksi HIP käsittelyllä.

Tulostustilaisen näytteen mikrorakennepäätöstä (kuva 15a) näkyy jauhepetisulatukselta syntyneet tulostussuuntaan kasvava palkomainen rakenne. Jännitystenpoiston ja HIP käsittelyn jälkeen (kuva 15b) on nähtävissä rakeenkasvua ja homogeenisempi raerakenne. Liuotushehkutuksen ja erkautuskarkaisun tuomaa eroa mikrorakenteeseen on vaikea havaita mikrorakennepäätöstä (kuva 15c), jonka vuoksi näytteitä tutkittiin elektronimikroskoopilla (SEM). Näytteistä otetut SEM-kuvat on koottu liitteeseen (Liite 3).

Lämpökäsittelyn (liuotus + erkautus) näytteen SEM-tarkastelussa havaittiin, että γ' faasi on erkautunut tasaisesti mikrorakenteeseen, jonka lisäksi havaittiin myös karbideja sekä erkaumia mikrorakenteessa sekä raerajoilla, jotka ovat todennäköisesti δ -faasia. Demonstraatio-osasta tehtiin nopea yleiskatsaus ja faasisuhteiden määrittäminen vaatisi lisätutkimuksia.



Kuva 15. Optisella mikroskoopilla otetut mikrorakennekuvat 3D-tulostetuista Inconel 718 näytteistä: a) tulostustila, b) jännitystenpoisto + HIP, c) jännitystenpoisto + HIP + liotushehkutus + erkautuskarkaisu.

Alkuperäisen ja 3D-tulostamalla valmistetun kappaleen valmistusta ja ominaisuuksia on vertailtu seuraavassa taulukossa (taulukko 4).

Taulukko 4. Perinteisen ja 3D-tulostetun kiinnitystapin vertailu.

	Alkuperäinen	3D-tulostettu
Materiaali	Inconel 718	
Valmistusmenetelmä	Valu	Jauhepetisulatus, SLM Solutions 125HL
Jälkikäsittelyt	Lämpökäsittely HIP + 2 lämpökäsittelyä Koneistus	Lämpökäsittely Tukien irrotus HIP + 2 lämpökäsittelyä Koneistus
Valmistusnopeus	-	Tulostusaika – 33h 40min Tukien irrotus – 1,5 h Lämpökäsittelyt – 30h Koneistus – Ei tarkkaa arviota
Toimitusaika	~1 vuosi	Valmistusaika ~ 4 vko
Valmistuskustannus	90€	Laskennallinen tulostuskustannus ~55€ /kpl (SLM 280HL tai vastaava) + koneistukset & lämpökäsittelyt
Minimieräkoko	Ei tiedossa	1 kpl

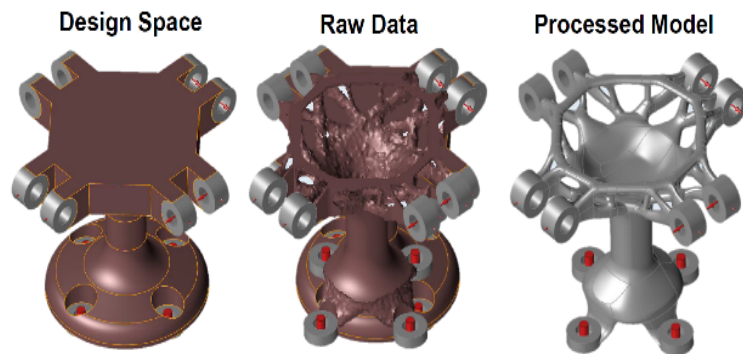
Yhteenveto

Kiinnitystappi-osat valmistettiin 3D-tulostamalla jauhepetisulatusmenetelmällä. 3D-skannattua mallia piti muokata ennen tulostusta ja kierteiden valmistaminen koneistamalla osoittautui parhaaksi ratkaisuksi. Kiinnitystapin 3D-tulostuskustannuksia arvioitiin samaan tapaan kuin muiden demonstraatio-osien kustannuksia. Laskennallinen kappalekohtainen tulostuskustannus on melko alhainen, ja suurin osa kustannuksista muodostuukin jälkikäsittelyvaiheista. Lujuusvaatimusten johdosta jälkikäsittelyvaiheessa tehtiin useita lämpökäsittelyitä, jotka olivat aikaa vieviä ja kalliita.

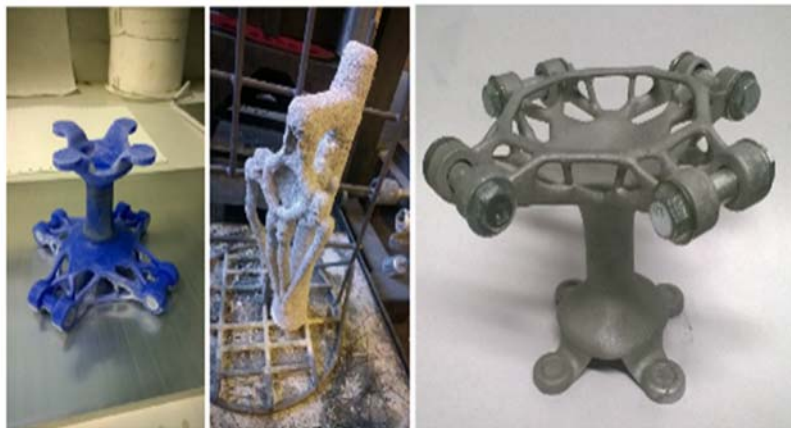
3D-tulostettujen varaosien mekaaniset ominaisuudet ylittivät minimivaatimukset pois lukien murtolujuus, joka jäi hieman tavoitteesta. Yhteenvetona voidaan kuitenkin todeta, että 3D-tulostetuille näytteille tehty standardin mukainen lämpökäsittely johti hyvään lopputulokseen. Koska kyseessä on kriittinen komponentti, vaatisi 3D-tulostetun varaosan käyttöönotto kuitenkin validointia, johon sisältyisi laajamittaista testausta käyttölämpötiloissa.

Pienoishelikopterin lapakeskiö

Pienoishelikopterin lapakeskiöön kiinnitetään roottorin lavat. Lapakeskiö pyörii helikopterin lentäessä ja kannattelee kopterin runkoa sekä nostaa sitä ylöspäin lapojen aikaansaaman nostovoiman mukaan. Lapakeskiön varaosa suunniteltiin perinteisen mallin mukaisesti sekä kevennettynä versiona tekemällä topologinen optimointi. Topologisen optimoinnin lähtökohtana oli sama lujuus kuormitukseen nähden, mutta kevyempi rakenne. Topologinen optimointi tehtiin Inspire-ohjelmistolla. Suunnitteluprosessi on esitetty seuraavassa kuvassa (kuva 16). Kappaleen valmistuksessa kokeiltiin kahta eri lähestymistapaa, joista ensimmäisessä tavassa koko kappale 3D-tulostettiin vahasta ja valettiin alumiinista tarkkuusvalumenetelmällä (kuva 17).



Kuva 16. Pienoishelikopterin lapakeskiön suunnitteluprosessi.



Kuva 17. Lapakeskiön tarkkuusvaluprosessi.

Sama lapakeskiö-osa valmistettiin myös kolmesta eri osasta liittämällä. Tämän lähtökohdan taustana oli demonstroida kappaleen jonkin rikkoontuneen osan poistamista ja korjaamista ehjällä osalla. Samalla myös tutkittiin, kuinka hyvin eri valmistusteknologiolla tehtyjä osia voidaan yhdistää toisiinsa. Keskiö jaettiin pohjaosaan, keskiosaan ja yläosaan. Pohjaosa valmis-

tettiin 316L teräksestä jauhepetisulatuksella, keskiosa normaalista 316L terästangosta sorvaamalla ja yläosa 3D-tulostetun vahamallin kautta tarkkuusvalettuna CF8M-teräksestä. Kappaleiden yhdistämiseen käytettiin laserhitsausta ja hitsauskiinnitin 3D-tulostettiin materiaalin purotuksella ABS muovista. Kappaleen jako kolmeen osaan ja kappale laserhitsauksen jälkeen esitetty seuraavissa kuvissa (kuva 18 ja kuva 19). Haasteena havaittiin laserhitsauspään vaatiman tilan huomioiminen, minkä johdosta kappaletta ei päästy hitsaamaan aivan optimaalisesta asennosta.



Kuva 18. Lapakeskiö ja sen jako kolmeen osaan.



Kuva 19. Lapakeskiö laserhitsattuna.

Ruohotrimmerin käynnistysratas

Ruohotrimmerin käynnistysrattaan tehtävänä on vetää 2-tahtinen polttomoottori käyntiin eli kyseessä on niin kutsuttu vetokäynnistys. Käynnistysrattaan rikkoutuessa laite on käyttökelvoton. Koska kyseinen trimmeri on hinnaltaan edullisemmasta päästä, ei sille ole saatavilla varaosia ja koko varaosatoimitusketju puuttuu. Rikki mennyt käynnistysratas irrotettiin, 3D-mallinnettiin ja tulostettiin. Rattaan 3D-mallinnus onnistui siitä huolimatta, että se oli osittain vaurioitunut. Lohjennut alkuperäinen ratas on seuraavassa kuvassa oikealla (kuva 20), ja 3D-tulostamalla valmistettu kopio on samassa kuvassa vasemmalla. Rattaan alkuperäinen materiaali oli

PA6, joten 3D-tulostuksen materiaaliksi valittiin ABS-muovi, koska se vastaa materiaalin ominaisuuksia melko hyvin tässä käyttökohteessa.



Kuva 20. Alkuperäinen ratas oikealla ja 3D-tulostettu ratas vasemmalla.

Uuden rataan asennus onnistui ongelmitta ja laite tuli toimintakuntoon (kuva 21). Laitteen käynnistymistä testattiin 50 kertaa, joka oli enemmän kuin mitä alkuperäinen osa kesti. Tulevaisuudessa tällaisille osille mahdollisesti löytyy internetistä erilaisia varaosakirjastoja, joista voi ladata valmiin 3D-mallin, jonka perusteella varaosan voi tehdä itse tai sen voi tilata 3D-tulostuksen palveluntarjoajalta.



Kuva 21. 3D-tulostettu ratas asennettuna.

Älykkäät varaosat

Älykkäisiin varaosiin on upotettu tai liitetty sensoreita tai tunnisteita, joiden avulla voidaan seurata osien, koneiden tai prosessien kuntoa ja arvioida käyttöikä. Tunnisteiden avulla voidaan myös seurata osan liikkumista toimitusketjussa sekä todentaa osien alkuperäisyys (digital ID).

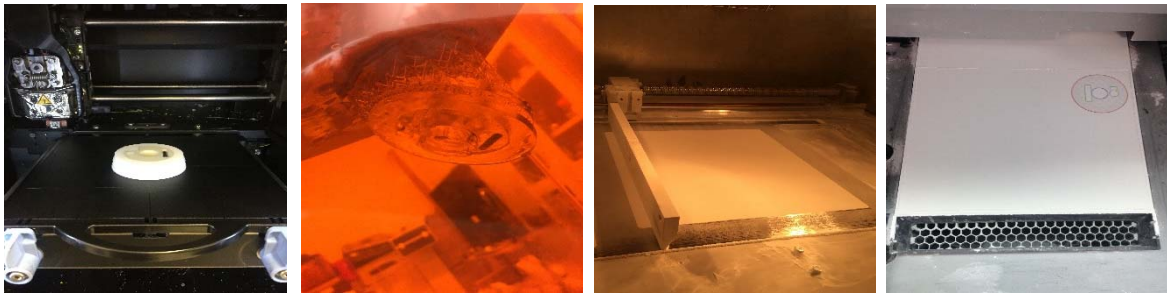
Tunniste voi olla esimerkiksi RFID (Radio Frequency Identification), joka on yleisesti käytetty teknologia komponentin älykkyyden lisäämiseksi. RFID on mikropiirin ja antennin yhdistelmä, johon voidaan kytkeytyä tyypillisesti indusoimalla antennin kautta virta sen mikropiirille. Muita tunnisteita ovat erilaiset viiva- ja matriisikuviot. Tunnisteeseen voidaan upottaa hieman

perustietoa osasta, mutta suurempien tietomäärien käsittelyyn täytyy käyttää ulkoisia tietolähteitä. Tunniste voidaan liittää fyysisesti komponenttiin monella tavalla.

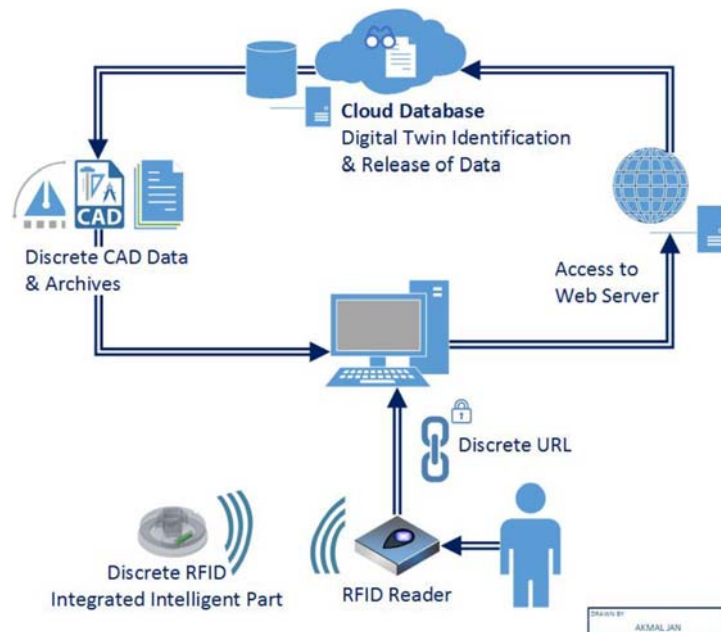
Mikropiiriin voidaan tallentaa joko tietoa tuotteesta tai tuottaa käytönaikaista tietoa kytketyillä antureilla. Tällä tavoin komponentin ”älyä” voidaan kasvattaa yhdistämällä, tallentamalla, lukemalla tai kirjoittamalla komponenttiin ulkoisessa tietovarastossa olevaa informaatiota.

3D-tulostaminen mahdollistaa kerros kerrokselta valmistusperiaatteen ansiosta kappaleen sisäiset rakenteet. Tällainen sisäinen rakenne voi olla esimerkiksi onkalo, johon asetetaan manuaalisesti tai muita valmistustapoja kuten suoratulostusta käyttäen em. tunniste tai anturi sillä aikaa, kun valmistus on keskeytettynä.

Demonstraatiossa käytettiin neljää eri 3D-tulostusteknologiaa ruohotrimmerin käynnistysratiaan muuttamiseksi älykkääksi varaosaksi. Käytetyt 3D-tulostusteknologiat olivat valokovetus altaassa (Form2 / Formlabs), materiaalin pursotus (uPrint / Stratasys), jauhepetisulatus (SLS-tulostin, Aalto-yliopiston rakentama) ja sideaineen suihkutus (Zprinter / 3D Systems). Jokaisella teknologialla tulostettiin varaosa, johon istutettiin RFID-tunniste (kuva 22). Tunnisteeseen tallennettiin attribuuttitietona linkki osan valmistusdokumentaatioon, joka oli tallennettu tiedostopalvelimelle. Lukijaohjelmisto määritettiin avaamaan kyseinen linkki lukuhetkellä (kuva 23).



Kuva 22. Neljällä eri 3D-tulostusteknologialla toteutetut älykkäät varaosat.



Kuva 23. Viitekuva älykkään varaosan lukemisesta ja kytkeytymisestä ulkoiseen tietojärjestelmään.

Elektroniikkakotelo

Ruiskupuristamalla valmistetun elektroniikkakotelon korvaamista lasersintratulla varaosalla demonstroitiin. Alkuperäisestä kotelosta mallinnettiin kopio, joka valmistettiin 3D-tulostamalla PA12-materiaalista. Alkuperäinen kotelo ja 3D-tulostettu kopio näkyvät seuraavassa kuvassa (kuva 24).



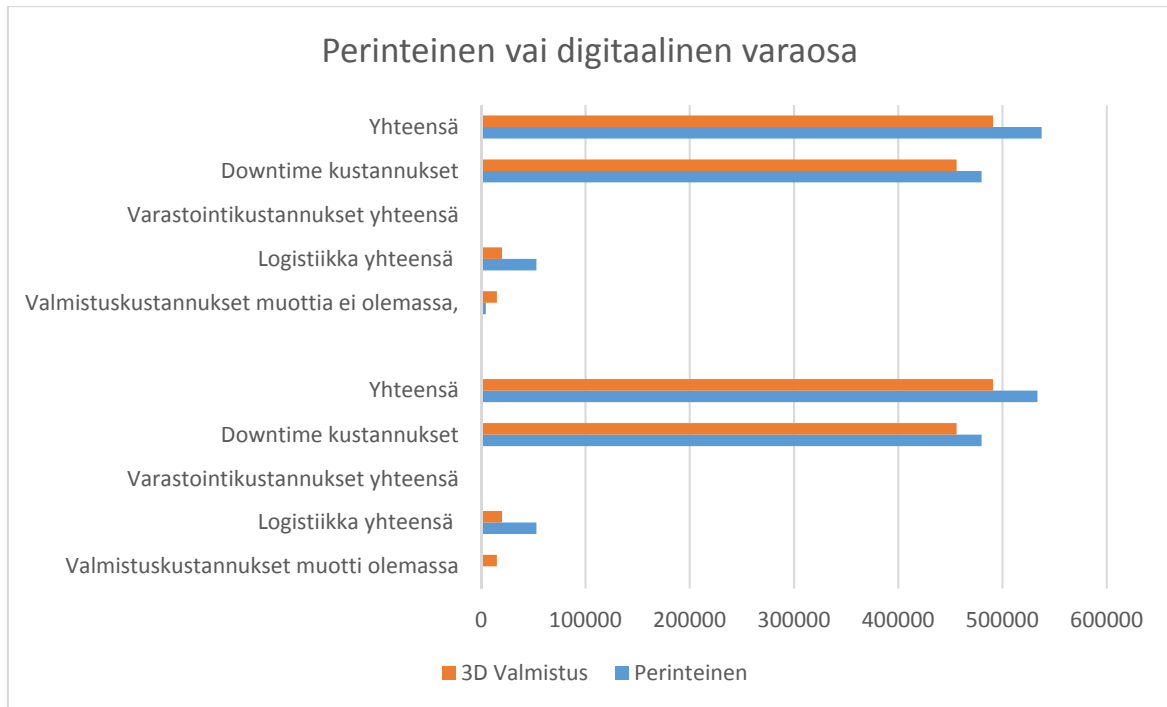
Kuva 24. Ruiskupuristettu elektroniikkakotelo vasemmalla ja lasersintrattu oikealla.

Varaosasta tulee tietää riittävästi taloudellisia yksityistietoja, jotta 3D-tulostetun varaosan kannattavuutta voidaan arvioida. Keskeisinä tietoina ovat varaosan menekki, valmistuskustannukset, logistiikkakustannukset, sekä mahdolliset seisokin aiheuttamat kustannukset. 3D-tulostetun elektroniikkakotelon kustannuksia vertailtiin alkuperäisen tuotantovaraosan kustannuksiin (taulukko 5).

Taulukko 5. Elektroniikkakotelon kustannusten vertailu.

	Ruiskupuristus	3D-tulostus
Vuotuinen menekki (kpl)	100	100
Valmistuskustannus/kpl (€)	5	150
Muottikustannukset (€)	40000	0
Muotin kesto (vuotta)	10	0
Valmistuskustannukset, kun muotti olemassa (€)	500	15000
Valmistuskustannukset, kun muottia ei olemassa (€)	4500	15000
Logistiikkakustannukset valmistajalta varastoon (€/kpl)	30	0
Logistiikkakustannukset asiakkaalle (€/kpl)	500	200
Keskimääräinen varastotaso (kpl)	10	1
Täydennyseräkoko (kpl)	10	0
Varastointikustannus (€/kpl)	10	1
Varastointikustannukset yhteensä (€)	100	1
Asiakkaan seisokkikustannukset (€/h)	1000	1000
Toimitusaika (d)	20	19

Edellä olevasta taulukosta nähdään, että sadan kappaleen menekillä varaosan vuosittaiset valmistuskustannukset ovat 3D-tulostamalla 15000 €, kun ruiskupuristuksella kustannukset ovat vain 45000 €, jos muottia ei ole ja 500 €, jos muotti on jo olemassa. Logistiikka- ja varastointikustannuksissa 3D-tulostuksella on kustannusetu, mutta sillä ei vielä kateta merkittävästi suurempia valmistuskustannuksia. 3D-tulostuksella saadaan kuitenkin taloudellinen etu, kun huomioidaan seisokkikustannukset. Seisokkikustannukset ovat yrityksen arvioimien kustannusten alin arvo. Elektroniikkakotelon nykyinen toimitusaika on 20 päivää perinteisin menetelmin. Jos 3D-tulostamalla saadaan seisokkia lyhennettyä vain päivällä, pysähtyneen tuotannon suuret kustannukset aiheuttavat sen, että 3D-tulostetun kappaleen kokonaiskustannukset ovat tällöin alhaisempia. Todellisuudessa tällaisen 3D-tulostetun kappaleen toimitusaika on alle viikko, pikatoimituksena vieläkin nopeampi. Kustannusten jakautuminen on esitetty seuraavassa kuvassa (kuva 25).

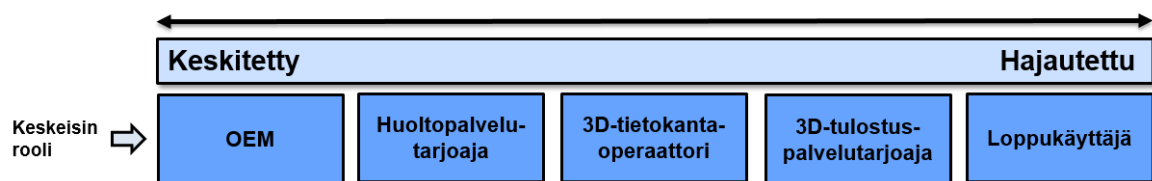


Kuva 25. Elektroniikkakotelon kustannusten jakautuminen.

5. Digitaalisten varaosien vaikutukset toimintamalleihin ja järjestelmiin

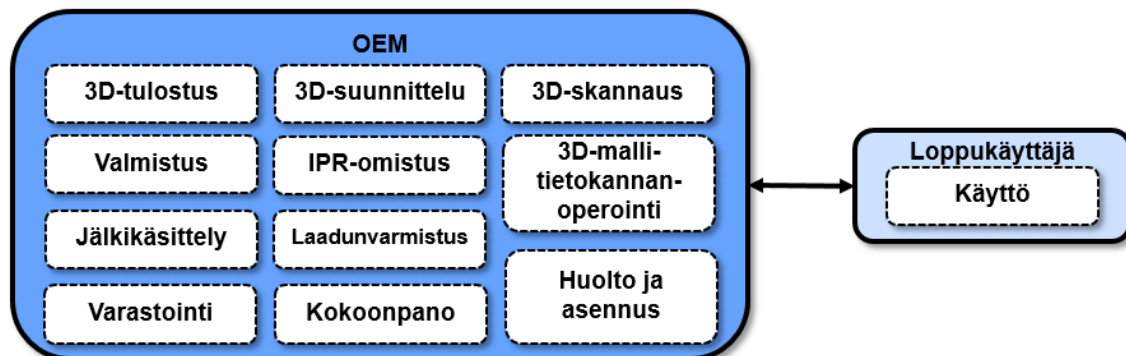
Verkosto- ja liiketoimintamallit

Digitaalisten varaosien vaikutusta toimintamalleihin voidaan hahmottaa hankkeessa kehitetyin viiden yleisen toimitusketjumallin avulla, jotka vaihtelevat keskitetystä hajautettuun malliin (kuva 26): 1) OEM-keskeinen malli 2) Huoltopalvelutarjoajakeskeinen malli 3) 3D-tietokantaoperaattorikeskeinen malli 4) 3D-tulostuspalvelutarjoajakeskeinen malli 5) loppukäyttäjakeskeinen malli.



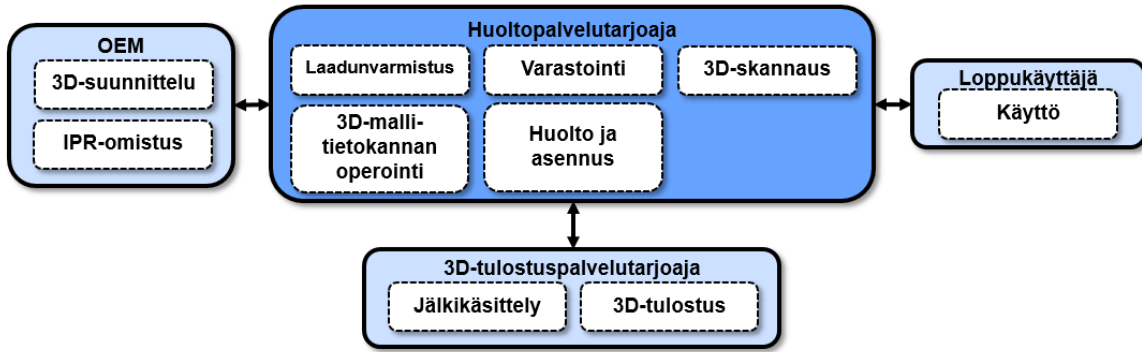
Kuva 26. Viisi toimitusketjumallia.

OEM-keskeinen malli (kuva 27) soveltuu esimerkiksi tilanteisiin, joissa on suuret vastuukysymykset, kuten turvallisuuskriittiset sovellukset (esim. lääkinnälliset laitteet ja ilmailu). Tässä mallissa IPR:n hallinta on OEM:lle selkeää, koska OEM kontrolloi koko prosessia. Voidaan kuitenkin kysyä, onko tämä OEM:n ydinosaa? Loppukäyttäjälle tämä malli on helppo ja luotettava, mutta toisaalta joustamaton malli, koska vaihtoehtoisia kanavia asiointiin ei ole.



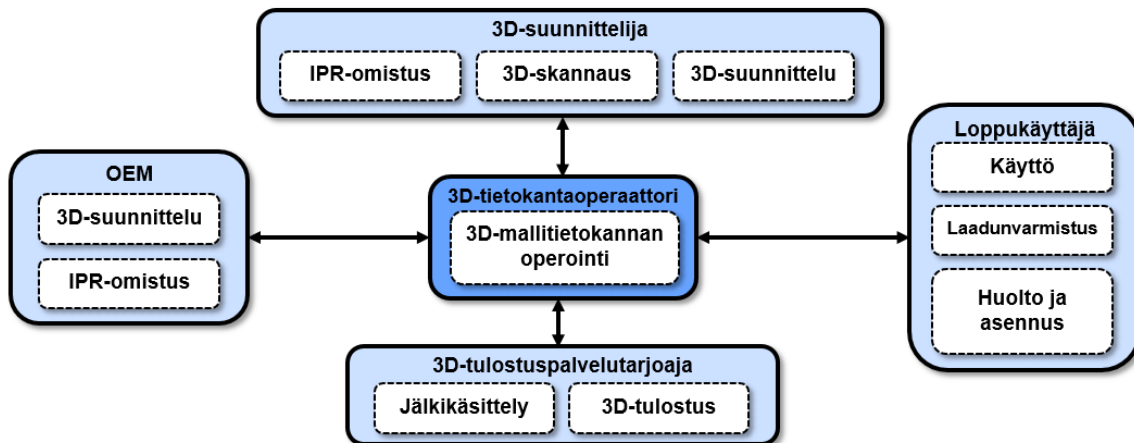
Kuva 27. OEM-keskeinen malli.

Huoltopalvelutarjoajakeskeinen malli (kuva 28) sopii erityisesti tilanteisiin, joissa huoltopalvelutarjoajalla on perinteisestikin ollut vahva asiakassuhde loppukäyttäjään, esimerkiksi koneet ja laitteet, jotka vaativat jatkuvaa ja säännöllistä huoltoa. Lisäksi huoltopalvelutarjoaja on monesti maantieteellisesti lähempänä loppukäyttäjää kuin OEM, mikä helpottaa yhteistyötä.



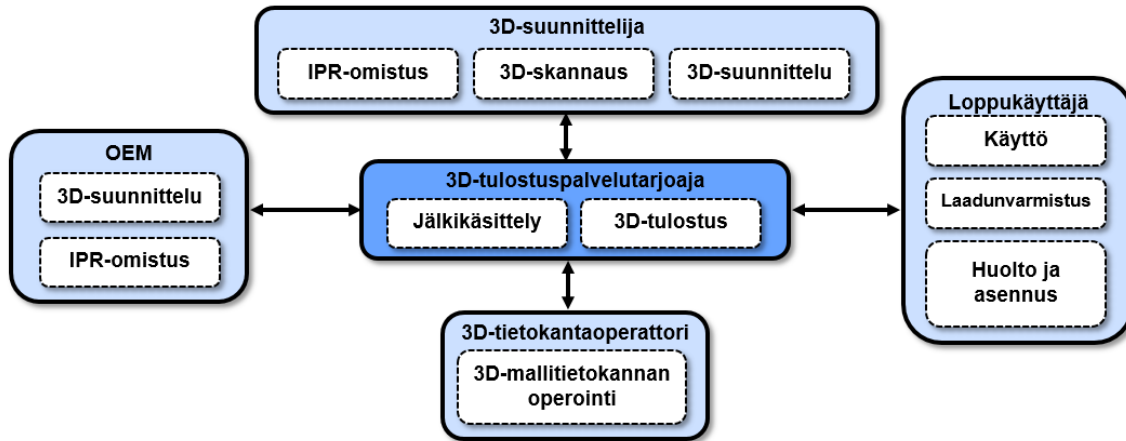
Kuva 28. Huoltopalvelutarjoajakeskeinen malli.

3D-tietokantaoperaattorikeskeinen malli (kuva 29) voidaan nähdä kaikkein disruptiivisimpana mallina, jossa verkostoon tulee keskeiseen rooliin kokonaan uusi toimija. Tämä rooli voisi sopia myös jollekin suurelle globaalille alustatoimijalle (esim. Google, Amazon tai eBay). Tässä mallissa loppukäyttäjä pääsisi yhden 3D-tietokantaoperaattorin kautta käsiksi monen eri OEM:n varaosavalikoimaan. Tässä mallissa loppukäyttäjä on selvästi omatoimisempi kuin kahdessa edeltävässä mallissa. Loppukäyttäjä vastaa itse esim. laadun varmistuksesta sekä tietyistä huoltotoimenpiteistä, joten loppukäyttäjältä vaaditaan enemmän asiantuntemusta kuin aiemmissa malleissa.



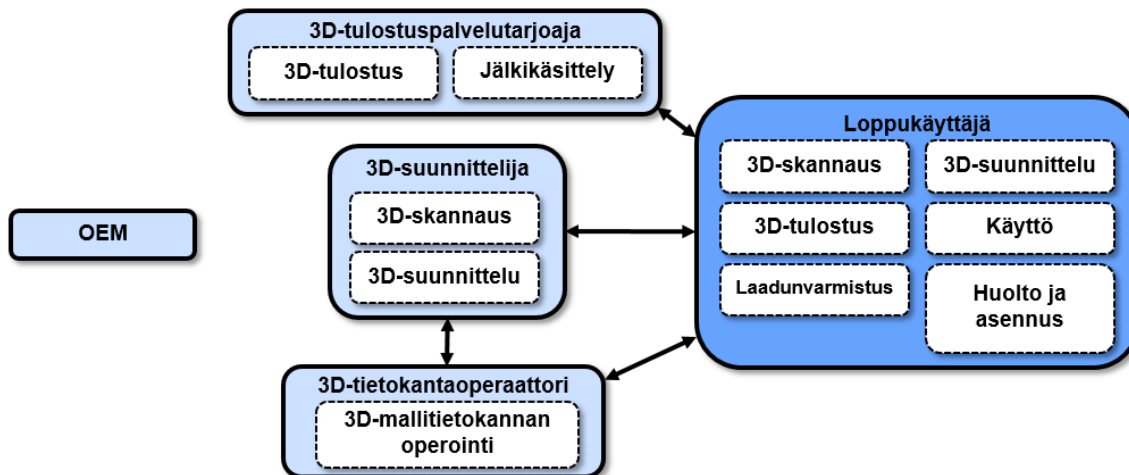
Kuva 29. 3D-tietokantaoperaattorikeskeinen malli.

3D-tulostuspalvelutarjoajakeskeisessä mallissa (kuva 30) keskeisessä roolissa voi toimia perinteinen valmistusyritys tai komponenttitoimittaja. Näillä toimijoilla on todennäköisesti jo ainakin tietty osa valmistusprosessista (esim. jälkikäsittelylaitteet) valmiina, joten siirtymä malliin voisi olla aika luonteva. Ajatuksena on, että loppukäyttäjä pyrkii valitsemaan maantieteellisesti mahdollisimman lähellä olevan toimijan. Jos 3D-tulostuspalvelutarjoajia on useita, voi näiden vertailu olla loppukäyttäjälle vaikeaa.



Kuva 30. 3D-tulostuspalvelutarjoajakeskeinen malli.

Loppukäyttäjakeskeistä mallia (kuva 31) voi hyvin kuvata tee se itse -tyyppiseksi hajautetuksi ratkaisuksi, jossa loppukäyttäjällä on paljon valtaa ja valinnanvaraa. Malli soveltuu lähinnä ei-kriittisiin sovelluskohteisiin ja geneerisille varaosille. Malli on loppukäyttäjälle nopea ja joustava, mutta vaatii myös paljon teknistä osaamista sekä pääsyn tarvittaviin laitteisiin. Tämä malli soveltuu parhaiten b-to-c -markkinakontekstiin.



Kuva 31. Loppukäyttäjakeskeinen malli.

3D-tulostus on liiketoimintana vielä kehityksensä alkutaipaleella. Niinpä selkeitä ”dominoivia” arvoketjumalleja ja verkostoja ei ole vielä havaittavissa. Esimerkiksi useat projektissa mukana olleet tulostuspalveluyritykset kertoivat toimivansa asiakaskohtaisesti erityyppisten verkostojen kautta, eikä tämän nähty muuttuvan lähitulevaisuudessa. Toimivia toimintamalleja siis vielä etsitään kokeillen. OEM-valmistajillakaan ei ole selkeää tulevaisuuden verkostomallia, mutta liiketoiminnan logiikkaa on kuitenkin jatkuvasti mietittävä tulostus- ja skannausteknologioiden kehittyessä.

Moni yritys pohtii panostaako ja investoidako 3D-tulostusteknologiaan. Hankintaa jarruttavina tekijöinä nähdään usein, että teknologia on vielä nopeassa kehitys- ja uudistumisvauhdissa, eikä toisaalta mahdollisen investoinnin tuomaa kapasiteettia kyetä käyttämään riittävästi. Nämä te-

kijät puoltavat sitä, että 3D-tulostus tulee etenemään lähivuosina erityisesti erikoistuneiden tulostusyriytysten kautta. Näin osaamis pohjaa rakennetaan keskitetysti ja investoinneille saadaan laajan asiakaskunnan kautta suurempi käyttöaste.

Yhteistyö, kompetenssit ja johtaminen

3D-tulostettuihin varaosiin liittyvän verkoston eri toimijoiden välinen yhteistyö on tällä hetkellä suhteellisen kevyttä, mutta sen painoarvon arvioidaan kasvavan tulevaisuudessa. Pääosin yhteistyö eri toimijoiden kesken sujuu hyvin. Ongelmatilanteita syntyy lähinnä aikataulujen venymisen ja riittämättömän viestinnän takia.

Tilaukseen, tulostukseen ja kuljetusvaiheeseen liittyvän yhteistyön ongelmia voidaan vähentää aktiivisella viestinnällä, toimivilla neuvottelusuhteilla ja nopealla reagoinnilla. Selkeät sopimukset, yhteistyön automatisointi ja sähköiset järjestelmät, jotka luovat läpinäkyvyyttä kumppaniverkoston, tuovat parannusta tilanteeseen. Erityisesti systemaattisessa ja laajassa toiminnassa suurten asiakasyriytysten kanssa tullaan tulevaisuudessa tarvitsemaan varsinkin tilausten hallintaan toimivia web-järjestelmiä sen sijaan, että tilauksia tehtäisiin esimerkiksi sähköpostin välityksellä. Yhteistyö vaatii myös luottamusta. Luottamusta voidaan lisätä muun muassa sopimuksin (NDA), rajoittamalla jaettavan tiedon sisältöä sekä yhteistyöllä tuttujen ja luotettaviksi havaittujen toimijoiden kanssa.

Varaosien tuotannon digitalisointi tulee muuttamaan yrityksiltä vaadittavia kompetensseja merkittävästi. Rutiinitehtävien merkitys näyttää vähenevän, kun taas vaativammat tietoon perustuvat tehtävät tulevat entistä tärkeämmiksi. Yrityksiltä vaadittavat kompetenssit vaihtelevat sen mukaan, mikä on yrityksen rooli digitaalisten varaosien verkostossa. Kompetenssit voidaan jaotella kolmeen kategoriaan, joista ensimmäinen liittyy 3D-tulostusprosessin yleiseen ymmärrykseen. Toinen kategoria pitää sisällään kaupallista ja liiketoimintaosaamista. Se sisältää projektinhallintataitoja, logistiikan osaamista, toimitusaikojen hallintaa, lakien tuntemusta ja markkinoinnin sekä hinnoittelun taitoja. Kolmas kategoria sisältää sosiaalisia taitoja, kuten yhteistyö- ja viestintätaitoja, johtamistaitoja ja luovaa ajattelukykyä.

Yhteistyön johtaminen vaatii jaettua näkemystä tavoitteista ja tehtävistä. Prosessin etenemisen pitää olla läpinäkyvää, mikä tarkoittaa avointa tiedonjakoa ja pikaista reagointia mahdollisiin ongelmatilanteisiin ja muutoksiin. Vakiintuneiden yhteistyökumppaneiden kanssa esimerkiksi säännöllisin väliajoin pidettävät seurantalaverit mahdollistavat ongelmakohtien ennaltaehkäisyn ja luottamuksen rakentamisen.

ICT-järjestelmät

3D-tulostus on suomalaisille yrityksille tällä hetkellä yksi vaihtoehtoinen tapa valmistaa tarvittava osa. 3D-tulostetun osan valmistamiseen liittyvä tapahtumaketju on varsin suoraviivainen. Tyypillisesti varaosan 3D-tulostukseen liittyvä viestintä ja tiedonjako tapahtuvat sähköpostitse. Asiakas toimittaa tulostettavaksi tarkoitettun osan mallin joko valmiina 3D-mallina, skannattuna tai paperikuvana. Tieto osasta mahdollisine työ- tai materiaali ohjeineen toimitetaan joko sähköpostin liitteenä tai linkkinä asiakkaan dokumenttienhallintajärjestelmään. Joissakin tapauksissa toimitusverkoston toimijoilla on jonkin verran näkymää toistensa järjestelmiin toimitusketjun sisällä, mutta hyvin rajoitetusti.

Asiakkaalla saattaa myös olla hallussaan vain rikkoutunut osa, josta ei ole minkäänlaisia piirustuksia. Tällöin voidaan käyttää käännteissuunnittelun menetelmiä ja joko skannata rikkoutunut osa ja muokata mallia tarvittavissa määrin tai käyttää ulkopuolista yhteistyökumppania osan CAD-mallinnuksessa.

Osista saattaa ajan myötä tulla useampia revisioita, joiden hallinta tapahtuu tyypillisesti tiedostojen nimeämiskäytäntöjen avulla. 3D-mallien tallennus ja varmuuskopiointi tehdään usein kolmannen osapuolen tarjoaman pilvipalvelun avulla. Yleensä CAD-järjestelmien malleja tallennetaan natiiviformaatissa, ja niistä käännettyjä 3D-tulostuksessa käytettyjä STL-malleja ei kerätä tietojärjestelmiin.

Osista tehtyjen mallien IPR kuuluu lähes aina oletusarvoisesti asiakkaalle eli tilauksen tekijälle. Osa asiakkaista vaatii tuhoamaan tehdyn mallin tulostuksen jälkeen, ja osa pyytää tulostajaa tallettamaan sen mahdollista myöhempää tarvetta varten. Kaikki 3D-tulostuspalveluja käyttävät asiakkaat eivät näytä tällä hetkellä olevan lainkaan kiinnostuneita 3D-mallin omistukseen tai käyttöön liittyvistä seikoista, vaan ainoastaan tuloksena saadusta fyysisestä osasta.

Toistaiseksi yritykset eivät ole tarvinneet erityisiä 3D-tulostuksen tietojärjestelmiin liittyviä panostuksia. Käytössä on lähinnä erilaisia CAD-ohjelmistoja osien suunnitteluun ja 3D-mallien tuottamiseen sekä 3D-tulostimien käyttämiseen ja tuotannon suunnitteluun tarvittavia järjestelmiä.

Tietojärjestelmätieteiden näkökulmasta 3D-tulostusta voidaan pitää yhtenä tuotantoprosessien digitalisaatiota mahdollistavana teknologiana, jonka avulla pystytään aiempaa tehokkaampaan tuotteiden räätälöintiin sekä hajautettuun tuotantoon. Saavutettavan hyödyn maksimoimiseksi 3D-tulostukseen liittyvien tuotantoprosessien tulisi olla mahdollisimman pitkälle digitaalisia. Jotta 3D-tulostettava osa pystytään valmistamaan hajautetussa ympäristössä taloudellisesti ja tasalaatuisesti, kaiken tuotemäärittelyyn liittyvän tiedon tulisi olla saatavissa digitaalisessa muodossa.

Tuotannon digitalisoituessa valmistusprosesseihin liittyen on tarjolla yhä enemmän hyödynnettävissä muodossa saatavaa tietoa, esimerkiksi määrittelyjä, suunnitelmia ja mittausdataa. Sopivilla tiedonhallinnan ratkaisuilla 3D-tulostusprosessiin liittyvää tietoa voitaisiin hyödyntää yrityksissä huomattavasti nykyistä tehokkaammin ja kehittää siihen perustuen jopa uusia liiketoimintamahdollisuuksia.

Tulevaisuudessa asiakkaiden vahvempi integrointi 3D-tulostettavan tuotteen kehitykseen ja valmistukseen tuottaa toimitusverkostolle lisäarvoa. Valmistusprosessin aikana generoituvan tiedon määrä lisääntyy voimakkaasti, ja tietoa on mahdollista hyödyntää huomattavasti nykyistä monipuolisemmin, esim. tuotteen validoinnissa tai sen toiminnallisuuden simuloinnissa. Tiedonjakoa tulisi lisätä niin loppukäyttäjän/asiakkaan ja tuotekehityksen välillä kuin tuotekehityksen ja valmistuksen välillä. Osan tai tuotteen digitaalisen mallin tulee sisältää kaikki sen laadukkaan valmistuksen kannalta oleellinen tieto. Tuotteen elinkaaren aikana muodostuu ”digitaalinen säie”: kaikki tieto liittyen osan suunnitteluun, valmistukseen ja käyttöön kerätään talteen digitaaliseen muotoon. Digitaalinen säie mahdollistaa tiedon jakamisen organisaation sisällä, tuotantoverkoston jäsenille, asiakkaille ja loppukäyttäjille. Lisäämällä näin näkyvyyttä tuotantoverkosto pystyy tehostamaan ja automatisoimaan toimintaansa sekä palvelemaan pa-

remmin loppukäyttäjää. Kaikesta talteen kerätystä tiedosta muodostuu tuotteen tai osan ”digitaalinen kaksoisolento”, jota voidaan hyödyntää tuotteen jatkokehityksessä ja tuotannon kehittämisessä, sekä uusien liiketoimintamallien kehittämisessä.

Tiedon määrän jatkuvasti lisääntyessä tietoturvan merkitys korostuu. Digitaalisen tiedon kopiointi ja jakaminen on lähtökohtaisesti helppoa, joten tekijänoikeuksien suojaaminen ja piratismin torjuminen nousevat merkittävään rooliin. Samoin tiedon oikeellisuus ja eheys ovat olennaisia tärkeitä kysymyksiä: varaosan 3D-malliin voi pahansuopa tekijä haluttaessaan tehdä muutoksia, joiden ansiosta osasta tulee esimerkiksi rakenteeltaan vaarallisen heikko. Avoimia kysymyksiä liittyy myös tuoteturvaan: kenen toimitusverkoston jäsenen vastuulla on, jos tulostettu varaosa hajoaa ja aiheuttaa vaaratilanteen.

6. Digitaalisten varaosien tulevaisuus

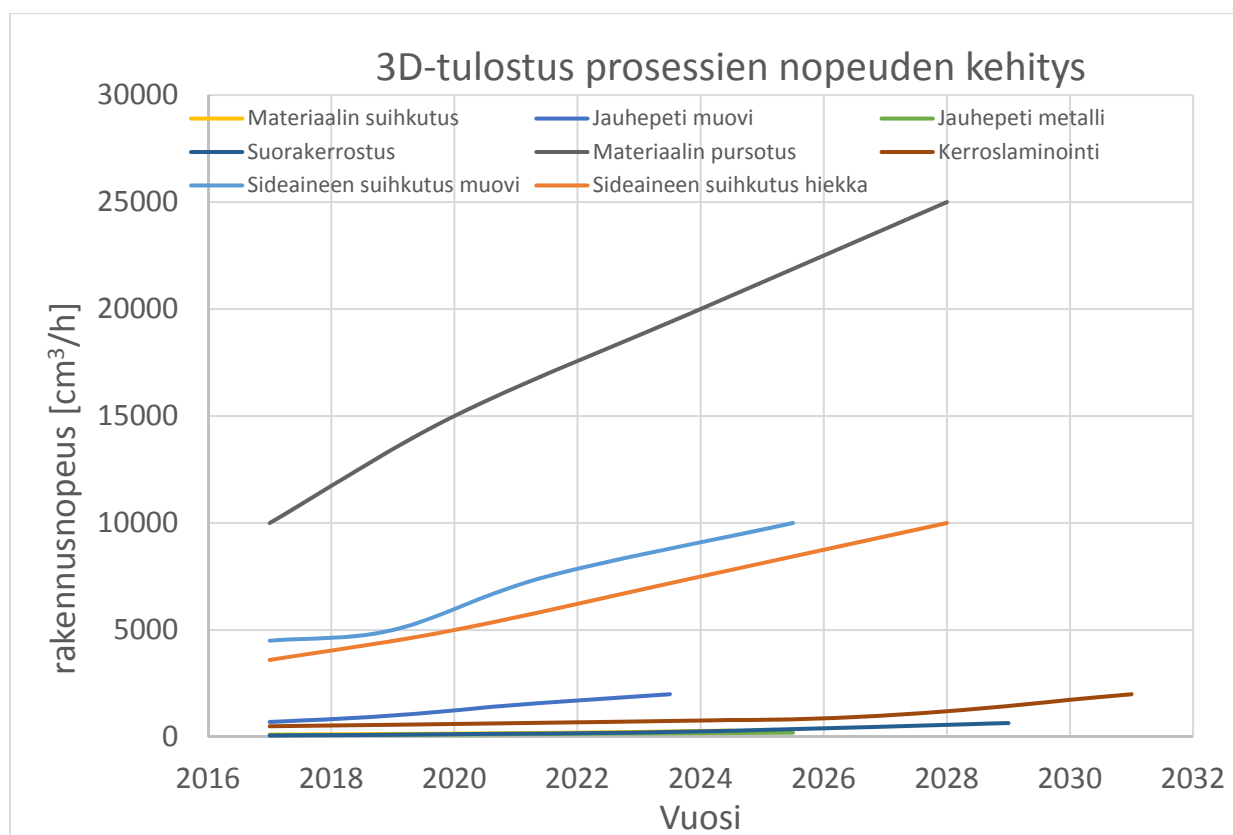
3D-tulostuksen kehittyminen – ennuste

Ennusteiden mukaan 3D-tulostuslaitteiden rakennuskammioiden koko kasvaa, materiaalikirjo laajenee sekä tulostusprosessit tehostuvat. Seuraavasta taulukosta (taulukko 6) nähdään, että jo lähivuosina suurin osa, noin 81–99 % 3D-tulostettavista varaosista voidaan kokonsa puolesta valmistaa 3D-tulostamalla käytetystä tulostusprosessista riippuen.

Taulukko 6. Kammio-tilavuus nyt ja vuonna 2020, ja laitteisiin mahtuvien kappaleiden osuudet.

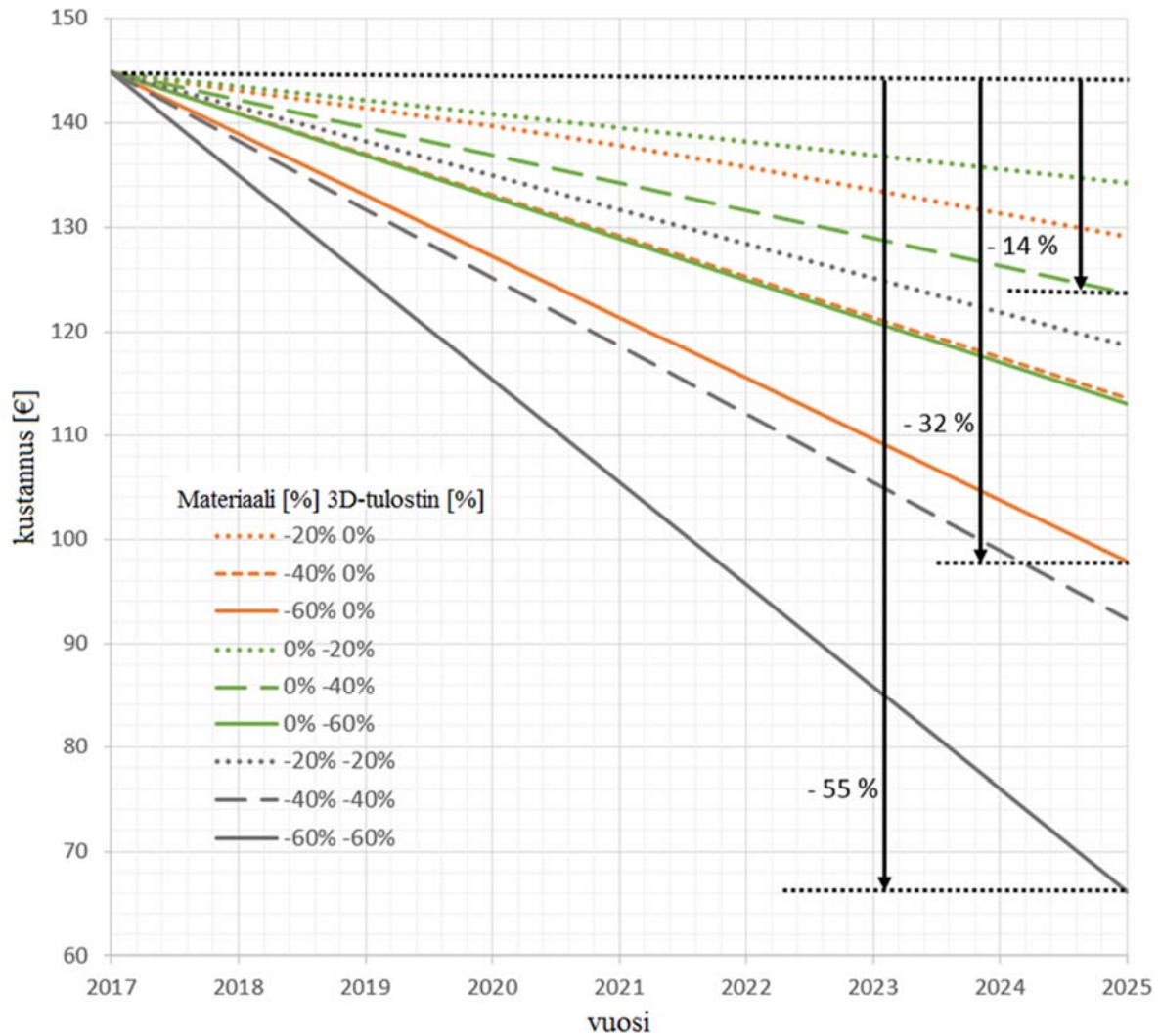
	Suurin rakennuskammion tilavuus 2017 [m ³]	Osuus laitteeseen mahtuvista kappaleista 2017 [%]	Arvioitu suurin rakennuskammion tilavuus 2020 [m ³]	Osuus laitteeseen mahtuvista kappaleista 2020 [%]
Jauhepetisulatus (metalli)	0.16	63.34	0.52	81.07
Sideaineen suihkut	0.3	72.25	0.7	86.27
Materiaalin suihkut	0.4	76.73	0.8	88.7
Valokovetus altaassa	0.62	84.11	1.5	99
Jauhepetisulatus (muovi)	0.98	92.56	2.4	99
Kerros laminointi	3	99	4.2	99
Sideaineen suihkut (hiekk)	8	99	11.5	99
Suorakerrostus	11.7	99	16	99
Materiaalin pursotus	25	99	25	99

Teollisten osien valmistamiseen soveltuvien 3D-tulostusmenetelmien tuotantonopeuksien oletetaan kasvavan huomattavasti seuraavan vuosikymmenen aikana (kuva 32). Tutkimuslaitoksille suunnattu kysely osoittaa, että materiaalin pursotus-tekniikan oletetaan saavuttavan valmistusnopeuden 25000 cm³/h vuonna 2028, muovipohjaisen sideaineen suihkutuksen 10000 cm³/h vuonna 2025, ja hiekkapohjaisen sideaineen suihkutuksen vastaavan valmistusnopeuden vuonna 2028. Muovien jauhepetisulatus saavuttaa 2000 cm³/h valmistusnopeuden vuoden 2023 jälkeen ja metallipohjainen jauhepetisulatus saavuttaa 200 cm³/h valmistusnopeuden vuoden 2025 jälkeen.



Kuva 32. Ennuste 3D-tulostuslaitteiden nopeuden kehityksestä.

Rakennuskammioiden koon kasvaminen, suuremmat tuotantonopeudet sekä tulostusmateriaalien hintojen lasku todennäköisesti tulevat laskemaan 3D-tulostettujen osien hintoja merkittävästi seuraavien vuosien aikana. Seuraavassa kuvassa (kuva 33) on esitetty 3D-tulostuksen kustannuksien kehitys vuoteen 2025 saakka. Y-akselilla on esitetty esimerkigeometrian (ajoituspyörä, volyyymi 80 cm³) tuotantokustannuksen kehitys. Kun materiaali- ja konekustannukset laskevat kumpikin 60 %, lopulliset kustannukset voivat laskea jopa 55 %. Arviomme mukaan todennäköisin tulevaisuuden skenaario on, että vuoteen 2025 mennessä materiaalikustannukset laskevat 60 % ja konekustannukset pysyvät samalla tasolla, mistä seuraa, että kokonaiskustannukset laskevat 32 %. Kasvava kilpailu ja lisääntyvä metallitulostajien määrä oletettavasti myös laskevat hintoja. Vain harvat yritykset pystyvät valmistamaan metallimateriaalien 3D-tulostimia, jotka on tarkoitettu korkealaatuisten kappaleiden tuotantoon. Tästä johtuen ja huolimatta materiaalikustannusten 60% laskusta, konekustannukset saattavat säilyä samalla tasolla kuin aiemmin. Lisäparannuksia tuotantonopeuteen voidaan saavuttaa, jolloin kokonaiskustannukset voivat mahdollisesti laskea 40–45 % vuoteen 2025 mennessä.



Kuva 33. Valmistuskustannusten lasku ajan funktiona esimerkigeometrialle.

Digitaalisten varaosien tulevaisuudennäkymät

Digitaalisiin varaosiin liittyy monia tekijöitä, joiden kehityksestä ja valmiusasteesta riippuu paljolti se, kuinka pian ja missä laajuudessa yritykset ottavat digitaaliset varaosat käyttöön. Tärkeimpiä tekijöitä lienevät materiaalien, 3D-tulostuskustannusten ja 3D-tulostettujen kappaleiden laadun kehittyminen ja vertailtavuus perinteisesti valmistettuihin osiin. Myös prosessien automatisointi on oleellista kustannustehokkuuden kannalta. Automatisointia tarvitaan niin tilaus-toimitusprosesseissa kuin 3D-tulostamiseen liittyvän valmistusketjun eri vaiheissa.

3D-tulostusmateriaalien valikoima kasvaa koko ajan ja 3D-tulostamisen kustannukset laskevat, mikä osaltansa tulee kiihdyttämään digitaalisten varaosien käyttöönottoa ja hyödyntämistä. 3D-tulostus tulee myös pian vakiinnuttamaan paikkansa myös alkuperäisesti toimitettujen osien valmistamisessa. Näin ollen osa varaosista muuttuu luonnollisesti digitaalisiksi varaosiksi. Varaosien digitalisointi mahdollistaa osien jatkuvan päivityksen, mistä johtuen varaosia on tulevaisuudessa paremmin tarjolla ja käyttökohteen tarpeiden mukaan räätälöitynä. Tämä koskee myös kokoonpanoja, joista voidaan joko tulostaa vain rikkoutuneet osat tai toisaalta voidaan tulostaa kertatulosteena useamman osan kokoonpanoja.

Digitaalisille varaosille on kehitettävä kattavampia laatujärjestelmiä. On pystyttävä takaamaan ja todentamaan, että 3D-tulostusprosesseilla valmistettujen osien suorituskyky ja laatu ovat vähintään samaa tasoa kuin mihin pystytään perinteisillä valmistusmenetelmillä. Varaosakirjastot kaipaavat myös päivitystä: kirjastoista pitää löytyä 3D-mallien lisäksi myös kaikki valmistustieto toleransseineen, materiaalitietoineen sekä tarvittavine jälkikäsitteilyprosesseineen. Digitaalisten varaosien ympärille rakentuneen tulevaisuudessa erilaisia ekosysteemejä, joissa sekä valmistustieto että 3D-tulostetut varaosat liikkuvat turvallisesti eri toimijoiden välillä. On myös erittäin todennäköistä, että digitaaliset varaosat tuovat ekosysteemeihin uusia toimijoita, kuten esimerkiksi yrityksiä, jotka siirtävät varaosamallit sekä valmistustiedon digitaaliseen muotoon, ja jotka mahdollisesti myös säilyttävät ja siirtävät varaosiin liittyvää tietoa ekosysteemin eri toimijoiden välillä. Digitaaliset varaosat voidaan valmistaa hajautetusti, mikä lyhentää toimitusketjuja ja vähentää turhaan paikallisiin varastoihin valmistettavien osien määrää ja niiden hävikkiä sekä osien kuljetustarvetta.

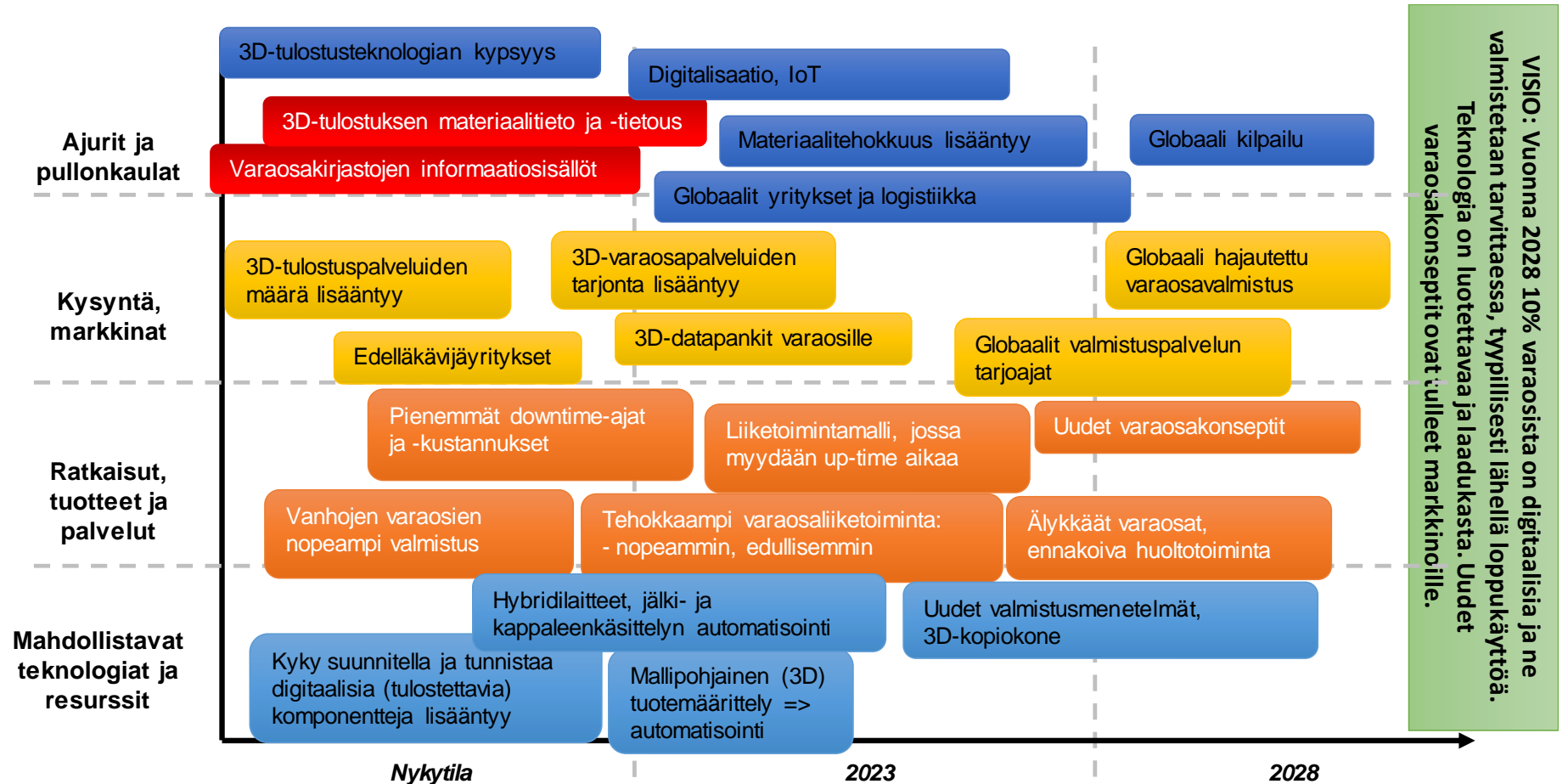
Tulevaisuuden varaosakonseptit

3D-tulostaminen avaa paljon uusia mahdollisuuksia tulevaisuudessa. 3D-tulostetun osan ei tarvitse välttämättä olla kopio alkuperäisestä osasta, vaan osaa voidaan räätälöidä tarpeen mukaan. Varaosaan voidaan vaikkapa upottaa älyä tai osat voidaan suunnitella kestävämmän vain rajatun ajan (ns. ensiapuvaraosat). Osia voidaan myös korjata 3D-tulostuksen avulla tai niitä voidaan valmistaa esimerkiksi liikkuvissa 3D-tulostusasemissa. Erilaisia 3D-tulostuksen kautta mahdolliseksi tulevia tulevaisuuden varaosakonsepteja on kuvattu seuraavassa taulukossa (taulukko 7).

Taulukko 7. Tulevaisuuden varaosakonseptit.

Varaosakonsepti	Kuvaus
Älykkäät varaosat	Älykkäisiin varaosiin on upotettu tai liitetty sensoreita tai tunnisteita, joiden avulla voidaan seurata osien, koneiden tai prosessien kuntoa ja arvioida käyttöikä sekä tarvittaessa tehdä automaattisesti tilaus uudesta osasta. Tunnisteidon avulla voidaan myös seurata osan liikkumista toimitusketjussa sekä todentaa osien alkuperäisyys (digital ID).
Paremmat varaosat	3D-tulostuksen avulla voidaan osien ulkonäköä ja/ tai muita ominaisuuksia (esim. osan keventäminen, topologinen optimointi) muokata räätälöidysti tarpeen mukaan. Tuoteversioita voi olla loputon määrä ja tiedot osien päivityksistä jäävät talteen (digital twin).
Ensiapuvaraosat	3D-tulostamalla voidaan valmistaa esimerkiksi korvaavasta materiaalista nopeasti osa, jolla saadaan pysymään laite / tuotanto käynnissä sen ajan, minkä alkuperäisen varaosan valmistaminen / kuljettaminen kestää.
Korjausvaraosat	3D-tulostus mahdollistaa materiaalin lisäämisen jo olemassa olevaan kappaleeseen. Korjaaminen soveltuu etenkin kalliiden tai massiivisten osien korjaamiseen.
Mobiili 3D-tulostus	Mobiili 3D-tulostus tarkoittaa valmistusta tilapäisesti lähelle asiakasta tuodulla laitteistolla tai kuljetuksen aikana kuten kontissa (merirahti).
Pitkän elinkaaristen varaosat	Varaosa voidaan säilyttää digitaalisissa varaosakirjastoissa lähes ikuisesti. Soveltuu vanhojen koneiden ja laitteiden varaosille ja yksittäiskappaleille, joiden tekemiseen tarvittavia työkaluja ei enää ole olemassa ja kysyntä on satunnaista.
Kokoonpanot	3D-tulostetaan osa ja joitakin osia kokoonpanosta tai korvataan toisiinsa liitettävät yksittäiset osat kertatulosteisella kokoonpanolla.

Digitaalisten varaosien tiekartta



7. Yhteenveto

Digitaaliset varaosat on konsepti, jossa varaosat ja niihin liittyvä valmistustieto säilytetään ja siirretään digitaalisessa muodossa. Varaosien valmistus tapahtuu 3D-tulostamalla tarpeen mukaan yleensä lähellä loppukäyttäjää. Varaosien digitalisoinnilla tavoitellaan parempaa, joustavampaa ja nopeampaa varaosien saatavuutta sekä pienempiä varastointi-, valmistus- ja kuljetuskustannuksia. Nopeammalla varaosien toimittamisella voidaan myös pienentää seisokkiaikoja, mikä voi tarkoittaa merkittäviä kustannussäästöjä.

Oleellista yritysten varaosien digitalisoinnissa on löytää varaosakirjastoista ne osat, joiden säilyttämisestä digitaalisessa muodossa ja valmistamisesta 3D-tulostamalla saadaan suurin hyöty. Tällaisia osia ovat etenkin vanhojen laitteiden ja koneiden osat sekä hitaasti kiertävät osat, jotka ovat geometrialtaan monimutkaisia. 3D-tulostamalla voidaan nykypäivänä valmistaa suorituskykyisiä kappaleita ja menetelmä soveltuu erinomaisesti yksittäiskappaleiden tai pienten sarjojen valmistamiseen. Digitaalinen valmistus antaa myös mahdollisuuden kehittää varaosia, mistä esimerkkinä voidaan mainita päivitetyt ja älykkäät varaosat.

Tiedot yritysten varaosista ovat hajallaan monissa järjestelmissä ja varsinkin valmistukseen liittyvää tietoa voi olla vaikea löytää. Alkuvaiheessa on tärkeää tunnistaa 3D-tulostettavat osat varaosakirjastoista ja digitalisoida osat mukaan lukien niin 3D-mallit kuin kaikki muu valmistustieto materiaaleista ja toleransseista tarvittaviin jälkikäsitteilytietoihin. Varaosien digitalisointi vaatii 3D-suunnitteluosaamista sekä 3D-tulostusprosessien tuntemusta ja tulostettaviin materiaaleihin perehtymistä.





Varaosia on harvoin tarkoitettu valmistettavaksi 3D-tulostamalla ja toisaalta 3D-tulostettavien materiaalien valikoima on vielä kohtuullisen rajallinen, mistä syystä joudutaan todennäköisesti tilanteisiin, joissa valmistetaan osa jostakin korvaavasta materiaalista. 3D-tulostusprosessit tuottavat omanlaista rakennetta ja pinnan jälkeä, mistä syystä myös 3D-tulostettavien osien jälkikäsitteilyt kuten lämpökäsittelyt ja viimeistelyt on valittava huolellisesti. Tavoite on, että 3D-tulostamalla valmistettujen osien ominaisuudet ovat vähintään yhtä hyvät verrattuna perinteisesti valmistettuihin osiin.

Raportissa esitetyn digitaalisten varaosien tiekartan visio on, että noin kymmenen vuoden päästä 10% varaosista on digitaalisia ja valmistusteknologia on luotettavaa ja laadukasta. 3D-tulostusteknologioilta edellytetään siis laadun tosittamista, niihin liittyvän materiaalikirjon laajenemista sekä prosessien automatisointia.





3D-tulostaminen avaa uusia mahdollisuuksia kehittää osien, laitteiden tai kokonaisten prosessien toimintaa. 3D-tulostettuihin osiin voidaan upottaa tunnisteita ja sensoreita, joiden avulla voidaan seurata osien liikkumista toimitusverkostossa sekä suorittaa ennakoivaa kunnonvalvontaa. Tulevaisuuden varaosa osaa tilata automaattisesti uuden osan digitaalisesta varaosakirjastosta, jolloin uusi osa saadaan vaihdetuksi kuluneen tilanne juuri oikeaan aikaan ennen koneen rikkoutumista tai prosessin pysähtymistä.

8. Liitteet




Liite 1. Digitaaliset varaosat -projektin demonstraatio-osat.

Kappaleen kuva	Nimi	Varaosakategoria	Materiaali (alkuperäinen)	Materiaali (demo)	Saatavilla ollut aineisto	Valmistusmenetelmä (alkuperäinen)/jälkikäsitellyt	Valmistusmenetelmä (demo)/jälkikäsitellyt
	Lämpölevy	Suoraan korvaava varaosa / päivitetty varaosa	ARNE työkaluteräs	H13 työkaluteräs	3D malli, 2D piirros	Koneistamalla latatangoista , viimeistelyhionta, lämpökäsittely	SLM , koneistus, lämpökäsittely, viimeistelyhionta
	Lämpölevy	Suoraan korvaava varaosa / päivitetty varaosa	ARNE työkaluteräs	42CrMo4	3D malli, 2D piirros	Koneistamalla latatangoista , viimeistelyhionta, lämpökäsittely	3D-tulostettu vahamalli + tarkkuusvalu , koneistus, lämpökäsittely, hionta
	Kiinnitystappi	Suoraan korvaava varaosa	Inconel 718		2D piirros	Tyhjiöruiskuvalu, lämpökäsittely, koneistus	SLM , lämpökäsitellyt, koneistukset
	Istukkarengas (seetirengas)	Korjausvaraosa	NiCr	Inconel 718	2D piirros	Koneistus, lämpökäsittely	Alustan koneistus ja kappaleen sahaus, SLM , koneistukset


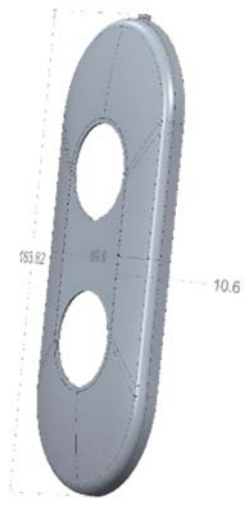
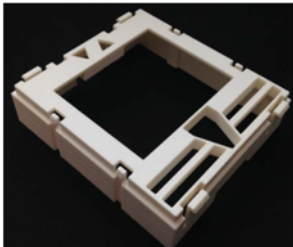
Digitaaliset varaosat

	Istukkarengas (seetirengas)	Korjausvaraosa	NiCr	NiCr + stelliitti 21	2D piirros	Koneistus, lämpökäsittely	Suorakerrostus , koneistus
	Holkki	Suoraan korvaava varaosa	CuSn12	CuSn10	3D malli, 2D piirros	Koneistus	SLM , koneistukset
	Holkki	Suoraan korvaava varaosa	CuSn12	CuAl10Fe5Ni5	3D malli, 2D piirros	Koneistus	3D-tulostettu vahamalli + tarkkuusvalu , koneistus
	Adapteri	Päivitetty varaosa	Pronssi	Pronssi	2D piirros, topologinen optimointi	Valu	3D-tulostettu hiekkamuotti + valu


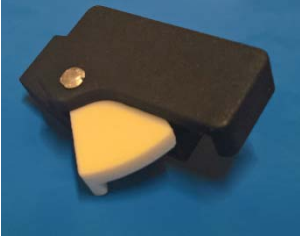


Digitaaliset varaosat

	Korotusruuvi	Ensiapuvaraosa	ABS	Nylon	Alkuperäisosa	Ruiskupuristus	3D-tulostus + niittaus
	Metallikisko	Ensiapuvaraosa	Kupari / tina	-	Alkuperäisosa		
	Sähkölaitteen kotelo	Suoraan korvaava varaosa	ABS	PA12	Alkuperäisosa	Ruiskupuristus	Jauhepetisulatus




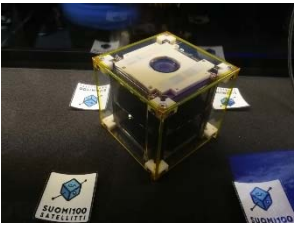
Digitaaliset varaosat

	Napin pohja	Suoraan korvaava varaosa	PC	VeroBlue	2D-piirustus	Ruiskupuristus	Materiaalin suihkutus
	Paneelin levy	Ensiapuvaraosa	Ruostumaton teräs 1.4301	Ruostumaton teräs	2D-piirustus	Levytyöstö	Numeerinen paino- muovaus
	Sähkölaitteen kuori	Suoraan korvaava varaosa	PC/ABS+V0	PP2210FR	3D-malli	Ruiskupuristus	Jauhepetisulatus

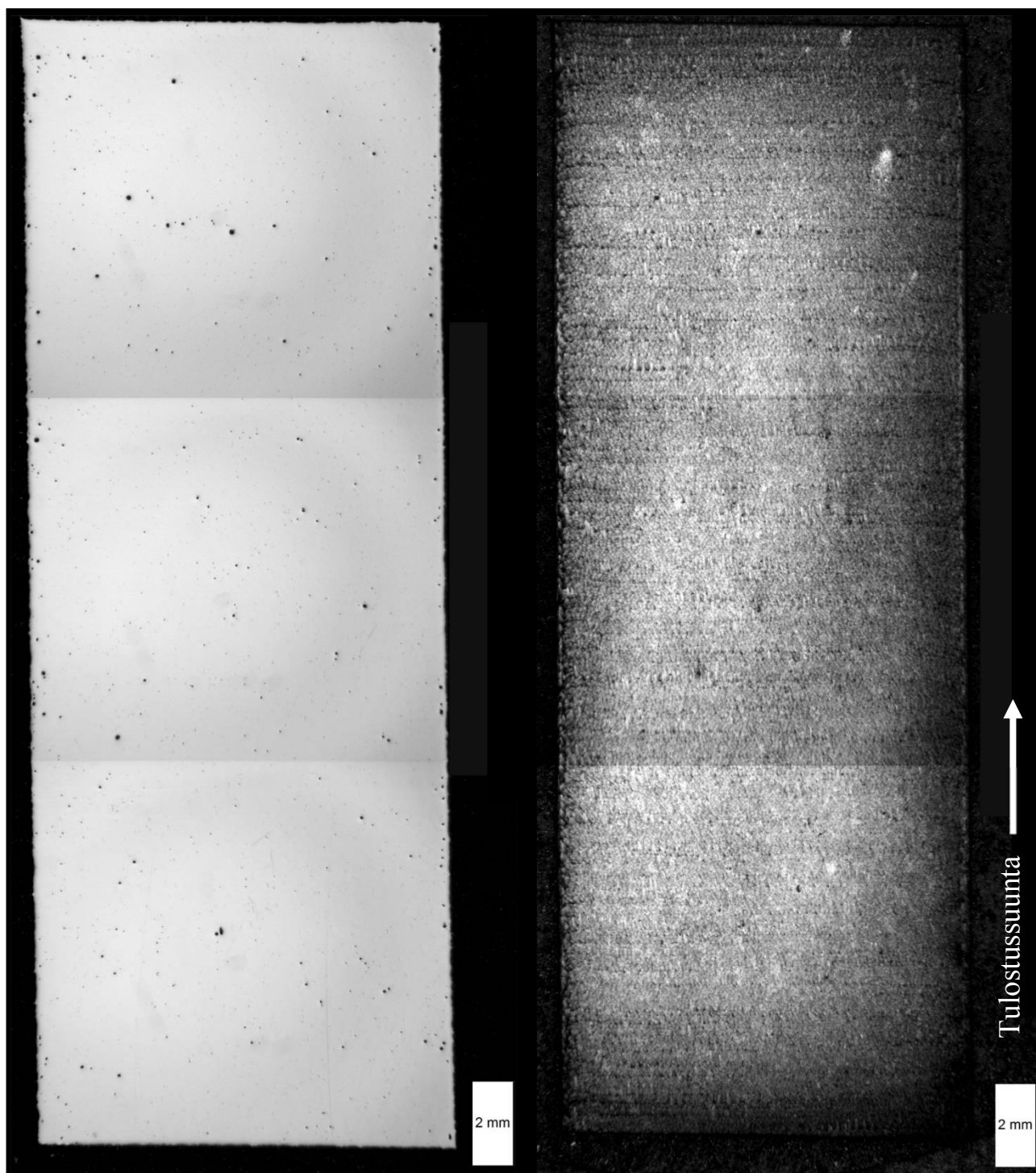
Digitaaliset varaosat

	Hälytysnappi	Suoraan korvaava varaosa	Alumiini	Alumiini vahan kautta	2D-piirustus	Stanssaus	3D-tulostettu vahamalli + tarkkuusvalu
	Käynnistysratas	Suoraan korvaava varaosa / älykäs varaosa	PA6	ABS	Alkuperäisosa	Ruiskupuristus	Materiaalin pursotus
	Auton ikkunan sulkija	Suoraan korvaava varaosa	ABS	PA12	Alkuperäisosa	Ruiskupuristus + kokoonpano	Jauhepetisulatus
	Astiapesukoneen pyörä	Suoraan korvaava varaosa	Nylon	ABS	3D-malli	Ruiskupuristus + kokoonpano	Materiaalin pursotus
	Kannettavan tietokoneen muistiluukku	Suoraan korvaava varaosa	ABS	PA12	Alkuperäisosa	Ruiskupuristus	Jauhepetisulatus

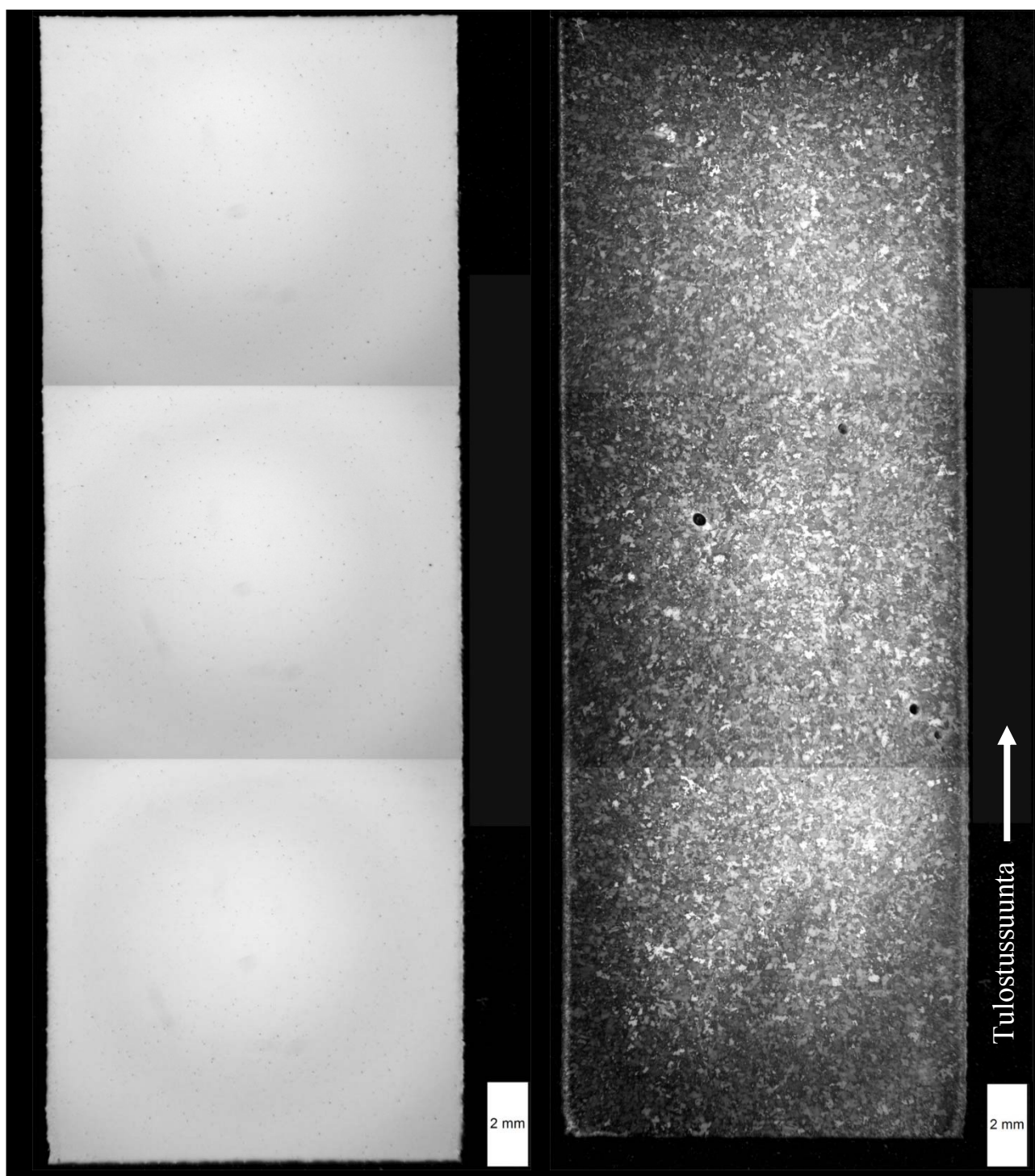
Digitaaliset varaosat

	Jousituksen linkki	Päivitetty varaosa	AlSi7	Alumiini tulostetun hiekkamuotin kautta	Topologinen optimointi	Valu	3D-tulostettu hiekkamuotti + valu
	Ajoneuvon A-tukivarsi	Päivitetty varaosa	AlSi7	Alumiini tulostetun hiekkamuotin kautta	Topologinen optimointi	Valu	3D-tulostettu hiekkamuotti + valu
	Elastinen tiiviste	Suoraan korvaava varaosa	Kumi	Kumimaiset 3D-tulostusmateriaalit	Alkuperäisosa	Valu	Materiaalin suihkutusta, jauhepetisulatus, valokovetus altaassa
	Suomi 100 satelliitin kuorirakenne	Päivitetty varaosa	Ultem	Ultem	Geometrian optimointi	Koneistus	Materiaalin pursotus

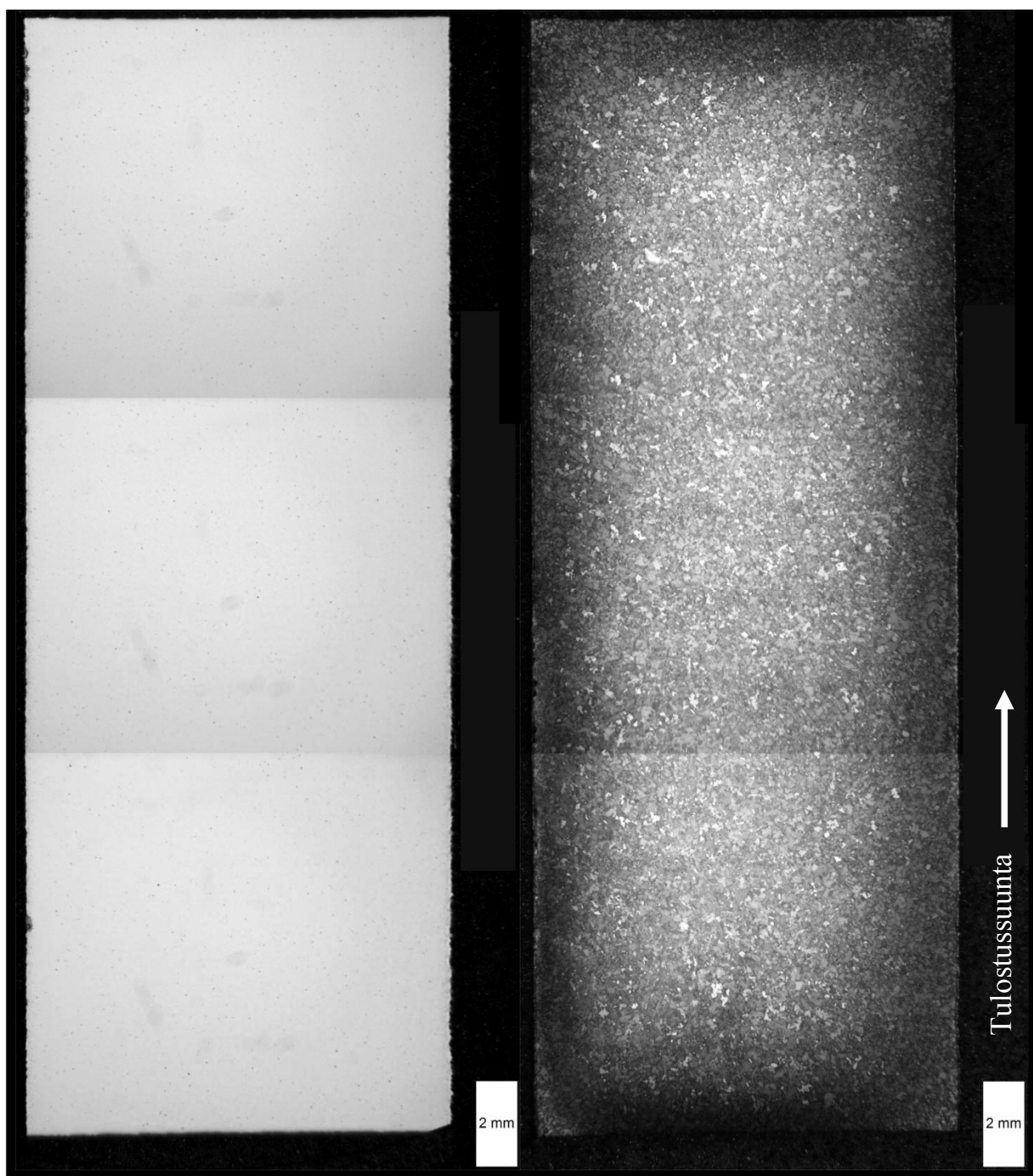
Liite 2. Inconel 718 mikrorakennekuvat.



Kuva 2.1. Tulostustilainen Inconel 718 näyte a) ennen syövytystä, b) syövytyksen jälkeen.

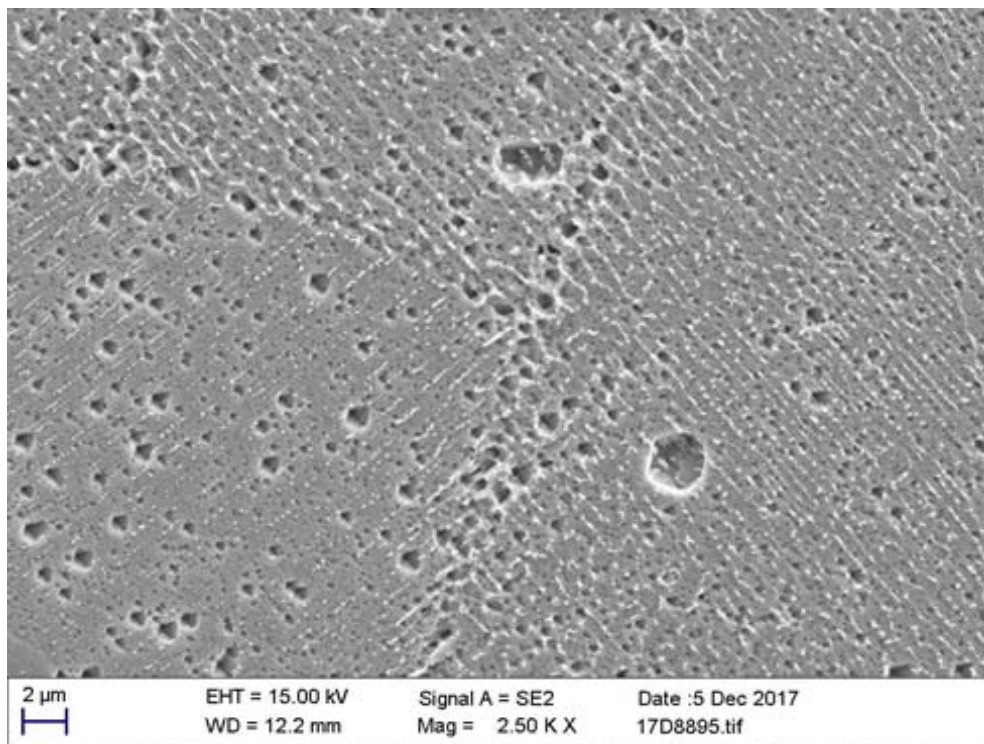


Kuva 2.2. 3D-tulostettu ja lämpökäsitelty (Jännitystenpoisto + HIP) Inconel 718 näyte a) ennen syövytystä, b) syövytyksen jälkeen.

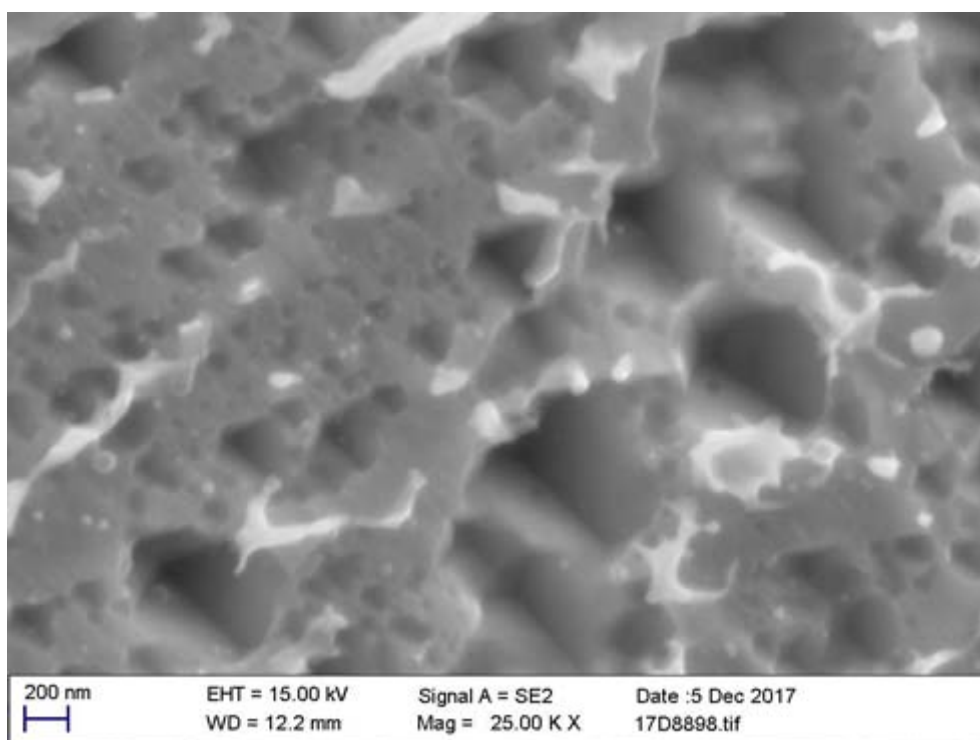


Kuva 2.3. 3D-tulostettu ja lämpökäsitelty (Jännitystenpoisto + HIP + Liuotushehkus + Erkautuskarkaisu) Inconel 718 näyte a) ennen syövytystä, b) syövytyksen jälkeen.

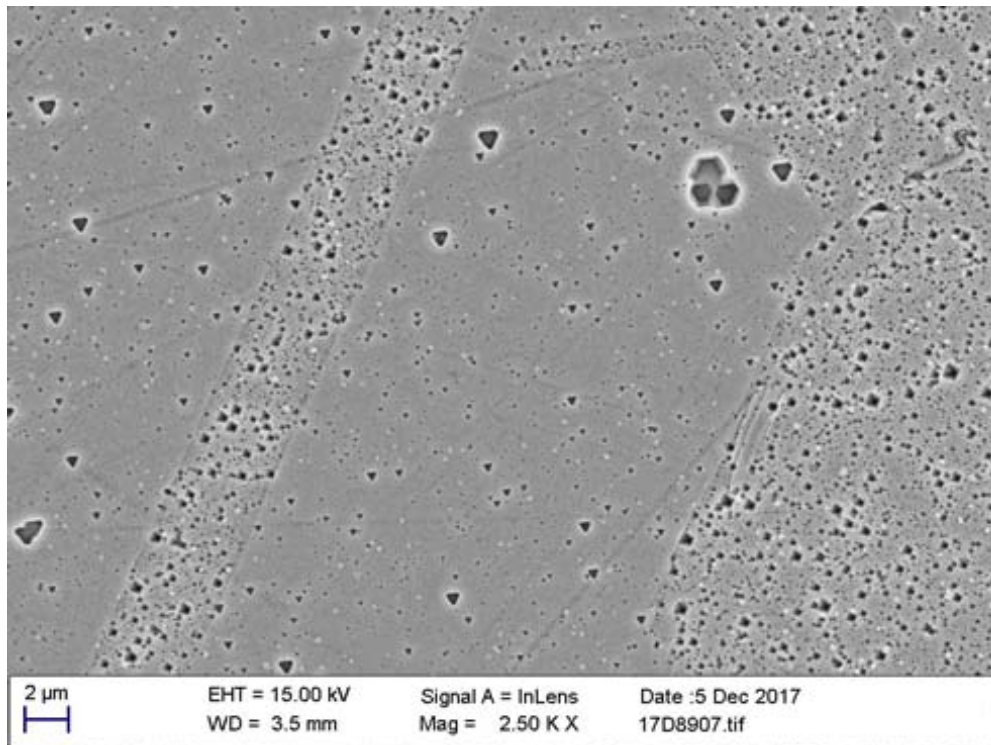
Liite 3. Inconel 718 SEM kuvat.



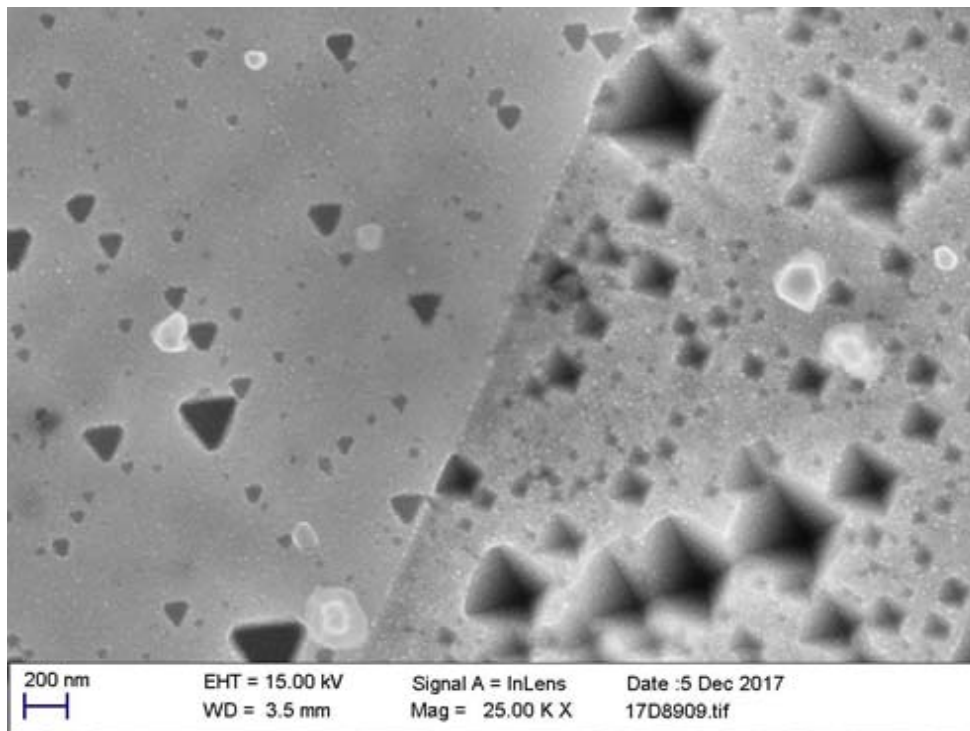
Kuva 3.1. Tulostustilainen Inconel 718 SEM kuva 2500x suurennoksella.



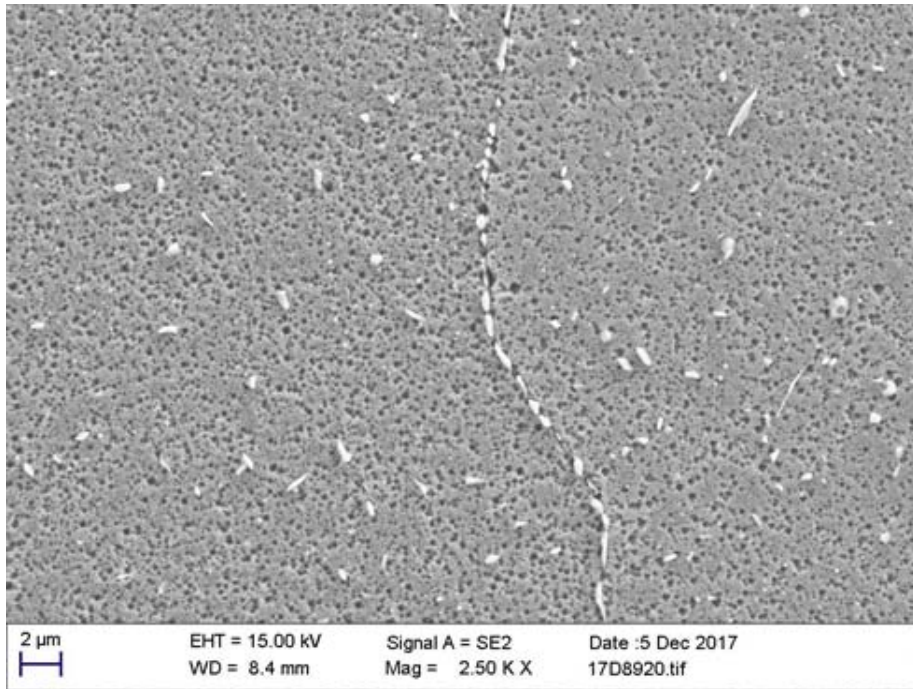
Kuva 3.2. Tulostustilainen Inconel 718 SEM kuva 25000x suurennoksella.



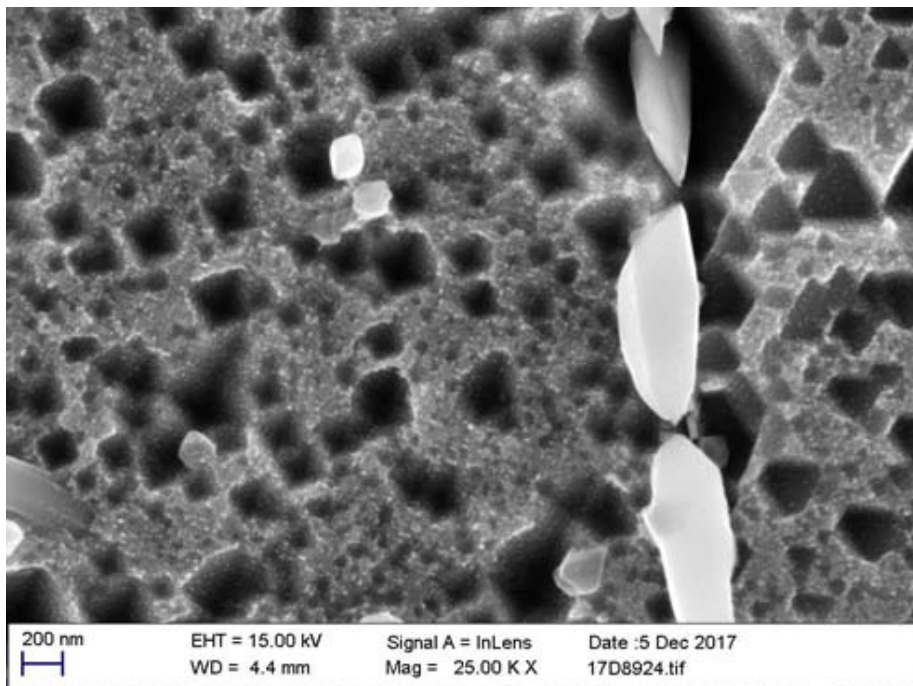
Kuva 3.3. 3D-tulostettu ja lämpökäsitelty (Jännitystenpoisto + HIP) Inconel 718 SEM kuva 2500x suurennoksella.



Kuva 3.4. 3D-tulostettu ja lämpökäsitelty (Jännitystenpoisto + HIP) Inconel 718 SEM kuva 25000x suurennoksella.



Kuva 3.5. 3D-tulostettu ja lämpökäsitelty (Jännitystenpoisto + HIP + Liutushehktus + Erkautuskarkaisu) Inconel 718 SEM kuva 2500x suurennoksella.



Kuva 3.6. 3D-tulostettu ja lämpökäsitelty (Jännitystenpoisto + HIP + Liutushehktus + Erkautuskarkaisu) Inconel 718 SEM kuva 25000x suurennoksella.

Liite 4. Digitaaliset varaosat -projektin julkaisuja.

Chekurov, S., Metsä-Kortelainen, S., Salmi, M., Roda I., Jussila, A. The value of digital spare parts in the industry: an empirical investigation. *Vertaisarvioitavana*.

Chekurov, S., Salmi, M. 2017. Additive Manufacturing in Offsite Repair of Consumer Electronics. *Physics Procedia*, 89:23–30.

Chekurov, S., Kretzschmar N., Rossani, M., Felice, D., Colombo, G. Axiomatic design of an additively manufactured non-assembly pump. *Kirjoitusvaiheessa*.

Chekurov, S., Lantela, T. 2017. Selective laser melted digital hydraulic system. *3D printing and additive manufacturing*, 4(4).

Jussila, A., Mikkola, M., Tanner, H. 2017. 3D printed spare parts: rethinking supply chains and business models. In *Proceedings of the ISPIM Innovation Summit: Building the Innovation Century*, Melbourne, Australia, 10–13 December 2017.

Kretzschmar, N., Chekurov, S., Salmi, M., Tuomi, J. Evaluating the Readiness Level of Additively Manufactured Digital Spare Parts. *Vertaisarvioitavana*.

Reijonen, Joni. 2017. Identifying 3D-printable Spare Parts for a Digitalized Supply Chain. *Proceedings*. Tampere University of Technology, ss. 37–40. The 2nd Annual SMACC Research Seminar 2017, 7 November 2017, Tampere, Finland.

Vuorela, P. 2017. Ainetta lisäävillä tekniikoilla valmistettujen elastisten tiivisteiden varaosavellukset. *Diplomityö*, Aalto-yliopisto.