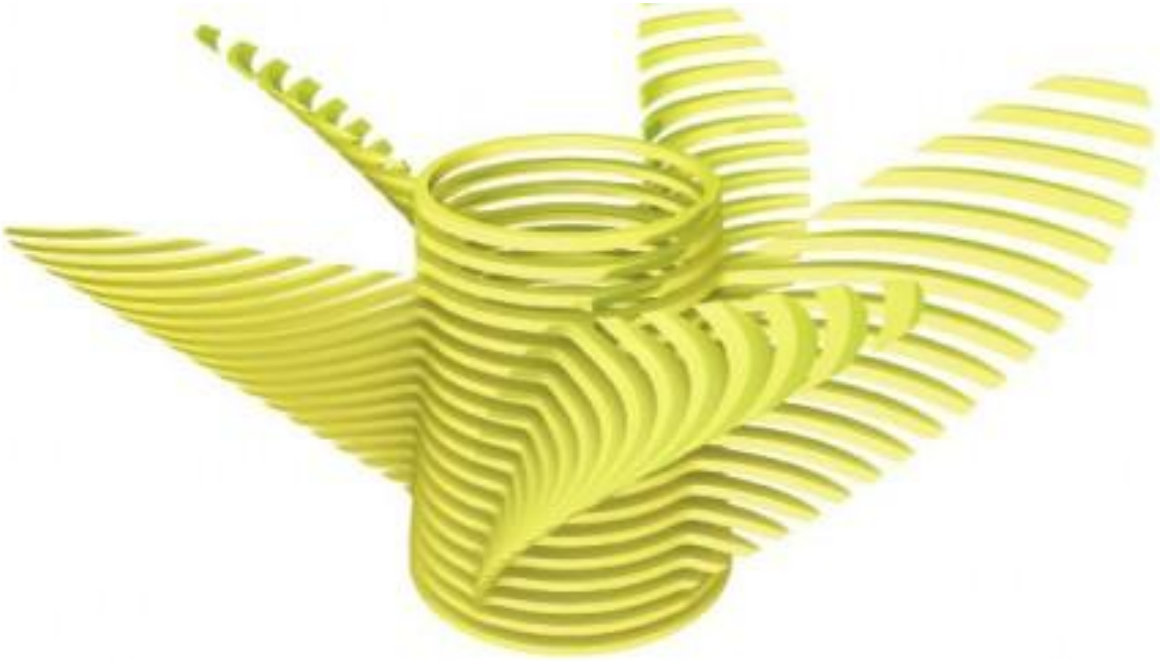
3D-valmistus



VELI-MATTI KUISMA

2020

Etukannen kuva:
3D-tulostuksen periaate (Prof. Partanen, Aalto yliopisto).

Kirjoittaja: Veli-Matti Kuisma, TkT, johtava asiantuntija, Teknologiateollisuus ry/Helsinki

Kustantaja: Aarre Lehtimäki, Likolammenkatu 2 L, 33300 Tampere
Ulkoasu ja taitto: Aarre Lehtimäki
Omakustannuspainos, 2020.

hakusanat: 3D-valmistus, ainetta lisäävän valmistuksen mahdollisuuksia, hybrideityöstömenetelmät, varaosavalmistus, protovalmistus

JOHDANTO kirjoittanut: Aarre Lehtimäki

LASTUVAN TYÖSTÖN KIINNITTIMET JA PALETIT kirja on 1 / 20 tuotantoväline kirjasarjastani. Muut sarjaan kuuluvat, ovat lueteltu tuossa alapuolella. Nettilinkkiä painamalla saat kirjan näkyviin.

OSA 1. TYÖVÄLINERYHMÄT

OHJAIMET JA KIINNITTIMET

Lastuavan työstön kiinnittimet ja paletit https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCY4jOapT3xpU7KF

- Hydraulikiinnitin https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kB2I4mKasaArYX4n
- Magneettikiinnittimet https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kB4951O_FsqzRcgZ

- Hitsauskiinnittimet ja –mekanisointilaitteet https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCWBsgklyOoxAL2Q
- Robotin työkalut (tarttujat ja kiinnittimet) https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCF4_8TH0VXeS3xl

KOKOONPANON TYÖVÄLINEET https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCSYfEuoZWFlE7a5

MUOTIT

- Ruiskuvalumuotit https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCm-xfx4nI4FRyJ-
- Painevalumuotit https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCjts2KB2UArqYKA
- Takomuotit https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kBd_sWoW0vQpVVY4

MEISTOTYÖKALUT (PURISTINTYÖKALUT)

- LEIKKAUS
  - Leikkain 1) sivut 7 – 24, https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kBgt357A8oASrGcC
  - Jonoleikkain https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kBlXwiavKW4lQEqF
  - Levytyökeskus työvälineet https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kBoQdrNuWH3E1u9d
- MUOVAUS
  - Taivutustyövälineet https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kBvTiL0PNDVmQFhx
  - Syväveto 1) sivut 25 – 28, https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kBgt357A8oASrGcC
  - Venytysmuovaus 1) sivut 29 – 32, https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kBgt357A8oASrGcC
  - Painosorvaus https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kB-zHbeGHGO5aAbI

OSA 2. MENETELMÄT

TYÖVÄLINEEN VALMISTUSTA TUKEVAT MENETELMÄT

- Manuaalityöstömenetelmät
  - Hiomalaikan kunnostus 2) sivut 18 – 33, https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCF4_8TH0VXeS3xl
  - Kierrejousien valmistus sorvissa 2) sivut 34 – 36, https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCF4_8TH0VXeS3xl
- NC-työstömenetelmät
  - Kipinätyöstö
- Erikoistyöstömenetelmät
- Käsityömenetelmät
  - Yksinkertaiset ohutlevyosien levitykset 2) sivut 37 – 41, https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCF4_8TH0VXeS3xl
  - Juottaminen 2) sivut 7 – 17, https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCF4_8TH0VXeS3xl
  - Työvälineen kokoonpano, testaus ja kunnossapito

MATERIAALITEKNIIKKA JA LÄMPÖKÄSITTELY, https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCF4_8TH0VXeS3xl

SUUNNITTELU

- Koneturvallisuus https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCCfLhku4Uc5TalF
- Suomalaista koneenpiirtämistä 1916-2016 https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_hkDl_STrNSvNgoZO
  - PowerPoint esitys https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_j32FGpyPRHwteNLI

AINETTA POISTAVAT MENETELMÄT

- Lastuaminen
  - Työkalun ja materiaalin vaikutus toisiinsa https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kBxR5tG6tM0wdNFK

AINETTA LISÄÄVÄT MENETELMÄT

- 3D-valmistus

AUTOMAATIO JA ROBOTISOINTI

- Hitsausrobotti ja hitsauskiinnitin, sivut 19 ja 32, https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCWBsgklyOoxAL2Q
  - Kappaleenkäsittelyrobottien ja hitsausrobottien yhteistyö, sivut 32 – 37, https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCWBsgklyOoxAL2Q
- Kiinnitys miehittämättömässä tuotannossa, NC-sorvi, sivut 55 - 57, https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCY4jOapT3xpU7KF
- Automatisoitu työkappaleen vaihto, sivu 58, https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_kCY4jOapT3xpU7KF

SUOMALAINEN TYÖKALUJEN VALMISTUS

Vanhan rakenteen mukaisissa konepajoissa oli työväline- tai työkaluosasto. Siellä paitsi valmistettiin työvälineitä, varsinkin sellaisia, joita ei valmiina voinut ostaa, myös huollettiin ja varastoitiin niitä.

Suomeen perustettiin muutamia työkalutehtaita, jotka suurelta osin osoittautuivat taloudellisiksi pettymyksiksi. Työvälineiden valmistuksen edellyttämä monipuolinen konekanta ja korkea ammattitaito murensivat katteet.

Työvälineitä suunnittelevan tai valmistavan yrityksen on useissa tapauksissa välttämätöntä toimia kiinteässä yhteistyössä lopputuotteita valmistavien yritysten kanssa, koska työvälinettä suunnitellaan yhtä aikaa sillä valmistettavan tuotteen kanssa. Työvälinesuunnittelija voi myös tarjota arvokkaita neuvoja lopputuotteen järkevästä ja taloudellisesta rakenteesta. Työvälinealan ammattitaito on kuitenkin katoamassa maastamme työntekijöiden ikääntyessä ja koulutuksen kuihtuessa.

AMMATILLINEN KOULUTUS

Ammatillisen koulutuksen tavoitteena on kehittää opiskelijan ammatillista osaamista sekä kasvua sivistyneeksi ihmiseksi ja yhteiskunnan jäseneksi. Koulutus vaikuttaa osaltaan työelämää ja vastaa työelämän osaamistarpeisiin, edistää yrittäjyyttä sekä tukee elinikäistä oppimista. Ammatillinen koulutus antaa myös mahdollisuuden jatkaa opintoja korkeakoulussa.

Ammatillinen koulutus avaa monia mahdollisuuksia iästä ja taustasta riippumatta. Ammatillisissa perustutkinnoissa hankitaan alalla vaadittavat perustaidot. Ammatti- ja erikoisammattitutkinnot mahdollistavat osaamisen kehittämisen työuran eri vaiheissa. Tutkintojen lisäksi järjestetään valmentavaa koulutusta.

Työelämän muutos muokkaa mm. ammatillisten nimikkeiden kenttää ja niiden sisältöjä. Samalla valinnaisuus lisääntyy. Olennaista on, että työssä oppimista painotetaan aiempaa enemmän, muotoja ovat oppisopimuskoulutus sekä ns. työssä oppimisen korvaava koulutussopimus. Tavoitteena ovat toimintojen selkiyttäminen ja joustavuuden lisääntyminen, tosin mm. työpaikoilla tapahtuvan oppimisen vastuisiin liittyvät kysymykset askarruttavat.

ERIKOISTUNEET YRITYKSET

Työvälinevalmistajien erikoistuessa yrityksinä pääasiassa työvälineiden valmistukseen perustettiin erillinen **Työvälineiden valmistajien toimialaryhmä** (1975) Suomen Metalliteollisuusyhdistykseen.
Konepajateknisesti työvälineiden valmistus on yksi vaativimmista toimialoista. Suomen työvälinevalmistajien teknologinen taso onkin hyvä. Alan osaajien pitää hallita materiaalit ja tekninen laatu kuin lämpö- ja pintakäsittelymenetelmätkin.
Yksi nopeutuvan kehityksen avaimia on tiedon kulun nopeutuminen. Aikana, jolloin ihminen oppi käyttämään työkaluja uuden tiedon siirtyminen naapurille saattoi kestää vuosia. Tätä kirjoittaessa on mahdollista, että tieto saavuttaa kohteensa toisella puolella maapalloa reaaliajassa.

Teknologiateollisuus ry:n Työvälineiden valmistajien toimialaryhmä koordinoi alan yritysten teollisuus- ja talouspoliittista yhteistyötä. Toimialaryhmän tärkein tehtävä on omaa toimialaa koskevan teknisen ja taloudellisen tiedon hankkiminen, muokkaaminen ja levittäminen jäsenten keskuuteen.

Toimialaryhmä osallistuu Teknologiateollisuus ry:n **Tuotanto- ja palveluverkoston** toimintaan.

Suomalaiset työvälinevalmistajat tuottavat erilaisia muotteja muovi-, metalliteollisuudelle sekä erilaisia meistejä, puristintyökaluja, teriä ja kiinnittimiä ja ohjaimia metalliteollisuudelle.

TOIMIALARYHMÄN PAINOPISTEALUEET

- toimialan kilpailukyvyn kehittämistyö
- suhdanneseuranta
- markkinatilanne seuranta
- työvoiman saatavuus, laatu ja koulutus
- laatujärjestelmät
- verkostoituminen
- läpimenoajan lyhentäminen
- koulutustilaisuudet
- kansainvälistyminen
- vientiyhteistyö

KIRJASARJAN TYÖSTÄMINEN

Toimitusjohtaja Timo Hertell, TH-Tools Oy:sta soitteli minulle joskus v. 2013 kesällä ja kysyi, että voisinko tulla mukaan yhdeksi asiantuntijaksi Opetushallituksen (OPH) rahoittamaan Työvälinevalmistuksen oppikirjaan. Kirjan tulee olla suunnattu ammattioppilaitoksen tarpeisiin.

Timon vastuualueena kirjassa ovat mm. Ohjaimet ja Kiinnittimet, joita hän tarjosi kirjoitettavakseni. Otin tehtävän vastaan ja aloin kirjoittamaan tähän ryhmään kuuluvia oppimateriaaleja. Tämän 3D-valmistus kirjan on kirjoittanut Veli-Matti Kuisma.

OPH joutui vuonna 2019 säästösyistä pysäyttämään hankkeita.
Loppukeväästä 2019 Työvälinevalmistuksen oppimateriaalihanke päätettiin lopettaa, koska alan koulutus on muuttunut. Tekijänoikeudet OPH palautti meille kirjoittajille.
Pikku hiljaa kypsyi ajatus melko valmiiksi tuotetun aineiston hyödyntämisestä ja laajentamisesta. Kokemus työvälineiden suunnittelusta, niiden valmistuksesta ja alan kehittämisestä sekä uusien sukupolvien kouluttamisesta neljällä eri vuosikymmenellä oli kantavana juurena tämän kirjasarjan kokoamiseen.
Olen laajentanut tätä alun perin ammattioppilaitoksille suunnattua oppimateriaalia toimittamalla siihen lisäaineistoa toiminnastani työvälinesuunnittelun tuntiopettajana Tampereen Teknillisen Korkeakoulun (nyk. Tampereen Yliopisto) Tuotantotekniikan laitoksen, Tampereen Ammattikorkeakoulun kone- ja tuotantotekniikan opintolinjan sekä AEL:n (aik. Ammattienedistämislaitos) projekteissa vuosina 1987 – 2012. Työni ohella olen suunnitellut myös näyttötutkintoja kone- ja työkaluvalmistuksesta ALVAR'iin (Ammattitutkintoaineiston laadunvarmistus), jonne näyttötutkintojen opetusmateriaalit kootaan. Näiden "lastujen" korista löytynee jokaiselle tarkkaavalle lukijalle mielenkiintoinen työvälinevalmistuksen aihepiiri.

3D-valmistus kirja / kirjasarja on tarkoitettu oppilaitoksissa ja työpaikoilla oppi- ja lähdekirjaksi henkilöille, jotka ovat tuotannon suunnittelun tai toteutuksen kanssa tekemisissä. Moniammatilliseen käyttöön tarkoitetun kirjasarjan kohderyhmä on laaja: tuotantovälineiden valmistusta opiskelevat, tuotannon suunnittelijat, -toteuttajat ja -kehittäjät, ammatilliset opettajat ja työelämän esimiehet.

Olen kirjoittajana käyttänyt runsaasti alan asiantuntijoita hyväksi. Kirjoituksien lähteet, kuvien lähdeaineisto ja kiitokset ovat kirjoitusosioiden perässä. Lähteistä ja kuvien lähdeaineistoista on kirjalliset luvat. Parhaimmat Kiitokset miellyttävästä yhteistyöstä ja saamastani tuesta.

HARRASTUS

Lapsuus katoaa, mutta ei koskaan lapsi. Elmer Diktonius. Ensi askeleet otin ammattiini kansakoulun alaluokilla, kun rakentelin kotona naapurin Juhan kanssa puisia autoja. Kuorma-autoissa oli kipit, hinausautoissa nostokampi puurattaineen ja yhdessä linja-autossa suuntaviitat, jotka nappia painamalla nousivat ylös. Kaikki autoni tein ilman piirustuksia. Nykyään leluja tehdessäni pitää ensin tehdä piirustus, ja

vasta sen jälkeen alkaa valmistaa niitä.
Kymmenen vuotta sitten Sandvik Tampereen tehtaalta eläköityneenä työvälinesuunnittelijana/ sählääjänä, olen tämän tuotantoväline kirjasarjan työstämisen lisäksi julkaissut, PUUTYÖT HARRASTUKSENA 50 VUOTTA kirjan. https://1drv.ms/b/s!AgmIzq_1uvK_ilnhYAHjpoYsdWcg Kirjassa käsittelen paljon mm. perinne- ja pulmaleluja. Vuonna 1900 pidetyn maailmannäyttelyn yhtenä vetonaulana piti olla ikiliikkuja, mutta sitä ei saatu toimimaan. Puutyöt harrastuksena kirjassa olen jatkokehitellyt Leonardo da Vinci'n keksintöjä ja ne toimivat (sivut 168…174).

OPETUKSESSA, jokainen uusi askel, jonka otat, nostaa valtavasti sen ensimmäisen askeleen arvoa. YKSI ASKEL KERRALLAAN. Älä koskaan väheksy alempia askelmia onnistumisen tikapuilla.

3D-VALMISTUS

kirjoittanut: Veli-Matti Kuisma

1. MATERIAALIA LISÄÄVÄN TULOSTUKSEN KEHITYSVAIHEITA 8

2. MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUKSEN PERIAATE 10

3. AINETTA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN ETUJA 11

4. AINETTA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN MAHDOLLISUUKSIA 12

4.1 Protovalmistus 12

4.2 Varaosavalmistus 12

4.3 Uudet sovellutusalueet 13

4.4 Ainetta lisäävä valmistus työvälineiden ja muottien valmistuksessa 13

4.5 Työkalupitimen valmistus 14

5. AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS NOPEUTTAMAAN JA YKSINKERTAISTAMAAN PEREINTEISIÄ TUOTANTOTEKNOLOGIOITA 14

5.1 Ainetta lisäävän valmistuksen käyttö valutuotetekniikassa 14

5.2 Yleisemmät AM-teknologiat 15

6. SUUNNITTELUSSA JA VALMISTUKSESSA HUOMIOITAVIA SEIKKOJA 19

6.1 Kokoa ja muotoa rajoittavia tekijöitä 19

6.2 Käytettäviä metalliseoksia 21

6.3 Tuotannon tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä 22

7. HYBRIDITYÖSTÖMENETELMÄT 22

7.1 Hybridivalmistuksen edut 24

1 MATERIAALIA LISÄÄVÄN TULOSTUKSEN KEHITYSVAIHEITA

Materiaalia lisäävissä valmistusmenetelmissä kappale tehdään 3D mallin pohjalta materiaali-kerroksia lisäämällä. Menetelmät on jaettu ASTM standardissa seitsemään kategoriaan.

Pikamallinnusta (Rapid Prototyping) on käytetty jo 1980-luvun lopulta alkaen. Menetelmää on käytetty pääasiassa prototyyppien valmistamiseen. Pikamallinnus on laajalti käytössä maailmalla ja laitteita on myynnissä myös harrastuskäyttöön ja halvimmat laitteet maksavat muutaman sata euroa.

Työvälinevalmistuksessa 1990-luvun lopulta alkaen on käytetty erilaisia tekniikoita työkalujen valmistukseen. Työkalut suunniteltiin protosarjan tuotteita varten ja varsinaiset tuotantosarjan työkalut tehtiin, kun tuote oli saanut lopullisen rakenteen. Prototyyppien ja piensarjojen lisäävä valmistus, jonka avulla testataan iteratiivisesti kappaleen muotoa, mittatarkkuuksia ja toimivuutta tuotekehitysprosessin aikana ja ennen varsinaista tuotantoa. Protosarjan työkalujen kesto on rajallinen.

Materiaalia lisäävä valmistus (Additive Manufacturing, AM) on yleistynyt 2000-luvun alusta alkaen. Materiaalia lisäävälle valmistukselle FIRPA (Suomen Pikavalmistusyhdistys - Finnish Rapid Prototyping Association, FIRPA ry) määrittelee seuraavat synonyymit:

- Lisäävä valmistus,
- Ainetta lisäävä valmistus,
- Pikavalmistus,
- Lisäävä pikavalmistus,
- AM-tekniikka,
- 3D-tulostus ja
- 3D Printing.

Kuva 1. Maastopolkupyörän istuinkannatin valmistettu titaanista (Ti6Al4V) ja valmistusaika on 63 tuntia 51 minuuttia.

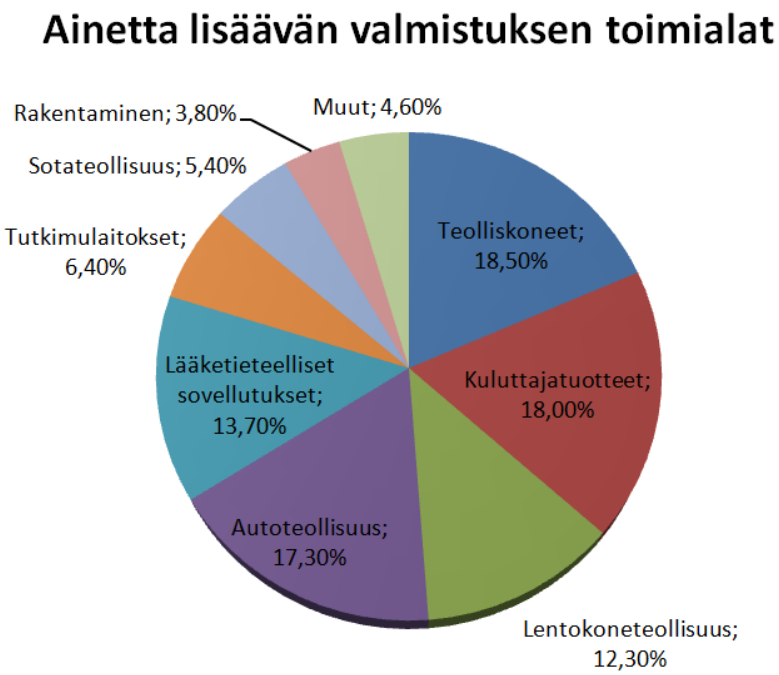
Markkinoiden vuotuinen kasvu on ollut viimevuosina noin 30 prosenttia. Markkinoiden ennustetaan kasvavan yli 10 miljardiin dollariin vuoteen 2020 mennessä (kuva 2).

Source: Wohler Associates

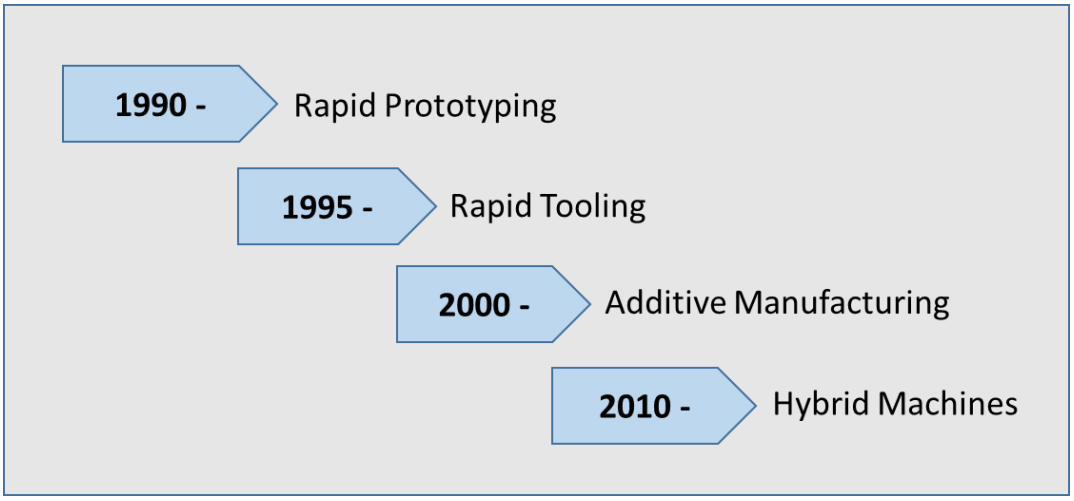
Kuva 2. Materiaalia lisäävän valmistuksen markkinoiden kasvun ennuste vuoteen 2020.

Tuottavuusvaatimukset ovat ohjanneet työstömenetelmien kehitystä yksittäisistä prosesseista kohti yhdistelmätyöstöä eli hybrideistöä. Perinteisissä yhdistelmätyöstökoneissa on esimerkiksi sorvaus ja jyrsintä pyörivillä työkaluilla toteutettuna. Näin akselimaisiin kappaleisiin on voitu jyrsiä kiilaurat samalla kiinnityksellä. Nyt on kehitetty erilaisia hybridikoneita, jossa on ainetta lisäävät toiminnot sekä koneistus yhdistettynä. Materiaalia lisäävissä hybrideistömenetelmissä kerrostettua materiaalia sulatetaan laserilla ja laserilla sulatettua materiaalia kerrostetaan. Menetelmässä voidaan käyttää erilaisia seosmateriaaleja tai monimateriaaleja.

Materiaalia lisäävää valmistusta käytetään useilla teollisuuden aloilla (kuva 3). Sovellutuskohteita ovat mm. yksittäiset komponentit, ihmisen varaosat (implantit, hammasraudat jne.), auto- ja lentokoneteollisuuden komponentit, keveyttä vaativat rakenteet, lujuus– ja paino-optimoidut rakenteet sekä sovellutuskohteet joissa eri materiaalien liitetään toisiinsa.



Kuva 3. Materiaalia lisäävän valmistuksen toimialat vuonna 2014 (Wohler raportti 2015).

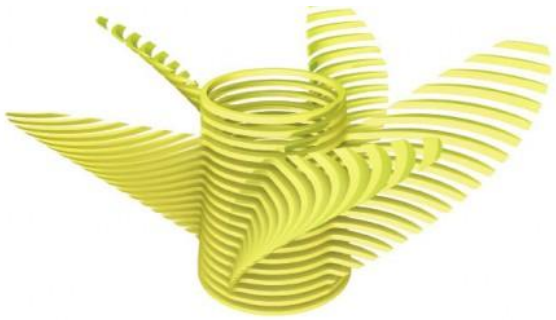


Kuva 4. AM-menetelmien kehitys

Menetelmän käytössä ollaan yhä enemmän siirtymässä teknisistä proto-osien valmistuksesta tuotteiden tai komponenttien valmistamiseen (kuva 4). Tästä on esimerkkinä työstökoneiden jäähdytetyt työkalupitimet.

2 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUKSEN PERIAATE

Ainetta lisäävä valmistus eli AM (Additive Manufacturing, AM) on valmistustekniikka, joka erilaisilla menetelmillä rakentaa valmistettava kappale liittämällä materiaalia kerros kerrokselta. Kolmiulotteiset kappaleet valmistetaan suoraan 3D-mallin pohjalta. 3D-malli kuvaa kolmiulotteisen kappaleen kolmioidussa tilavuusmalli-formaatissa, jota tulostuslaitteet käyttävät. 3D-malli luodaan suoraan mallintamalla tai scannatusta pistepilvi-datasta rekonstruoimalla. 3D-mallinnukseen tarkoitetuilla ohjelmistoilla 3D pistepilvi muokataan AM-laitteille yhteensopivaan muotoon. Ohjelmistoilla voi muokata pintakolmiorakennetta, korjata eri tavoin STL-tiedostoja, muodostaa komponenteista suljettuja pintoja, sisällyttää malliin rasterointi ja luoda tukirakenteita. Valmistus voidaan toteuttaa useilla eri menetelmillä. Yhteistä kaikille menetelmille on kuitenkin se, että ainetta lisätään kerros kerrokselta (kuva 5) ja laitteissa on alusta, johon rakennusaine tulostetaan.



- 3D-malli viipaloidaan ohjelmallisesti, jolloin syntyy ohuita 2d-viipaleita
- Ohjaustiedosto siirretään tulostimelle
- Pinoamalle 2D-viipaleita päällekkäin voidaan tehdä kaikki 3D-kappaleet
- Konseptuaalisesti yksinkertainen prosessi – toimii hyvin automaationa

Kuva 5. 3D-tulostuksen periaate (Prof. Partanen, Aalto yliopisto).

Materiaalia lisäävä valmistus poistaa suuren osan geometrisista rajoituksista, joita perinteiset valmistusmenetelmät asettavat tuotteen suunnittelussa. Tämä mahdollistaa monimutkaisten ja käyttötarkoitukseen optimoitujen muotojen käytön. Materiaalia lisäävä valmistus asettaa suunnittelijoille uusia mahdollisuuksia kappaleen muotoilussa ja teknisessä toteutuksessa. Esimerkiksi kappaleen sisään voidaan tehdä muotoja ja kanavia joita perinteisin työstömenetelmin on mahdotonta toteuttaa. Toisaalta AM tuo mukanaan uusia haasteita, jotka liittyvät mm. negatiivisiin pintoihin ja kerrokselliseen rakenteeseen.

AM:n laajentaa perinteisten valmistusmenetelmien toistettavuutta ja luotettavuutta yksittäistuotannon ja räätälöitävien kappaleiden suuntaan. Vaikka joidenkin kappaleiden (esimerkiksi lääketiede, hammasimplantit) osalta ainetta lisäävän valmistuksen kustannus-kilpailukyky on jo perinteisiä valmistusmenetelmiä parempi, ollaan laajassa mitassa vielä kaukana tavoitteista.

Samoin tuoteperheen nopeat muutokset ovat mahdollisia AM-tekniikkaa hyödynnettäessä. Kaikki AM-tekniikalla tuotettavat osat voivat olla erilaisia. Toisaalta, vaikka varsinaisia työkaluja ei tarvitakaan, joudutaan kuitenkin valmistelemaan tulostustiedostot ja jälki käsittelemään tulosteet.

3 AINETTA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN ETUJA

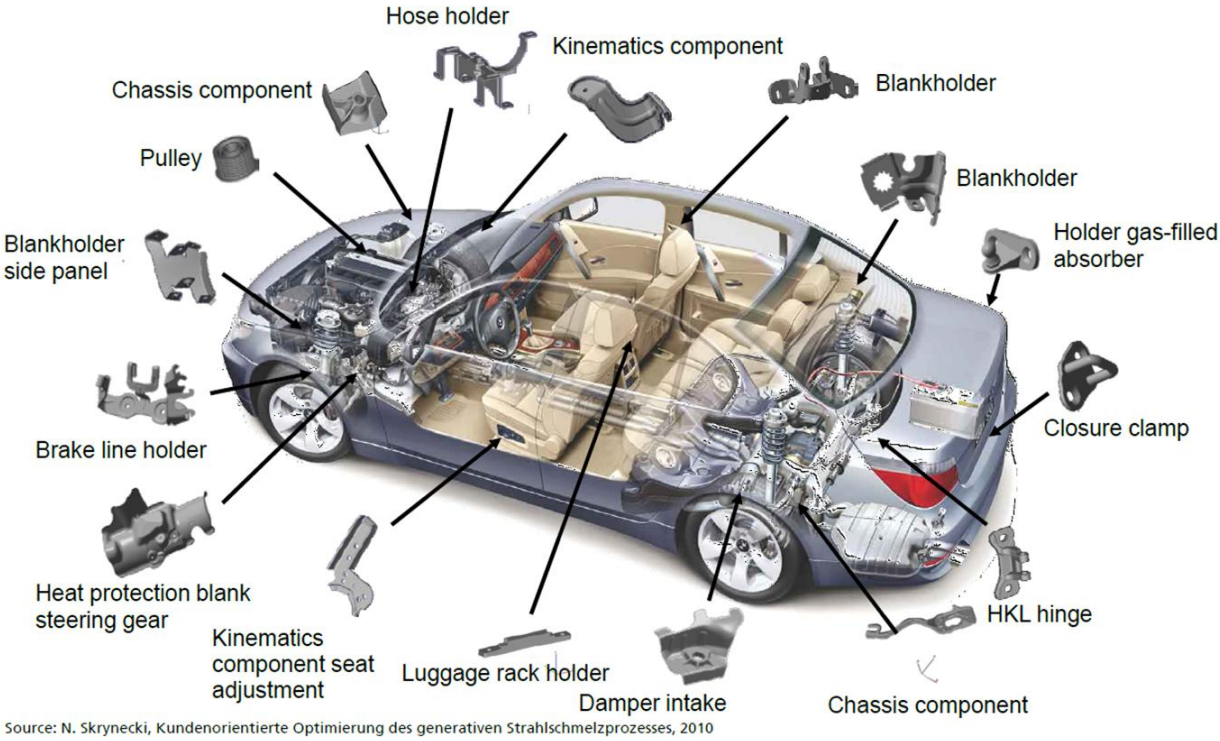
1) Valmistettavien kappaleiden monimutkaisuus ei lisää kustannuksia.
2) Raaka-ainesäästöt voidaan saavuttaa rakenteiden optimoinnissa.
3) Raaka-ainehukka on pieni.
4) Kappaleiden geometria voi olla vapaa työstökoneiden ja aihioiden rajoituksista.
5) Asetusajat ovat pienet.
6) Laitteistojen koko vaihtelee pienestä siirrettävästä kiinteästi asennettaviin.
7) Valmistusmateriaalien kirjo on runsas.
8) Teknologia mahdollistaa osan valmistamisen vain tarpeeseen. Voidaan vähentää varastoja.
9) Mahdollistaa yksittäis- ja personoitujen kappalevalmistuksen muuttamatta valmistusmenetelmää.
10) Tuotanto ja jakelu voidaan sijoittaa lähemmäs asiakasta ilman suuria investointeja.
11) AM:n avulla voidaan usein vähentää kokoonpanon osien määrää rakentamalla monimutkaisempia osia (kuva 7).

Kuva 7. Polttoainejärjestelmän suutin, joka ennen valmistettiin 24 osasta (Swirler) ja valmistusaika lyheni kuudesta viikosta kahteen.

4. AINETTA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN MAHDOLLISUUKSIA

4.1 Protovalmistus

Ainetta lisäävää valmistusta käytetään paljon protojen valmistuksessa (kuva 8). Yksittäiset osat ja osakokonaisuudet voidaan tulostaa muoviin, jolloin voidaan tarkastella yksittäisen osan tai osakokonaisuuden toiminnallisuutta, mittasuhteita, ulkonäköä, sopivuutta muuhun kokonaisuuteen tai käytettävien materiaalien määrää, valmistettavuutta ja simuloida tuotantokustannuksia. Tällöin suunnittelija saa nopeasti palautteen suunnitteluun, ilman että tuote valmistetaan lopullisesta raaka-aineesta tai varsinaisella tuotantomenetelmällä. Ainetta lisäävä valmistus antaa mahdollisuuden optimoida tuotteen rakennetta, lujuutta ja materiaalin käyttöä.



Kuva 8. Erään auton prototyypin pikavalmistetut osat.

4.2 Varaosavalmistus

Eräs merkittävä tulevaisuuden mahdollisuus on varaosavalmistus. Ensinnäkin vanhojen käytössä olevien koneiden varaosat tai varaosien tai tuotedokumenttien (piirustusten) saatavuus voi olla rajoitettu. Tällöin rikkoutunut osa on mallinnettava tai skannattava ja siitä on laadittava digitaalinen malli (3D-malli), jota hyödynnetään ainetta lisäävässä valmistuksessa. Kappaleesta on myös tiedettävä materiaalitiedot (raaka-aine, lujuusominaisuudet jne.). Jos varaosavalmistusprosessi on loppuun asti suunniteltu ja verifioitu varaosavalmistus voi olla hyvinkin luotettavaa ja nopea.

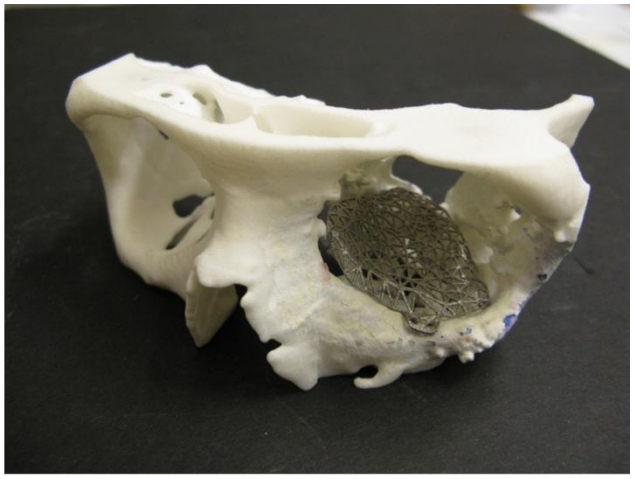
Toiseksi tuotesuunnittelussa voidaan lähteä liikkeelle jo osaperheen tarkastelusta siten, että tiettyihin osiin laaditaan prosessi varaosatuotantoa varten eli kun osa rikkoutuu tai vaurioituu. Käynnistyy automaattisesti kyseisen varaosatuotanto eli 3D –tulostin tulostaa varaosan. Periaatteessa viivettä on ainoastaan osan tulostukseen, logistiikkaan ja asennukseen kulunut aika.

Tätä prosessia voidaan vielä nopeuttaa, jos osaan sovelletaan IoT:n (Internet of Thinks) mukaista toimintaa eli kriittiseen osaan asennetaan sensori, joka monitoroi osan kuntoa ja laitteen tilaa. Tällöin osa voi tilata itse itsensä ennen kuin rikkoutuminen tapahtuu. Menetetty aika on vain osan vaihtamiseen kulunut aika, joka voidaan toteuttaa ennakkohuollon yhteydessä.

Ainetta lisäävä valmistuksella voidaan vähentää fyysisten osien määrää merkittävästi. Tällöin raaka-aineisiin ja tehtyyn työhön sitoutunut pääoma pienenee. Varaosavaraston tilantarve vähenee ja osien tulostus voidaan sijoittaa lähelle sen tarvepaikkaa vaikkapa toiselle puolelle maapalloa. Merkittävää säästöä tulee myös logistiikka kuluista, pelkkä data siirto on lähes ilmaista verrattuna materiaalin siirtoihin.

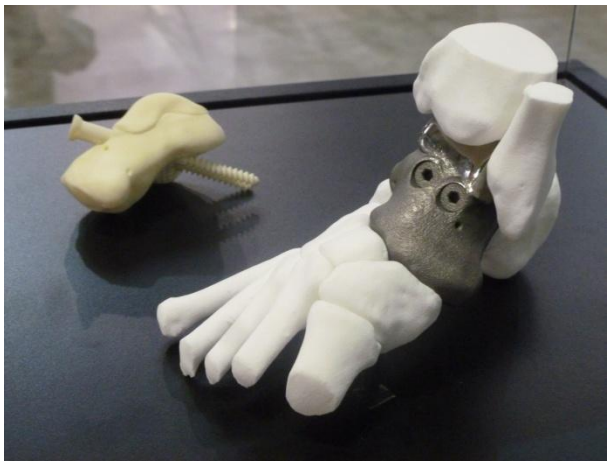
4.3 Uudet sovellutusalueet

Ainetta lisäävää valmistusta on käytetty terveysteknologiassa (kuva 9 ja kuva 10). Esimerkiksi hammasraudat voidaan korvata yksilöllisillä muovisilla muoteilla, jotka vähitellen muuttavat hampaita haluttuun asentoon. Muotteja tarvitaan parikymmentä lopullisen tavoitteen saavuttamiseksi. Toinen käytetty sovellutuskohde on esimerkiksi onnettomuudessa tuhoutuneen kallon osan korvaaminen titaanisella osalla. Tällöin kallon muoto skannataan ehjästä osasta kalloa ja muutetaan vastakkaisen puolen geometriaksi. Tarvittava alue tulostetaan 3D-metallitulostimella ja istutetaan puuttuvaan kohtaan.



Salmi M et al., "Patient specific reconstruction with 3D modeling and DMLS additive manufacturing." *Rapid Prototyping Journal*, 18:209-214, 2012.

Kuva 9.



Kuva 10.

Kuvassa 9. Onnettomuudessa tuhoutunut silmänpohjan luut on korvattu implantilla.

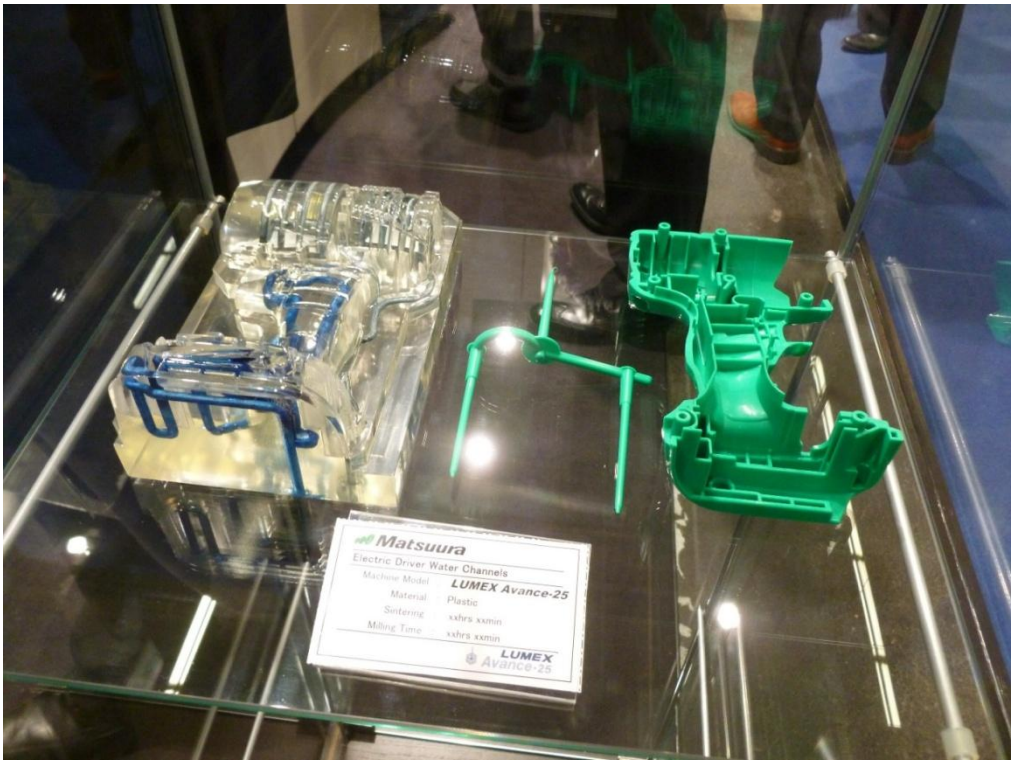
Kuva 10. Jalkapöydän luun korvaa kappale ja muovinen ruuvi, joka liukenee paranemisen aikana.

4.4 Ainetta lisäävä valmistus työvälineiden ja muottien valmistuksessa

Muotteja ja työvälineitä käytetään eri valmistusprosesseissa, kuten muovin ruisku-, tyhjiö- ja painevalussa, puhallus- ja lämpömuovauksessa, metallilevyn puristuksessa, painemuovauksessa, taonnassa, työvälineiden kiinnityksessä ja koneistuskappaleiden kiinnittämisessä. Yksi- ja kaksipuoleiset muotit ovat kappaleen muotoisen ontelon sisältäviä kehyksiä.

Ainetta lisäävillä menetelmillä voidaan valmistaa muottien ja työvälineitä tai niiden osia suoraan käyttöönotettavaksi tai menetelmää voidaan käyttää tarvittavien mallien tekemiseen.

Ainetta lisäävä valmistus mahdollistaa muottien suunnittelussa ja valmistuksessa paremman muotin jäähdytyksen toteutuksen. Muotin sisään voidaan tehdä kanavisto, jota perinteisin menetelmin ei ole mahdollista tehdä. Kanavistossa voi olla mutkia, seurata muuttuvia muotoja, voidaan päästä jäähdytyskohteisiin, joihin muuten ei olisi mahdollista päästä (kuva 11). Tällöin valmistuksen sykliajat lyhenevät, muotin kestoikä pitenee ja tuotteiden laatu paranee.



Kuva 11. Akkuporakoneen muotin ja kahden eri kanaviston havainnekuva (Matsuura).

4.5 Työkalupitimien valmistus

Lastuavan työstökoneiden työkalupitimiä valmistetaan ainetta lisäävällä valmistuksella jo kaupallisesti (Mapal). Tällöin työkalujen pitimet voidaan valmistaa keveämmiksi, pitimen jäähdytystä voidaan parantaa ja lujuutta optimoida.

5. AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS NOPEUTTAMAAN JA YKSINKERTAISTAMAAN PERINTEISIÄ TUOTANTOTEKNOLOGIOITA

5.1 Ainetta lisäävän valmistuksen käyttö valutuotetekniikassa

Hiekkakokillivalussa mallineen teko voidaan korvata kaavauksessa asettamalla tulostettu vahamalli hiekan sisään. Hiekka kovetetaan ja vaha sulatetaan pois.

Tarkkuusvalussa käytettävä valumallineen valmistus voidaan korvata materiaalia lisäävällä valmistuksella. Valumallinen tulostetaan suoraan metalliin ja tehdään tarvittavat viimeistelyt sekä pintakäsittelyt.

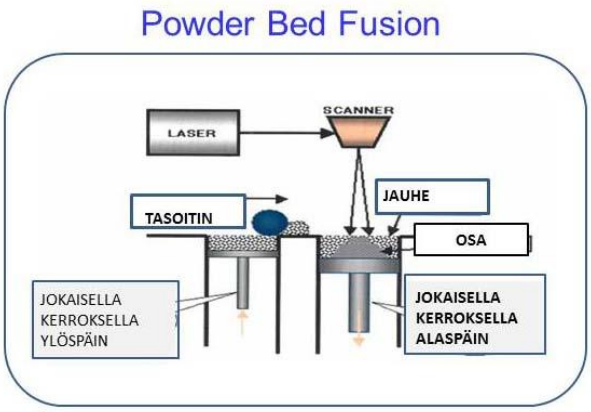
Tarkkuusvalussa valumallia käytetään kumimuotin valmistamiseen (koruvalmistus). Kumimuotilla tehdään tarvittava määrä vahoja, jotka pystytetään vahapuiksi. Kuvassa 12 on tarkkuusvalun työvaiheet.

Valu voidaan myös korvata suoraan metallista tulostetulla osalla. Tällöin hybridikoneella saadaan lähes valmis kappale.

Kuva 12. Tarkkuusvalun työvaiheet. Jos valu korvataan pikavalmistetulla osalla, niin työvaihesäästöt ovat suuret.

5.2 Yleisimmät AM-teknologiat

Kansainvälisessä termistössä AM-tekniikat luokitellaan seitsemään alaluokkaan. Jauhepetimenetelmä, kuva 13 (Powder Bed Fusion), suorakerrostus, kuva 14 (Direct Energy Deposition), materiaaliruiskutus (Material jetting), sideaineruiskutus (Binder Jetting), materiaalin pursotus (Material Extrusion), nesteen polymerisointi (Vat Polymerisation) ja laminointimenetelmä (Sheet lamination).



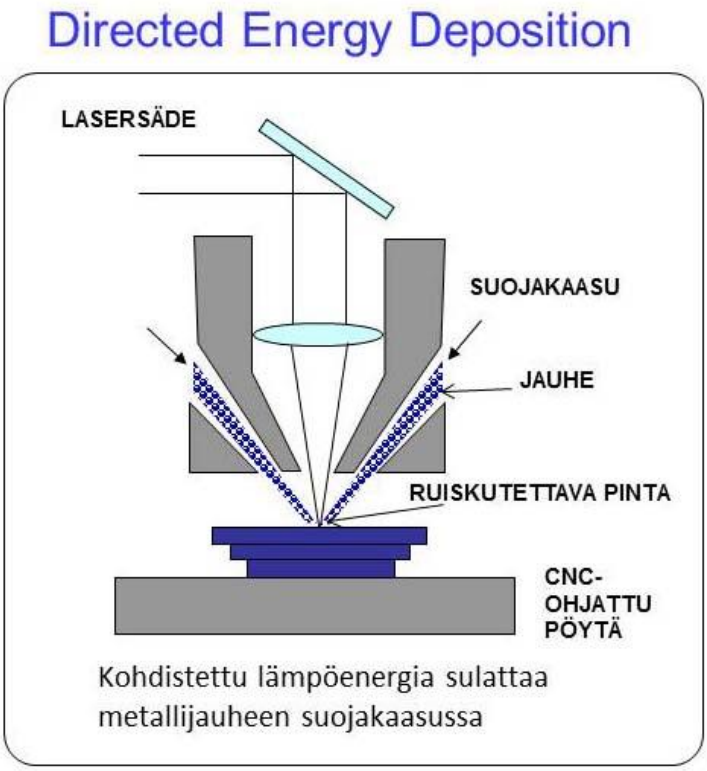
- valolla kovettuva hartsi

-lasersäde ohjataan kontrolloidulla pelillä piirtämään ja kovettamaan yksi viipale kappaleesta

- kappale menee alaspäin viipaleen paksuuden

- uusi kerros hartsia levitetään

Kuva 13. 3D-tulostusteknologia -Stereolitografia



Kuva 14. Suorakerrostus (Direct Energy Deposition)

Kuva 15. Sintratuissa kappaleissa voidaan käyttää myös eri metalleja samassa kappaleessa.

Ainetta lisäävän valmistuksen tulostusnopeus riippuu käytetystä prosessista, halutusta pinnanlaadusta ja tulostusmateriaalista. Tarkoissa prosesseissa päästään 5 - 20 cm^3/tunnissa ja vähemmän tarkoissa jopa 4000 cm^3/tunnissa.

Esimerkkejä valmistetuista kappaleista (kuvat 15, 16, 17 ja 18).

Kuvassa 16. Jarrupoljin tulostettu titaanista (Ti6 Al4V), jolloin painosäästä kotelomaiseen kappaleeseen on 35 %. Seinämävahvuus oheni 1,6 mm:stä 0,9 mm:iin ja samalla jäykkyys parani.

Kuva 17. Akselin kannatin valmistettu alumiinista (EOS).

Kuva 18. Kannatin tulostettu Ti6Al4V-seoksesta ja tulostusaika 38 tuntia.

6. SUUNNITTELUSSA JA VALMISTUKSESSA HUOMIOITAVIA SEIKKOJA

6.1 Kokoa ja muotoa rajoittavia tekijöitä

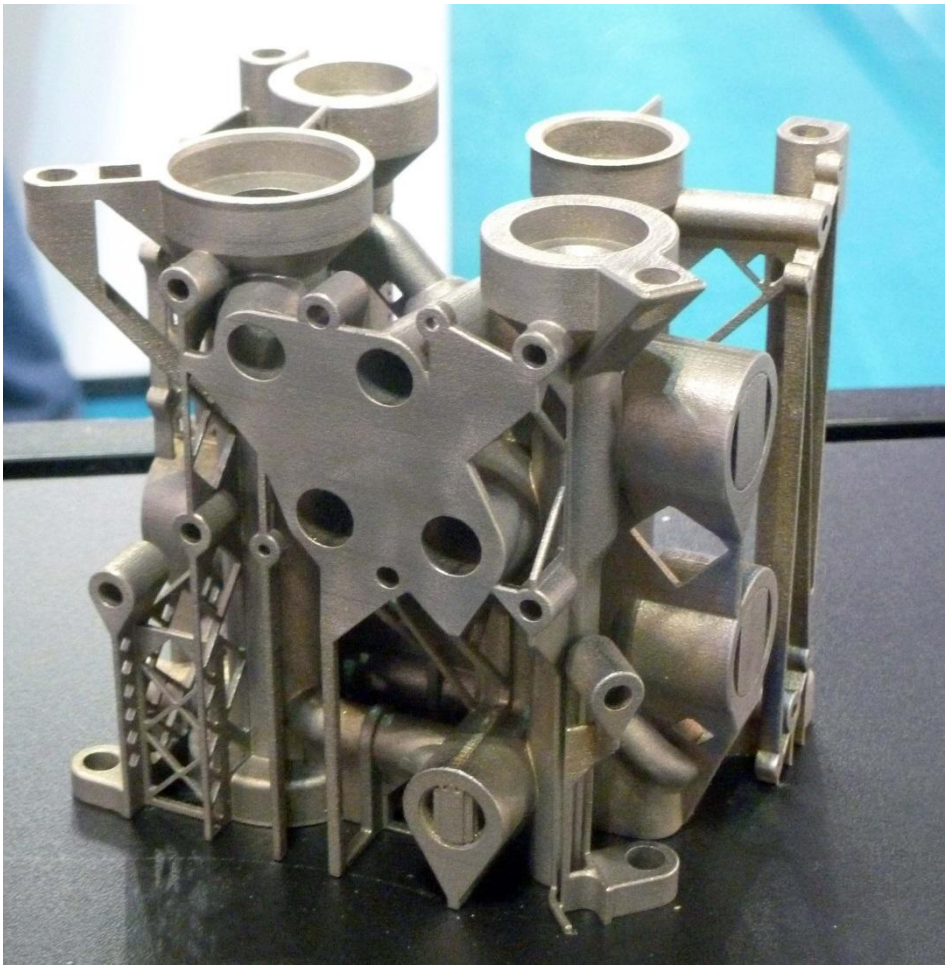
3D-tulostuksessa kappaleen kokoa ja muotoa rajoittavia tekijöitä on useita, ensimmäisenä on kappaleen koko. Esimerkiksi työalan koko voi 250 x 250 x 185 mm tai pöydän halkaisija on 600 mm ja työalan korkeus on 400 mm ja kappaleen paino voi olla 600 kg.

Toinen tekijä on 3D-tulostimen erottelukyky eli resoluutio. Metallitulostimet yleensä kykenevät riittävään resoluutioon, mutta halvoissa muovitulostimissa tämä voi olla rajoittava tekijä. Kolmas huomioitava tekijä tulostettavan minimi seinämän vahvuuden huomioon otto. Metallitulostimissa on päästy 5 mikrometrin tarkkuuteen.

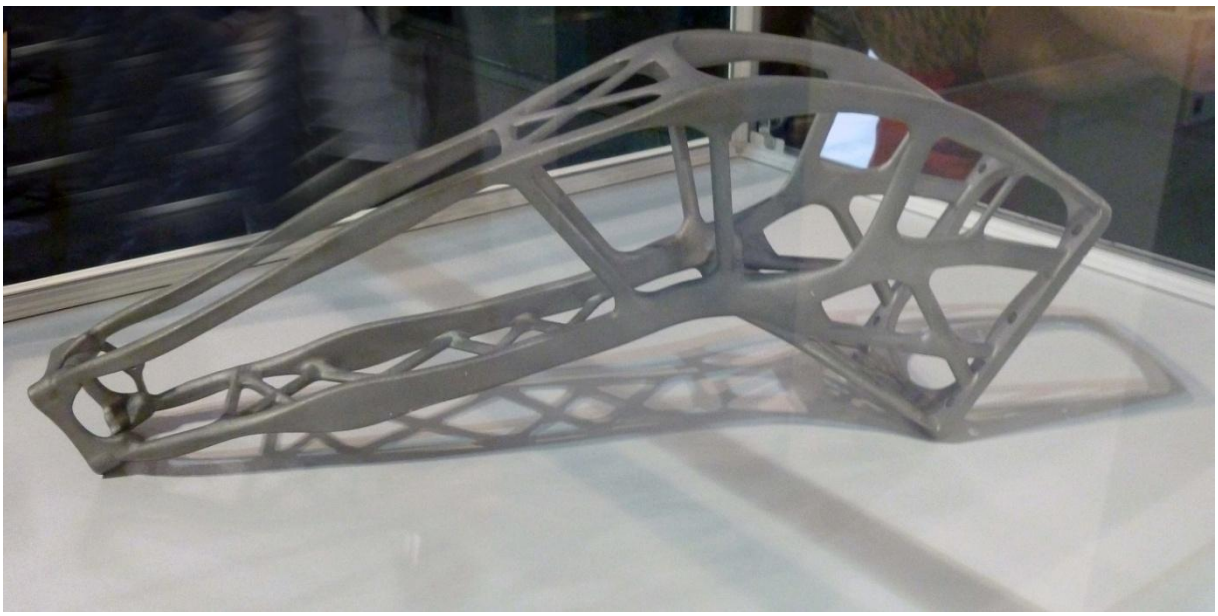
Pursottavilla tekniikoilla ja metallien tulostuksessa huomioitava, että ”tyhjän päälle ei voi tulostaa”. Tällöin tarvitaan alle tukirakenne. Kun kappaleen muoto laajenee kerroksittain, ylempiä kerroksia tuetaan rakennusalustasta tai alemmista muodoista lähtien kasvatetuilla tukirakenteilla, jotka takaavat valmiin kappaleen käyttökelpoisuuden. Tuet eivät kuulu kappaleeseen, vaikka ne on yleensä tehty samasta materiaalista. Ne pitävät kappaleen kiinni rakennusalustassa ja tukevat muotoa alhaaltapäin. Suunnitteluvaiheeseen sisältyy tukirakenteiden tyypin, materiaalin ja muiden parametrien määrittely. Tukirakenteita tarvitaan erityisesti metallijauheen sulatuksessa, sekä muovien pursotuksessa ja valokovettamisessa. Sulamaton polymeerijauhe ympäröi ja tukee kappaletta, eikä lisätukia sitä käytettäessä yleensä tarvita.

- Kappale on muotoiltava ilman roikkuvia muotoja, (45 asteen sääntö).
- Tai tulostettava kappale sellaisessa asennossa, että roikkuvia muotoja ei esiinny.
- Tai on käytettävä tukimateriaalia.
- Lyhyet roikkuvat muodot tai pienet reiät eivät yleensä vaadi tukemista (tarkat mitat menetelmäkohtaisia).
- Seinämien vahvuudet on tarkastettava.
- Usein prosessiin tuodaan paljon lämpöä - > lämpöjännitykset on huomioitava sekä kappaleen kutistumat/muodonmuutokset.

Kappaleita AM-tekniikoilla valmistettaessa kappaleiden sisälle voidaan jättää keventäviä onteloita tai kuorikerrosten väliin voidaan tulostaa vaikkapa hunajakennorakenne (kuva 19). Jauhepetitekniikoissa onteloihin, joihin materiaali voi jäädä, on kuitenkin jätettävä tyhjennysaukkoja jauheen poistamiseksi. Rakenteita voidaan keventää myös kuvan 20 osoittamalla tavalla.



Kuva 19. Monimutkainen kappale, jossa näkyy eri muotojen tuennat ja kevennykset.



Kuva 20. Varsirakenne, jossa paino ja lujuus on optimoitu.

6.2 Käytettäviä metalliseoksia

Ainetta lisäävässä valmistuksessa käytettäviä metalliseoksia ovat esimerkiksi maraging teräkset, ruostumattomat teräkset (AISI 316, X38CrMoV5-1, X40CrMoV5-1), titaanit (puhdas titaani, Ti6Al7Nb, Ti6Al4V), kromi-koboltti -seokset, nikkeliseokset (Inconel 718) ja alumiiniseokset (AlSi10Mg). Myös jalometalleja on tulostettu.

Kappaleen pintaan voidaan myös kasvattaa toista ainetta. Kuvassa 21 ruostumattoman teräksen (AISI 316) päälle on kasvatettu erilaisia muotoja (Inconel 718). Kuvassa 22 on ruostumattoman teräksen ja Inconel 718 liitoksen lujuus on kestävämpi kuin heikomman aineen vetomurtolujuus.

Metalliseosten lujuusominaisuuden saattavat vaihdella eri valmistajien jauheilla ja koneilla.

Kuvassa 21. Ruostumattoman teräsputken päälle on kasvatettu erilaisia muotoja Inconel 718 seoksesta (messukappale, Mazak).

Kuva 22. Kahden eri materiaalin liitoslujuuden testaus vetokokeella.

6.3 Tuotannon tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä

Tuotantokustannukset muodostuvat materiaalikustannuksista, konekustannuksista (koneaika, tilakustannus, sähkö yms.) ja henkilötyökustannuksista. Materiaalikustannus voidaan laskea kappaleen painon ja tulostusmateriaalin kilohinnan mukaan. Koneaikaan vaikuttaa tulostettavan materiaalin kerrospaksuus ja koneen liikenopeudesta. Kerrospaksuuden voivat vaihdella 5 – 250 mikrometrin välillä. Henkilötyöaikaa kuluu operointiin, operoinnin suunniteluun ja kappaleiden viimeistelyyn (esim. tukirakenteiden poistoon).

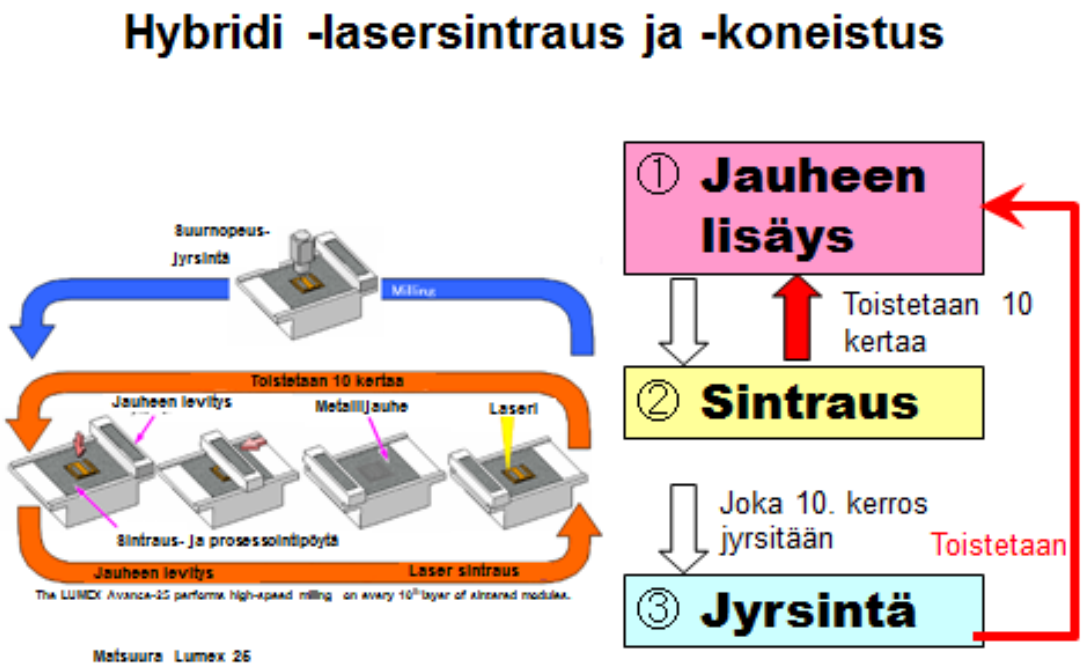
Ainetta lisäävillä koneilla pyritään ajamaan miehittämättömästi läpi vuorokauden ja viikonloput. Usein yksi käyttäjä voi operoida useampaa konetta samanaikaisesti. Tämä laskee konekustannusta.

7. HYBRIDITYÖSTÖMENETELMÄT

Hybridivalmistus yhdistää kaksi tai useampia olemassa olevia valmistusprosesseja yhdistelmä-työstöksi, jossa kummankin erillisen prosessin etuja voidaan hyödyntää samanaikaisesti:

1. Ainetta poistavat hybrideistyöstömenetelmät
2. Ainetta muovaavat hybrideistyöstömenetelmät
3. Ainetta lisäävät hybrideistyöstömenetelmät
4. Ainetta lisäävät ja poistavat hybrideistyöstömenetelmät
5. Ainetta liittävät ja poistavat hybrideistyöstömenetelmät
6. Ainetta lisäävät ja aineen rakennetta muuttavat hybrideistyöstömenetelmät
7. Ainetta poistavat ja aineen rakennetta muuttavat hybrideistyöstömenetelmät

Integroidut koneet eli hybridikoneet, joilla eri prosesseja voidaan tehdä samassa laitteessa kuten jyrsinnän ja sorvauksen yhdistäminen tai laserilla tapahtuva aineen lisäys ja jyrsintä (kuva 23 Matsuura). Hybridivalmistukseksi on myös luettu menetelmä jossa skannaaminen ja pikavalmistus on automatisoitu yhteen prosessiin.



Kuva 23. Periaatekuva Matsuuran käyttämästä hybridilaser-sintrauksesta ja -jyrsinnästä.

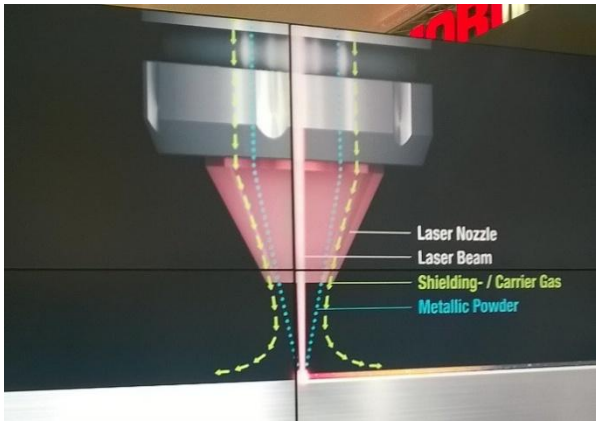
Edellä kuvatussa Matsuuran käyttämässä tekniikassa jauhetta levitetään kerros ja se sintrataan. Tämä toistetaan kymmenen kertaa, jonka jälkeen pinta jyrsitään ja taas aloitetaan sintraus. Tätä toistetaan niin kauan kuin kappale on valmis.

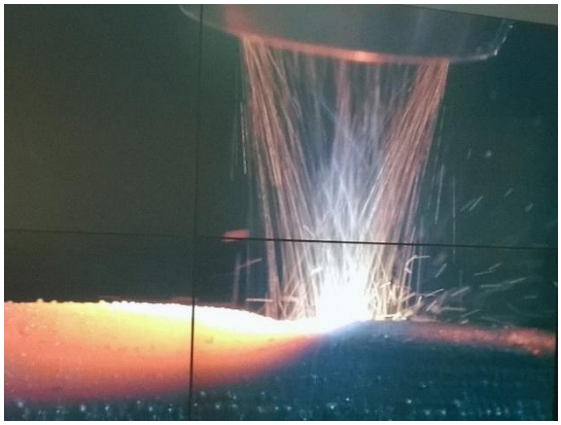
Kuvassa 24 on Mori Seikin käyttämä tekniikka, tässä metallijauhe ruiskutetaan pintaan, johon lasersäde sen sulattaa kiinni. Myös tässä tekniikassa pintaa voidaan aina koneistaa laseroitujen kerrosten välillä.

Hybridimenetelmä sopii erinomaisesti pienerävalmistukseen, kuten esimerkiksi erittäin vaikeasti koneistettavista materiaaleista valmistettavien osien valmistukseen. Ainetta lisäävää mahdollisuutta hyödynnetään kappaleiden valmistuksessa lähes valmiiseen muotoon. Periaatteessa kone valmistaa samalla kiinnityksellä valmiin kappaleen. Lisäksi laserpäätä voidaan käyttää myös merkkaukseen ja pinnan strukturointiin. Metallijauheen sulattamiseen käytetään yleisesti kuitulaseria. Laserpinnoituspäät tai ainetta lisäävän valmistuksen suuttimet sulattavat materiaalia kerroksittain ja kappaleen haluttu muoto muodostuu jähmettymällä. Myös eri metallinen yhdistäminen tällä menetelmällä on mahdollista.

Esimerkkinä DMG Mori Seikin kehittämä 5-akselinen jyrsinkone johon laserpää on integroitu HSK-kartion avulla. Työkappale voidaan koneistaa jyrsimällä ja automaattisesti vaihtaa lasersintrauspää jyrsinnän ja lasertyöstövaiheen välillä. Ainetta lisäävä laserityöstö on jauhesuuttimen avulla noin10 kertaa jauhekerrostusmenetelmää nopeampi. Koneen työstöalue on halkaisijaltaan 600 mm ja korkeudeltaan 400 mm sekä painoa kappaleella voi olla 600 kg.

Kuvissa 24. DMG Mori Seikin kehittämän lasersintrausjärjestelmän periaate. Laser-säteellä sulatetaan ruiskutettava metallijauhe kiinni kappaleeseen ja suojakaasu estää materiaalin hapettumisen.

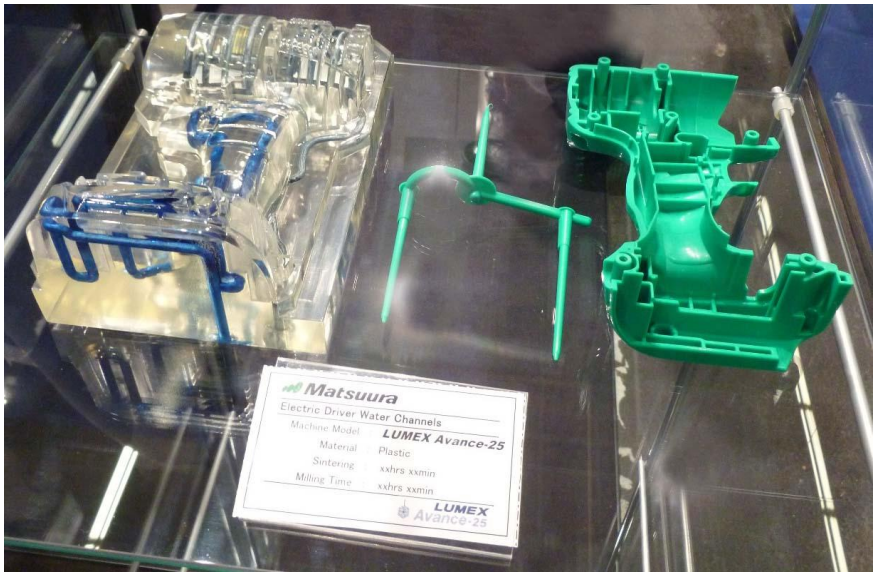
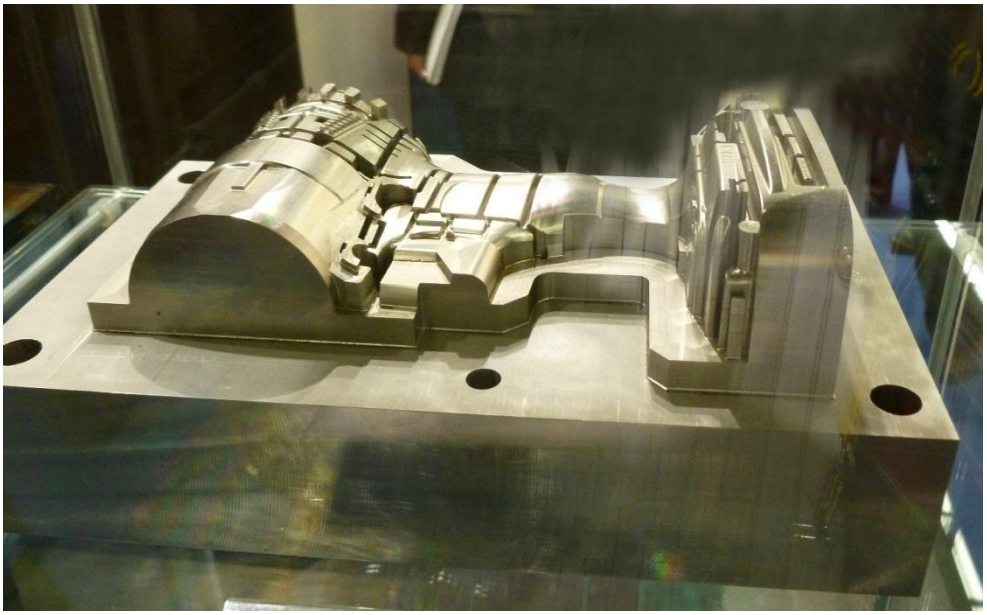




Kuva 24. DMG Mori Seikin kehittämä lasersintraus periaatekuvana ja sama prosessi käytännössä.

7.1 Hybridivalmistuksen edut

Hybridivalmistuksessa valmistettavan kappaleen (tai muotin) osien määrää voidaan vähentää. Kuvassa 25 ja 26 akkuporakoneen muotin puolisko on valmistettu yhdestä kappaleesta ja kanavat on integroitu muotin sisään opimaaliselle tavalla. Kuvassa 14 on linssin muotti. Kappale näyttää yksinkertaiselta, mutta laatuvaatimukset ovat erittäin suuret.



Kuva 25. Akkuporakoneen muotin ja kanaviston havainnekuva (kanavat voivat seurata kappaleen muotoa). Tässä esimerkissä jäähdytysaika syklin välillä putosi 30 sekunnista 15 sekunttiin (Matsuura).