

Opinnäytetyö (AMK / YAMK)

Konetekniikka

2025

Juuso Mettälampi

DED-Arc menetelmän sovellukset ja soveltaminen



Opinnäytetyö AMK | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

2025 | 40 sivua

Juuso Mettälampi

DED-Arc menetelmän sovellukset ja soveltaminen

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kartoittaa DED-Arc (Directed Energy Deposition – Arc) sovelluksia ja niiden soveltamista lisäävässä valmistuksessa. Opinnäytetyö toteutettiin yhteistyössä Turun ammattikorkeakoulun (Turun AMK) kanssa.

Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jota täydennettiin käytännön kokeiluilla. Kirjallisuusosion on tarkoitus muodostaa käsitys DED-Arc:in prosessista ja siinä hyödynnettävistä ohjelmistoista ja laitteistosta. Käytännön osiossa pyrittiin selvittämään, miten esimerkiksi menetelmän avulla voitaisiin kulutusosat kunnostaa uudelleen käytettäväksi. Menetelmän onnistumisen kannalta on tärkeää, että hitsaussolu, robotti, ja mahdolliset työkalut on tarkasti mallinnettu, jotta simuloinnista saadaan todellisuutta vastaava.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että DED-Arc on lupaava teknologia suurien ja kulutusta kestävien osien uudelleen hitsauksessa. Kuitenkin korkeat investointikustannukset ja osaamisvaatimukset rajoittavat menetelmän hyödyntämistä monissa teollisuuden yrityksissä. Jatkuvien tutkimusten ja kehitystyön ansiosta mahdollisuudet laajenevat, ja tulevaisuudessa rooli voi olla suuri valmistuksessa ja kunnossapidossa.

Asiasanat:

DED-Arc, Lisäävä valmistus, Hitsausautomaatio

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2025 | Total number of pages 40

Juuso Mettälämki

Applications and Implementation of the DED-Arc method

The objective of this thesis was to explore the applications of the DED-Arc (Directed Energy Deposition- Arc) method and its suitability in additive manufacturing. The work was carried out in collaboration with Turku University of Applied Sciences (Turku AMK).

The research was conducted as a literature review, supplemented by practical experiments. The literature section aimed to provide an overview of the DED-Arc process, including the software and hardware used in its implementation. In the practical part, the focus was on evaluating how the method could be applied to renovate worn components for reuse. For the method to be successful, it is important that the welding cell, robot, and any associated tools are accurately modeled to ensure the simulation corresponds closely to reality.

Based on the findings, DED-Arc is promising technology for the repair of large and wear-resistant components. However, high investment costs and the need for specialized expertise currently limit its broader industrial use. With continued research and development, the potential of this method is expected to grow, and in the future, it may play a significant role in both manufacturing and maintenance.

Keywords:

DED-Arc, Additive manufacturing, Welding automation

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	7
1 Johdanto	8
2 Ainetta lisäävä valmistus	9
2.1 Ainetta lisäävät menetelmät	9
2.1.1 Sideaineen suihkutus (BJT, Binder Jetting)	9
2.1.2 Materiaalin pursotus (MEX, Material Extrusion)	10
2.1.3 Materiaalin suihkutus (MJT, Material Jetting)	11
2.1.4 Jauhepetisulatus (PDF, Powder Bed Fusion)	11
2.1.5 Kerroslaminointi (SHL Sheet Lamination)	12
2.1.6 Valokovetus altaassa (VPP, Vat Photopolymerization)	13
2.1.7 Suorakerrostus (DED, Directed Energy Deposition)	14
3 Robotisoidun DED-Arcin työvaiheet	16
3.1 3D Mallinnus	16
3.2 Työstöratojen integrointi	16
3.3 Postprosessori	17
3.4 Hitsaus	17
3.5 Jälkikäsittely	18
4 Käyttökohteet ja menetelmän keskeiset hyödyt	19
4.1 Käyttökohteita	19
4.2 DED-Arc maataloudessa	20
5 DED-Arc ohjelmistotyökalut	21
5.1 AM plugin	21
5.2 RoboDK	21
5.3 Autodesk	21
5.4 Siemens NX	22
5.5 ADAXIS	22
5.6 Caracol	23

5.7 WAAM3D	24
5.8 MX3D	25
5.9 Fronius	26
6 Robotti- integraatio ja laitteisto	28
6.1 Robottivalmistajia	28
6.1.1 Yaskawa Motoman	28
6.1.2 ABB	29
6.2 Hitsausvirtalähteet	29
6.3 Laitteiden erilaisuus ja haasteellisuus	30
6.4 Valmistusprosessin digitaaliset työkalut	30
6.4.1 G-koodi	31
6.4.2 Tulostusratojen määrittäminen	31
6.4.3 CNC (Computer Numerical Control)	32
7 Käytännön kokeilut	33
7.1 Ohjelmistot	33
7.1.1 Autodesk Fusion	33
7.2 Robottihitsaus	34
7.2.1 Testikappaleet	35
8 Yhteenveto	37
Lähteet	38

Kuvat

Kuva 1. Binder jetting (SFS-EN ISO 17296-2:2016).	10
Kuva 2. Material extrusion (SFS-EN ISO 17296-2:2016).	10
Kuva 3. Material jetting (SFS-EN ISO 17296-2:2016).	11
Kuva 4. Powder bed fusion (SFS-EN ISO 17296-2:2016).	12
Kuva 5. Sheet lamination (SFS-EN ISO 17296-2:2016).	13
Kuva 6. Vat photopolymerization (SFS-EN ISO 17296-2:2016).	14
Kuva 7. Directed energy deposition (SFS-EN ISO 17296-2:2016).	15

Kuva 8. DED-Arc (Twi-global, 2025b).	18
Kuva 9. Adaxis AdaOne ohjelmisto ja demo osa(Tuunainen Aku, 2024).	23
Kuva 10. Caracol tuotannonhallinta sekä demoja(Tuunainen Aku, 2024).	24
Kuva 11. WAAM3D Kylmälanka prosessilla tulostettuna(Tuunainen Aku, 2024).	25
Kuva 12. hallintajärjestelmä, demo-osia ja robottijärjestelmä(Tuunainen Aku, 2024).	26
Kuva 13, Froniuksen demo osat(Tuunainen Aku, 2024).	27
Kuva 14. ABB lisäävän valmistuksen prosessi(ABB, 2020).	29
Kuva 15. Valmistusmenetelmät	34
Kuva 16. Testi kärjet.	36

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

AM	Additive Manufacturing
BJT	Binder jetting
CAD	Computer-Aided Desing
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CMT	Cold metal transfer
CNC	Computer Numerical Control
DED-Arc	Directed energy deposition-Arc
MEX	Material Extrusion
MJT	Material Jetting
PDF	Powder Bed Fusion
SHL	Sheet lamination
STP	Travelling salesman problem
VPP	Vat Photopolumerization
WAAM	Wire Arc additive Manufacturing

1 Johdanto

Lisäävä valmistus on yksi nykyaikaisen valmistustekniikan nopeimmin kehittyvistä osa-alueista (Rodrigues *et al.*, 2019). Erityisesti metallien kohdalla sen tarjoamat mahdollisuudet on laajentuneet merkittävästi. DED-Arc kerrostukseen perustuva lisäävä valmistus on menetelmä, joka yhdistää hitsauksen ja robotiikan, tarjoten mahdollisuuden valmistaa tai kunnostaa suurikokoisia ja kulutukselle alttiita metallikomponentteja kustannustehokkaasti. Menetelmä sopii erityisen hyvin teollisuuteen, jossa varaosien toimitusajat, yksilöllisyys tai materiaalikustannukset ovat isoja tekijöitä. (Twi-global, 2025b.)

Tässä opinnäytetyössä tavoitteena on selvittää, millaisia mahdollisuuksia ja haasteita DED-Arc tarjoaa. Työssä tarkastellaan mitä ohjelmistoja, laitteita ja järjestelmiä voidaan hyödyntää menetelmässä, sekä niiden yhteensopivuuksia. Huomiota kiinnitetään myös laitteistointegraatioon, joka on usein keskeinen haaste automatisoidussa valmistusympäristössä.

Lisäksi työssä arvioidaan DED-Arc menetelmän käyttömahdollisuuksia korjausvalmistuksessa ja kunnossapidossa, kuten kuluvien osien elinkaaren jatkamisessa.

Tämän opinnäytetyön ensisijaisena tutkimusmenetelmänä toimii kirjallisuuskatsaus, jonka avulla pyritään muodostamaan kattava kokonaiskuva. Aineistoina käytetään laajasti kansainvälisiä tutkimuksia, standardeja, valmistajien ohjeita sekä tutkimuksia. Lisäksi tarkastellaan ajankohtaisia julkaisuja ohjelmistokehityksestä, robottihitsauksesta ja valmistusprosessien automatisoinnista. Kirjallisuuden tukena työssä käytetään yksittäisiä käytännön esimerkkejä.

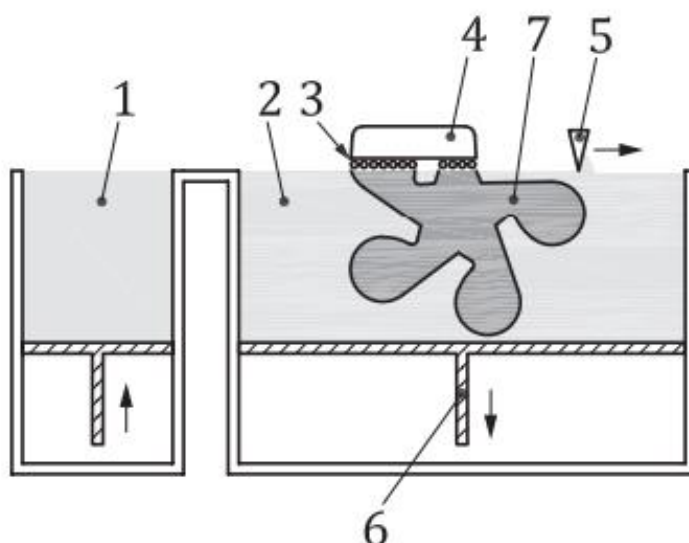
2 Ainetta lisäävä valmistus

2.1 Ainetta lisäävät menetelmät

Ainetta lisäävä valmistus eli 3D tulostus on nykypäivänä yksi suosituista aiheista tekniikan aloilla. Ainetta lisäävän valmistuksen kyky luoda kolmiulotteisia, monimutkaisia sekä lähes lopulliseen muotoonsa valmiita osia kerros kerrokselta tapahtuvalla aineenlisäysprosessilla on tehnyt merkittäviä edistysaskeleita ajatellen tulevaisuutta. (Rodrigues et al., 2019.) Erityisesti kalliiden materiaalien, kuten titaanin tai volframin kohdalla lisääainevalmistus voi olla kustannustehokkain valmistusmenetelmä (Treutler and Wesling, 2021). Alla on esitelty standardin SFS-EN ISO/ASTM 52900:2021 mukaiset seitsemän eri lisäävän valmistuksen menetelmää ja niiden perusteet.

2.1.1 Sideaineen suihkutus (BJT, Binder Jetting)

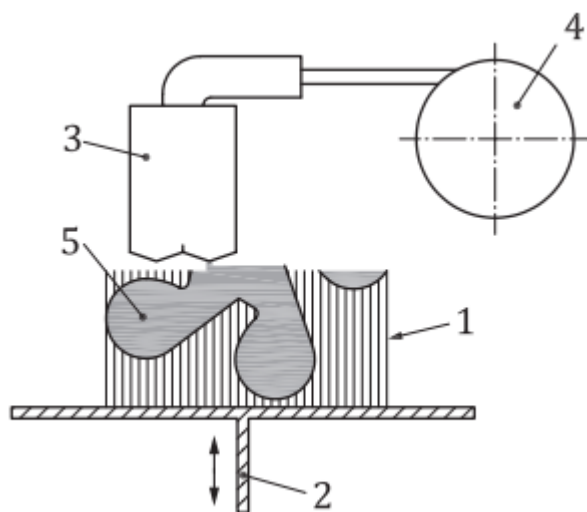
Seuraavassa kuvassa (Kuva 1) on esitetty Binder Jetting menetelmä, joka on yksi ainetta lisäävän valmistuksen menetelmistä. BJT:ssä nestemäistä sideainetta suihkutetaan hienojakoiseen jauhepetiin, jolloin syntyy kerroskerrokselta rakentuva kiinteä kappale. Menetelmässä Jauhesyöttöjärjestelmä (1) tuo jauhetta tulostusalueelle, jossa se levitetään jauhepediksi (2). Sideaineen suihkutuslaite (4) ruiskuttaa nestemäistä sideainetta jauhepedin pinnalle (3). Kun sideaine on levitetty, jauheenlevityslaite (5) levittää uuden jauhekerroksen ja rakennusalue (6) laskeutuu hieman, jotta uusi kerros voidaan muodostaa edellisen päälle. Prosessi toistuu, kunnes kappale (7) on kokonaan muodostettu. (SFS-EN ISO 17296-2:2016.)



Kuva 1. Binder jetting (SFS-EN ISO 17296-2:2016).

2.1.2 Materiaalin pursotus (MEX, Material Extrusion)

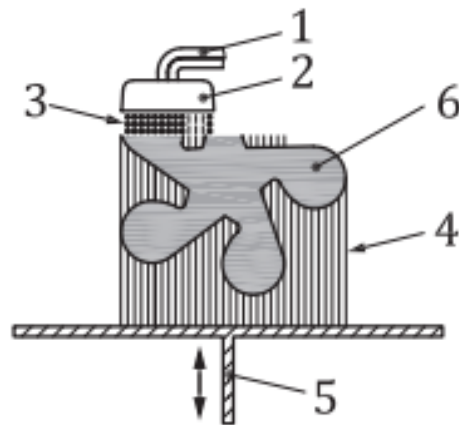
Seuraavassa kuvassa (Kuva 2) on esitetty Material extrusion ainetta lisäävä menetelmä. MEX on menetelmä, jossa materiaalia annostellaan suuttimen tai reiän kautta. Haluttu materiaali syötetään tulostuspäähän (4), tulostuspään sisällä oleva kuumennettu suutin lämmittää materiaalin juoksevaksi ja kerrostuu suuttimen (3) läpi tarkasti tulostusalustalle (1), jossa mahdollisesti joudutaan käyttämään tukimateriaalia kappaleesta riippuen. (SFS-EN ISO 17296-2:2016.)



Kuva 2. Material extrusion (SFS-EN ISO 17296-2:2016).

2.1.3 Materiaalin suihkutus (MJT, Material Jetting)

Seuraavassa kuvassa (Kuva 3) on esitelty Materiaalin suihkutus lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa rakennusmateriaalin pisaroita suihkutetaan tarkasti halutuille alueille. Prosessissa raaka-ainesyöttöjärjestelmä (1) tuo sulatettua vahaa tulostuspäähän. Suihkutuslaite (2) annostelee pieniä materiaalipisaroita (3) kerroksittain tukirakenteen (4) päälle. Tukirakenne auttaa kappaleen muodon säilyttämisessä tulostuksen aikana. Rakennusalusta ja hissi (5) liikkuvat alaspäin kerros kerrokselta, kunnes valmis tuote (6) on valmis. Prosessin aikana käytetään aktivointilähteenä säteilyvaloa tai lämpöä, jotka saavat aikaan sulaneen materiaalin kiinnittymisen. (SFS-EN ISO 17296-2:2016.)

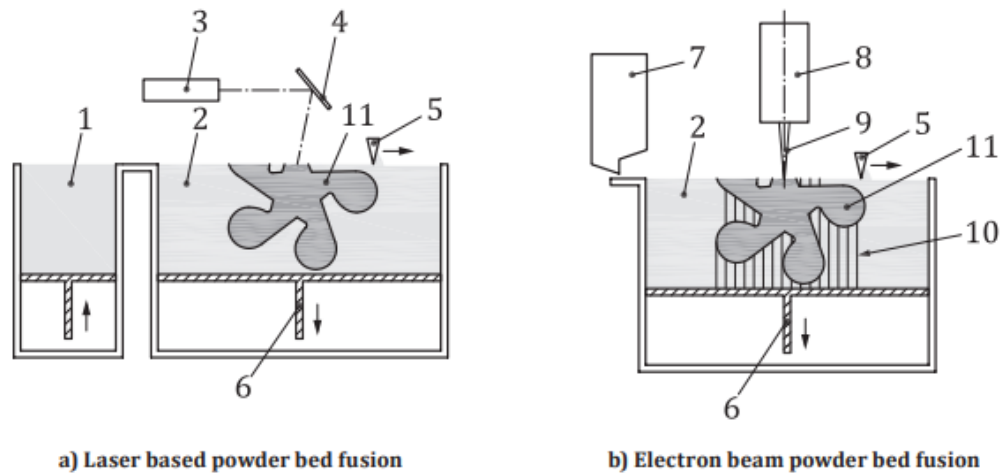


Kuva 3. Material jetting (SFS-EN ISO 17296-2:2016).

2.1.4 Jauhepetisulatus (PDF, Powder Bed Fusion)

Seuraavassa kuvassa (Kuva 4) On esitelty jauhepetisulatus menetelmä, jossa lämpöenergiaa käytetään sulattamaan jauhepedin materiaali tarkasti valituilla alueilla. Kuvassa esitellään kaksi erilaista PDF menetelmää laserpohjainen (a) ja elektronisuihkupohjainen (b). Laserpohjaisessa menetelmässä jauhemateriaali (2) levitetään rakennusalustalle (6), ja jauhetta syötetään jauhesyöttöjärjestelmästä (1). Laser (3) sulattaa jauhetta tarkasti peilin (4) ohjaamana. Jauheen levityslaite (5) lisää uuden kerroksen. Elektronisuihkupohjaisessa menetelmässä puolestaan käytetään elektronisuihkutykin (8) tuottamaa fokuoitetua elektronisuihkua (9) sulattamaan jauhetta. Syöttösäiliöstä (7) jauhe siirtyy rakennusalustalle. Lisäksi kappale voidaan käsitellä

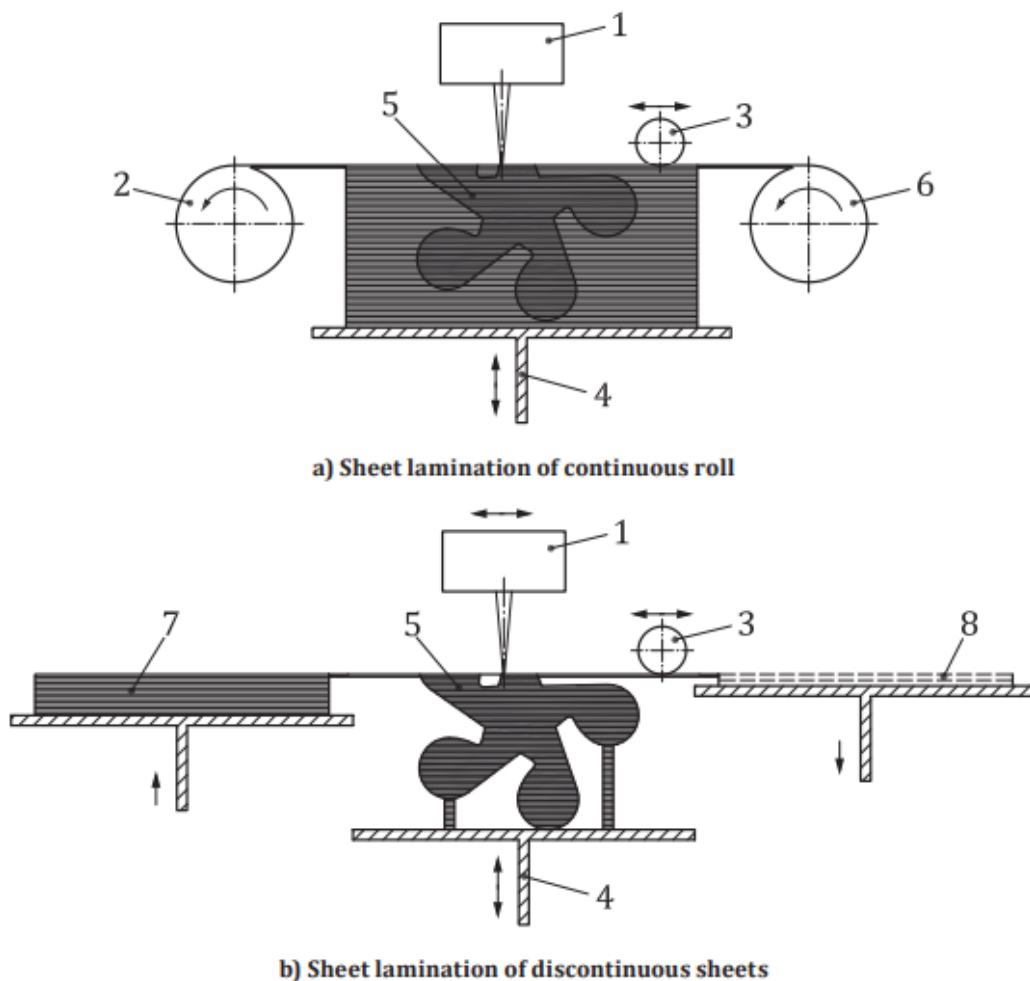
mekaanisesti tai lämpökäsitellä haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. (SFS-EN ISO 17296-2:2016.)



Kuva 4. Powder bed fusion (SFS-EN ISO 17296-2:2016).

2.1.5 Kerroslaminointi (SHL Sheet Lamination)

Seuraavassa kuvassa (Kuva 5) on esitelty kerroslaminoinnin kaksi erilaista kerroslaminointitapaa, jatkuvan rullan laminointi (a) ja erillislevyjen laminointi (b). Menetelmässä lämpöenergiaa käytetään sulattamaan materiaalia. Molemmissa menetelmissä leikkauslaite (1) muotoilee materiaalilevyt, ja laminaattorilla (3) yhdistää ne kerroskerrokselta rakennusalustalle (4). Jatkuvan rullan laminoinnissa materiaalilevyt syötetään jatkuvasta rullasta (6), kun taas erillislevyjen laminoinnissa käytetään yksittäisiä levyjä, jotka on pinottu raakamateriaalipinoon (8). Ylimääräinen materiaali kerätään joko rullana (2) tai pinona (7). Lopullinen kappale muodostuu kerroksittain, ja sen sitomismekanismina käytetään joko lämpöreaktiota, kemiallista sitoutumista tai ultraääntä. Jälkikäsitelyä ylimääräinen materiaali poistetaan ja kappale tarvittaessa hiotaan tai lämpökäsitellään. (SFS-EN ISO 17296-2:2016.)

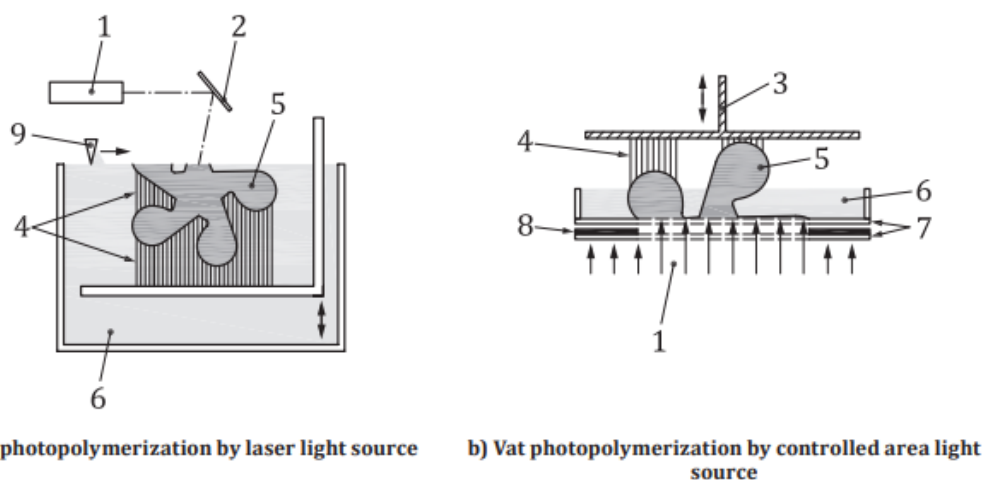


Kuva 5. Sheet lamination (SFS-EN ISO 17296-2:2016).

2.1.6 Valokovetus altaassa (VPP, Vat Photopolymerization)

Seuraavassa kuvassa (Kuva 6) on esitetty valokovetuksen kaksi eri menetelmää, laserpohjainen (a) ja kontrolloidun alueen valolähteeseen perustuva (b). Laserpohjaisessa menetelmässä valonlähde (1) tuottaa lasersäteen, joka ohjataan peilin (2) avulla kohdistetusti altaaseen (6), joka on täytetty valokovetetulla hartsilla. Rakennusalusta ja hissi (3) laskeutuvat vähitellen, kun kovettunut kerros muodostuu. Pinnan tasausmekanismi (9) varmistaa tasaisen kerroksen ennen seuraavan valotuksen aloittamista. Kontrolloidun alueen valolähteessä käytetään isompaa valoaluetta, jossa läpikuultavat levyt (7) ja valomaski (8) auttavat kohdistamaan UV-säteilyn suoraan hartsialtaaseen (6). Molemmissa menetelmissä kovettumismekanismina on kemiallinen reaktio, joka aktivoituu uv-säteilyn vaikutuksesta. Jälkikäsittelyvaiheessa kappale puhdistetaan, poistetaan mahdolliset

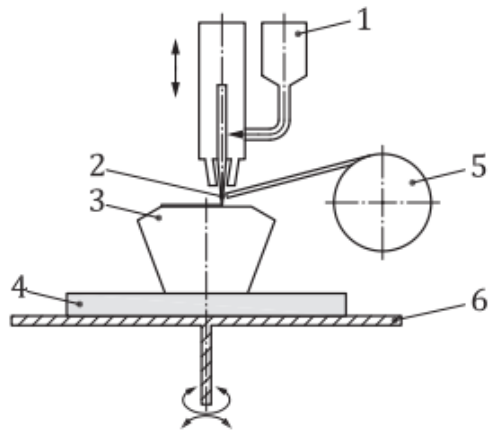
tukirakenteet ja suoritetaan jälkikivetys lisäämällä uv-altistusta.(SFS-EN ISO 17296-2:2016, 2016.)



Kuva 6. Vat photopolymerization (SFS-EN ISO 17296-2:2016).

2.1.7 Suorakerrostus (DED, Directed Energy Deposition)

Seuraavassa kuvassa (Kuva 7) on esitetty suorakerrostus menetelmä, jossa kohdennettua lämpöenergiaa käytetään materiaalin sulattamiseen sen kerrostamisen aikana. DED prosessissa käytetään joko lankaa tai jauhetta raaka-aineena. Prosessi alkaa materiaalin syötöstä joko jauhesäiliöstä (1) tai lankakelalta (5). Energiasäde (2), joka voi olla esimerkiksi laser, elektronisuihku tai plasmakaariprosessi, kohdistetaan sulatusalueelle, jossa materiaali kerrostuu ja sulaa yhdeksi kiinteäksi kappaleeksi. Kerrostuva materiaali (3) rakentuu alustalle (4), joka liikkuu rakennuspöydän (6) mukana. Tyypillisesti DED järjestelmässä on usean akselin liike (3–6 akselia), mikä mahdollistaa monimutkaisten muotojen valmistuksen eri kulmista. Tärkeää on, että energiapisteeseen syötetty materiaali sulautuu saumattomasti aiempaan kerrokseen, jolloin kappaleen mekaaniset ominaisuudet säilyvät. (SFS-EN ISO 17296-2:2016.)



Kuva 7. Directed energy deposition (SFS-EN ISO 17296-2:2016).

3 Robotisoidun DED-Arcin työvaiheet

WAAM (Wire arc additive manufacturing) on lisäainevalmistus menetelmä, jossa kappale rakennetaan kerroksittain hitsaamalla. Kaarihitsauksella syötetään lisäainetta, jonka takia se luokitellaan suorakerrostusmenetelmään. DED menetelmät muodostavat yleisnimikkeen, joissa lisämateriaalia syötetään kohdennetun energialähteen avulla suoraan valmistettavan kappaleen pintaan joko lankana tai jauheena. (Twi-global, 2025b; ISO/ASTM 52900:2021.)

DED menetelmien alaryhmään kuuluva DED-Arc, joka viittaa niihin DED toteutuksiin, joissa energialähteenä käytetään hitsauskaarta. (Twi-global, 2025b.)

3.1 3D Mallinnus

DED-Arc prosessi käynnistyy suunnittelulla ja mallinnuksella. Digitaalinen 3D-malli luodaan CAD- tai muilla mallinnusohjelmilla. Tässä vaiheessa määritellään kappaleen mitat, geometria ja valmistustapa. Mallin analysointi voidaan suorittaa simulointi ohjelmilla, jotka ennustavat rakenteelliset ja lämpötekniset ominaisuudet sekä optimoi tulostusprosessin. (Twi-global, 2025a.)

3.2 Työstöratojen integrointi

DED-Arc tunnetaan yleisesti metallin 3D tulostuksena, jossa kappale rakentuu kerros kerrokselta. Yksi merkittävimmistä haasteista on hidas valmistusaika verrattuna muihin 3D-tulostusmenetelmiin, jota pyritään parantamaan työstöratojen optimoinnilla. Tutkimuksissa on hyödynnetty useita eri lähestymistapoja, kuten TSP (travelling salesman problem) pohjaisia optimointeja, tekoälymenetelmiä ja graafiteoriaan perustuvia malleja, joiden avulla on pyritty lyhentämään turhia liikkeitä ja parantamaan laadukasta materiaalin levitystä. (Liu et al., 2020.)

Perinteisesti AM-prosesseissa käytetään tasavälein tehtyjä viipalointeja, mutta se aiheuttaa pitkiä valmistusaikoja ja turhaa liikettä. Viipalointiohjelmat eivät huomioi metallin lämpötila tai jähmettymisdynamiikkaa eikä myöskään hitsausprosessin parametrejä. Tästä syystä DED-Arc menetelmässä pyritään käyttämään CAM ohjelmistoja kuten Siemens NX Additive, Autodesk Powermill tai Robotstudio +

Arcweld, jotka mahdollistavat mukautetut kerrostus-stragediat, lämpöhallintaan perustuvat tauot ja siirtymät sekä integroinnin hitsausparametrien ja robotiikan kanssa.(EWI, 2025.)

3.3 Postprosessori

Postprosessorin tehtävänä on ottaa CAM-ohjelmistossa suunniteltu liikerata ja kääntää se konekohtaiseksi ohjauskoodiksi. Tämä ohjauskoodi voi olla esimerkiksi G-koodia tai muuta koneen ohjaukseen soveltuvaa formaattia. Koska eri valmistuslaitteet käyttävät erilaisia ohjausjärjestelmiä, tarvitaan jokaiselle laitteelle tai laitesarjalle oma postprosessorinsa. Ilman tätä vaihetta ohjelmistossa luotua työkalurataa ei voida suoraan käyttää valmistuksessa. Postprosessorin avulla varmistetaan, että esimerkiksi kerrospaksuudet, liikenopeudet, lämpötila-asetukset sekä suunniteltu tulostusjärjestys välittyvät oikein laitteelle, joka suorittaa valmistuksen. Toimivan valmistusprosessin kannalta on siis välttämätöntä, että ohjelmisto on yhteensopiva käytettävän laitteen kanssa.(Autodesk, 2025.)

3.4 Hitsaus

Kun malli on valmis, alkaa varsinainen valmistusprosessi. Hitsausrobotti aloittaa sille luodulla suunnitelmalla hitsaamaan kappaletta. Valokaaren lämpötila saadaan optimoitua niin, että sulametalli jähmettyy nopeasti muodostaen kiinteän rakenteen. Tämä vaihe toistuu kerroksittain ohjelman mukaan.(Reimann et al., 2021.)Tyypillinen kerrospaksuus on 0,25–0,5 mm. Koneen liikettä ja kerrostuksen tarkkuutta hallitaan tietokoneavusteisesti, jotta on mahdollista varmistaa tarkkuus sekä pinnan laatu. (Twi-global, 2025a.)

Jotta valmistettava kappale säilyttää korkealaatuiset ominaisuudet on hitsauksen aikainen kaasusuojaus ja laadunhallinta oltava kunnossa. Prosessissa käytetään inerttejä suojaakaasuja, kuten argonia estämään hapettuminen ja parantamaan metallurgista laatua. Jatkuva prosessin lämpötilan ja jähmettymisnopeuden seuranta auttaa estämään mahdolliset epämuodostumat sekä sisäiset jännitykset. (Reimann et al., 2021; Twi-global, 2025a.)



Kuva 8. DED-Arc (Twi-global, 2025b).

3.5 Jälkikäsittely

Valmistuksen jälkeen komponentti voidaan koneistaa, hioa tai lämpökäsitellä halutun pinnanlaadun ja mekaanisten ominaisuuksien saavuttamiseksi. Jos kyseessä on olemassa olevan osan korjaus, viimeistelyllä varmistetaan saumaton liitos vanhan ja uuden materiaalin välille. (Reimann et al., 2021; Twi-global, 2025a.)

4 Käyttökohteet ja menetelmän keskeiset hyödyt

4.1 Käyttökohteita

DED-Arc menetelmää käytetään uusien osien valmistukseen ja kuluneiden osien korjaukseen. Menetelmä soveltuu erityisesti suurikokoisiin ja vaikeasti valmistettaviin metalliosiin. Korkea syöttönopeus, hyvä lämmöntuontikyky sekä joustavuus materiaalivalinnoissa tekevät siitä erityisen soveltuvan valmistettujen kappaleiden tuotantoon. Moniakselisuus ja taittopöydät mahdollistavat monimutkaisten kappaleiden valmistuksen hyvin pienellä materiaalihukalla. (Twi-global, 2025a.)

DED-Arc mahdollistaa nopean prototyypin valmistuksen, metallikomponenttien tuotannon ja älykkäiden rakenteiden luomisen. Korkeaseosteisia teräksiä, kuten AISI M2 ja M4, on tutkittu kovapinnoitemateriaaleina niiden erinomaisen kovuuden ja kulumiskestävyyden vuoksi, ja AISI M2:n on havaittu parantavan kovuutta jopa 30–50 % perinteiseen työkaluteräkseseen verrattuna. (Shim et al., 2017.)

Haastattelin Uudenkaupungin Teräsrakenteen toista omistajaa, Ville Karhulaa, lisäävän valmistuksen mahdollisista käyttökohteista heidän yrityksessään. Karhulan mukaan teknologian sovellusmahdollisuudet ovat moninaiset. Yksi keskeinen käyttökohde voisi olla erilaisten akseleiden ja holkkien korjaus, sillä niitä joudutaan vaihtamaan usein esimerkiksi vääntymisen vuoksi. Vaikka koneistus olisi edelleen välttämätöntä, lisäävän valmistuksen avulla voitaisiin välttää kokonaan uuden akselin hankinta. Lisäksi hän mainitsi kaivinkoneiden puomiston sylintereiden holkkien vaihdoissa, että sylinterien kiinnityskorvat kuluvat käytössä. Korvakkeista voisi myös samalla menetelmällä saada aikaan lähes alkuperäistä vastaavan. Mahdollisina käyttökohteina nähtiin myös erilaiset purkuosat, joita joudutaan välillä irrottamaan ja työstämään. Näissä tilanteissa osat leikataan usein plasmaleikkauksella, jossa tarkkuus on hyvä. Kuitenkin monessa tapauksessa tarvitaan myös täyttöä tai pinnan korjausta ennen jatkokäsittelyä. Tällaiset ratkaisut voisivat tuoda kustannussäästöjä, mutta alkuinvestointi on kohtuullisen suuri. (Karhula V. haastattelu 27.3.2025)

4.2 DED-Arc maataloudessa

DED-Arc tarjoaa kiinnostavia mahdollisuuksia myös maataloudessa erityisesti monien eri kulumien varaosien kunnossapidossa tai uudelleen valmistuksessa. Robottilaitteisto mahdollistaisi kulumien osien valmistuksen/korjauksen suoraan tilalla. Tämän ansiosta esimerkiksi aurojen, äkeiden ja kultivaattorin uusia kulutuskärkiä ei tarvitsisi hankkia valmiina tuotteina, vaan sesongin ulkopuolella voitaisiin suorittaa tarvittava hitsaaminen eli 3D tulostus paikan päällä. Tämä mahdollistaisi myös mahdollisten osien mukauttamisen tarkasti omiin käyttöolosuhteisiin sopiviksi.

Yksi selkeä hyöty DED-Arc menetelmässä on se, että kulunut osa voidaan paikallisesti korjata ilman tarvetta purkaa kokorakenne tai valmistaa täysin uutta osaa.

Yksi merkittävä haittapuoli DED-Arc teknologian käyttöönotossa maataloilla on laitteiston korkea hankintahinta. Robottijärjestelmä, hitsausvirtalähde, ohjausyksiköt sekä mahdolliset skannaus ja ohjelmistotyökalut muodostavat kokonaisuuden, jonka investointikustannukset voivat nousta todella suuriksi. Tämä on este monille yksittäisille viljelijöille, mutta yhteiskäyttöratkaisuja, ulkopuolista rahoitusta tai yhteistyö esimerkiksi oppilaitosten kanssa voisivat vähentää kustannuksia huomattavasti. Lisäksi laitteistojen ylläpito ja operointi vaativat osaamista, mikä lisää käyttökustannuksia edelleen.

Analyysini perusteella voidaan todeta, että menetelmä on lupaava teknologia, mutta sen hyödyntäminen maataloilla on vielä todella rajallista käytännön tasolla. Prosessi vaatii suuria investointeja, opettelua ja oikeanlaista ympäristöä.

5 DED-Arc ohjelmistotyökalut

5.1 AM plugin

AM-plugin on kehitetty tukemaan lisäävän valmistuksen prosessien integrointia simulointiympäristöön, ja se soveltuu erinomaisesti myös DED-Arcin menetelmän mallintamiseen. Sen avulla voidaan tehokkaasti analysoida lämmön ja materiaalin kertymistä sekä prosessin aikaisia jännityksiä ja muodon muutoksia. (Edison A & Andres, 2021.)

5.2 RoboDK

RoboDK on ohjelmisto, joka mahdollistaa teollisuusrobottien hyödyntämisen 3D-tulostuksessa. Ohjelma tukee sekä 3–6 akselisia robotteja ja mahdollistaa työkaluratojen luomisen, simuloinnin sekä G-koodin muuntamisen robottikielelle. Jälkiprosessorin avulla ohjelma laskee materiaalinsyötön jokaiselle liikkeelle ja yhdistää sen robottiohjelmaan. Tämä on välttämätöntä, sillä pelkkä viipalointiohjelman luoma g-koodi ei sisällä riittävästi tietoa esimerkiksi työkalun suunnasta tai nivelkulmista. (RoboDK, 2025.)

Ohjelma sisältää 3D Print Project-työkalun, jolla käyttäjä voi valita mallin, määrittää parametrit ja luoda työstöradat. Ohjelma hallitsee suulakepuristimen syöttöä synkronoituna robotin liikkeeseen ja tarjoaa simulointityökaluja prosessin tarkasteluun. Postprosessorin mukauttamisen avulla voidaan optimoida tulostusprosessia, ottaa huomioon liikerajoitukset ja varmistaa laadukas ja tehokas 3D tulostus. (RoboDK, 2025.)

5.3 Autodesk

Autodesk tarjoaa kattavan Design and make – alustan, joka kokoaa yhteen suunnittelijat, insinöörit, arkkitehdit ja valmistajat, mahdollistaen saumattoman yhteistyön hankkeiden kaikissa vaiheissa. Alan johtavana ohjelmistovalmistajana Autodesk tukee arkkitehtuuria, rakentamista, insinööritaitoa, tuotantoa ja 3D-tuotantoa, tarjoten työkaluja niin suurten kuin pientenkin innovaatioiden toteuttamiseen. Olipa

kyseessä monimutkainen infrastruktuurihanke tai luova 3D mallinnusprojekti. Autodeskin teknologia antaa asiantuntijoille mahdollisuuden kehittää, testata ja toteuttaa visionsa tehokkaasti.(Autodesk, 2024b.)

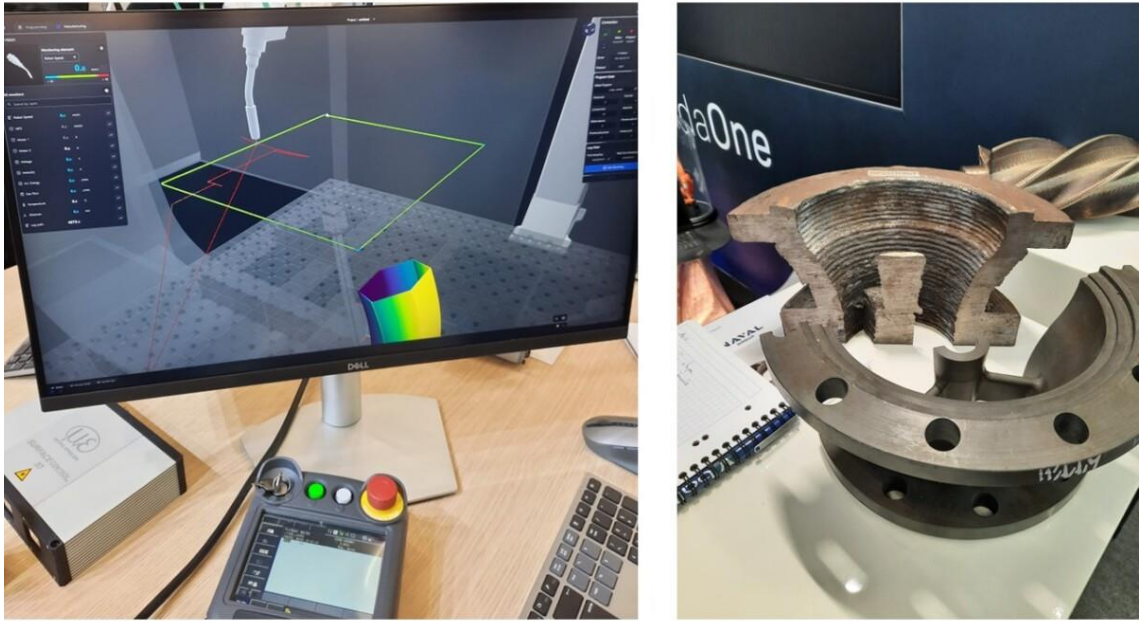
5.4 Siemens NX

Siemens tukee valmistajia ja koneenrakentajia lisäävän valmistuksen kaikissa vaiheissa tarjoamalla yhtenäisen digitaalisen työkulun aina CAD suunnittelusta aina robottiohjaukseen asti. Siemens NX helpottaa suunnittelua luonnostelutyökaluillaan ja mahdollistaa optimoidun mallin siirtymisen suoraan valmistusvaiheeseen, mikä yksinkertaistaa työkalupolkujen luomista. Moniakselinen CAM simulaatio auttaa tunnistamaan mahdolliset törmäykset ja optimoi prosessia jo ennen valmistusta.(Tobias Kamps, 2021.)

Siemens NX AM Multi-Axis on suunniteltu erityisesti vaativaan moniakseliseen lisäävään valmistukseen. Se mahdollistaa monimutkaisten kolmiulotteisten työkaluratojen suunnitteluun, simulointiin ja optimointiin DED-Arc prosessiin. Ohjelmisto tukee useita liikeratatyyppejä, ja sen avulla voidaan suunnitella sekä tulostus että jälkikoneistus saman alustan sisällä. NX sisältää kattavat CAD työkalut osien valmisteluun, kuten kiinnitysten suunnitteluun ja ominaisuuksien jakamiseen eri tulostusvaiheisiin. Lisäksi se tukee tarkkaa simulointia, törmäysten ennakoitua ja materiaalin kertymän analysointia. Yhteistyössä SRM/DC järjestelmän kanssa robottia voidaan ohjata suoraan CNC tarkkuudella ilman erillistä robottiohjelmointia, mikä nopeuttaa käyttöönottoa ja parantaa lopputuotteen tarkkuutta.(Siemens, 2025.)

5.5 ADAXIS

Adaxis on robottitulostuksen ohjelmistoja kehittävä yritys, joka esitteli AdaOne ohjelmistonsa (Kuva 9. Adaxis AdaOne ohjelmisto ja demo osa(Tuunainen Aku, 2024).Kuva 9), joka soveltuu moniin robottitulostusprosesseihin, kuten DED-Arc:iin, polymeeritulostukseen ja betonitulostukseen. AdaOne tukee viittä yleisintä robottimerkkiä ja on muokattavissa myös portaalitulostimille. Ohjelmistoa myydään myös white label- periaatteella, jolloin tulostusratkaisujen tarjoajat voivat integroida sen omaan brändiinsä.(ADAXIS, 2025.)



Kuva 9. Adaxis AdaOne ohjelmisto ja demo osa(Tuunainen Aku, 2024).

AdaOne ei rajoitu pelkkään tulostusohjelmointiin, vaan sisältää myös työkaluja ainetta poistavaan työstöön, kuten robottijyrsintään. Tämä on erityisen hyödyllistä suurikokoisissa muovitulosteissa, joissa pinnan viimeistely on tarpeen. Yhdistämällä tulostus- ja jyrsintäominaisuudet samaan ohjelmistoon voidaan vähentää tarvetta käyttää useita ohjelmia.(ADAXIS, 2025.)

Adaxis on laajentanut ohjelmistoaan kohti tulostuksen- ja laadunhallintaratkaisuja, jolloin viipalointi ei ole vain staattinen robottiohjelma, vaan dynaaminen prosessi. Lisäksi ohjelmisto tukee skannausvaiheita, mikä mahdollistaa tulostuksen jälkeisen laadun valvonnan ja muodonmuutosten mittauksen. AdaOne pyrkii yhdistämään robottitulostuksen ja jälkikäsittelyn yhteen järjestelmään, joka helpottaa työnkulkua ja parantaa prosessin tehokkuutta.(ADAXIS, 2025.)

5.6 Caracol

Caracol on tunnettu muovitulostuksen osaaja, joka on laajentamassa metallin lisäävään valmistukseen. Yritys kehittää omia viipalointi- ja tuotantohallintaohjelmistoja erityisesti WAAM tekniikkaan. Yrityksen ratkaisuihin käytetään lisäaineellista plasmaa tai mig/mag hitsausta. Yritys on myös luonut futuristisen anturointijärjestelmän tulostustyökalun ympärille prosessin hallintaan. Anturointi on tärkeää monimutkaisissa

geometrinen kappaleiden tulostuksissa, mutta työkalun suuri koko voi rajoittaa käyttöä isommissa kappaleissa (Kuva 10).(Caracol, 2025.)



Kuva 10. Caracol tuotannonhallinta sekä demoja(Tuunainen Aku, 2024).

5.7 WAAM3D

WAAM3D on yritys, joka alun perin rekisteröi WAAM termin tavaramerkiksi. Yritys tarjoaa kokonaisratkaisuja, jotka hyödyntävät pääasiassa mig/mag prosessia sekä lisäaineelliseen plasmahitsaukseen perustuvia menetelmiä. Uutuutena yritys esitteli CWGMA prosessin, jossa CMT mig/mag tekniikkaan yhdistetään kylmää lisäainetta (Kuva 11). Prosessin teoreettinen lisäainetuottokyky voi olla jopa 15 kg/h, mutta käytännössä geometria ja lämpötilan hallinta rajoittavat tuotantotehoa.(Tuunainen Aku, 2024.)



Kuva 11. WAAM3D Kylmälanka prosessilla tulostettuna(Tuunainen Aku, 2024).

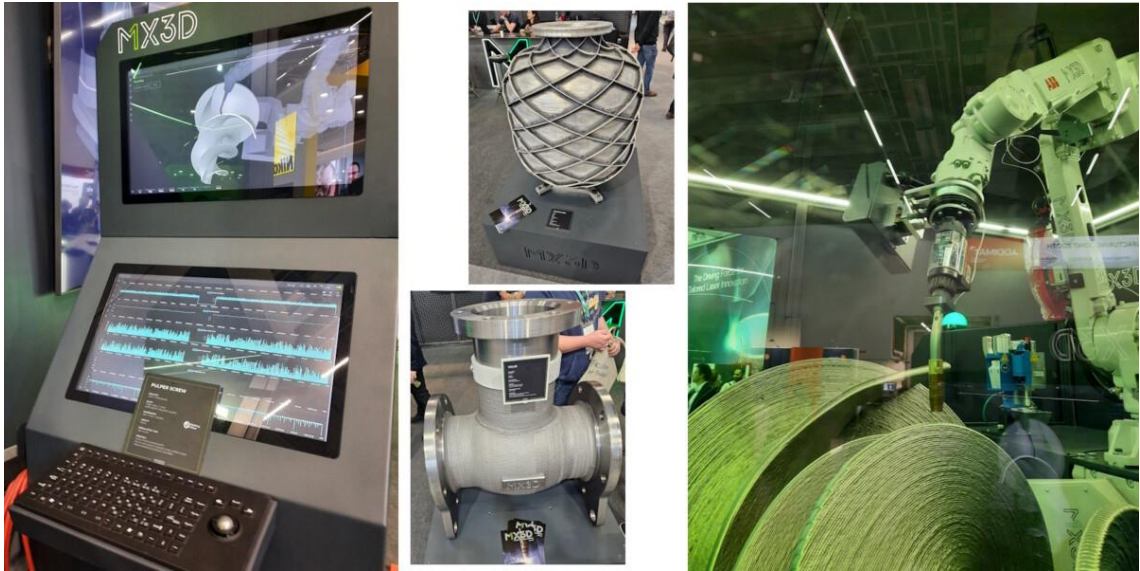
Yrityksen ratkaisuihin käytetään lisälaitteita, kuten suojakaasutusta ja profilometriä, joiden avulla varmistetaan hitsin tarkka sijoittuminen ja muoto. Lisäksi reaaliaikaista seuranta varten on saatavilla hitsauskamera. Vaikka nämä lisälaitteet parantavat laadunhallintaa, ne myös vähentävät hitsauspolttimen ulottuvuutta.(WAAM3D, 2025.)

Yritys tarjoaa erilaisia tuotantosoluja. Suuremmat tuotantosolut perustuvat teollisuusrobotikkaan ja voivat käsitellä jopa 2x2x2 metrin tulostusalueita.((WAAM3D, 2025.)

Aikaisemmin yritys käytti Rhinoceros+Grasshopper alustaan perustuvaa ohjelmistoa, mutta nyt kehitteillä on uusi, täysin itsenäinen viipalointiohjelmisto, joka julkaistaan vuoden 2025 alussa.(WAAM3D, 2025.)

5.8 MX3D

MX3D on yksi johtavista WAAM ratkaisuja tarjoavista yrityksistä. Yritys esitteli robottijärjestelmänsä ja demokappaleita (Kuva 12), jotka havainnollistavat heidän laajaa osaamistaan lisäävässä valmistuksessa. Yritys tarjoaa oman viipalointi ohjelmiston, robottijärjestelmät sekä tuotannon ja laadun hallintajärjestelmän.(MX3D, 2025.)



Kuva 12. hallintajärjestelmä, demo-osia ja robottijärjestelmä(Tuunainen Aku, 2024).

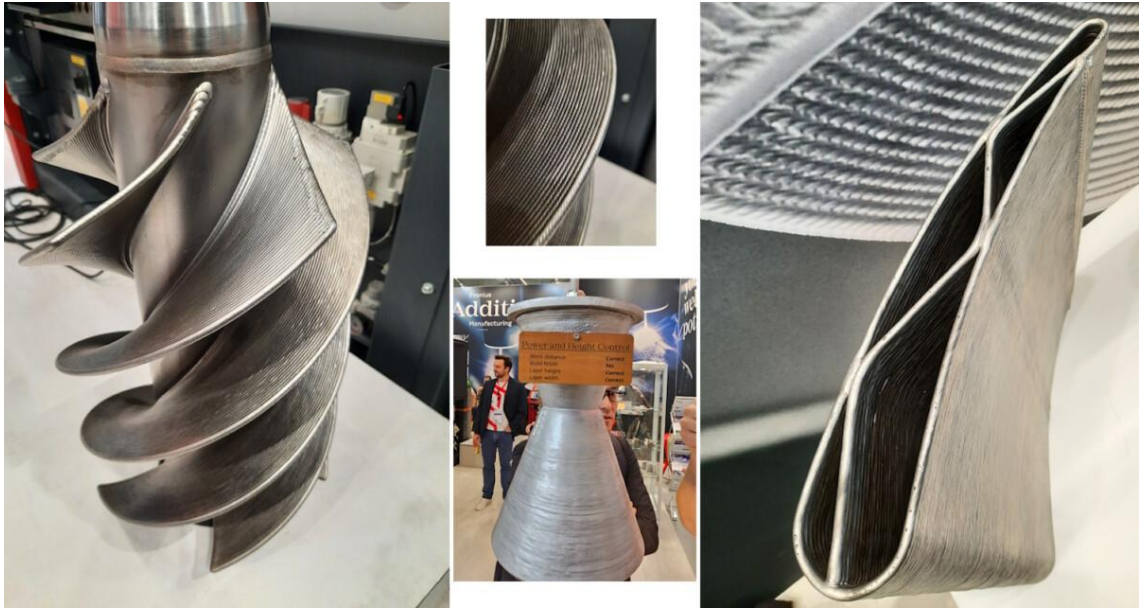
Tulostusprosessin hallinta perustuu erilaisten sensoreiden käyttöön. Hitsauspolttimen lähelle asennettu pyrometri mittaa välipalkolämpötiloja ja 3D-kamera seuraa muodonmuutoksia hitsausten välillä. Kamera sijaitsee robotin työkalun vieressä suojakotelossa, ja mittaukset tapahtuvat silloin, kun hitsausta ei tehdä. Lisäksi hitsausprosessin dataa kerätään säännöllisesti, ja nämä tiedot visualisoidaan tuotantohallintajärjestelmässä 3D-näkymään.(MX3D, 2025.)

MX3D hyödyntää usein mig/mag-prosesseja ja käyttää froniuksen virtalähteitä, mutta seuraa aktiivisesti myös muita valmistajia. Yrityksen lähestymistapana on hyödyntää tehokkaita ja testattuja parametreja, jotka varmistavat palkojen hyvän limittymisen. Tarvittaessa lämpötilan nousua hallitaan jäähdytysratkaisuilla. Näin saavutetaan laadukas tulostusjälki ja prosessin tasaisuus.(MX3D, 2025.)

5.9 Fronius

Fronius on tuonut markkinoille uuden c, joka on suunniteltu erityisesti WAAM prosessiin. Aiemmin käytetty Froniuksen TPSi CMT (Cold Metal Transfer) -virtalähde on ollut suosittu kyseisessä prosessissa, sillä sen synergiaikäyrät on optimoitu lisäävään tulostukseen. Vuonna 2024 lanseerattu iWave-virtalähde tarjoaa merkittäviä parannuksia. Yksi tärkeimmistä uudistuksista on lämmöntuonnin pienentyminen

vaihtovirtayksikön ansiosta. Tämä vähentää tulostusvirheitä ja parantaa hitsausjälkeä (Kuva 13).(Fronius, 2025b.)



Kuva 13, Froniuksen demo osat(Tuunainen Aku, 2024).

Uusi iWave mahdollistaa myös langansyöttönopeuden vakioinnin ja suutinetäisyyden mittauksen tietyillä lisäaineilla. Tämä parantaa kerroskorkeuden hallintaa ja varmistaa tasaisemman pinnan. Tehon ja langansyötön eriytetty säätö mahdollistaa sen, että kylmälle pinnalle voidaan käyttää enemmän tehoa ja kuumalle pinnalle matalampaa tehoa. Näin hitsauksen aloituskohdista tulee tarkempia ja muoto säilyy tasaisena.(Fronius, 2025b.)

Jos robottijärjestelmässä on jo käytössä froniuksen TPSi CMT-laitteisto, sen päivittäminen iWave additive pro-tekniikkaan onnistuu vaihtamalla vain virtalähde ja interface-ohjausyksikkö. Tämä tekee siirtymisestä uuteen tekniikkaan joustavaa ja taloudellista. Additive pro hitsausvarustus maksaa noin 50–60 tuhatta euroa. Kustannuksiin kuitenkin saattaa sisältyä lisäosia ja integrointeja, joiden tarkka sisältö ei ole täysin selvillä. Fronius tunnetaan perinteisesti hitsausvirtalähteiden valmistajana, mutta yhtiön projektiosasto kehittää nyt aktiivisesti ratkaisuja lisäävän valmistuksen tarpeisiin. Koska WAAM tekniikka kehittyi nopeasti, Froniuksen rooli robottijärjestelmien integraattorina saattaa kasvaa tulevaisuudessa.(Fronius, 2025b.)

6 Robotti- integraatio ja laitteisto

6.1 Robottivalmistajia

Turun ammattikorkeakoululla on kolmea eri lisäävään valmistukseen soveltuvaa robottia. Robottien merkit ovat Motoman, Universal Robots sekä ABB. Näitä robotteja hyödynnetään opetuksessa ja tutkimuksessa. Hyvin yleisiä robottivalmistajia ovat myös Kuka robotit ja Fanuc robots.(Turku AMK, 2024.)

Laitteistointegraatio tarkoittaa eri järjestelmien, ohjelmistojen tai laitteiden yhteensovittamista niin, että ne voivat toimia yhdessä saumattomasti. Tavoitteena on esimerkiksi automatisoida tiedonsiirto laitteiden välillä, tuotantoprosessin ohjaus tai datan yhdistäminen eri lähteistä. Integraation avulla voidaan vähentää manuaalista työtä, parantaa tiedon laatua ja tehostaa liiketoimintaprosesseja. (Hurja, 2024.)

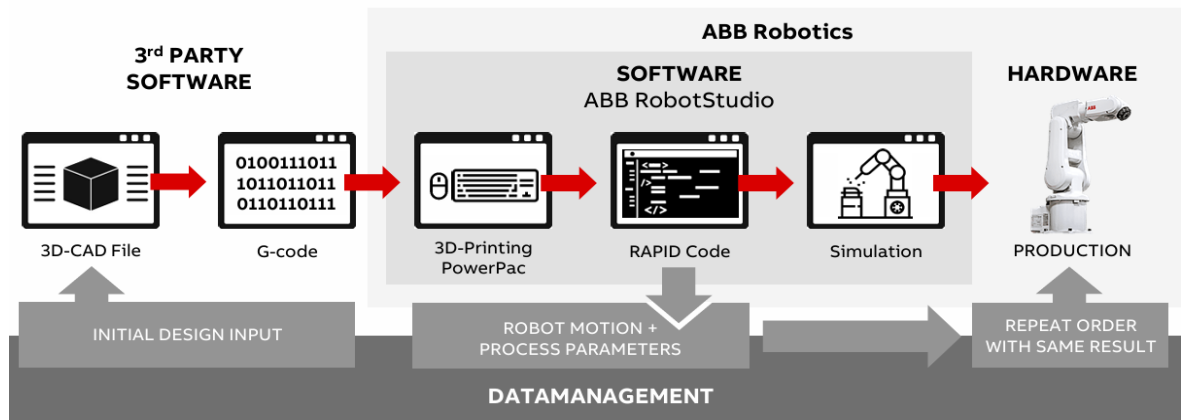
6.1.1 Yaskawa Motoman

Motoman robotit tarjoavat laajan alustan DED-Arc käyttöön, niiden vakauden, liikeratojen tarkkuuden ja hitsaukseen suunnitellun suorituskyvyn ansiosta. Ne soveltuvat hyvin eri hitsauslaitteiden kanssa käytettäviksi. Motomanin robottimallit tukevat useita ulkoisia akseleita, kuten pyörityspöytiä, lineaariliikkeitä ja kääntöpöytiä, joiden avulla työaluetta voidaan laajentaa huomattavasti ja mukauttaa suurten tai monimutkaisten kappaleiden valmistukseen.(Yaskawa, 2025.)

Robottien vakaa liike mahdollistaa kerrosten tasalaatuisen ja tarkan rakentamisen, mikä on kriittistä DED-Arc prosessin onnistumiselle. Motoman robotit ovat yhteensopivia yleisten CAD/CAM ohjelmistojen kanssa, sekä monien muiden digitaalityökalujen kanssa. Lisäksi avoimet ohjelmointirajapinnat ja kehittyneet liitännät mahdollistavat sensorien hyödyntämisen esimerkiksi kerrospaksuuden, lämpötilan tai materiaalinvalvonnan valvonnassa. Näiden ominaisuuksien ansiosta Motoman tarjoaa joustavan ja tehokkaan ratkaisun DED-Arc teknologian toteutukseen eri mittakaavan valmistusympäristöissä.(Yaskawa, 2025.)

6.1.2 ABB

ABB on päivittänyt Robotstudio simulointi ja offline ohjelmointiohjelmistoaan uudella 3D printing PowerPac laajennuksella, joka mahdollistaa siirtymisen CAD suunnittelusta valmiiseen mallinnukseen vain 30 minuutissa. Ohjelmisto muuntaa suoraan tavallisilla viipalointiohjelmilla luodut g-koodit ABB:n robottien ymmärtämäksi koodiksi ja simulointiin. Tämä nopeuttaa huomattavasti tulostusprosessia, sillä perinteisesti 3D tulostuksen polkujen ohjelmointi vaatii miljoonien pisteiden ja liikeratojen määrittelyä. Kuvassa (Kuva 14) Kuva 14 on esitelty ABB:n lisäävän valmistuksen prosessin kulku. (ABB, 2020.)



Kuva 14. ABB lisäävän valmistuksen prosessi(ABB, 2020).

PowerPac tukee useita ainetta lisäävän valmistuksen menetelmiä, kuten hitsausta, raemateriaaleilla tai betonilla tulostamista. Ratkaisu sopii erityisesti pieniin sarjoihin ja monipuoliseen tuotantoon. Sen avulla voidaan valmistaa prototyyppisiä ja muotoja, joita ei olisi mahdollista toteuttaa perinteisin menetelmin. (ABB, 2020.)

6.2 Hitsausvirtalähteet

Fronius, Kemppi ja ESAB ovat keskeisiä toimijoita hitsausvirtalähteiden valmistajina. Valmistajilla on erilaisia ratkaisuja, jotka soveltuvat DED-Arc menetelmään.

Fronius on kehittänyt CMT (Cold metal transfer) -prosessin, joka on erityisen sopiva DED-Arc sovelluksiin. Prosessissa lämmöntuonti on huomattavasti pienempi verrattuna perinteisiin kaarihitsausmenetelmiin. CMT prosessin hyödyt ovat DED-Arc

menetelmässä merkittäviä, sillä lisäainevalmistuksessa hallittu lämmöntuonti ja kerrospaksuuden tarkka ohjaus ovat keskeisiä tekijöitä tuotteen laadun kannalta. Pienempi lämmöntuonti tarkoittaa, että kappaleeseen syntyy vähemmän lämpöjännityksiä ja muodonmuutoksia, mikä puolestaan vähentää jälkikäsittelyn tarvetta. Lisäksi CMT mahdollistaa ohuempien kerrosten kerrostamisen tarkemmin, mikä parantaa geometristä hallintaa ja pinnan laatua erityisesti ohutseinäisissä rakenteissa. (Fronius, 2025.)

Kemppi tarjoaa Max Cool hitsausprosessin, joka on suunniteltu vähentämään lämmöntuontia jopa 32 % verrattuna perinteisiin pulssi- tai lyhytkaariprosesseihin. Tämä prosessi parantaa hitsauksen hallintaa ja soveltuu erityisesti ohutlevyjen hitsaukseen sekä juuripalkojen hitsaukseen. Vaikka MAX Cool ei ole erityisesti suunniteltu DED-Arc prosesseihin, sen ominaisuudet, kuten alhainen lämmöntuonti ja hyvä hitsausaltaan hallinta voivat olla hyödyllisiä tietyissä kohteissa. (Kemppi, 2025.)

ESAB on ollut suuri toimija DED-Arc menetelmän kehittämisessä ja soveltamisessa erityisesti teollisiin suurkohteisiin, kuten laivanrakennukseen ja offshore tuulivoimaa. Yhtiö on lahjoittanut EWI:lle hitsausjärjestelmiä nopeuttamaan menetelmän kehitystä ja sovellutuksia. (ESAB, 2024.)

6.3 Laitteiden erilaisuus ja haasteellisuus

Laitteistointegraatio teollisuusympäristössä kohtaa monia haasteita, joista keskeisin on se, että eri valmistajien laitteet eivät ole yleensä suoraan yhteensopivia keskenään. Eri valmistajien koneet ja järjestelmät toimivat eri tavoilla ja hyödyntävät erilaisia viestintäprotokollia, mikä vaikeuttaa niiden yhdistämistä yhtenäiseksi tuotantojärjestelmäksi ilman erillisiä rajapintoja tai räätälöityä ohjelmointia. Tämä vaatii syvällistä teknistä osaamista, mukaan lukien ohjelmointia, järjestelmäsuunnittelua ja testausmenetelmiä. (JR Automation, 2025.)

6.4 Valmistusprosessin digitaaliset työkalut

Seuraavissa kappaleissa kerrotut työkalut muodostavat yhdessä tärkeän osan digitaalisesta valmistusprosessista, jossa 3D-malli muutetaan fyysiseksi kappaleeksi.

Kaikkien näiden työkalujen yhteinen nimittäjä on se, että ne kuuluvat tietokoneavusteiseen valmistukseen (CAM, Computer-Aided Manufacturing) ja toimivat osana automatisoitua tuotantoketjua. Yhdessä nämä neljä osatekijää muodostavat saumattoman tuotantoketjun, jossa digitaalinen suunnittelu muuntuu tuotteeksi automaation ja tietokoneohjauksen avulla. Tämä ei ainoastaan nopeuta tuotantoa vaan myös parantaa laatua, vähentää virheitä ja mahdollistaa erittäin monimutkaisten geometristen muotojen valmistuksen.(Alonen Antti, 2022; Kinza Yasar, 2023.)

6.4.1 G-koodi

G-koodi on tiedosto, joka sisältää tulostettavan kappaleen liikeradan ja siihen liittyvät käskyt koneen suoritettavaksi. Perinteiset 3D-tulostimet, kuten kuluttajakäyttöön tarkoitetut laitteet, voivat lukea viipalointiohjelmiston tuottaman G-koodin suoraan ja suorittaa tulostuksen ilman lisäkäsittelyä. Sen sijaan nivelrobottien käyttö tulostuksessa edellyttää monimutkaisempaa liikeradan ja nopeuden hallintaa.(Alonen Antti, 2022.)

Jotta robotti voisi suorittaa tulostuksen oikein, sillä on oltava jokaisella liikepisteelle vähintään seuraavat tiedot: pisteen tarkka sijainti koordinaatistossa, työkalun asento ja nivelten kulmat. Koska perinteinen G-koodi ei sisällä kaikkia robotin liikeradan määrittämiseen tarvittavia tietoja, se täytyy muuntaa robottiohjelmiston ymmärtämään muotoon. Tämä tapahtuu jälkiprosessorin avulla, joka sovittaa G-koodin sisällön vastaamaan robotin erityisvaatimuksia ja ohjauskieltä.(Alonen Antti, 2022; Ronan Ye, 2023.)

6.4.2 Tulostusratojen määrittäminen

Työkaluratojen suunnittelu perustuu karteesisen koordinaatistoon, joka tunnetaan myös suorakulmaisena koordinaatistona, perustuu kolmeen kohtisuoraan akseliin x, y, ja z. Tämä mahdollistaa materiaalin kerroksittain lisäämisen monimutkaisiin 3D muotoihin. Työkalun liikeradat suunnitellaan siten, että ne mahdollistavat materiaalin tasaisen kerrostamisen ja esteettömän liikkeen.(Reimann et al., 2021.)

6.4.3 CNC (Computer Numerical Control)

Tietokone ohjattu numerointi CNC on valmistusmenetelmä, jossa työkaluja ohjataan automaattisesti tietokoneohjelman avulla. CNC-järjestelmä mahdollistaa tarkkuuden ja toistettavuuden ilman manuaalista käyttöä. Sitä käytetään yleisesti metallin ja muovin työstössä sekä erilaisten leikkaus, ja koneistustyökalujen ohjauksessa sekä sitä voidaan soveltaa hitsaus- ja kokoonpanolaitteissa.(Kinza Yasar, 2023.)

Jokaiselle valmistettavalle kappaleelle laaditaan tietokoneohjelma, joka kirjoitetaan G-koodilla ja suoritetaan koneen ohjausyksikössä. G-koodi ohjaa työkalujen liikkeitä, kun taas M-koodi hallitsee ulkoisia liikkeitä. Prosessi alkaa CAD-mallinnuksella, joka muutetaan CNC- ohjelmaksi. Ennen tuotantoa tehdään testiajo, jotta varmistetaan oikeat asetukset ja ehkäistään törmäyksistä johtuvat vauriot.(Kinza Yasar, 2023.)

CNC mahdollistaa nopeamman ja tarkemman valmistuksen ilman laajaa manuaalista työtä. Sen hyötyjä ovat:

- Kustannussäästöt, tarkka valmistus vähentää materiaalihukkaa ja energiankulutusta.
- Jätteen vähentyminen, simuloinnit ja optimoinnit minimoivat materiaalihävikin.
- Turvallisuus, vähemmän ihmisen tarvetta koskea koneistettavaan kappaleeseen.
- Vähemmän virheitä, automaatio takaa tasalaatuiset ja virheettömät tuotteet.
- Nopeampi ohjelmointi, CAD ja CAM- ohjelmistojen integraatio nopeuttaa ohjelmointia.
- Parempi prosessin hallinta, CNC voidaan yhdistää tuotannonhallinta järjestelmiin, mikä parantaa suorituskykyä.(Kinza Yasar, 2023.)

CNC-tekniikkaa hyödynnetään monilla kriittisillä aloilla, joissa tarkkuus on ensiarvoisen tärkeää, kuten esimerkiksi ilmateollisuudessa, lääketieteessä, autoteollisuudessa, elektroniikassa, öljy- ja kaasuteollisuudessa ja merenkulussa. (Kinza Yasar, 2023.)

7 Käytännön kokeilut

Käytännön osion tavoitteena on perehtyä 3D-suunnitteluohjelmistojen tarjoamiin mahdollisuuksiin ainetta lisäävän valmistuksen näkökulmasta. Tämän työn keskiössä on DED-Arc, jonka soveltuvuutta ja käytännön toteutusta tarkastellaan erilaisten mahdollisten käyttöön saatavien ohjelmistojen avulla sekä koulun robotiikan avulla. Mahdollisten ohjelmistojen avulla pyritään selvittämään, minkälaisia vaatimuksia lisäävä valmistus edellyttää käytännössä. Ohjelmistojen avulla voidaan muodostaa kokonaiskuva teknisistä ratkaisuksista, joita prosessi vaatii, kuten robottien liikeradoista, työkalujen toimintasäteistä sekä materiaalisyötön hallinnasta. Ohjelmistot auttavat myös arvioimaan, miten lisäävä valmistus voidaan parhaiten toteuttaa nykyisellä laitteistolla.

Tarkoituksena olisi testata robottihitsaamista ja selvittää sen avulla menetelmän mahdolliset hyödyt sekä käytännön ominaisuuksia. Kokeilujen avulla pyrittiin havainnollistamaan, miten menetelmä toimii reaalisessa valmistusympäristössä ja millaisia etuja se tarjoaa.

7.1 Ohjelmistot

Ohjelmistot tarjoavat monia mahdollisuuksia lisäainevalmistuksessa, mutta samalla niiden jatkuva kehitys ja muutokset aiheuttavat haasteita. Ongelmana on, että ohjelmistot kehittyvät koko ajan, ja uudet versiot tuo uusia haasteita.

Erityisesti ohjelmistoissa on runsaasti työkaluja 3D tulostamiseen tarkoitetuille prosesseille. Sen sijaan DED-Arc menetelmälle ja robottihitsaukselle eri työkaluja on tarjolla huomattavasti vähemmän.

7.1.1 Autodesk Fusion

Autodesk on käyttöliittymältään erittäin selkeä ja helppokäyttöinen. Ohjeita ohjelmiston käyttöön on paljon, mutta ohjeet ovat nykyiseen versioon nähden vanhoja.

Ohjelmistolla voidaan luoda monipuolisia mallinnuksia, simulaatioita sekä muokata kappaleita mahdollisimman tuotantokelpoiseen muotoon.

Manufacturing osiossa voidaan toteuttaa tarkkoja kappaleen valmistussimulaatioita sekä luoda NC-koodit, jotka vastaavat valitun koneen ymmärtämää mallia.

Valmistusmenetelmiä ovat jyrsintä (milling), sorvaus (turning), lisäävä valmistus (additive), tarkastus (inspection) sekä valmistus (fabrication) (Kuva 15). Ohjelmiston omasta kirjastosta löytyy näihin valmistusmenetelmiin laaja valikoima eri koneita, työkaluja sekä tulostimia. Sen sijaan moniakselinen robotiikka valikoima on suppea.



Kuva 15. Valmistusmenetelmät

Ohjelmistoon on mahdollista hankkia useita lisäosia, jotka eivät olleet käytössäni 30 päivän testijakson aikana. Esimerkiksi Product Design & Manufacturing Collectionissa on monia parempia mahdollisuuksia lisäävän valmistuksen prosessiin. (Autodesk, 2024a.)

Koulukäyttöön Autodesk soveltuu hyvin selkeän käyttöliittymän ja monipuolisten mallinnusominaisuuksiensa ansiosta. Kuitenkin robottisolujen mahdolliset step-tiedostot rakenteista kuten työkalut, robottialusta ja hitsauspöydät, olisivat ehdottomia tarpeellisia mahdollisimman tarkkoja simulaatioita varten.

7.2 Robottihitsaus

Robottihitsauksen tarkoituksena olisi havainnollistaa, miten DED-Arc menetelmä voisi toimia käytännön korjaustilanteissa. Kokeilun kohteena on aurojen kulutuspalojen korjaushitsaus. Vaikka vastaava hitsaus olisi mahdollista suorittaa myös käsin, käsin hitsauksessa ei voida varmistaa suutinetäisyyden, kuljetusnopeuden tai kuljetusasennon tarkkuutta. Tämän vuoksi lopputulos ei välttämättä vastaisi robotilla hitsattavan kappaleen tasoa.

Robottihitsauksen tavoitteena oli määrittää hitsausradat mahdollisimman tarkasti. Hitsattavien kappaleiden erilaisuuden takia radan määrittäminen joudutaan suorittamaan jokaiselle kappaleelle erikseen. Kappale on tarkoitettu palauttaa alkuperäiseen muotoonsa ja saada optimaalinen hitsaus eri parametreja, kuten virtaa jännitettä ja langansyöttöä muokkaamalla. Kemppi WeldEye sovelluksen avulla hitsausparametrien

seuranta onnistuu, sillä sovellukseen tulee jokainen hitsi alusta loppuun. Arvojen tasaisuutta voidaan täten seurata ja niiden perusteella voidaan myös todeta, onko ratojen määritys onnistunut sekä mitkä parametrit mahdollistavat tässä tapauksessa parhaimman laadun. Kokeen suorittaminen kuitenkin jäi suorittamatta, sillä robotti ei ollut käyttökunnossa kokeen toteuttamiseksi.

7.2.1 Testikappaleet

Testikappaleiksi valikoitui maataloudessa käytettävien aurojen kulutusosat (Kuva 16), jotka tarjoavat hyvän esimerkin DED-Arc menetelmän soveltuvuuden arvioimiseksi. Aurat ovat työkoneita, jotka altistuvat jatkuvalla mekaaniselle kuormitukselle, hankauksille ja iskuille, minkä seurauksena niiden rakenneosat kuluvat tasaisesti. Erityisesti aurojen kärkipalat, vantaat sekä siivet ovat alttiita voimakkaalle kulumiselle, ja niiden käyttöikä rajoittaa kokolaitteen toimintaa sekä kasvattaa huolto- ja varaosakustannuksia. Kuvassa (Kuva 16) esitetty kulutuspalat, joita oli tarkoitus hitsata.

Aurojen rakenne ja käyttötarkoitus tekevät niistä erittäin sopivia kohteita tarkasteltaessa ainetta lisäävän valmistuksen mahdollisuuksia. DED-Arc menetelmä mahdollistaa metallin lisäämisen suoraan kuluneisiin kohtiin, jolloin osia ei välttämättä tarvitse korvata uusilla, vaan ne voidaan kunnostaa ja vahvistaa kohdennetusti. Tämä säästää materiaalia ja kustannuksia mahdollisesti tulevaisuudessa.

Käytännön DED-Arc testaus kärkipala-testikappaleelle jäi tekemättä, koska robotti oli epäkunnossa.



Kuva 16. Hitsaustesteissä käytetyt kärkipalat.

8 Yhteenveto

Tämä opinnäytetyön käsittelee ainetta lisäävän valmistuksen menetelmiä, mutta pääosassa on DED-Arc menetelmä. Menetelmässä yhdistyvät 3D tulostus ja robottihitsaus. Työn tavoitteena on kartoittaa menetelmän sovellukset ja niiden soveltaminen.

Työssä käytettiin menetelminä kirjallisuuskatsausta ja käytännön kokeilua. Kirjallisuuskatsauksen avulla kartoitettiin DED-Arc menetelmän sovelluskohteita sekä siinä käytettäviä ohjelmistoja, laitteistoa ja integraatoratkaisuja. Käytännön kokeilun tavoitteena oli selvittää menetelmän soveltuvuutta maatalouskäytössä olevien kulutusosien korjaukseen.

Työn teoriaosuudessa tarkasteltiin menetelmän toimintaperiaatteita, prosessiin liittyviä laitteisto- ja ohjelmistoratkaisuja sekä alan viimeisintä kehitystä. Lisäksi esiteltiin menetelmän haasteita, kuten ohjelmistotyökalujen rajallisuutta ja laitteistojen yhteensopivuutta eri valmistajien välillä. Tuloksena syntyi kokonaiskuva menetelmän mahdollisuuksista ja rajoitteista erityisesti suurikokoisten ja vaikeasti hitsattavien kappaleiden valmistuksessa ja korjauksessa. Käytännön kokeen tavoitteena oli arvioida menetelmän soveltuvuutta maatalouden kulutusosien kunnostukseen. Kokeen toteuttaminen kuitenkin estyi, sillä robotti ei ollut hitsauskunnossa.

Opinnäytetyö osoittaa, että DED-Arc on lupaava ja potentiaalinen teknologia teollisuuden ainetta lisäävään valmistukseen sekä kunnossapitotarpeisiin. Menetelmän avulla voidaan valmistaa ja korjata suuria, kulutusta kestäviä osia, mutta sen hyödyntäminen edellyttää tarkkaa prosessinhallintaa, riittävää osaamista sekä yhteensopivaa laitteisto- ja ohjelmistokokonaisuutta. Korkeat alkuinvestoinnit ja menetelmän tekninen vaatavuus voivat rajoittaa sen laajamittaista käyttöä esimerkiksi maatalouden kaltaisilla aloilla. Teknologian jatkuva kehitys luo kuitenkin edellytyksiä laajemmalle soveltamiselle tulevaisuudessa.

Lähteet

ABB. 2020. *RobotStudio 3D Printing PowerPac Additive Manufacturing of large scale objects 2020*.

ADAXIS. 2025. *Software for robotic hybrid manufacturing*. Viitattu 31.4.2025.

<https://adaxis.eu/>

Alonen Antti. 2022. *3D printing with robots*. Viitattu: 10.3.2025.

<https://www.savonia.fi/en/articles/3d-printing-with-robots/>

Autodesk. 2024a. *Autodesk Product Design & Manufacturing Collection* .

Autodesk. 2024b. *Suunnittele ja luo mitä vain Autodesk-ohjelmistoilla*. Viitattu:

19.3.2025. <https://www.autodesk.com/fi>

Autodesk. 2025. *CAM Post Processor Guide 4/2/25 Post Processor Training Guide For use with Fusion CAM, Inventor CAM, HSMWorks*.

Caracol. 2025. *Build beyond possible, with additive manufacturing*. Viitattu 31.3.2025.

<https://www.caracol-am.com/>

Edison A, B. and Andres, M. (2021). 'A Directed Energy Deposition Additive Manufacturing Process Simulated with ABAQUS AM Modeler', *International Journal of Robotic Engineering*, 6(1).

ESAB. 2024. *ESAB partners with EWI to develop innovative solutions for arc-DED additive manufacturing and SAW processes*. Viitattu: 13.4.2025.

https://esab.com/it/nam_en/about/news-folder/esab-partners-with-ewi-to-develop-innovative-solutions-for-saw-processes

EWI. 2025. *What Is Direct Energy Deposition?* Viitattu: 12.4.2025.

<https://ewi.org/capabilities/additive-manufacturing/what-is-direct-energy-deposition/>?

Fronius. 2025a. *Metal 3D printing with CMT Additive Pro*. Viitattu: 11.4.2025.

<https://www.fronius.com/en-us/usa/welding-technology/product-information/fronius-additive?>

Fronius. 2025b. *iWave for automated welding solutions*. Viitattu 1.4.2024.

<https://www.fronius.com/en/welding-technology/product-information/iwave-automated>

Hurja. 2024. *Ohjelmiston integraatio – miksi integroida ja kuinka onnistua?* Viitattu:

12.4.2025. <https://www.hurja.fi/blogi/ohjelmiston-integraatio-miksi-integroida-ja-kuinka-onnistua/>?

JR Automation. 2025. *Robotics Integration*. Viitattu: 13.4.2025.

<https://www.jrautomation.com/solutions/technology-integrations/robotics-integration>

Karhula, V. 2025. Haastattelu. Haastattelija: [Juuso Mettälampi], 27. maaliskuuta 2025.

Kemppi. 2025. *MAX Cool arc performance welding process*. Viitattu: 13.4.2025.

<https://www.kemppi.com/en/family/max-cool?>

- Kinza Yasar. 2023. *computer numerical control (CNC)*. Viitattu: 17.3.2025. <https://www.techtarget.com/searcherp/definition/computer-numerical-control-CNC>
- Liu, W. *et al.* (2020) 'Toolpath planning for additive manufacturing using sliced model decomposition and metaheuristic algorithms', *Advances in Engineering Software*, 149, p. 102906.
- MX3D. 2025. *Robotic 3D Metal printing*. Viitattu: 1.4.2024. https://mx3d.com/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwqv2_BhC0ARIsAFb5Ac89XYahmmWZbC0D9JlOWYByT15WZu2U3QDALWlOOPQFJquvAxHmrkIaAirWEALw_wcB
- Reimann, J. *et al.* (2021) 'Directed energy deposition-arc (Ded-arc) and numerical welding simulation as a hybrid data source for future machine learning applications', *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(15).
- RoboDK. 2025. *Robot 3D printing project*. Viitattu: 10.3.2025. <https://robodk.com/doc/en/Robot-Machining-Robot-3D-Printing-Project.html#Print3D>
- Rodrigues, T.A. *et al.* (2019) 'Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM)', *Materials*, 12(7).
- Ronan Ye. 2023. *What is G-code: Definition, Function, Types & Uses*. Viitattu: 10.3.2025. <https://www.3erp.com/blog/g-code/>
- SFS-EN ISO 17296-2:2016 (2016) *Additive manufacturing- - General principles - Part 2: Overview of process categories and feedstock*. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN ISO /ASTM 52900:2021. *Additive manufacturing. General principles. Fundamentals and vocabulary*. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry
- Shim, D.S., Baek, G.Y. and Lee, E.M. (2017) 'Effect of substrate preheating by induction heater on direct energy deposition of AISI M4 powder', *Materials Science and Engineering: A*, 682, pp. 550–562.
- Siemens. 2025. *NX AM Multi-Axis*. Viitattu: 9.4.2025. <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/products/nx-am-multi-axis>
- Tobias Kamps. 2021. *Siemens High-Tech Solutions for Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)*. Viitattu: 2.4.2025. <https://blog.siemens.com/2021/12/light-years-ahead-with-the-arc>
- Treutler, K. and Wesling, V. (2021) 'The current state of research of wire arc additive manufacturing (Waam): A review', *Applied Sciences (Switzerland)*. MDPI.
- Turku AMK. 2024. *Laser- ja hitsaustekniikan laboratorio*. Viitattu: 12.3. 2025. <https://www.turkuamk.fi/palvelu/laser-ja-hitsaustekniikan-laboratorio/>
- Tuunainen Aku. 2024. *Formnext 2024 tulostusmessut WAAM:n näkökulmasta*. Viitattu: 1.4. 2025. <https://www.savonia.fi/tki/formnext-2024-tulostusmessut-waam-nakokulmasta>
- Twi-global. 2025a. *What is Directed Energy Deposition (DED)?* Viitattu: 10.3.2025. https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/directed-energy-deposition?utm_source

Twi-global. 2025b. *Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)*. Viitattu: 7.4.2025. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/arc-based-additive-manufacturing-137>

WAAM3D. 2025. *Waam, But Faster*. Viitattu 31.4.2025. <https://www.waam3d.com/>

Yaskawa. 2025. *Motoman Robots for Additive Manufacturing*. Viitattu: 9.4.2025. https://www.yaskawa.fi/ratkaisut/sovellukset/sovellukset/additive-manufacturing_a10967