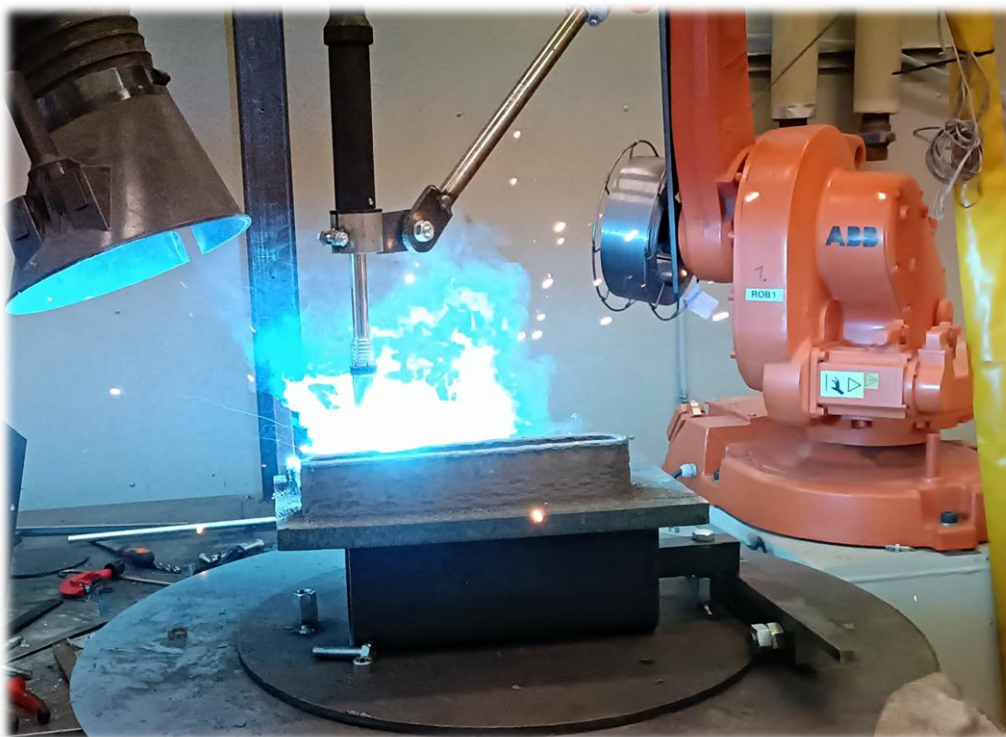


Robotti/CNC solun muuttaminen DED tulostussoluksi



IDIID - Implementation of DeD AM in future manufacturing - Suorakerrostuksen hyödyntäminen tulevaisuuden valmistuksessa ja 3D-tulostuksen yhteishanke 3DTY projektien tuottama opas

Tämä dokumentti on tuotettu projektien **Implementation of DeD AM in future manufacturing (IDiD)** ja **3D tulostuksen yhteishanke (3DTY)** yhteistyönä. Dokumentin pohjana on Mikko Hietalan (Oulun yliopisto, FMT-ryhmä) IDiD projektissa tuottama englanninkielinen versio, jota on suomen kielelle kääntämisen yhteydessä täydennetty eri henkilöiden toimesta. Dokumentin lopussa olevan simulointiosuuden on kirjoittanut Sami Westman (LUT yliopisto).

IDiD - Implementation of DeD AM in future manufacturing - Suorakerrostuksen hyödyntäminen tulevaisuuden valmistuksessa hankkeessa edistetään metallien suorakerrostus menetelmien käyttöönottoa yrityksissä jo olemassa olevia laitteistoja hyödyntämällä sekä luomaan perusta tulevalle rajat ylittävälle yhteistyölle metallin suorakerrostus tulostamisen alan toimijoiden kesken.

Menetelmänä metallin suorakerrostus tulostaminen avaa uusia mahdollisuuksia suurten ja vaativien kappaleiden valmistamiseen. Suorakerrostus 3D tulostusta on mahdollista toteuttaa moderneilla robottihitsaussoluilla ja CNC-mekanisoiduilla ratkaisulla, joita on käytössä teollisuudessa. Hankkeen tavoitteena onkin edistää alueen konepajateollisuuden uudistamista hyödyntämällä jo olemassa olevia laitteita metallien suorakerrostukseen. Hankkeessa tuotetaan tietoa suorakerrostuksen mahdollisuuksista ja laitteistoista, joilla suorakerrostus on mahdollista. Paikallisen teollisuuden lisäksi hankkeessa tehdään yhteistyössä kansainvälisten laitevalmistajien kanssa.



Projektin kesto: 01.01.2023 - 31.12.2025

Kokonaisbudjetti: 2 M€

Rahoittaja: Euroopan rakenne- ja investointirahastot – INTERREG-Aurora ohjelma, Lapin liitto

Toteuttajat: Oulun yliopisto – FMT ryhmä (koordinaattori), Luulajan teknillinen yliopisto (LTU), Norjan arktinen yliopisto (UiT) ja LUT yliopisto

Hankekoodi: NYPS 20358021

3D-tulostuksen yhteishanke 3DTY projektin tavoitteena on uudistaa teollisuutta yhdistämällä Suomessa toimivat suurten kappaleiden 3D-tulostuksen tekniikkaa kehittävät ja levittävät TKI-toimijat ja parantaa toiminnan paikallista ja valtakunnallista vaikuttavuutta tiiviillä kotimaisella yhteistyöllä ja parhaalla maailmalta saatavalla osaamisella. Hankkeessa on mukana sekä metallien tulostus että polymeeri-/komposiittimateriaalien tulostus.

Projektissa havainnollistetaan kattavasti suurten kappaleiden tulostustekniikoiden soveltuvuutta Suomalaisen teollisuuden tuotteiden valmistukseen sekä edistetään suurten kappaleiden 3D-tulostuksen tekniikan tietotaidon lisääntymistä ja leviämistä teollisuuteen. Pyrkimyksenä synnyttää osaamisen kehittämiseen ja innovointiin pohjautuvaa uutta liiketoimintaa ja tukea yrityslähtöistä toiminnan uudistumista.

3DTY projekti tukee suomalaisten yritysten, etenkin pk-yritysten, tuotteiden, materiaalien, palvelujen sekä tuotantomenetelmien kehittämistä, pilotointia ja kaupallistamista ja uusien teknologioiden käyttöönottoa ja hyödyntämistä varmentamalla suurten kappaleiden 3D tulostuksen teknologioiden hyödynnettävyyden ja osoittamalla millä tekniikoilla ja miten suuria kappaleita voi kustannustehokkaasti 3D tulostaa. Projektin lisäarvo pohjautuu toiminnan laaja-alaisuuteen ja vaikuttavuuteen tiivistyneen yhteistyön, tehokkaampien laiteresurssien hyödyntämisen, kattavan 3D-tulostusmateriaali- ja -rakennekirjon tutkimisen sekä korkealuokkaisen tietotaidon ja teollisuuden uudistumisen myötä.



Projektin kesto: 1.8.2023-31.12.2026

Kokonaisbudjetti: 3.2 M€

Rahoittaja: EU:n EAKR "Uudistuva ja osaava Suomi 2021-2027" ohjelma "Innovaatio- ja osaamisverkostot" teema. Etelä-Savon-ELY keskus

Toteuttajat: Oulun yliopisto – FMT ryhmä (koordinaattori), Lapin koulutuskeskus REDU, Savonia-ammattikorkeakoulu, Itä-Suomen yliopisto (UEF), LUT-yliopisto, Tampereen AMK ja DIMECC Oy:n FAMN ja FAME ekosysteemit.

Hankekoodit: A90782 (Oy), A90788 (REDU), A90786 (Savonia), A90787 (UEF), A90785 (LUT), A90784 (TAMK), A90783 (Dimecc)

Tiivistelmä

Directed Energy Deposition (DED) on ainetta lisäävän valmistuksen teknologia, joka on kasvattanut merkittävästi suosiotaan erityisesti suurien kappaleiden tulostuksessa. Olemassa olevan infrastruktuurin, kuten robottihitsaussolujen, CNC-hitsaussolujen tai CNC-leikkaussolujen, hyödyntäminen DED-sovelluksissa on kustannustehokas strategia konepajoille, jotka haluavat valmistaa osia metallin tulostusmenetelmillä. Olemassa olevien tuotantolaitteiden muutosprosessi edellyttää kuitenkin huolellista suunnittelua, arviointia, järjestelmäpäivityksiä sekä mahdollisia laitemuutoksia.

Muutosprosessin ensimmäinen vaihe on olemassa olevan laitteiston soveltuvuuden arviointi DED-valmistukseen. Robottihitsaussoluissa on yleensä jo useita DED-prosessin kannalta olennaisia peruskomponentteja, kuten teollisuusrobotti, hitsausvirtalähde ja liikkeenohjausjärjestelmä. Siirtyminen DED-käyttöön edellyttää kuitenkin usein lisäinvestointeja ja teknisiä muutoksia. Näitä ovat esimerkiksi tulostusratojen suunnitteluun soveltuvien ohjelmistojen hankinta, lisäaineensyöttöjärjestelmän integrointi sekä mahdolliset muutokset tuotantosolun rakenteeseen, suojaukseen ja prosessinhallintaan. CNC-pohjaisissa hitsaus- tai leikkaussoluissa muutos kohdistuu erityisesti DED-tulostuspään, polttimen tai laserjärjestelmän integrointiin sekä liikeratojen ja ohjauslogiikan mukauttamiseen lisäävän valmistuksen vaatimuksiin. Molemmissa tapauksissa ohjelmisto- ja automaatiopäivitykset ovat usein välttämättömiä, jotta tulostusparametreja voidaan hallita tarkasti, prosessia seurata reaaliaikaisesti ja saavuttaa hyvä laatu.

Onnistuneen käyttöönoton kannalta keskeisiä tekijöitä ovat materiaalien yhteensopivuus, lämmöntuonnin ja lämpömuodonmuutosten hallinta sekä työalueen ja prosessiympäristön tarkoituksenmukainen suunnittelu. Tulostusjärjestelmän on mahdollistettava materiaalin syöttö, energiantuonnin ja tulostusparametrien tarkka säätö. Tämä on tärkeää, jotta voidaan ehkäistä valmistusvirheitä, kuten huokoisuutta, epätäydellistä geometriaa, halkeamia ja muodonmuutoksia. Lämpötilanhallintaa voidaan parantaa esimerkiksi esilämmityksen, kerrosten välisen lämpötilan seurannan, hallitun jäähdytyksen ja lämpökäsittelyjen avulla. Lisäksi työalueen suunnittelussa on huomioitava turvallisuus ja käytettävyys: DED-prosessit perustuvat usein suuritehoiseen laseriin tai valokaareen, minkä vuoksi tarvitaan asianmukaiset suojaukset, savukaasujen ja metallihiukkasten tehokas poisto sekä turvalliset käyttö- ja huoltomenettelyt.

Muutosprosessiin kuuluu myös antureiden ja mittausjärjestelmien integrointi. Näiden avulla voidaan seurata ja säätää reaaliaikaisesti esimerkiksi tulostusnopeutta, energiantuontia ja langansyöttöä. Kehittyneet ohjelmisto- ja simulointityökalut tukevat liikeratojen suunnittelua, prosessin optimointia ja mahdollisten ongelmakohtien ennakkointia jo ennen osan tulostusta. Tämä parantaa mittatarkkuutta, vähentää materiaalihukkaa ja lyhentää käyttöönottoon liittyvää kehitysaikaa. Yhtä tärkeää on henkilöstön koulutus, joka kattaa sekä prosessitekniset että työturvallisuuteen liittyvät osa-alueet. Kun käyttäjät ymmärtävät DED-prosessin erityispiirteet, laitteiston toiminnan ja laadunvarmistuksen vaatimukset, järjestelmä voidaan ottaa käyttöön hallitusti ja tuotantokatkokset voidaan minimoida.

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	6
2	Robotti- ja CNC-solujen muuntaminen WAAM-sovelluksiin.....	6
2.1	Hitsausrobotisolun muuntaminen WAAM-sovelluksiin.....	6
2.1.1	Robottisolun ominaisuuksien arviointi ja muutoksen toteutettavuus.....	7
2.1.2	Hitsausvirtalähteen soveltuvuuden arviointi WAAM-prosessia varten.....	8
2.1.3	Hitsaussolun arviointi ja uudelleen suunnittelu.....	10
2.1.4	Ohjausjärjestelmän päivitykset.....	11
2.1.5	Ohjelmistopäivitykset ja -parannukset.....	12
2.1.6	Prosessin kehittäminen ja testaus.....	13
2.1.7	Koulutus ja turvallisuus.....	14
2.1.8	Jatkuva kunnossapito ja optimointi.....	15
2.2	CNC-hitsaussolun muuntaminen WAAM-sovelluksiin.....	16
2.2.1	Toteutettavuuden arviointi ja suunnittelu.....	16
2.2.2	CNC-solun layoutin muokkaaminen WAAM-vaatimusten mukaiseksi ja laitteiston päivittäminen 17	
2.2.3	Ohjausjärjestelmän päivitykset.....	19
2.2.4	CNC-ohjelmointi ja tulostusratojen luominen.....	20
2.2.5	Tulostusprosessin kehitys ja validointi.....	21
2.2.6	Turvallisuus näkökohdat ja käyttäjien koulutus.....	22
2.2.7	Kunnossapito ja jatkuva parantaminen.....	23
3	Olemassa olevien laserhitsaus- ja leikkaussolujen muuntaminen laser-DED-sovelluksia varten.....	24
3.1	Arviointi ja suunnittelu.....	24
3.2	Laitteiston päivitykset.....	25
3.3	Ohjelmisto- ja ohjausjärjestelmien integrointi.....	27
3.4	Koulutus ja turvallisuus.....	28
3.5	Testaaminen ja kalibrointi.....	29
3.6	Järjestelmä käyttöönotto.....	31
4	Kaupalliset DED systeemit.....	33
4.1	WAAM systeemit.....	33
4.1.1	WAAM3D.....	34
4.1.2	MX3D.....	35
4.1.3	Gefertec.....	36
4.1.4	MetalWorm.....	37
4.2	Laser DED-järjestelmät.....	37
4.2.1	Meltio.....	38
4.2.2	Laserline.....	38
4.2.3	Aconity3D.....	39
4.2.4	Additec3D.....	40
4.2.5	Optomec.....	40
4.2.6	Precitec.....	41

4.2.7	Trumpf.....	42
4.2.8	Innstek.....	42
4.3	WAAM -hitsausprosessit.....	43
4.3.1	Gas Metal Arc Welding (GMAW).....	43
4.3.2	Cold Metal Transfer (CMT).....	44
4.3.3	Muut hitsausprosessit	44
4.4	Ohjelmistot Robotisoituun DED-valmistukseen	45
4.4.1	Adaxis.....	46
4.4.2	RoboDK.....	47
4.4.3	Dotx Control Systems	48
4.4.4	Autodesk Netfabb	49
4.4.5	Siemens NX for DED	50
4.4.6	Hypertherm Robotmaster	51
4.4.7	ABB RobotStudio 3D printing PowerPac, Additive Path Planning and Robot Programming Extension.....	52
4.4.8	Visual Components	52
4.4.9	Rhino3D and Grasshopper – CAD and Parametric Design Environment for Robotic Additive Manufacturing.....	53
4.4.10	SprutCAM X.....	54
4.5	Kokemuksia CNC-koneen muuttamisesta WAAM-sovelluksia varten	55
4.6	Kokemuksia hitsausrobotisolun muuntamisesta WAAM-käyttöön	57
5	Suorakerrostus (DED) prosessin simulointi.....	59
5.1	Mitä prosessisimulaatio tarkoittaa DED-prosessissa	60
5.1.1	Mihin DED prosessin simulointia käytetään	60
5.1.2	Mitä hyötyä simulaatiosta on käytännössä.....	60
5.1.3	Prosessimuutosten vaikutusten tarkastelu pitkällä aikavälillä	60
5.1.4	Miksi simulaatio on erityisen hyödyllistä DED prosessissa	61
5.2	DED prosessin simulointimenetelmät.....	61
5.2.1	Lämpö mekaaninen simulointi	61
5.2.2	Virtauslaskenta (CFD).....	61
5.2.3	Inherent strain menetelmä.....	62
5.3	Lämpö mekaanisen simuloinnin käytännön rakentaminen DED prosessille	62
5.3.1	Geometrian mallinnus ja laskentamallin rajaus	62
5.3.2	Verkotus – mihin tarkkuutta oikeasti tarvitaan	62
5.3.3	Työkalurata ja materiaalinlisäyksen mallinnus	63
5.3.4	Lämmönlähdemalli	63
5.3.5	Rajaehdot ja ympäristö.....	63
5.3.6	Materiaalimallit	64
5.3.7	Aika askel ja laskennan hallinta.....	64
5.3.8	Simulaation tulokset ja niiden tulkinta	64
5.4	Simulaation kalibrointi ja validointi DED prosessissa	64

Tämä on erityisen hyödyllistä yrityksille, jotka haluavat parantaa valmistuksen joustavuutta, kasvattaa nykyisen laitekannan käyttöastetta ja mahdollistaa monimutkaisten tai suurikokoisten metallikomponenttien tuotannon ilman kokonaan uuden tuotantojärjestelmän hankintaa. Tässä luvussa tarkastellaan keskeisiä näkökulmia, vaatimuksia ja vaiheita, jotka yrityksen tulee huomioida muuntaessaan robottihitsaussolun WAAM-tuotantoon soveltuvaksi tulostusolosuhteiksi.

Robottihitsaussolun muuntaminen WAAM-käyttöön on merkittävä kehitysaskel, joka voi laajentaa yrityksen valmistuskyvykkyyksiä huomattavasti. Muutosprosessi käynnistyy teknisellä ja taloudellisella toteutettavuusarvioinnilla, jossa tarkastellaan olemassa olevan solun soveltuvuutta, tarvittavia laitemuutoksia, ohjelmisto- ja ohjausjärjestelmiä sekä tuotannon tavoitteita. Tämän jälkeen tuotantosolun layout suunnitellaan uudelleen WAAM-prosessin vaatimusten mukaisesti, laitteistoa ja ohjelmistoja päivitetään, ja käyttöön otetaan tarkoituksenmukaiset prosessinhallinta- ja laadunvarmistuskäytännöt. Näiden vaiheiden järjestelmällinen toteuttaminen luo edellytykset onnistuneelle käyttöönotolle ja hallitulle siirtymälle uuteen valmistusmenetelmään.

WAAM-järjestelmän tehokas käyttö ei kuitenkaan perustu pelkästään onnistuneeseen käyttöönottoon, vaan edellyttää myös jatkuvaa kehittämistä, säännöllistä huoltoa ja prosessin optimointia. Esimerkiksi hitsausparametrien, lisäaineensyötön, lämpötilanhallinnan ja liikeratojen jatkuva säätäminen on tärkeää valmistuslaadun, mittatarkkuuden ja materiaalihokkuuden varmistamiseksi. Kun muutos toteutetaan suunnitelmallisesti, yritys voi avata uusia liiketoimintamahdollisuuksia esimerkiksi yksittäisten komponenttien valmistuksessa, korjausrakentamisessa ja tarpeenmukaisessa tuotannossa. Samalla olemassa olevan robottisolun arvo kasvaa, kun sitä voidaan hyödyntää aiempaa laajemmin myös tulevaisuuden valmistustarpeisiin.

2.1.1 Robottisolun ominaisuuksien arviointi ja muutoksen toteutettavuus

Ensimmäinen vaihe robottihitsaussolun muuntamisessa WAAM-käyttöön on kattavan arvioinnin suorittaminen, jotta voidaan varmistaa muutoksen toteutettavuus. Muutosprosessi alkaa perusteellisella nykyisen hitsausrobottisolun tarkastelulla. Keskeisiä arvioitavia osa-alueita ovat robotin ulottuvuus, kuormankantokyky, paikoitustarkkuus, toistotarkkuus sekä käytettävissä oleva työalue. Lisäksi on arvioitava nykyisen hitsausvirtalähteen soveltuvuus WAAM-sovelluksiin sekä langansyöttöjärjestelmien kunto, hitsauspolttimen yhteensopivuus, jäähdytyskapasiteetti ja sähköinfrastruktuuri. Myös turvallisuusjärjestelmät, suojarakenteet ja savukaasujen poisto on tarkistettava, jotta varmistetaan WAAM-prosessin vaatimusten täytyminen.

Tämä vaihe sisältää seuraavat osa-alueet:

Robotin mekaaninen suorituskyky:

Robotin mekaaniset ominaisuudet on arvioitava huolellisesti. Tarkasteltavia tekijöitä ovat erityisesti kuormankantokyky, ulottuvuus, toistotarkkuus, rakenteellinen jäykkyys sekä kyky toimia kohonneissa lämpötiloissa. WAAM-prosessi voi kuormittaa robottia eri tavalla kuin perinteinen liitoshitsaus, sillä prosessiin liittyy pitkät tulostukset, mistä seuraa pitkäkestoinen käyttö lämpöä tuottavassa ympäristössä. Robotin on pystyttävä säilyttämään hyvä paikoitustarkkuus ja hallittu liike myös näissä olosuhteissa.

Perinteiseen liitoshitsaukseen tarkoitettua robottia voidaan usein hyödyntää myös WAAM-prosessissa. Tällöin on kuitenkin varmistettava, että robotti voi toteuttaa halutut tulostusliikeradat luotettavasti ja kerrosten geometria säilyi suunnitellun mukaisena koko valmistusprosessin ajan.

Työalue:

Käytettävissä oleva työalue on arvioitava sen varmistamiseksi, että se soveltuu tulostettavien kappaleiden suunnitellulle kappalekoolle, kerros kerrokselta tapahtuvalle tulostettavan kappaleen kasvulle sekä robotin turvalliselle ja esteettömälle liikkumiselle. Riittävä vapaa tila on varmistettava erityisesti monimutkaisia

geometrioita, kappaleen mahdollista pyöritystä tai asemointia sekä ulkoisten akseleiden käyttöä varten. Lisäksi huolto- ja käyttötoimenpiteille on jätävä riittävästi tilaa. Arvioinnissa on huomioitava myös tulostusalustan mitat, kantavuus ja kiinnitysratkaisujen soveltuvuus.

Ohjainjärjestelmä:

Robotin ohjausjärjestelmän tulee mahdollistaa tasainen ja jatkuva liike korkealla toistotarkkuudella. WAAM-prosessi edellyttää vakiona pysyvää etenemisnopeutta sekä polttimen vakaata asentoa, jotta palkogeometria, kerrosten välit ja koko kappaleen laatu pysyvät hyvinä. Ohjaimen on tuettava moniakselista koordinoitua liikettä sekä liikeratojen jatkuvaa suorittamista ilman tarpeettomia pysähdyksiä tai katkoksia. Lisäksi on suositeltavaa, että ohjain tukee reaaliaikaista tiedonsiirtoa hitsausvirtalähteen ja muiden prosessikomponenttien kanssa. Tähän kuuluu kyky lähettää ja vastaanottaa signaaleja esimerkiksi valokaaren käynnistämiseksi ja sammuttamiseksi, langansyöttönopeuden, virran ja jännitteen säätämiseksi sekä prosessin tilan seuraamiseksi.

Ohjelmistoyhteensopivuus:

On selvitettävä, voidaanko olemassa olevaa robotinohjausohjelmistoa hyödyntää WAAM-prosessin edellyttämien liikeratojen, tulostusstrategioiden ja parametrien hallintaan vai tarvitaanko ohjelmistopäivityksiä tai kokonaan uusia työkaluja. Ohjelmistoyhteensopivuus on keskeinen tekijä onnistuneessa WAAM-toteutuksessa, jotta lisäävä valmistus edellyttää tiivistä yhteyttä suunnittelun, liikeratojen generoinnin, robottiohjelmoinnin ja prosessinohjauksen välillä.

Robotin ohjausjärjestelmän tulisi tukea joustavaa ohjelmistoekosysteemiä, joka mahdollistaa liikeratojen tehokkaan suunnittelun, simuloinnin, optimoinnin ja siirron tuotantoon. Tämä parantaa prosessin luotettavuutta ja lyhentää käyttöönottoon liittyvää kehitystyötä.

Lämmönhallinta ja prosessin vakaus:

WAAM-prosessi tuottaa huomattavan lämpökuorman sekä valmistettavaan kappaleeseen että sitä ympäröiviin rakenteisiin. Järjestelmän on mahdollistettava tehokas lämmönhallinta, mukaan lukien kerrosten välisen lämpötilan seuranta, mahdolliset jäähdysstrategiat sekä lämmön poistuminen kappaleesta ja kiinnitysrakenteista. Erityisesti välipalkolämpötila voi vaikuttaa merkittävästi kappaleen mittatarkkuuteen, jäännösjännitysten muodostumiseen ja muodonmuutoksiin. On myös arvioitava lämmön vaikutukset robotin tarkkuuteen, kiinnittimiin ja ympäröivään laitteistoon. Prosessin vakauden kannalta olennaista on, että lämmöntuonti pysyy hallinnassa koko valmistuksen ajan.

Turvallisuus:

Olemassa oleva turvallisuuskonsepti on tarkistettava ja tarvittaessa päivitettävä vastaamaan hitsaukseen ja ainetta lisäävään valmistukseen liittyviä erityisriskejä. Näitä ovat muun muassa kaarisäteily, kuumat pinnat, hitsausroiskeet, savukaasut, metallihiukkaset, paloriski sekä prosessin pitkäkestoinen käyttö. Lisäksi on huomioitava mahdolliset automaation, liikkuvien akseleiden ja lisälaitteiden aiheuttamat vaaratekijät. Turvallisuuden varmistamiseksi on huolehdittava asianmukaisista suojauksista, ilmanvaihdesta, poistokaasujärjestelmistä, käyttöohjeista ja koulutuksesta. Samalla on varmistettava, että järjestelmä täyttää sovellettavat teollisuuden turvallisuusstandardit, viranomaisvaatimukset ja työympäristöä koskevat määräykset.

2.1.2 Hitsausvirtalähteen soveltuvuuden arviointi WAAM-prosessia varten

1. Virtalähde

Hitsausvirtalähde on WAAM-järjestelmän keskeinen komponentti ja se vaikuttaa suoraan prosessin vakauteen, materiaalin lisäyksen laatuun sekä valmistettavan kappaleen ominaisuuksiin. Tämän vuoksi virtalähteen soveltuvuus WAAM-käyttöön on arvioitava järjestelmällisesti ennen prosessin käyttöönottoa.

WAAM-prosessissa käytetään yleensä GMAW- eli MIG/MAG-prosessia ja Cold Metal Transfer (CMT) -menetelmää. Näillä hitsauskoneilla valokaaren käyttäytyminen ja tarkasti hallittu lämmöntuonti ovat keskeisiä edellytyksiä tasaisen palkogeometrian, hyvän pinnanlaadun ja hyvän materiaalin laadun saavuttamiseksi.

Virtalähteen on myös mahdollistettava keskeisten hitsausparametrien tarkka ja toistettava säätö. Tällaisia parametreja ovat muun muassa virta, jännite, langansyöttönopeus. Koska WAAM tulostus kestää yleensä kauan ja perustuu jatkuvaan materiaalin lisäykseen, virtalähteen tulee kyetä ylläpitämään vakaa hitsausprosessi koko tulostuksen ajan.

Lisäksi hitsausvirtalähteen tulee olla yhteensopiva robottiohjaimen ja muun automaatiojärjestelmän kanssa. Digitaalisten tiedonsiirtoajapintojen tuki on tärkeää, jotta robotin liike ja hitsausparametrit voidaan synkronoida luotettavasti. Tämä mahdollistaa esimerkiksi valokaaren käynnistys- ja sammutuskomentojen hallinnan ja mahdollisen parametrien reaaliaikaisen säätämisen tulostuksen aikana sekä prosessitiedon keräämisen seurantaan ja laadunvarmistusta varten. Kuitenkin usein riittää, että hitsausvirtalähde on hyvissä säädöissä hitsauksen alkaessa, koska prosessi on yleensä suhteellisen vakaa.

WAAM-prosessit aiheuttavat yleensä suuremman ja pitkäkestoisemman lämpökuormituksen kuin perinteinen hitsaus, joten myös virtalähteen kuormituskesto on arvioitava huolellisesti. Virtalähteen on tarjottava riittävä käyttösuhde jatkuvaan käyttöön sekä tehokas lämmönhallinta, jotta ylikuumentuminen ja suorituskyvyn heikkeneminen voidaan estää. Erityistä huomiota on kiinnitettävä jäähdytysjärjestelmiin, kuten vesijäähdytykseen, etenkin silloin kun järjestelmää käytetään pitkäkestoisissa tai suurta lämmöntuontia vaativissa tulostustehtävissä.

Lisäksi on suositeltavaa arvioida virtalähteen kyky tukea prosessin kehittämistä ja optimointia myös pidemmällä aikavälillä. Tähän sisältyvät esimerkiksi mahdollisuudet parametrien tallentamiseen, ohjelmointiin, prosessidatan keräämiseen ja mahdollisiin tuleviin ohjelmistopäivityksiin. Näin varmistetaan, että valittu virtalähde ei ainoastaan sovellu nykyiseen WAAM-sovellukseen, vaan tukee myös järjestelmän jatkokehitystä ja laajempaa käyttöä tulevaisuudessa.

2. Hitsauspoltin

WAAM-käyttöön tulisi valita hitsauspoltin, jossa on tehokas jäähdytys sekä luotettava ja tasainen langansyöttö. Robottihitsauksessa yleisesti käytettävät polttimet soveltuvat usein myös WAAM-käyttöön, mutta jatkuva tulostusprosessi ja korkea lämpökuormitus edellyttävät riittävää jäähdytyskapasiteettia.

Vesijäähdytteinen poltin on yleensä suositeltava WAAM-tulostuksessa, sillä se parantaa prosessin vakautta, vähentää kulumista ja mahdollistaa pidemmät keskeytymättömät tulostusjaksot. Lisäksi polttimen rakenteen tulee mahdollistaa tasainen lisäainelangan syöttö ja vakaa kaaren geometria eri tulostusasennossa.

3. Langansyöttölaite

Vakaa ja tarkka langansyöttö on kriittinen WAAM-prosessin onnistumiselle. Virtalähteen ja langansyöttölaitteen tulee tukea tarkkaa langansyöttöä sekä minimoida syöttöhäiriöt. Järjestelmän on kyettävä ylläpitämään tasainen langansyöttö myös pitkäkestoisissa tulostusprosesseissa ilman katkoksia tai nykimistä. Yhteensopivuus eri lankahalkaisijoiden ja materiaalien kanssa on arvioitava. Tämä koskee esimerkiksi ruostumattomia teräksiä, hiiliteräksiä, lujia hiiliteräksiä ja alumiinia. Syöttöhäiriöt, kuten jumittuminen tai nopeuden vaihtelut, voivat heikentää merkittävästi laatua ja aiheuttaa virheitä tulostettavaan rakenteeseen.

2.1.3 Hitsaussolun arviointi ja uudelleen suunnittelu

WAAM-prosessi voi edellyttää erilaisia soluratkaisuja kuin perinteinen robottihitsaus. Siksi hitsaussolun layoutin arviointi on keskeinen vaihe, kun olemassa olevaa järjestelmää mukautetaan WAAM-käyttöön. Toisin kuin tavanomaisessa hitsauksessa, WAAM-prosessissa materiaalia lisätään jatkuvasti useina kerroksina, valmistettavat kappaleet ovat usein suurempia ja prosessien käyttöajat pidempiä. Tämän vuoksi solun rakenteen on tuettava vakaata tulostusprosessia, turvallista käyttöä sekä sujuvaa ja tehokasta työnkulkua.

Layoutin uudelleenkonfigurointi voi olla tarpeen, jotta järjestelmä vastaa WAAM-prosessin teknisiä ja toiminnallisia vaatimuksia. Suunnittelussa on huomioitava muun muassa robotin liikealue, tulostettavien kappaleiden koko, lisälaitteiden sijoittelu, huollettavuus sekä turvallisuusratkaisut. Hyvin suunniteltu layout parantaa prosessin hallittavuutta, vähentää häiriöitä ja tukee tasalaatuisen lopputuloksen saavuttamista. Keskeisiä huomioitavia osa-alueita ovat seuraavat:

1. Liikeratojen ja ulottuman optimointi

Robotin liikkeelle, tulostusalustalle ja valmistettavalle kappaleelle on varmistettava riittävä tila. Tarvittaessa robotin, työpisteen ja rakennusalan sijoittelua on muutettava niin, että robotin käytettävissä oleva liikealue voidaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti ja samalla mahdollistaa suurempien tai geometrialtaan vaativampien WAAM-kappaleiden valmistus. Robotilla tulee olla esteetön pääsy kaikkiin tulostusalueisiin koko prosessin ajan.

Layoutin suunnittelussa on vältettävä robotin kannalta epäedullisia asentoja, kuten äärimmäisiä nivelkulmia ja äkillisiä polttimen orientaation muutoksia. Tasaiset ja jatkuvat liikeradat parantavat prosessin vakautta, tukevat yhtenäisen palkogeometrian muodostumista ja vähentävät robotin mekaanista kuormitusta. Hyvin optimoidut liikeradat parantavat myös tulostuksen toistettavuutta ja pienentävät virheiden riskiä.

2. Lämmönhallinta

WAAM-prosessissa syntyy merkittävä lämpökuorma, joka kohdistuu sekä valmistettavaan kappaleeseen että ympäröiviin rakenteisiin. Tämän vuoksi solun layoutissa on huomioitava riittävät lämmönhallintaratkaisut, kuten jäähdytysmahdollisuudet, hallitut odotusjaksot sekä tarvittaessa lämpötilan seuranta prosessin aikana. Näillä toimenpiteillä voidaan ehkäistä ylikuumentumista, hallita kappaleen muodonmuutoksia ja parantaa prosessin vakautta.

Kappaleen hallittu jäähtyminen voi parantaa tuottavuutta ja tietyillä materiaaleilla myös lopullisia materiaalin ominaisuuksia. Joissakin sovelluksissa on lisäksi tarpeen huomioida kappaleen esilämmitys tai aktiivinen jäähdytys, jotta materiaalin käyttäytyminen ja lopputuotteen laatu pysyvät halutulla tasolla. Lämmönhallinta on siten keskeinen osa sekä prosessin hallintaa että lopputuloksen laadunvarmistusta.

3. Tulostusalustan sijoittelu

Tulostusalustan ja kiinnitysjärjestelmän tulee olla riittävän jäykkä, lämpötilanvaihteluista kestävä ja kantavuudeltaan sellainen, että se pystyy kantamaan kappaletta turvallisesti koko tulostusprosessin ajan. Alustan sijoittelussa on pyrittävä siihen, että robotin ulottuma voidaan hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti ja polttimen optimaalinen asento säilyttää koko tulostuksen ajan.

Tulostusalustan oikea sijoittelu vaikuttaa suoraan prosessin saavutettavuuteen, liikeratojen sujuvuuteen ja kappaleen valmistettavuuteen. Joissakin tapauksissa pyöröpöydän, asentoakselin tai muun ulkoisen akselin käyttö voi parantaa merkittävästi robotin saavutettavuutta ja mahdollistaa paremman hallinnan kappaleen sekä palkogeometrian orientaatioon. Tällaiset ratkaisut voivat lisätä prosessin joustavuutta ja vähentää tarvetta epäedullisille robotin liikkeille.

4. Turvallisuusratkaisut

Soluun on asennettava asianmukaiset turvallisuusratkaisut käyttäjien ja ympäristön suojaamiseksi. Näihin kuuluvat esimerkiksi hitsausverhot, suojaseinämät, hätäpysäytysjärjestelmät sekä muu tarvittava suojaus. Uudelleensuunnittelun layoutin on täytettävä turvallisuusvaatimukset ja mahdollistettava turvallinen pääsy soluun asennuksen, tarkastuksen, huollon ja mahdollisten häiriötilanteiden aikana.

Layoutin suunnittelussa on huomioitava myös raskaiden kappaleiden, lisäaineiden turvallinen käsittely. Tämän lisäksi turvallisuusprotokollat on päivitettävä vastaamaan WAAM-prosessin erityispiirteitä. Tähän sisältyvät muun muassa tehokas savukaasujen ja hiukkasten poisto. Koska WAAM perustuu usein pitkäkestoiseen valokaareen, järjestelmä edellyttää tehokasta ilmanvaihtoa ja oikein sijoitettuja kohdepoistoja tai paikallisia savukaasujen imuja järjestelmiä. Näiden ratkaisujen tulee toimia tehokkaasti häiritsemättä robotin liikettä tai suojakaasun suojaavaa vaikutusta.

2.1.4 Ohjausjärjestelmän päivitykset

Hyvin vanhojen hitsaussolujen ohjausjärjestelmät eivät välttämättä sellaisenaan täytä WAAM-prosessin vaatimuksia, joissa korostuvat korkea tarkkuus, prosessin vakaus ja eri järjestelmien saumaton yhteistoiminta. Tämän vuoksi ohjausjärjestelmän päivittäminen voi olla tarpeen, kun robottisolu mukautetaan WAAM-käyttöön. WAAM-prosessi edellyttää tarkkaa synkronointia robotin liikkeen, hitsausparametrien ja oheislaitteiden välillä, jotta materiaalin lisäys pysyy vakaana ja kappaleen laatu säilyy tasaisena koko valmistusprosessin ajan. Päivitystoimenpiteissä on huomioitava erityisesti seuraavat osa-alueet:

1. Kommunikaation muodostaminen robottiohjaimen ja hitsausvirtalähteen välille

Ensimmäinen vaihe on varmistaa luotettava ja riittävän nopea tiedonsiirto robottiohjaimen ja hitsausvirtalähteen välillä. Tämä mahdollistaa valokaaren sytytyksen ja sammutuksen sekä langansyöttönopeuden, virran ja jännitteen koordinoitua ohjauksen osana robotin liikettä. Käytännössä tiedonsiirto toteutetaan yleensä teollisten kenttäväyläprotokollien, digitaalisten I/O-ratkaisujen tai valmistajakohtaisten rajapintojen avulla. Toimiva kommunikaatio on perusedellytys sille, että WAAM-prosessia voidaan ohjata hallitusti ja toistettavasti. Kommunikaatio robotin ja hitsausvirtalähteen välillä voidaan kuitenkin yksinkertaisimmillaan toteuttaa käyttämällä robotin input/output liitäntöjä ja robotti vain käynnistää ja sammuttaa hitsauksen.

2. Reaaliaikaisen prosessisyntronoinnin mahdollistaminen

Edistyneimmissä WAAM-soluissa on robotin liikkeen ja hitsausparametrien synkronoitua ohjaus koko valmistuksen ajan. Tällöin ohjausjärjestelmä tukee prosessimuuttujien reaaliaikaista säätöä esimerkiksi robotin etenemisnopeuden, kerrosten vaihtumisen tai antureilta saatavan palautetiedon perusteella. Tällainen synkronointi parantaa prosessin vakautta ja auttaa ylläpitämään tasalaatuisia tulostusta myös muuttuvissa olosuhteissa. Käytännössä tämä voi edellyttää ohjelmistopäivityksiä, lisätoiminnallisuuksia robottiohjaimeen tai erillisten ohjausmoduulien käyttöönottoa.

3. Ulkoisten laitteiden ja antureiden integrointi

Prosessin hallinnan ja laadun parantamiseksi ohjausjärjestelmä voi tukea myös ulkoisten laitteiden ja antureiden integrointia. Tällaisia voivat olla esimerkiksi lämpötila-anturit, kamerajärjestelmät, railonseurantaratkaisut, laserskannerit tai muut prosessin tilaa seuraavat mittalaitteet. Näiden tuottamaa tietoa voidaan hyödyntää prosessin valvonnassa, poikkeamien tunnistamisessa ja tarvittaessa adaptiivisessa ohjauksessa tulostuksen aikana. Anturien tehokas hyödyntäminen parantaa prosessin hallittavuutta ja tukee tasalaatuisen lopputuloksen saavuttamista.

4. Datan tallennus ja laadunhallinta

Järjestelmään voidaan rakentaa myös datankeruu- ja tallennusratkaisut jäljitettävyyden, laadunvalvonnan ja prosessianalyysin tueksi. Päivitetyn ohjausjärjestelmä mahdollistaa keskeisten prosessiparametrien

tallentamisen, kuten robotin liikedata, hitsausasetukset, prosessitilat ja antureilta saatu mittaustieto. Tallennettu data tukee laadunvarmistusta, helpottaa mahdollisten poikkeamien selvittämistä ja luo perustan prosessin jatkuvalla kehittämiselle ja optimoinnille. Samalla se parantaa valmistuksen läpinäkyvyyttä ja tukee vaativien teollisten sovellusten dokumentointitarpeita.

2.1.5 Ohjelmistopäivitykset ja -parannukset

Ohjelmistopäivitykset ja -laajennukset ovat keskeinen osa robottisolun muuntamista WAAM-käyttöön. Ainetta lisäävä valmistus asettaa ohjelmistoille erilaisia vaatimuksia kuin perinteiset robottisovellukset, sillä prosessi perustuu jatkuvaan monikerroksiseen tulostukseen, hitsausparametrien ja robotin liikkeen tarkkaan synkronointiin sekä edistyneeseen liikeratojen suunnitteluun. Tämän vuoksi ohjelmistoympäristö on mukautettava tukemaan luotettavaa, hallittua ja tehokasta WAAM-tuotantoa. Käytävissä olevat ohjelmistoratkaisut ja niiden päivitettävyys riippuvat kuitenkin merkittävästi robotin iästä, ohjainjärjestelmästä, mallista sekä siitä, tarjoaako valmistaja kyseiseen järjestelmään lisäävään valmistukseen soveltuvia ohjelmistotyökaluja.

1. Robottiohjaimen firmware- ja järjestelmäohjelmiston päivittäminen

Ensimmäinen vaihe on varmistaa, että robottiohjaimen firmware ja muu järjestelmäohjelmisto ovat ajan tasalla ja yhteensopivia WAAM-tulostukseen.

2. WAAM-liikeratojen suunnitteluun soveltuvat ohjelmistot

Näistä ohjelmistoista kerrotaan tarkemmin myöhemmin tässä dokumentissa.

Tulostusratojen luomiseksi tarvitaan soveltuva ohjelmisto, joka pystyy generoimaan tulostusliikeradat CAD-malleista. Tähän tarvitaan erikoistuneita työkaluja, joilla voidaan suunnitella kerrostustrategiat, palkojen sijoittelu, liikeratojen järjestys ja muut valmistuksen kannalta olennaiset parametrit. Monikerroksisten liikeratojen ohjelmointi on usein huomattavasti vaativampaa kuin perinteisessä hitsauksessa, koska siinä on huomioitava kappaleen kolmiulotteinen geometria, kerrosten välinen vuorovaikutus sekä prosessin jatkuva eteneminen.

3. Simulointi ja offline-ohjelmointi

Varsinainen tulostusprosessi on suositeltavaa testata ja optimoida virtuaalisesti ennen tulostuksen aloittamista. Tähän tarkoitukseen tarvitaan simulointi- ja offline-ohjelmointityökaluja, joiden avulla voidaan tarkastella liikeratoja, tunnistaa mahdollisia ongelmakohtia ja vähentää käyttöönottoon liittyviä riskejä. Offline-ohjelmointityökalut on konfiguroitava vastaamaan robotin todellista ympäristöä, jotta simuloitujen ohjelmien on mahdollista siirtää tuotantoon luotettavasti. Tämä nopeuttaa kehitystyötä, parantaa prosessin ennakoitavuutta ja vähentää virheiden sekä tuotantokatkosten riskiä. Erityisesti monimutkaisissa kappaleissa simuloinnin merkitys korostuu.

4. Reaaliaikainen valvonta ja adaptiivinen ohjaus

Hyvän tulostuslaadun saamiseksi on hyvä prosessin hallinta tärkeää ja järjestelmään on suositeltavaa integroida antureita sekä niitä tukevia ohjelmistoja. Tällaisia voivat olla esimerkiksi konenäköjärjestelmät, lämpötilamittaukset, laserskannerit tai muut mittausratkaisut, joilla voidaan seurata prosessin tilaa tulostuksen aikana. Anturien hyödyntäminen edellyttää, että niitä vastaavat ohjelmistot asennetaan ja integroidaan osaksi ohjausjärjestelmää.

Nämä työkalut mahdollistavat reaaliaikaisen valvonnan, datankeruun sekä tarvittaessa adaptiivisen prosessinohjauksen. Tällöin järjestelmä voi reagoida mittaustietoon tulostuksen aikana ja säätää toimintaa esimerkiksi prosessin vakauden tai kerrosgeometrian ylläpitämiseksi. Reaaliaikainen seuranta ja ohjaus

parantavat tulostuksen luotettavuutta, vähentävät poikkeamia ja tukevat tasalaatuisen lopputuloksen saavuttamista.

2.1.6 Prosessin kehittäminen ja testaus

Seuraava vaihe koostuu prosessitesteistä, joiden tavoitteena on varmistaa, että WAAM-järjestelmä täyttää sille asetetut tuotannolliset, laadulliset ja tekniset vaatimukset. Prosessin kehitys ja testaus ovat keskeisiä vaiheita, kun hitsausrobotia päivitetään WAAM-käyttöön. Toisin kuin perinteisessä hitsauksessa, WAAM-prosessi edellyttää vakaata ja toistettavaa materiaalin lisäystä pitkillä valmistusajoilla sekä useiden peräkkäisten kerrosten aikana. Järjestelmällinen ja vaiheittainen lähestymistapa on tärkeä, jotta voidaan saavuttaa luotettava tulostuslaatu, tasaiset materiaalin ominaisuudet ja turvallinen prosessin toiminta. Tämä vaihe sisältää seuraavat osa-alueet:

1. Koetulostukset

Kehitysprosessi alkaa suorituskykyvaatimusten määrittelyllä. Näihin kuuluvat esimerkiksi tavoiteltu palkogeometria, kerrospaksuus, tulostusnopeus, pinnanlaatu, mittatarkkuus sekä valmiin rakenteen mekaaniset ominaisuudet. Selkeästi määritellyt tavoitteet ohjaavat koko testausprosessia, parametrien valintaa ja hyväksymiskriteerien muodostamista.

2. Parametrien optimointi

Prosessiparametreja hienosäädetään koetulostusten tulosten perusteella. Lähtöparametrit valitaan yleensä materiaalin, langan halkaisijan, vapaa langan pituuden (suutin etäisyys) ja halutun kerrospaksuuden mukaan. Keskeisiä säädettäviä parametreja ovat muun muassa virta, jännite, langansyöttönopeus, tulostusnopeus sekä suojakaasun koostumus ja virtausnopeus. Näiden parametrien perusteella määräytyy myös kerrosten välinen nosto. Optimoinnissa hyödynnetään usein valmistajan suosituksia, aiempaa käyttökokemusta sekä tutkimustietoa, mutta parametrit on aina validoitava kyseisessä järjestelmässä käytännön kokein.

3. Yksittäisen palon tulostuksen testaus

Yksipalkotestit ovat tärkeä lähtökohta prosessin kehityksessä. Niiden avulla arvioidaan valokaaren vakautta, palon muotoa, leveyttä, korkeutta. Tavoitteena on löytää sellainen parametrialue, jolla materiaalin lisäys on hallittua ja toistettavaa. Ennen siirtymistä monikerroksisiin rakenteisiin on varmistettava, että yksittäinen palko muodostuu tasaisesti ja ilman merkittäviä virheitä.

4. Monimutkaisempien rakenteiden tulostaminen

Kun yksittäisen palon käyttäytyminen on saatu vakaaksi, siirrytään monikerroksisiin koerakenteisiin, kuten seinämien tulostamiseen. Näiden testien avulla arvioidaan kerrosten välisiä liitoksia, lämmön kertymistä, geometrian hallintaa ja mittatarkkuutta. Samalla voidaan tunnistaa mahdollisia ongelmia, kuten kerrosten epätasaisuutta tai huonoa pinnanlaatua. Monikerrostestit ovat keskeisiä, koska ne kuvaavat todellista WAAM-prosessia huomattavasti paremmin kuin yksittäisien palkojen tulostaminen.

5. Tulostusstrategiat

Tulostusliikeratoja testataan ja optimoidaan siten, että ne tuottavat vakaan prosessin ja hyvän lopputuloksen. Huomioitavia asioita ovat esimerkiksi palkojen limitys, kerrosjärjestys, etenemissuunta, aloitus- ja lopetuskohdat sekä mahdolliset suunnanvaihdot. Robotin liike on ohjelmoitava niin, että se pysyy tasaisena ja jatkuvana koko tulostuksen ajan. Tavoitteena on myös minimoida aloitus- ja lopetusvirheet, vähentää lämpötilavaihteluja ja varmistaa yhtenäinen rakenne koko kappaleessa.

6. Prosessin valvonta ja datankeruu

Testauksen aikana kerätään järjestelmällisesti prosessidataa, kuten hitsausparametreja, lämpödataa, kerrosten välisiä lämpötiloja, robotin liikedataa ja mahdollisten muiden antureiden mittaustuloksia. Datalla

voidaan tunnistaa prosessin epävakauksia, arvioida parametrien vaikutuksia ja analysoida materiaalin laadun sekä prosessiasetusten välistä yhteyttä. Laadukas datankeruu tukee myös jäljitettävyyttä, laadunvarmistusta ja prosessin myöhempää optimointia.

7. Jäähdytysstrategia

Kerrosten välinen jäähdytys (välipalkolämpötila) on huomioitava, jotta materiaalin laatu säilyy tasaisena ja rakenteellinen eheys varmistuu. Liian korkea kerrosten välinen lämpötila voi heikentää osan mittatarkkuutta ja materiaalin laatua, kun taas liian pitkä jäähdytysaika voi heikentää tuottavuutta. Kerrosten välistä lämpötilaa voidaan seurata esimerkiksi pyrometrin, lämpökameran tai muiden mittausjärjestelmien avulla. Yksinkertainen tapa hallita kappaleen lämpötilaa on pitää tauko kerrosten välillä, jolloin lämpötilan hallinta on aikaperusteinen, mutta tämä ei ole hyvä tapa tarkan välipalkolämpötilan saavuttamiseksi. Hyvin suunniteltu jäähdytysstrategia on keskeinen osa vakaata WAAM-prosessia.

8. Materiaalin ja mekaanisten ominaisuuksien testaus

Tulostettuja testikappaleita voidaan arvioida useilla eri menetelmillä. Näihin kuuluvat visuaalinen tarkastus, mittatarkkuuden mittaaminen, mikrorakenneanalyysit, kovuusmittaukset sekä tarvittaessa vetokokeet, väsymiskokeet tai muut mekaaniset testit. Näiden tutkimusten avulla varmistetaan, että tulostusprosessi tuottaa materiaalia, joka täyttää asetetut laatu- ja lujuusvaatimukset. Yliopistot, tutkimuslaitokset ja asiantuntijaryhmät voivat tarjota merkittävää tukea erityisesti vaativampien materiaalitutkimusten ja mekaanisten testien toteutuksessa.

9. Dokumentointi ja validointi

Kaikki prosessiparametrit, testitulokset ja kappaleiden ominaisuuksiin liittyvät tiedot kannattaa dokumentoida huolellisesti jäljitettävyyden varmistamiseksi. Kun vakaa ja toistettava prosessi on saavutettu, lopulliset parametrit, liikeratastrategiat, työohjeet ja laadunvarmistuskäytännöt kirjataan selkeästi. Tämän jälkeen suoritetaan validointitulostuksia, joiden avulla varmistetaan prosessin toistettavuus, tuotantovalmius ja soveltuvuus käytännön valmistukseen.

2.1.7 Koulutus ja turvallisuus

Robottihitsaussolun muuntaminen WAAM-käyttöön tuo mukanaan uusia turvallisuusnäkökohtia sekä aiempaa laajempia osaamisvaatimuksia. Tämän vuoksi henkilöstön koulutus ja turvallisuusprotokollien päivittäminen ovat keskeisiä toimenpiteitä onnistuneen ja hallitun käyttöönoton varmistamiseksi. Koska WAAM yhdistää hitsausprosessin, robotiikan, automaation ja lisäävän valmistuksen vaatimukset, on tärkeää, että henkilöstö ymmärtää sekä prosessin tekniset erityispiirteet että siihen liittyvät riskit.

1. Henkilöstön koulutus

WAAM-prosessi eroaa merkittävästi perinteisestä hitsauksesta, joten henkilöstön osaamista on laajennettava vastaamaan uuden valmistusmenetelmän vaatimuksia. Kun olemassa oleva robottihitsaussolu muutetaan WAAM-käyttöön, koulutuksen tulee kattaa ainetta lisäävän valmistuksen perusteet, lämmön kertymisen hallinta, kerrosten välisen lämpötilan seuranta ja säätö sekä WAAM-prosessille tyypilliset virheet ja niiden ennaltaehkäisy.

Operaattorit, ohjelmoijat ja suunnittelijat on koulutettava WAAM-spesifisiin toimintatapoihin, kuten WAAM-prosessin hallintaan, parametrien säätöön, laadunvarmistukseen ja tulostusvirheiden tunnistamiseen. Koulutuksen tulee sisältää myös uusien ohjelmistojen käyttö sekä robottiohjelmointi, joita tarvitaan liikeratojen toteuttamiseen. Erityisen tärkeitä osa-alueita ovat offline-ohjelmointi ja simulointi.

Lisäksi henkilöstön on ymmärrettävä, miten hitsausparametrit ja välipalkolämpötila vaikuttavat lopputuotteen laatuun. WAAM-prosessi edellyttää systemaattista laadunseurantaa, hyvää prosessitietoisuutta sekä kykyä tunnistaa poikkeamia jo valmistuksen aikana.

2. Laajennetut turvallisuusprotokollat

WAAM-prosessi edellyttää kattavaa turvallisuuskoulutusta, joka kattaa sekä hitsaukseen että lisäävään valmistukseen liittyvät riskit. Henkilöstön tulee olla tietoinen pitkäkestoiseen valokaaren altistumiseen liittyvistä vaaratekijöistä, kuten kaarisäteilystä, kuumista pinnoista, hitsausroiskeista, savukaasuista sekä suojakaasujen käsittelystä. Koska WAAM-tulostus voi kestää yhtäjaksoisesti huomattavasti pidempään kuin tavanomainen hitsaus, myös paloriski ja lämpökuormituksen vaikutukset korostuvat.

Turvallisuusprotokollien tulee kattaa asianmukaiset suojarusteet, turvalliset käytännöt, savukaasujen poiston, ilmanvaihdon sekä toiminnan poikkeus- ja hätätilanteissa. Erityistä huomiota on kiinnitettävä palontorjuntaan, sammutusvälineiden saatavuuteen ja selkeisiin menettelyihin tilanteissa, joissa prosessi joudutaan keskeyttämään nopeasti tai hallitusti.

Myös vianetsintäosaaminen on olennainen osa turvallista toimintaa. Henkilöstö on koulutettava tunnistamaan ja ratkaisemaan WAAM-prosessin aikana esiintyviä tyypillisiä ongelmia, kuten valokaaren epävakaas, langansyöttöhäiriöt tai suojakaasun puutteet. Mitä paremmin prosessin häiriöt osataan tunnistaa varhaisessa vaiheessa, sitä tehokkaammin voidaan ehkäistä laatuongelmia ja turvallisuusriskejä.

3. Ohjausjärjestelmän turvallisuus

Myös ohjausjärjestelmään liittyvät turvallisuustoiminnot on tarkistettava ja tarvittaessa päivitettävä. Häätäpysäytyspiirien, turvalukitusten sekä turvalukiteltujen tulo- ja lähtösignaalien on katettava sekä robottijärjestelmä että hitsauslaitteisto kokonaisuutena. Turvallisuustoimintojen on toimittava luotettavasti kaikissa käyttötilanteissa, myös häiriöiden, keskeytysten ja huoltotoimenpiteiden aikana.

Lisäksi järjestelmään on määriteltävä selkeät menettelyt turvallista käynnistystä, hallittua pysäytystä ja keskeytyksen jälkeistä uudelleenkäynnistystä varten. Nämä käytännöt ovat välttämättömiä sekä käyttäjäturvallisuuden että laitteiston suojaamisen kannalta. Hyvin suunniteltu turvallisuusjärjestelmä vähentää inhimillisten virheiden riskiä.

2.1.8 Jatkuva kunnossapito ja optimointi

Kun WAAM-solu on otettu käyttöön, järjestelmän suunnitelmallinen ylläpito on välttämätöntä korkean laadun ja turvallisen toiminnan varmistamiseksi. WAAM-käyttöön muunnetun robottisolun jatkuvan kunnossapidon tulee kohdistua sekä mekaaniseen luotettavuuteen että prosessin vakauteen. Erityistä huomiota on kiinnitettävä hitsauspolttimen, virtasuuttimien, kaasusuuttimien ja langansyöttölaitteiden kuntoon, sillä nämä komponentit kuluvat usein tavanomaista nopeammin pitkäkestoisen tulostuksen ja jatkuvan langansyötön seurauksena. Kulutusosat on vaihdettava ennakoivasti, jotta voidaan ehkäistä valokaaren epävakaas, epätasaista geometriaa, laatuvariaatioita ja odottamattomia tuotantokatkoksia.

Myös kaapelit ja jäähditysletkut on tarkastettava säännöllisesti lämpövaurioiden, kulumisen ja mekaanisen rasituksen varalta. Niiden asianmukainen reititys on tärkeää, jotta pitkät tulostusjaksot eivät aiheuta ylimääräistä kuormitusta tai ennen aikaista vaurioitumista. Hyvin toteutettu kunnossapito vähentää häiriöitä, pidentää laitteiston käyttöikää ja tukee tuotannon ennakoitavuutta.

1. Säännölliset laitetarkastukset

Järjestelmälle on laadittava selkeä ja kattava huoltoaikataulu, joka kattaa hitsauslaitteiston, robotin nivelet ja liikeakselit, turvajärjestelmät sekä muut oheislaitteet. Koska WAAM-prosessi aiheuttaa usein suurempaa lämpö- ja mekaanista rasitusta kuin perinteinen hitsaus, robotin, polttimen, langansyöttölaitteen ja hitsausvirtalähteen kuntoa on seurattava säännöllisesti. Tarkastusten avulla voidaan havaita kulumisen, säätötarpeet ja mahdolliset vikojen ensioireet ennen kuin ne vaikuttavat tuotantoon tai kappaleen laatuun.

2. Prosessin optimointi

Prosessiparametreja on arvioitava ja hienosäädettävä jatkuvasti tulostuksen laadun ja käytännön kokemusten perusteella. Parametrien, kuten tulostusnopeuden, hitsausenergian ja langansyötön optimointi voi parantaa rakennuslaatua, lyhentää valmistusaikoja ja vähentää materiaalihukkaa. Jatkuva optimointi on tärkeää erityisesti silloin, kun valmistettavat kappaleet, materiaalit tai tuotantovaatimukset vaihtelevat.

3. Datalähtöinen kehittäminen

Prosessin aikana kerättyä dataa voidaan hyödyntää järjestelmällisesti trendien tunnistamiseen, poikkeamien analysointiin, ennakoivan kunnossapidon tukemiseen ja prosessin asteittaiseen parantamiseen. Tallennettu tieto voi sisältää esimerkiksi hitsausparametreja, lämpötiloja, robotin liikedataa, tuotantoaikoja ja laatuun liittyviä havaintoja. Datalähtöinen toimintatapa tukee sekä laadunhallintaa että tuotannon tehokkuuden kehittämistä, ja sen avulla voidaan tehdä päätöksiä aiempaa paremman tiedon perusteella.

4. Ohjelmistojen päivitys ja optimointi

Liikeratojen suunnitteluun, simulointiin ja robottiohjaukseen liittyvät ohjelmistot on pidettävä ajan tasalla, jotta järjestelmä toimii luotettavasti ja tehokkaasti. Robottiohjelmaa ja tulostusstrategioita voidaan kehittää tuotantokokemuksen perusteella niin, että valmistusaika lyhenee, materiaalinkäyttö tehostuu ja lämpömuodonmuutokset pysyvät paremmin hallinnassa.

5. Tulevat päivitykset ja jatkuva kehittäminen

Järjestelmän pitkäjänteisessä kehittämisessä on huomioitava myös tulevat laajennus- ja päivitystarpeet. Tällaisia voivat olla esimerkiksi lisärobotit, ulkoiset akselit, automaattisemmat materiaalinkäsittelyratkaisut tai edistyneet anturi- ja mittausjärjestelmät, joilla voidaan kasvattaa tuotantokapasiteettia ja parantaa prosessin hallintaa. Järjestelmän skaalautuvuus on tärkeä osa investoinnin elinkaariajattelua.

Jatkuvaa kehittämistä tukevat lisäksi käyttäjäpalautte, dokumentaation säännöllinen päivittäminen sekä prosessin suorituskyvyn jatkuva arviointi. Tuotannosta saadut kokemukset ja havainnot on sisällytettävä päivitettyihin työohjeisiin, koulutusmateriaaleihin ja huoltosuunnitelmiin. Näin varmistetaan, että osaaminen kehittyy järjestelmän mukana ja että parhaat käytännöt siirtyvät osaksi päivittäistä toimintaa.

2.2 CNC-hitsaussolun muuntaminen WAAM-sovellukseen

CNC-hitsaussolun muuntaminen WAAM-järjestelmäksi mahdollistaa suurten ja räätälöityjen metallikomponenttien valmistuksen. Perinteiseen CNC-hitsaukseen verrattuna WAAM perustuu jatkuvaan, kerros kerrokselta etenevään materiaalin lisäykseen, mikä asettaa uusia vaatimuksia koneen rakenteelle, ohjausjärjestelmille, ohjelmistoille sekä koko prosessin vakaudelle ja hallittavuudelle.

Tässä luvussa kuvataan keskeiset tekniset vaiheet, joita tarvitaan olemassa olevan CNC-hitsaussolun muuntamiseksi WAAM-yhteensopivaksi järjestelmäksi. Tarkastelu kattaa muun muassa toteutettavuusarvioinnin, mekaaniset ja laitteistoon liittyvät muutokset, ohjausjärjestelmän päivitykset, CNC-ohjelmoinnin mukauttamisen, prosessin kehityksen, turvallisuusnäkökohdat sekä pitkäjänteisen kunnossapidon. Tavoitteena on luoda edellytykset luotettavalle, hallitulle ja teollisesti käyttökelpoiselle WAAM-toteutukselle hyödyntämällä mahdollisimman tehokkaasti olemassa olevaa CNC-pohjaista infrastruktuuria.

2.2.1 Toteutettavuuden arviointi ja suunnittelu

Ennen muunnosprosessin aloittamista on tehtävä huolellinen toteutettavuusarviointi, jonka tavoitteena on selvittää, soveltuuko olemassa oleva CNC-hitsaussolu WAAM-käyttöön teknisesti, tuotannollisesti ja taloudellisesti. Arvioinnin avulla voidaan tunnistaa tarvittavat muutokset, mahdolliset rajoitteet sekä ne edellytykset, joilla järjestelmä voidaan ottaa käyttöön luotettavasti ja hallitusti. Toteutettavuusarvioinnin tulee kattaa vähintään seuraavat osa-alueet:

1. Järjestelmän yhteensopivuusanalyysi

Ensimmäisessä vaiheessa on arvioitava, täyttävätkö CNC-hitsaussolun nykyiset komponentit, kuten hitsausvirtalähde, langansyöttölaite, poltin ja mahdolliset oheislaitteet, WAAM-prosessin vaatimukset. Jokainen komponentti on tarkasteltava sen soveltuvuuden kannalta jatkuvaan, metallin tulostukseen sekä WAAM-prosessille tyypillisiin pitkiin käyttöjaksoihin. Erityistä huomiota tulee kiinnittää kriittisten komponenttien tekniseen kuntoon, jäljellä olevaan käyttöikään sekä mahdollisuuksiin päivittää, modernisoida tai korvata ne tarvittaessa. Yhteensopivuusanalyysi muodostaa perustan koko muutosprosessin suunnittelulle.

2. Koneen rakenne

CNC-koneen rakenteellisen jäykkyyden on oltava riittävä WAAM-prosessin aiheuttamien lämpökuormien ja suuren tulostettavien kappaleiden hallitsemiseksi. Perinteiseen hitsaukseen verrattuna WAAM tuo mukanaan suuremman ja pitkäkestoisemman lämpökuorman, mahdollisesti suuremmat tulostettavat osat sekä pidemmät prosessiajat. Koneen on kyettävä säilyttämään paikoitustarkkuus ja liikkeen hallinta myös näissä olosuhteissa. Mahdollinen alttius lämpömuodonmuutoksille on tunnistettava jo suunnitteluvaiheessa, jotta tarvittavat rakenteelliset tai prosessiin liittyvät toimenpiteet voidaan määrittää ajoissa.

3. Ohjaimen yhteensopivuus

Ohjausjärjestelmän suorituskyky on yksi keskeisimmistä arvioitavista tekijöistä. CNC-ohjaimen tulee tukea sujuvaa ja jatkuvaa moniakselista liikettä, tarkkaa liikkeen ja hitsausparametrien synkronointia sekä pitkien ja monimutkaisten ohjelmien luotettavaa suorittamista. Lisäksi on varmistettava yhteensopivuus WAAM-käyttöön mukautetun G-koodin, ulkoisten prosessinohjausrajapintojen sekä datankeruu- ja valvontatoimintojen kanssa. Mahdolliset ohjaimen suorituskykyyn, muistiresursseihin tai ohjelmistotukeen liittyvät rajoitteet voivat vaikuttaa sekä tarvittaviin päivityksiin että siihen, kuinka vaativia WAAM-kappaleita järjestelmällä voidaan valmistaa.

4. Työalue

Työalueen on mahdollistettava polttimen, langansyöttölaitteen, tulostusalustan ja muiden tarvittavien laitteiden tarkoituksenmukainen sijoittaminen sekä turvallinen käyttö koko prosessin ajan. Koska WAAM-menetelmällä voidaan tulostaa suuria kappaleita, työtilan on oltava riittävä sekä lopullisille kappalemitoille. Tilaa on oltava myös mahdollisille jäähdytysjärjestelmille, mittalaitteille ja antureille. Lisäksi layout-suunnittelussa on huomioitava hyvä saavutettavuus huoltoa ja kappaleenvaihtoja varten. Hyvin suunniteltu työtila parantaa sekä käytettävyyttä että turvallisuutta.

5. Tuotantotarpeiden analyysi

Tuotannolliset tavoitteet ja taloudelliset näkökohdat ovat olennainen osa toteutettavuusarviointia. Arvioitavia tekijöitä ovat esimerkiksi odotetut tuotantomäärät, valmistusajat, tuottavuustavoitteet, käyttöaste, materiaalinkulutus sekä investointi- ja käyttökustannukset. Näitä on verrattava vaihtoehtoihin valmistusmenetelmiin, jotta voidaan arvioida, tarjoaako WAAM kyseisessä käyttötapauksessa selkeitä etuja esimerkiksi kustannustehokkuuden, toimitusaikojen lyhentymisen, materiaalitehokkuuden tai suunnittelun joustavuuden kannalta. Tällainen analyysi tukee päätöksentekoa ja auttaa arvioimaan, onko muutos teknisesti ja liiketoiminnallisesti perusteltu.

2.2.2 CNC-solun layoutin muokkaaminen WAAM-vaatimusten mukaiseksi ja laitteiston päivittäminen

Seuraava vaihe on solun fyysisen layoutin muokkaaminen sekä tarvittavien laitteistopäivitysten toteuttaminen ainetta lisäävän valmistuksen vaatimusten mukaisesti. WAAM-prosessi asettaa perinteiseen CNC-hitsaukseen verrattuna erilaisia mekaanisia, lämpötekniisiä ja toiminnallisia vaatimuksia, minkä vuoksi järjestelmän rakenne, kokoonpano ja apulaitteet on mukautettava vastaamaan näitä uusia tarpeita.

Tavoitteena on varmistaa, että järjestelmä tukee vakaata materiaalin lisäystä, turvallista käyttöä ja riittävää prosessinhallintaa koko tulostuksen ajan.

1. Työalue ja työkalun ulottuvuuden optimointi

Työtilan ja tulostusalueen optimointi on muutosprosessin keskeinen lähtökohta. WAAM-kappaleet voivat olla suurikokoisia. CNC-järjestelmän layoutin on tarjottava riittävästi vapaata tilaa kappaleen kasvulle ja polttimen liikkeelle koko tulostusprosessin ajan. Tulostusalueesta on suunniteltava siten, että polttimella on riittävästi tilaa liikkua ja kappaleen tarkkailu ja poistaminen tulostuksen jälkeen on helppoa. Hyvin optimoitu työtila parantaa samalla liikeratojen sujuvuutta ja vähentää häiriöiden riskiä.

2. Virtalähde

Hitsausvirtalähde on WAAM-järjestelmän tärkein komponentti ja sen soveltuvuus vaikuttaa suoraan prosessin vakauteen ja lopputuloksen laatuun. Virtalähteen käyttösuhteen tulisi olla hyvä sekä mahdollistaa keskeisten prosessiparametrien, kuten virran, jännitteen ja langansyöttönopeuden, tarkka ja toistettava hallinta. Lisäksi sen on ylläpidettävä vakaa valokaari pitkien tulostusjaksojen aikana.

3. Hitsauspoltin

Sopivan hitsauspolttimen valinta ja integrointi ovat kriittisiä WAAM-toiminnan onnistumisen kannalta. Polttimen tulee soveltua pitkäkestoiseen ja jatkuvaan käyttöön, ja sen on pystyttävä ylläpitämään vakaa suorituskyky koko tulostusprosessin ajan. Yleensä kannattaa valita nestejäähdytetty poltin ja poltinkaapeli. Polttimen kiinnityksen on oltava riittävän jäykkä, jotta materiaalin tulostus pysyy toistettavana ja kerrokset sijoittuvat suunniteltuun paikkaan ilman poikkeamia. Polttimen valinnassa on huomioitava myös huollettavuus sekä kulutusosien vaihtamisen helppous.

4. Lämmönhallinta

Lämmönhallinta on olennainen osa WAAM-järjestelmän vaatimuksista. Prosessi tuottaa jatkuvaa lämpökuormaa, joka voi vaikuttaa sekä koneen rakenteeseen että valmistettavan kappaleen laatuun. Jos lämmön kertymistä ei hallita riittävästi, seurauksena voi olla mittapoikkeamia, muodonmuutoksia, prosessin epävakautta tai heikentynyttä kerrosten välistä laatua. Lämmönhallintaa voidaan parantaa esimerkiksi lämpösuojauksella, paikallisella jäähdytyksellä sekä tarvittaessa aktiivisilla jäähdytysjärjestelmillä. Lämmönhallintaan liittyy myös välipalkolämpötilan hallinta ja se voidaan toteuttaa esim. pyrometrin avulla.

5. Langansyöttöjärjestelmä

Langansyöttöjärjestelmän on toimittava luotettavasti, tasaisesti ja keskeytyksettä koko valmistusprosessin ajan. WAAM edellyttää vakaata langansyöttöä, joten järjestelmän tulee toimia ilman häiriöitä. Epäsäännöllinen langansyöttö voi aiheuttaa valokaaren epävakautta, geometrisia virheitä ja tuotannon keskeytymisiä, joten sen luotettava toiminta on yksi WAAM-järjestelmän perusedellytyksistä. Usein esim. alumiinilanka voi tuottaa hankaluuksia langansyöttöjärjestelmälle.

6. Savukaasujen poistojärjestelmä

Tehokas savukaasujen poisto ja ilmanvaihto on toteutettava tai päivitettävä vastaamaan WAAM-prosessin pitkäkestoisen tulostuksen aiheuttamaa lisääntyneitä savukaasu- ja hiukkaskuormaa. Poistojärjestelmä on sijoitettava siten, että se poistaa savukaasut tehokkaasti häiritsemättä suojaavaa vaikutusta. Samalla on varmistettava työterveys- ja turvallisuusvaimusten täyttyminen. Erityisesti ruostumattomien terästen ja alumiinin tulostuksessa tehokas savukaasujen poisto on erittäin tärkeää sekä käyttäjien turvallisuuden kannalta.

7. Lisälaitteet ja jäähdytysjärjestelmät

Laitteistopäivityksiin voi sisältyä myös lämpötila-antureiden, kameroiden, laserskannereiden tai muiden prosessin valvontaan tarkoitettujen laitteiden integrointi. Layout-suunnittelussa on hyvä varata näille järjestelmille riittävästi tilaa, sopivat kiinnityspisteet ja tarvittavat liittynät, jotta nykyiset ja tulevat päivitykset voidaan toteuttaa ilman merkittäviä rakennepäivityksiä. Lisäksi aktiivinen jäähdytys voidaan ottaa käyttöön koneen lämpökuorman hallitsemiseksi ja lämpömuodonmuutosten vähentämiseksi. Tällaiset lisäratkaisut parantavat järjestelmän hallittavuutta, tukevat laadunvarmistusta ja lisäävät WAAM-prosessin teollista käyttökelpoisuutta.

2.2.3 Ohjausjärjestelmän päivitykset

WAAM-prosessin erityisten ohjausvaatimusten täyttämiseksi CNC-järjestelmän ohjausta on mahdollisesti päivitettävä, jotta materiaalin lisäys voidaan toteuttaa tarkasti ja toistettavasti. Ohjausjärjestelmän kehittäminen on keskeinen vaihe CNC-hitsausolosuhteiden mukauttamisessa WAAM-käyttöön. Toisin kuin perinteisessä hitsauksessa, WAAM edellyttää koneen liikkeen, hitsausparametrien ja oheisjärjestelmien erittäin tarkkaa synkronointia pitkien ja jatkuvien valmistusprosessien aikana. Ohjausjärjestelmän on tuettava monimutkaisten, monikerroksisten lisäysstrategioiden hallittua toteutusta siten, että prosessin luotettavuus, laatu ja turvallisuus säilyvät koko valmistuksen ajan. Keskeisiä päivitystarpeita voivat olla seuraavat:

1. Ohjaimen päivitys

CNC-ohjaimen on kyettävä suorittamaan WAAM-käyttöön mukautettua G-koodia. WAAM-ohjelmat perustuvat jatkuviin liikeratoihin sekä hallittuihin taukoihin kerrosten välillä. Perinteiset CNC-hitsausohjelmat koostuvat usein lyhyistä ja toisistaan erillisistä liikeradoista, kun taas WAAM-ohjelmat sisältävät pitkiä, keskeytymättömiä liikesarjoja useiden kerrosten yli. Tämän vuoksi ohjaimen on pystyttävä käsittelemään suuria ohjelmätiedostoja sekä varmistamaan sujuva liikeradan suoritus ilman odottamattomia pysähdyksiä.

2. Edistynyt prosessinohjausohjelmisto

Tiivis integraatio CNC-ohjaimen ja hitsausvirtalähteen välillä on eduksi, jotta materiaalin tulostusta voidaan hallita luotettavasti. Ohjausjärjestelmän olisi hyvä mahdollistaa valokaaren sytytyksen ja lopetuksen hallinta sekä hitsausvirran, jännitteen ja langansyöttönopeuden hallinta. Tällainen hallinta on tärkeää erityisesti silloin, kun tulostusnopeus, liikeradan geometria tai lämmöntuonti muuttuvat tulostuksen aikana.

Mahdollisuuksien mukaan järjestelmässä tulisi hyödyntää digitaalisia tiedonsiirtoprotokollia, jotka mahdollistavat parametrien reaaliaikaisen säädön ja prosessipalautteen hyödyntämisen. Edistyneet prosessinohjausominaisuudet ovat WAAM-toiminnassa erittäin hyödyllisiä, sillä niiden avulla voidaan hallita tulostusta kokonaisvaltaisesti. Ohjausjärjestelmän tulisi tukea myös ohjelmistomoduulien tai ulkoisten ohjainten integrointia, jotta järjestelmä voi reagoida esimerkiksi lämmön kertymiseen, geometrian muutoksiin tai anturipalautteeseen tulostuksen aikana.

3. Laadunvalvonta ja datankeruu

Ohjausjärjestelmä voi sisällyttää kattavat datankeruu- ja tallennustoiminnot. Keskeisten prosessiparametrien, kuten liikedatan, hitsausvirran, jännitteen, langansyöttönopeuden ja lämpötilan tallentaminen tuottaa arvokasta tietoa laadunvarmistuksen, jäljitettävyyden ja prosessin optimoinnin tueksi. Tallennetun datan avulla voidaan analysoida prosessin tasaisuutta, tunnistaa poikkeamia ja arvioida eri parametrien vaikutusta valmistettavan kappaleen laatuun. Samalla se luo perustan järjestelmän jatkuvalla kehittämiselle ja ennakoivammalle kunnossapidolle.

Ohjausjärjestelmän päivityksessä on huomioitava myös ulkoisten laitteiden ja antureiden integrointimahdollisuudet. CNC-ohjaimen tulee tukea esimerkiksi pyrometrien, lämpökameroiden tai geometrian seurantajärjestelmien liittämistä osaksi kokonaisjärjestelmää. Näitä laitteita voidaan hyödyntää reaaliaikaisessa valvonnassa ja prosessin validoinnissa. Antureiden tehokas hyödyntäminen parantaa prosessin hallittavuutta ja mahdollistaa entistä luotettavamman WAAM-valmistuksen.

2.2.4 CNC-ohjelmointi ja tulostusratojen luominen

CNC-ohjelmointi WAAM-käyttöön voi olla vaativa tehtävä, jos tulostettava kappale on muodoltaan monimutkainen. Perinteiseen CNC-hitsaukseen verrattuna WAAM edellyttää jatkuvaa ja hallittua materiaalin lisäystä, jossa koko valmistusprosessi rakentuu ainetta lisäävän valmistuksen periaatteiden mukaisesti. Tämä asettaa uusia vaatimuksia CNC-ohjelmoinnille sekä liikeratastrategioiden suunnittelulle. Lisäksi tyypillinen CNC-koneen kolmiakselinen rakenne rajoittaa tulostettavissa olevia geometrioita verrattuna moniakselisiin robottijärjestelmiin, mikä on huomioitava jo kappaleen suunnittelussa. CNC-liikkeiden uudelleenohjelmointi ja tarkoituksenmukaisten liikeratastrategioiden kehittäminen ovatkin keskeisiä tekijöitä onnistuneessa WAAM-toteutuksessa.

1. Liikeratojen optimointi

WAAM-liikeratojen suunnittelu alkaa lisäysstrategian määrittelystä valmistettavan kappaleen geometrian perusteella. CAD-mallit on viipaloitava "slicing", joka määrittää kunkin kerroksen ääriviivat, mahdolliset täyttöalueet sekä liikeratojen etenemisjärjestyksen. CNC-ohjelman on ohjattava jokaisen kerroksen lisäys siten, että materiaalin kertymä pysyy tasaisena, palkogeometria yhtenäisenä ja lämpöolosuhteet hallittuina koko valmistuksen ajan.

Erityistä huomiota on kiinnitettävä tulostusratojen aloitus- ja lopetuspisteisiin, koska niihin liittyy usein suurempi riski virheille, kuten liialliselle lämmöntonniolle ja epätasaiselle materiaalin kertymälle. Liikeratojen suunnittelussa on pyrittävä mahdollisimman sujuviin ja jatkuviin liikkeisiin, jotta prosessi pysyy vakaana ja kappaleen laatu tasaisena.

Koska useimmat CNC-hitsaussolut perustuvat kolmiakseliseen liikkeeseen, ne asettavat rajoituksia valmistettavien kappaleiden geometrialle. Nämä kinematiikkaan liittyvät rajoitteet on huomioitava liikeratojen suunnittelussa. Geometriat on suunniteltava tai tarvittaessa mukautettava siten, että tulostus voidaan toteuttaa kiinteällä tai rajallisesti muuttuvalla polttimen orientaatiolla ilman tukemattomia overhang piirteitä. Jos tavoitteena on valmistaa monimutkaisempia geometrioita, järjestelmäsuunnittelussa on arvioitava pyöriä akseleiden tai muiden lisäliikejärjestelmien käyttöönottoa.

2. Adaptiivinen kerrosstrategia

Tulostuksessa olisi etu, jos CNC-ohjelmoinnissa on mahdollista tehdä parametrien säätäminen kerrosten välillä tai kappaleen eri alueilla geometrian, lämmön kertymisen perusteella. Adaptiiviset kerrosstrategiat voivat parantaa pinnanlaatua, vähentää mittapoikkeamia ja näin pienentää jälkikäsittelyn tarvetta. Ne tukevat myös tasaisempaa lämmönhallintaa, mikä on tärkeää erityisesti suurissa tai monikerroksisissa rakenteissa.

3. Reaaliaikainen anturi-integraatio

Mikäli järjestelmässä on käytettävissä antureita, jotka antavat reaaliaikaista informaatiota tulostusprosessista, niiden antama data voi merkittävästi parantaa liikeratojen hallintaa ja prosessin vakautta. Esimerkiksi lämpötila-anturit, kamerajärjestelmät tai geometrian seurantajärjestelmät voivat tuottaa tietoa kerrospaksuudesta, palon muodosta, lämpötilasta ja muista prosessin kannalta olennaisista muuttujista tulostuksen aikana.

CNC-ohjelma voidaan suunnitella hyödyntämään tätä anturipalautetta siten, että järjestelmä säätää esimerkiksi tulostusnopeutta, langansyöttönopeutta, energian tuontia tai kerrosten välistä jäähdytysaikaa takaisinkytkennällä prosessin aikana. Tällainen palauteohjattu toiminta takaisinkytkennällä parantaa prosessia, vähentää virheiden riskiä ja tukee tasalaatuisen lopputuloksen saavuttamista.

4. Offline-ohjelmointi

WAAM-sovelluksissa offline-ohjelmointi- ja simulointityökalujen käyttö on erittäin suositeltavaa. Offline-ohjelmoinnin ja simuloinnin avulla liikeratastrategiat voidaan suunnitella, generoida, testata ja validoida ennen varsinaista ajoa CNC-koneella.

Simuloinnin avulla voidaan tunnistaa mahdolliset törmäykset, ulottuvuusrajoitteet, epäedulliset liikeradat ja lämpökuormitukseen liittyvät ongelmat jo ennen tuotannon aloittamista. Samalla voidaan arvioida liikeratojen toimivuutta, ohjelmien rakennetta ja valmistusstrategioiden tarkoituksenmukaisuutta. Offline-ohjelmointi parantaa prosessin luotettavuutta, lyhentää koneella tehtävän testauksen tarvetta ja tukee tehokasta WAAM-tuotannon käyttöönottoa.

2.2.5 Tulostusprosessin kehitys ja validointi

Prosessin kehitys ja validointi ovat keskeisiä vaiheita sen varmistamiseksi, että CNC-pohjainen WAAM-järjestelmä toimii luotettavasti ja tuottaa komponentteja, jotka täyttävät niille asetetut laatu- ja muut vaatimukset. Toisin kuin perinteisessä hitsauksessa, WAAM-prosessi sisältää pitkäkestoista materiaalin tulostusta. Järjestelmällinen prosessinkehitys ja huolellinen validointi on hyvä tehdä ennen siirtymistä varsinaiseen tuotantokäyttöön. Tämä vaihe sisältää seuraavat osa-alueet:

1. Alkustestien suorittaminen

Prosessin kehitys alkaa alustavien tulostusparametrien testaamisella käytettävän materiaalin, langanhalkaisijan ja hitsausarvojen perusteella. Keskeisiä hitsausparametreja ovat muun muassa hitsausvirta, jännite, langansyöttönopeus, tulostusnopeus ja lisäksi suojakaasun koostumus vaikuttaa tulostuksen lopputulokseen. Lähtöarvot ovat suositeltavaa valita valmistajan ohjeiden, aiemman käyttökokemuksen tai julkaistujen WAAM-tutkimustulosten perusteella. Näin prosessinkehitys voidaan aloittaa hallitulta ja teknisesti perustellulta pohjalta.

2. Parametrien hienosäätö

Ensimmäisten tulostusten perusteella parametreja säädetään siten, että saavutetaan tasainen kerrosten laatu, haluttu kerrospaksuus ja hyvä geometria. Tavoitteena on tulostaa visuaalisesti hyvän näköistä materiaalia, jossa ei ole ulkoisesti näkyviä vikoja. Alkustestauksessa keskitytään yleensä yksittäisten palkojen ja yksikerroksisten rakenteiden valmistukseen, jotta voidaan arvioida valokaaren vakautta, palkogeometriaa ja pinnanlaatua. Näiden testien avulla määritetään sopiva parametrialue ja tunnistetaan mahdolliset ongelmat, kuten liialliset roiskeet tai liian epätasainen tulostuslaatu.

Kun yksittäisen palon tulostus on saatu vakaaksi ja toistettavaksi, siirrytään monikerroksisten rakenteiden, kuten seinämäkokeiden, valmistukseen. Näiden avulla voidaan arvioida kerrosten geometriaa ja pinnanlaatua. Nämä tulostukset vastaavat paremmin todellista WAAM-prosessia.

3. Lämmönhallinta

Lämmönhallinta on yksi prosessinkehityksen tärkeimmistä osa-alueista. Kerrosten välinen lämpötila, jäähtytysaika ja tulostusjärjestys on arvioitava ja optimoitava huolellisesti, jotta voidaan hallita jäännösjännityksiä, muodonmuutoksia sekä tulostettavan materiaalin mikrorakennetta. Liiallinen lämmön kertymä voi heikentää osien mittatarkkuutta ja materiaalin ominaisuuksia.

Lämmönhallintaa voidaan parantaa esimerkiksi hallituilla tauoilla, välipalkolämpötilan säätämällä, tulostussuunnan vaihtelulla tai segmentoidulla tulostusstrategialla. Näiden avulla voidaan saavuttaa tasaisempi lämpöjakauma koko valmistusprosessin aikana ja parantaa siten sekä rakenteen laatua että prosessin vakautta.

4. Laadunvarmistus

Geometrisen ja pinnanlaadun tarkastelun jälkeen myös materiaalin lujuusominaisuudet on arvioitava. WAAM-rakenteista valmistetuille koesauvoille ja muille näytteille voidaan tehdä mikrorakenneanalysit, kovuusmittaukset sekä tarvittaessa mekaaniset testit, kuten vetokokeet tai väsytestit. Näiden kokeiden avulla voidaan varmistaa, että tulostusprosessi tuottaa rakenteita, jotka täyttävät niille asetetut mekaaniset ominaisuudet ja laatuvaatimukset.

5. Prosessin dokumentointi

Koko prosessinkehitys- ja validointivaiheen kannattaa ylläpitää kattavaa ja järjestelmällistä dokumentaatiota. Tämä sisältää kaikkien käytettyjen prosessiparametrien, tulostus materiaalien, tulostus olosuhteiden, havaintojen ja testitulosten kirjaamisen. Huolellinen dokumentointi tukee jäljitettävyyttä, laadunvarmistusta, myöhempää prosessin optimointia sekä mahdollisten poikkeamien analysointia.

Dokumentoinnin avulla voidaan myös varmistaa, että kehitetty prosessi on toistettavissa ja siirrettävissä tuotantokäyttöön hallitusti. Samalla se muodostaa perustan työohjeille, validointikäytännöille ja tulevalle prosessin jatkuvalla kehittämiselle.

2.2.6 Turvallisuus näkökohdat ja käyttäjien koulutus

Siirtyminen perinteisestä CNC-hitsauksesta WAAM-prosessiin tuo mukanaan uusia toiminnallisia ja turvallisuuteen liittyviä haasteita, jotka on hallittava päivittämällä turvallisuutta ja järjestämällä kohdennettua henkilöstökoulutusta. WAAM-prosessit tuottavat pitkäkestoista valokaarialtistusta, suurempaa lämmöntuontia, sekä pitkiä koneen käyttöjaksoja, mikä edellyttää päivitettyjä turvallisuusratkaisuja ja laajempaa osaamista.

1. Käyttäjien koulutus

Operaattorit on koulutettava WAAM-spesifisiin tehtäviin, kuten parametrien säätöön ja prosessin hallintaan. Turvallisuuden kehittäminen tulee aloittaa muokatun CNC-solun kattavalla riskinarvioinnilla.

Olemassa olevat turvallisuusjärjestelmät on tarkistettava ja päivitettävä vastaamaan WAAM-prosessin erityisiä vaaratekijöitä, kuten pitkäaikaista altistumista kaarisäteilylle, kuumille pinnoille, roiskeille sekä lisääntyneelle savukaasujen muodostumiselle. CNC-solun tulee tarjota riittävä suoja kaarisäteilyltä. Myös kaikki hätäpysäytystoiminnot ja valoverhot yms. on varmistettava toimiviksi.

2. Turvallisuusmenettelyt

Tehokas savukaasujen poisto ja ilmanvaihto ovat välttämättömiä WAAM-prosessin jatkuvan luonteen vuoksi. Ilmanvaihtoratkaisut tulee suunnitella siten, että ne poistavat hitsaussavut tehokkaasti häiritsemättä suojakaasun suojausvaikutusta.

Paloturvallisuustoimenpiteitä on vahvistettava erityisesti pitkäkestoisten tai osittain miehittämättömien WAAM-tulostusten osalta. Tämä voi sisältää palonkestävien materiaalien käytön solurakenteessa, lämpötilanvalvontajärjestelmät sekä tarvittaessa automaattiset palonilmaisujärjestelmät.

3. Kunnossapitohenkilöstön koulutus

Huoltohenkilöstö on koulutettava erityisesti WAAM-järjestelmän laitteisiin, kuten hitsauspolttimiin, langansyöttöjärjestelmiin, jäädytysyksiköihin ja valvontalaitteisiin. Asianmukaiset kunnossapitokäytännöt ovat olennaisia vikojen ehkäisemiseksi, sillä laitehäiriöt voivat vaarantaa sekä turvallisuuden että prosessin vakauden.

2.2.7 Kunnossapito ja jatkuva parantaminen

Kun CNC-pohjainen WAAM-järjestelmä on otettu käyttöön, järjestelmällinen kunnossapito ja jatkuva kehittäminen kannattaa tehdä pitkän aikavälin luotettavuuden, tasaisen kappalelaadun ja tehokkaan tuotannon varmistamiseksi. WAAM-prosessi voi aiheuttaa perinteiseen CNC-hitsaukseen verrattuna suurempia lämpö- ja mekaanisia kuormituksia, minkä vuoksi ennakoivan kunnossapidon, prosessin seurannan ja jatkuvan optimoinnin merkitys korostuu. Tavoitteena on varmistaa, että järjestelmä toimii vakaasti, tuottaa tasalaatuisia kappaleita ja säilyttää tuotantokykynsä myös pitkäkestoisessa käytössä.

1. Säännölliset laitetarkastukset

Kunnossapitotoimenpiteiden tulee kohdistua kaikkiin järjestelmän toiminnan kannalta kriittisiin komponentteihin. Erityisesti hitsaukseen liittyvät osat, kuten hitsausvirtalähde, poltin ja langansyöttöjärjestelmä, on tarkastettava säännöllisesti, sillä pitkäkestoinen käyttö ja jatkuva langansyöttö lisäävät niiden kulumista. Kulutusosat on vaihdettava ennakoivasti, jotta voidaan välttää prosessin epävakaas, epätasainen palkogeometria, laatuvaihtelut ja suunnittelemattomat tuotantokatkokset.

Myös koneen mekaaniset osat, liikejärjestelmät, kaapeloinnit, jäähdytysjärjestelmät ja turvalaitteet on sisällytettävä säännölliseen huolto-ohjelmaan. Näin voidaan havaita kulumisen, säätötarpeet ja mahdolliset vikojen ensioireet ennen kuin ne vaikuttavat tuotannon jatkuvuuteen tai valmistettävien kappaleiden laatuun.

2. Parametrien seuranta ja säätö

Prosessiin liittyvä seuranta ja optimointi ovat yhtä tärkeitä kuin varsinainen mekaaninen huolto. Tallennettua prosessidataa tulee tarkastella säännöllisesti, jotta voidaan seurata hitsausparametrien toimivuutta. Poikkeamat määritellyistä prosessialueista voivat viitata esimerkiksi laitteiston kulumiseen, antureiden vikoihin tai parametrien hienosäädön tarpeeseen.

Jatkuva parametrien seuranta mahdollistaa ongelmien varhaisen tunnistamisen ja auttaa ehkäisemään laatuvirheitä ennen niiden syntymistä. Samalla se tukee prosessin vakauden ylläpitämistä ja luo perustan hallitulle optimoinnille.

3. Jatkuva kehittäminen datan perusteella

WAAM-prosessin aikana kerättyä dataa kannattaa hyödyntää aktiivisesti prosessiparametrien hienosäädössä ja tuotantosolun kehittämisessä. Myös pienillä parannustoimenpiteillä voidaan usein saavuttaa merkittäviä hyötyjä esimerkiksi tuottavuuden, prosessin vakauden, materiaalitehokkuuden ja kappalelaadun kannalta. Jatkuvan kehittämisen tulee perustua järjestelmälliseen datan keruuseen, tuotantokokemusten analysointiin ja havaintojen dokumentointiin.

Tuotantokappaleista, huoltotoimenpiteistä, prosessiseurannasta ja laaduntarkastuksista saadut havainnot on hyvä sisällyttää päivitettyihin prosessiparametreihin, käyttöohjeisiin, huoltosuunnitelmiin ja koulutusmateriaaleihin. Lisäksi säännölliset arviointipalaverit ja suorituskyvyn analyysit auttavat tunnistamaan uusia mahdollisuuksia tehokkuuden parantamiseen, laadun kehittämiseen ja järjestelmän jatkopäivityksiin.

3 Olemassa olevien laserhitsaus- ja leikkaussolujen muuntaminen laser-DED-sovelluksia varten

Olemassa olevan laserhitsaus- tai laserleikkaussolun muuntaminen laserpohjaiseksi Directed Energy Deposition (DED) -järjestelmäksi tarjoaa mahdollisuuden hyödyntää nykyistä laitteistoa ainetta lisäävässä valmistuksessa. Menetelmä soveltuu erityisesti metallikomponenttien valmistukseen, korjaukseen ja materiaalin lisäykseen kohteissa, joissa vaaditaan hyvää mittatarkkuutta, hallittua lämmöntuontia ja korkeaa tulostusprosessin laatua. Perinteiseen laserleikkaukseen tai laserhitsaukseen verrattuna laser-DED asettaa kuitenkin järjestelmälle uudenlaisia vaatimuksia, sillä prosessi perustuu jatkuvaan tulostukseen, tarkasti tehtävään materiaalin lisäykseen sekä reaaliaikaiseen prosessin valvontaan, tasaisen kerrosrakenteen ja laadukkaan lopputuloksen saavuttamiseksi.

Tämän vuoksi muunnosprosessi ei rajoitu yksittäisiin laitemuutoksiin, vaan edellyttää kokonaisvaltaista tarkastelua, joka kattaa laitteiston, ohjelmistot, ohjausjärjestelmät, prosessinhallinnan sekä turvallisuusratkaisut. Järjestelmän on kyettävä hallitsemaan samanaikaisesti lasertehoa, lisääneen syöttöä, työstöratoja ja lämpöolosuhteita siten, että materiaalin lisäys pysyy vakaana koko tulostusprosessin ajan. Onnistunut muutos edellyttää myös sitä, että olemassa olevan solun rakenteelliset ja tekniset ominaisuudet tukevat laser-DED-prosessin vaatimaa tarkkuutta ja toistettavuutta.

Tässä luvussa esitetään lyhyesti keskeiset vaiheet olemassa olevan laserpohjaisen valmistussolun muuntamiseksi laser-DED-järjestelmäksi. Tarkastelu kattaa toteutettavuusarvioinnin ja suunnittelun, tarvittavat laitteistopäivitykset, ohjelmisto- ja ohjausjärjestelmäintegraation, koulutus- ja turvallisuusnäkökohdat, testauksen ja kalibroinnin sekä täysimittaisen käyttöönoton. Tavoitteena on tuoda esiin lähtökohdat hallitulle, turvalliselle ja teollisesti käyttökelpoiselle laser-DED-toteutukselle hyödyntämällä mahdollisimman tehokkaasti olemassa olevaa laserpohjaista infrastruktuuria.

3.1 Arviointi ja suunnittelu

Olemassa olevan laserhitsaus- tai laserleikkaussolun muuntaminen laserpohjaiseksi DED-järjestelmäksi tulee aloittaa kattavalla arviointi- ja suunnitteluvaiheella. Tämä vaihe on tarpeen teknisen toteutettavuuden varmistamiseksi, tarvittavien järjestelmämuutosten tunnistamiseksi sekä toteutukseen liittyvien riskien minimoimiseksi ennen merkittäviä investointeja.

Arviointi alkaa nykyisen lasersolun infrastruktuurin yksityiskohtaisella tarkastelulla. Tarkastelun kohteena ovat muun muassa laserlähde, säteenohjaus- ja optiikkakomponentit, liikejärjestelmä, konekotelointi, apulaitteet sekä muut järjestelmän toiminnan kannalta olennaiset käyttöjärjestelmät. Tavoitteena on selvittää, soveltuuko nykyinen järjestelmä jatkuvaan, DED-prosessissa tapahtuvaan materiaalin lisäykseen, joka poikkeaa merkittävästi perinteisen laserleikkauksen tai -hitsauksen toimintatavasta.

Laserlähteen soveltuvuus on yksi arvioinnin keskeisimmistä osa-alueista. Käytetyn lasertyyppin, kuten kuitulaserin, diodilaserin, CO₂-laserin, Nd:YAG-laserin tai Yb:YAG-laserin, yhteensopivuus DED-prosessin kanssa on arvioitava huolellisesti. Käytännössä kuitulaserit ovat yleisimmin käytettyjä niiden korkean hyötysuhteen, hyvän säteenlaadun sekä hyvän yhteensopivuuden koaksiaalisten ja sivusyöttöisten tulostuspäiden/laitteiden kanssa. Käytettävissä olevan lasertehon on oltava riittävä halutun

lisäainemateriaalin hallittuun sulattamiseen. Tyypillisesti laser-DED-sovelluksissa tarvitaan yli 500 watin teho riippuen materiaalista, tulostusnopeudesta ja osan kerrosgeometriasta. Mikäli laserin teho ei ole riittävä tai sen säätö ei mahdollista tarkkaa prosessinhallintaa, järjestelmä saattaa vaatia päivityksen tai koko laserlähteen korvaamisen. Myös useamman laserlähteen käyttö on mahdollista.

Myös optinen järjestelmä ja säteen siirtoon liittyvät komponentit on arvioitava huolellisesti. Laserleikkaus- ja laserhitsausjärjestelmien optiikka on usein optimoitu kapeaan leikkausraon muodostamiseen tai syvään tunkeumaan, eivätkä nämä ominaisuudet välttämättä sovellu hallittuun sulan muodostukseen lisäaineesta, jota DED-prosessi edellyttää. Laser-DED-sovelluksissa säteen muodon, fokuksipisteen ja syvyysterävyyden on mahdollistettava lisäaineen sulattaminen hallitusti. Tämä voi edellyttää muutoksia optiikkaan, jotta materiaalin tulostus pysyy tasaisena ja toistettavana koko prosessin ajan.

Lämmönhallinta on toinen keskeinen arviointikohde. Laser-DED tuottaa pitkäkestoista lämmöntuontia verrattuna moniin perinteisiin laserprosesseihin, minkä vuoksi olemassa olevien jäähdytysjärjestelmien kapasiteetti on arvioitava huolellisesti. Tarkoituksena on varmistaa, että järjestelmä kykenee jatkuvaan käyttöön ilman, että optiset komponentit, laserlähde tai mekaaniset rakenteet ylikuumenevat. Tarvittaessa jäähdytyskapasiteettia voidaan lisätä esimerkiksi tehokkaammalla vesijäähdytyksellä, paikallisilla lämpösuojauksilla tai muilla lämpökuormaa hallitsevilla ratkaisuilla vakaiden käyttöolosuhteiden ylläpitämiseksi.

Liikejärjestelmä ja työalue on tarkastettava rinnakkain muiden osa-alueiden kanssa. Käytettävissä olevan tulostustilan, akselikonfiguraation, paikoitustarkkuuden ja dynaamisen suorituskyvyn on oltava riittäviä monikerroksiseen materiaalin tulostukseen. Lisäksi on varmistettava, että tulostuspäällä, materiaalin syöttöjärjestelmällä ja mahdollisilla valvontalaitteilla on riittävästi tilaa. Samalla on huolehdittava siitä, että kappaleen tulostamiselle, suojarakenteille ja huoltotoimenpiteille jää riittävästi tilaa.

Myös käyttöjärjestelmät ja infrastruktuuri on arvioitava osana kokonaisuutta. Tämä sisältää sähkötehon saatavuuden, suojavaatimukset, jauhe- tai lankasyöttöjärjestelmät, ilmanvaihdon sekä savukaasujen ja hiukkasten poiston. Erityisesti jauhepohjaisissa laser-DED-ratkaisuissa voi syntyä hienojakoisia hiukkasia ja metallihöyryjä, mikä asettaa erityisiä vaatimuksia ilmanvaihdolle ja työympäristön turvallisuudelle.

Suunnitteluvaiheessa on määriteltävä selkeästi myös tekniset, tuotannolliset ja sovelluskohtaiset vaatimukset. Näihin kuuluvat käytettävät materiaalit, tavoitellut kappalekoot, geometrian monimutkaisuus ja mittatoleranssit. Nämä tekijät vaikuttavat siihen, onko laser-DED tarkoituksenmukaisin valmistusmenetelmä kyseiseen sovellukseen, ja ne ohjaavat samalla järjestelmäkonfiguraation valintaa.

Osana arviointia on syytä tehdä myös investointi- ja kustannus-hyötyanalyysi. Lasersolun muuntamisesta aiheutuvat kustannukset, kuten tulostuspäät, materiaalin syöttöjärjestelmät, ohjelmistot, koulutus ja turvallisuuspäivitykset, on suhteutettava saavutettaviin hyötyihin. Näitä voivat olla esimerkiksi lisääntynyt joustavuus, lyhentyneet toimitusajat, materiaalin säästöt sekä uudet sovellus- ja liiketoimintamahdollisuudet. Tällainen analyysi tukee päätöksentekoa ja auttaa arvioimaan, onko muutos teknisesti ja taloudellisesti perusteltu.

Turvallisuus- ja viranomaisvaatimukset on sisällytettävä suunnitteluprosessiin alusta alkaen. Suuritehoisten laserien käyttö, jatkuva tulostusprosessi sekä mahdollinen metallijauheiden käsittely tuovat mukanaan lisäturvallisuusvaatimuksia verrattuna tavanomaiseen laserleikkaukseen tai -hitsaukseen. Suunnittelussa on varmistettava, että sovellettavat laserturvallisuusstandardit, työterveys- ja työturvallisuusmääräykset sekä ympäristövaatimukset täyttyvät. Näiden huomioiminen jo suunnitteluvaiheessa vähentää käyttöönoton riskejä ja helpottaa järjestelmän turvallista käyttämistä teollisessa ympäristössä.

3.2 Laitteiston päivitykset

Laitteistopäivitykset ovat keskeinen vaihe olemassa olevan laserhitsaus- tai laserleikkaussolun muuntamisessa laserpohjaiseksi DED-järjestelmäksi. Vaikka osa alkuperäisen lasersolun

peruskomponenteista voidaan hyödyntää myös uudessa käyttötarkoituksessa, lisäävä valmistus asettaa järjestelmälle uusia vaatimuksia erityisesti tulostuspään, materiaalinsyöttöjärjestelmien, lämmönhallinnan sekä koko laitteiston kestävyuden ja toimintavarmuuden osalta. Tämän vuoksi laitteiden huolellinen valinta, mitoitus ja integrointi ovat välttämättömiä vakaan, toistettavan ja turvallisen DED-prosessin varmistamiseksi.

Yksi merkittävimmistä laitepäivityksistä on varsinaisen laser-DED-tulostuspään integrointi järjestelmään. Laser-DED:ssä käytettävä lisäyspää poikkeaa olennaisesti perinteisestä leikkaus- tai hitsausoptiikasta, koska sen on mahdollistettava lasersäteen ja lisäainemateriaalin tarkka kohdistus tulostuskohdassa. Valitun prosessin mukaan tulostuspää voidaan valita joko jauhe- tai lankasyöttöä varten. Jauhepohjaisissa ratkaisuissa käytetään tavallisesti koaksiaalisia tulostuspäätä, jonka avulla metallijauhe sulatetaan hallitusti. Lankapohjaisissa ratkaisuissa lisäaine syötetään kiinteänä lankana suoraan prosessialueelle koaksiaalisesti tai sivusyöttönä. Valitun tulostuspään on oltava yhteensopiva olemassa olevan laserlähteen, optiikan ja liikejärjestelmän kanssa.

Materiaalinsyöttöjärjestelmät on asennettava tai päivitettävä siten, että lisäainemateriaalin syöttö pysyy jatkuvana ja tasaisena koko valmistusprosessin ajan. Jauhepohjaisessa DED-prosessissa tämä tarkoittaa jauheensyöttölaitteistoa ja suuttimia, joiden on tuotettava tasainen jauhevirta ilman merkittäviä vaihteluita. Lisäksi jauheen käsittelyssä on kiinnitettävä huomiota kontaminaation ehkäisyyn, kosteuden hallintaan ja tarvittaessa myös jauheen talteenottoon ja kierrätykseen. Lankapohjaisessa DED-järjestelmässä tarvitaan luotettava langansyöttölaite, jossa syöttönopeuden säätö on tarkkaa ja vakaata. Langansyötön on oltava synkronoitu lasertehon ja liikejärjestelmän nopeuden kanssa, jotta materiaalin lisäys pysyy tasaisena ja sulan käyttäytyminen hallittuna.

Tulostusalusta ja kiinnitysjärjestelmät on mukautettava ainetta lisäävän valmistuksen vaatimuksiin. Perinteiset leikkauspöydät ja hitsauskiinnittimet voivat soveltua tulostettaville rakenteille ja pitkäkestoiselle lämpökuormitukselle. Järjestelmään voidaan riittävän jäykkä ja lämpöä kestävä rakennuslevy tai alusta, jonka päälle kappale voidaan tulostaa. Tarvittaessa voidaan käyttää lisäkiinnityksiä tai muita tukirakenteita muodonmuutosten, siirtymien ja värähtelyjen minimoimiseksi. Tulostusalustan rakentaminen vaikuttaa suoraan sekä mittatarkkuuteen että prosessin vakauteen.

Lämmönhallinta ja jäähdytysjärjestelmät vaativat erityistä huomiota laitepäivitysten yhteydessä. Laser-DED tuottaa jatkuvaa lämmöntuotantaa, joka voi vaikuttaa optisiin komponentteihin, tulostuspäähän, koneen rakenteisiin ja muihin ympäröiviin järjestelmän osiin. Olemassa olevien jäähdytysjärjestelmien kapasiteetti on arvioitava huolellisesti, ja niitä on tarvittaessa päivitettävä jatkuvaa käyttöä varten. Lisäjäähdytyspiirit, tehostettu vesijäähdytys tai paikalliset lämpösuojaukset voivat olla tarpeen herkkien komponenttien suojaamiseksi ja vakaiden käyttöolosuhteiden ylläpitämiseksi. Riittävä lämmönhallinta on samalla tärkeä edellytys sekä prosessin laadulle että laitteiston pitkäaikaiselle kestävyydelle.

Suojakaasujärjestelmät on mukautettava DED-käyttöön, koska inertti suojakaasu on useimmiten välttämätön sulan ja kerrostetun materiaalin hapettumisen estämiseksi. Kaasun syöttöjärjestelmän on tuotettava tasainen virtaus ja tarjottava riittävä suoja tulostusalueelle. Joissakin sovelluksissa voidaan lisäksi hyödyntää paikallista suojakaasukammiota tai suljettua työtilaa, jos tavoitteena on parantaa materiaalin laatua tai vähentää herkkien materiaalien hapettumista.

Savukaasujen poistojärjestelmät on päivitettävä vastaamaan laser-DED-prosessissa syntyvien metallihöyryjen ja hienojakoisten hiukkasten aiheuttamaa kuormitusta, erityisesti jauhepohjaisissa ratkaisuissa. Poistojärjestelmän on toimittava tehokkaasti siten, että epäpuhtaudet poistuvat prosessialueelta ilman, että optiikka, suojakaasuvirtaus tai materiaalin tulostus häiriintyvät. Tämä on tärkeää sekä työympäristön turvallisuuden että prosessin laadun kannalta.

Laitteistopäivityksiin voi sisältyä myös valvonta- ja diagnostiikkajärjestelmien integrointi. Kamerateat, kerroskorkeuden mittausjärjestelmät ja muut optiset tai lämpötilaan perustuvat mittalaitteet voivat tuottaa reaaliaikaista tietoa prosessin vakaudesta, sulan käyttäytymisestä ja kerrostuksen laadusta. Näiden järjestelmien sijoittelu, suojaus ja huollettavuus on suunniteltava huolellisesti, jotta lämpö, roiskeet, pöly ja mahdollinen kontaminaatio eivät heikennä niiden toimintaa.

Kaikki päivitettyt laitteet on integroitava mekaanisesti ja sähköisesti olemassa olevaan lasersoluun kestäväällä, turvallisella ja huollettavalla tavalla. Kaapeloinnin, letkujen, suojarakenteiden ja muiden liitäntöjen on kestävä jatkuvaa käyttöä ja mahdollistettava turvallinen pääsy huolto-, puhdistus- ja tarkastustoimenpiteisiin. Hyvin suunniteltu integrointi helpottaa käyttöönottoa, vähentää häiriöitä ja parantaa järjestelmän elinkaaren hallintaa.

Laitteistopäivityksiä ei tule tarkastella yksittäisinä muutoksina, vaan kokonaisvaltaisena järjestelmätason kehityshankkeena. Tulostuspään, materiaalinsyötön, lämmönhallinnan, suojakaasuratkaisujen ja valvontajärjestelmien yhteensopiva integraatio on ratkaiseva tekijä luotettavan, turvallisen ja teollisesti käyttökelpoisen laser-DED-prosessin saavuttamisessa.

3.3 Ohjelmisto- ja ohjausjärjestelmien integrointi

Tehokas ohjelmisto- ja ohjausjärjestelmäintegraatio on keskeinen edellytys laserpohjaisen DED-prosessin onnistuneelle käyttöönotolle. Perinteisestä laserleikkauksesta tai -hitsauksesta poiketen laser-DED perustuu jatkuvaan materiaalin lisäykseen, jossa liikkeenohjauksen, lasertehon, lisäainemateriaalin syötön ja prosessin valvonnan on toimittava saumattomasti yhdessä. Tämän vuoksi ohjelmistoympäristön on tuettava kehittynyttä liikeratasuunnittelua, reaaliaikaista prosessinohjausta sekä prosessidatan hallintaa. Hyvin toteutettu integraatio parantaa prosessin vakautta, kappaleen laatua, jäljitettävyyttä ja järjestelmän käyttövarmuutta.

Integraatioprosessi alkaa arvioimalla, soveltuuko olemassa oleva CNC- tai liikkeenohjausjärjestelmä lisäävän valmistuksen käyttöön. Ohjaimen on kyettävä suorittamaan pitkiä ja monimutkaisia ohjelmia tasaisella, keskeytymättömällä liikkeellä samalla, kun laserteho, materiaalinsyöttö ja mahdolliset prosessitauot pysyvät tarkasti synkronoituina. Mahdolliset rajoitukset ohjaimen laskentakapasiteetissa, muistissa, ohjelmistorakenteessa tai tiedonsiirtorajapinnoissa on tunnistettava varhaisessa vaiheessa. Tarvittaessa nämä rajoitteet on ratkaistava ohjainpäivityksillä, erillisillä prosessinohjausmoduuleilla tai ulkoisilla reaaliaikaisilla ohjausratkaisuilla.

Laser-DED-prosessissa tarvitaan lisäksi lisäävään valmistukseen soveltuva ohjelmisto työkaluratojen tuottamiseksi CAD-malleista. Ohjelmiston tehtävänä on muuntaa kolmiulotteinen geometria kerrospohjaisiksi tulostusradoiksi sekä määrittää esimerkiksi kerroskorkeus, palkojen limitys, tulostussuunta, täyttöstrategia ja materiaalin lisäysjärjestys. Valitun ohjelmiston on oltava yhteensopiva käytössä olevan ohjausarkkitehtuurin kanssa, ja sen on pystyttävä tuottamaan ohjaimen ymmärtämässä muodossa olevat ohjelmat tai ohjauskomennot. Käytännössä offline-ohjelmointi ja simulointityökalut ovat erittäin suositeltavia, koska niiden avulla voidaan tarkistaa työkaluradat, arvioida saavutettavuus, tehdä törmäystarkasteluja ja optimoida lisäysstrategiat ennen varsinaista koneajoa. Tämä vähentää käyttöönottoon liittyviä riskejä ja lyhentää kehitysaikaa.

Liikkeenohjaimen ja laserlähteen välinen tiivis integraatio on välttämätön vakaan DED-prosessin saavuttamiseksi. Ohjausjärjestelmän tulee mahdollistaa lasertehon, tulostusnopeuden ja lisäainemateriaalin syöttönopeuden synkronoitu hallinta siten, että energiansyöttö ja materiaalin lisäys pysyvät tasapainossa koko prosessin ajan. Digitaaliset tiedonsiirtorajapinnat ovat suositeltavia, koska ne parantavat parametrioituksen tarkkuutta, toistettavuutta ja diagnosoitavuutta. Kehittyneemmissä ratkaisuissa järjestelmä voi mahdollistaa dynaamisen parametrien säädön esimerkiksi geometrian muutosten, liikkumisnopeuden vaihtelun, lämpötilan tai sulan käyttäytymisen perusteella. Tämä parantaa prosessin vakautta erityisesti monimutkaisissa rakenteissa ja pitkissä valmistusajoissa.

Materiaalinsyöttöjärjestelmä, olipa kyseessä jauhe- tai lankapohjainen ratkaisu, on integroitava osaksi samaa ohjausarkkitehtuuria. Ohjelmiston on hyvä mahdollistaa jauhevirran tai langansyötön koordinoitu säätö suhteessa lasertehoon ja liikkeeseen. Erityisen tärkeää on, että syötön aloitus, lopetus ja mahdolliset siirtymävaiheet tapahtuvat hallitusti, jotta vältetään liiallinen materiaalin kertymä, epäjatkuvuudet tai kerrosten välinen epätasaisuus. Vakaa ja ennakoitava materiaalinsyöttö on yksi tärkeimmistä edellytyksistä tasaisen palkogeometrian ja riittävän mittatarkkuuden saavuttamiselle.

Valvontajärjestelmien ja takaisinkytkennän merkitys korostuu laser-DED-sovelluksissa. Ohjelmistoympäristön tulee tukea erilaisten antureiden, kuten pyrometrien, lämpökameroiden, kerroskorkeuden mittaajajärjestelmien ja muiden optisten tai lämpötilan mittalaitteiden integrointia. Näiden tuottamaa tietoa voidaan hyödyntää reaaliaikaisessa prosessin valvonnassa, laadunvarmistuksessa ja kehittyneimmissä toteutuksissa. Tällöin järjestelmä voi säätää esimerkiksi lasertehoa, syöttönopeutta tai etenemisnopeutta mittaustiedon perusteella. Lisäksi prosessidatan järjestelmällinen tallennus tukee jäljitettävyyttä, poikkeamien analysointia ja jatkuvaa prosessin optimointia.

Ohjelmisto- ja ohjausjärjestelmäintegraatiossa on tärkeää huomioida myös parametrienhallinta. Käytännössä järjestelmään on hyödyllistä rakentaa selkeä rakenne, jossa materiaalikohtaiset ja sovelluskohtaiset prosessiasetukset voidaan tallentaa, hallita ja ottaa käyttöön hallitusti. Tällaisia asetuksia voivat olla esimerkiksi laserteho, syöttönopeus, suojakaasun asetukset, kerrosstrategiat ja jäähdytykseen liittyvät parametrit. Hallittu parametrienhallinta vähentää käyttövirheitä, tukee toistettavuutta ja helpottaa prosessin siirtämistä kehitysympäristöstä tuotantoon.

Myös käyttöliittymän ja järjestelmän käytettävyyden suunnittelu on tärkeä osa integraatiota. Käyttäjällä tulee olla selkeä näkyvä prosessin tilaan, aktiivisiin asetuksiin, hälytyksiin, anturitietoihin ja mahdollisiin poikkeamiin. Käyttöliittymän on tuettava turvallista ja loogista työskentelyä sekä mahdollistettava parametrien säätäminen vain määritellyissä rajoissa. Hyvin suunniteltu käyttöliittymä vähentää inhimillisten virheiden riskiä, nopeuttaa käyttöönottovaihetta ja parantaa koko järjestelmän luotettavuutta.

Lisäksi integraatiossa on huomioitava ohjelmistojen ylläpidettävyyden ja muutosten hallinta. Ohjauslogiikka, käyttöliittymäasetukset, liikeratagenerointi, anturiliitännät ja prosessireseptit on hyvä dokumentoida versionhallinnan periaatteiden mukaisesti. Näin voidaan varmistaa, että järjestelmän muutokset ovat jäljitettävissä, ohjelmistopäivitykset hallittuja ja mahdolliset virhetilanteet helpommin diagnosoitavia. Tämä on erityisen tärkeää teollisissa ympäristöissä, jotta järjestelmän luotettavuus ja tuotannon jatkuvuus ovat keskeisiä vaatimuksia.

Kaikki ohjelmisto- ja ohjausjärjestelmäintegraatit on testattava ja validoitava perusteellisesti ennen tuotantokäyttöä. Käyttöönottoon tulee sisältyä koerakennuksia, joiden avulla varmistetaan tiedonsiirron vakaus, parametrien oikea synkronointi, anturien toimivuus sekä pitkäkestoisten lisäprosessien luotettava suoritus. Samalla on tarkistettava, että ohjelmistokonfiguraatit, rajapinnat, turvatoiminnot ja käyttömenettelyt toimivat suunnitellusti myös poikkeustilanteissa. Huolellinen validointi ja dokumentointi luovat perustan toistettavalle, ylläpidettävälle ja teollisesti käyttökelpoiselle laser-DED-järjestelmälle.

3.4 Koulutus ja turvallisuus

Olemassa olevan laserhitsaus- tai laserleikkaussolun muuntaminen laserpohjaiseksi DED-järjestelmäksi tuo mukanaan uusia operatiivisia, teknisiä ja turvallisuuteen liittyviä vaatimuksia. Laser-DED-prosessi perustuu jatkuvaan suuritehoisen laserin käyttöön, materiaalin hallittuun lisäykseen ja joissakin tapauksissa myös metallijauheiden käsittelyyn. Tämän vuoksi järjestelmän turvallinen ja tehokas käyttö edellyttää sekä laajennettuja turvallisuus menettelyjä että kohdennettua henkilöstökoulutusta. Pelkkä olemassa olevan lasersolun tekninen muuntaminen ei riitä, vaan samalla on varmistettava, että käyttäjillä, ohjelmoijilla, kunnossapitohenkilöstöllä ja valvojilla on riittävä osaaminen uuden prosessin hallintaan.

Koulutusta on tarjottava kaikille henkilöille, jotka osallistuvat laser-DED-järjestelmän käyttöön, ohjelmointiin, kunnossapitoon, laadunvalvontaan tai prosessin seurantaan. Käyttäjien on ymmärrettävä laser-DED-prosessin peruseräatteen, kuten tulostuksen perusteet sekä lasertehon, lisäainemateriaalin syöttönopeuden ja tulostusnopeuden välinen vuorovaikutus. Näiden ilmiöiden ymmärtäminen on keskeistä laadun varmistamiseksi ja poikkeavien tilanteiden tunnistamiseksi riittävän ajoissa.

Prosessiosaamisen lisäksi koulutuksen tulee kattaa päivitettyjen laitteisto- ja ohjelmistojärjestelmien käyttö. Tämä sisältää lisäävän valmistuksen ohjelmistojen käytön, parametrien hallinnan, prosessivalvontadatan tulkinnan sekä turvallisten käynnistys-, pysäytys- ja palautusmenettelyjen toteuttamisen. Käyttäjien on

osattava toimia järjestelmällisesti myös häiriötilanteissa ja ymmärrettävä, miten yksittäiset prosessiparametrit vaikuttavat lopputuloksen laatuun ja prosessin turvallisuuteen. Huoltohenkilöstölle on puolestaan annettava erillinen koulutus laser-DED-järjestelmän erityiskomponenteista, kuten tulostuspäistä, optisista järjestelmistä, jauhe- tai langansyöttölaitteista, jäähdytysjärjestelmistä sekä prosessin valvontalaitteista. Näin varmistetaan, että järjestelmän kunnossapito voidaan toteuttaa turvallisesti ja oikein.

Turvallisuus menettelyt on tarkistettava ja päivitettävä vastaamaan laser-DED-prosessiin liittyviä erityisriskejä. Suuritehoinen lasersäteily aiheuttaa merkittäviä vaaroja, minkä vuoksi järjestelmässä on oltava asianmukainen laserluokitus, riittävä suojakotelointi, turvalukitukset sekä pääsynhallintajärjestelmät. Henkilöstön on saatava koulutus laserturvallisuudesta, mukaan lukien mahdollinen suojalasien oikea käyttö, rajattujen alueiden määrittely, säteilyvaaran tunnistaminen sekä toiminta hätätilanteissa sovellettavien määräysten mukaisesti. Myös optiikan puhdistukseen, kohdistukseen ja huoltoon liittyvät riskit on huomioitava, sillä niihin voi liittyä sekä säteilyvaara.

Jos käytössä on jauhepohjainen DED-prosessi, turvallisuusvaatimukset laajenevat merkittävästi materiaalinkäsittelyn suuntaan. Henkilöstöä on koulutettava metallijauheiden turvalliseen varastointiin, käsittelyyn, siirtoon ja hävittämiseen. Samalla on varmistettava, että käyttäjät tunnistavat hienojakoisiin metallijauheisiin liittyvät hengitystie-, palo- ja räjähdysriskit. Ilmanvaihto- ja suodatusjärjestelmien on poistettava hienojakoiset hiukkaset ja metallihöyryt tehokkaasti, ja henkilöstön on ymmärrettävä näiden järjestelmien oikea käyttö, kunnossapito ja toimintakunnon seuranta. Myös puhtaanapitoon ja pölyn kertymisen estämiseen liittyvät käytännöt ovat tärkeitä, jotta turvallisuus voidaan varmistaa koko työympäristössä.

Paloturvallisuus on erityisen tärkeä jatkuvan lasertulostuksen, kuumien pintojen ja korkeiden lämpötilojen vuoksi. Turvallisuusjärjestelyihin tulee sisällyttää palonkestävät materiaalit solun rakenteissa, kriittisten lämpötilojen seuranta, sopivat sammutusvälineet sekä selkeät toimintaohjeet poikkeus- ja hätätilanteita varten. Joissakin sovelluksissa, erityisesti pitkäkestoisessa tai osittain miehittämättömässä käytössä, voidaan tarvita automaattisia palonilmaisujärjestelmiä. Lisäksi on varmistettava, että henkilöstö tuntee paloturvallisuuteen liittyvät toimintamallit ja osaa toimia nopeasti sekä turvallisesti mahdollisissa vaaratilanteissa.

Selkeät käyttöohjeet ja työmenettelyt on laadittava ja viestittävä kaikille järjestelmän käyttöön osallistuville henkilöille. Dokumentaation tulee määritellä vastuut, käyttöoikeudet, turvalliset käyttörajat, kunnossapitomenettelyt sekä toimintatavat prosessipoikkeamien, hälytysten tai laitevikojen yhteydessä. Häätäpysäytysjärjestelmät, turvalukitukset ja muut turvallisuustoiminnot on testattava säännöllisesti niiden toimintavarmuuden varmistamiseksi. Turvallisuuden hallinta ei saa perustua pelkästään teknisiin suojausratkaisuihin, vaan sen on oltava osa koko järjestelmän käyttö- ja ylläpitokulttuuria.

Kokonaisuutena onnistunut laser-DED-järjestelmän käyttöönotto edellyttää, että tekniset järjestelmät, käyttäjien osaaminen ja turvallisuusmenettelyt muodostavat yhtenäisen ja hallitun kokonaisuuden. Kun henkilöstö on koulutettu asianmukaisesti ja turvallisuusprotokollat on päivitetty vastaamaan uuden prosessin vaatimuksia, voidaan järjestelmää käyttää tehokkaasti, luotettavasti ja turvallisesti myös vaativissa teollisissa sovelluksissa.

3.5 Testaaminen ja kalibrointi

Ennen kuin muunnettua laserhitsaus- tai laserleikkaussolua voidaan käyttää tuotantotason laser-DED-valmistukseen, on suoritettava kattava testaus- ja kalibrointivaihe. Tämä vaihe on välttämätön järjestelmän toimivuuden varmistamiseksi, prosessin vakauden arvioimiseksi sekä sen todentamiseksi, että päivitettyt laitteistot, ohjelmistot ja ohjausjärjestelmät toimivat yhdessä suunnitellulla tavalla. Huolellinen testaus vähentää käyttöönottoon liittyviä riskejä, tukee laadunvarmistusta ja luo perustan toistettavalle tuotannolle.

Testaus tulee aloittaa järjestelmätason verifiointilla, jossa tarkastetaan kaikkien integroitujen komponenttien toiminta kokonaisuutena. Tähän kuuluu laserlähteen, tulostuspään, materiaalinsyöttöjärjestelmän, liikejärjestelmän, suojakaasujärjestelmän, jäähdytysjärjestelmien sekä valvonta- ja mittalaitteiden toiminnan varmistaminen. Samalla on tarkistettava liikkeenohjaimen, laserteholähteen ja materiaalinsyöttöjärjestelmän välinen tiedonsiirto, jotta lasertehon, tulostusnopeuden ja materiaalin syöttönopeuden tarkka synkronointi voidaan varmistaa. Järjestelmätason verifiointi on tärkeää, koska yksittäisten komponenttien toimivuus ei vielä yksin takaa koko prosessin hallittua toimintaa.

Laser-DED-lisäyspään kalibrointi on yksi kriittisimmistä käyttöönoton vaiheista. Lasersäteen ja lisäainemateriaalin, eli jauheen tai langan, välinen kohdistus on säädettävä erittäin tarkasti, jotta materiaali sulaan johdonmukaisesti ja hallitusti. Virheellinen kohdistus voi johtaa epävakaaseen tulostusprosessiin, heikkoon tulostetun materiaalin laatuun, ylimääräiseen roiskeeseen tai epätasaisen geometrian muodostumiseen. Myös fokuskorkeus ja säteen halkaisija on säädettävä valitun materiaalin, tulostusstrategian ja tavoitellun kerrosgeometrian mukaisesti. Näillä säädöillä on suora vaikutus sulan vakauteen ja tulostetun materiaalin laatuun.

Myös materiaalinsyötön säätäminen on tehtävä huolellisesti vakaan ja toistettavan syötön varmistamiseksi. Jauhepohjaisissa järjestelmissä on säädettävä ja tarkistettava esimerkiksi jauhevirtausnopeus, kuljetuskaasun paine, suuttimen kohdistus sekä syötön tasaisuus pitkäkestoisessa käytössä. Lankapohjaisissa järjestelmissä on varmistettava, että langansyöttönopeus toimii tarkasti ja pysyy synkronissa lasertehon sekä liikejärjestelmän kanssa. Epätasainen materiaalinsyöttö voi aiheuttaa palkogeometrian vaihtelua, sulan epävakautta ja laadun heikkenemistä, joten syöttöjärjestelmän toiminnan luotettavuus on keskeinen osa koko prosessin onnistumista.

Prosessiparametrien testaus on toteutettava koetulostusten avulla. Alkuvaiheessa keskitytään yksittäisiin kerroksiin, jotta voidaan arvioida sulan vakautta, palkogeometriaa ja pinnanlaatua. Näiden kokeiden avulla määritellään sopivat parametri-ikkunat laserteholle, materiaalinsyöttönopeudelle, tulostusnopeudelle ja suojakaasuvirtaukselle. Kun vakaa tulostus on saavutettu yhden kerroksen testeissä, siirrytään monikerroksisten rakenteiden valmistukseen. Tällöin voidaan arvioida lämmön kertymistä, geometrian hallintaa, mittapysyvyyttä ja mahdollisia laatupoikkeamia todellista valmistustilannetta paremmin vastaavissa olosuhteissa.

Lämpökäyttäytyminen on arvioitava huolellisesti koko testausvaiheen ajan. Lämpötilamittaukset, visuaalinen seuranta ja mahdolliset lämpökamerat tai pyrometrit auttavat arvioimaan lämmön kertymistä, jäähdytyksen tehokkuutta sekä lämpömuodonmuutosten, jäännösjännitysten tai halkeilun riskiä. Havaintojen perusteella voidaan säätää kerrosten välistä jäähdytysaikaa, tulostusjärjestystä, liikeratoja tai muita prosessiparametreja, jotta saavutetaan mahdollisimman vakaa lämpötilatasapaino. Lämmönhallinnan optimointi on erityisen tärkeää monikerroksisissa rakenteissa, joissa lämpökuorma kasvaa valmistuksen edetessä.

Myös valvonta- ja anturijärjestelmät on testattava ja kalibroitava tässä vaiheessa. Kameran, kerroskorkeuden mittausjärjestelmät sekä muut prosessin seurantalaitteet on kohdistettava ja konfiguroitava siten, että ne tuottavat luotettavaa, käyttökelpoista ja toistettavaa dataa. Samalla on validoitava hälytysrajat, datankeruutoiminnot ja mahdolliset palautesilmukat, jotta prosessivalvonta toimii luotettavasti sekä normaalitilanteissa että poikkeamien aikana. Anturijärjestelmien toimivuus on tärkeää sekä laadunvarmistuksen että jäljitettävyyden kannalta.

Lopuksi on suoritettava varsinaiset validointitulostukset prosessin toistettavuuden ja luotettavuuden osoittamiseksi. Samat testikappaleet tulostetaan useita kertoja identtisillä parametreilla, jotta voidaan arvioida geometrian ja laadun toistettavuutta. Näiden validointitulostusten avulla voidaan varmistaa, että prosessi ei ainoastaan toimi yksittäisissä testeissä, vaan on riittävän vakaa ja hallittu myös tuotantokäyttöä varten. Tarvittaessa validointiin voidaan liittää myös mittatarkkuusmittauksia, metallografisia tarkastuksia, kovuusmittauksia tai muita materiaalin ominaisuuksiin liittyviä analyysejä.

Kaikki testaus- ja kalibrointitulokset on dokumentoitava huolellisesti. Dokumentaatioon tulee sisällyttää käytetyt prosessiparametrit, kalibrointiasetukset, testikappaleiden tunnistetiedot, mittaus- ja tarkastustulokset sekä mahdolliset havainnot prosessin käyttäytymisestä. Huolellinen dokumentointi tukee jäljitettävyyttä, helpottaa myöhempää optimointia ja muodostaa perustan tuotantokäyttöön siirtymiselle. Kun testaus ja kalibrointi on toteutettu systemaattisesti, voidaan laser-DED-järjestelmän käyttöönotto tehdä hallitusti, turvallisesti ja teolliset laatuvaatimukset täyttäen.

3.6 Järjestelmä käyttöönotto

Onnistuneen testaus- ja kalibrointivaiheen jälkeen laser-DED-järjestelmä voidaan ottaa täysimittaiseen teolliseen käyttöön. Tässä vaiheessa siirrytään hallituista validointirakennuksista kohti toistettavaa tuotantoa siten, että prosessin vakaus, kappaleiden laatu, jäljitettävyyden ja turvallisuus säilyvät koko käyttöönoton ajan. DED-prosessien erityispiirteisiin kuuluu lisäksi kyky valmistaa suuria kappaleita, tehdä korjausrakentamista ja tuottaa osia pieninä sarjoina, mikä korostaa käyttöönoton suunnitelmallisuutta.

Täysimittainen käyttöönotto kannattaa toteuttaa vaiheittain. Ensimmäiset tuotantoerät on suositeltavaa pitää rajattuina ja niiden tulostusta seurata tavallista tarkemmin, jotta voidaan varmistaa, että validoitu prosessi toimii samalla tavalla myös todellisissa tuotanto-olosuhteissa. Erityistä huomiota on kiinnitettävä järjestelmän toimintavarmuuteen pitkäkestoisessa käytössä, mukaan lukien lasertehon ja materiaalinsyötön synkronisointi, lämmön kertymisen hallinta ja suojaus toiminta.

Ennen säännöllisen tuotannon aloittamista on laadittava ja otettava käyttöön selkeät vakio toimintamenettelyt. Näiden tulee kattaa järjestelmän käyttöönotto, materiaalien ja parametrien valinta, käynnistys- ja pysäytyssekvenssit, prosessin valvonta, poikkeamien käsittely sekä tuotannon aikainen dokumentointi. Käyttöohjeiden lisäksi on tärkeää määritellä hyväksytyt prosessi-ikkunat, vastuut, hyväksymiskriteerit ja muutostenhallinnan menettelyt, jotta prosessiin tehtävät muutokset

voidaan arvioida ja hyväksyä hallitusti. Tällainen systemaattinen toimintatapa tukee yhdenmukaista tuotantoa eri käyttäjien, työvuorojen ja valmistuserien välillä.

Laadunvarmistus on integroitava osaksi normaalia tuotantoa, ei erilliseksi loppuvaiheen toimenpiteeksi. Tämä tarkoittaa käytännössä säännöllisiä visuaalisia tarkastuksia, mittatarkastuksia, prosessidatan seurantaan sekä tarvittaessa rikkomattomia tai rikkovia testejä edustaville kappaleille. Tuotannon aikana kerättyä dataa, kuten lasertehoa, materiaalinsoyhtöä, lämpötiloja, suojakaasun tilaa ja valvontasignaaleja, tulee analysoida säännöllisesti, jotta voidaan varmistaa prosessin pysyminen validoiduissa rajoissa. Samalla syntyy digitaalinen jälki, jota voidaan hyödyntää jäljitettävyydessä, poikkeamien analysoinnissa ja jatkuvassa parantamisessa.

Tuotannonsuunnittelu on olennainen osa täysimittaista käyttöönottoa. Tulostusajat, materiaalinkulutus, lisäaineen hyötysuhde, esivalmistelut, jälkikäsitteily, koneistus, tarkastus ja mahdolliset lämpökäsittelyt on tarkasteltava yhtenä kokonaisuutena. Vaikka laser-DED tarjoaa huomattavaa joustavuutta erityisesti korjaus-, pinnoitus- ja pienerätuotannossa, sen tehokas hyödyntäminen edellyttää tiivistä koordinoitua lisäävän valmistuksen, koneistuksen, tarkastuksen ja viimeistelyn välillä. Käyttöönoton yhteydessä onkin hyödyllistä määritellä tuotannon tunnusluvut, kuten läpimenoaika, käyttöaste, hylkäysaste, materiaalihävikki ja jälkikäsitteilyn osuus, jotta prosessin todellista teollista suorituskykyä voidaan arvioida.

Kunnossapito on integroitava osaksi tuotannonsuunnittelua alusta alkaen. Ennaltaehkäisevät huoltoaikataulut optiikalle, tulostuspäille, materiaalinsoyhtöjärjestelmille, jäähdytysyksiköille, suojakaasujärjestelmille ja turvatoiminnoille on määriteltävä ja toteutettava järjestelmällisesti. Käytännössä tämä tarkoittaa myös kriittisten varaosien saatavuuden varmistamista, kalibrointien aikatauluttamista ja sitä, että huoltotilanteet eivät pääse katkaisemaan tuotantoa hallitsemattomasti. Ennakoiva kunnossapito vähentää suunnittelemattomia seisokkeja ja tukee pitkäaikaista prosessivakautta.

Käyttäjäpalautetta ja tuotantodataa tulee hyödyntää aktiivisesti jatkuvassa kehittämisessä. Varhaisista tuotantoeristä saadut kokemukset voidaan käyttää prosessiparametrien, tulostusratastrategioiden, tulostusjärjestysten ja järjestelmäkonfiguraatioiden hienosäätöön. Jatkuva optimointi voi parantaa tuottavuutta, vähentää energiankulutusta, pienentää materiaalihävikkiä, parantaa pinnanlaatua ja laajentaa käytettävissä olevien materiaalien sekä sovellusten kirjoa. Tuotannossa kannattaa lisäksi ottaa käyttöön selkeä palaute- ja muutostenhallintakäytäntö, jotta kehitystoimet perustuvat dokumentoituihin havaintoihin eikä yksittäisiin poikkeamiin.

Osana täysimittaista käyttöönottoa on huomioitava myös järjestelmän skaalautuvuus ja tuleva kehitys. Järjestelmän kyky käsitellä uusia materiaaleja, suurempia kappaleita, monimutkaisempia geometrioita tai tiukempia laatuvaatimuksia on arvioitava jo käyttöönoton yhteydessä. Samalla kannattaa varautua tuleviin päivityksiin, kuten kehittyneempiin prosessinvalvontaratkaisuihin, suljettuun säätöön, lisäakseleihin, automaattisempaan materiaalinkäsittelyyn ja tuotannonohjausjärjestelmien integraatioon. Näin varmistetaan, että laser-DED-järjestelmä säilyy joustavana ja kilpailukykyisenä myös tulevaisuudessa.

Turvallisuus ei saa heikentyä siirryttäessä pilotoinnista tuotantoon. Suuritehoiset laserit voivat aiheuttaa silmä- ja ihovaurioita, ja metallipohjaiseen additiiviseen valmistukseen voi liittyä myös hiukkas-, savu-, palo- ja räjähdysriskejä erityisesti jauheiden käsittelyssä. Siksi tuotantovaiheessa on varmistettava, että laserturvallisuus, ilmanvaihto, suodatus, pääsynhallinta, poikkeamatilanteiden

menettelyt ja henkilöstön osaaminen pysyvät vähintään samalla tasolla kuin validointivaiheessa. Erityisesti metallijauheita käytettäessä riskinarviointi, ehkäisevät suojaustoimet ja jätevirtojen hallinta ovat olennainen osa teollista käyttöönottoa.

4 Kaupalliset DED systeemit

4.1 WAAM systeemit

Tässä luvussa esitetään yleiskatsaus kaupallisesti saatavilla oleviin WAAM-järjestelmiin. Kuvatut järjestelmät on suunnattu teollisiin ja tutkimuskäyttökohteisiin, joissa valmistetaan keskikokoisia ja suuria

metallikomponentteja, toteutetaan korjaussovelluksia tai valmistetaan lähes lopulliseen muotoon (near-net-shape) tulostettuja kappaleita.

Kuvaukset keskittyvät järjestelmien teknisiin ominaisuuksiin, tyypillisiin käyttökohteisiin sekä ohjelmistokyvykkyyksiin.

4.1.1 WAAM3D

WAAM3D on Iso-Britanniassa toimiva teollisten WAAM-järjestelmien kehittäjä ja toimittaja. Yritys on syntynyt Cranfieldin yliopistossa tehdyn tutkimustyön pohjalta, ja sen tavoitteena on kaupallistaa WAAM-teknologia suurikokoisten metallikomponenttien ainetta lisäävään valmistukseen. WAAM3D palvelee erityisesti ilmailu-, energia-, kaivos-, meri- ja puolustusteollisuuden toimijoita tarjoamalla sekä laitteisto- että ohjelmistoratkaisuja.

WAAM3D:n tuote-ekosysteemi on suunniteltu mahdollistamaan toistettava ja hallittu suurikokoinen WAAM-tuotanto. Tarjontaan kuuluu korkean suorituskyvyn teollisia järjestelmiä sekä kompaktimpia ja kustannustehokkaampia ratkaisuja prototypointiin, tutkimukseen ja prosessikehitykseen.

Keskeiset tuotteet:

RoboWAAM-sarja

RoboWAAM-tuoteperhe käsittää suurikokoiset robottipohjaiset WAAM-järjestelmät, jotka on suunniteltu teolliseen kappalevalmistukseen. Järjestelmät integroidaan edistyneisiin anturiratkaisuihin, erikoissuunniteltuihin tulostuspäihin (end-effector) sekä kattavaan ohjelmistoekosysteemiin.

RoboWAAM-järjestelmät mahdollistavat reaaliaikaisen prosessivalvonnan, automaattisen datankeruun sekä parannetun turvallisuushallinnan. Ne soveltuvat useiden tonnien painoisten komponenttien valmistukseen ja voivat sisältää esimerkiksi:

- kokonaisvaltaisen suojakaasuratkaisun (global shielding)
- inertti-ilmakehän hallinnan
- savukaasujen hallintajärjestelmän
- muokattavat suojakotelot ja tuotantoympäristöt

MiniWAAM

Vuonna 2024 esitelty MiniWAAM tuo WAAM3D:n tulostus- ja valvontateknologiat kompaktimpaan ja kustannustehokkaampaan kokoonpanoon. Järjestelmä perustuu kolmiakseliseen yläpuoliseen CNC-rakenteeseen, jossa on lisäksi pyörityspöytä. Rakennustilavuus on noin 800 × 800 × 600 mm.

MiniWAAM-järjestelmässä on kaksi toisistaan riippumatonta langansyöttölaitetta, joita voidaan käyttää joko:

- suurempien tulostusnopeuksien saavuttamiseksi
- monimateriaalirakenteiden tai funktionaalisesti gradientoitujen rakenteiden valmistamiseen

Järjestelmä sisältää WAAM3D:n kehittämiä omia anturiratkaisuja, kuten:

- interferometriseen mittaukseen perustuvan ShapeTech™-kerroskorkeusmittauksen
- kaksoispistemittaukseen perustuvan lämpötilanseurannan

MiniWAAM on suunnattu erityisesti tutkimus- ja kehitystoimintaan, koestuskappaleiden valmistukseen sekä pilottituotantoon, ja se on yhteensopiva WAAM3D:n ohjelmistoalustan kanssa.

Ohjelmistoratkaisut:

WAAM3D tarjoaa integroidun ohjelmistoekosysteemin, joka kattaa koko WAAM-työnkulun:

- **WAAMPlanner** – työkaluratojen suunnitteluun ja geometrian kerrosjakoon
- **WAAMCtrl** – koneen ohjaukseen, reaaliaikaiseen prosessivalvontaan ja tuotannon hallintaan
- **WAAMKeys** – prosessiparametrien tietokantahallintaan ja asetusten määrittelyyn

Ohjelmistot tukevat tulostusratojen suunnittelua, tulostusprosessin simulointia, datan tallennusta sekä laadun jäljitettävyyttä, mahdollistaen teollisen tason prosessinhallinnan ja dokumentoinnin.

4.1.2 MX3D

MX3D on Amsterdamissa toimiva hollantilainen yritys, joka kehittää teollisen mittakaavan robottipohjaisia WAAM-järjestelmiä suurikokoisten metallikomponenttien lisäävään valmistukseen. Yritys perustettiin vuonna 2014, ja sen juuret ovat Joris Laarman Labin kokeellisessa tutkimustyössä. MX3D on noussut tunnetuksi toimijaksi yhdistämällä perinteisen robottihitsauksen ja kehittyneen ainetta lisäävän valmistuksen teknologiat monimutkaisten ja korkean lisäarvon metallirakenteiden valmistamiseen useille teollisuudenaloille.

MX3D:n WAAM-järjestelmät on suunniteltu keskisuurten ja erittäin suurten metallikomponenttien valmistukseen korkeilla tulostusnopeuksilla ja reaaliaikaisella prosessinohjauksella. Teknologiaa hyödynnetään muun muassa energia-alalla (mukaan lukien ydinvoima sekä öljy- ja kaasuteollisuus), meriteollisuudessa, ilmailussa, ajoneuvoteollisuudessa, konepajateollisuudessa, arkkitehtuurissa ja infrastruktuurirakentamisessa, joissa tarvitaan suuria ja geometrisesti vaativia metallikomponentteja.

Keskeiset tuotteet:

M1 Metal AM System

M1-järjestelmä on MX3D:n avaimet käteen -ratkaisu keskisuurten ja suurten metallikomponenttien WAAM-valmistukseen. Järjestelmä yhdistää teollisuusrobotin, korkean tuottavuuden mahdollistavan hitsausvirtalähteen sekä MX3D:n kehittämän MetalXL-ohjelmistoalustan.

M1 mahdollistaa edistyneen tulostusrata suunnittelun, reaaliaikaisen prosessivalvonnan ja kattavan datankeruun, minkä ansiosta se soveltuu sertifioituun tuotantoon ja yritysten omaan valmistukseen. Järjestelmällä voidaan tulostaa useiden tonnin painoisia kappaleita ja se on suunniteltu jatkuvaan käyttöön vaativissa teollisissa ympäristöissä.

MX Metal AM System

MX Metal AM -järjestelmäperhe laajentaa M1-alustan kapasiteettia suuremmilla roboteilla ja kehittyneemmällä automaatiolla raskaisiin teollisiin sovelluksiin. Ratkaisut on suunnattu valmistajille, jotka tuottavat erittäin suuria komponentteja, mukaan lukien yli neljän metrin pituisia ja yli 10 tonnin painoisia rakenteita.

Järjestelmät tukevat korkeaa tuottavuutta ja joustavia tulostusstrategioita. Kuten M1-järjestelmässä, myös näissä ratkaisuissa hyödynnetään MetalXL-teknologiaa integroidun prosessinohjauksen ja valvonnan mahdollistamiseksi.

Ohjelmisto ja prosessi-integraatio:

MX3D:n WAAM-järjestelmien keskeinen osa on MetalXL-ohjelmistoalusta, joka kattaa koko lisäävän valmistuksen työnkulun. MetalXL sisältää moduulit:

Tulostusratojen suunnittelu ja ratojen viipalointi, sisältäen kehittyneitä CAM-ominaisuuksia, useiden metalliseosten käsittelyn sekä geometrian optimoinnin.

Reaaliaikainen prosessivalvonta ja -ohjaus, jonka avulla käyttäjät voivat seurata tulostusprosessia ja tarvittaessa puuttua poikkeamiin.

Korkearesoluutioinen datankeruu ja analytiikka, mikä tukee laadunvarmistusta ja jäljitettävyyttä teollisissa sovelluksissa.

4.1.3 Gefertec

GEFERTEC GmbH on Berliinissä sijaitseva saksalainen teollisten WAAM-järjestelmien kehittäjä ja valmistaja. Yritys perustettiin vuonna 2015, ja sen toiminta keskittyy WAAM-tekniikan kaupallistamiseen patentoidun 3DMP® (3D Metal Print) -ratkaisun kautta. Tekniikka yhdistää vakiintuneet valokaari prosessit nykyaikaiseen CAM- ja CNC-ohjaukseen mahdollistaen suurikokoisten metallikomponenttien resurssitehokkaan valmistuksen.

GEFERTECin WAAM-järjestelmiä hyödynnetään teollisuudenaloilla, joissa tarvitaan suuria metallikappaleita, nopeita toimitusaikoja ja kustannustehokasta tuotantoa. Keskeisiä sovellusalueita ovat energia-, ilmailu-, rautatie- ja infrastruktuuriala, meriteollisuus sekä teollisten varaosien valmistus. Järjestelmät ovat jo teollisessa sarjatuotantokäytössä, esimerkiksi Siemens Energyn turbiinikomponenttien valmistuksessa.

arc80X-sarja

arc80X edustaa GEFERTECin uusinta teollista WAAM-konealustaa. Se on suunniteltu suurikokoisten metallikomponenttien valmistukseen suurilla rakennustilavuuksilla (enintään noin 8 m³) ja korkealla materiaalinlisäyskapasiteetilla. Järjestelmä voidaan konfiguroida CNC-ohjatuilla lineaarisilla akseleilla, mikä takaa liikkeen tarkkuuden ja prosessivakauden koko työalueella.

Saatavilla olevat kokoonpanot:

3-akselinen versio: Tulostusalue noin 2 × 2 × 2 m ja enimmäiskappalepaino noin 8 000 kg.

5-akselinen versio: Mahdollistaa monimutkaisempien geometrioiden valmistuksen pyörivän akselin ja lisävapausasteiden avulla.

arc80X sisältää useita automaatio-ominaisuuksia, kuten integroidun työkalumittauksen, kaasusuuttimen puhdistuksen, langan katkaisun sekä kuluvien osien automaattisen vaihdon. Nämä vähentävät manuaalisen työn tarvetta ja lisäävät tuotannon käytettävyyttä.

Järjestelmässä on kattava prosessimonitorointijärjestelmä, joka tallentaa keskeiset prosessiparametrit valmistuksen aikana laadunvarmistuksen ja prosessin optimoinnin tueksi.

Valinnaisiin ominaisuuksiin kuuluu inerttikaasukammio, joka mahdollistaa hallitun suojaakaasu-ympäristön käytön ja siten herkkien materiaalien, kuten titaanin, valmistuksen.

4.1.4 MetalWorm

MetalWorm on Ankarassa, Turkissa toimiva robottipohjaisten WAAM-järjestelmien teknologiatoimittaja. Yritys tarjoaa joustavan valikoiman WAAM-järjestelmiä, joissa yhdistyvät valokaaripohjainen lisäävä valmistus, prosessivalvonta sekä älykkäät ohjelmistoratkaisut. Ratkaisut on suunnattu teolliseen tuotantoon, tutkimusympäristöihin sekä hybridivalmistukseen.

MetalWormin WAAM-teknologia perustuu teollisuusrobottiin, joka tulostaa kappaleen kerros kerrokselta DED-periaatteella. Järjestelmä tukee useita valokaariprosesseja, kuten MIG/MAG (GMAW) ja TIG (GTAW), ja on yhteensopiva useiden johtavien robottivalmistajien, kuten ABB:n, KUKA:n ja FANUCin, teollisuusrobottien kanssa.

Ohjelmointiin eli slaissaukseen sekä tulostusprosessin hallintaan MetalWorm käyttää Adaxis:n AdaOne ohjelmistoa. Oletuksena on, että ohjelmointiin on käytettävissä samat strategiat kuin AdaOne:ssa Tulostusprosessin hallintaan käytetään AdaOne:n digital twin –ratkaisua.

Keskeiset WAAM-järjestelmät:

MetalWorm tarjoaa konfiguroitavia robottipohjaisia WAAM-järjestelmiä eri tuotantomittakaavoihin ja sovellustarpeisiin.

Compact System

Plug-and-play-tyyppinen robottisoluratkaisu, joka on helposti integroitavissa ja on helppo käyttää. Tyypillinen työalue on noin $\varnothing 0,7 \text{ m} \times 0,7 \text{ m}$. Järjestelmissä käytetään yleensä kuusiakselista teollisuusrobottia, jota voidaan täydentää pyörityspöydällä tai lisäakseleilla. Tämä mahdollistaa joustavat tulostusstrategiat keskikokoisille kappaleille.

Special System -sarja

Suunnattu suurille ja raskaille kappaleille. Järjestelmät tukevat laajennettuja työalueita ja suuria hyötykuormia, mahdollistaen esimerkiksi halkaisijaltaan noin 2 metrin ja useiden metrien korkuisten komponenttien valmistuksen. Kokoonpanoihin voidaan integroida edistyneitä liikejärjestelmiä, kuten yläpuolisia skyhook-tyyppisiä positionereita ja useita koordinoituja akseleita, mikä parantaa saavutettavuutta ja tulostuksen hallintaa.

Lab / Research Systems

Kompaktit ja muokattavat järjestelmät, jotka on tarkoitettu tutkimus- ja kehityskäyttöön. Ne soveltuvat WAAM-prosessikehitykseen, materiaalitutkimukseen ja pilot-mittakaavan tuotantoon. Osa ratkaisuista on optimoitu yhteistoimintarobottien (cobot) käyttöön sekä pienemmille virtalähteille, mikä mahdollistaa kustannustehokkaamman käyttöönoton tutkimusympäristöissä.

4.2 Laser DED-järjestelmät

Laserpohjaisissa DED-järjestelmissä (Directed Energy Deposition) energialähteenä käytetään fokuoitua lasersädettä ja lisäainemateriaalina metallilankaa tai -jauhetta. Valokaaripohjaisiin prosesseihin verrattuna laser-DED mahdollistaa tyypillisesti paremman mittatarkkuuden, pienemmät palkokoot sekä paremman pinnanlaadun.

Laser-DED-järjestelmiä hyödynnetään laajasti korkean lisäarvon valmistuksessa, korjaussovelluksissa sekä hybridivalmistuksessa, jossa yhdistetään lisäävä ja vähentävä työstö. Tyypillisiä sovellusalueita ovat ilmailu-, työkalu-, energia- ja ajoneuvoteollisuus.

Laser-DED-ratkaisuja on saatavilla erillisinä ainetta lisäävän valmistuksen järjestelminä, CNC-koneisiin integroituna hybridialustoina sekä robottipohjaisina soluina. Seuraavissa luvuissa esitetään yleiskatsaus kaupallisesti saatavilla oleviin laser-DED-järjestelmätoimittajiin, jotka ovat merkityksellisiä teollisen käyttöönoton näkökulmasta.

4.2.1 Meltio

Meltio on laserpohjaisen lankasyöttöisen DED-teknologian (laser wire DED) kehittäjä, joka painottaa ratkaisujensa modulaarisuutta, materiaalitehokkuutta ja helppoa integroitavuutta olemassa oleviin tuotantoympäristöihin. Meltio käyttää lisäainemateriaalina metallilankaa. Meltio-järjestelmät soveltuvat hyvin teolliseen tuotantoon ja korjaussovelluksiin.

Meltio tarjoaa sekä erillisiä metallin ainetta lisäävän valmistuksen koneita että integraatoratkaisuja robotti- ja CNC-alustoihin. Meltio M450 ja Meltio M600 ovat teollisen tason metallin 3D-tulostimia, jotka on suunniteltu keskisuurten ja suurten komponenttien valmistukseen. Järjestelmät toimivat hallitussa suojakaasuympäristössä ja tukevat laajaa materiaalivalikoimaa, mukaan lukien ruostumattomat teräkset, työkaluteräkset, titaaniseokset, alumiiniseokset ja kuparipohjaiset materiaalit.

Meltio-järjestelmien monilaserinen tulostuspää mahdollistaa hallitun energiansyötön ja vakaan materiaalin tulostuksen. Tämän vuoksi on mahdollista hallita paremmin palkogeometriaa ja pinnanlaatua verrattuna moniin valokaaripohjaisiin prosesseihin.

Erillisten koneiden lisäksi Meltio tarjoaa robotti-integraatiopaketteja, joiden avulla olemassa olevat robottisolut voidaan päivittää laser wire DED-käyttöön suhteellisen vähäisin mekaanisin muutoksin. Tämä lähestymistapa tukee kustannustehokasta ainetta lisäävän valmistuksen käyttöönottoa hyödyntämällä jo olemassa olevaa robotti-infrastruktuuria. Robottiratkaisut soveltuvat erityisesti suurikokoisiin komponentteihin, monimutkaisiin geometrioihin sekä korjaussovelluksiin, joissa tarvitaan moniakselista tulostusta.

Meltio tarjoaa myös CNC-integraatoratkaisuja, joiden avulla perinteiset työstökeskukset voidaan muuntaa hybridivalmistusalustoiksi. Näissä kokoonpanoissa ainetta lisäävä valmistus ja ainetta poistava koneistus voidaan toteuttaa samassa järjestelmässä, mikä mahdollistaa near-net-shape -valmistuksen ja sen jälkeisen tarkkuuskoneistuksen ilman kappaleen uudelleenasetusta. Hybridivalmistus on erityisen hyödyllinen korjaus- ja uudelleenvalmistussovelluksissa, sillä se vähentää kappaleenkäsittelyä, parantaa geometria-tarkkuutta ja lyhentää kokonaisläpimenoaika.

Ohjelmiston osalta Meltio tukee sekä omia että kolmannen osapuolen CAM-ratkaisuja työkaluratojen generointiin ja prosessinohjaukseen. Tämä joustavuus mahdollistaa tulostusstrategioiden mukauttamisen eri geometrioille ja materiaaleille, mikä on tärkeää teknologian integroimisessa erilaisiin teollisiin ympäristöihin.

Kokonaisuutena Meltio'n laser wire DED-ratkaisut tarjoavat monipuolisen ja skaalautuvan vaihtoehdon yrityksille, jotka tavoittelevat korkealaatuaista metallin ainetta lisäävää valmistusta ja teknologian tehokasta integroitavuutta olemassa oleviin tuotantoympäristöihin.

4.2.2 Laserline

Laserline on johtava suuritehoisten diodilaserjärjestelmien toimittaja teollisiin valmistussovelluksiin, mukaan lukien laserpohjainen Directed Energy Deposition (DED), pinnoitus (cladding) ja komponenttien korjaus. Toisin kuin valmiita ainetta lisäävän valmistuksen koneita tarjoavat toimittajat, Laserline keskittyy laser-lähteiden ja prosessioptiikan kehittämiseen. Näitä komponentteja integroidaan robotti- tai CNC-pohjaisiin järjestelmiin tyypillisesti järjestelmäintegraattoreiden tai loppukäyttäjien toimesta. Tämä toimintamalli mahdollistaa DED-ratkaisujen joustavan räätälöinnin teollisten sovellusten erityisvaatimuksiin.

Laserlinen diodilaserjärjestelmät soveltuvat erityisesti lankapohjaisiin laser-DED-prosesseihin. Niille on ominaista korkea sähköinen hyötysuhde, vakaa säteenlaatu ja tarkka energiantuonnin hallinta. Lankalisäaineen käyttö mahdollistaa tehokkaan materiaalinkäytön ja puhtaan prosessin, mikä on tärkeää tuotantoympäristöissä, joissa materiaalihukka, kontaminaatio ja prosessin toistettavuus ovat kriittisiä tekijöitä. Laserlinen teknologiaan perustuvia laser wire DED-ratkaisuja hyödynnetään laajasti korjaus- ja kunnostussovelluksissa, pinnoituksessa sekä suurten tai korkean lisäarvon komponenttien valmistuksessa.

Laserlinen ratkaisujen keskeinen etu on niiden skaalautuvuus lasertehon ja järjestelmäkonfiguraation osalta. Laser-lähteitä on saatavilla laajalla tehoalueella, mikä mahdollistaa järjestelmän mukauttamisen eri materiaaleille, lisäysnopeuksille ja kappalekokoluokille. Yhdistettynä soveltuviin lisäyspäihin ja langansyöttöjärjestelmiin tämä joustavuus mahdollistaa DED-järjestelmien optimoinnin sovelluksiin aina hienorakenteisesta lisäyksestä korkean lisäysnopeuden valmistukseen.

Laserline-järjestelmät integroidaan usein moniakselisiin robottisoluihin tai CNC-koneisiin, mikä mahdollistaa monimutkaiset tulostusradat ja moni-akselisen materiaalin tulostuksen. Tämä tekee niistä erityisen soveltuvia olemassa olevan tuotantoinfrastruktuurin muuntamiseen DED-käyttöön. Integraatio edellyttää lasertehon, langansyötön ja liikejärjestelmän synkronointia, mikä on ratkaisevaa vakaan sulan käyttäytymisen ja tasaisen palkogeometrian saavuttamiseksi.

Ohjelmisto- ja ohjausnäkökulmasta Laserlinen laser tehonlähteet voidaan liittää useisiin teollisiin ohjausjärjestelmiin ja CAM-ohjelmistoihin. Tämä yhteensopivuus mahdollistaa räätälöityjen DED-työnkulkujen kehittämisen, mukaan lukien offline-ohjelmointi, simulointi ja prosessin valvonta. Laserline-teknologiaan perustuvia ratkaisuja käytetään laajasti vaativilla teollisuudenaloilla, kuten ilmailu-, energia- ja raskaan konepajateollisuuden sovelluksissa, joissa vaaditaan korkeaa prosessivarmuutta, pitkää käyttöikää ja tarkkaa energiansäästöä.

4.2.3 Aconity3D

Aconity3D kehittää modulaarisia laserpohjaisia DED-järjestelmiä, jotka on suunnattu teolliseen ja tutkimuskäyttöön. Yrityksen lähestymistapa perustuu konfiguroitavuuteen ja avoimeen järjestelmäarkkitehtuuriin, mikä mahdollistaa järjestelmien räätälöinnin prosessivaatimusten, materiaalien ja sovelluskohteiden mukaisesti. Tämä modulaarinen suunnittelufilosofia tekee Aconity3D:n ratkaisusta erityisen soveltuvia ympäristöihin, joissa korostuvat prosessikehitys, validointi ja edistyneet ohjausstrategiat.

Aconity3D tarjoaa DED-alustoja, jotka tukevat sekä lanka- että jauhepohjaisia lisäaineita yhdistettynä laserenergiälähteeseen. Järjestelmät voidaan konfiguroida eri rakennustilavuuksilla, liikejärjestelmillä ja atmosfäärinhallintaratkaisuilla, mukaan lukien inertit tai kontrolloidut ympäristöt reaktiivisten materiaalien, kuten titaanin, käsittelyä varten. Moniakseliset liikeratkaisut mahdollistavat materiaalin tulostuksen monimutkaisilla geometrioilla sekä edistyneet valmistusstrategiat, kuten moniakselisen tulostuksen.

Aconity3D-järjestelmien keskeinen vahvuus on laaja prosessinvalvonnan, datankeruun ja ohjauksen integrointi. Laitteet on varustettu in situ -antureilla, joilla voidaan seurata sulan käyttäytymistä, lämpötilaa ja tulostuksen laatua reaaliaikaisesti. Näiden valvontajärjestelmien tuottama data tukee prosessin optimointia, laadunvarmistusta ja jäljitettävyyttä, jotka ovat yhä keskeisempiä vaatimuksia teollisessa aineita lisäävässä valmistuksessa.

Ohjaus- ja ohjelmistoarkkitehtuurin osalta Aconity3D painottaa avoimuutta ja muokattavuutta. Käyttäjillä on pääsy yksityiskohtaisiin prosessiparametreihin ja järjestelmätietoihin, mikä mahdollistaa kehittyneiden ohjausstrategioiden kehittämisen sekä ulkoisten ohjelmistotyökalujen integroinnin. Tämä avoimuus on erityisen hyödyllistä tutkimusorganisaatioille ja teollisille käyttäjille, jotka tarvitsevat enemmän joustavuutta kuin valmiit "turnkey"-ratkaisut yleensä tarjoavat.

Aconity3D:n DED-järjestelmiä hyödynnetään muun muassa ilmailu-, energia-, auto- ja työkaluteollisuudessa, joissa korkea prosessivarmuus ja materiaalien suorituskyky ovat kriittisiä tekijöitä. Modulaarisen laitteiston, kehittyneen prosessinvalvonnan ja joustavan ohjelmistoarkkitehtuurin yhdistelmä tekee järjestelmistä soveltuvia sekä tuotantokäyttöön että vaativaan prosessikehitykseen.

Kokonaisuutena Aconity3D tarjoaa monipuolisen alustan laserpohjaisiin DED-sovelluksiin, joissa tarkkuus, mukautettavuus ja dataan perustuva prosessinohjaus ovat keskeisiä vaatimuksia.

4.2.4 Additec3D

Additec on laserpohjaisiin DED-järjestelmiin erikoistunut teknologiatoimittaja, jonka ratkaisut painottuvat modulaarisuuteen, hybridiratkaisuihin ja joustavaan integroitavuuteen. Yrityksen järjestelmät on suunniteltu tukemaan sekä lankapohjaista että jauhepohjaista DED-prosessia, mikä mahdollistaa laajan materiaalivalikoiman ja sovelluskohteiden kattamisen. Tyypillisiä käyttökohteita ovat prototypointi, komponenttien korjaus ja kunnostus ja työkalujen valmistus.

Additecin järjestelmävalikoimaan kuuluu sekä itsenäisiä (standalone) DED-laitteita että integroitavia ratkaisuja CNC-työstökeskuksiin ja robottialustoihin. Yritys painottaa erityisesti hybridivalmistusta, jossa ainetta lisäävä ja vähentävä valmistus yhdistetään samaan koneympäristöön. Tällaisessa hybridikokoonpanossa komponentti voidaan valmistaa lähelle lopullista muotoa (near-net-shape) ainetta lisäävällä prosessilla ja viimeistellä koneistamalla samassa kiinnityksessä. Tämä vähentää asetusaikoja, parantaa mittatarkkuutta ja soveltuu erityisen hyvin korjaus- ja uudelleenvalmistussovelluksiin.

Additecin järjestelmien keskeinen ominaisuus on kompakti rakenne ja modulaarinen arkkitehtuuri. Pienen tilantarpeen ansiosta järjestelmät soveltuvat laboratorioihin, tutkimusympäristöihin ja tuotantotiloihin, joissa lattiapinta-ala on rajallinen. Modulaarinen suunnittelu mahdollistaa järjestelmien konfiguroinnin käyttötarpeen mukaan, esimerkiksi rakennustilavuuden, materiaalinäyttökäytön (lanka tai jauhe) ja prosessinvalvontalaitteiston osalta. Järjestelmiä voidaan laajentaa myöhemmin, mikä tukee asteittaista teknologian käyttöönottoa.

Ohjaus- ja ohjelmistopuolella Additec-järjestelmät on suunniteltu yhteensopiviksi tavanomaisten CAM-ohjelmistojen ja CNC-ohjausjärjestelmien kanssa. Tämä helpottaa integrointia olemassa oleviin digitaalisiin valmistusketjuihin ja madaltaa käyttöönoton kynnyksiä erityisesti organisaatioissa, joissa on vahva CNC-koneistusosaaminen. Työstöratageometriat voidaan mukauttaa erilaisiin tulostusstrategioihin ja materiaaleihin, mahdollistaen sekä puhtaan ainetta lisäävän valmistuksen että hybridiratkaisut.

Additecin DED-järjestelmiä hyödynnetään muun muassa muotti- ja työkaluteollisuudessa, komponenttien korjauksessa (esim. ilmailu- ja energiateollisuus) sekä tutkimus- ja materiaalikehityshankkeissa. Yrityksen ratkaisut tarjoavat joustavan ja suhteellisen matalan investointikynnyksen vaihtoehdon organisaatioille, jotka haluavat ottaa käyttöön DED-teknologian vaiheittain ja integroida sen olemassa olevaan tuotantoinfrastruktuuriin.

Kokonaisuutena Additecin vahvuuksia ovat kompakti järjestelmäarkkitehtuuri, hybridi-valmistuksen tuki sekä hyvä integroitavuus CNC-ympäristöihin, mikä tekee ratkaisuista soveltuvia erityisesti korjaus-, kunnossapito- ja pienisarjatuotantosovelluksiin.

4.2.5 Optomec

Optomec on pitkään toiminut DED-järjestelmien toimittaja, joka tunnetaan erityisesti LENS®-teknologiastaan (Laser Engineered Net Shaping). Yrityksellä on laaja kokemus teollisesta ainetta lisäävästä valmistuksesta, komponenttien korjauksesta ja pintatekniikasta. Optomecin järjestelmiä käytetään laajasti ilmailu-, energia-, puolustus- ja raskaan teollisuuden sovelluksissa, joissa vaaditaan korkeaa prosessivarmuutta ja materiaalien suorituskykyä.

Optomec tarjoaa sekä itsenäisiä lisäävän valmistuksen järjestelmiä että hybridiratkaisuja, joissa DED-tekniikka on integroitu CNC-työstökeskuksiin. LENS-järjestelmät perustuvat lasersäteeseen energialähteenä ja metallijauheeseen lisäainemateriaalina, mikä mahdollistaa tarkan materiaalin tulostuksen ja hyvän sulan hallinnan. Järjestelmiä käytetään tyypillisesti kontrolloidussa atmosfäärissä, mikä mahdollistaa reaktiivisten ja korkean suorituskyvyn materiaalien, kuten titaaniseosten, alumiiniseosten ja nikkelpohjaisten superseosten, käsittelyn.

Optomecin teknologian keskeinen vahvuus on korjaus- ja uudelleenvalmistussovelluksissa. LENS-järjestelmiä käytetään usein kuluneiden tai vaurioituneiden komponenttien kunnostukseen, uusien toiminnallisten piirteiden lisäämiseen olemassa oleviin osiin sekä kulutus- ja korroosionkestävien pinnotteiden valmistukseen. Materiaalin tulostaminen suoraan olemassa olevan kappaleen pinnalle suurella tarkkuudella mahdollistaa komponenttien käyttöiän pidentämisen ja materiaalihukan vähentämisen.

Optomecin hybridiratkaisuissa DED-ominaisuus integroidaan suoraan CNC-työstökeskukseen. Tällaisessa kokoonpanossa ainetta lisäävä ja vähentävä valmistus voidaan suorittaa samassa koneessa ja samassa kiinnityksessä. Tämä parantaa mittatarkkuutta, vähentää kappaleen käsittelyvaiheita ja lyhentää läpimenoaikoja erityisesti korjaus- ja pienisarjatuotannossa. Hybridikonsepti tukee tehokasta siirtymistä lisäävän ja koneistavan vaiheen välillä sekä near-net-shape -valmistusstrategioita.

Ohjaus- ja ohjelmistopuolella Optomecin järjestelmät tukevat integroitavuutta teollisiin CAM-ohjelmistoihin ja prosessinvalvontatyökaluihin. Prosessiparametreja, kuten laserin tehoa, jauheen syöttöä ja liikeratoja, voidaan säätää tarkasti materiaalin ja geometrian mukaan. Yritys tarjoaa myös valvonta- ja ohjausratkaisuja, jotka tukevat prosessin toistettavuutta, laadunvarmistusta ja jäljitettävyyttä.

Kokonaisuutena Optomecin LENS-teknologia edustaa kypsää ja teollisesti validoitua DED-ratkaisua. Sen vahvuudet korostuvat erityisesti korjaus-, hybridisovelluksissa, mikä tekee Optomec-järjestelmistä soveltuvia organisaatioille, jotka etsivät luotettavaa ja vakiintunutta laserpohjaista DED-teknologiaa tuotanto- ja uudelleenvalmistuskäyttöön.

4.2.6 Precitec

Precitec on laserpohjaisten lisäainelaitteiden, optiikan ja prosessinvalvontaratkaisujen toimittaja, joka keskittyy erityisesti DED- ja muihin laserpohjaisiin materiaalikäsitteilysovelluksiin. Yritys ei tarjoa valmiita turnkey-tyyppisiä ainetta lisäävän valmistuksen laitteita, vaan toimittaa korkean tarkkuuden järjestelmäkomponentteja, jotka integroidaan tyypillisesti robottisoluihin tai CNC-pohjaisiin alustoihin järjestelmäintegraattorien tai loppukäyttäjien toimesta. Tämä lähestymistapa mahdollistaa vahvasti räätälöidyt DED-ratkaisut teollisten vaatimusten mukaisesti.

Precitecin laser-DED-tulostuspäät on suunniteltu takaamaan vakaa ja tarkasti hallittu energiansyöttö. Ratkaisuissa hyödynnetään usein koaksiaalista jauhe- tai lankasyöttöä, jossa lisäainemateriaali syötetään lasersäteen keskilinjalle. Koaksiaalinen rakenne mahdollistaa tasaisen materiaalin syötön riippumatta tulostussuunnasta, mikä on erityisen hyödyllistä moniakselisessa ja moni-suuntaisessa valmistuksessa. Tämä rakenne tukee yhtenäistä palkogeometriaa ja parantaa prosessin vakautta erityisesti monimutkaisten geometrioiden valmistuksessa ja kaarevien pintojen korjaussovelluksissa.

Precitecin ratkaisujen keskeinen vahvuus on edistyneiden prosessinvalvonta- ja anturitekniikoiden integrointi. Yritys tarjoaa järjestelmiä sulan käyttäytymisen, laserin tehon, sauman geometrian ja prosessiominaisuuksien reaaliaikaiseen seurantaan. Nämä valvontaratkaisut tukevat laadunvarmistusta, prosessin optimointia ja jäljitettävyyttä, jotka ovat yhä keskeisempiä vaatimuksia teollisessa ainetta lisäävässä valmistuksessa.

Precitecin laitteistoja integroidaan yleisesti moniakselisiin robottijärjestelmiin ja CNC-koneisiin, mikä tekee niistä soveltuvia olemassa olevien valmistusympäristöjen jälkiasennuksiin (retrofit). Modulaarinen

tulostuspäiden ja antureiden rakenne mahdollistaa järjestelmäkokoontalon valinnan sovellyskohtaisesti esimerkiksi materiaalin, tulostusnopeuden ja komponenttikoon perusteella.

Ohjaus- ja ohjelmistoarkkitehtuurin osalta Precitecin järjestelmät on suunniteltu yhteensopiviksi teollisten laserohjainten, robottiohjainten ja CNC-järjestelmien kanssa. Tämä mahdollistaa liikkeen, laserin tehon ja lisäainemateriaalin syötön tarkan synkronoinnin, mikä on kriittistä vakaan ja toistettavan lisäyksen saavuttamiseksi. Avoin järjestelmäarkkitehtuuri tukee myös kolmannen osapuolen CAM-ohjelmistojen ja edistyneiden ohjausstrategioiden integrointia.

Kokonaisuutena Precitec tarjoaa korkean tarkkuuden ja joustavan komponenttipohjaisen ratkaisun laser-DED-sovelluksiin, erityisesti tilanteissa, joissa tarvitaan räätälöityä järjestelmäintegraatiota, laajaa prosessinvalvontaa ja yhteensopivuutta olemassa olevan tuotantoinfrastruktuurin kanssa.

4.2.7 Trumpf

TRUMPF on kansainvälinen teollisten lasersysteemien ja valmistusteknologioiden toimittaja, jonka tuotevalikoima kattaa ratkaisuja laserpohjaiseen DED-valmistukseen, pintakäsittelyyn sekä hybridi-valmistukseen. Yritys tarjoaa sekä valmiita DED-järjestelmiä että laser-lähteitä ja tulostuspäitä, jotka voidaan integroida robottisoluihin tai CNC-pohjaisiin alustoihin. Tämä mahdollistaa joustavan käyttöönoton erilaisissa teollisissa ympäristöissä.

TRUMPFin laser-DED-ratkaisut on suunniteltu korkeaan prosessivakauteen, tarkkuuteen ja teolliseen käyttövarmuuteen. Yritys tarjoaa tulostuspäitä, jotka tukevat sekä jauhe- että lankapohjaista lisäainetta, jolloin käyttäjä voi valita sovellukseen parhaiten soveltuvan syöttökonseptin. TRUMPFin järjestelmiä hyödynnetään ainetta lisäävässä valmistuksessa, komponenttien korjauksessa ja pintamuokkauksessa erityisesti aloilla, joissa laadunvarmistus, toistettavuus ja prosessien dokumentointi ovat keskeisiä vaatimuksia.

Keskeinen osa TRUMPFin valikoimaa on TruLaser Cell -sarja, jossa yhdistyvät moniakselinen liikejärjestelmä ja laserpohjainen materiaalin lisäys. Nämä järjestelmät tukevat monimutkaisten geometrioiden valmistusta sekä hybridi-valmistusstrategioita, joissa tulostus ja koneistus voidaan toteuttaa samassa koneympäristössä. Useiden valmistusvaiheiden yhdistäminen yhteen kiinnitykseen parantaa mittatarkkuutta ja lyhentää kokonaisläpimenoaika.

Ohjaus- ja ohjelmistopuolella TRUMPF tarjoaa kehittyneitä ratkaisuja prosessinvalvontaan, parametrien hallintaan ja järjestelmädiagnostiikkaan. Näiden avulla voidaan varmistaa tasalaatuinen tulostus ja tukea teollisen mittakaavan tuotantoa. Järjestelmät integroituvat teollisiin CAM-ohjelmistoihin, mikä mahdollistaa tehokkaan tulostusratojen generoinnin, simuloinnin ja offline-ohjelmoinnin.

Lisäksi TRUMPF tarjoaa hybridi-valmistusalustoja, joissa laserpohjainen materiaalin tulostus voidaan yhdistää esimerkiksi jauhepetiteknikkaan tai perinteiseen koneistukseen. Tällainen yhdistelmä mahdollistaa joustavat tuotantotratemat suurille, monimutkaisille tai toiminnallisesti optimoiduille komponenteille. Tyypillisiä sovellusalueita ovat ilmailu-, auto- ja energiateollisuus.

Kokonaisuutena TRUMPFin vahvuuksia ovat laaja laserosaaminen, teollisesti validoidut järjestelmäratkaisut sekä integroitavuus hybridi-valmistusympäristöihin. Yrityksen ratkaisut soveltuvat erityisesti organisaatioille, jotka etsivät korkeaa prosessivarmuutta ja skaalautuvuutta laserpohjaisiin DED-sovelluksiin.

4.2.8 Innstek

Innstek kehittää teollisia DED-järjestelmiä ainetta lisäävään metallivalmistukseen painottaen erityisesti hybridi-valmistusratkaisuja, joissa materiaalin tulostus yhdistetään perinteiseen CNC-koneistukseen. Yritys tarjoaa sekä itsenäisiä DED-järjestelmiä että CNC-pohjaisia hybridialustoja, mikä mahdollistaa joustavan käyttöönoton tuotantotarpeiden ja olemassa olevan valmistusinfrastruktuurin mukaan.

Innstekin hybridijärjestelmissä laserpohjainen DED-teknologia on integroitu moniakseliseen CNC-työstökoneeseen. Tällaisessa kokoonpanossa tulostus ja koneistus viimeistely voidaan toteuttaa samassa koneessa ja samassa kiinnityksessä. Tämä parantaa mittatarkkuutta, vähentää kappaleiden käsittelyvaiheita ja lyhentää läpimenoaika. Hybridikonsepti soveltuu erityisesti komponenttien korjaukseen, uudelleenvalmistukseen sekä monimutkaisten ja tarkkuutta vaativien geometrioiden tuotantoon.

Innstekin DED-ratkaisut tukevat sekä jauhe- että lankapohjaista lisäainetta, mikä mahdollistaa laajan materiaalivalikoiman ja erilaisten tulostusstrategioiden käytön. Reaaliaikainen prosessinvalvonta on integroitu osaksi järjestelmiä, ja sen avulla voidaan seurata esimerkiksi sulan käyttäytymistä, tulostusnopeutta ja lämpötilakuormitusta. Nämä valvontatoiminnot tukevat tasalaatuista tulostusta, prosessin optimointia ja laadunvarmistusta teollisissa sovelluksissa.

Järjestelmäintegraation näkökulmasta Innstekin ratkaisut on suunniteltu vaativiin teollisiin ympäristöihin, joissa korostuvat käyttövarmuus ja pitkäaikainen toimintavakaus. CNC-pohjainen arkkitehtuuri mahdollistaa tarkan liikkeenhallinnan sekä yhteensopivuuden standardien CAM-ohjelmistojen kanssa. Tämä helpottaa integrointia olemassa oleviin digitaalisiin valmistusprosesseihin ja vähentää tarvetta erillisille, pelkästään ainetta lisäävään valmistukseen tarkoitetuille ohjelmistoille.

Innstekin järjestelmiä käytetään muun muassa työkalujen ja muottien valmistuksessa, ilmailukomponenttien korjauksessa sekä energiateollisuuden sovelluksissa, joissa korkean lisäarvon komponentit hyötyvät hybridi-valmistuksen tarjoamasta joustavuudesta.

Kokonaisuutena Innstek tarjoaa teollisen tason DED-ratkaisuja, joissa yhdistyvät tarkkuus, joustavuus ja lisäävän sekä vähentävän valmistuksen tehokas integraatio. Ratkaisut soveltuvat erityisesti organisaatioille, jotka tavoittelevat kehittyneitä hybridi-valmistusvalmiuksia osana tuotantostrategiaansa.

4.3 WAAM -hitsausprosessit

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) perustuu valokaaripohjaisiin hitsausprosesseihin materiaalin lisäyksessä. Valittu hitsausprosessi vaikuttaa merkittävästi tulostusnopeuteen, lämmöntuontiin, pinnanlaatuun, mittatarkkuuteen sekä valmistetun komponentin mekaanisiin ominaisuuksiin. Prosessivalinnalla on siten keskeinen rooli WAAM-tuotannon laadussa, toistettavuudessa ja tuottavuudessa.

Tässä luvussa esitellään WAAM-sovelluksissa yleisimmin käytetyt hitsausprosessit sekä tarkastellaan niiden keskeisiä etuja ja rajoituksia ainetta lisäävän valmistuksen näkökulmasta.

4.3.1 Gas Metal Arc Welding (GMAW)

Gas Metal Arc Welding (GMAW), joka tunnetaan myös nimellä MIG/MAG-hitsaus (Metal Inert/Active Gas), on yksi yleisimmin käytetyistä prosesseista WAAM-sovelluksissa. GMAW-prosessissa jatkuvasyöttöinen metallilanka toimii sekä lisäainemateriaalina että elektrodina. Langan ja työkappaleen välille muodostuva valokaari sulattaa langan, ja sula metalli siirtyy työkappaleelle kerros kerrokselta muodostaen valmistettavan rakenteen.

GMAW soveltuu hyvin WAAM-prosessiin erityisesti silloin, kun tavoitteena on korkea lisäaineen tuotto ja suurten komponenttien valmistus.

Edut:

- Korkea lisäaineen tuotto mahdollistaa suhteellisen nopeat tulostusajat erityisesti suurikokoisille kappaleille.
- Soveltuu laajalle materiaalivalikoimalle, mukaan lukien hiilliteräkset, ruostumattomat teräkset ja alumiiniseokset.
- Kypsä ja laajasti käytössä oleva teknologia, jonka laitteistot, kulutusosat ja osaaminen ovat helposti saatavilla.

- Kustannustehokas ratkaisu teollisen mittakaavan WAAM-sovelluksiin.

Rajoitukset:

- Lämmöntuonti on tyypillisesti suurempi kuin tarkemmin ohjatuissa kaariprosesseissa, mikä voi lisätä lämpömuodonmuutoksia ja jäännösjännityksiä.
- Pinnanlaatu on usein rajallinen, ja jälkikoneistus tai muu viimeistely on yleensä tarpeen.
- Ei välttämättä sovellu tarpeisiin, joissa vaaditaan erittäin hienoa geometriaa tai tiukkoja mittatoleransseja.

GMAW-hitsauslaitteita valmistavat useat tunnetut teolliset toimijat, kuten Kemppi, ESAB, EWM, Lincoln Electric, Wallius, Fronius ja Parweld. Näiden valmistajien laitteistoja hyödynnetään laajasti myös WAAM-sovelluksissa.

4.3.2 Cold Metal Transfer (CMT)

Cold Metal Transfer (CMT) on Gas Metal Arc Welding (GMAW) -prosessin kehitetty muunnos, jossa langan syöttäminen tapahtuu tarkasti ohjatulla, mekaanisesti tuetulla langan edestakaisliikkeellä. CMT-prosessissa langansyöttöliike on synkronoitu kaariprosessin kanssa siten, että langan koskettaessa sulaa allasta virta katkaistaan hallitusti ja lanka vedetään takaisin. Tämä vähentää lämmöntuontia ja roiskeita verrattuna perinteiseen GMAW-prosessiin.

WAAM-sovelluksissa CMT on erityisen kiinnostava prosessi silloin, kun tavoitteena on alhaisempi lämmöntuonti, parempi pinnanlaatu ja hallitumpi kerroksittainen tulostus.

Edut:

- Alhaisempi lämmöntuonti verrattuna perinteiseen GMAW-prosessiin, mikä vähentää lämpömuodonmuutoksia ja jäännösjännityksiä.
- Vakaa ja hallittu hitsaus, joka mahdollistaa tasaisemman palkogeometrian.
- Parempi pinnanlaatu ja pienempi roiskeiden määrä.
- Soveltuu hyvin ohuisiin rakenteisiin ja materiaaleille, jotka ovat herkkiä liian suurelle lämmöntuonnille, kuten alumiini ja tietyt korkean lujuuden teräkset.
- Parantaa mittatarkkuutta erityisesti monikerroksisissa WAAM-rakenteissa.

Rajoitukset:

- Tyypillisesti alhaisempi tuottavuus verrattuna perinteiseen GMAW-prosessiin.
- Laitteistokustannukset ovat korkeammat, koska prosessi vaatii erityisen ohjausjärjestelmän ja langansyöttömekanismien.
- Prosessiparametrien optimointi WAAM-käyttöön edellyttää huolellista kehitystyötä.

CMT-teknologia on Froniuksen kehittämä ja kaupallistama prosessi, ja sitä käytetään laajasti WAAM-sovelluksissa, joissa vaaditaan tarkkaa lämmönhallintaa ja hyvää kerrosten välistä sidosta. Kokonaisuutena CMT soveltuu WAAM-valmistukseen erityisesti tilanteissa, joissa priorisoidaan prosessivakautta, alhaista lämmöntuontia ja hyvää pinnanlaatua korkeimman mahdollisen tuottavuuden sijaan.

4.3.3 Muut hitsausprosessit

4.3.3.1 EWM React

EWM React -hitsausprosessi

EWM React on EWM:n kehittämä edistynyt valokaariprosessi, joka on toimintaperiaatteeltaan verrattavissa esimerkiksi CMT-prosessiin. Prosessi perustuu älykkääseen reaaliaikaiseen ohjaukseen, jossa valokaaren ominaisuuksia säädetään dynaamisesti hitsauksen aikana. Tämä parantaa valokaaren vakautta ja vähentää roiskeita.

EWM React yhdistää spray arc hitsauksen korkean lisäysnopeuden ja oikosulkukaaren (short arc) matalan lämmöntuonnin edut. Tämän yhdistelmän ansiosta prosessi mahdollistaa vakaan, tarkasti hallitun ja tuottavan automatisoidun hitsauksen. Tulostuksen aikana pisaran siirtyminen sulaan tapahtuu hallitusti, mikä tukee tasalaatuista ja toistettavaa kerrosrakennetta WAAM-sovelluksissa.

EWM React -prosessin edut WAAM-sovelluksissa:

Tarkka pisaransiirtymän hallinta

Prosessi mahdollistaa kontrolloidun ja vakaan hitsauskaaren, mikä tukee hyvä laatuisten kerroksen muodostumista ja vähentää huokosten, epätasaisen palkogeometrian tai muiden tulostusvirheiden riskiä.

Alhainen lämmöntuonti

Oikosulkukaaren ja spray arc -ominaisuuksien yhdistelmä pitää prosessin suhteellisen viileänä verrattuna perinteiseen spray arc -prosessiin. Tämä vähentää jäännösjännityksiä, lämpömuodonmuutoksia ja parantaa mittatarkkuutta, mikä on kriittistä WAAM-rakenteissa.

Vähäinen roiskeiden määrä

Roiskeeton tai vähäroiskeinen prosessi parantaa pinnanlaatua ja vähentää jälkikäsittelyn tarvetta, mikä tehostaa WAAM-tuotantoa.

Korkea lisäysnopeus

Prosessi hyödyntää spray arc hitsausta, mikä mahdollistaa korkean tulostusnopeuden ja parantaa kokonaistuottavuutta erityisesti suurikokoisissa rakenteissa.

Luotettava hitsauslaatu

Vakaa kaari ja hallittu energiansyöttö mahdollistavat virheettömät ja mekaanisesti kestävät liitokset myös vaativissa olosuhteissa. Tämä mahdollistaa WAAM-komponenttien hyvät lujuus- ja väsymisominaisuudet.

4.4 Ohjelmistot Robotisoituun DED-valmistukseen

Robottipohjaiset DED- ja WAAM-prosessit edellyttävät erikoistuneita ohjelmistoratkaisuja, jotka tukevat tulostusratojen suunnittelua, liikkeenohjausta, simulointia, prosessinvalvontaa sekä järjestelmäintegraatiota. Toisin kuin perinteisessä koneistuksessa tai hitsauksessa, ainetta lisäävä valmistus vaatii jatkuvaa ja koordinoitua liikkeen, energian- ja lisäainemateriaalin syötön hallintaa kerros kerrokselta. Ohjelmistolla on siten keskeinen rooli prosessin vakaudessa, toistettavuudessa ja laadunhallinnassa.

Tässä luvussa esitetään yleiskatsaus valittuihin kaupallisiin ohjelmistoratkaisuihin, joita käytetään robotti- ja CNC-pohjaisissa DED-järjestelmissä. Tarkastelu keskittyy erityisesti WAAM- ja laser-DED-sovellusten kannalta olennaisiin ominaisuuksiin eikä yksityiskohtaiseen toiminnallisuuksien luettelointiin.

On tärkeää huomata, että yhtä universaalia WAAM-ohjelmistoa ei ole olemassa. Onnistunut WAAM- tai DED-toteutus perustuu yleensä integroituihin ohjelmistoekosysteemeihin, jotka valitaan seuraavien tekijöiden perusteella:

Käytettävä laitteistoalusta (robotti vs. CNC)

Prosessityyppi (valokaaripohjainen vs. laserpohjainen)

Geometrian monimutkaisuus ja moniakselisuus

Käyttötarkoitus (tutkimus- ja kehityskäyttö vs. teollinen sarjatuotanto)

Ohjelmistovalinnalla on suora vaikutus tulostusratojen generointiin, prosessin ohjaukseen, simulointiin, laadunvarmistukseen ja digitaaliseen jäljitettävyyteen. Tämän vuoksi ohjelmistoarkkitehtuuri tulee suunnitella kokonaisuutena yhdessä laitteiston ja prosessivaatimusten kanssa.

4.4.1 Adaxis

Adaxis on ohjelmistoyritys, joka keskittyy robottipohjaisen ainetta lisäävän valmistuksen (Robotic Additive Manufacturing) ohjelmistoihin. Yrityksen ratkaisut on suunnattu erityisesti WAAM- ja muihin robotisoiuihin tai moniakselisiin 3D-tulostusprosesseihin. Adaxisin päätuote, AdaOne, tarjoaa yhtenäisen ohjelmistoalustan suunnittelusta valmistukseen -työnkululle robottipohjaisessa lisäävässä valmistuksessa.

AdaOne tukee laajaa valikoimaa teollisuusrobotteja ja kinematiikkakokoonpanoja, mukaan lukien perinteiset kuusiakseliset robotit, ulkoakselit, kääntöpöydät ja portaalijärjestelmät. Ohjelmisto tukee myös hybridi-valmistusta, jossa ainetta lisäävä prosessi yhdistetään materiaalia poistaviin työvaiheisiin, kuten koneistukseen, sekä prosessinaikaiseen skannaukseen ja tarkastukseen.

Keskeiset ominaisuudet WAAM- ja DED-sovelluksissa

Moniakselinen tulostusratojen generointi

AdaOne tuottaa optimoituja tulostusratoja tasomaisille, kulmallisille, monitasoisille ja konformaalisille pinoille. Tämä mahdollistaa monimutkaisten geometrioiden valmistuksen ja tukee rakenteiden tulostusta eri suuntiin ilman perinteisiä tukirakenteita.

Simulointi ja validointi

Ohjelmiston sisäänrakennetut simulointityökalut mahdollistavat ulottuvuuden tarkistuksen, törmäysten välttämisen, singulariteettien tunnistamisen ja liikeratojen toteutettavuuden arvioinnin ennen tuotantoa. Tämä vähentää käyttöönottoon liittyviä riskejä ja parantaa ensiyrityksen onnistumisastetta.

Prosessi-integraatio

AdaOne:en on hankittavissa lisäosa, joka mahdollistaa tulostusratojen luonnin lisäksi tulostuksen aikaisen prosessin hallinnan. Lisäosa ratkaisu sisältää robottisolun lisäävää anturointia sekä digitaalisen kaksosen. Tämän kokonaisuuden avulla tulostuksesta kerätään reaaliaikaisesti dataa, joka visualisoidaan. Tämän tiedon pohjalta on mahdollista muokata tulostusta dynaamisesti esimerkiksi kerrokorkeuden vaihdella tulostuksen eri vaiheissa. Lisäksi datan keräys palvelee laadunvarmistusta sekä

Kokonaisvaltainen työnkulku

Ohjelmisto kattaa koko prosessin 3D-mallin tuonnista ja geometrian optimoinnista tulostusratojen generointiin, robottiohjelmointiin ja prosessin aikaiseen valvontaan*. Tämä mahdollistaa yhtenäisen digitaalisen tuotantoketjun.

Laaja prosessituki

AdaOne tukee useita lisääviä teknologioita, kuten WAAM-prosessia, lankapohjaista laser-DED:iä, laser metal deposition -menetelmiä sekä materiaalia poistavi koneistusvaiheita hybridi-ympäristöissä.

Laitteistoyhteensopivuus

Ohjelmisto on yhteensopiva keskeisten robottivalmistajien, kuten ABB:n, KUKA:n, Yaskawan ja FANUCin, kanssa. Se voidaan sovittaa myös monimutkaisiin moniakselisiin järjestelmiin, mukaan lukien portaalirakenteet ja ulkoiset positionointilaitteet.

Tyypilliset käyttökohteet

Robottipohjainen WAAM-tuotanto

Moniakselisten WAAM-rakenteiden suunnittelu ja toteutus optimoiduilla tulostusradoilla sekä minimoiduilla tukirakenteilla.

Hybridi-valmistussolut

Ainetta lisäävän valmistuksen, koneistuksen ja tarkastuksen yhdistäminen samaan ohjelmistoalustaan.

Prosessin simulointi ja validointi

Robotti- ja prosessikelpoisuuden varmistaminen ennen varsinaista tuotantoa, mikä vähentää kokeiluun perustuvaa kehitystyötä ja materiaalihukkaa.

Datan keruu ja prosessinvalvonta

Prosessiparametrien tallennus ja visualisointi laadunvarmistuksen ja jäljitettävyyden tueksi.*

*production lisäosa mahdollistaa

4.4.2 RoboDK

RoboDK on laajasti käytetty robottiohjelmointi- ja simulointiohjelmisto, jota hyödynnetään myös robottipohjaisessa DED- ja WAAM-valmistuksessa. Ohjelmisto ei ole pelkästään ainetta lisäävään valmistukseen suunniteltu ratkaisu, vaan yleiskäyttöinen offline-ohjelmointi- (OLP) ja simulointialusta, joka tukee useita teollisia robottimerkkejä ja sovelluksia.

RoboDK:n vahvuus WAAM- ja DED-ympäristöissä perustuu sen kykyyn tuottaa robottiratoja CAD-geometrioista, simuloida moniakselista liikettä ja generoida suoraan robottikohtaisia ohjelmia eri valmistajien ohjaimille. Tämä mahdollistaa joustavan ja laiteriippumattoman kehitysympäristön erityisesti tutkimus- ja pilotointivaiheessa.

Keskeiset ominaisuudet WAAM- ja DED-sovelluksissa:

Offline-ohjelmointi (OLP)

Mahdollistaa robottiohjelmien luomisen ja testauksen ilman tuotantosolun käyttöä. Tämä vähentää seisokkiaikoja ja nopeuttaa käyttöönottoa.

Moniakselinen simulointi

Tukee kuusiakselisia robotteja sekä ulkoakseleita, kääntöpöytiä ja portaaliratkaisuja. Simulointi mahdollistaa törmäystarkastelun, ulottuvuusanalyysin ja singulariteettien tunnistamisen.

CAD-integraatio

Mahdollistaa 3D-mallien tuonnin ja pintojen tai reunojen hyödyntämisen tulostusratojen generointiin. WAAM-sovelluksissa tätä käytetään esimerkiksi erilaisten seinämärakenteiden ohjelmointiin.

Laaja robottiyhteensopivuus

Tukee useimpia teollisuusrobotteja, kuten ABB, KUKA, FANUC, Yaskawa ja muut. Tämä tekee RoboDK:sta laiteriippumattoman kehitysalustan.

Avoin ohjelmointiympäristö

Mahdollistaa Python- ja API-pohjaisen laajennettavuuden, mikä on hyödyllistä WAAM-prosessien automatisoinnissa ja parametrioijauksessa.

Rajoitukset WAAM-käytössä:

- RoboDK ei ole varsinaisesti WAAM- tai DED-spesifinen ohjelmisto, joten kerrospohjainen slicaus ja edistyneet tulostusstrategiat vaativat usein lisätyökaluja tai ulkoista CAM-ohjelmistoa.
- Prosessin reaaliaikainen valvonta ja suljettu säätö eivät kuulu ohjelmiston ydintoimintoihin, vaan ne toteutetaan tyypillisesti robottiohjaimen tai erillisen prosessiohjelmiston kautta.

Tyypilliset käyttökohteet:

- WAAM-prosessien robottiratojen kehitys ja validointi
- Tutkimus- ja pilotointiprojektit
- Moniakselisten tulostusstrategioiden testaus
- Hybridi-solujen ohjelmointi, joissa yhdistetään hitsaus ja koneistus

4.4.3 Dotx Control Systems

Dotx Control Systems kehittää ohjelmisto- ja ohjauksratkaisuja erityisesti robottipohjaiseen lisäainevalmistukseen, mukaan lukien WAAM- ja laser-DED-prosessit. Yrityksen ratkaisut keskittyvät erityisesti prosessinohjaukseen, reaaliaikaiseen seurantaan ja adaptiiviseen säätöön, mikä erottaa sen monista perinteisistä CAM- ja offline-ohjelmointiohjelmistoista.

Dotx ei ole pelkästään työkaluratojen generointiohjelmisto, vaan järjestelmätason ohjauksratkaisu, joka yhdistää robottiliikkeen, energialähteen (kaari tai laser), materiaalin syötön ja sensoridatan yhdeksi hallituksi kokonaisuudeksi.

Keskeiset ominaisuudet WAAM- ja DED-sovelluksissa:

Reaaliaikainen prosessinohjaus

Mahdollistaa hitsaus- tai laserparametrien säätämisen lennossa robotin nopeuden, geometrian tai sensoripalautteen perusteella. Tämä on erityisen tärkeää WAAM- ja DED-prosesseissa, joissa lämpökuorma ja kerrospaksuus vaihtelevat.

Sensorien integrointi

Tukee lämpötila-antureita, kameroita, sulan monitorointijärjestelmiä ja muita mittalaitteita. Sensoridataa voidaan käyttää joko valvontaan tai suljetun säätöpiirin ohjaukseen.

Prosessiparametrien hallinta

Yhdistää robottiliikkeen ja energialähteen ohjauksen siten, että esimerkiksi virta, jännite, langansyöttö ja laserin teho pysyvät synkronoituna liikeradan kanssa.

Datan keruu ja jäljitettävyyys

Tallentaa keskeiset prosessiparametrit, mikä tukee laadunvarmistusta, dokumentointia ja myöhempää analysointia. Tämä on erityisen tärkeää teollisessa tuotannossa ja sertifioituissa sovelluksissa.

Yhteensopivuus teollisten robottien kanssa

Integroituu tyypillisesti ABB-, KUKA-, FANUC- ja muiden teollisuusrobottien ohjausjärjestelmiin.

Rooli WAAM-ekosysteemissä

Dotx toimii usein siltana CAM-ohjelmiston ja varsinaisen laiteohjauksen välillä. Tyypillinen työnkulku voi sisältää:

- Työkaluratojen generointi erillisellä CAM- tai slicausohjelmistolla
- Robottiliikkeen ohjelmointi offline-ympäristössä
- Dotx-järjestelmän käyttö prosessin reaaliaikaiseen hallintaan ja monitorointiin
- Tämä arkkitehtuuri mahdollistaa korkeamman prosessistabiilisuuden ja paremman laadunhallinnan verrattuna pelkkään staattiseen robottiohjelmaan.

Tyypilliset käyttökohteet:

- Teollinen WAAM-tuotanto, jossa vaaditaan korkea toistettavuus
- Laser-DED-järjestelmät, joissa tarvitaan suljetun säätöpiirin ohjausta
- Tutkimusympäristöt, joissa kehitetään adaptiivisia säätöstrategioita
- Sertifiointia vaativat sovellukset (esim. energia- ja ilmailuala)

4.4.4 Autodesk Netfabb

Autodesk Netfabb on kattava ohjelmistoalusta, joka keskittyy ainetta lisäävän valmistuksen (AM) esivalmisteluun, simulointiin ja optimointiin. Vaikka Netfabb ei ole yksinomaan WAAM-teknologiaan tarkoitettu ohjelmisto, sitä käytetään laajasti koko lisäävän valmistuksen teollisuudessa — mukaan lukien robottipohjaisissa DED- ja WAAM-ympäristöissä — geometrian korjaukseen, viipalointiin, tukirakenteiden luontiin, valmisteluun sekä prosessisimulointiin. Netfabb integroituu CAD-järjestelmiin ja robottiohjelmointityökaluihin, mahdollistaen kokonaisvaltaisen suunnittelusta valmistukseen -työnkulun.

Netfabbin työkalut soveltuvat insinööreille, tutkijoille ja tuotantotiimeille, jotka tarvitsevat joustavia valmistelun ja analysoinnin työkaluja sekä jauhe- että lankapohjaisiin ainetta lisäävän valmistuksen prosesseihin.

WAAM- ja robottipohjaisen DED-valmistuksen kannalta keskeiset ominaisuudet

- CAD-korjaus ja esikäsitteily:

Netfabb sisältää työkaluja 3D-mallien geometrinen virheiden, kuten aukkojen, käännteisten normaalien ja ei-manifold-reunojen, tunnistamiseen ja korjaamiseen. Tämä varmistaa, että tulostettavat kappaleet ovat geometrisesti ehjiä ennen viipalointia tai tulostusratojen suunnittelua.

- Viipalointi ja geometrian valmistelu:

Vaikka Netfabb on alun perin kehitetty jauhepetipohjaiseen lisäävään valmistukseen, sen viipalointityökaluja voidaan soveltaa myös DED- ja WAAM-prosesseihin. Ohjelmisto mahdollistaa poikkileikkaukskerrosten, kerrosalueiden ja rajapintojen määrittelyn, jotka toimivat WAAM-tulostusratojen suunnittelun perustana.

- **Prosessisimulointi:**

Netfabb tarjoaa simulointiominaisuuksia, joiden avulla voidaan arvioida lämmöntuontia, muodonmuutoksia ja mahdollisia jäännösjännityksiä prosessiparametrien ja valmistusstrategian perusteella. WAAM-sovelluksissa simulointi auttaa arvioimaan lämpökäyttäytymistä sekä tarvetta kiinnitykselle, jäähdytysstrategioille tai tulostusratojen optimoinnille ennen varsinaista valmistusta.

- **Rakenteen asettelu ja optimointi:**

Ohjelmisto tukee kappaleen orientaation määrittelyä, tukirakenteiden luontia (tarvittaessa) sekä automaattista layout-optimointia. Vaikka WAAM-prosessissa perinteisiä tukirakenteita käytetään harvemmin kuin jauhepetimenetelmissä, kappaleen asennon ja valmistusasetelman analysointi auttaa minimoimaan siirtymäliikkeet ja lämpömuodonmuutokset.

- **Parametrien hallinta:**

Käyttäjät voivat määrittää ja hallita prosessiparametreja sekä materiaalikirjastoja. Nämä ominaisuudet tukevat jäljitettävyyttä ja prosessin toistettavuutta useiden tulostusten tai samankaltaisten kappalesuunnitelmien välillä.

4.4.5 Siemens NX for DED

Siemens NX on laaja CAD/CAM/CAE-ohjelmistoalusta, joka sisältää erilliset moduulit ainetta lisäävälle valmistukselle, mukaan lukien DED-prosessit. NX tukee sekä laserpohjaisia että kaaripohjaisia DED-työnkulkuja ja soveltuu erityisen hyvin teollisiin ympäristöihin, joissa lisäävä valmistus integroidaan perinteiseen koneistukseen ja tuotannonsuunnitteluun. Siemens NX on laajasti käytössä muun muassa ilmailu-, energia-, työkalu- ja raskaassa konepajateollisuudessa.

NX for DED tarjoaa integroidun digitaalisen työnkulun, joka kattaa kappalesuunnittelun, ainetta lisäävän valmistuksen esivalmistelun, tulostusratojen generoinnin, simuloinnin sekä hybridivalmistusoperaatiot yhden ohjelmistoympäristön sisällä.

DED- ja WAAM-prosessien kannalta keskeiset ominaisuudet

- **Lisäävän valmistuksen tulostusratojen generointi:**

Siemens NX mahdollistaa DED-prosessien tulostusratojen luomisen suoraan CAD-malleista. Ohjelmisto tukee sekä kerros- ja ääriivapohjaisia talletusstrategioita, jolloin käyttäjä voi hallitusti määrittää kerrosjärjestyksen, palkojen limityksen sekä talletussuunnan.

- **Hybridivalmistuksen tuki:**

Yksi Siemens NX:n keskeisistä vahvuuksista on hybridivalmistuksen mahdollistaminen. Lisäävä talletus ja vähentävä koneistus voidaan yhdistää samaan NC-ohjelmaan, mikä mahdollistaa near-net-shape -valmistuksen ja sen jälkeisen koneistuksen joko prosessin aikana tai sen jälkeen lopullisten toleranssien saavuttamiseksi.

- **Simulointi ja verifiointi:**

NX sisältää simulointityökaluja, joiden avulla voidaan arvioida tulostusratoja, koneen kinematiikkaa sekä mahdollisia törmäyksiä ennen varsinaista ajoa. Lisäksi ohjelmisto tarjoaa lämpö- ja muodonmuutos- ja simulointiominaisuuksia, joiden avulla voidaan arvioida lämmön kertymistä ja muodonmuutosriskejä, tukien näin luotettavaa prosessisuunnittelua.

- Kone- ja ohjainintegraatio:

Siemens NX voidaan konfiguroida tietyille koneelle, robotille tai DED-järjestelmälle postprosessorien ja konekohtaisten määrittelyjen avulla. Tämä mahdollistaa konekohtaisen NC-koodin tuottamisen CNC-ohjaimille ja robottialustoille, joita käytetään DED-sovelluksissa.

- Tiedonhallinta ja jäljitettävyys:

Integraatio Siemensin digitaalisen valmistuksen ekosysteemiin mahdollistaa prosessiparametrien, valmistusdatasta ja revisiohallinnan hallinnan. Tämä tukee jäljitettävyttä ja laadunvarmistusta erityisesti säännellyissä tai tuotantokriittisissä teollisuusympäristöissä.

4.4.6 Hypertherm Robotmaster

Hypertherm Robotmaster on offline-ohjelmointiin (OLP) ja tulostusratojen suunnitteluun tarkoitettu ohjelmisto robottipohjaisiin valmistussovelluksiin, kuten robottihitsaukseen, materiaalinpoistoon (koneistus), trimmaukseen sekä ainetta lisäävään valmistukseen. Ohjelmiston on kehittänyt Hypertherm CAM Solutions, ja sen avulla voidaan luoda, simuloida ja optimoida robottien liikeohjelmia, jotka siirretään teollisiin robottiohjaimiin.

Vaikka Robotmasterin ydinsovellusalue on robottihitsaus ja -koneistus, sen ominaisuudet ovat yhä merkityksellisempiä myös robottipohjaisessa lisäävässä valmistuksessa, kuten WAAM- ja muissa DED-prosesseissa. Ohjelmisto tukee edistynyttä liikeratojen suunnittelua, törmäysten välttämistä sekä robotin kinematiikan hallintaa monimutkaisissa moniakselisissa liikkeissä.

WAAM- ja robottipohjaisten DED-prosessien kannalta keskeiset ominaisuudet

- Edistynyt robottiratojen generointi:

Robotmaster generoi robottien liikeradat CAD-malleista ottaen huomioon robotin kinematiikan, nivelrajoitukset sekä työtilan rajat. WAAM-sovelluksissa tämä mahdollistaa jatkuvien, tulostusratojen luomisen, joissa on otettu huomioon törmäysmahdollisuudet.

- CAD/CAM-integraatio:

Ohjelmisto integroituu CAD-järjestelmiin ja tukee yleisiä 3D-muotoja (esim. STEP, IGES, STL). Geometriaa voidaan hyödyntää tulostusratojen generointiin, mukaan lukien pintaa seuraavat radat sekä monisuuntaiset liikestrategiat, joita tarvitaan usein vaativissa WAAM-kappaleissa.

- Simulointi ja verifiointi:

Sisäänrakennettu simulointi mahdollistaa robottien liikkeiden visuaalisen ja numeerisen tarkastelun ennen varsinaista ajoa. Simulointi tunnistaa mahdolliset ongelmat, kuten singulariteetit, ulottuvuusrajoitukset ja törmäykset kappaleen tai solun rakenteiden kanssa, vähentäen riskiä tuotantoympäristössä.

- Moniakselinen tuki:

Robotmaster tukee moniakselisiä kokoonpanoja, mukaan lukien robotit, joissa on ulkoisia akseleita (esim. pyörityspöydät tai asemointilaitteet). Tämä on erityisen tärkeää WAAM-järjestelmissä, joissa lisäakselit parantavat saavutettavuutta, talletussuuntausta ja prosessin vakautta.

- Räättälöinti ja automaatio:

Ohjelmisto mahdollistaa toistuvien tehtävien automatisoinnin sekä robottikäyttämisen räättälöinnin skriptauksen avulla. Tämä tukee yksilöllisten talletusstrategioiden toteutusta ja mahdollistaa integraation ulkoisiin prosessiparametreihin, kuten syöttönopeuteen tai viiveohjaukseen.

- Ohjainyhteensopivuus:

Robotmaster tukee keskeisiä robottivalmistajia (esim. ABB, FANUC, KUKA, Yaskawa) konfiguroitavien postprosessorien avulla, jotka muuntavat yleiset robottiohjelmat ohjainkohtaiseksi koodiksi. Tämä mahdollistaa WAAM-tulostusratojen saumattoman käyttöönoton eri laitteistoalustoilla.

4.4.7 ABB RobotStudio 3D printing PowerPac, Additive Path Planning and Robot Programming Extension

ABB RobotStudio on laajasti käytetty offline-ohjelmointi- ja simulointiympäristö ABB:n teollisuusroboiteille. 3D Printing PowerPac on RobotStudion lisämoduuli, joka laajentaa ohjelmiston toiminnallisuutta erityisesti ainetta lisäävän valmistuksen sovelluksiin, mukaan lukien lankapohjaiset tulostusprosessit kuten WAAM.

RobotStudio toimii yleisenä robottien simulointi- ja offline-ohjelmointialustana, kun taas 3D Printing PowerPac mahdollistaa lisäävään valmistukseen räätälöityjen robottiratojen generoinnin, validoinnin ja käyttöönoton. Ratkaisu integroituu suoraan ABB:n robottiohjaimiin ja tuotantosoluihin.

WAAM- ja robottipohjaisten DED-prosessien kannalta keskeiset ominaisuudet

- Ainetta lisäävän valmistuksen liikeratojen ohjelmointi RobotStudiassa:

PowerPac tarjoaa ainetta lisäävään valmistukseen suunnattuja toimintoja, kuten pintaa seuraavaa radan interpolointia, kerrosten pinoamisen hallintaa, lanka- tai materiaalinäytön integrointia sekä jatkuvan tulostuksen liikeratojen suunnittelua.

- Täysi offline-simulointi ja validointi:

RobotStudio mahdollistaa kattavan robottien liikesimuloinnin, mukaan lukien ulottuvuuden tarkastelun, törmäystunnistuksen ja moniakselisen liikkeen verifiointin. WAAM-sovelluksissa tämä varmistaa, että tulostusradat ovat toteuttamiskelpoisia ja turvallisia ennen fyysistä ajoa.

- Integraatio ABB:n ohjaimiin:

RobotStudion ja 3D Printing PowerPacin avulla generoidut ohjelmat ovat yhteensopivia ABB:n robottiohjaimien (esim. IRC5) kanssa. Tämä mahdollistaa tulostusratojen suoran siirron ohjaimelle ilman manuaalista käännöstä tai muokkausta, lyhentäen käyttöönottoaikaa ja parantaen toistettavuutta.

- Moniakselinen tuki vaativille geometrioille:

Järjestelmä tukee robotteja, joissa on lisäakseleita (esim. pyörityspöydät, lineaariradat ja asemointilaitteet). Tämä mahdollistaa moniakseliset WAAM-strategiat, jotka parantavat saavutettavuutta monimutkaisissa kappalegeometrioissa ja optimoivat tulostussuunnan.

- Digitaalinen kaksonen ja visualisointi:

RobotStudio luo robottisolusta digitaalisen kaksonen, joka sisältää työkalut, kiinnittimet ja työkappaleen geometrian. Käyttäjä voi visualisoida ainetta lisäävän valmistuksen kerros kerrokselta, tarkastella liikeratojen toteutumista ja varmistaa, että robotin liike pysyy turvallisissa käyttörajoissa koko prosessin ajan.

- Parametrien hallinta ja skriptaus:

PowerPac tukee keskeisten tulostusparametrien parametrisoitua hallintaa liikeratojen yhteydessä. Vaikka ohjelmisto ei suoraan ohjaa esimerkiksi laserin tehoa tai langansyöttölaitteistoa, se mahdollistaa ulkoisten signaalien integroinnin robottiohjelmaan, jolloin prosessilaitteet voidaan synkronoida robotin liikkeen kanssa.

4.4.8 Visual Components

Visual Components on 3D-simulointi- ja digitaalinen kaksonen -ohjelmistoalusta, joka on suunniteltu robottisolujen ja tuotantojärjestelmien mallintamiseen, simulointiin ja validointiin. Vaikka ohjelmisto ei ole tarkoitettu yksinomaan lisäävään valmistukseen, sitä käytetään laajasti teollisessa automaatiassa

monimutkaisten robottisolujen simulointiin, layoutin optimointiin ja liikestrategioiden tarkasteluun ennen fyysistä käyttöönottoa.

WAAM- ja muiden DED-prosessien näkökulmasta Visual Components tarjoaa virtuaalisen ympäristön robottien liikeratojen suunnitteluun, työalueen vuorovaikutusten analysointiin ja solukon konfiguraation verifiointiin. Mahdollistamalla useiden robottien, ulkoisten akselien, kiinnittimien ja työkalujen kokonaisvaltaisen simuloinnin ohjelmisto tukee turvallista ja hallittua robottipohjaisten WAAM-järjestelmien käyttöönottoa.

WAAM- ja robottipohjaisten DED-prosessien kannalta keskeiset ominaisuudet

- 3D-simulointi robottisoluista:

Visual Components mahdollistaa robottisolujen yksityiskohtaisen 3D-mallinnuksen, mukaan lukien robotit, kiinnittimet, tarttijat, työkalut ja työkappaleet. WAAM-sovelluksissa tämä mahdollistaa kappaleen kerroksittaisen kasvun, liikesekvenssien ja mahdollisten häiriöiden simuloinnin robotin liikkeen ja kasvavan rakenteen välillä.

- Digitaalinen kaksonen:

Ohjelmisto tukee digitaalisten kaksosten luomista – fyysisten WAAM-robottisolujen virtuaalisia vastineita – joita voidaan käyttää robottiratojen, layoutin ja järjestelmän yhteistoiminnan visualisointiin ja analysointiin ennen fyysistä toteutusta.

- Usean robotin ja ulkoisten akselien simulointi:

Visual Components tukee useiden robottien sekä ulkoisten akselien (esim. pyörityspöydät, lineaariradat) simulointia. Tämä on erityisen tärkeää edistyneissä WAAM-sovelluksissa, joissa koordinoitu moniakselinen liike parantaa saavutettavuutta ja mahdollistaa optimoidut tulostusstrategiat.

- Törmäystunnistus ja liikkeen validointi:

Alusta tunnistaa mahdolliset törmäykset, nivelrajojen ylitykset ja ulottuvuusongelmat simuloitussa ympäristössä. Tämä vähentää riskiä fyysisessä solussa tapahtuville virheille ja tukee turvallisen sekä tehokkaan robottiohjauksen suunnittelua ainetta lisäävässä valmistustehtävissä.

- Prosessi- ja sykli aika-analyysi:

Visual Components mahdollistaa koko tuotantosyklin simuloinnin ja arvioidun sykliajan laskennan. Tämä tukee WAAM-järjestelmän tuottavuuden, kapasiteetin ja mahdollisten pullonkaulojen analysointia jo ennen laitteiston asentamista.

- Integraatio muihin ohjelmistoihin:

Simulaatioita voidaan täydentää tuomalla sisään robottiohjelmiä tai yhdistämällä offline-ohjelmointityökaluihin. Vaikka Visual Components ei itse generoi talletusratoja, se voi visualisoida ja analysoida muiden ohjelmistojen (esim. RoboDK, ADAXIS, RobotStudio) tuottamia ohjelmia, tukien kokonaisvaltaista järjestelmävalidointia.

4.4.9 Rhino3D and Grasshopper – CAD and Parametric Design Environment for Robotic Additive Manufacturing

Rhino3D (Rhinoceros 3D) on Robert McNeel & Associatesin kehittämä laajasti käytetty CAD-ohjelmisto, joka tunnetaan vahvoista vapaan muodon pintamallinnusominaisuuksistaan ja kyvystään tuottaa monimutkaisia geometrioita. Robottipohjaisessa ainetta lisäävässä valmistuksessa, mukaan lukien WAAM- ja muut DED-prosessit, Rhino3D:tä käytetään yleisesti yhdessä Grasshopperin kanssa, joka on sen visuaalinen parametrisoinnin ja ohjelmoinnin ympäristö.

Yhdessä Rhino3D ja Grasshopper muodostavat joustavan, geometrialähtöisen suunnitteluympäristön, joka tukee parametrisia kappalemalleja, räätälöityä talletusratojen generointia sekä kokeellisten tulostusstrategioiden kehittämistä. Vaikka ohjelmisto ei suoraan ohjaa robotteja tai tulostuslaitteistoa, sillä on keskeinen rooli geometrian valmistelussa ja tulostuslogiikan kehittämisessä robottipohjaisissa AM-työnkuluissa.

WAAM- ja robottipohjaisten DED-prosessien kannalta keskeiset ominaisuudet

- Edistynyt geometriamallinnus (Rhino3D):

Rhino3D mahdollistaa monimutkaisten vapaan muodon pintojen, kaarevien rakenteiden ja epästandardien geometrioiden mallintamisen. Tämä on erityisen hyödyllistä WAAM-sovelluksissa, joissa suunnitteluvapaus ja near-net-shape -valmistus ovat keskeisiä tavoitteita.

- Parametrinen suunnittelu ja ohjaus (Grasshopper):

Grasshopper mahdollistaa geometrian, tulostusratojen ja prosessilogiikan määrittelyn parametrisessa muodossa visuaalisen ohjelmoinnin avulla. WAAM-työnkuluissa tämä mahdollistaa esimerkiksi sääntöpohjaisen kerroskontuurien generoinnin, muuttuvan palonleveyden, adaptiivisen seinämänpaksuuden sekä geometriariippuvien tulostusstrategioiden toteuttamisen.

- Räätälöity talletusratojen generointi:

Grasshopper-komponenttien ja skriptauksen (esim. Python tai C#) avulla voidaan tuottaa räätälöityjä tulostusratoja, jotka ylittävät perinteisen tasokerrosviipaloinnin rajoitukset. Tämä on erityisen arvokasta eitasomaisissa, moniakselisissa tai funktionaalisesti gradientoiduissa WAAM-strategioissa.

- Integraatio robottipohjaisiin AM-työnkuluihin:

Rhino3D/Grasshopper-ympäristössä luotu geometria- ja ratadata voidaan viedä erillisiin robottien offline-ohjelmointi- ja reitinsuunnitteluohjelmistoihin, kuten ADAXIS, RoboDK, Robotmaster tai ABB RobotStudio. Tämän ansiosta Rhino ja Grasshopper toimivat tehokkaina etupään työkaluina robottipohjaisissa AM-työnkuluissa.

- Laajennettava lisäosaympäristö:

Rhino ja Grasshopper tukevat laajaa lisäosakirjastoa, joka kattaa esimerkiksi verkkogeometrian käsittelyn, viipaloinnin, robotti-integraatiot ja lisäävän valmistuksen tutkimustyökalut. Tämä mahdollistaa alustan mukauttamisen sekä teolliseen kehitystyöhön että kokeellisiin WAAM-sovelluksiin käyttäjän tarpeiden mukaisesti.

4.4.10 SprutCAM X

SprutCAM X on Sprut Technologyn kehittämä integroitu CAD/CAM- ja robottiohjelmointialusta. Se tukee laajaa valikoimaa valmistusprosesseja, kuten CNC-koneistusta, robottikoneistusta, hitsausta sekä robottipohjaista ainetta lisäävää valmistusta, mukaan lukien WAAM- ja muut DED-prosessit.

SprutCAM X tarjoaa yhtenäisen ympäristön tulostus- ja työstöratojen generointiin, simulointiin ja robottiohjelmien luontiin. Käyttäjät voivat valmistella lisäävän valmistuksen työvaiheet suoraan CAD-geometriasta ja siirtää ohjelmat teollisuusroboteille tai moniakselisille CNC-järjestelmille.

WAAM- ja robottipohjaisten DED-prosessien kannalta keskeiset ominaisuudet

- Additiivisten tulostusratojen generointi:

SprutCAM X sisältää toiminnallisuudet ainetta lisäävän valmistuksen ratojen luomiseen ja tukee kerrospohjaisia tulostusstrategioita, jotka soveltuvat WAAM- ja DED-prosesseihin. CAM-ympäristössä voidaan määrittellä esimerkiksi kerrospaksuus, palkojen väli, tulostussuunta ja muut prosessiparametrit.

- Tuki roboteille ja CNC-koneille:

Ohjelmisto tukee sekä teollisuusrobotteja että CNC-koneita, mikä mahdollistaa joustavan WAAM-toteutuksen joko robotilla tai moniakselisella CNC-alustalla. Tämä tekee SprutCAM X:stä erityisen soveltuvan hybridi- ja retrofit-järjestelmiin.

- Simulointi ja törmäystarkastelu:

SprutCAM X sisältää sisäänrakennetut simulointityökalut ratojen, robotin liikkeiden ja konekinematiikan varmentamiseen. Törmäystarkastelu, ulottuvuus- ja akselirajojen analysointi auttavat varmistamaan, että tulostusprosessi on turvallinen ja toteuttamiskelpoinen ennen ohjelman siirtämistä fyysiselle laitteistolle.

- Moniakselinen ja hybridi-valmistus:

Alusta tukee moniakselisiä ratoja sekä työnkulkuja, joissa yhdistetään tulostus ja koneistus. Tämä mahdollistaa near-net-shape -valmistuksen, jota seuraa viimeistelykoneistus lopullisten toleranssien saavuttamiseksi samassa ohjelmointiympäristössä.

- Postprosessointi ja ohjainyhteensopivuus:

SprutCAM X sisältää postproessorit useille teollisuusroboteille ja CNC-ohjaimille. Tämän ansiosta generoidut radat voidaan muuntaa suoraan kohdelaitteiston ymmärtämään konekoodiin, mikä tukee sujuvaa käyttöönottoa WAAM-järjestelmissä.

4.5 Kokemuksia CNC-koneen muuttamisesta WAAM-sovelluksia varten

FMT-tutkimusryhmä otti WAAM-prosessin käyttöön CNC-laitteessa, jota oli aiemmin käytetty puuntyöstösovelluksissa. Muutostyön yhteydessä suunniteltiin ja valmistettiin erillinen kiinnitysratkaisu hitsauspolttimen kiinnittämistä varten. Polttimen kiinnitys on suunniteltu niin että se voi toimia myös "sulakkeena" mahdollisen törmäyksen sattuessa. Lisäksi laitteeseen asennettiin suojarakenteita, joiden tarkoituksena on suojata koneen komponentteja ja akseleita hitsausroiskeilta, lämmöltä ja valokaaren aiheuttamalta säteilyltä.

Hitsausprosessin hallittua käynnistämistä ja pysäyttämistä varten kehitettiin relepohjainen ohjausrajapinta, joka mahdollistaa tiedonsiirron CNC-ohjaimen ja hitsausvirtalähteen välillä. Tämä integraatio varmistaa koneen liikkeen ja hitsausprosessin synkronoidun ohjauksen, mikä on edellytys vakaalle ja toistettavalle WAAM-tulostukselle.

CNC-konetta ohjataan PlanetCNC-ohjelmistolla, joka on avoimen lähdekoodin CNC-ohjausratkaisu. Vapaasti saatavilla olevan ohjelmiston käyttö tarjoaa kustannustehokkaan ja joustavan tavan toteuttaa WAAM-järjestelmä, ja se mahdollistaa liikeohjauksen sekä prosessiparametrien mukauttamisen WAAM-prosessin vaatimusten mukaisesti.

Prosessin seurannan ja lämpötilanhallinnan parantamiseksi järjestelmään asennettiin pyrometrejä lämpötilan mittausta varten. Yhtä pyrometriä käytetään kerrosten välisen välilämpötilan (interpass temperature) mittaamiseen ja säätämiseen. Välilämpötila on kriittinen parametri, joka vaikuttaa tulostettavan kappaleen mikrorakenteeseen, mekaanisiin ominaisuuksiin ja jäännösjännityksiin. Toinen pyrometri mittaa kappaleen kokonaislämpötilaa tulostuksen aikana, mikä mahdollistaa lämmön kertymisen paremman ymmärtämisen ja lämpöhistoriadan keräämisen.

Kokonaisuutena tämä laitteen muutosprosessi osoittaa, että olemassa oleva CNC-laitteisto voidaan suhteellisen pienin muutoksin muuntaa WAAM-käyttöön. Menetelmä tarjoaa kustannustehokkaan ja joustavan tavan ottaa käyttöön kaaripohjainen ainetta lisäävä valmistus erityisesti tutkimus-, prototyyppi- ja korjaussovelluksissa.

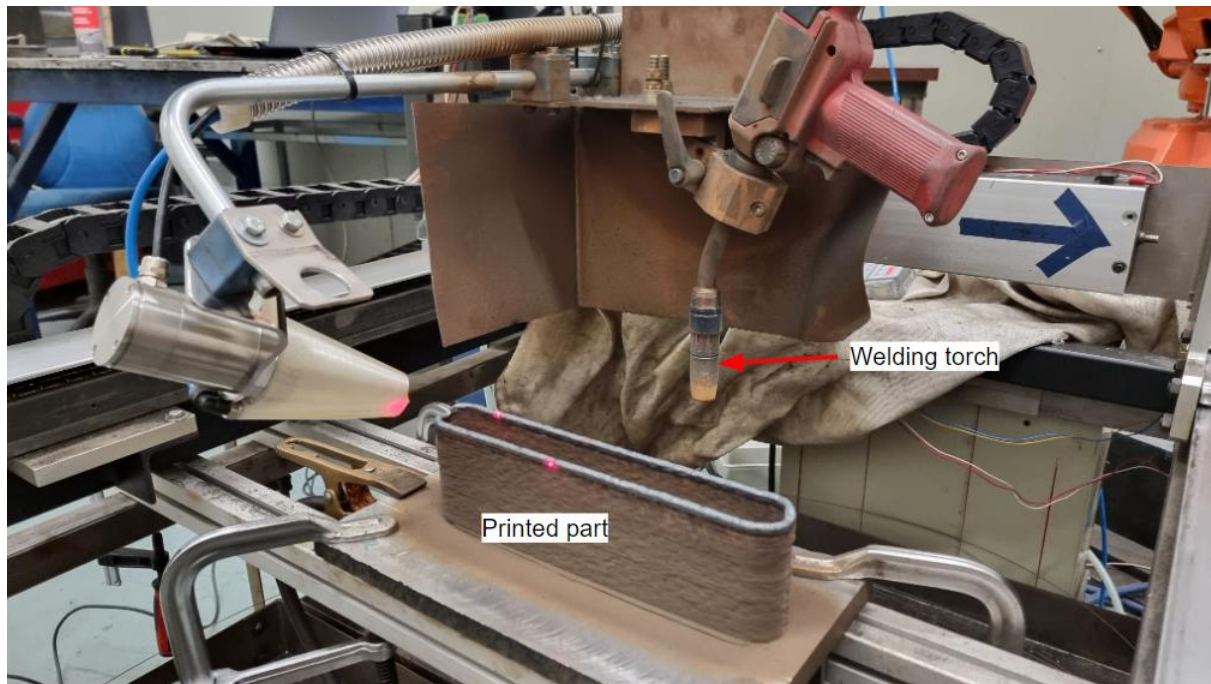


Fig. 1. WAAM tulostuslaitteisto.

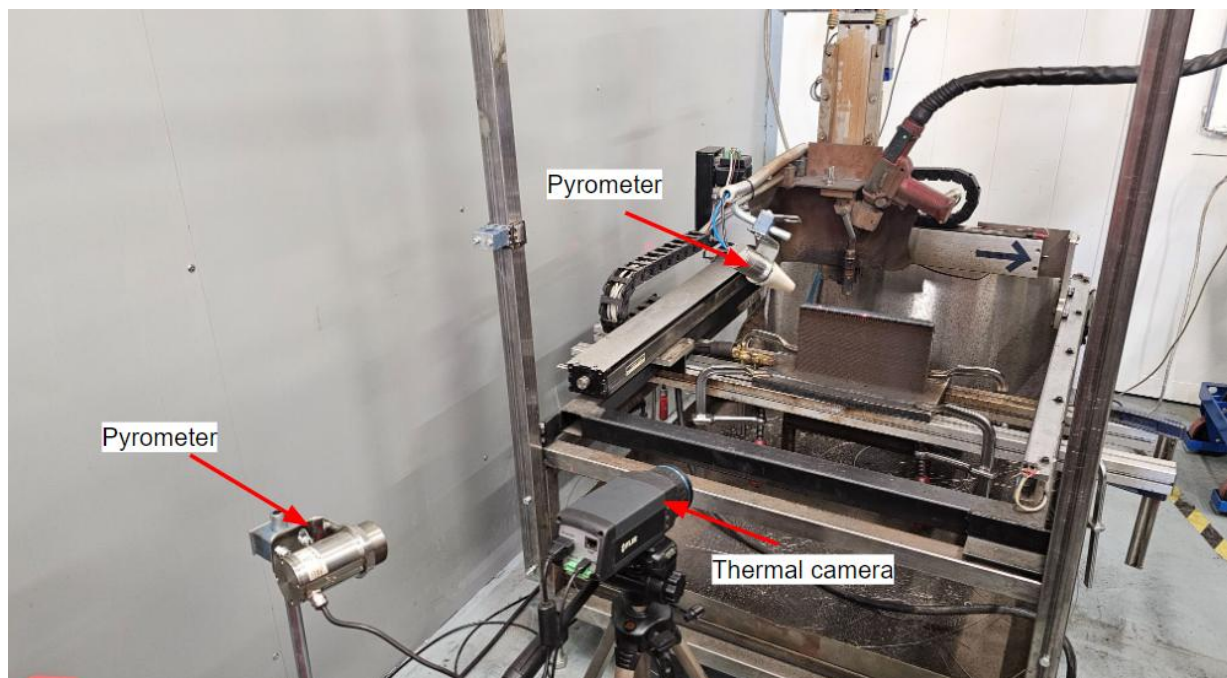


Fig. 2. Lämpötilan mittaaminen ja välipalkolämpötilan säätäminen pyrometrien avulla.

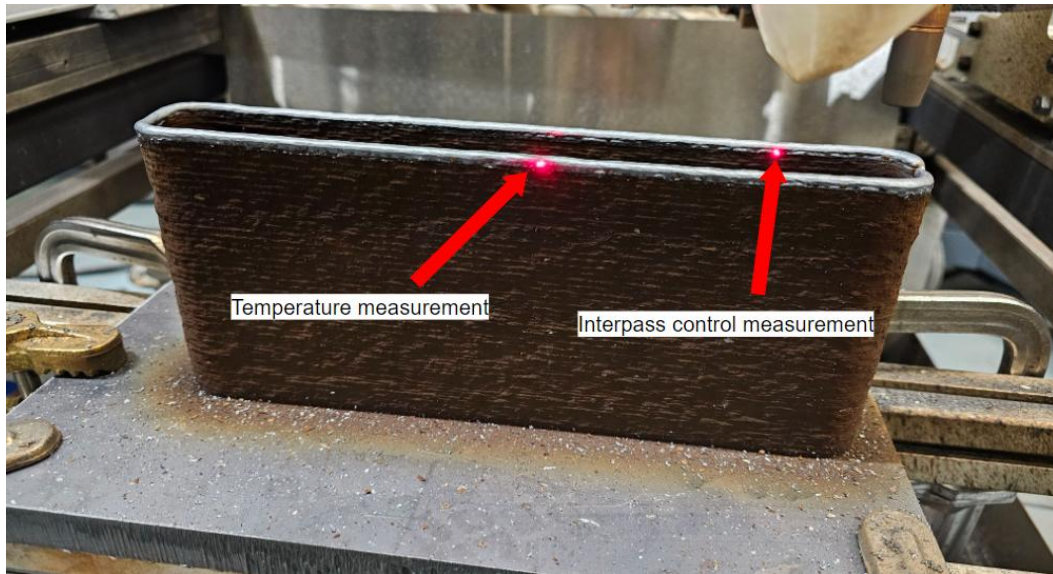


Fig. 3. Lämpötilan ja välipalkolämpötilan mittauspaikat.



Fig. 4. WAAM-solun layout.

4.6 Kokemuksia hitsausrobotisolun muuntamisesta WAAM-käyttöön

FMT-tutkimusryhmä toteutti olemassa olevan robotihitsaussolun muuntamisen WAAM-käyttöön. Robottisolu koostuu kolmesta ABB:n teollisuusrobotista, joita käytettiin alun perin perinteisissä hitsaussovelluksissa.

Muutetussa WAAM-kokoonpanossa suurin robotti toimii tulostettavan kappaleen kiinnitys- ja asemointirobottina. Se mahdollistaa kappaleen hallitun liikuttamisen tulostusprosessin aikana ja optimoi kappaleen orientaation suhteessa hitsauspolttimeen. Tämä on erityisen hyödyllistä WAAM-prosessissa, koska se auttaa säilyttämään suotuisat tulostusolosuhteet ja parantaa osan geometrista tarkkuutta.

Yksi pienemmistä roboteista on varustettu langansyöttölaitteella ja hitsauspolttimella ja se vastaa materiaalin tulostuksesta. Hitsausprosessissa hitsausvirtalähteenä toimii Wallius Blackline 323 -virtalähde, joka tarjoaa hyvin säädettävän valokaaren, soveltuen WAAM-prosessiin.

Robotit toimivat alun perin perinteisessä hitsaussolussa, jossa oli hitsausprosessiin suunniteltu turvajärjestelmä. Muutosprosessin ensimmäisessä vaiheessa olemassa oleva turvajärjestelmä purettiin ja korvattiin uudella, nimenomaan WAAM-käyttöön suunnitellulla turvallisuusratkaisulla. Päivitetty turvajärjestelmä huomioi jatkuvan tulostusprosessin, pidemmät käyttöajat sekä useiden robottien koordinoitun liikkeen, varmistaen turvallisen ja luotettavan toiminnan ainetta lisäävässä valmistuksessa.

WAAM-tulostuksen mahdollistamiseksi suurempaan robottiin suunniteltiin ja asennettiin räätälöity kiinnitysjärjestelmä, joka mahdollistaa tulostettavan kappaleen kiinnityksen. Tämä kiinnitysjärjestelmä toimii samalla suojarakenteena, vähentäen robotin rakenteiden altistumista hitsausroiskeille ja lämpösäteilylle. Kiinnitys- ja suojarakenteiden integrointi oli keskeistä sekä prosessin vakauden että robottijärjestelmän pitkäaikaisen luotettavuuden kannalta.

Tulostusstrategioiden kehittämisen yhteydessä RoboDK-ohjelmistoa arvioitiin aluksi WAAM-tulostusratojen ohjelmointiin. Vaikka RoboDK tarjoaa yleisiä työkaluja robottien simulointiin ja offline-ohjelmointiin, sen käyttö WAAM-spesifisiin sovelluksiin osoittautui haasteelliseksi. Erityisesti erittäin monimutkaisten tulostusratojen luominen vaati paljon manuaalista työtä ja geometrisesti vaativien kappaleiden ratojen generointi oli työlästä ja aikaa vievää.

Tämän kokeilun jälkeen ohjelmointiin otettiin käyttöön Grasshopper-ohjelmisto. Grasshopperilla tehtiin tulostusradat esimerkiksi impellerin siipien kaltaisille monimutkaisille geometrioille, joissa perinteiset CAM-pohjaiset lähestymistavat eivät usein ole riittäviä. Grasshopperin parametrinen lähestymistapa mahdollisti joustavien ja monimutkaisten tulostusratojen generoinnin, jolloin tulostusstrategiat voitiin mukauttaa monimutkaisiin muotoihin.

Vaikka Grasshopperin oppimiskäyrä on suhteellisen jyrkkä, erityisesti käyttäjille, joilla ei ole aiempaa kokemusta parametrisesta suunnittelusta tai visuaalisesta ohjelmoinnista, ohjelmisto tarjoaa merkittäviä etuja WAAM-sovelluksissa. Sen avulla voidaan toteuttaa erittäin monimutkaisia tulostusratoja, joita olisi vaikea tai käytännössä mahdotonta toteuttaa perinteisillä robottiohjelmointityökaluilla. Tämä joustavuus tekee Grasshopperista erityisen soveltuvan tutkimusympäristöihin ja vaativiin teollisiin sovelluksiin, joissa kappalegeometriat ovat monimutkaisia.

Kokonaisuudessaan robottisolun muutos osoittaa, että olemassa olevat monirobottiset hitsaussolut voidaan muuntaa WAAM-käyttöön suhteellisen vähäisillä muutoksilla. Käytössä ollut lähestymistapa tarjoaa käytännöllisen ja kustannustehokkaan tavan ottaa käyttöön WAAM-prosessi hyödyntämällä olemassa olevaa robotti-infrastruktuuria.

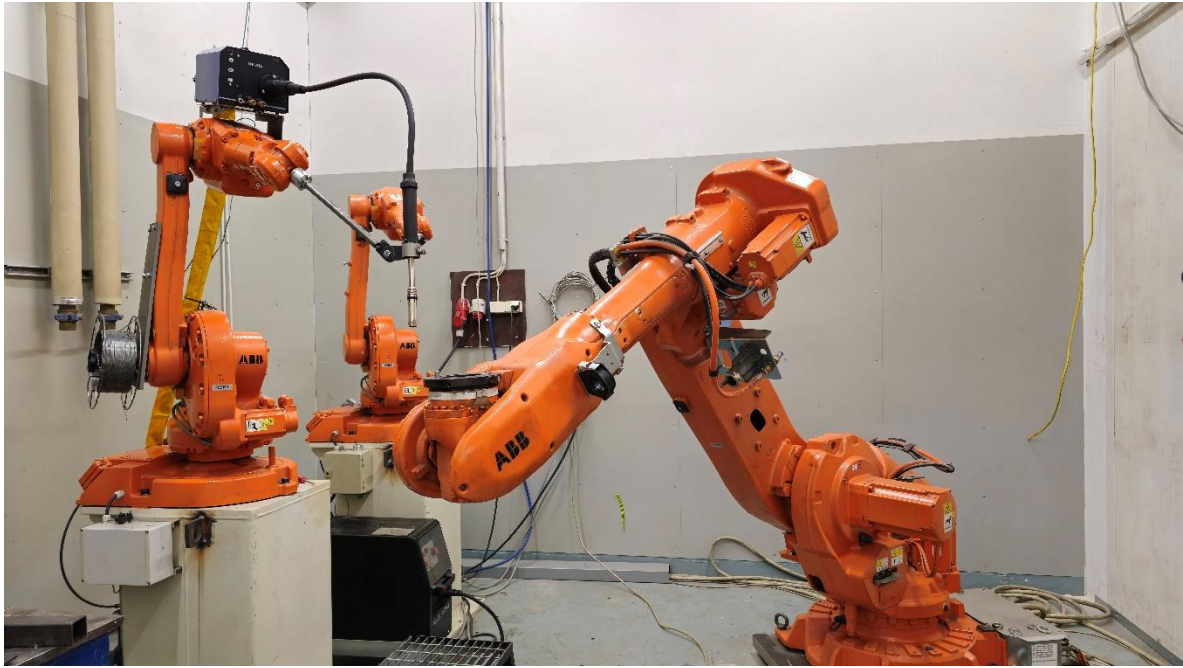


Fig. 1. WAAM-robottisolu.

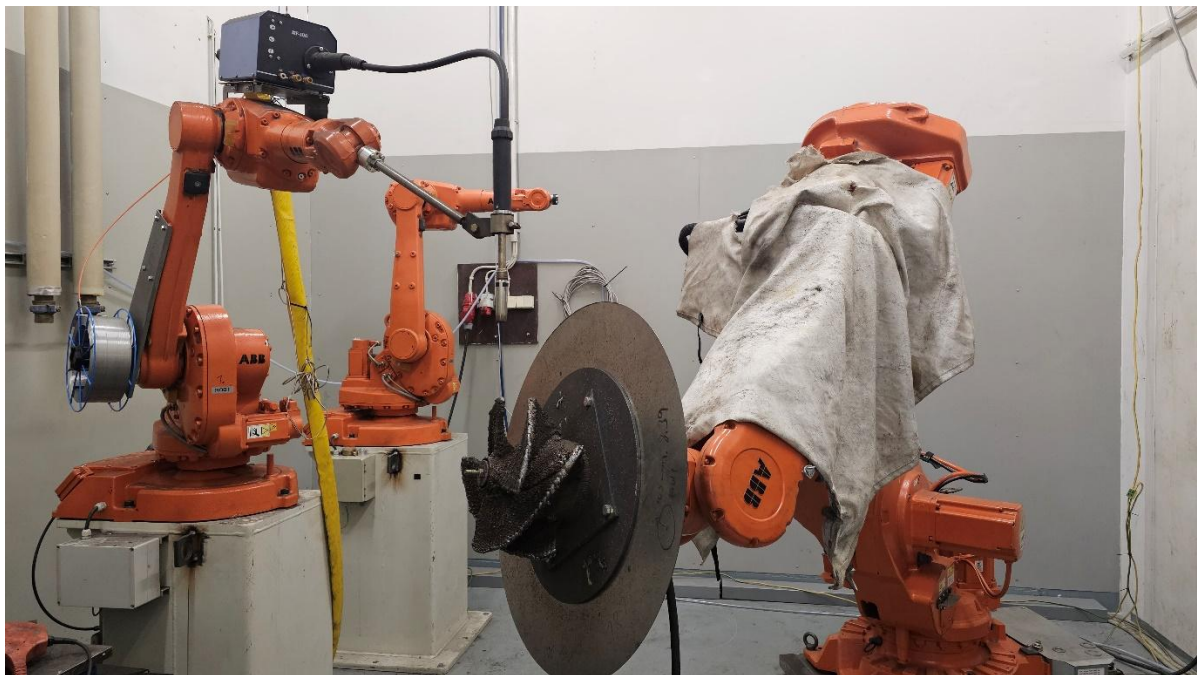


Fig. 2. WAAM-tulostusta robottisolussa.

5 Suorakerrostus (DED) prosessin simulointi

Tämän osuuden on kirjoittanut Sami Westman, LUT-yliopisto.

5.1 Mitä prosessisimulaatio tarkoittaa DED-prosessissa

Prosessisimulaatiolla tarkoitetaan valmistusprosessin mallintamista tietokoneella siten, että voidaan ennustaa, mitä kappaleelle tapahtuu prosessin aikana ja sen jälkeen. DED prosessissa tämä tarkoittaa erityisesti lämmön siirtymisen, lämpötilojen, muodonmuutosten ja jäännösjännitysten ennustamista, kun metallia lisätään kerros kerrokselta voimakkaan ja paikallisen lämmönlähteen avulla.

Yksinkertaistettuna prosessisimulaatio on digitaalinen versio todellisesta DED ajosta. Prosessia kokeillaan ensin virtuaalisesti ennen kuin yhtään jauhetta tai lankaa syötetään koneeseen. Tämä mahdollistaa prosessin ilmiöiden tarkastelun huomattavasti hallitummin kuin pelkän kokeilun kautta.

DED on prosessina herkkä monille tekijöille. Teho, etenemisnopeus, työkaluradan muoto, kerrosten järjestys, tauot kerrosten välillä sekä kappaleen kiinnitys vaikuttavat kaikki siihen, miten lämpö kertyy kappaleeseen ja miten kappale lopulta käyttäytyy. Prosessisimulaatio auttaa ymmärtämään näitä tekijöitä ja niiden välisiä syy–seuraussuhteita tavalla, jota on vaikea saavuttaa pelkillä kokeilla.

5.1.1 Mihin DED prosessin simulointia käytetään

DED prosessin simulointia hyödynnetään moniin käytännöllisiin tarkoituksiin, joista yksi keskeisimmistä on muodonmuutosten ennustaminen. Simulaatio antaa arvion siitä, mihin suuntaan ja kuinka paljon kappale todennäköisesti vääntyy tai kaareutuu prosessin aikana. Tämä on erityisen tärkeää ohutseinäisissä rakenteissa, suurikokoisissa kappaleissa sekä geometrioissa, joissa jo pienikin vääntyminen voi aiheuttaa ongelmia myöhemmissä työvaiheissa tai tehdä kappaleesta käyttökelvottoman.

Toinen merkittävä käyttökohde on prosessin aiheuttamien jäännösjännitysten arviointi. Nopea ja paikallinen kuumeneminen sekä sitä seuraava jäähtymisen synnyttävät DED prosessissa suuria jännityksiä, jotka voivat johtaa halkeamiin, hallitsemattomiin muodonmuutoksiin tai vaikeuksiin koneistuksen aikana. Simuloinnin avulla voidaan tunnistaa jännitysten kannalta kriittiset alueet ja arvioida riskien suuruusluokkaa jo ennen fyysistä valmistusta.

Simulaatio soveltuu hyvin myös prosessiparametrien optimointiin. Erilaisia tehotasoja, etenemisnopeuksia, työkaluratoja ja kerrosjärjestyksiä voidaan vertailla virtuaalisesti ilman, että jokaista vaihtoehtoa tarvitsee testata käytännössä. Tämä nopeuttaa prosessin kehitystä ja vähentää kokeiluihin kuluvaan aikaa ja materiaalia.

Lisäksi simulointi tukee kiinnitysten ja esilämmitysstrategioiden suunnittelua. Mallin avulla voidaan arvioida, kuinka jäykkä kiinnityksen tulisi olla tai missä tilanteissa esilämmitys auttaa hallitsemaan lämpötilagradientteja ja niistä johtuvia muodonmuutoksia. Erityisesti korjaus ja lisäysprosesseissa simuloinnilla on suuri merkitys, sillä sen avulla voidaan arvioida, miten lämpö vaikuttaa olemassa olevaan kappaleeseen ja syntyykö ei-toivottuja muutoksia osaan, jota ei varsinaisesti olla rakentamassa.

5.1.2 Mitä hyötyä simulaatiosta on käytännössä

Prosessisimulaation suurin hyöty ei ole yksittäisissä lämpökäyrissä tai värikartoissa, vaan päätöksenteossa, jota niiden avulla voidaan tehdä. Käytännössä simulaation käyttö johtaa usein vähäisempään epäonnistuneiden rakennusten määrään, pienempään mekaanisen jälkityöstön tarpeeseen, lyhyempään prosessin kehitysaikaan ja parempaan toistettavuuteen tuotannossa.

Simulaatio tuo myös syvempää ymmärrystä siitä, miksi jokin kappale käyttäytyy tietyllä tavalla. Monessa tapauksessa simulaatio ei korvaa kokeita kokonaan, mutta se vähentää kokeilujen määrää merkittävästi ja auttaa kohdistamaan ne oikeisiin asioihin.

5.1.3 Prosessimuutosten vaikutusten tarkastelu pitkällä aikavälillä

Yksi prosessisimulaation merkittävimmistä eduista on mahdollisuus tarkastella prosessimuutosten vaikutuksia myöhemmissä kerroksissa ja prosessin edetessä. DED prosessissa monet ilmiöt eivät ilmene heti ensimmäisten kerrosten aikana, vaan vasta kun lämpö alkaa kerääntyä kappaleeseen.

Simulaation avulla voidaan esimerkiksi tarkastella, miten työkaluradan tai valmistusstrategian muutos vaikuttaa lämpötiloihin 20 tai 50 kerrosta myöhemmin, miten pieni muutos tehotasossa näkyy kappaleen yläosassa tai miten kerrosten välinen tauko vaikuttaa kokonaislämpötilatasoon pitkällä aikavälillä.

Todellisessa prosessissa näiden vaikutusten tutkiminen on huomattavasti työläämpää. Koska DED prosessissa lämpöhistoria kertyy kerros kerrokselta, vastaavat olosuhteet ylemmissä kerroksissa saavutetaan usein vain ajamalla koko koekappale alusta asti uudelleen. Tämä voi tarkoittaa useita pitkiä ja kalliita ajokertoja yhden parametrimuutoksen arvioimiseksi.

Simulaatiossa samaa asetelmaa voidaan muuttaa nopeasti ja tarkastella tuloksia suoraan saman lämpöhistorian jatkona. Tämä tekee erityisesti pitkien ja suurten DED rakenteiden optimoinnista huomattavasti tehokkaampaa kuin pelkkään kokeiluun perustuva lähestymistapa.

5.1.4 Miksi simulaatio on erityisen hyödyllistä DED prosessissa

DED eroaa monista muista lisäävän valmistuksen menetelmistä siinä, että lämmöntuonti on suuri ja paikallinen, materiaalinlisäys tapahtuu usein paksuilla kerroksilla ja kappaleet voivat olla suuria ja massiivisia. Prosessi muistuttaa monessa suhteessa monipalkohitsausta enemmän kuin hienorakeista jauhepetitulostusta.

Näiden ominaispiirteiden vuoksi lämpö kertyy helposti, jäähtyminen voi olla epätasaista ja kappaleen käyttäytyminen ei ole aina intuitiivista. Simulaatio tarjoaa mahdollisuuden nähdä nämä ilmiöt etukäteen eikä vasta siinä vaiheessa, kun kappale irrotetaan alustasta ja todetaan kieroksi.

Simulaation arvo kasvaa erityisesti silloin, kun kappale on kallis tai aikaa vievä valmistaa, geometriat ovat ohuita tai epäsymmetrisiä, toleranssit ovat tiukkoja tai tavoitteena on vakioitu tuotantoprosessi. Erityisesti paksuissa, massiivisissa täyttörakenteissa DED prosessin haasteena on usein liiallinen lämmön kertyminen, joka voi johtaa epästabiliin sulaan tilaan, hallitsemattomiin muodonmuutoksiin ja prosessin ajettavuuden heikkenemiseen ylemmissä kerroksissa.

Simulaation avulla voidaan suunnitella kerrosten välisiä taukoja, porrastaa tehotasoa prosessin edetessä, muuttaa valmistusstrategiaa ylemmissä kerroksissa tai arvioida esilämmityksen ja aktiivisen jäähdytyksen tarvetta.

5.2 DED prosessin simulointimenetelmät

DED prosessia voidaan lähestyä simulaation näkökulmasta usealla eri tavalla. Kaikki menetelmät eivät kuitenkaan sovellu yhtä hyvin koko kappaleen prosessisimulointiin, ja käytännössä valinta on kompromissi tarkkuuden ja laskennallisen tehokkuuden välillä.

5.2.1 Lämpö mekaaninen simulointi

Lämpö mekaaninen simulointi on DED prosessien yleisimmin käytetty simulointimenetelmä, erityisesti silloin kun tavoitteena on ennustaa muodonmuutoksia ja jäännösjännityksiä koko kappaleessa. Menetelmä perustuu siihen, että ensin ratkaistaan kappaleen lämpötilakenttä prosessin aikana, ja tämän jälkeen lämpötilahistoria syötetään mekaaniseen laskentaan, jossa lasketaan jännitykset ja muodonmuutokset. Tuloksista siis nähdään lämpötilan, siirtymien ja jäännösjännitysten kehitys prosessin aikana.

DED prosessin keskeisimmät ilmiöt kuten lämmön kertyminen, epätasainen jäähtyminen ja rakenteen vääntyminen ovat suoraa seurausta lämpötilakentän kehityksestä. Lämpö mekaaninen simulointi mallintaa nämä ilmiöt riittävällä tarkkuudella ilman, että laskenta aika kasvaa kohtuuttomaksi, minkä vuoksi sitä pidetään teollisena perusmenetelmänä DED simuloinneissa.

5.2.2 Virtauslaskenta (CFD)

CFD simulointi mallintaa sulan metallin käyttäytymistä fyysisesti hyvin yksityiskohtaisella tasolla. Se käsittää sulan virtauksen, pintajännityksen ja Marangoni ilmiön, sula kiinteä rajapinnan liikkeen sekä jauheen tai langan vuorovaikutuksen sulan kanssa.

CFD mallit ovat hyvin tarkkoja, mutta laskennallisesti raskaita. DED prosessissa CFD soveltuu tyypillisesti vain yksittäisen juovan tai lyhyen ajanjakson tarkasteluun. Siksi CFD toimii usein mikroskooppina prosessin paikallisten ilmiöiden ymmärtämiseen, kun taas lämpö mekaaninen simulointi tarjoaa kokonaiskuvan.

5.2.3 Inherent strain menetelmä

Inherent strain menetelmä kuvaa prosessin aikana syntyvät pysyvät muodonmuutokset yksinkertaistettuna sisäisenä venymänä ilman eksplisiittistä lämpökentän laskentaa. Menetelmä on nopea ja soveltuu suuriin rakenteisiin, mutta DED prosessissa sen käyttöä rajoittavat prosessin monimutkaiset lämpöhistoriat ja vaihtelevat olosuhteet.

DED prosessissa inherent strain parametrien määrittely on haastavaa, ja pienet prosessimuutokset voivat tehdä kerran kalibroidusta mallista epäluotettavan. Menetelmä soveltuu lähinnä karkeaan muodonmuutosten arviointiin, ei prosessin dynamiikan syvälliseen analyysiin.

5.3 Lämpö mekaanisen simuloinnin käytännön rakentaminen DED prosessille

Kun DED prosessin simulointimenetelmäksi on valittu lämpö mekaaninen simulointi, seuraava kysymys on hyvin käytännöllinen: miten tällainen simulaatio todellisuudessa rakennetaan. Tässä kappaleessa käydään läpi keskeiset mallinnusvaiheet ja valinnat, jotka toistuvat lähes kaikissa DED simuloinneissa riippumatta käytetystä ohjelmistosta.

Tarkoituksena ei ole antaa ohjelmistokohtaisia käyttöohjeita, vaan auttaa ymmärtämään, mitä mallissa täytyy olla mukana ja miksi tietyt valinnat ovat kriittisiä tulosten kannalta.

5.3.1 Geometrian mallinnus ja laskentamallin rajaus

Lämpö mekaaninen simulointi alkaa aina geometriasta. Malliin tarvitaan vähintään rakennettava kappale, alusta tai perusmateriaali sekä mahdolliset kiinnitykset tai tuennat. Käytännössä geometriaa harvoin mallinnetaan täysin identtisesti todellisen CAD mallin kanssa. Pienet yksityiskohdat jätetään usein pois ja reunapyöristyksiä yksinkertaistetaan.

Tavoitteena ei ole visuaalinen tarkkuus, vaan oikean lämpö ja jäykkyyskäyttäytymisen kuvaaminen. Yksi tärkeimmistä ja usein aliarvioituista päätöksistä on se, kuinka paljon ympäröivää materiaalia otetaan mukaan laskentamalliin.

DED prosessissa suurin osa sulan jäähtymisestä tapahtuu lämmön johtumisella materiaaliin. Jos ympäröivää materiaalia mallinnetaan liian vähän, lämpö ei pääse johtumaan realistisesti pois sulasta ja kappale lämpenee simulaatiossa liikaa. Ylemmät kerrokset voivat näyttää epärealistisen kuumilta ja prosessi vaikuttaa epävakaammalta kuin todellisuudessa. Tämä johtuu siitä, että simulaatiossa ei ole riittävästi lämpökapasiteettia tasaamassa lämpöä.

Toisessa ääripäässä liian suuri malli johtaa siihen, että lämpö johtuu pois liian tehokkaasti, kappale jäähtyy liian nopeasti ja lämmön kertymistä aliarvioidaan. Samalla elementtien määrä kasvaa, laskenta aika pitenee ja huomio saattaa siirtyä pois kriittisiltä alueilta.

Hyvä geometrinen malli on aina kompromissi. Tavallisesti mukaan mallinnetaan koko rakennettava kappale, riittävän paksu osa alustaa sekä tarvittaessa osa ympäröivästä rakenteesta. Liiallista geometriaa voidaan rajata pois alueellisen verkon karkeistamisen tai lämpösiirron kannalta merkityksettömien alueiden poistamisen avulla. Geometrian rajauksella on suora vaikutus siihen, ennustaako simulaatio realistisesti lämmön kertymistä vai ei.

5.3.2 Verkotus – mihin tarkkuutta oikeasti tarvitaan

DED prosessissa lämpötilagradientit ovat erittäin jyrkkiä sulan alueella, kun taas suurin osa kappaleesta lämpenee ja jäähtyy huomattavasti hitaammin. Tästä syystä laskentaverkko rakennetaan tyypillisesti epätasaisena. Materiaalinlisäyksen ja lämmönlähteen ympärillä tarvitaan hieno verkko, kun taas kauempana rakennusalueesta verkko voi olla huomattavasti karkeampi. Joitain rajoituksia elementtien maksimikoolla kappaleessa kuitenkin on. Erityisesti jos jokainen kerros simuloidaan olisi hyvä että kerros paksuus olisi elementin koolla jaollinen jotta vältetään ongelmilta elementin aktivoimisessa.

Liian hieno verkko koko kappaleessa tekee simuloinnista raskaan ilman vastaavaa hyötyä. Liian karkea verkko taas vääristää lämpökenttää ja johtaa virheellisiin muodonmuutosten ja jännitysten ennusteisiin.

Verkotus on aina kompromissi tarkkuuden ja laskenta ajan välillä, ja sen valintaan kannattaa suhtautua yhtä vakavasti kuin materiaalimalleihin tai rajaehtoihin.

5.3.3 Työkalurata ja materiaalinlisäyksen mallinnus

DED prosessin lämpö mekaanisessa simuloinnissa työkalurata ja materiaalinlisäys määrittävät käytännössä koko prosessin kulun. Lämmönlähde liikkuu jatkuvasti kappaleen pinnalla ja uutta materiaalia syntyy samaa tahtia. Simulaatiossa vastataan koko ajan kahteen kysymykseen: missä kohtaa energiaa syötetään ja missä kohtaa materiaalia on jo olemassa.

Työkalurata määrää lämmön kertymisen, paikalliset ylikuumenemiset, ylempien kerrosten lämpötilan sekä muodonmuutosten suunnan ja suuruuden. Monissa simulointiohjelmistoissa ratojen luontityökalut ovat rajallisia tai kömpelöitä, minkä vuoksi työkaluradat luodaan usein CAM ohjelmistoissa, robottiohjelmointiympäristöissä tai suoraan tuotantokonetta varten generoituna G koodina. Tämä parantaa simulaation vastaavuutta todelliseen prosessiin, koska liikeprofiilit, nopeudet ja pysähdykset tulevat luonnollisesti mukaan.

Materiaalinlisäys mallinnetaan useimmiten elementtien aktivoimisen avulla. Aktivointi voidaan tehdä elementti tai ratakohtaisesti, kerroksittain tai näiden yhdistelmänä. Elementtikohtainen aktivointi tuottaa realistisemman paikallisen lämpökentän, mutta kasvattaa laskenta aikaa nopeasti suurissa rakenteissa. Kerroskohtainen aktivointi on nopeampi ja yksinkertaisempi, mutta aliarvioi paikallisia lämpöhuippuja. Hybridistrategioissa alemmat kerrokset mallinnetaan tarkemmin ja ylempissä siirrytään karkeampaan aktivointiin, mikä vastaa hyvin todellista prosessia.

Aktivointistrategialla on suuri vaikutus siihen, kuinka realistinen lämpökenttä simulaatiossa syntyy ja kuinka paljon laskenta aikaa kuluu. DED prosessissa ei ole yhtä oikeaa strategiaa, vaan valinta riippuu kappaleen koosta, kerrosmäärästä, tarkasteltavasta ilmiöstä ja käytettävissä olevista laskentaresursseista.

5.3.4 Lämmönlähdemalli

Lämmönlähdemalli on lämpö mekaanisen DED simuloinnin ydin. Sen tehtävänä on kuvata, miten prosessissa käytetty energia siirtyy kappaleeseen materiaalinlisäyksen aikana. Lämmönlähdemalli perustuu aina todellisiin prosessiparametreihin, kuten tehotasoon, etenemisnopeuteen ja materiaalinlisäykseen.

Prosessiparametreja ei saa muuttaa mallin kalibroimiseksi. Jos lämmönlähdettä säädetään vain siksi, että yksi tapaus näyttää oikealta, simulaatiomalli toimii vain kalibroidussa tapauksessa eikä reagoi realistisesti parametrimuutoksiin. Kalibrointi on tehtävä fysikaalisten malliparametrien, ei prosessireseptin, kautta.

Lämmönlähteen geometrian merkitys riippuu voimakkaasti mallin mittakaavasta. Pienissä ja yksityiskohtaisissa malleissa sulan alueen oikea koko on kriittinen, koska paikalliset lämpötilagradientit vaikuttavat suoraan mekaaniseen vasteeseen. Suurissa ja massiivisissa rakenteissa paikallisten yksityiskohtien merkitys pienenee ja olennaisempaa on kokonaislämmöntuonin ja lämpötilatason oikea suuruusluokka.

5.3.5 Rajaehdot ja ympäristö

Rajaehdot näyttävät usein yksinkertaisilta, mutta DED prosessissa niillä on erittäin suuri vaikutus tuloksiin. Prosessi on pitkäkestoinen ja lämmöntuonti suuri, joten simulaation ennustama käyttäytyminen riippuu siitä, miten lämpö poistuu kappaleesta ja miten kappale on mekaanisesti tuettu.

Lämpöpuolella suurin epävarmuus liittyy konvektioon ja säteilyyn, sillä DED prosessin ympäristöolosuhteet vaihtelevat. Suojakaasun virtaus, ilmanpoisto, tulostustilan koko ja ulkoiset häiriöt vaikuttavat lämpötilatasoon. Toisin kuin jauhepetiprosesseissa, olosuhteet eivät ole hyvin vakioituja, ja lämpörajaehdot ovat väistämättä approksimaatioita.

Mekaanisessa simuloinnissa kiinnitykset ovat kriittisiä. Todelliset kiinnitykset eivät ole täysin jäykkiä, vaan joustavat ainakin hieman. Täysin jäykkien rajaehtojen käyttö johtaa usein epärealistisiin jäännösjännityksiin ja virheellisiin muodonmuutosennusteisiin. Kiinnitysten realistinen mallinnus on osa prosessimallia, ei erillinen yksityiskohta.

5.3.6 Materiaalimallit

Materiaalimalli on lämpö mekaanisen simuloinnin perusta. Se kuvaa, kuinka lämpö siirtyy materiaalissa, miten materiaali laajenee ja kutistuu sekä milloin se käyttäytyy elastisesti ja milloin plastisesti. DED prosessissa materiaali käy läpi erittäin korkeita lämpötiloja ja toistuvaa kuumenemistä ja jäähtymistä, minkä vuoksi lämpötilariippuvat materiaalimallit ovat välttämättömiä.

Sekä lämpö että mekaaniset ominaisuudet muuttuvat voimakkaasti lämpötilan funktiona. Jos simulaatiossa käytetään vain huoneenlämpöisiä arvoja, seurauksena on usein liioitellut jännitykset ja epärealistinen jäykkyys. Useimmissa käytännön sovelluksissa lämpötilariippuva elastinen ja plastinen käyttäytyminen riittää, kun taas faasimuutokset tai viruminen otetaan mukaan vain, jos niillä on selkeä vaikutus tarkasteltavaan ilmiöön.

5.3.7 Aika askel ja laskennan hallinta

Aika askel määrittää, kuinka usein simulaatio päivittää tilannekuvan prosessista. Suuret aika askeleet syöttävät lämpöä malliin suurina energiamäärinä kerralla, mikä tasoittaa lämpötilagradientteja. Pienet aika askeleet mahdollistavat lämmön leviämisen tarkemman seurannan, mutta kasvattavat laskenta aikaa ja tiedostokokoa.

Aika askeleen valinta on kompromissi tarkkuuden ja laskennan hallinnan välillä. Pienissä ja yksityiskohtaisissa malleissa aika askeleen on oltava riittävän pieni suhteessa työkaluradan nopeuteen. Suurissa kappaleissa voidaan käyttää karkeampaa ajallista resoluutiota, erityisesti myöhemmissä kerroksissa ja jäähdytysvaiheissa.

5.3.8 Simulaation tulokset ja niiden tulkinta

Lämpö mekaanisen DED simulaation tuloksena saadaan lämpötilahistoria, muodonmuutosten kehitys ja jäännösjännitysten jakauma. Tulosten arvo syntyy erityisesti prosessivaihtoehtojen vertailussa, ei yksittäisten arvojen absoluuttisessa tarkkuudessa. Simulaatio auttaa ymmärtämään, miksi jokin ilmiö tapahtuu ja missä vaiheessa prosessi ajautuu ongelmalliselle alueelle.

5.4 Simulaation kalibrointi ja validointi DED prosessissa

DED simulaatio ei ole käyttökelpoinen ilman kalibrointia. Kalibroinnin tavoitteena ei ole täydellinen vastaavuus todellisuuteen, vaan riittävän realistinen ja ennustava malli oikeaan käyttötarkoitukseen.

Kalibrointi tarkoittaa mallin fysikaalisten parametrien säätämistä, kun taas validointi tarkoittaa sen varmistamista, että malli toimii myös muissa tilanteissa kuin yhdessä tapauksessa. DED prosessissa täysin aukoton validointi on harvoin mahdollista, mutta kohtuullinen validointi on aina tarpeen.

Kalibrointi kohdistuu lämmönlähteen tehokkuuteen ja jakaumaan, lämmön poistumiseen sekä materiaalin korkealämpötilakäyttäytymiseen. Prosessiparametreja ei tule muuttaa kalibroinnin keinona. Lämpöpuoli kalibroidaan ensin, koska mekaaninen käyttäytyminen riippuu suoraan lämpöhistoriasta. Tavoitteena on realistinen lämpötaso ja lämmön kertymisnopeus, ei yksittäisten mittapisteiden täydellinen osuma.

Mekaanisessa kalibroinnissa keskitytään muodonmuutoksen suuntaan ja suuruusluokkaan. Todelliset kiinnitykset joustavat aina jonkin verran, eikä millimetrin tarkkaa ennustetta pidä vaatia. Validoinnissa tarkastellaan, reagoiko malli samansuuntaisesti kuin todellinen prosessi esimerkiksi työkaluratojen tai tehotason muuttuessa.

Simulaation kalibrointi on osa mallin elinkaarta. Kun prosessia, materiaalia tai laitteistoa muutetaan, myös mallia on päivitettävä. Hyvin kalibroitu ja oikein käytetty DED simulaatio on tehokas työkalu, joka vähentää kokeilujen määrää, säästää materiaalia ja tuo näkyvyyden prosessin käyttäytymiseen tavalla, jota on vaikea saavuttaa pelkän kokeilun avulla.