



Suomen
Hitsausteknillinen
Yhdistys r.y.

HITSAUS

TEKNIKKÄ

1/2025

Saammeko esitellä itsemme:

Valk Welding Finland

Valk Welding kehittää ja rakentaa huippuluokan helpokäyttöisiä hitsausrobottiratkaisuja kaikenkokoisiin tuotannon tarpeisiin ja on kumppanisi hitsauksen automatisoinnissa. Lue lisää tästä lehdestä.

The strong connection



3D-tulostus on pelkkää hitsausta

■ Kirjoittajaryhmä

Erityisesti metallien 3D-tulostus on hitsausta sanan varsinaisessa merkityksessä. Nykyään valokaarella ja lisäainelangalla tapahtuvasta lisäävästä valmistuksesta on tulossa – ja joissain tapauksissa on jo tullut – osa hit-saavaa konepajateollisuutta perinteisen liitos- ja pinnoitus-hitsauksen rinnalle. Tämän tekniikan ympärille on rakentunut kansallisella tasolla kattavaa tutkimus- ja teollisuusyhteistyötä, mistä tässä artikkelissa kerrotaan meillä olevan 3D TY-hankkeen näkökulmasta.



Metallien DED-tulostus

Avataan alkuun hieman kirjainyhdistelmiä AM, DED, WAAM, kuva 1. Puhuttaessa ainetta lisäävästä valmistuksesta eli 3D-tulostuksesta, käytetään tyypillisesti lyhennettä AM, joka tulee sanoista Additive Manufacturing. DED eli Directed Energy Deposition on metallien tulostamisen prosessi, jossa materiaalia sulatetaan ja kerrostetaan kerros kerrokselta 3-ulotteisen muodon luomiseksi. Suomeksi näistä menetelmistä käytetään nimitystä suorakerrostus. DED-prosessissa käytetään keskitettyä lämpöenergiaa kuten valokaarta, laseria, plasmaa tai elektronisuihkua.

WAAM eli Wire Arc Additive Manufacturing on DED-prosessin muoto, jossa lämmönlähteenä toimii valokaari. Prosessi on tyypillisesti GMAW eli MIG tai MAG, mutta myös TIG-prosessia voidaan käyt-

tää tulostamiseen. Termien käyttöön ei ole selkeää, vakiintunutta tapaa ja se on toisinaan kirjavaa. Tässä artikkelissa käsitellään MIG- tai MAG-prosessilla tehtävää tulostamista ja terminä käytetään WAAM-prosessia (esim. termit DED-WA tai DED-Arc tarkoittavat samaa asiaa).

Termi:

- 3D-tulostus = AM = Yleistermi lisäävälle valmistukselle.
- DED = Directed Energy Deposition = Suorakerrostus, joka on yksi 3D-tulostuksen tekniikoista.
- WAAM = Wire Arc Additive Manufacturing = Lisäainelangalla ja valokaarella tapahtuva lisäävä valmistus, joka on yksi DED-tekniikan variaatioista.

Kuva 1. 3D-tulostuksen terminologiaa.

Perinteiset kaarihitsauslaitteistoilla varustetut hitsausrobotit soveltuvat monenlaisiin 3D-tulostustapauksiin. Esimerkiksi robotisoidulla WAAM:lla valmistetuilla pyörähdyssymmetrisillä komponenteilla on laajasti potentiaalisia käyttökohteita teollisuudessa, kuten painelaitteet [1], koneosia ja avaruusrakettien osat, esimerkiksi

Space X:n rakettimoottori Raptor 3 [2]. Optimoidun pyörähdyssymmetrisen metalliosan valmistus on kuitenkin haastavaa, sillä monimutkaisen geometrian, tulostusstrategian ja hitsausmetallurgisten tekijöiden kokonaisvaltainen hallitseminen ei vielä tällä hetkellä onnistu metallimateriaalien lisävässä valmistuksessa läheskään yh-

tä automaattisesti kuin muovimateriaalien tulostustuotannossa.

Potentiaali WAAM:n valmistuskapasiteetin lisäämiselle on suuri, sillä tulostusprosessilaitteistoksi sopivia robotihitsausasemia löytyy jo valmiiksi suuresta osasta Suomen valmistavan konepaja- ja metalliteollisuuden yrityksistä.

DED-tutkimuksia ja -caseja

LUT-yliopisto

LUT-yliopiston Hitsaustekniikan yksikössä on käynnissä teollisuuslähtöisiä 3DTY-hankkeen case-tutkimuksia, joissa tutkitaan ratkaisuja monimutkaisten kappaleiden WAAM-tulostuksen valmistettavuuden mahdollisuuksiin ja haasteisiin hyödyntäen robotihitsauslaitteistoa sekä robotisoidun WAAM-prosessin simulointia. Tutkimuksen tavoitteena on kehittää tehokkaita ja tarkkoja menetelmiä suurten monimutkaisten metallirakenteiden WAAM-valmistukseen. Kuvassa 2 on esitetty kahden case-tutkimuksen periaatteellinen kulku päävaiheineen WAAM-tulostuksen valmistusketjussa.

Tutkimusten ensimmäisessä vaiheessa kartoitettiin eri strategioita robotin tulostusliikeratojen luomiseksi ja valittiin kuhunkin sovelluskohteeseen paras valmistusmenetelmä; palkojärjestys, pol-

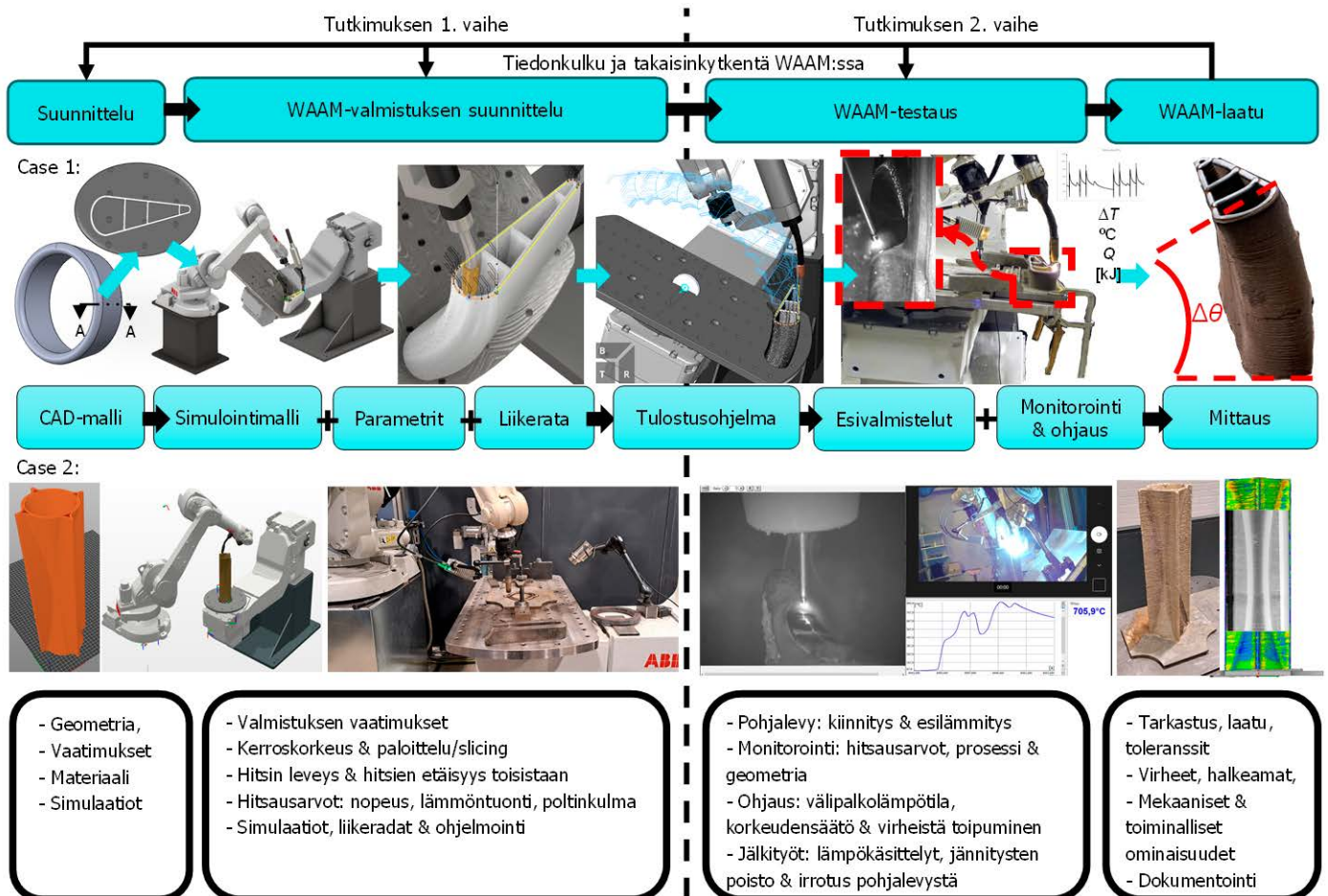
tinkulma ja tulostusstrategia. Tulostusstrategia sisältää rakenteen monimutkaisuudesta riippuen ulkoisen akselin pyörähdyksen sekä hitsausparametrien mukauttamisen valmistettavan kappaleen detaljien perusteella. Rakenteeseen voidaan siis valmistaa tarvittaessa eri kerrospaksuuksia, käyttää lämmöntuontea/jäähtymisaikoja tai muuten optimoida rakenteen ominaisuuksia.

Case 1: Pyörähdyssymmetrinen kappale

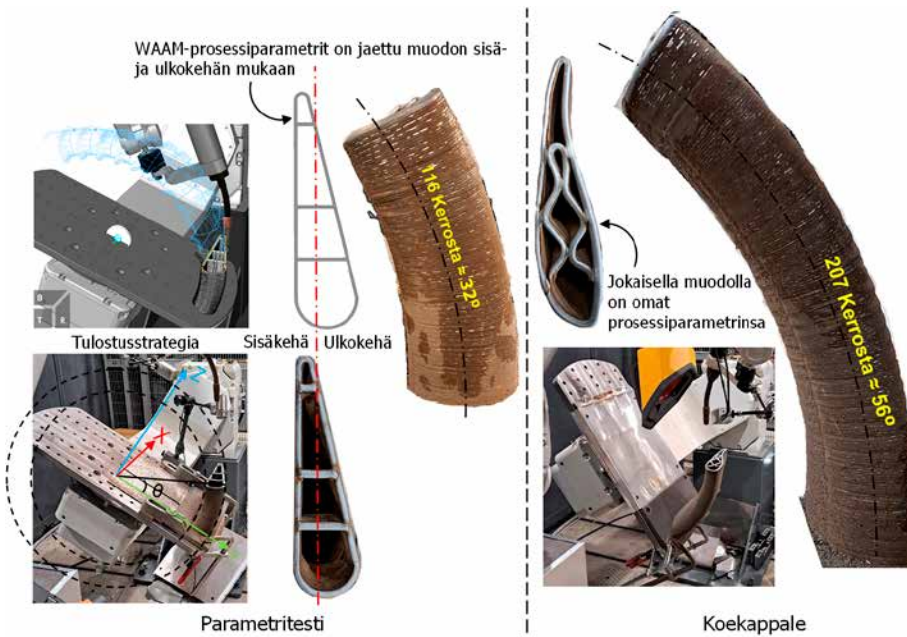
Pyörähdyssymmetrisen kappaleen tutkimusongelmaksi muodostui se, että valmistusteknisten ja hitsausmetallurgisten syiden vuoksi tulostustason on pysyttävä vakiona vaakatasossa, eli kappaleenkäsittelypöytää on käännettävä joka kerroksen jälkeen tietyn asteen verran. Lisäksi matemaattisten tekijöiden vuoksi pyörähdyssymmetrisen kappaleen ulkokehälle on

tuotettava enemmän materiaalia kuin sisäkehälle, riippuen eri detaljien säteen etäisyydestä pyörähdyksen keskipisteeseen.

Ongelman ratkaisemiseksi tutkimuksen toisessa vaiheesta keskityttiin WAAM-tulostuksen parametritestaukseen sekä pyörähdyssymmetrisen kappaleen valmistamisen vaatimuksiin, kuva 3. Merkittävämpänä tuloksena oli varmistus siitä, että tulostustaso saadaan pidettyä hallitusti vaakatasossa. Kerroskorkeuden ollessa tiedossa, pystytään trigonometriaa hyödyntäen laskemaan kerroskierron määrä asteina, jonka tutkimuksessa käytetty etäohjelmointityökalu Visual Components Robotics OLP kykenee automaattisesti ohjelmoimaan käsittelypöydälle sekä kloonattuihin tulostuskerroksiin. Materiaalin tuottoa muodon sisä- ja ulkokehälle voidaan ohjata tarkasti tulostuksen lämmöntuontia säätämällä, kun tulostusohjelmassa asetetaan eri hitsausparametrit kappaleen detalleille.



Kuva 2. WAAM-kappaleiden case-tutkimusten päävaiheet valmistusketjussa.



Kuva 3. Pyörähdysymmetrisyyden testauksen tuloksia 116 WAAM-tulostetun kerroksen jälkeen ja varsinainen koekappale 207 WAAM-tulostetun kerroksen jälkeen.

Case 2: Muuttuva seinämäpaksuus avaruusmuodoilla

Muuttuvan seinämäpaksuuden omaavan kappaleen tutkimusongelmaksi muodostui rakenteen muotoon mukautuminen, jotta kerrospaksuudet ovat tarkasti hallussa ensimmäisistä paloista aina viimeisiin asti. Kerrospaksuudet tyypillisesti muuttuvat seinämäpaksuuden muuttuessa, ellei hitsausparametreja muuteta. Toinen haaste syntyy lämmönhallinnasta, joka muuttuu sekä lämmönjohtumisesta alaspäin rakenteessa että myös lämmönjohtumisesta muuhun jatkuvasti muuttuvaan ympäröivään rakenteeseen ja paikallisesti prosessista syntyvään lämmöntuontiin liittyen. Lisäksi yhtenä tutkimuksessa selvitettävänä asiana oli WAAM-valmistetun kappaleen liittäminen hitsaamalla ulkoiseen rakenteeseen ja tässä toimenpiteessä huomioon otettavat asiat.

Vaikka nykyään simulointiohjelmistoilla on mahdollista simuloida lämmönjohtumista, tämäntyyppiset monimutkaiset rakenteet aiheuttavat haasteita, sillä lämpöä johtuu merkittävästi ilmaan, ja kasvava kappaleen korkeus kasvattaa myös ilman virtausnopeutta kappaleen pinnoilla muuttaen jäähtymistä. Tutkimusongelmaa lähdettiin ratkaisemaan anturointia hyödyntäen. Lämmönjohtumista/jäähtymisaikaa mitattiin yksinkertaisella pyrometrillä (Micro-Epsilon) käyttäen vakioitua välipalkolämpötilaa. Prosessin osalta aineensiirtymää ja hitsin/palon geometriaa mitattiin hyödyntäen prosessikameraa (Cavitar), jonka avulla pystyttiin havaitsemaan kerroskorkeuden muutokset sekä muun muassa vierekkäisten palkojen liittyminen toisiinsa.

Valmistetun kappaleen liittämisessä huomioon otettavaksi asiaksi korostuu

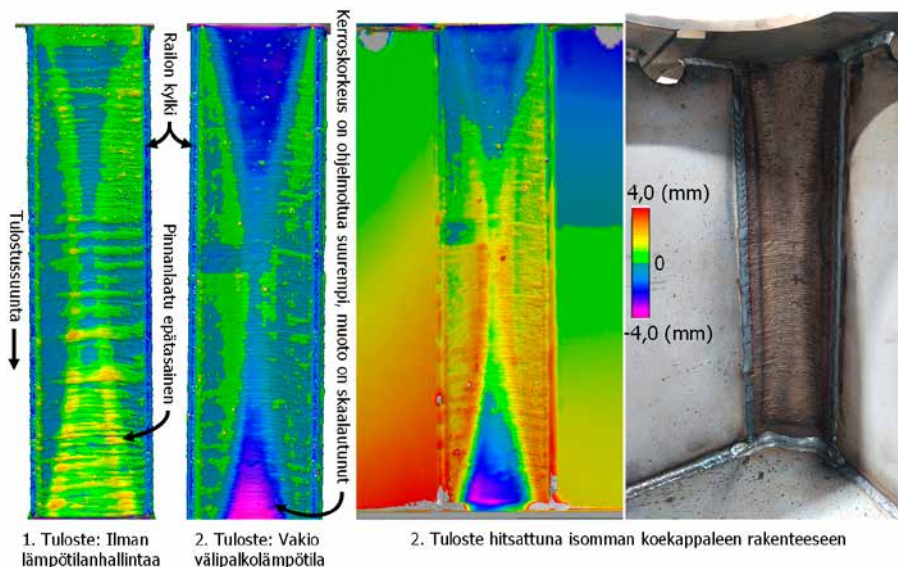
valmistustarkkuus ja toleranssit. Vaikka WAAM-prosessilla valmistettu kappale olisi itsessään mittatarkka voi ulkoinen rakenne aiheuttaa suunnittelemattomia muotoeroja tai epätarkkuuksia verrattuna simuloituun optimaaliseen tapaukseen, kuva 4. Myös railojen muodot on mahdollista tehdä WAAM-valmistettuun kappaleeseen, jolloin rillonvalmistus sekä muu manuaalisen työn määrä vähenee.

Savonia

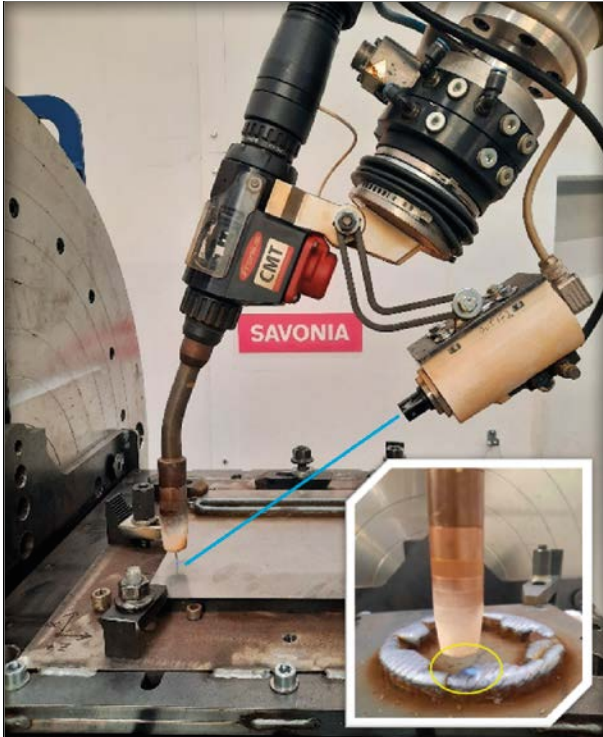
Savonia-ammattikorkeakoululla on vankka kokemus robottihitsauksen soveltavasta tutkimuksesta ja kehityksestä. Perinteisen robottihitsauksen lisäksi myös pinnoitushitsauksesta on runsaasti kokemusta. Tämän osaamisen pohjalta Savonian fokus on keskittynyt 3DTY-hankkeessa WAAM-prosessin hallittavuuteen ja ohjelmointiratkaisujen testaukseen ja tutkimiseen. Savonian sekä 3DTY-hankkeen yhtenä tarkastelunäkökulmana on, voidaanko perinteistä robottihitsaussolua hyödyntää WAAM-prosessiin, ja jos, millaisilla reunaehdoilla. Hankkeen kaikkien tutkimusorganisaatioiden robottijärjestelmät ovat perinteisiä tyypillisiä robottihitsausjärjestelmiä, toki enemmän tai vähemmän tutkimuskäyttöön räätälöityjä.

Lämpötilan hallinta – apuna pyrometri ja jäädytetty alusta

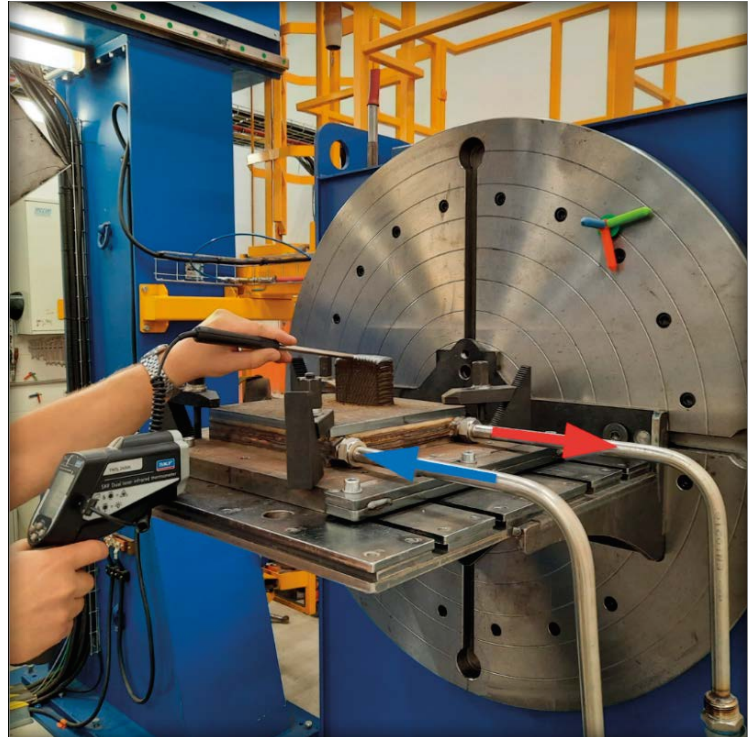
Tulostusstrategiota, eli millaisella robotin liikeradalla tavoiteltua geometriaa lähdetään tulostamaan, on runsaasti. Tulostusprosessissa on aina mukana hitsaus, joka tuo lämpöä tulosteeseen, alustaan tai aihioon, johon tulostetaan. Tulostusajasta, geometriasta ja lämmön johtumisesta johtuen myös kiinnittimenä toimiva ratkaisu tai käsittelylaite alkaa myös usein lämpenemään. Riippuen siitä, millaista geometriaa tulostetaan, tulosteen lämpötila voi alkaa kumulatiivisesti kasvamaan. Tällöin tulostettavan materiaalin mikrorakenteen ominaisuudet voivat kärsiä tai tuloste pahimmillaan valahtaa. Liiallinen lämpeneminen on mahdollista hallita antamalla tulosteen jäähtyä hitsauksen/tulostamisen välissä. Yksinkertaisin ratkaisu tähän on käyttää robottiohjelmassa ajastinta, jossa aikamäärellä tulostaminen keskeytetään, jotta tuloste ennättää jäähtyä. Tätä joustavampi keinoja on käyttää pyrometria tai muuta vastaavaa anturointia, josta saatavaa tietoa voidaan käyttää robotin ohjaukseen. Savoniassa käytössä oleva pyrometri on integroitu robotin ohjaukseen ja asennettu kuvan 5 mukaisesti. Anturin tarkkailupiste on suunnattu robotin työkalupisteeseen ja ratkaisu toimii käytännössä termostaatin tavoin. Robotin ohjauksessa voidaan asettaa vakioitu välipalkolämpötila ja tarvittaessa lämpötilaa voidaan säätää robotilta ohjelmallisesti tai manuaalisesti. Ohjelmakohta johon lämpötilan tarkistus on sijoitettu, pysäyttää robotin ko. kohtaan siksi aikaa, kunnes tarkastettavan kohdan lämpötila on laskenut alle



Kuva 4. WAAM-tulosteen ideaalisen 3D-mallin sovitusta todellisesti valmistettuun rakenteeseen.



Kuva 5. Pyrometrin sijoitus robotin työkaluun ja mittauspiste robotin työkalupisteessä.



Kuva 6. Jäähdytysalusta ja manuaalinen lämpötilan mittaus.

asetetun välipalkolämpötilan. Pyrometrin ollessa suunnattu robotin työkalupisteeseen, ei robottiohjelmaan tarvitse luoda erillisiä liikekäskyjä. Savonian testeissä lämpötilan tarkistus on tyypillisesti sijoitettu joko tulostetun kerroksen loppuun tai aloitettavan kerroksen alkuun.

Tulosteen ja tulostusalustan kumulatiivinen lämpeneminen alkaa jossain vaiheessa näkyä pidentyvinä jäähdytysaikoina. Pitkissä tulostuksissa on huomattu, että robotin käsittelylaitteen lautasen ja kääntökehän lämmöt ovat alkaneet nousta tasolle, joka voi alkaa haitata niiden toimintaa. Lämpötilan vakiointiin Savoniolla toteutettiin ratkaisu, jossa robottijärjestelmän laserin jäähdyttimestä toteutettiin vesikierto tulostusalustaan. Kennorakenteinen tulostusalusta toteutettiin ruostumattomasta teräksestä ja jäähdyttimen vesikierto kulkee kennon läpi, kuva 6. Alustan toimivuutta on testattu tähän mennessä muutamien tulosteiden kanssa ja niiden pohjalta on tulostuksen työkiertoa saatu nopeutettua 20–30 %. Alustavat tulokset ovat todella lupaavia ja hankkeen aikana testejä tullaan jatkamaan. Kiinnostuksen

kohteena on mm. jäähdytyksen vaikutus tulostetun materiaalin mikrorakenteeseen ja kuinka se vertautuu ilman jäähdytystä tulostettuun.

Case: Hitsauskiinnittimen osa

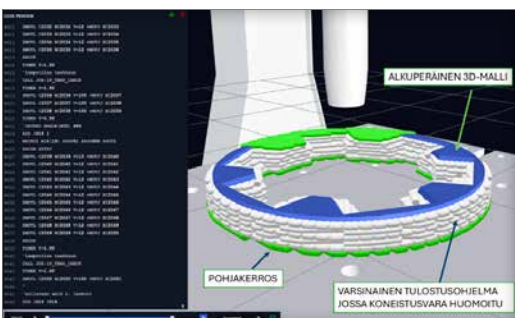
3DTY:ssä mukana oleva yritys tiedusteli, voitaisiinko heidän hitsauskiinnittimeensä suunniteltu osa toteuttaa WAAM-prosessilla. Valmistusteknisesti osa olisi ollut todennäköisesti tehokkaampaa toteuttaa perinteisemmillä menetelmillä. Osa kuitenkin sopi hyvin kokonsa sekä valmistusmäärän osalta hankkeen testien tarpeisiin. Samalla pystyttiin testaamaan työnkulkua, kuinka Savonian muut tulostukseen linkitetyt työvaiheet, kuten lämpökäsittely, koneistus sekä tulosteen irrotus alustasta saadaan toteutettua jouhevasti. Materiaalina käytettiin matalahiilistä rakenneterästä, jonka tulostamisesta Savoniolla on eniten kokemusta.

Työvaiheiden kulku

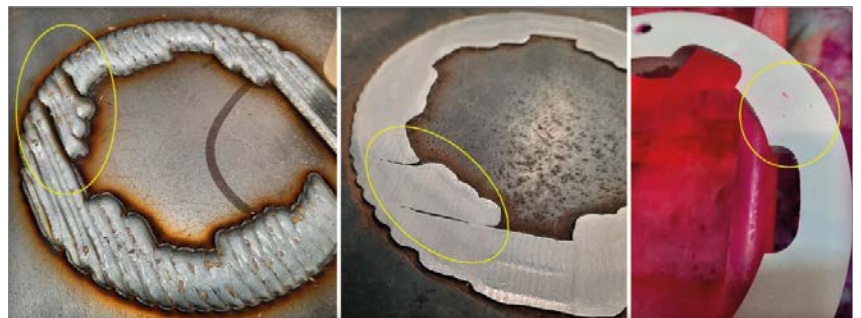
Tuotteen 3D-mallin pohjalta luotiin tulostusohjelma Adaxis Adaone -robottitulostusohjelmistossa kuva 7. Tuotteen

pintojen osalta päädyttiin siihen, että lopullinen muoto koneistetaan kokonaan. Tämän osalta tulostusstrategiaksi valittiin pelkkä täyttö ja koneistusvaraksi asetettiin 3 mm.

Tulostusohjelma toteutettiin siten, että ensin tulostettiin yksi pohjakerros eli raft, "riittävän" kuumilla parametreilla, jotta hitsipalot leviävät riittävästi ja yhtyvät viereisiin palkoihin jouhevasti. Tämä pohjakerros toimi petinä varsinaiselle tulosteelle ja samalla esilämmityksenä seuraaville kerroksille. Loput kerrokset tulostettiin matalamman lämmötuonnin parametreilla verrattuna ensimmäiseen kerrokseen. Testeissä on huomattu, että mikäli ns. perustulostusparametreilla aloitetaan tulostus huoneenlämpöiseen alustaan, saattaa hitsipalkojen väliin jäädä sulamattomia kohtia, kuva 8. Kyseiset kohdat eivät välttämättä sula yhteen seuraavan tulostuskerroksen vaikutuksesta ja kohdat näkyvät selkeinä virheinä tulosteissa. Välipalkolämpötilaksi määriteltiin ohjelmoinnin yhteydessä 325 C° ja lämpötilan tarkistus asetettiin tehtäväksi jokaisen hitsin lopetuksen jälkeen.



Kuva 7. Tulostusohjelman tekoa AdaOne-ohjelmassa.



Kuva 8. Sulamaton kohta pohjakerroksessa näkyy virheenä tulosteessa.

Tulostaminen

Tulostaminen toteutettiin jäädytetyllä tulostusalustalla. Pohjakerroksen pinnan laatu tarkistettiin sen tulostamisen jälkeen ja tulostusta jatkettiin automaattijollalla. Tulostamisen yhteydessä testattiin väli-palkolämpötilojen loggaukseen toteutettua ratkaisua, jotta jäähtymisaikojen pituuksia pystytään jälkikäteen tarkastelemaan ja käyttämään tutkimuksessa. Hitsausparametrit tallennettiin tuotekohtaisesti Froniuksen WeldCube -serverille, josta tiedot ovat jälkikäteen tarkasteltavissa.

Tulostuksen jälkeen

Tulosteille tehtiin jännityksenpoistohehkuus ennen ensimmäistä koneistusvaihetta. Työvaiheet jaksotettiin siten, että tuloste irrotettiin tulostusalustasta ensimmäisen koneistusvaiheen jälkeen. Irrotus tulostusalustasta tehtiin Savonian jauhepetitulos-teiden irrotukseen soveltuvalta vannesahalla. Viimeisenä työvaiheena koneistettiin sahauspinnan puoli.

Tulokset

Tuotteiden tulostukset sujuivat ilman ongelmia. Yksi tuote tulostettiin ilman aktiivista jäähdystä, jolloin kokonaistulostusaika piteni 25 %. Tulostusohjelman pysyessä vakiona, kasvu tuli siis pelkästään pidemmistä jäähtymisaajoista. Tuotteet soveltuivat käyttöön, johon ne alkujaan on suunniteltu. Kuvassa 9 on esitetty vaiheita valmistuksen ajalta sekä valmis tuote.

Työnkulkuun liittyvät eri vaiheet sujuivat myös pitkälti suunnitelmien mukaan ja toivat meille ymmärrystä, kuinka työn suunnittelu jatkossa kannattaa toteuttaa. Tulostusparametrit toimivat hyvin ja niitä voidaan jatkossa soveltaa monipuolisesti erilaisten geometrioiden tulostamiseen.

TAMK

Tampereen ammattikorkeakoululla on opetettu robotisoitua hitsausta konetekniikan insinööriopintokoulutuksessa jo pitkään ja roboteilla 3D-tulostettu vuodesta 2017. Vuonna 2023 päivitettiin olemassa olevan ABB-robotisolun ohjelmisto, jotta se soveltuisi entistä paremmin WAAM-tekniikan käyttöön. Robottisolun koostuu ABB IRB2600 -robotista ja kaksiakselisesta käsittelypöydästä, kuva 10.

Projektin alussa tehtiin nykytilakartotus, jossa selvitettiin robotin ohjelmistojärjestelmän ohjelmisto-optiot sekä halutun ohjelmistoyhdistelmän vaatimukset. Tulostettaessa kappaleita, jotka vaativat käsittelypöydän pyörytystä, robotti varustettiin optiolla, joka mahdollistaa paikan nollaamisen pitkän pyörytyksen jälkeen. Hitsausvarustus oli jo entuudestaan hyvin sopiva tarkoitukseen, sillä käytössä oli vanhemman sukupolven Fronius CMT-laitteisto.

TAMKilla käytetään viipalointiohjelmistona Adaxis AdaOnea, ja tulostusratojen siirtämiseen robotille on kolme mahdollista reittiä: suoraan ABB:n RAPID-natiivikoodina, kustomoidulla G-koodilla tai erityisesti ABB RobotStudioon kehitetyn siirtoformaatin avulla. ABB-robotin kanssa voidaan hyödyntää RobotStudio lisäosaa 3D Printing Power Pack, joka tukee yleisimpien viipalointiohjelmistojen G-koodia sekä Adaxis-ratojen vientiä joko G-koodimuodossa tai RobotStudio omassa siirtoformaattissa. Tilanne elää ja kehittyvä koko ajan, sillä kaikkiin ohjelmistoihin tulee useampia päivityksiä vuodessa.

Projektin yhteydessä robottiin asennettiin pieni käyttöjärjestelmäpäivitys, joka toi mukanaan lisäosia tulostusohjelmien hallintaan. Näitä keskeisiä toi-

minoja olivat muun muassa työjonon hallinta sekä nopeuden ja kerrospaksuuden hienosäätöominaisuudet.

Tämän kevään aikana on tarkoitus lisätä robottiin pyrometri kerrosämpötilojen seurantaan ja datakeräysominaisuuksia iot-dataympäristö Fiwareen. Tavoitteena on, että WAAM-tulosteista jäisi datapiilveen dokumentaatio, joka perustuu todellisiin ajoarvoihin.

Testiovaali

3DTY-projektin aikana olemme kehittäneet oppilaitosten välistä testausmallia, joista yksi on testiovaali, kuva 11. Tästä kappaleesta on tarkoitus hyödyntää suorat sivut ja leikata niistä näytteitä vetolujuus-, taivutus- ja iskusitkeyskokeisiin.

Varaosanapa

WAAM-menetelmää pidetään soveltuvana myös varaosien tuotantoon. Tämän testin tavoitteena oli koeajaa Adaxis-ohjelmiston ominaisuutta, joka mahdollistaa erilaiset tulostusstrategiat saman kappaleen sisällä. Ensimmäisessä vaiheessa tulostettiin napa pitäen pöytä paikallaan, jolloin kaikki liikkeet suoritettiin robotilla, kuva 12. Toisessa vaiheessa pöydän 1. akseli käännettiin 90 asteen kulmaan, ja laippainen osa ajettiin radiaalisesti pöytää pyörittämällä.

Oulun yliopisto / FMT

Oulun yliopiston Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -ryhmän pääpainoalue on metallisten, etenkin teräksisten materiaalien hyvien ominaisuuksien siirtämisessä lopputuotteiden ylivoimatekijöiksi kustannustehokkailla tuotantomenetelmillä. Lisäävässä valmistuksessa valmistuskustannus syntyy merkittävältä osin ai-



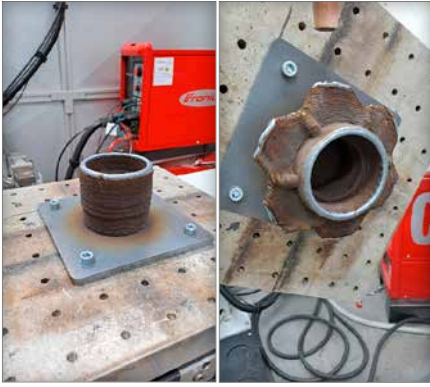
Kuva 9. Vaiheita WAAM-valmistuksesta ja valmis tuote.



Kuva 10. Tamkin hitsausrobotti ja käsittelylaite.



Kuva 11. Testiovaali.



Kuva 12. Varaosanavan tulostusvaiheet.

neen lisäämisestä, jonka takia rakenteet kannattaa suunnitella mahdollisimman keveiksi. Keveiden ja kestävien rakenteiden suunnittelussa materiaalin väsyminen nousee merkittäväksi tekijäksi ja yksi merkittävimmistä FMT-ryhmän mielenkiinnon kohteista onkin prosessiparametrien ja jälkikäsitteilyiden vaikutus tulostettujen osien väsymiskestävyyteen. WAAM-prosessien tutkimuksessa FMT-ryhmällä on käytössä kolme virtalähdettä (Fronius 2700 CMT, Kemppi AX500 ja Wallius Blackline 516i Mig Synergic Pulse2) ja tulostukseen ABB ja Motoman robotisolut sekä 3-akselinen CNC-mekaniikka. Materiaalitestauksessa käytössä on ryhmän oman laboratorion laitteistojen lisäksi Oulun yliopiston terästudkimusympäristön laitteistot. Eriytyessä väsymistutkimukseen FMT-laboratoriossa on neljä nopeaa aksiaaliväsytyksen konetta ja 10 koesauvan rinnakaistettu taivutusväsytyksen kone.

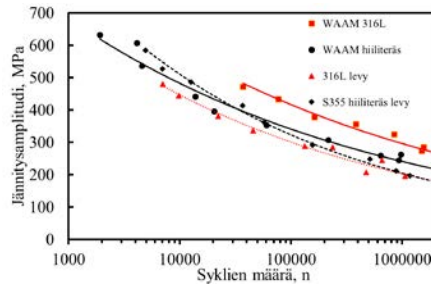
3DTY- ja IDiD-projekteissa WAAM-tutkimus on toistaiseksi keskittynyt pääasiassa neljään materiaaliin: Hiiliteräs ESAB Aristorod 12.50, luja hiiliteräs ESAB Aristorod 89, ruostumaton teräs INEFIL INOX 316L ja duplex teräs Exaton 29.8.2.L. Tässä esitetyissä testeissä tulostukset on tehty 1.2 mm langalla. Tulostuksessa välilämpötilana on käytetty 150 astetta, lukuun ottamatta lujaa hiiliterästä, jolla on käytetty 100 asteen välilämpötilaa.

Taulukossa 13 on esitetty tulostettujen materiaalien myötö- ja murtolujuudet sekä murtovenymä. Hitsauslisäaineeseen verrattuna lujuusarvot ovat jonkin verran pienemmät kuin materiaalin valmistajan hitsille antamat lujuudet, mutta murtovenymät ovat jonkin verran suuremmat. WAAM:illa tulostetaan useita kerroksia päällekkäin, mikä johtaa tulostettujen kerrosten toistuvaan lämpösykliin. Tämä aiheuttaa mikrorakenteen muutoksia, mikä vaikuttaa tulostetun materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin.

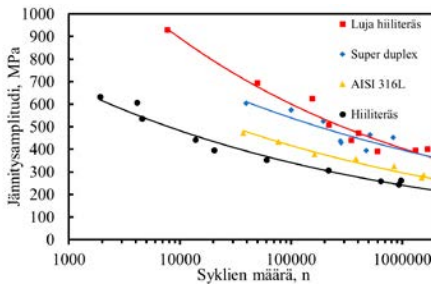
Kuvassa 14 on verrattu WAAM-tulostetun materiaalin väsymistä vastaavaan teräslevynä saatavaan materiaaliin. Tässä WAAM-tulostettu sauva on koneistetulla pinnalla ja perusmateriaali toimituspinnalla. WAAM-menetelmällä tulostetussa seinämästä ei röntgenkuvauksessa ole

Taulukko 13. Testattujen materiaalien staattiset lujuudet. Hitsauslangan valmistajan hitsille hitsatussa tilassa lupaama arvo ilmoitettu suluisissa.

Materiaali	Myötölujuus	Murtolujuus	Murtovenymä
	MPa	MPa	%
Hiiliteräs	392 (470)	503 (560)	41 (26)
AISI 316L	348 (440)	631 (560)	47.7 (40)
Luja hiiliteräs	803 (920)	955 (940)	25 (18)
Super duplex	630 (730)	820 (850)	37.4 (25)



Kuva 14. WAAM-tulostetun hiiliteräksen ja ruostumattoman teräksen taivutusväsymislujuus verrattuna vastaavaan teräslevyyn.



Kuva 15. WAAM-tulostetun hiiliteräksen, lujan hiiliteräksen, ruostumattoman teräksen ja Duplex-teräksen taivutusväsytyksen S/N käyrät.

löytynyt huokosia, mikä näkyy hyvänä väsymiskestävyytenä, tilanteessa, jossa pinta on koneistettu.

Kuvassa 15 on testattujen neljän materiaalin S/N käyrät. WAAM-tulostetulla lujalla teräksellä on paras väsymiskestävyyden etenkin low-cycle alueella. Super duplex:lla on hieman alempi väsymislujuus low-cycle alueella, mutta väsymisraja on lähes sama kuin lujalla teräksellä. 316L ja hiiliteräksellä on selvästi alemmat väsymisrajat ja hiiliteräksellä yleisesti huonoin väsymislujuus WAAM-menetelmällä tulostetuista materiaaleista.

3DTY-PROJEKTI

3DTY-projektin tavoitteena on uudistaa teollisuutta yhdistämällä Suomessa toimivat suurten kappaleiden 3D-tulostuksen tekniikkaa kehittävät ja levittävät TKI-toimijat.

3DTY kuuluu Uudistuva ja osaava Suomi 2021–2027 EU:n alue- ja rakennepoliittikan ohjelmaan. Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) tuen on myöntänyt Etelä-Savon elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY). Projektissa mukana ovat

Oulun yliopiston Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) tutkimusryhmä, Lapin koulutuskeskus REDU, Savonia-ammattikorkeakoulu, Itä-Suomen yliopisto (UEF), LUT-yliopisto, Tampereen AMK ja DIMECC Oy:n johtamat FAME ja MAKE in Finland-ekosysteemit. Lisätietoa hankkeesta ja tuloksista 3dty.fi.

Lähteet

- Lipiäinen, K., Afkhami, S., Lund, H., Ahola, A., Varis, S., Skriko, T., & Björk, T. (2024). Manufacturing and mechanical performance of a large-scale stainless steel vessel fabricated by wire-arc direct energy deposition. *Materials & Design*, 113044. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113044>
- Metal AM. (2024). SpaceX debuts Raptor 3 engine, further enhanced with metal Additive. Manufacturing. https://www.metal-am.com/spacex-debuts-raptor-3-engine-further-enhanced-with-metal-additive-manufacturing/?utm_source=copy&utm_medium=website&utm_campaign=SocialSnap

Tekijäryhmä:
Tuomas Skriko
Apulaisprofessori, IWE
Hitsaustekniikka, LUT-yliopisto
Aku Tuunainen
Tutkimusinsinööri, IWE
Savonia ammattikorkeakoulu
Tero Haapakoski
Projektipäällikkö
Tampereen ammattikorkeakoulu
Kari Mäntyjärvi
Kehityspäällikkö
Oulun yliopisto – Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) ryhmä
Mikko Hietala
Projektipäällikkö
Oulun yliopisto – Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) ryhmä
Markku Keskitalo
Projektipäällikkö
Oulun yliopisto – Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) ryhmä
Kaisa Kaukovirta
Viestintäpäällikkö
DIMECC Oy