

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
School of Energy Systems
Konetekniikan koulutusohjelma

Santeri Varis

**LANKAPOHJAISEN SUORAKERROSTUKSEN HYÖDYNTÄMINEN SELLU- JA
PAPERITEOLLISUUDEN KONEPAJAVALMISTUKSESSA**

15.6.2020

Tarkastajat Professori Heidi Piili
DI Simo Pylkkänen
Ohjaaja DI Wayna Moncada

TIIVISTELMÄ

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

School of Energy Systems

Konetekniikan koulutusohjelma

Santeri Varis

Lankapohjaisen suorakerrostuksen hyödyntäminen sellu- ja paperiteollisuuden konepajavalmistuksessa

Diplomityö

2020

61 sivua, 29 kuvaa, 5 taulukkoa ja 5 liitettä

Tarkastajat: Professori Heidi Piili
DI Simo Pylkkänen

Hakusanat: Lisäävä valmistus, AM, suorakerrostus, DED, WAAM, 316L, CMT

Tämän diplomityön tavoitteena oli tuottaa kohdeyritykselle tietoa hitsausrobottilaitteistolla suoritettavan lankapohjaisen suorakerrostuksen (WAAM) edellytyksistä, sen vaikutuksista tuotanto- ja arvoketjuihin sekä sen liiketoimintapotentialista. Kirjallisuustutkimuksen lisäksi diplomityössä suoritettiin kokeellinen osuus, jossa luotiin valmistuskyky lankapohjaiselle suorakerrostukselle, suoritettiin koetulostuksia 316L austeniittiselle ruostumattomalle teräkselle ja tutkittiin tulostetun materiaalin materiaaliominaisuuksia rikkomattomalla sekä rikkovalla aineenkoetuksella.

Kirjallisuustutkimuksen pohjalta todettiin, että WAAMille luonteenomaista on metallilanka raaka-aineena, hitsausvarustus kohdennetun lämpöenergian lähteenä sekä laitteisto hitsauspolttimen liikuttamiseen. WAAM erottuu jauhepetisulatuksesta ja muista yleisemmistä metallia lisäävän valmistuksen prosesseista merkittävästi korkeammalla hitsiaineentuotolla. Kirjallisuustutkimuksessa huomattiin myös, että matalan lämmöntuonnin CMT-hitsausprosessi sekä menetelmälle soveltuva CAM-ohjelmisto ovat isossa roolissa tulostusprosessin onnistumisen kannalta, sillä muilta osin WAAM noudattaa normaalin robottihitsauksen periaatteita. Kokeellisesta osuudesta saatiin pääosin positiivisia tuloksia. Materiaalitesteissä ei esiintynyt hylkäykseen johtavia virheitä tai poikkeamia. Numeeriset arvot ylittivät lujuusominaisuuksien osalta vastaavan levymateriaalin standardoidut minimiarvot testaussuunnasta riippumatta.

WAAMin käyttö on vielä globaalisti suhteellisen vähäistä, mutta jatkuvasti kehittyvät hitsausprosessit ja CAM-ohjelmistot yhdessä lisääntyvän tutkimustiedon kanssa parantavat teollisten käyttökohteiden löytymisen edellytyksiä. Valmistusmenetelmällä on kuitenkin jo tässä vaiheessa tunnistettu olevan suuri potentiaali vastaamaan nopeisiin toimitusaikatarpeisiin tai parantamaan kappaleiden suorituskykyä uudelleensuunnittelun kautta. Valmistusmenetelmä kaipaa kuitenkin vielä paljon jatkokehitystä, menetelmien vakiointia sekä standardisointia saavuttaakseen täysimittaisen teollisen potentiaalinsa.

ABSTRACT

LAPPEENRANTA-LAHTI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT
School of Energy Systems
Mechanical Engineering

Santeri Varis

Utilizing Wire Based Directed Energy Deposition in Pulp and Paper Mill Equipment Manufacturing

Master's thesis

2020

61 pages, 29 figures, 5 tables and 5 appendices

Examiner: Professor Heidi Piili
M. Sc. (Tech.) Simo Pykkänen

Keywords: Additive Manufacturing, AM, Directed Energy Deposition, DED, WAAM, 316L, CMT

Aim of this Master's Thesis was to provide knowledge for subject company about requirements of wire and arc based additive manufacturing (WAAM), its impact to value and supply chains and its business potential. In addition to literature review, also experimental part was conducted. In experimental part, capability for WAAM was created first, after which test pieces was manufactured with 316L austenitic stainless steel. After manufacturing, both nondestructive and destructive tests were carried out to validate the quality of deposited material.

From literature review it was concluded that WAAM process is characterized by metal wire feedstock, welding equipment as a heat source to melt material together and machinery to manipulate welding torch movement. WAAM process stands out with significantly higher deposition rates compared to powder bed fusion or other more common metal additive manufacturing processes. It was also noted that low heat input CMT welding process is playing important role for achieving good results and that software and simulation side of manufacturing process still needs further development. Results from experimental part were mostly very promising. There were not any defects leading to rejection and numerical results regarding strength properties were above the minimum requirements of corresponding plate material regardless of testing direction.

Usage of WAAM in industrial is still very limited, but with continuously improving welding processes and CAM software together with increasing research outcomes, industrial usage of this process is increasing. It is already concluded that WAAM has a big potential to address the needs for short lead time products or to improve properties via redesigning of products for additive manufacturing. However, more research, development and standardization needs to be done before full scale industrial use can be achieved.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty ANDRITZ Savonlinna Works Oy:lle yhteistyössä ANDRITZ Oy:n kanssa. Haluan kiittää ANDRITZia tästä mahdollisuudesta päästä tekemään diplomityötä itseäni suuresti kiinnostavasta aiheesta ja saada huomattava tuki taustalle työn suorittamiseen.

Erityiskiitokset kuuluvat työni ohjaajalle Wayna Moncadalle, ketä saan kiittää ylipäätään tämän aiheen esilletuomisesta ja vireille saattamisesta. Myös tuon Lappeenrannan kohtalokkaan tapaamisen jälkeen ohjaus on ollut äärimmäisen arvokasta ja etenkin alkuvaiheessa ohjasit työtä epätoivon hetkillä oikeaan suuntaan.

Suuret kiitokset kuuluvat myös työni tarkastajille Heidi Piilille ja Simo Pylkkäselle. Teidän molempien tuki ja ohjaus on ollut tärkeää tämän työn kansiin saattamiseksi.

Lopuksi haluan vielä kiittää lämpimästi Skinnarilan niemen opiskelutovereita, rakasta Koneenrakennuskiltaani ja erityisesti koko Idéakaljaa. Teidän ansiosta tämä lyhyt kuuden ja puolen vuoden opiskelu-urakka tuntui huomattavasti mielekkäämmältä.

Varisparvi, kohta juhlimaan!



Santeri Varis

Savonlinnassa 15.6.2020

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	1
ABSTRACT.....	2
ALKUSANAT	3
SISÄLLYSLUETTELO	5
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO.....	7
1 JOHDANTO.....	8
1.1 ANDRITZ Oy ja ANDRITZ Savonlinna Works Oy	9
1.2 Tavoitteet	10
1.3 Tutkimusongelma ja -kysymykset	10
1.4 Tutkimusmenetelmät	11
1.5 Rajaukset.....	13
2 SUORAKERROSTUS METALLIEN LISÄÄVÄSSÄ VALMISTUKSESSA	14
2.1 Suorakerrostus	14
2.2 Nykytila ja tulevaisuus.....	16
2.3 Sovelluskohteet	17
2.4 CMT-kylmäkaariprosessi lankapohjaisessa suorakerrostsessa.....	20
3 LIIKETOIMINTAPOTENTIALI SELLUTETOLLISUUDESSA.....	22
3.1 Tuotanto- ja arvoketjujen muutos	22
3.2 Ympäristövaikutukset	23
3.3 Riskit ja uhat	26
3.4 Käyttökohteet.....	27
4 KOKEELLINEN OSUUS	29
4.1 Tavoite ja tarkoitus	29
4.2 Käytetyt materiaalit ja laitteet.....	30
4.3 Käytetyt menetelmät	33
5 TULOKSET JA NIIDEN ANALYYSI.....	41
5.1 Valmistusketjun todentaminen	41
5.2 Lämpökamerakuvaus	43
5.3 Rikkomaton aineenkoetus.....	45
5.4 Rikkova aineenkoetus	45

6	POHDINTA	52
6.1	Jatkotutkimus	52
6.2	Tutkimuksen objektiivisuus, reliabiliteetti ja validiteetti	53
6.3	Yleistettävyyys.....	53
6.4	Menetelmän käyttöönoton haasteet	54
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	55
	LÄHTEET	57
	LIITTEET	
	LIITE I: Tunkeumanestetarkastuksen pöytäkirja	
	LIITE II: Radiografisen tarkastuksen pöytäkirja	
	LIITE III: Ainetta rikkovan koestuksen pöytäkirja	
	LIITE IV: Makro- ja mikrorakennetarkastelun pöytäkirja	
	LIITE V: Lincoln Electric LNM 316LSi Data Sheet	

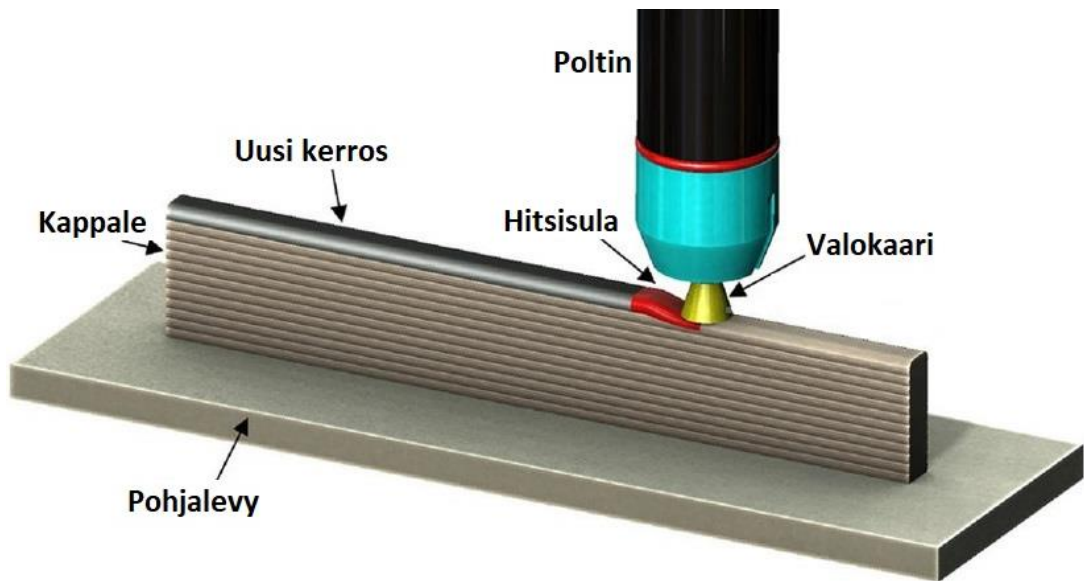
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

<i>I</i>	Hitsausvirta [A]
<i>k</i>	Terminen hyötysuhde
<i>Q</i>	Hitsauksen lämmöntuonti [kJ/mm]
<i>U</i>	Hitsauksen kaarijännite [V]
<i>v</i>	kuljetusnopeus [mm/s]
AM	Additive Manufacturing, lisäävä valmistus
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CAM	Computer Aided Manufacturing, tietokoneavusteinen valmistus
CMT	Cold Metal Transfer
DED	Directed Energy Deposition, suorakerrostus
DT	Destructive Testing, rikkova aineenkoetus
NDT	Nondestructive Testing, rikkomaton aineenkoetus
WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing, lankaan ja valokaareen pohjautuva suorakerrostusmenetelmä

1 JOHDANTO

Lisäävää valmistusta (AM, engl. Additive Manufacturing) eli arkikielessä 3D-tulostusta on jo pitkään pidetty digitalisaation ja teollisen internetin ohella yhtenä merkittävänä osa-alueena neljännessä teollisessa vallankumouksessa (Dilberoglu et al. 2017, s. 545–546; Haleem and Javaid 2019, s. 1–3). Integroidut rakenteet ja alati kasvava tarve entistä kevyemmille sekä energiatehokkaimmille ratkaisuille asettavat vaatimuksia, joita on yhä vaikeampi saavuttaa perinteisin valmistusmenetelmin. Tarpeisiin täytyisi myös vastata entistä nopeammin ja ketterämmin. Kaikille näille tarpeille yhteisenä tekijänä on, että niihin voidaan vastata lisäävällä valmistuksella.

Suorakerrostus (DED, engl. Directed Energy Deposition) on yksi lisäävän valmistuksen prosessiluokka, jossa kohdennetulla lämpöenergialla sulatetaan ja liitetään materiaalia halutun kappaleen luomiseksi. Suorakerrostus itsessään pitää sisällään useita aliprosesseja, missä raaka-aine voidaan syöttää joko lankana tai jauheena ja kohdennetun lämpöenergian lähteenä voi toimia laser, elektronisuihku tai valokaari. (SFS-EN ISO/ASTM 52900, s. 7, 18.) Tässä diplomityössä käsitellään hitsausrobottilaitteistolla suoritettavaa suorakerrostusta eli toisin sanoen valokaareen perustuvaa lankapohjaista suorakerrostusta. Tälle yksittäiselle suorakerrostuksen alaprosessille ei ole kirjoitushetkellä voimassa olevaa standardisoitua termiä, mutta aikaisemmassa tutkimuksessa sekä laitevalmistajien keskuudessa prosessin nimeksi on vakiintunut WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing, suom. lankaan ja valokaareen pohjautuva suorakerrostusmenetelmä). (Busachi et al. 2015, s. 48) Lankapohjaisen suorakerrostusprosessin periaate on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Valokaareen perustuvan lankapohjaisen suorakerrostusprosessin periaatekuva (Muok. McAndrew et al. 2018, s. 341).

Tässä diplomityössä käsitellään metallien lisäävän valmistuksen valokaareen perustuvaa lankapohjaista suorakerrostusprosessia kohdeyrityksen näkökulmasta, tuotetaan kohdeyritykselle tietoa kyseisen valmistusmenetelmän käyttöönoton edellytyksistä ja sen liiketoimintamahdollisuuksista sekä käytännön kokemusta valmistuksesta kohdeyrityksessä tulostettavien koekappaleiden ja materiaalitestien muodossa.

1.1 ANDRITZ Oy ja ANDRITZ Savonlinna Works Oy

ANDRITZ on yli 40 maassa toimiva lähes 30 000 työntekijän maailmanlaajuinen teknologiakonserni, joka toimittaa laitoksia, laitteita ja palveluita muun muassa vesivoimateollisuudelle, sellu- ja paperiteollisuudelle, metalli- ja terästeollisuudelle sekä erotusteknologiaan. ANDRITZ Oy on ANDRITZ-konsernin Suomen toiminnoista, pääasiassa sellu- ja paperiteollisuuden järjestelmien, tuotteiden ja palveluiden suunnittelusta ja tuottamisesta vastaava yksikkö, joka työllistää noin 1300 henkilöä. (Andritz 2020a).

ANDRITZ Savonlinna Works Oy taas on ANDRITZ Oy:n tytäryhtiönä toimiva noin 200 hengen konepaja, joka valmistaa ja toimittaa tuotteita ja palveluita pääsääntöisesti sellu- ja paperiteollisuuden tarpeisiin. Konepajan yli 100-vuotisen historian aikana toiminnan painopisteet ja valmistettavat tuotteet ovat muuttuneet useasti. Nykyään kuitenkin pääpaino valmistuksessa on selluteollisuuden pesureissa, suodattimissa ja lajittimissa.

Uuslaitevalmistuksen lisäksi konepaja tarjoaa kattavia huolto-, modernisointi- ja asennuspalveluita sellu- ja paperiteollisuuden tarpeisiin omistajan suunnitelman mukaisesti. (Andritz 2020b).

1.2 Tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää tarvittava laitteisto sekä ohjelmistot lankapohjaisen suorakerrostusmenetelmän käyttöönottoon sekä ANDRITZ Savonlinna Works Oy:n kyky kyseiseen valmistusmenetelmään yrityksen nykyisellä hitsausrobotikalustolla. Tavoitteena on myös selvittää, mikä on kyseisen valmistusmenetelmän liiketoimintapotentiaali konepajan tyypillisessä tuotannossa ja mitä lisäarvoa uuden valmistusmenetelmän käyttö toisi sellu- ja paperiteollisuuden konepajavalmistuksessa. Kokeellisen osuuden tavoitteena on luoda edellytykset valmistusmenetelmälle, suorittaa testituloksia sekä tuottaa tietoa tulostetun materiaalin laadusta ja materiaaliominaisuuksista.

1.3 Tutkimusongelma ja -kysymykset

Perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna lankapohjaisen suorakerrostusmenetelmän uutuus ja globaalisti vähäinen käyttö aiheuttavat ongelmaksi sen, että kohdeyritys ei luotettavasti pysty hahmottamaan valmistusmenetelmän konkreettisia vaatimuksia, valmistettujen kappaleiden laatua eikä myöskään siitä mahdollisesti saatavia hyötyjä. Valmistusmenetelmän käyttökohteet ja olemassa olevat esimerkit ovat hyvin tapauskohtaisia ja kokonaisyödyt riippuvat suuresti käytettävästä materiaalista ja valmistettavan kappaleen geometriasta. Kohdeyrityksellä ei ole toistaiseksi käytännön kokemusta metallien lisäävästä valmistuksesta, etenkin lankapohjaisesta suorakerrostuksesta, jonka vuoksi kyseisen valmistusmenetelmän kokonaiskuvassa ja valmistusmenetelmästä mahdollisesti saatavien hyötyjen ymmärtämisessä on puutteita. Tästä tutkimusongelmasta saadaan johdettua seuraavat tutkimuskysymykset, joihin tällä diplomityöllä pyritään vastaamaan:

1. Mitä lankapohjaisen suorakerrostuksen käyttöönotto vaatii laitteiston ja ohjelmiston osalta kohdeyrityksen näkökulmasta?
2. Mitä hyötyjä lankapohjaisella suorakerrostuksella voidaan saavuttaa sellu- ja paperiteollisuuden konepajavalmistuksessa ja mikä on kyseisen valmistusmenetelmän liiketoimintapotentiaali?

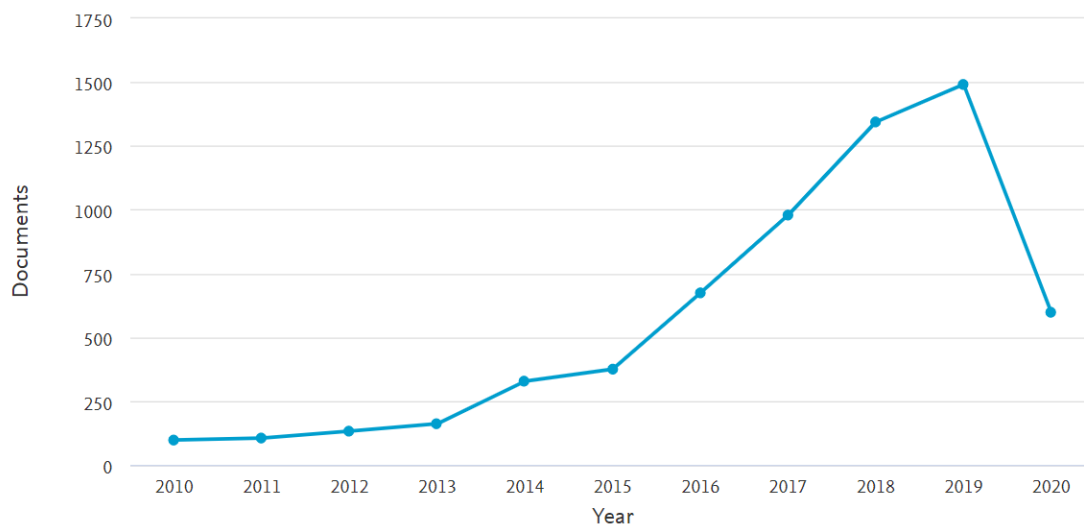
3. Mitkä ovat tällä menetelmällä valmistettujen tuotteiden laatu sekä materiaaliominaisuudet?

1.4 Tutkimusmenetelmät

Diplomityö toteutetaan kirjallisuustutkimuksen ja kokeellisen osuuden yhdistelmänä, jossa pääpaino on kokeellisessa osuudessa ja siitä saatavissa tuloksissa. Kirjallisuustutkimuksessa tukeudutaan muun muassa LUT Finnan, Google Scholarin sekä Scopusin tietokantoihin, joiden avulla pyritään selvittämään kyseisen valmistusmenetelmän edellytykset laitteistovaatimusten suhteen, menetelmän tyypilliset ominaisuudet sekä menetelmän liiketoimintapotentiaali.

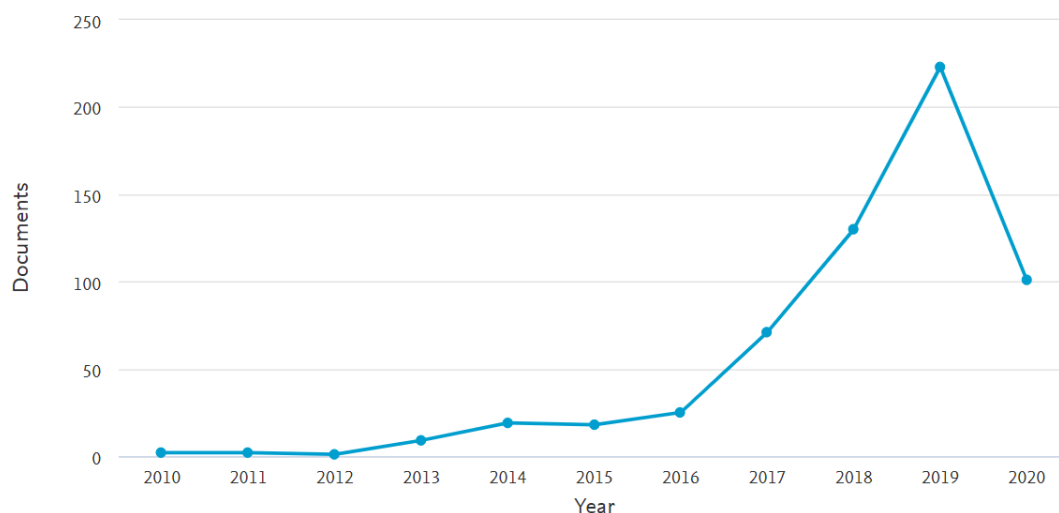
Koska hitsauslaitteistolla suoritettavalla lankapohjaisella suorakerrostuksella ei ole voimassa olevaa standardisoitua termiä, kirjallisuustutkimuksen tiedonhaussa käytettiin hakusanoina paljon eri termien yhdistelmiä. Käytetyt hakusanat koostuivat pääosin termeistä ”WAAM”, ”Wire and Arc Additive Manufacturing”, ”Wire DED”, ”Wire AM” ja ”3D welding”. Kirjallisuustutkimuksen yhteydessä huomattiin, että lankapohjaisen suorakerrostuksen sekä yleisesti metallien lisäävän valmistuksen julkaisumäärät ovat jyrkässä kasvussa. Kuvassa 2 on esitetty Scopusin julkaisujen lukumäärät vuosilta 2010-2020 hakusanoille ”Metal Additive Manufacturing” sekä vastaavasti kuvassa 3 hakusanoille ”Wire Arc Additive Manufacturing”.

Documents by year



Kuva 2. Julkaisut Scopusksessa vuosilta 2010-2020 hakusanoilla “Metal Additive Manufacturing” (Scopus 2020a).

Documents by year



Kuva 3. Julkaisut Scopusksessa vuosilta 2010-2020 hakusanoilla “Wire Arc Additive Manufacturing” (Scopus 2020b).

Kuten kuvasta 2 voidaan nähdä, yleisesti metallia lisäävää valmistusta koskevia julkaisuja on julkaistu joitakin 2010-luvun alkupuolella ja trendi on vuodesta 2015 lähtien tasaisesti kasvava. Kuvan 3 mukaan valokaareen perustuvaa lankapohjaista suorakerrostusta taas ei ole käsitelty julkaisuissa 2010-luvun alkupuolella lähes ollenkaan, ja julkaisutrendi lähtee kasvamaan vasta vuodesta 2016 lukien. Kasvu on myös jyrkempi, kuin yleisesti metallia

lisäävää valmistusta koskevat julkaisut. Kuvista 2 ja 3 huomataan myös huomattava ero julkaisumäärissä, kun vuonna 2019 metallia lisäävää valmistusta koskevia julkaisuja oli noin 1500 kappaletta ja vastaavasti lankapohjaista suorakerrostusta käsitteli vain 225 julkaisua. Julkaisumääristä voidaan päätellä, että lankapohjainen suorakerrostus on menetelmänä uudempi sekä vähemmän tutkittu metallia lisäävän valmistuksen menetelmä. Valmistusmenetelmän uutuusarvosta johtuen tämän diplomityön tuottamat tulokset ovat arvokkaita kohdeyritykselle, jotta menetelmän mahdollisesti tarjoamaa kilpailuetua päästään hyödyntämään mahdollisimman aikaisessa vaiheessa.

Kokeellisessa osuudessa luodaan ANDRITZ Savonlinna Works Oy:n eräälle hitsausrobotiasemalle edellytykset lankapohjaiseen suorakerrostusmenetelmään sekä tulostetaan testikappaleita. Lämpökamerakuva ja rikkomatonta sekä rikkovaa aineenkoetusta hyödyntäen pyritään selvittämään kattavasti tulostettujen koekappaleiden laatua sekä materiaaliominaisuuksia. Kokeellisen osuuden järjestelyt ja menetelmät ovat kuvattu tarkemmin kappaleessa 4.

1.5 Rajaukset

Metallien lisäävä valmistus on aihealueena laaja, joten tutkimusta on rajattu vastaamaan paremmin juuri kohdeyrityksen tarpeita. Yrityksen tyypilliset valmistettavat ja huollettavat laitteet ovat kooltaan suuria, jonka vuoksi tutkimus on prosessin osalta rajattu koskemaan korkean tuoton lankapohjaista suorakerrostusmenetelmää, WAAMia. Tätä rajausta tukee myös kohdeyrityksestä löytyvä robotihitsauslaitteisto, jonka myötä käytännön kokeita voidaan suorittaa yrityksen sisällä ilman laiteinvestointeja tai alihankintaa.

Kirjallisuustutkimuksen osalta aihetta käsitellään WAAMin edellyttämän laitteiston ja ohjelmiston osalta. Liiketoimintapotentiaalin osalta asiaa lähestytään metallien lisäävästä valmistuksesta saatavilla eduilla, tuotanto- ja arvoketjujen muutoksella, ympäristövaikutuksilla sekä valmistusmenetelmän mahdollisilla uhkilla. Kirjallisuustutkimuksesta rajataan pois valmistusmenetelmään liittyvä kustannuslaskelma työn salaustarpeen välttämiseksi. Kokeellisessa osuudessa valmistusprosessista rajataan ulkopuolelle koekappaleiden geometrian optimointi, tulostuksen lämpö- ja rasisusjakaumien simulointi.

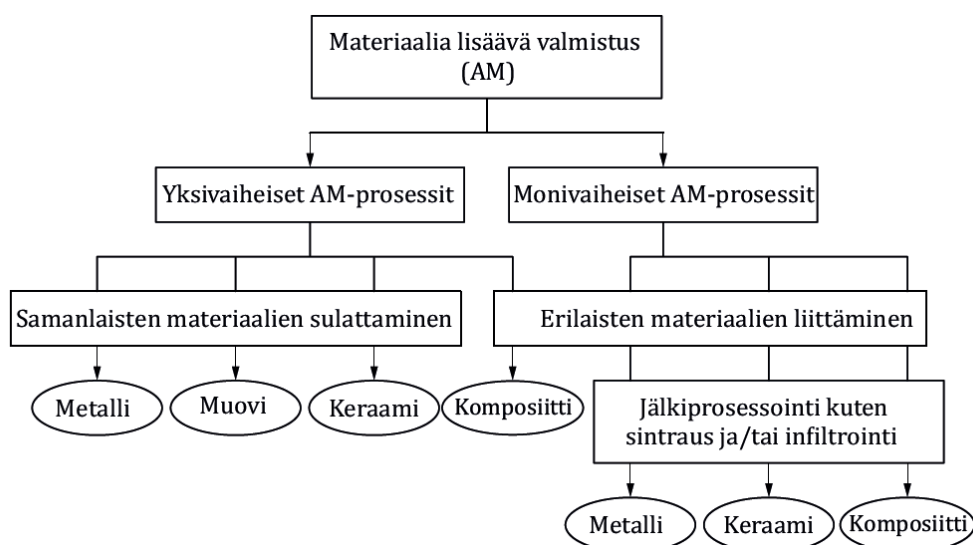
2 SUORAKERROSTUS METALLIEN LISÄÄVÄSSÄ VALMISTUKSESSA

Lisäävä valmistus etenkin metallimateriaaleille on valmistusmenetelmänä hyvin tuore verrattuna perinteisiin metallien valmistus- ja työstömenetelmiin. Nykyisenkaltaiset sovellukset metallien lisäävään valmistukseen ovat kehittyneet ja yleistyneet vasta viimeisimpien vuosikymmenien aikana, painottuen viimeisimpään vuosikymmeneen. Metallien lisäävän valmistuksen juuret kuitenkin yltävät noin vuosisadan taakse, kun Ralph Baker patentoi vuonna 1925 menetelmän, jossa hitsausprosessin lisääaineella luotiin kolmiulotteisia kappaleita (Pat. US 1533300 1925, s. 1).

Bakerin patenttia voidaan kuitenkin pitää vain lisäävän valmistuksen esiasteena, sillä SFS-EN ISO/ASTM 52900 (2017, s. 6) määrittelee termin lisäävä valmistus seuraavasti: ”Menetelmä tuottaa kappaleita 3D-mallitiedon pohjalta materiaaleja yhteen liittämällä, tyypillisesti kerros kerrokselta -periaatteella, vastakohtana materiaalia poistaviin ja materiaalia muovaaviin menetelmiin.” Määritelmän vaatimus 3D-mallitiedosta tekee lisäävästä valmistuksesta digitaalisen valmistusmenetelmän. Bakerin patentti oli luonnollisesti tuohon aikaan puutteellinen digitaalisen 3D-mallitiedon suhteen, jonka vuoksi lisäävän valmistuksen katsotaan alkaneen vasta modernien 3D-tulostimien myötä. Menetelmien ja prosessien kehitys metallien lisäävään valmistukseen alkoi Suomessa 80-luvulla ja teollisia käyttökohteita on ilmaantunut enemmissä määrin vasta 2010-luvulla (Piili 2020).

2.1 Suorakerrostus

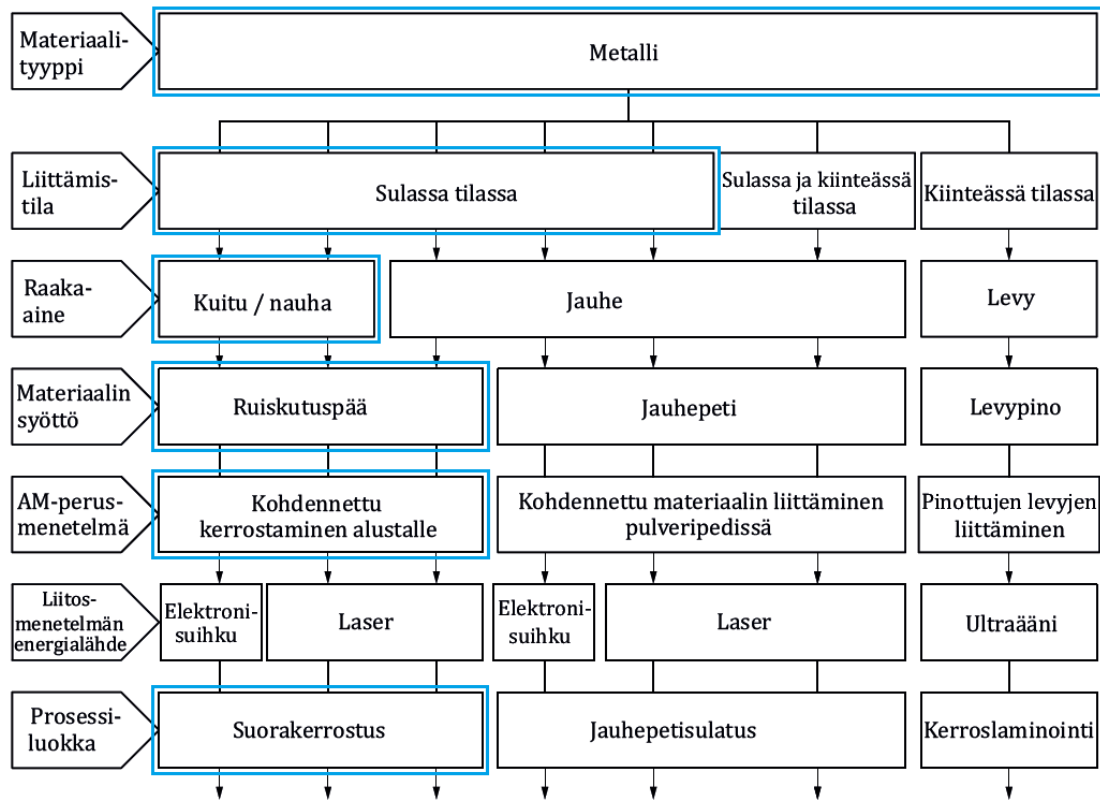
Lisäävä valmistus jaetaan raaka-ainemateriaalista riippumatta yksi- ja monivaiheisiin prosesseihin kuvan 4 mukaisesti. Yksivaiheisissa prosesseissa tuotteen päämuodot ja materiaaliominaisuudet saadaan yhdellä materiaalilla samanaikaisesti, kun taas monivaiheisissa prosesseissa käytetään materiaalien yhdistelmiä ja halutun tuotteen saamiseksi hyödynnetään useampaa työvaihetta, esimerkiksi kerros kerrokselta tulostamista sekä sintrausta. (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2017, s. 16-18, 20.)



Kuva 4. Lisäävän valmistuksen prosessien jaottelu yksi- ja monivaiheisiin prosesseihin (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2017, s. 17).

Suorakerrostus kuuluu jauhepetisulatuksen ja kerroslaminoinnin ohella yksivaiheisiin metallimateriaalin lisäävän valmistuksen prosesseihin, sillä haluttu tuote saadaan valmistettua suoraan raaka-ainemateriaalista yhdellä työvaiheella. Suorakerrostuksessa käytettävänä raaka-aineena voi toimia kuitu, nauha, lanka tai jauhe ja standardin SFS-EN ISO/ASTM 52900 mukaan liitosmenetelmän energianlähteenä voi olla elektronisuihku tai laser. Tässä yhteydessä tämän hetken standardisointi ei siis vielä tunne valokaaren perustuvaa suorakerrostusta, vaikka kyseistä menetelmää on tutkittu jo laajasti ja kaupallisiakin ratkaisuja on jo markkinoilla. (SFS-EN ISO/ASTM 52900 2017, s. 17-18; TWI 2020; Gefertec 2020.)

SFS-EN ISO/ASTM 52900 mukaan (2017, s. 7) suorakerrostus määritellään ”materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmä, jossa kohdennettua lämpöenergiaa käytetään sulattamaan ja liittämään materiaali kohdennetusti.” Samaisessa määritelmässä vielä huomautetaan, että kohdennetulla lämpöenergialla, joka voi olla esimerkiksi laser, elektronisuihku tai plasma, kohdennetaan sulattamaan liitettävä materiaali SFS-EN ISO/ASTM 52900 mukaan (2017, s. 7). Tämän määritelmän mukaan myös valokaaren perustuva suorakerrostus prosessi täyttää määritelmän kriteerit, vaikkei sitä olekaan lämpöenergian lähteissä erikseen mainittu. Kuvassa 5 on esitetty metallien yksivaiheisten lisäävän valmistuksen prosessien periaatteet ja korostettuna lankapohjaisen suorakerrostuksen reittikartta.



Kuva 5. Metallien yksivaiheisten lisäävän valmistuksen prosessien periaatteet. Sinisellä korostettuna WAAMin prosessiperiaate. (Muok. SFS-EN ISO/ASTM 52900 2017, s. 18.)

Kuten kuvasta 5 huomataan, ainoa prosessin periaate-ero valokaareen perustuvan ja esimerkiksi laseriin perustuvan lankapohjaisen suorakerrostuksen välillä on liitosmenetelmän energianlähteessä, muiden prosessiperiaatteiden pysyessä samana.

2.2 Nykytila ja tulevaisuus

Metallien lisäävä valmistus on ollut viime vuosina suuressa, parhaimmillaan jopa hyvin jyrkässä kasvussa ja muutos ”tulevaisuuden valmistusmenetelmästä” täysimittaiseen tuotantoon on jo tapahtunut. Muutostahti ja kehitys on ollut verrattain nopeaa ja kehitystyö on edennyt suurelta osin laitevalmistajien puolelta. Nämä tekijät ovat vaikuttaneet siihen, että jo tuotantokäytössä olevalta valmistusteknologialta puuttuu kattava tuote- ja laatustandardointi. Marraskuussa 2019 lisäävää valmistusta koskevia julkaistuja ISO/ASTM-standardeja oli 8 kappaletta, ISO-standardeja 3 kappaletta ja ASTM-standardeja 15 kappaletta. Julkaistujen standardien lisäksi valmisteilla oli 44 kappaletta ISO/ASTM-standardeja sekä 8 ISO/ASTM-tekniistä raporttia. Valmisteilla olevista ISO/ASTM-

standardeista vain 6 koskee erityisesti suorakerrostusprosesseja. (Korpela 2019.) Oheisista luvuista voidaan huomata, että vaikka standardeja lisäävästä valmistuksesta on jo julkaistu, on standardointityö vielä kaukana valmiista.

Vaikka jauhepetisulatus kattaa tällä hetkellä selkeästi suurimman osan kaupallisesta toiminnasta, lisäävän valmistuksen markkinoiden kehittyminen näkyy väistämättä myös suorakerrostuksen käytön yleistymisessä. Viimeisien vuosien dataan peilaten, lisäävän valmistuksen markkinoiden on arvioitu kasvavan huimalla 23,8-27,9 % vuotuisella tahdilla vuoteen 2024 saakka (Ampower 2020). Suorakerrostuksen yleistyessä myös menetelmä kehittyy yksittäisistä ja irrallisista tulostuksista paremmin osaksi hybridivalmistusmenetelmiä. Tulevaisuuden suunta suorakerrostuksen osalta näyttäisi olevan edistyneellä monitoroinnilla varustettu hybridityöasema, jossa lisäävän valmistuksen yhteydessä voidaan tehdä myös materiaalia poistavaa työtä. (Tuominen 2019.)

2.3 Sovelluskohteet

Lankapohjainen suorakerrostus on saanut tähän mennessä merkittäviä etuja käytännössä kahdella käyttökohdealueella. Ensimmäisenä on pitkiin toimitusaikoihin vastaaminen huomattavasti nopeammin. Etenkin piensarjatuotannon valukappaleilla toimitusajat voivat olla useista viikoista aina useisiin kuukausiin tai jopa vuosiin. Lankapohjaisella suorakerrostuksella toimitusaika saadaan tiputettua yksittäisiin päiviin tai viikkoihin, riippuen kappaleen koosta ja jälkikäsittelyn ja koneistuksen tarpeesta. Tätä on hyödyntänyt muun muassa Saksan rautatieyhtiö Deutsche Bahn, joka valmisti veturin erään laakerin suojuksen WAAMilla. Perinteisesti valukappaleena toimitetussa osassa toimitusaika on ollut jopa 9 kuukautta, kun nyt osa saatiin valmiiksi kahdessa kuukaudessa. Ensimmäistä kertaa uudella menetelmällä valmistettava osa aiheutti viiveitä ja jatkossa arvioitu toimitusaika kyseiselle osalle on noin 2-3 viikkoa. (Metal-AM 2019). Kuvassa 6 on esitetty kyseinen suojus.



Kuva 6. Deutsche Bahnin WAAMilla valmistettu laakerinsuojus (Metal-AM 2019).

Kuvassa 6 nähdään vasemmalla kappale heti tulostusprosessin jälkeen, jossa erottuu WAAMille tyypilliset yksittäiset hitsipalot ja karkea pinnanlaatu. Kuvan 6 oikealla puolella on sama kappale valmiiksi koneistettuna. Vaikka koneistustarvetta onkin, on materiaalihukka silti verrattain pientä tulostetun osan ollessa jo lähelle lopullisissa mitoissa.

ANDRITZ-konsernin vesivoimaan keskittyvällä liiketoiminta-alueella lankapohjaista suorakerrostusta on hyödynnetty jo 90-luvulta alkaen. Kuvan 7 mukaisia Pelton-turbiineita on mahdollista valmistaa usealla eri tavalla, mutta ANDRITZilla yleisessä käytössä on valmistusmenetelmä, jossa taotun kiekon ympärille valmistetaan turbiinin kauhat lankapohjaisella suorakerrostuksella. Tällä tavoin pienennetään merkittävästi kauhojen koneistusaikaa sekä koneistustarpeen pienentyessä vähennetään myös materiaalihävikkiä. (Heider 2019, Appleyard 2012).



Kuva 7. Lankapohjaisella suorakerrostuksella valmistettuja Pelton-turbiinin kauhoja (Appleyard 2012).

Kuvasta 7 voidaan huomata, että lankapohjaisen suorakerrostuksen hyödyntämisessä Pelton-turbiinin kauhojen valmistamisessa käytetään hybridimenetelmää eli kahden tai useamman eri valmistusmenetelmän yhdistelmää. Taotun kiekon pohjalle tulostetut kauhat ovat puolessa välissä koneistettu lopullisiin mittoihinsa, jonka jälkeen tulostusprosessia on jatkettu kauhan loppuun saakka. Kesken valmistuksen tapahtuva vaihtelu ainetta lisäävän ja ainetta poistavan menetelmän välillä voi tietyissä tapauksissa olla hyvä keino saada menetelmästä suurin hyöty ulos. Jos osa tulostettaisiin valmiiksi asti, ei sen koneistaminen joissain tapauksissa olisi välttämättä enää mahdollista.

Cranfieldin yliopistosta alkunsa saanut WAAMMat-ohjelma on jo useita vuosia ollut merkittävä toimija WAAM-prosessin kehittäjänä. WAAMMat on tehnyt laajaa tutkimus- ja kehitystyötä eri materiaaleille, prosessoinnille, CAM-ohjelmistolle kuten myös etsinyt teollisia käyttökohteita. WAAMMatin konkreettisessa valmistuksessa on usein pohjana ollut ilmailuteollisuuden tarpeet, missä työstettävät alumiini- ja titaaniseokset ovat suhteellisen

kalliita sekä koneistettavissa osissa hukka voi olla suurta, jopa 90% luokkaa. WAAMMatin valmistamia lentokoneen laskutelineen osia on esitetty kuvassa 8. (WAAMMat 2020b.)

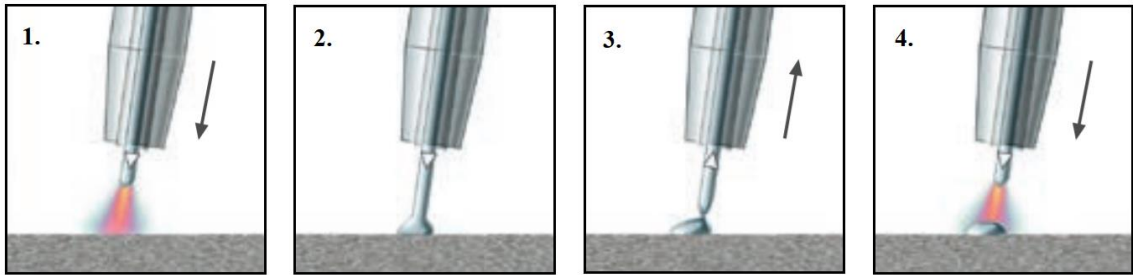


Kuva 8. Titaanista (vasemmalla) ja teräksestä (oikealla) valmistetut lentokoneen laskutelineen osan aihiot (WAAMMat 2020a).

Kuvan 8 esimerkkikappaleista voidaan nähdä, että kappaleen rakenne on hyvin ontto kennomainen rakenne. Jos vastaavat kappaleet valmistettaisiin perinteisin menetelmin koneistamalla yhdestä tarpeeksi isosta ahiosta, materiaalihukka olisi merkittävä. Lankapohjaisella suorakerrostuksella valmistetut aihiot vähentävät ostettavien materiaalin määrää noin viidennekseen. Kun materiaalia tarvitsee koneistaa paljon vähemmän, on sillä myös valmistusprosessia nopeuttava vaikutus. (WAAMMat 2020b.)

2.4 CMT-kylmäkaariprosessi lankapohjaisessa suorakerrostuksessa

Froniuksen CMT-hitsausprosessi (Cold Metal Transfer) on niin sanottu kylmäkaariprosessi, joka on yhteisnimitys eri kaupallisille nimityksille, joissa hitsauksen lämmöntuontia rajoitetaan merkittävästi normaaleihin prosesseihin verrattuna. CMT-hitsausprosessi on lähellä normaalia pulssihitsausta, mutta lämmöntuontia on saatu merkittävästi rajoitettua lisäainelangan edestakaisella liikkeellä (Fronius 2020, s. 2). CMT-hitsausprosessin periaate on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. CMT-hitsausprosessin periaatekuva, jossa kuvattuna lisääinelangan liikesuunta prosessin eri vaiheissa (Fronius 2020, s. 2).

Kuten kuvasta 9 nähdään, vaiheessa 1 lisääinelanka liikkuu kohti hitsisulaa valokaaren palaessa. Vaiheessa 2 lisääinelanka osuu hitsisulaan, valokaari sammuu ja tapahtuu oikosulku, jonka aikana hitsausvirtaa pienennetään. Oikosulun tapahduttua vaiheessa 3 lisääinelangan suunta vaihtuu hitsisulasta pois päin, joka auttaa sulapيسان irtoamisessa. Vaiheessa 4 lisääinelangan suunta vaihtuu jälleen hitsisulan suuntaan ja prosessi alkaa alusta. (Fronius 2020, s. 2.)

Kylmäkaari-prosessista huolimatta tulostuksen lämmönhallintaan tulee kiinnittää huomiota, etenkin geometrioissa joissa pienelle alueelle kohdistuu paljon kohdennettua energiaa. Hitsauksen lämmöntuonnin kaavalla ja koekappaleen tulostuksessa käytetyillä parametreilla voidaan tehdä johtopäätöksiä tulostettavaan kappaleeseen kohdistuvasta lämpökuormasta. Hitsauksen lämmöntuonti on määritelty standardissa SFS EN 1011-1 seuraavasti (SFS-EN 1011-1, s. 18):

$$Q = k \cdot \frac{UI}{v} \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

Kaavassa 1 Q on hitsauksen lämmöntuonti kilojouleina millimetriä (kJ/mm) kohden, k on termien hyötysuhde, U on kaarijännite voltteina (V), I on hitsausvirta ampeereina (A) ja v on kuljetusnopeus millimetreinä sekunnissa (mm/s). Ruostumattomien terästen hitsauksessa lämmöntuonnin ylärajaksi suositellaan yleensä korkeintaan 1,5 kJ/mm normaaleilla hitsausprosesseilla (AGA 2020). CMT-prosessilla voidaan saavuttaa merkittävästi matalampi lämmöntuonti, kohteesta riippuen noin puolet pienempi (Fronius 2020, s. 2 & 8-12).

3 LIKETOIMINTAPOTENTIAALI SELLUTETOLLISUUDESSA

Metallien lisäävä valmistus on keskittynyt kansallisesti ja kansainvälisesti suurimmaksi osaksi jauhepetimenetelmän suhteellisen pieniin ja hitaasti valmistettaviin kappaleisiin ja toisaalta erityisiin ja kriittisiin komponentteihin, jossa valmistusnopeudella tai hinnalla ei ole väliä (Piili 2020). Tästä syystä lisäävää valmistusta ei valmistusmenetelmänä usein nähdä potentiaalisena perinteisessä konepajavalmistuksessa, jossa materiaalit ovat usein kilohinnaltaan halpoja, kappaleet suuria ja tuotteet ovat suunniteltu perinteisten valmistusmenetelmien ehdoilla.

3.1 Tuotanto- ja arvoketjujen muutos

Kuten mikä tahansa muukin valmistusmenetelmä, koko tuotanto- ja arvoketju on paljon muutakin kuin pelkkä konkreettinen valmistus. Jotta valmistusmenetelmä olisi kilpailukykyinen, täytyy sen kattaa luotettavasti ja kilpailukykyisesti koko arvoketju laite- ja raaka-ainevalmistajista, tuotesuunnittelusta ja muusta simuloinnista aina valmistuksen kautta jälkiprosessointiin ja laadunvarmistukseen. Moderneissa tuotantoyksiköissä valmistusmenetelmä pitäisi näiden lisäksi olla vielä integroitavissa muiden toimintojen ja menetelmien ohelle hybridivalmistusmenetelmäksi.

Isojen konepajojen näkökulmasta tuotantoketjut ovat usein hyvin vakioituneet. Toimialasta ja yrityksen liiketoimintamallista riippuen joudutaan turvautumaan enemmän tai vähemmän alihankinta- ja toimittajaverkostoihin, sillä kaikkea ei juuri koskaan yhdellä konepajalla pystytä tai ole kannattavaa valmistaa. Joustavuutta ja riippumattomuutta konepaja voi hakea hankkimalla usean rinnakkaisen alihankkijan tai toimittajan yksittäisille osille tai työvaiheille, mutta alihankintariippuvuus on joka tapauksessa merkittävä.

Lisäävä valmistus vähentää alihankintariippuvuutta siirtämällä tuotantoa omaan valmistukseen, mutta samalla myös yksinkertaistaa tuotantoketjuja huomattavasti. Siinä missä esimerkiksi levy- tai putkikappaleet käyvät monta eri vaihetta ja sijaintia läpi ennen lopullista haluttua muotoa ennen jälkikäsittelyä, lankapohjaisessa suorakerrostuksessa tuotantoketju yksinkertaistuu ja lyhenee pitäen sisällään vain lisäainelangan valmistamisen, valmistusprosessin sekä jälkikäsittelyn. Samasta lankamateriaalista pystytään valmistamaan

joustavasti erilaisia muotoja, joten teräsraaka-aineen muovaaminen eri ahiomuotoihin, kuljettaminen eri toimittajille ja alihankkijoille sekä työstäminen oikeisiin loppumittoihin jää pois tuotantoketjusta. (Gefertec 2020.) Merkittävä etu on myös varastoinnin yksinkertaistuminen, kun samasta materiaalista ei tarvitse olla esimerkiksi eri paksuisia levyjä varastossa, vaan selvittää yhdentyypisellä varastoitavalla materiaalilla. Lisävä valmistus vaikuttaa myös tuotantoketjujen kuljetustarpeeseen, sillä konkreettisen tuotteen on aina fyysisesti kuljettava paikasta toiseen tullin läpi, mutta CAD-mallia ja valmistusdataa liikutetaan sähköisesti eikä datan liikkumisella ole tullin kaltaista valvontaa (Simpson 2017).

Lisäävän valmistuksen mahdollistama joustavuus valmistuspaikan ja raaka-ainemateriaalin suhteen luo myös toimintavarmuutta erilaisissa häiriötilanteissa. Tästä viimeisimpänä esimerkkinä toimii maailmanlaajuinen COVID-19 pandemia. Kun pandemian tai muun kriisin seurauksena monia toimintoja ajetaan alas ja voimassa on liikkumis- ja matkustusrajoituksia kansallisesti, sekä kansainvälisesti, on tällä väistämättä vaikutuksia myös toimitusketjuihin.

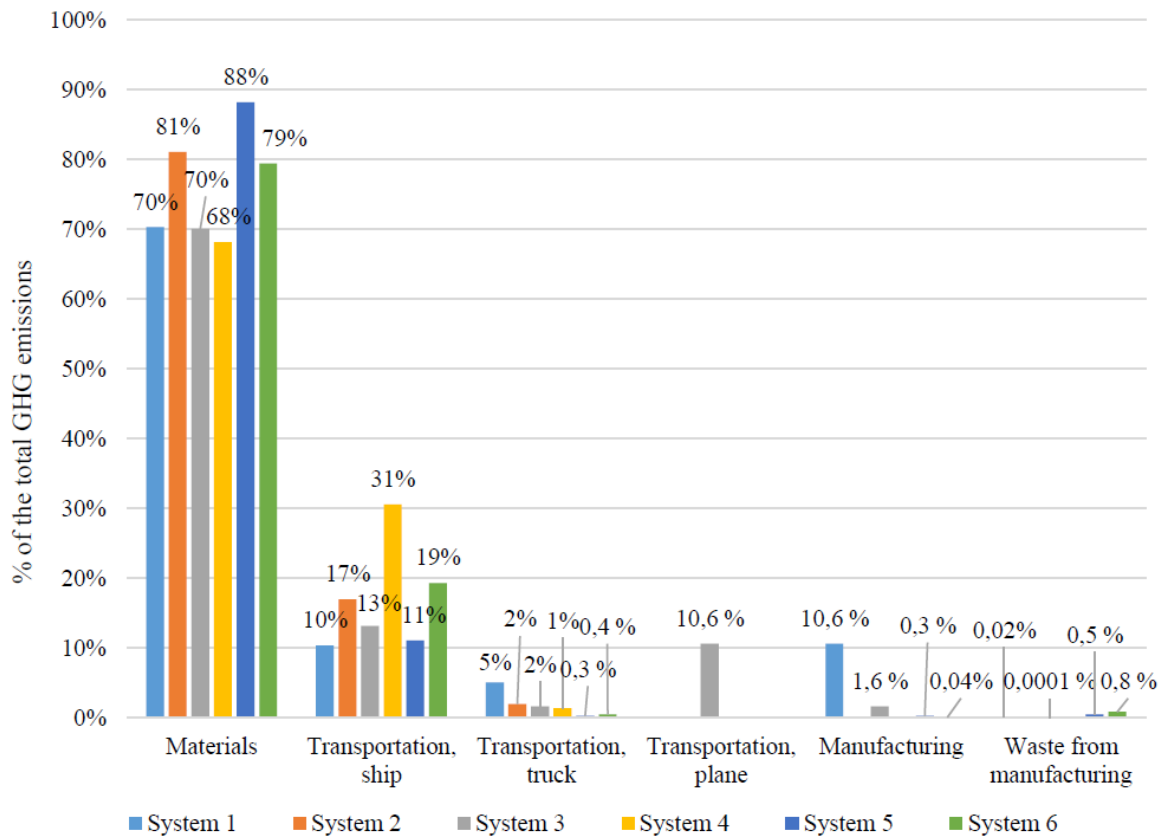
3.2 Ympäristövaikutukset

Ilmastonmuutos, sen vaikutukset sekä sen torjunta ovat viime vuosina olleet enenevässä määrin pinnalla julkisessa keskustelussa ja mediassa eikä tälle suunnalle ole oletettavasti tulossa lähiaikoina muutosta. Valmistava teollisuus on globaalisti yksi merkittävin kasvihuonekaasujen lähde, eikä sellu- ja paperiteollisuus muodosta poikkeusta tässä. Vaikka päästöjä on onnistuttu jo tähän mennessä leikkaamaan merkittävästi vertailuarvoista, on edessä edelleen isoja vähennystarpeita. (EEA 2016). Vuoden 2000 vertailuarvosta päästöjen globaali vähennystarve on 85% vuoteen 2050 mennessä, jotta ilmaston lämpeneminen saataisiin rajattua 2 asteeseen (Greenhouse Gas Protocol 2011, s. 3). Näiden vähennystarpeiden myötä sellu- ja paperiteollisuus mukaan luettuna sellu- ja paperiteollisuuden laitetoimittajat tulevat tarvitsemaan entistä tehokkaampia prosesseja, uusia innovaatioita sekä ympäristöystävällisempiä ratkaisuja.

ANDRITZ-konsernin arvoiksi on listattu intohimo, kumppanuus, näkökulmat ja monipuolisuus. Näitä näkökulmia tarkemmin tarkasteltuna näkökulmat pitää sisällään innovatiivisen asenteen, jonka avulla konserni luo uusia polkuja ja ratkaisuja parempaan tulevaisuuteen. Kumppanuudessa ja monipuolisuudessa yhdistyy uusien kykyjen

hyödyntäminen ja asiakkaan parhaaksi toimiminen joustavasti. (Andritz 2020c). Ekologisuus ja kestävä kehitys näkyvät myös ANDRITZ-konsernin asiakkaiden, suurten sellu- ja paperintuottajien, arvoissa. Kun sellu- ja paperiyhtiöistä tarkasteluun otetaan suomalaiset UPM ja Stora Enso, itävaltalainen Mondi sekä brasilialainen Bracell, yhteisenä näiden yhtiöiden arvoissa toistuu puhtaus, vastuullisuus ja halu uudistua (UPM 2020, Stora Enso 2020, Mondi 2020 & Bracell 2020). Sekä laitevalmistajalla, että loppukäyttäjällä on siis halu toimia paremman tulevaisuuden ja ekologisuuden puolesta.

Lankapohjaisella suorakerrostuksella on muiden ainetta lisäävän valmistuksen menetelmien tavoin suuri potentiaali laitteiden hiilijalanjäljen pienentämisessä vähentämällä joko suoria valmistuksesta aiheutuvia päästöjä tai tuottamalla ominaisuuksiltaan tehokkaampia ja puhtaampia tuotteita. Bekker & Verlinder totesi tutkimuksessaan (2018, s. 445), että lankapohjaista suorakerrostusta, hiekkavalua ja CNC-koneistusta verrattaessa valmistusmenetelmällä itsessään ei ole suurta vaikutusta loppukappaleen ympäristöpäästöihin. Merkittävin tekijä kokonaispäästöissä on raaka-ainemateriaalin valmistus ja tämän myötä kappaleen päästöt ovat enemmän riippuvaisia käytetyistä raaka-ainekiloista kuin valmistustavasta. Raaka-ainemateriaalin valmistamisen suuri osuus tuotteiden kokonaiskasvihuonepäästöistä ilmenee myös Andritz Oy:n tuottamassa tutkimuksessa, jossa tutkittiin kuuden kohdeyrityksen valmistaman laitteen kasvihuonepäästöjä materiaalin, kuljetuksien, valmistuksen sekä jätteiden osalta. Yksittäisten tekijöiden vaikutus kappaleen kokonaispäästöihin on nähtävissä kuvasta 10.



Kuva 10. Yrityksen tyypillisten tuotteiden kasvihuonekaasujen jakautuminen eri osaluokkien kesken (Oksala 2019, s. 75).

Kuten kuvasta 10 huomataan, kaikissa kuudessa tutkitussa laitteessa raaka-ainemateriaalien tuottamisen osuus kasvihuonepäästöistä on merkittävä, laitteesta riippuen noin 70-90% kokonaiskasvihuonepäästöistä. Toiseksi suurin päästölähde laitteissa on laivarahti noin 10-30% osuudella. Rahdista aiheutuvat päästöt ovat vahvasti riippuvaisia sekä raaka-ainemateriaalien alkusijainnista, että lopputuotteen määränpäästä. Näin ollen, lähialueilta hankitut raaka-aineet ja lopputuotteen toimittaminen kotimaahan pienentää rahdeista aiheutuneita päästöjä huomattavasti verrattuna tilanteeseen, jossa raaka-aineet kuljetetaan kaukomaista ja lopputuote viedään esimerkiksi Aasiaan tai Etelä-Amerikkaan. (Oksala 2019, s. 87.) Kuvasta 10 on hyvä huomata myös valmistuksesta aiheutuneiden päästöjen vähäinen osuus verrattuna kuljetuksista ja materiaaleista aiheutuneisiin päästöihin. Oksalan (2019) tutkimuksessa valmistuksen päästöihin oli luettu mukaan valmistuksesta johtuva sähkön, veden sekä polttoaineiden kulutus laitteiden sekä kiinteistön osalta. (Oksala 2019, s. 67).

On tärkeää myös huomata, että Oksalan tutkimuksessa (2019, s. 65) käytettyjä materiaalikiloja ja niistä aiheutuvia päästöjä käsiteltiin vain loppukappaleen osalta eikä valmistuksen eri vaiheissa tapahtunutta hukkaa otettu huomioon. Koneistuksessa ja levyleikkeiden valmistuksessa hukka on väistämätöntä, eikä tätä hukkaa ole laskettuna mukaan laitteiden ympäristöpäästöissä. Toisaalta, sekä koneistuksesta, että levytöistä syntyvä materiaalihukka saadaan kierrätettyä ja uudelleenkäytettyä teräksen valmistuksessa melko tehokkaasti ja näin ollen tämä materiaalihukan määrä vähentää terästuotannossa tarvittavan uusioraaka-aineen määrää.

Suurin yksittäinen tekijä teräksestä valmistetun lopputuotteen kasvihuonepäästöissä on siis raaka-ainemateriaalin valmistuksesta aiheutuneet päästöt. Tästä voidaan päätellä, että lopputuotteen massan pienentäminen on tehokkain tapa pienentää laitteen tai muun tuotteen valmistuksesta aiheutuneita päästöjä. Myös kuljetustarpeen minimoimisella on päästöjä vähentävää vaikutusta, joskin ei niin suurta kuin massan pienentämisellä. Massan pienentäminen geometrian optimoinnin myötä sekä kuljetustarpeen vähentäminen joustavan valmistuspaikan myötä ovat molemmat lisäävällä valmistuksella saavutettavia etuja. Tämän perusteella voidaan siis sanoa, että lankapohjaisella suorakerroksella on huomattava potentiaali lopputuotteiden hiilijalanjäljen pienentämisessä.

3.3 Riskit ja uhat

Lisäävään valmistukseen sisältyy perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna myös uudenlaisia riskejä ja uhkakuvia, jotka on syytä tunnistaa ja tiedostaa. Koska lisäävään valmistukseen liittyy konkreettisen valmistuksen lisäksi vahvasti myös digitaalinen puoli kaikissa tuotantoketjun vaiheissa, tuo se mukanaan riskejä tietoturvaan, immateriaalioikeuksiin ja laadunvarmistukseen liittyen.

Kyberuhat eivät äkkiseltään tunnu olevan merkittävä uhka valmistavalle teollisuudelle, mutta todellisuudessa vuonna 2015 Yhdysvalloissa kolmasosa kaikista kyberhyökkäyksistä kohdistui teollisuuteen. (He et al. 2016, s. 18). Tämä yhdistettynä siihen, että kyberhyökkäysten määrä kasvaa huomattavasti vuosittain, johtaa väistämättä johtopäätökseen, että kyberuhkiin tulee varautua digitaalisiin valmistusmenetelmiin siirryttäessä. Tietomurron tapahtuessa hyökkääjä yleensä haluaa kohteelta tietoa tai muita resursseja, mutta on myös muistettava sabotoinnin mahdollisuus.

Toinen merkittävä uhka liittyy digitaalisen CAD-mallin immateriaalioikeuksiin. Digitaalisen CAD-mallin patentoiminen ei onnistu yhtä helposti, kuin perinteiset laitteiden valmistuspiirustukset ja toisaalta CAD-mallin kopiointi saattaa monessa tapauksessa tuottaa suurempia rahallisia menetyksiä. Jotta lisäävästä valmistuksesta saisi potentiaaliset hyödyt irti, vaatii osat yleensä paljon uudelleensuunnittelua, topologiaoptimointia, virtaussuunnittelua ja muita simulointeja. Näistä syistä lisäävän valmistuksen tuotteet ja mallit ovat yleensä perinteisiä malleja arvokkaampia ja vastaavasti mallin vuotaessa yrityksen ulkopuolelle myös menetykset ovat isompia. (Simpson 2017.)

3.4 Käyttökohteet

Lankapohjainen suorakerrostus on monipuolinen valmistusmenetelmä ja tyypillisiä käyttökohteita on muun muassa pinnoitussovellukset, koneistettavien tai valukappaleiden korvaaminen tulosteilla, hybridimateriaalisovellukset, hybridivalmistusmenetelmät tai nopeaan tarpeeseen vastaaminen. Kohdeyrityksen näkökulmasta kiinnostavia käyttökohteita on erilaiset hybridimateriaalisovellukset, jossa arvokkaampia teräslaatuja tai pinnoitusmateriaaleja voitaisiin käyttää vain niihin paikkoihin, jossa sitä oikeasti tarvitaan ja tällä tavoin optimoida materiaalinkäyttöä.

Toisena potentiaalisena käyttökohteena kohdeyrityksen näkökulmasta on huoltoliiketoiminnan pinnoitus- ja täyttöhitsaukset. Lankapohjaisen suorakerrostuksen kyky yhdistettynä 3D-skannaukseen modernisoisi ja tehostaisi huollettavien laitteiden tuotantoketjua, missä tällä hetkellä turvaudutaan vielä paljon käsin mittaukseen, käsin hitsaukseen ja hitsausrobotin opettamalla ohjelmointiin, joka on monimutkaisille muodoille hankalaa ja hidasta.

Pidemmän linjan tavoitteena lisäävän valmistuksen hyödyntämiseen voisi olla esimerkiksi joustava valmistussijainti ja tehdasalueilla paikan päällä tapahtuva valmistus, joka eliminoisi osan huollettavien laitteiden kuljetustarpeesta sekä mahdollisesti lyhentäisi tehtaiden seisakkiaikoja.

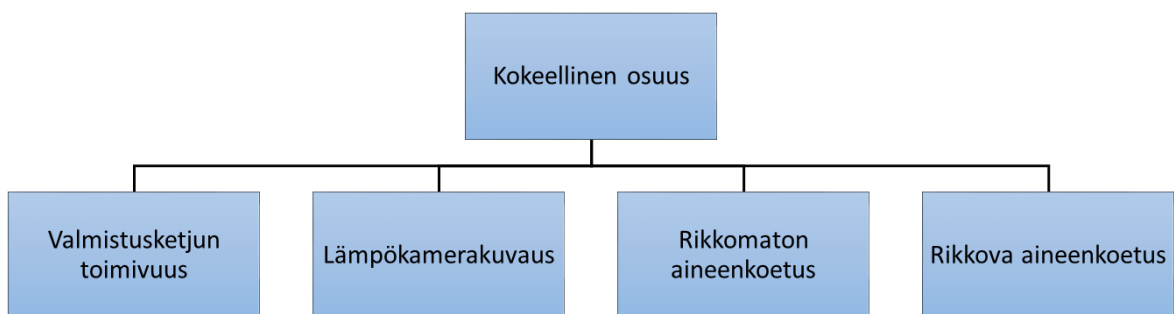
Aaltonen, Kauppinen ja Nuopponen totesivat ANDRITZ Oy:n sisäisessä selvitystyössä (2020), että lisäävän valmistuksen hyödyntäminen ei tapahdu itsestään muun toiminnan ohella, vaan tehokasta käyttöönottoa varten tarvitaan selkeä strategia, resurssit sekä organisaatio. Samaisessa työssä esitettiin, että konsernitasolla lankapohjaiselle suorakerrostukselle on useita potentiaalisia käyttökohdealueita, mutta kaikkea ei suinkaan tarvitse tehdä heti, vaan vaadittavan tietotaidon kerryttämiseksi eteneminen täytyisi tehdä vaiheittain.

4 KOKEELLINEN OSUUS

Tutkimuksen kokeellisessa osuudessa pyritään vastaamaan tutkimusongelman mukaiseen puutteeseen kohdeyrityksen kokemuksessa lankapohjaisen suorakerrostuksen suhteen ja tuottamaan ensimmäisiä tuloksia tulostetun materiaalin laadun suhteen.

4.1 Tavoite ja tarkoitus

Kokeellisen osuuden tavoitteena on sekä luoda edellytykset hitsauslaitteistolla suoritettavaan lankapohjaiseen suorakerrostukseen, että tuottaa tällä menetelmällä koekappaleita. Koekappaleen valmistuksella todennetaan valmistusketjun toimivuus ja tulostettua koekappaletta arvioidaan muun muassa ainetta rikkomattomilla (NDT, Nondestructive Testing) sekä ainetta rikkovilla (DT, Destructive Testing) testausmenetelmillä, jonka myötä saadaan ensi käden tietoa kyseisellä menetelmällä valmistettujen kappaleiden laadullisista ominaisuuksista. Kuvassa 11 on esitetty kokeellisen osuuden pääosiot.



Kuva 11. Kokeellisen osuuden jakautuminen neljään pääkategoriaan.

Kuvassa 11 mainittu valmistusketjun toimivuus on kokeellisen osuuden ensimmäinen askel, jolla todennetaan valmistusketjun toimivuus CAD-mallista konkreettiseen valmistukseen asti. Kun prosessi on todettu toimivaksi, voidaan seuraavassa vaiheessa lämpökameraa hyödyntämällä saada tietoa tulostusprosessin etenemisestä ja lopuksi rikkomattomalla sekä rikkovalla aineenkoetuksella saada tietoa tulostetun materiaalin laadullisista ominaisuuksista. Kaikki neljä kategoriaa ovat tärkeitä valmistusmenetelmän jatkokehityksen

ja mahdollisen tuotannollisen käyttöönoton kannalta ja tässä tutkimuksessa saatujen tulosten pohjalta on helpompi pohtia jatkotutkimuskohteita valmistusmenetelmän suhteen.

4.2 Käytetyt materiaalit ja laitteet

Tässä kappaleessa on esitetty kokeellisessa osuudessa käytetyt laitteet, ohjelmistot ja muut koejärjestelyihin liittyvä välineistö. Kokeellisen osuuden laitteiksi luetaan kaikki tarvittavat laitteet, ohjelmistot ja välineet, joiden avulla kokeellinen osuus on mahdollista toistaa kappaleessa 4.3 kuvattujen menetelmien avulla.

Koekappaleiden valmistus tapahtui konepajan hitsaus- ja koneistusasema 3:lla, HIKO3:lla. HIKO3-asemalla valmistukseen käytettiin Yaskawan valmistamaa Motoman HP20D 6-akselista käsivarsirobotia. HIKO3-asemaan kuului robottikäsivarren lisäksi myös lineaarirata robotille sekä yksiakselinen pyörityspöytä kappaleenkäsittelyyn. Robottikäsivarten oli integroitu Froniuksen TPS 500i hitsausvarustus CMT-ominaisuudella. Robottikäsivarsi ja hitsausvarustus on esitetty kuvassa 12.



(a)

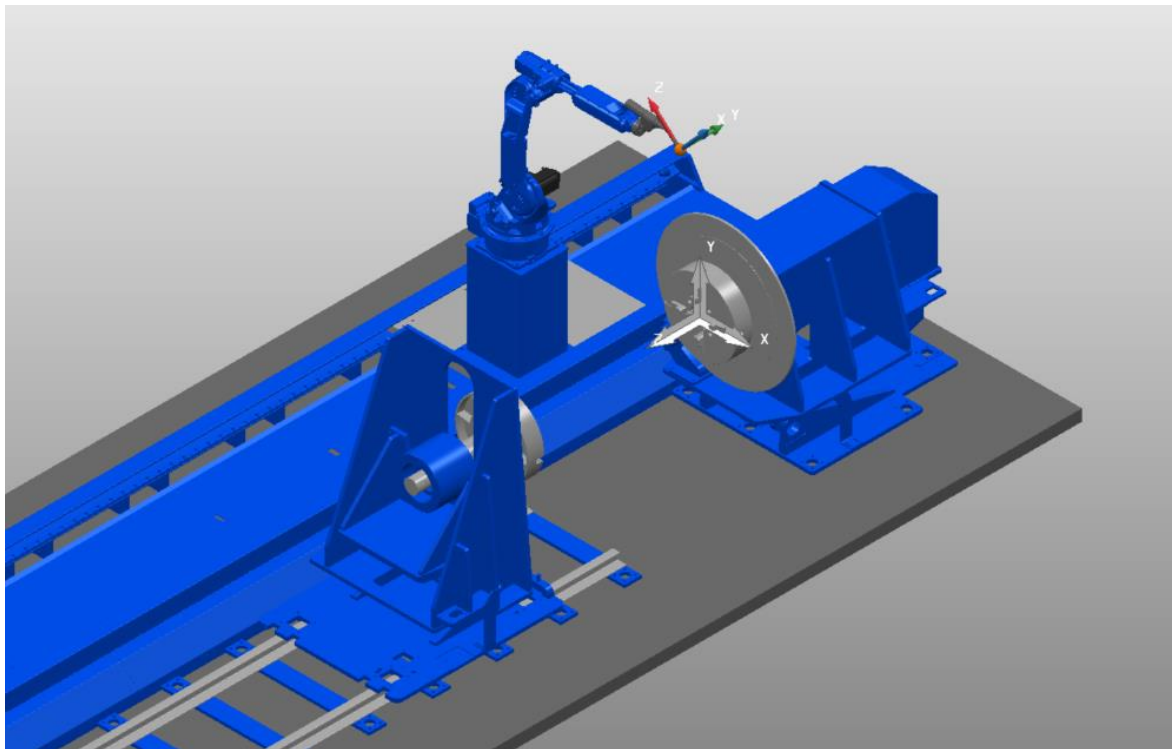


(b)

Kuva 12. HIKO3-aseman robottisolun. a) Motoman HP20D roboti, langansyöttölaitteisto ja hitsauspoltin. b) Fronius TPS 500i CMT hitsausvirtalähde.

Kuvassa 12a on näkyvissä HIKO3-robottisolun Motoman-käsivarsiroboti, pyörityspöytä ja hitsausvarustus langansyöttölaitteiston ja hitsauspoltin osalta. Kuvassa 12b taas on Froniuksen TPS 500i CMT hitsausvirtalähde. Kokeellisessa osuudessa hyödynnettiin ohjelmistoja sekä CAD-mallinnukseen (Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu), että CAM-ohjelmointiin (Computer Aided Manufacturing, tietokoneavusteinen

valmistus). CAD-ohjelmistona koekappaleen 3D-mallinnukseen käytettiin Autodeskin toimittamaa Inventor Professional 2020 -ohjelmistoa. CAM-ohjelmistona hitsausrobotin liikeratojen luontiin, simulointiin ja robottikoodin kirjoittamiseen käytettiin niin ikään Autodeskin toimittamaa PowerMill Ultimate 2020 -ohjelmistoa Additive- sekä Robot-moduuleilla. Kuvassa 13 on esitetty HIKO3-robottisolu virtuaalisena PowerMill-ohjelmistossa.



Kuva 13. Kohdeyrityksen HIKO3-robottisolu virtuaalisena PowerMill-ohjelmistossa.

Kokeellisessa osuudessa koekappaleen raaka-ainemateriaalina käytettiin Lincoln Electricin valmistamaa lisäainelankaa kauppanimeltään LNM 316LSi. LNM 316LSi on matalahiilinen umpilanka luokituksestaan EN ISO 14343-A G 19 12 3 LSi, joka on tarkoitettu austeniittisten kromi-nikkeli-molybdeenimateriaalien eli niin sanottujen haponkestävien terästen hitsaukseen (Lincoln Electric 2020). Taulukossa 1 on esitetty lisäainelangan tarkempi kemiallinen koostumus sekä sitä vastaavan levyateriaalin 1.4404 kemialliset koostumukset.

Taulukko 1. LNM 316LSi lisäainelangan sekä 1.4404 levyateriaalin kemialliset koostumukset. (Lincoln Electric 2020; SFS-EN 10028-7 s. 11)

Materiaali	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
LNM 316LSi	0,01	1,8	0,8	18,5	12,2	2,5
1.4404	≤ 0,03	≤ 2,0	≤ 1,0	16,5-18,5	10,0-13,0	2,0-2,5

Kuten taulukosta 1 nähdään, on lisäainelankana käytetyn 316LSi materiaalin sekä 1.4404 levyateriaalin kemialliset koostumukset lähes vastaavat. 1.4404 materiaali onkin eurooppalaisen EN-ISO standardin käyttämä määritelmä yhdysvaltalaisen ASTM standardin 316L materiaalista. Pieni ero materiaaleissa muodostuu 316LSi materiaaliin lisäystä piistä ja standardin ylärajasta selkeästi vähemmästä hiilen määrästä.

Valmistuksessa suojakaasuna käytettiin standardin EN ISO 14175 ryhmän Z mukaista Linde-Gasin valmistamaa suojakaasua kauppanimeltään MISON 2He. Ryhmä Z on määritelty standardin SFS-EN ISO 14175 (2020) mukaan ”Kaasuseokset, jotka sisältävät komponentteja, joita ei ole taulukossa, tai seosten pitoisuudet ovat ulkopuolella taulukossa annettujen alueiden.” Suojakaasu vastaa standardin EN ISO 14175 yleisemmin vastaavien materiaalin hitsauksessa käytettyä ryhmää M12, mutta suojakaasussa käytetty helium ja typpi muuttavat suojakaasun ryhmään Z (Linde-Gas 2020; SFS-EN ISO 14175, s. 18). MISON 2He suojakaasu on tarkoitettu etenkin ruostumattomien terästen hitsaukseen ja normaaliin ryhmän M12 suojakaasuun verrattuna MISON 2He mahdollistaa mm. suuremmat hitsausnopeudet ja aiheuttaa vähemmän muodonmuutoksia (Linde-Gas 2020). Suojakaasun koostumus on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. MISON 2He suojakaasun kemiallinen koostumus. (Linde-Gas 2020)

Aine	CO ₂	He	N	Ar
Osuus (%)	2,0	30	0,03	lopun

Koekappaleiden valmistuksen aikana työlämpötilaa mitattiin ja seurattiin kontaktilämpömittarilla sekä FLIR A35 -lämpökameralla. Lämpökameran mitta-alue on valmistajan mukaan spesifioitu vain 550 °C asti, joten varsinaisen hitsisulan jäähtymisen

mittaamiseen sijaan lämpökamera tuotti dataa jo tulostetun kappaleen lämpötilakertymästä ja jäähtymisestä. Lämpökameran tuottamaa materiaalia käsiteltiin ja analysoitiin FLIR Tools -ohjelmistolla. FLIR A35 -lämpökamera on esitetty kuvassa 14.



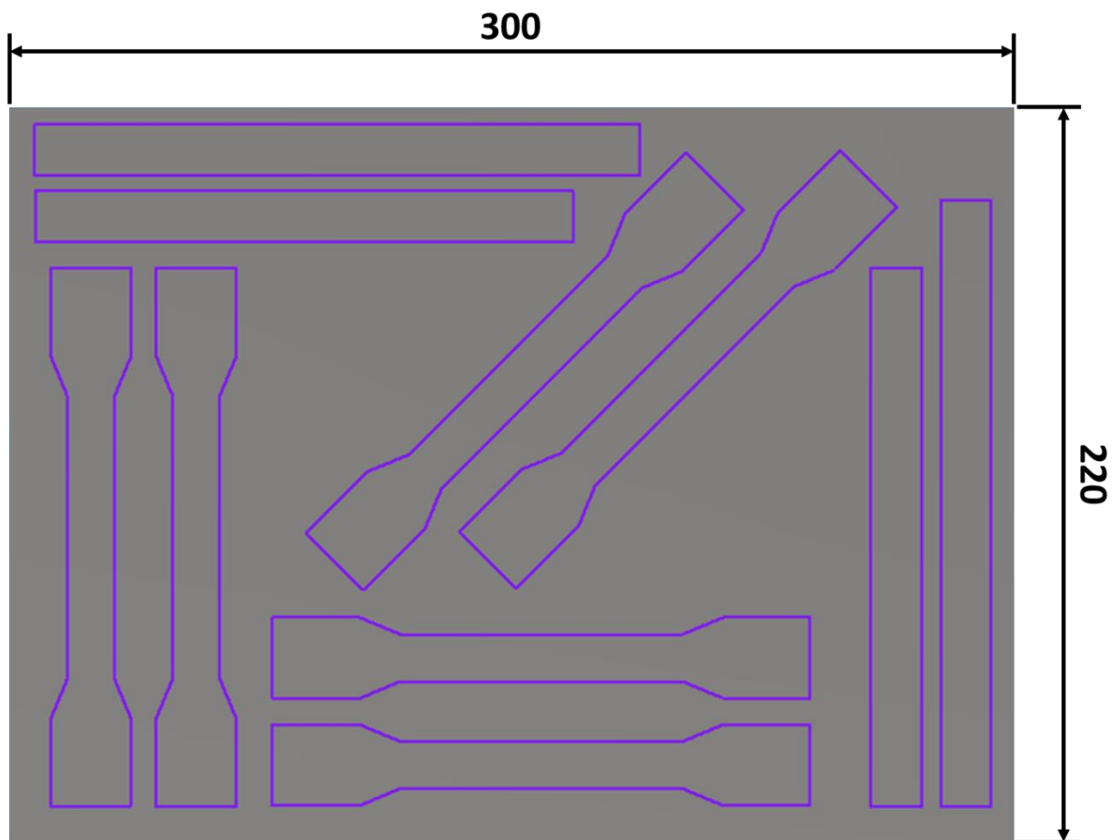
Kuva 14. Kokeellisessa osuudessa käytetty FLIR A35 -lämpökamera (Flir 2020).

Tulostetulle koekappaleelle suoritettavat materiaalitestaukset suoritettiin akkreditoitujen testauslaboratorioiden Dekra Industrial Oy:n (NDT:n osalta) ja Metlab Oy:n (DT:n osalta) toimesta. Materiaalitestauksissa käytetty välineistö on esitetty liitteessä I tunkeumanestetarkastuksen osalta, liitteessä II radiografisen tarkastuksen osalta, liitteessä III rikkovan aineenkoetuksen osalta sekä liitteessä IV makro- ja mikrorakennetarkastelun osalta.

4.3 Käytetyt menetelmät

Tässä kappaleessa on kuvattu kokeellisessa osuudessa käytetyt menetelmät. Kokeellisen osuuden tavoitteena oli ensinnäkin todentaa ohjelmisto- ja valmistusketjun toimivuus CAD-mallista valmiiseen kappaleeseen ja toisaalta tuottaa mahdollisimman kattavasti tietoa tulostettujen kappaleiden laadullisista ominaisuuksista. Ensimmäisten koetulostusten ja parametritestausten jälkeen tulostettiin varsinainen koekappale, jolle suoritettiin rikkomatonta sekä rikkovaa aineenkoetusta.

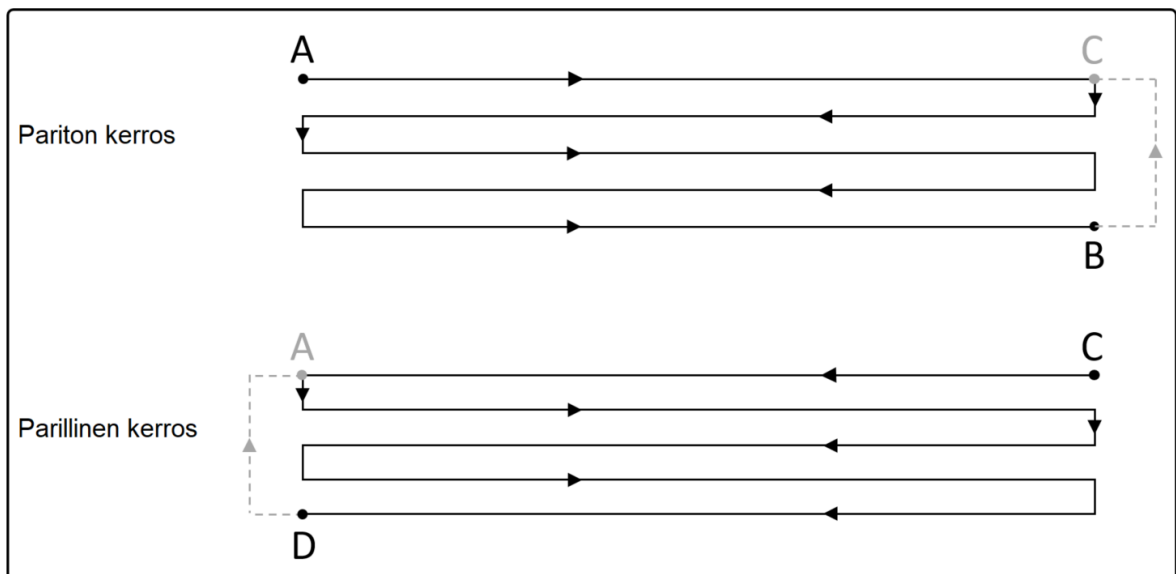
Koekappaleen geometria suunniteltiin niin, että sille pystyttäisiin tekemään mahdollisimman kattavasti materiaalitestausta, kuitenkin mahdollisimman pienellä materiaalinkäytöllä. Suoritettavissa testeissä, niiden lukumäärässä sekä testikappaleiden koossa tehtiin kompromisseja parhaimman ja laajan mittausdatan ja järkevän materiaalinkäytön välillä. Esimerkkinä tästä on, että suurimman saatavilla olevan kokoluokan vetokoesauvan olisi antanut parhaimman ja luotettavimman tuloksen kattaen eniten materiaalia testauspinnalle, mutta tulostettavan koekappaleen koko olisi kasvanut niin isoksi, ettei sitä ollut järkevää tulostaa. Tämän myötä päädyttiin hieman pienempiin, poikkileikkaukseltaan pyöreisiin koesauvoihin. Alustava suunnitelma koekappaleen koosta, rikkovan aineenkoetuksen testauslaajuudesta sekä testikappaleiden sijoittelusta on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Suunnitelma rikkovan aineenkoetuksen testikappaleiden sijoittelusta. Kuvassa näkyvissä myös koekappaleen CAD-mallin päämitat millimetreinä.

Kuvasta 15 nähdään, että koekappale mallinnettiin levynä, jonka leveys oli 300 mm ja korkeus 220 mm. Alustava testauslaajuus sisälsi yhteensä kuusi vetokoesauvaa pitkittäin, poikittain sekä 45° kulmassa, pitkittäisen sekä poikittaisen taivutuskokeen ja pitkittäisen sekä poikittaisen iskukoesarjan.

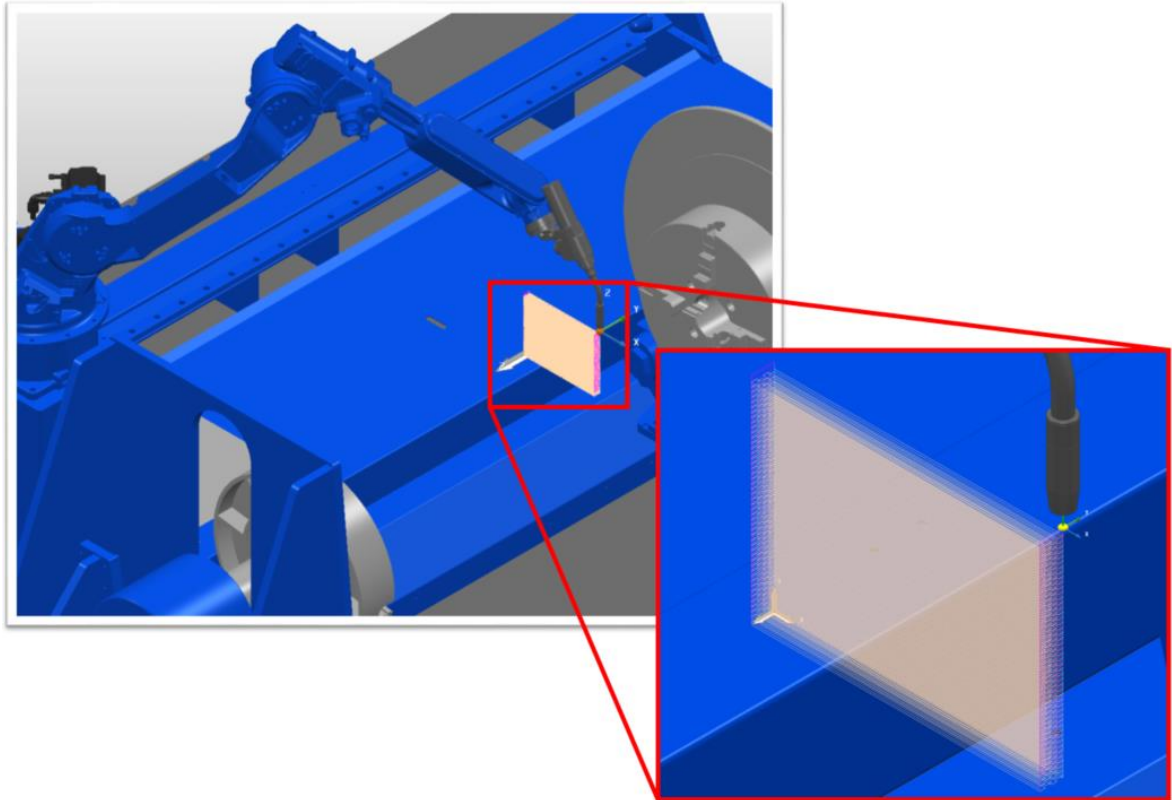
Myös tulostuksen liikeratastrategiana käytettiin strategiaa, jota ei välttämättä saman geometrian tuotantokappaleessa käytettäisi. Syynä tähän oli, että valitulla liikeratastrategialla saatiin materiaalitesteillä testattua tulostussuunnan mukaisen ja tulostussuuntaa vastaan olevan lujuuden ero. Voino, poikittainen tai suunnan suhteen vaihteleva liikerata olisi mahdollisesti tuonut tasaisimman materiaalin täytön, mutta se olisi samalla poistanut mahdolliset erot eri testaussuuntien väliltä. Koekappaleen tulostuksessa käytetty liikeratastrategia on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Koekappaleen tulostuksessa käytetty liikeratastrategia.

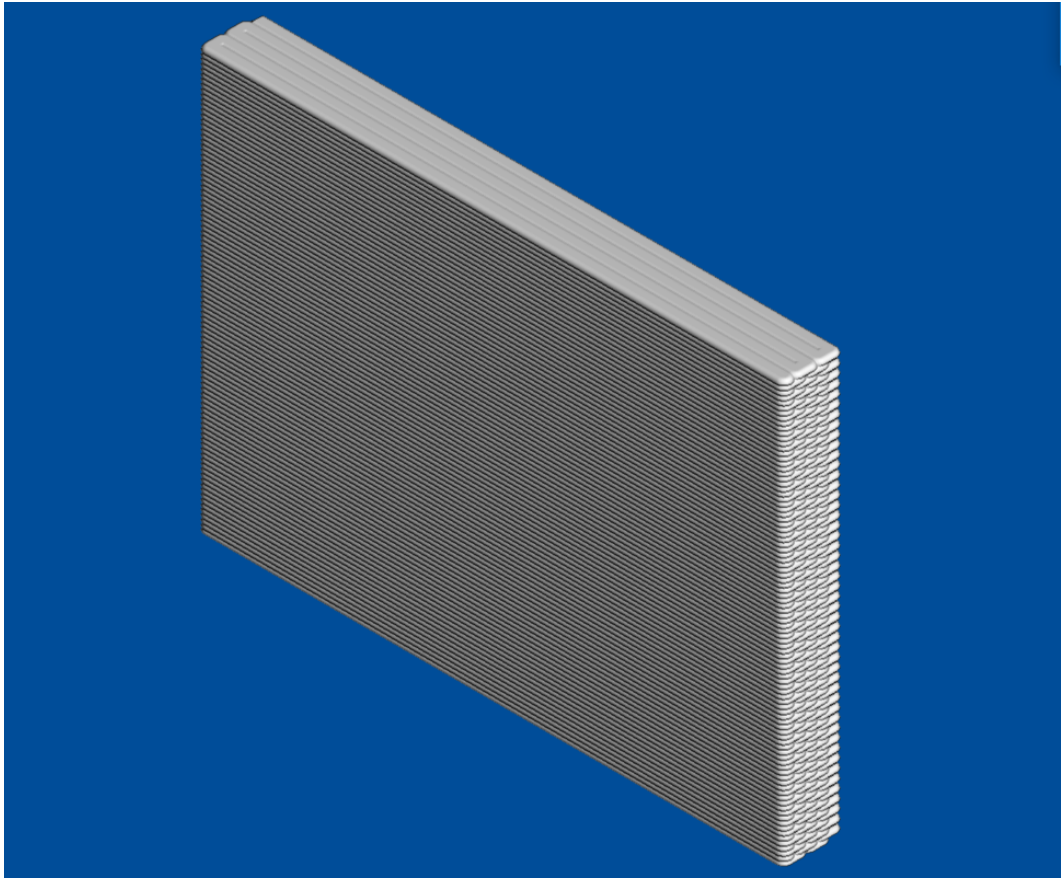
Yksittäisen kerroksen tulostus alkoi kuvan 16 mukaisesti pisteestä A, josta tulostus eteni katkeamatta viiden rinnakkaisen hitsipalon verran pisteeseen B. Pisteessä B tulostus loppui ja hitsauspoltin siirtyi pisteeseen C odottamaan seuraavan kerroksen tulostuksen aloitusta. Seuraavan kerroksen tulostus alkoi pisteestä C ja eteni edellisen kerroksen tavoin, mutta peilikuvana, pisteeseen D. Pisteessä D tulostus loppui ja hitsauspoltin siirtyi takaisin pisteeseen A odottamaan seuraavan kerroksen tulostuksen aloitusta. Näin ollen tulostuksessa yksittäisen kerroksen aloituspiste vaihteli vuoron perään pisteiden A ja C välillä. Tällä

pyrittiin varmistamaan materiaalin tasaisempi täyttö ja mahdollisten täyttövirheiden tasaaminen. Kuvassa 17 on esitetty koekappaleen liikeradat asemoituna valmistussijaintiin PowerMill-ohjelmiston virtuaalisolussa.



Kuva 17. Koekappale paikoitettuna robottiasemaan PowerMill-ohjelmistossa, hitsauspolttimen liikeradat näkyvissä suurennoksessa. Jokainen yksittäinen keltainen viiva vastaa yhtä hitsauspalkkoa.

Kuvasta 17 nähdään, miten koekappale sijoittui robottisoluuun sekä missä käsivarsirobotin asennossa tulostus tapahtui. Kuvan 17 perusteella tulostettava kappale näyttäisi olevan tyhjän päällä, mutta todellisuudessa pyörityspöydässä oli kiinni teline, johon tulostusalustana toiminut teräslevy kiinnitettiin ja tätä telinettä ei virtuaalisoluun ollut mallinnettu. Liikeratojen luonnin jälkeen koekappaleelle tehtiin PowerMill-ohjelmalla lisäävän valmistuksen simulointi, joka hahmottaa annettujen valmistusparametrien ja hitsipalon muodon perusteella loppukappaleen ulkonäön ja miten lisäävän valmistuksen täyttö etenee. Kuvassa 18 on esitetty koekappaleen simuloitu täyttö.



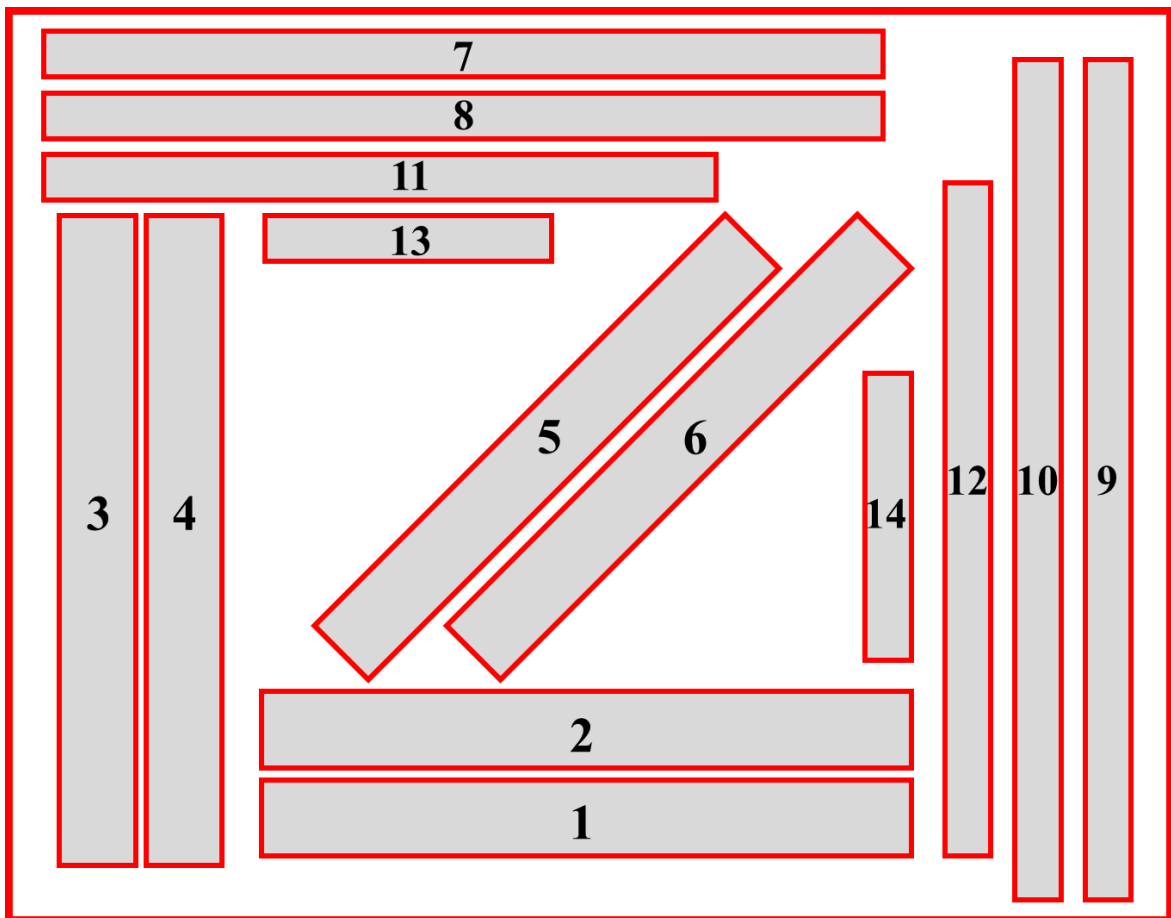
Kuva 18 Koekappaleelle tehty täytön simulointi PowerMill-ohjelmistolla.

Kuten kuvasta 18 voidaan nähdä, jo kappaleen simulointivaihe antaa osviittaa, että pinnanlaatu WAAM-prosessilla valmistetussa kappaleessa ei ole tarkka johtuen yksittäisistä hitsipaloista. Täytön simulointi on kuitenkin hyvä tehdä kappaleen CAM-ohjelmoinnissa, sillä sen avulla saatetaan huomata mahdollinen vajaa tai epätasainen täyttö jo ennen valmistusprosessin aloittamista. Taulukossa 3 on esitetty tulostusprosessin simuloinnissa sekä konkreettisesti valmistuksessa käytetyt parametrit.

Taulukko 3. Koekappaleen tulostusprosessissa käytetyt parametrit.

Parametri	Parametrin arvo
Kerrospaksuus	2,3 mm
Rinnakkaissiirto	6,0 mm
Kerrostien lukumäärä	95
Tauko kerrosten välillä	10 s
Tulostusnopeus	10 mm/s
Langansyötön nopeus	9,5-12,5 m/min
Hitsausjännite	20 V
Hitsausvirta	150 A

Koekappaleen tulostus suoritettiin taulukon 3 mukaisilla parametreilla. CMT-hitsausprosessi on dynaaminen prosessi, missä virtalähde pyrkii pitämään kaarityypin oikeanlaisena säätämällä aktiivisesti muun muassa langansyöttöä ja hitsausjännitettä. Tästä johtuen langansyötön nopeudelle on annettu taulukossa 3 väli 9,5-12,5 metriä minuutissa, sillä toteutunut langansyötön nopeus vaihteli tuolla välillä. Hitsausjännitteen- ja virran suhteen muutokset olivat pieniä, jonka vuoksi mainitut arvot kuvaavat parametreja riittävällä tarkkuudella ilman vaihteluväliä. Koekappaleen tulostuksen jälkeen lopullisten mittojen selvittäessä, myös alustavaa testausohjelmaa rikkovan aineenkoetuksen suhteen tarkennettiin. Toteutunut testauslaajuus ja testikappaleiden sijoittuminen tulostetulle levyille on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Lopullinen sijoittelu rikkovan aineenkoetuksen testikappaleista.

Kuvassa 19 näkyy, miten rikkovan aineenkoetuksen testikappaleet lopulta sijoittui tulostetulle levyille. Testikappaleissa näkyvät yksilöintinumero, joista selviää kyseiselle koekappaleelle suoritettu testi sekä myöhemmin tuloksissa kyseisen koekappaleen tulos yksilön tarkkuudella. Yksittäisille koekappaleille tehtävät testit sekä testausuunta on listattu taulukossa 4.

Taulukko 4. Rikkovan aineenkoetuksen testausohjelma.

Testikappaleen tunnus	Suoritettava testi	Testausuunta
1	Vetokoe	pitkittäinen
2	Vetokoe	pitkittäinen
3	Vetokoe	poikittainen
4	Vetokoe	poikittainen
5	Vetokoe	45° kulma

Taulukko 4 jatkuu. Rikkovan aineenkoetuksen testausohjelma.

6	Vetokoe	45° kulma
7	Taivutuskoe	pitkittäinen
8	Taivutuskoe	pitkittäinen
9	Taivutuskoe	poikittainen
10	Taivutuskoe	poikittainen
11	Iskukoe (3:n sarja)	poikittainen
12	Iskukoe (3:n sarja)	pitkittäinen
13	Korroosiokoe	pitkittäinen
14	Korroosiokoe	poikittainen

Kuten taulukosta 4 huomataan, rikkovaa aineenkoetusta tehtiin 14 yksilöidylle koekappaleelle, joista kaksi koekappaletta piti sisällään kolmen iskukokeen sarjan. Vetokokeita suoritettiin kolmeen suuntaan yhteensä 6 kappaletta, taivutuskokeita kahteen suuntaan yhteensä 4 kappaletta, iskukoesarjoja kahteen suuntaan yhteensä kaksi kappaletta ja korroosiokokeita kahteen suuntaan yhteensä kaksi kappaletta. Taulukossa 5 on esitetty koekappaleelle tehtyjen rikkomattomien sekä rikkovien aineenkoetusten testausstandardit ja -menetelmät.

Taulukko 5. Koekappaleelle suoritettavat materiaalitestit ja testausmenetelmät.

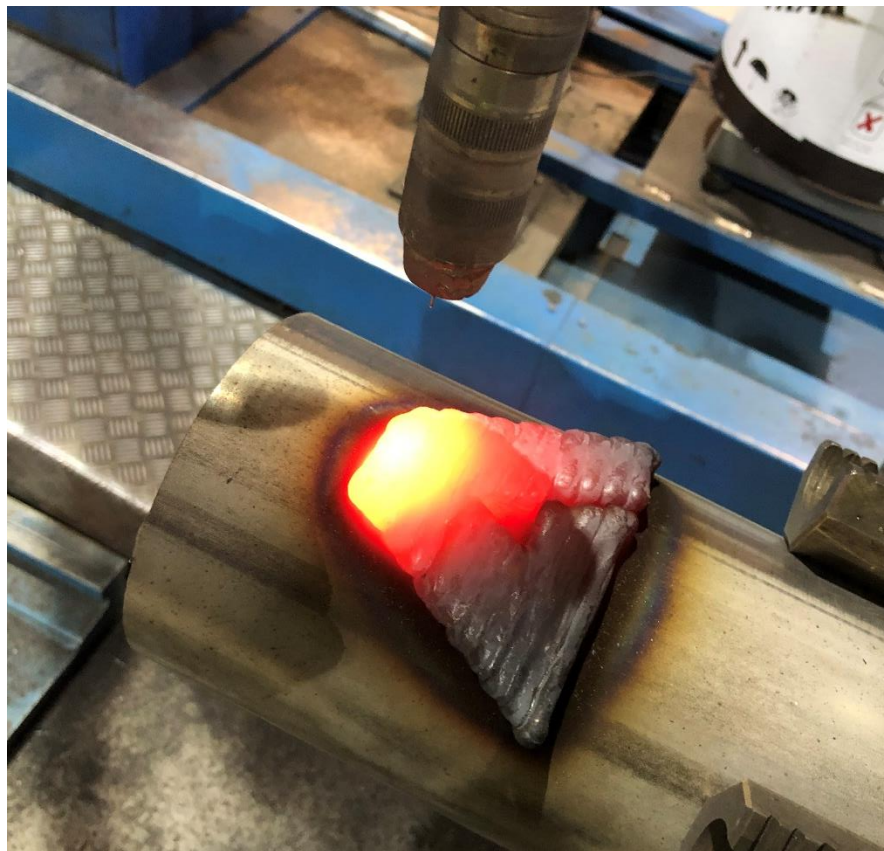
Suoritettava testi	Testausmenetelmä
Tunkeumanestetarkastus (PT)	SFS-EN ISO 3452-1
Radiografinen tarkastus (RT)	SFS-EN ISO 17636-1
Vetokoe	SFS-EN ISO 6892-1 A
Taivutuskoe	SFS-EN ISO 7438
Iskukoe	SFS-EN ISO 148-1 Charpy-V
Korroosiokoe	SFS-EN ISO 3651-2 metodi A
Makro- ja mikrorakennetarkastelu	SFS-EN ISO 17639
Raekoon määrittäminen	ISO 643

5 TULOKSET JA NIIDEN ANALYYSI

Tässä kappaleessa esitetään kokeellisen osuuden tulokset sekä tulosten analyysi. Kokeellinen osuus sisälsi kuvan 10 mukaan neljä pääkategoriaa: valmistusketjun toimivuuden todentamisen, lämpökamerakuvaukset, rikkomattoman aineenkoetuksen sekä rikkovan aineenkoetuksen.

5.1 Valmistusketjun todentaminen

Valmistusketjun todentaminen tapahtui siten, että ennen varsinaisen koekappaleen tulostamista suoritettiin erinäisiä demoja sekä testitulostuksia prosessin testaamiseksi ja oikeiden parametrien löytämiseksi. Kuvassa 20 on ensimmäinen prosessin toimivuuden todentamiseksi suoritettu testitulostus, jossa sylinterimäiselle pinnalle on lisätty ennalta määritetyn mallin mukaisesti materiaalia.



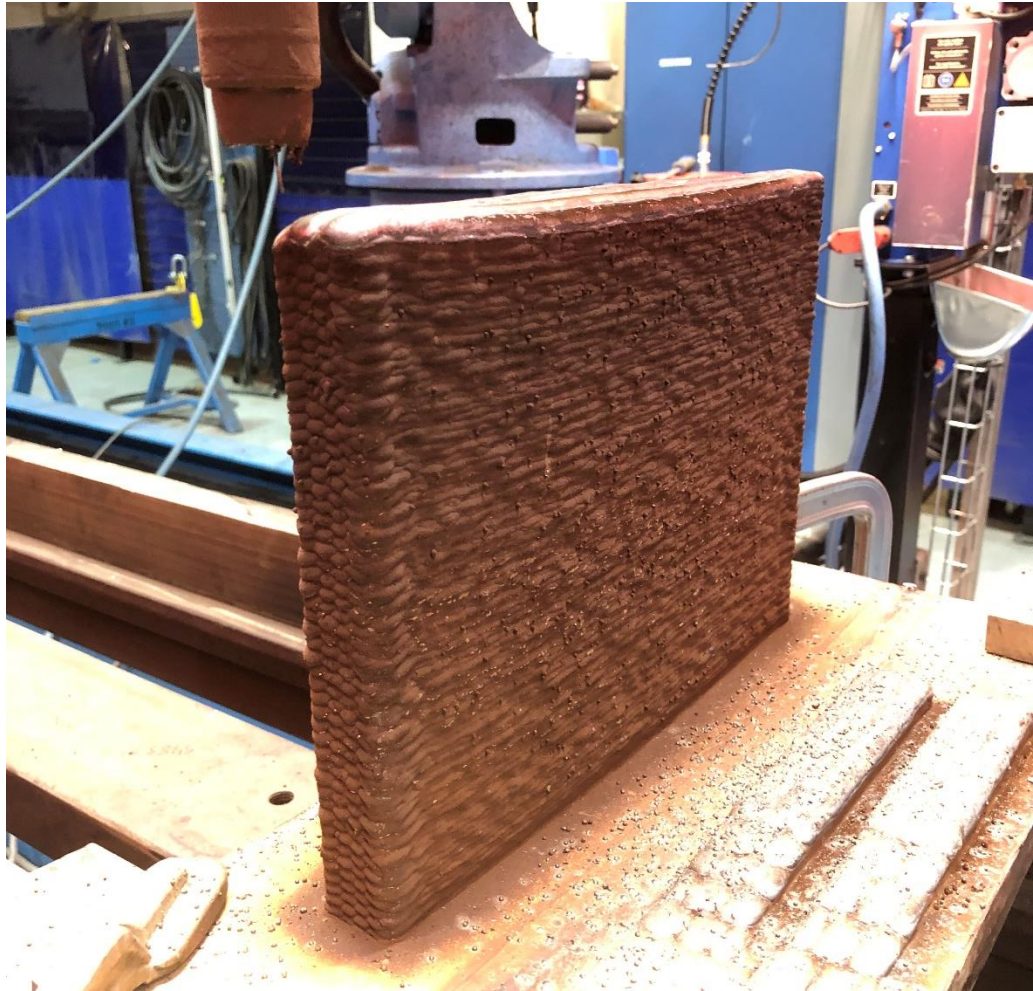
Kuva 20. Ensimmäinen tulostettu testikappale, jossa sylinterimäisen kappaleen pinnalle on lisätty materiaalia.

Kuvan 20 koekappale toimi ensimmäisenä testitulostuksena, joka kulki koko valmistusketjun läpi CAD-mallinnuksesta CAM-ohjelmoinnin kautta ohjelman viemiseen robotille ja lopuksi kappaleen valmistamiseen. Tämä sylinterimäiselle kappaleelle suoritettu pinnoituksen omainen tulostus oli kattava testi prosessin toimivuuden kannalta, sillä siinä yhdistyi robotin sekä pyörityspöydän yhtäaikaiset liikkeet, robotin ja PowerMill-virtuaalisolun välisen kalibrointitarkkuuden todentaminen sekä materiaalin kerrostamisen testaus. Seuraava askel oli valmistella koekappaleen tulostusta etsimällä koekappaleen tulostukseen oikeat parametrit. Tämä valmisteluvaihe on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Ennen varsinaisen koekappaleen tulostusta suoritettut tulostukset oikeiden parametrien löytämiseen.

Kuten kuvasta 21 nähdään, parametritestaus koekappaletta varten suoritettiin kahdella porrasmallisella kappaleella. Näissä kappaleissa liikeratastrategia oli sama kuin varsinaisessa koekappaleessa ja testitulostuksien aikana säädettiin hitsausparametreja visuaalisen arvioinnin perusteella. Hitsausparametrien ollessa halutut, arvioitiin hitsauspalkojen sivuttaissiirtymän oikeellisuus sekä mitattiin toteutunut kerrospaksuus, jotta koekappaleen CAM-ohjelmointi voitaisiin suorittaa oikeilla parametreilla. Valmis koekappale on esitetty kuvassa 22.

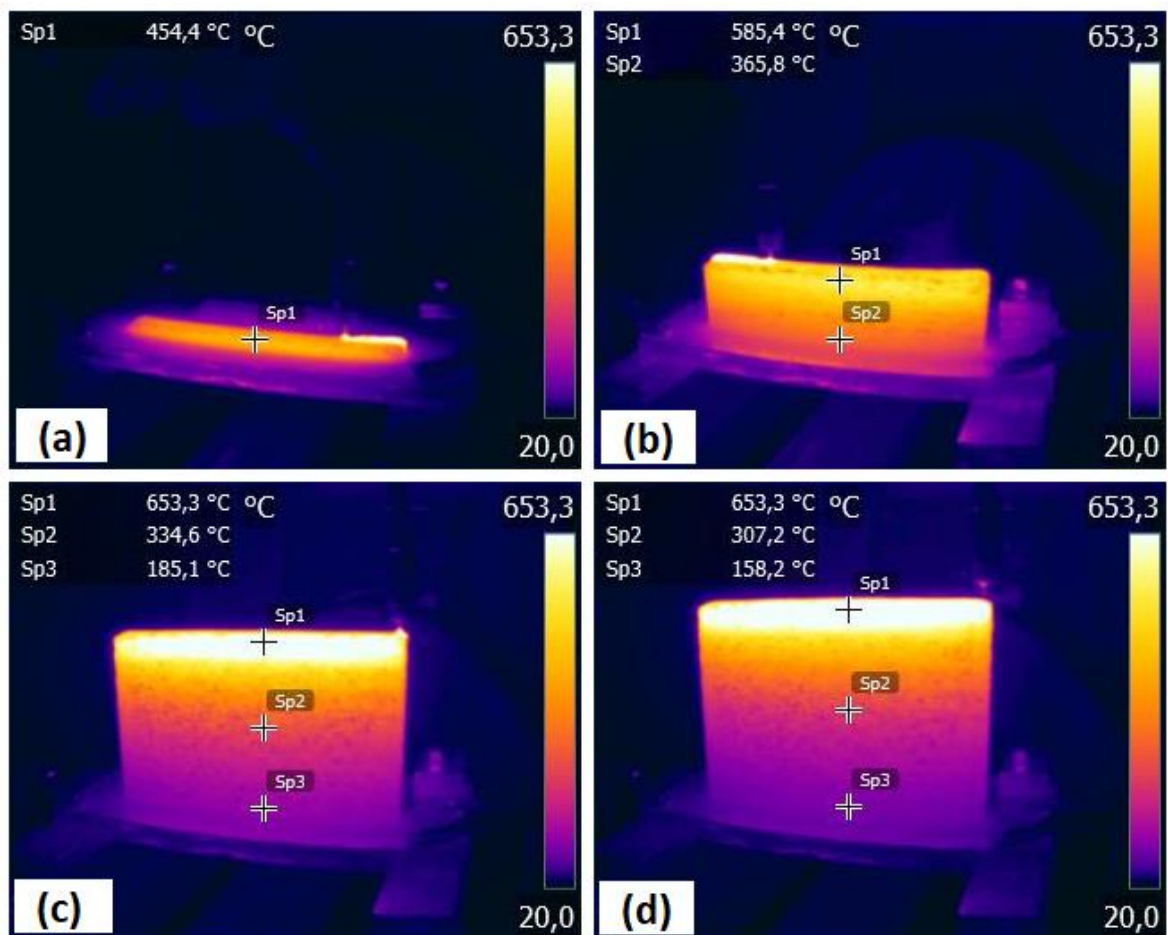


Kuva 22. Kokeellisen osuuden koekappale tulostusprosessin jälkeen.

Kuvasta 22 huomataan WAAM-prosessille tyypillinen huono pinnanlaatu, missä yksittäiset hitsipalot erottuvat selkeästi. Kappaleen päägeometria pysyi kuitenkin haluttuna tulostusprosessin loppuun asti ilman huomattavia muodonmuutoksia, valumia tai muita tulostuksen aikana mahdollisesti tapahtuvia virheitä. Ensimmäisen isomman kokoluokan tulostuksen onnistuessa suunnitellusti, tuki tämä aikaisempaa positiivista tulosta valmistusmenetelmän ja valmistusketjun toimivuudesta.

5.2 Lämpökamerakuvaus

Koekappaleen valmistuksen aikana kappaleen työlämpötilaa ja jäähtymistä seurattiin kontaktilämpömittarilla sekä infrapunatoimisella lämpökameralla. Lämpötilanseuranta ei ollut valmistusprosessissa ohjaava tekijä, vaan se suoritettiin puhtaasti datankeräyksen vuoksi helpottamaan menetelmän jatkokehitystä. Valmistuksen aikana kuvattua lämpökamerakuvaa valmistuksen eri vaiheista on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Koekappaleen valmistuksen aikana kuvatut infrapunakuvat. a) Koekappale kolmannen kerroksen jälkeen. b) ja c) Keskenkäynnin koekappale. d) Valmis koekappale

316LSi lisäainelangalle suositeltu palkojenvälinen lämpötila on 150 °C (SFS-EN 1011-3, s. 13). Kuten kuvasta 23 huomataan, oli työlämpötila jo muutaman kerroksen jälkeen suosituksia paljon korkeampi. Vaikka valmistusohjelmaan oli ohjelmoitu 10 sekunnin tauko jokaisen kerroksen välille jäähtymistä varten, ei se ollut tarpeeksi pitkä, jotta työlämpötila olisi pysynyt suosituksissa. Noin 5 kerroksen välein valmistusohjelma laitettiin tauolle, jotta kappaletta voitiin tarkastella, mitata sekä jäähdyttää manuaalisesti paineilmalla.

Kaavalla 1 ja taulukossa 3 listatuilla parametreilla saatiin laskettua hitsauksen lämmöntuonniksi 0,24 kJ/mm. Tämä on huomattavasti alle suositellun enimmäislämmöntuonnin 1,5 kJ/mm. Vaikka lämmöntuonti itsessään oli matala, lämpöä tuotiin vähälle aikaa suhteellisen pienelle alueelle, jonka vuoksi työlämpötila nousi yli suositusten.

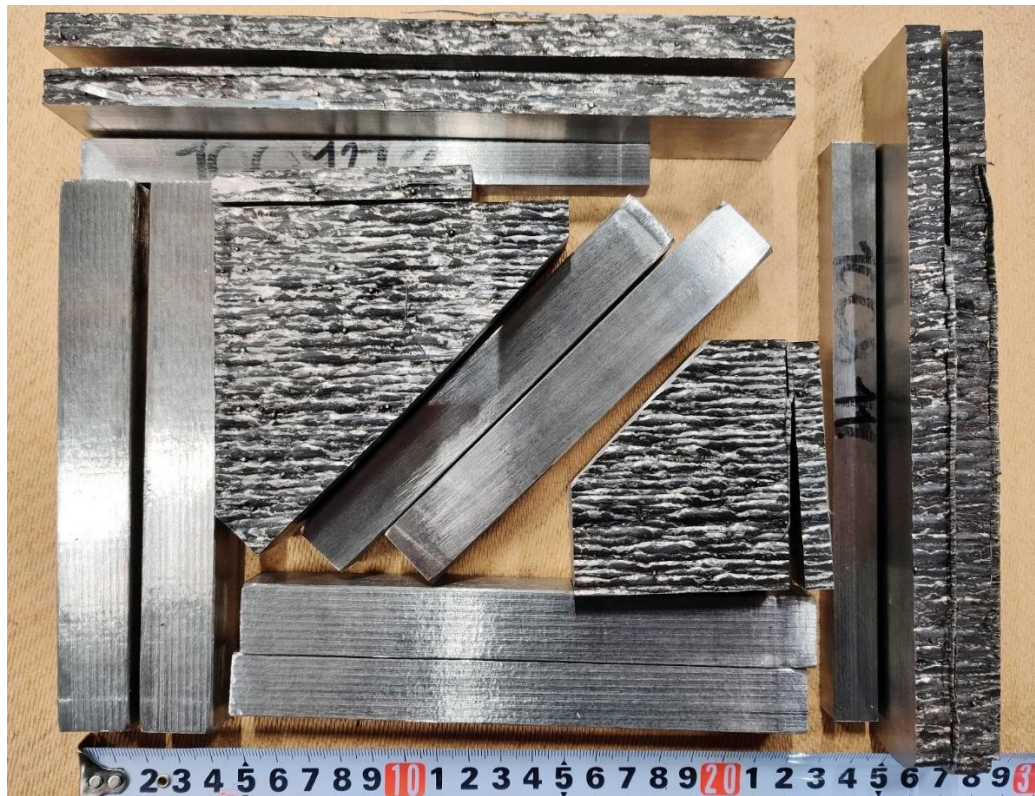
Lämpökamerakuvaus oli prosessin kokonaiskuvan kannalta tärkeä, sillä kuvauksen myötä huomattiin liian korkealle kohonnut lämpötila ja tämä voidaan ottaa valmistusmenetelmän jatkokehityksessä ja kappaleiden CAM-ohjelmoinnissa huomioon. Nopeasti yli suositusten kohoava työlämpötila korostuu etenkin tilanteissa, jossa pienelle alueelle tuodaan paljon materiaalia ilman taukoja. Lämpötilanhallintaa helpottaa poikkipinta-alaltaan suuremmat kappaleet ja useamman kappaleen valmistaminen samaan aikaan, jolloin yksittäiselle valmistettavalle kappaleelle tulee luonnostaan enemmän jäähtymisaikaa.

5.3 Rikkomaton aineenkoetus

Koekappaleen onnistuneen tulostuksen jälkeen kappaleelle suoritettiin Dekra Industrial Oy:n toimesta rikkomatonta aineenkoetusta. Suoritettavina testeinä oli tunkeumanestetarkastus sekä radiografinen tarkastus 100% koekappaleen laajuudelle. Kummassakaan testissä ei ilmennyt halkeamia, kappaleen sisäisiä huokosia tai muutenkaan hylkäykseen johtavaa virhettä. Tarkemmat testausselostetut tunkeumanestetarkastuksesta löytyy liitteestä I ja radiografisesta tarkastuksesta liitteestä II. Kappaleelle suoritettavat rikkomattomat aineenkoetukset olivat tärkeä välivaihe, sillä jos niissä olisi ilmennyt merkittäviä virheitä esimerkiksi halkeamien osalta, ei kyseistä koekappaletta olisi lähetetty rikkovaan aineenkoetukseen.

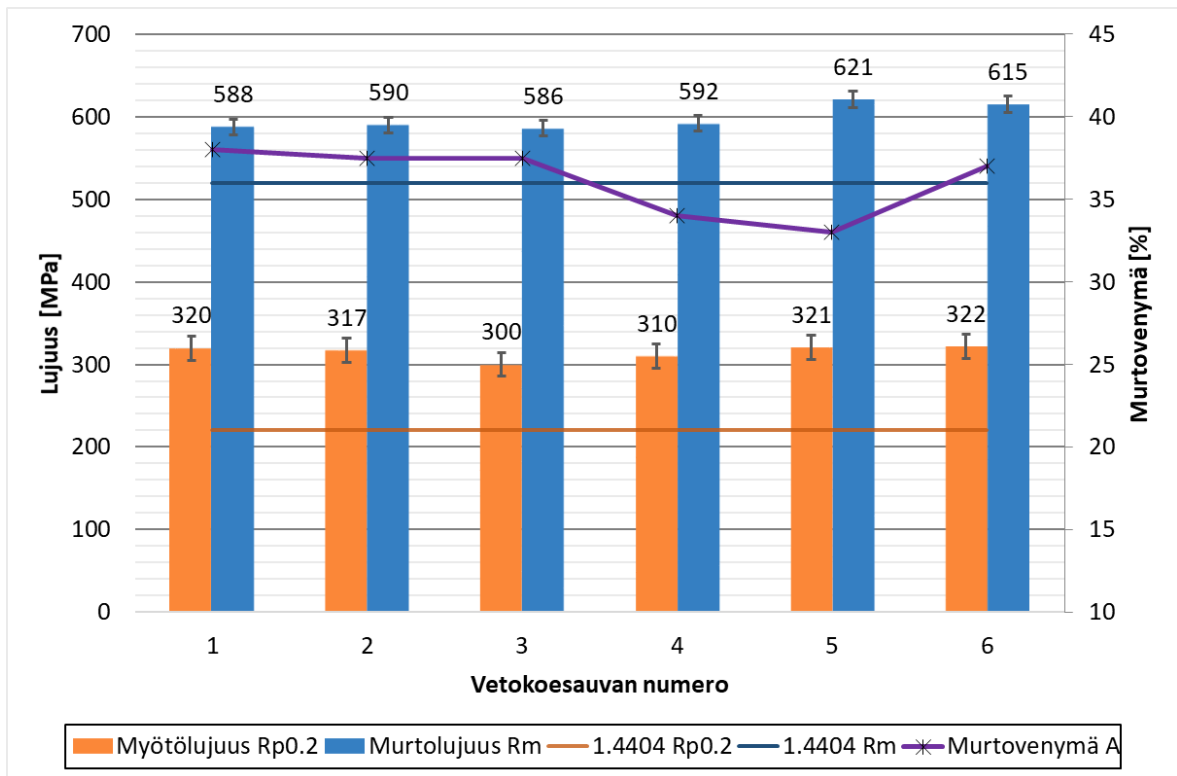
5.4 Rikkova aineenkoetus

Tässä kappaleessa käsitellään koekappaleelle tehtyjen rikkovan aineenkoetuksen testien tuloksia. Suoritettavat testit olivat vetokoe, iskukoe, taivutuskoe, korroosiokoe, makro- ja mikrorakennetarkastelu sekä raekoon määrittäminen. Kuvassa 24 on esitetty toteutuneet rikkovan aineenkoetuksen testikappaleiden irrotukset koekappaleesta.



Kuva 24. Koekappaleesta irroitettut testikappaleet rikkovaa aineenkoetusta varten.

Kuten kuvasta 24 huomataan, tulostettu koekappale saatiin käytettyä tehokkaasti hyödyksi, eikä keskustan kahta kolmion mallista palaa lukuun ottamatta isoja hukkapaloja jäänyt. Kuvassa 25 on esitetty vetokoesauvojen tulokset myötö- ja murtolujuuden sekä murtovenymän suhteen.



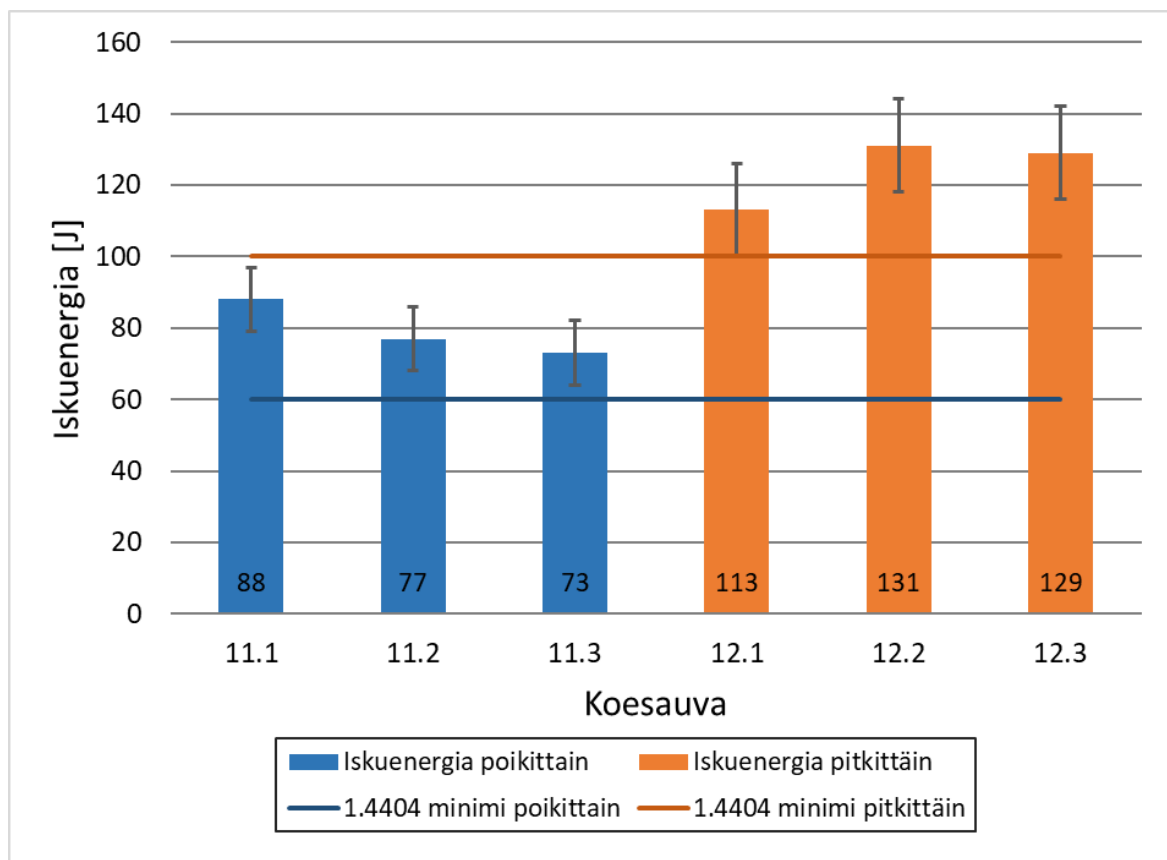
Kuva 25. Vetokokeiden tulokset.

Kuten kuvasta 25 nähdään, olivat vetokokeiden tulokset johdonmukaiset ja lähellä toisiaan testaussuunnasta riippumatta. Poikittaiseen suuntaan testattujen koekappaleiden 3 ja 4 lujuusarvot etenkin myötölujuuden suhteen olivat odotetusti hieman pitkittäisiä (1 ja 2) ja 45° kulmassa testattuja koekappaleita (5 ja 6) matalammat, mutta ero oli suhteellisen pieni ja mahtuu mittausepävarmuuden sisään. Poikittaiseen suuntaan testattujen koekappaleiden heikommat lujuusominaisuudet ovat tyypillinen ominaisuus lähes kaikille lisäävän valmistuksen prosesseille, sillä usean kerroksen yli testatuissa kappaleissa pieniä liitos- tai muita virheitä mahtuu testausalueelle enemmän verrattuna tulostussuunnan mukaisesti testattuihin kappaleisiin. Murtolujuuden suhteen poikittaiset koesauvat eivät olleet pitkittäisiä heikompia, vaan tulokset olivat täysin toistensa kaltaisia. Hieman yllättäen 45° kulmassa testatut koesauvat olivat murtolujuuden osalta parhaimpia, tosin tässäkin ero ei ollut iso muihin suuntiin verrattuna ja mittausepävarmuus huomioiden tulokset samankaltaisia kaikkien koekappaleiden välillä.

Kuvaan 25 on myös merkattuna myötölujuudelle sekä murtolujuudelle standardin SFS-EN 10028-7 mukaisen 1.4404 levy materiaalin minimiarvot, joihin tulostettu materiaali ylsi kaikkien koesauvojen osalta. Materiaali 1.4404 vastaa kemialliselta koostumukseltaan

tulostetun koekappaleen lisäainelankaa 316LSi, jonka vuoksi se toimii vertailukohtana lujuusarvoille. 316LSi lisäainelangan viitearvo myötölujuuden suhteen on 452 MPa ja murtolujuuden suhteen 580 MPa (Lincoln Electric 2020). Näistä arvoista tulostetun koekappaleen myötölujuudet jäivät selkeästi viitearvojen alapuolelle Koska kyseessä on ennemminkin perusaineeseen, kuin yksittäiseen hitsipalkoon rinnastettavissa oleva materiaali, jonka vuoksi saatuja lujuusarvoja ei ole mielekäästä verrata lisäainelangan valmistajan viitearvoihin. Tätä vertailukohdan valintaa puoltaa myös tulostetun materiaalin ja hitsipalon lämpötilaympäristö, tulostuksessa työlämpötila on huomattavasti normaalia hitsausprosessia korkeampi mikä vaikuttaa lujuusominaisuuksien muodostumiseen.

Myös iskuenergian suhteen vertailukohdaksi otettiin standardin SFS-EN 10028-7 ilmoittamat arvot 1.4404 materiaalille. Iskuenergiaa tutkittiin yksi kolme iskukokeen sarja pitkittäiseen sekä poikittaiseen suuntaan. Iskukokeiden tulokset on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Iskukokeiden tulokset.

Kuvasta 26 huomataan, että koesarjan 11 kaikki kolme koesauvaa olivat iskuenergian suhteen huomattavasti pienemmät verrattuna koesarjan 12 kolmeen koesauvaan. Tuloksista nähdään, että poikittainen suunta on iskulujuuden suhteen pitkittäistä suuntaa heikempi. Syynä tähän on sama, kuin vetokokeissa todettu alhaisempi lujuus poikittaiseen suuntaan. Poikittaiseen suuntaan tulee pitkittäiseen verrattuna enemmän palkojen välistä rajapintaa, mikä altistaa herkemmin pienille hitsaus- tai liitosvirheille ja tämän myötä alhaisemmalle lujuudelle. Testaussuunnalla on eroa myös standardin SFS-EN 10028-7 mukaisessa 1.4404 levy materiaalissa. Standardin minimiarvot poikittaiselle ja pitkittäiselle iskuenergialle on esitetty kuvassa 26 viivoilla ja huomataan, että tulostettu koekappale ylitti nämä minimiarvot molemmissa testaussuunnissa.

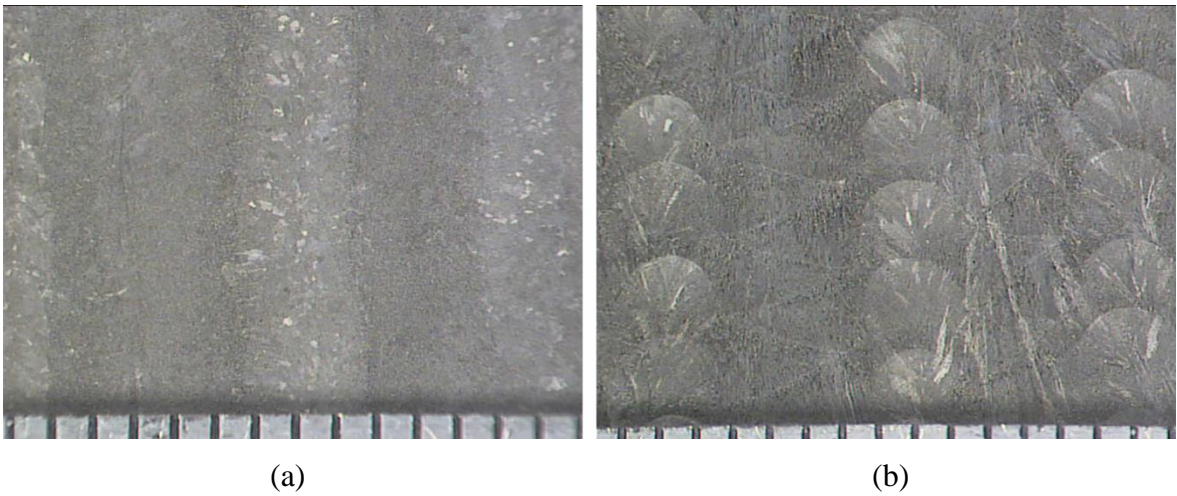
Koekappaleelle tehtiin myös makro- ja mikrorakennetarkastelu sekä raekoon määrittäminen. Näiden testien tarkoituksena oli tukea oletuksia esimerkiksi lämmötuonnin vaikutuksesta kasvaneeseen raekokoon tai huonontuneisiin lujuus- tai korroosio-ominaisuuksiin. Raekoon määrittäminen molempiin testaussuuntiin oli standardin SFS-EN ISO 643 mukaisen luokittelun luokka G11. Tämä vastaa hyvin tyypillistä hitsatun austeniittisen ruostumattoman teräksen raekokoa, mistä voidaan päätellä, että normaalista hitsausprosessista korkeampi työlämpötila ei vaikuttanut raekokoon kasvattavasti. Kuvissa 27 ja 28 on esitetty makrorakennekuvat kahdella eri suurennoksella.



(a)

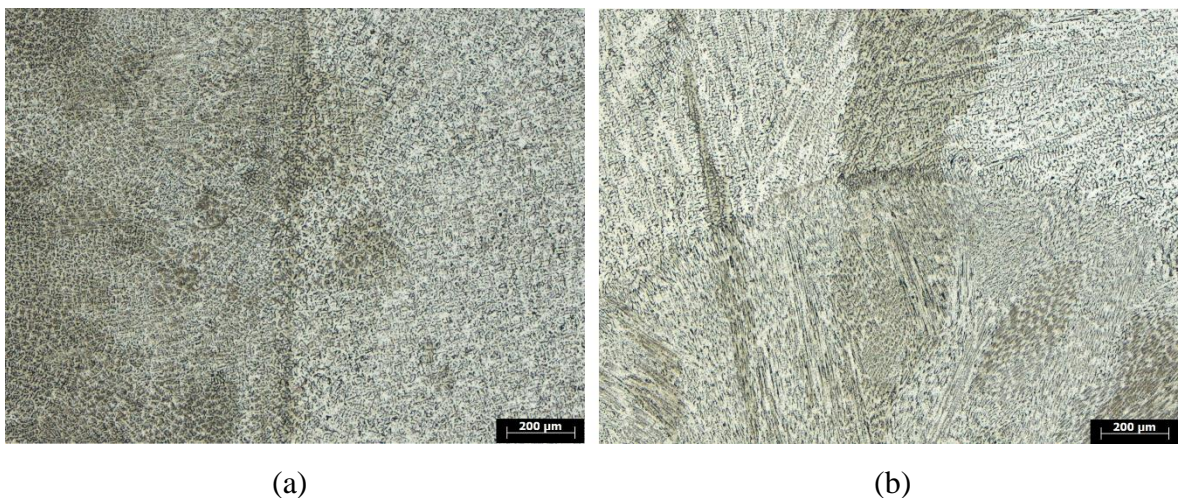
(b)

Kuva 27. Yleismakrokuva oksaalihapposyövytyksen jälkeen. a) Pitkittäisestä näytteestä. b) Poikittaisesta näytteestä.



Kuva 28. Lähimakro koekappaleen keskeltä. a) Pitkittäisestä näytteestä. b) Poikittaisesta näytteestä.

Sekä kuvista 27 että 28 huomataan, miten kerrostamalla muodostetussa rakenteessa tulostussuunta vaikuttaa kappaleen mikrorakenteeseen. Kuvan 27a pitkittäiseen suuntaan kuvatussa näytteessä erottuu selkeästi pituussuuntaiset yksittäiset hitsipalot, kun taas kuvan 27b poikittaisen suunnan kuvassa näkyvissä on hitsipalkojen poikkileikkaus. Sama ilmiö erottuu vielä hyvin hieman suuremmalla suurennoksella otetuissa kuvissa 28a ja 28b, joissa 28a edustaa pituussuuntaista tarkastelupintaa ja 28b poikittaista suuntaa. Makrokuvien lisäksi tutkimukseen kuului myös mikrorakenneanalyysi. Mikrorakennekuvat pitkittäiseen sekä poikittaiseen suuntaan on kuvattu kuvissa 29a ja 29b.



Kuva 29. Mikrorakennekuva kappaleen keskeltä. a) Pitkittäin. b) Poikittain.

Kuvia 29a ja 29b tarkastellessa tulostussuunta ei enää erotu samalla tavalla kuin makrokuvissa 27 ja 28. Kuvien 29 suurennosasteella mikrorakenteessa on silti näkyvissä pientä eroa tarkastelusuunnasta riippuen. Molemmissa kuvissa mikrorakenne on hyvin tyypillinen austeniittiselle ruostumattomalle teräkselle (Nieminen 2020).

Edellisten lisäksi koekappaleelle suoritettiin taivutus- ja korroosiokokeet poikittaiseen sekä pitkittäiseen suuntaan. Molemmat näistä kokeista arvostellaan hyväksytyt/hylätyt periaatteella, eikä niistä tule numeerisia tuloksia. Molemmat suoritetuista testeistä ja molempien koekappaleiden osalta läpäisivät testit ilman hylkäykseen johtaneita poikkeamia. Etenkin korroosiokokeen osalta hyväksytyt tulokset olivat positiivisia, sillä koekappaleen valmistuksessa työlämpötila oli selkeästi suosituksia korkeampi ja juuri liian korkea palkojen välinen lämpötila tai liian hidas jäähtyminen aiheuttaa materiaalin köyhtymistä ja huonontaa sen myötä korroosionkestoa. 316L materiaalin muita austeniittisiä ruostumattomia teräksiä matalampi hiilipitoisuus vähentää lämmöntuonnin vaikutuksesta aiheutuvaa materiaalin köyhtymistä. Tämä on myös positiivinen uutinen jatkokehityksen kannalta, sillä työlämpötila ei näiden testien perusteella ole niin kriittisessä asemassa, kuin normaalin 316 materiaalin kanssa olisi ollut.

6 POHDINTA

Tässä kappaleessa käsitellään syvällisemmin kirjallisuustutkimuksen ja kokeellisen osuuden tuloksia, kuin myös lankapohjaisen suorakerrostuksen nykytilaa ja realiteetteja yleisellä tasolla. Pohdinnassa käsitellään muun muassa diplomityön aikana esille tulleita jatkotutkimuskohteita, tutkimuksen objektiivisuutta ja luotettavuutta sekä tuloksien yleistettävyyttä.

6.1 Jatkotutkimus

Tämä diplomityö antoi muun aikaisemman tutkimuksen ohella hyvät perustiedot lankapohjaisen suorakerrostuksen käytölle sellu- ja paperiteollisuuden konepajavalmistuksessa sekä alustavaa validointia tällä menetelmällä tulostetulle laadulle. Kyseinen valmistusmenetelmä on kuitenkin hyvin tuore ja tällä hetkellä ei olla vielä täysimittaisen teollisen tuotannon vaiheessa standardisoinnin, simuloinnin, tuotantoketjujen ja laadullisen validoinnin ollen osittain puutteellisia. Jatkotutkimusta valmistusmenetelmän ympärillä tapahtuu jatkuvasti monen eri osa-alueen suhteen, mutta kohdeyrityksen näkökulmasta tietyt aiheet nousevat akuutimmiksi kehityskohteiksi.

Tärkeimpänä jatkotutkimuksen kohteena on tasaisen laadun varmistaminen muun muassa lämpötilan reaaliaikaisella monitoroinnilla ja lämpötilan kontrolloinnilla. Vaikka kokeellisessa osuudessa huomattiin, että korkea työlämpötila ei vaikuttanut merkittävästi aineen materiaaliominaisuuksiin etenkin kriittisen korroosionkeston suhteen, on työlämpötilan kontrollointi silti tärkeää laadun varmistamiseksi ja voi koitua ongelmaksi muiden materiaalien kanssa.

Toisena tärkeänä jatkotutkimuskohteena on suunnittelu- ja valmistusketjun vakiointi. Vaikka tällä hetkellä kohdeyrityksellä on todennettu toimiva ketju CAD-suunnittelusta valmistukseen asti, sisältyy työvaiheisiin vielä paljon manuaalista työtä, tarkastusta ja koeajoja, eikä valmistusmenetelmä ole vielä tarpeeksi kypsä käyttöönotettavaksi normaalissa tuotannossa.

Lisäksi jatkotutkimusta vaaditaan materiaalitestien muodossa muille, kuin 316L materiaalille. Potentiaalisina materiaaleina voi olla kuormalujat teräkset, erikoisseokset pinnoitussovelluksiin tai useamman materiaalin yhdistelmät. Kaikille käytettäville materiaaleille tulee tehdä tarpeeksi kattavat materiaalitestaukset prosessin validoimiseksi. Käyttöönoton edistämiseksi jatkotutkimusta tarvitaan myös soveltuvien kappaleiden tunnistamiseen sekä niiden uudelleensuunnitteluun menetelmälle sopiviksi.

6.2 Tutkimuksen objektiivisuus, reliabiliteetti ja validiteetti

Tutkimusta voidaan lähtökohtiin ja rajauksiin nähden pitää objektiivisena. Kirjallisuuskatsauksessa sekä kokeellisessa osuudessa asiaa on käsitelty lähes täysin kohdeyrityksen näkökulmasta, mikä tuo osaltaan asenteellisuutta ja jopa vinoumaa tutkimukseen, mutta koska tavoitteena tutkimuksessa oli nimenomaan tuottaa tietoa kohdeyrityksen tarpeisiin, ei tätä pidetä merkittävänä. Tutkimuksen objektiivisuutta ja reliabiliteettia lisäsi rikkomattomassa ja rikkovassa aineenkoetuksessa käytetyt ulkopuoliset akkreditoituneet testauslaboratoriot.

Kokeellisen osuuden reliabiliteettia olisi lisännyt materiaalitestien suuremmat otannat, sillä nyt testistä riippuen otantana oli vain 1-3 testiä per suunta eikä tämä vielä takaa luotettavia tuloksia. Vaikka testausmäärä oli verrattain pieni, materiaalitestien tulokset kuitenkin lisäsivät luotettavuutta. Materiaalitestien osalta ei tullut yhtään poikkeamaa tai hylättyä testiä laadullisissa testeissä ja kaikki numeeriset arvot olivat toisiinsa verrattuna virhemarginaalin sisällä sekä huomattavasti yli minimiarvojen.

6.3 Yleistettävyys

Diplomityöstä saadut tulokset ovat joissain määrin yleistettäviä tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Yleistettävää on lankapohjaisen suorakerrostuksen liiketoimintapotentiaali konepajavalmistuksessa kyseisen valmistusmenetelmän ominaispiirteidensä puolesta. Kokeellisen osuuden osalta saadut tulokset toimivat suuntaa antavina esimerkkeinä, mutta suoraa yleistettävyyttä esimerkiksi materiaalitestauksen tuloksista ei voi tehdä. Saadut tulokset riippuvat hyvin paljon käytetystä laitteistosta, liikeratastrategiasta, materiaalista ja hitsausparametreista. Tämän tutkimuksen tuloksia ei myöskään suoraan voi yleistää testatulle 316L materiaalille mihin tahansa geometriaan, vaan liikeratastrategiat, hitsausparametrit ja lämpötilanhallinta täytyy suunnitella tapauskohtaisesti. Kokeellinen

osuus antoi kuitenkin arvokasta ensi käden kokemusta lankapohjaisesta suorakerrostuksesta ja tuotantoketjusta CAD-mallista konkreettiseen valmistukseen ja tämä kokemus ja toimintatavat ovat yleistettävissä muihinkin tulostettaviin kappaleisiin.

6.4 Menetelmän käyttöönoton haasteet

Vaikka ensimmäiset tulokset kokeellisesta osuudesta oli hyvinkin lupaavia ja menetelmä on todettu kokonaisuutena toimivaksi, liittyy menetelmän ympärille vielä käyttöönottoa hidastavia tai estäviä haasteita. Täytyy pitää mielessä, että vaikka materiaalia saadaan tulostettua verrattain nopeasti, on suurella tuotolla myös haittapuolensa. Pinnanlaatu WAAMilla valmistetuissa kappaleissa ei juuri koskaan ole lopullinen pinta vaan ennemminkin niin sanottu near-net shape eli lähellä nettopintaa oleva aihio. Tämä tarkoittaa, että tulostusprosessin jälkeen vaaditaan vielä hiomis- tai koneistustyötä, jotta päästään haluttuihin loppumittoihin.

Käyttöönoton haasteena on myös menetelmän selkeästi kalliimpi kilohinta perinteisiin menetelmiin verrattuna. Lähes kaikki kohdeyrityksen laitteet ja osat on suunniteltu perinteisten valmistusmenetelmien ehdoilla, joten etenkin vähäisellä WAAMin kokemuksella voi olla haasteellista tunnistaa menetelmälle soveltuvia osia. Vaikka käyttökohteita ja tarpeita tunnistetaan, vaatii tulostettava osa aina silti jossain määrin uudelleensuunnittelua, jotta menetelmän etuja esimerkiksi kevyemmän rakenteen suhteen saavutetaan.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän diplomityö tehtiin ANDRITZ Savonlinna Works Oy:lle. Työn tavoitteena oli selvittää robottihitsauslaitteistolla suoritettavan lankapohjaisen suorakerrostuksen eli WAAMin edellytykset sekä kyseisen valmistusmenetelmän liiketoimintapotentiaali paperi- ja selluteollisuuden konepajavalmistuksessa. Kokeellisen osuuden tavoitteena oli tulostaa konepajan omalla laitteistolla koekappale ja suorittaa tulostetulle kappaleelle materiaalitestejä tulosteiden laadun selvittämiseksi.

Vaikka WAAMilla on metallien lisääväksi valmistukseksi kohtuullisen pitkä historia, on menetelmä elänyt hiljaiseloa aina viime vuosiin asti, minkä jälkeen tutkimusmäärät ja käyttökohteet menetelmälle ovat kasvaneet huomattavasti. Osasyynä äkilliseen viime vuosien kasvuun voi olla kehittyneet kylmähitsausprosessit kuten Froniuksen CMT, joka toimii isossa roolissa tulostuksen onnistumisessa etenkin pienemmillä kappaleilla.

Lankapohjaisen suorakerrostuksen liiketoimintapotentiaalia selvitettiin toimitusketjujen, ympäristövaikutusten, uhkien sekä potentiaalisten käyttökohteiden näkökulmasta. Selvisi, että lankapohjainen suorakerrostus yksinkertaistaa toimitusketjua sekä lisää omavaraisuutta mahdollisissa häiriötilanteissa, joissa alihankintaketjut eivät pysty toimimaan normaalisti. Ympäristövaikutusten osalta WAAMilla voidaan saavuttaa pienemmän hiilijalanjäljen tuotteita tehokkaamman materiaalinkäytön, ominaisuuksiltaan parempien tuotteiden ja joustavan valmistussijainnin kautta. Tämä kuitenkin vaatii tuotteiden uudelleensuunnittelua, jotta kyseisiä etuja voidaan saavuttaa.

Suurimpina uhkakuvina ja riskeinä lankapohjaisessa suorakerrostuksessa on digitaalisen valmistusmenetelmän mukanaan tuomat kyberuhkat. Mallitietojen sabotointi, kopiointi tai muu valmistuksen häirintä on vakavasti otettava uhkakuva, sillä teollisuuden kyberhyökkäykset ovat viime vuosina olleet jatkuvassa kasvussa. WAAMin käyttönoton haasteina on myös perinteisiin menetelmiin verrattuna korkeampi hinta ja hankalasti tunnistettavat potentiaaliset käyttökohteet kaikkien laitteiden ollessa tällä hetkellä suunniteltu perinteisille menetelmille.

Kokeellisessa osuudessa konepajalle luotiin edellytykset lankapohjaisen suorakerrostuksen käyttöön. Laitteiston osalta käytettiin konepajan olemassa olevaa robottihitsauskalustoa, Motomanin käsivarsirobottia sekä Froniuksen TPS 500i CMT hitsausvarustusta, jotka tarjosivat jo valmiiksi hyvät edellytykset tulostamiseen. Jotta CAD-mallin pohjalta saatiin luotua robotin liikeradat, tarvittiin WAAMille soveltuva CAM-ohjelmisto. Ohjelmistoksi valikoitui Autodeskin PowerMill Ultimate, jolla saatiin CAD-mallin tuomisen jälkeen viipaloitua kappale, luotua liikeradat sekä luoda robotille soveltuva valmis työtiedosto.

Koekappaleen onnistuneen tulostuksen jälkeen sille suoritettiin rikkomatonta sekä rikkovaa aineenkoetusta. Rikkomattoman aineenkoetuksen suoritti Dekra Industrial Oy ja siihen sisältyi tunkeumanestetarkastus sekä radiografinen tarkastus. Tämän jälkeen koekappaleelle suoritettiin vetokokeet, taivutuskokeet, iskukokeet, korroosiokokeet, makro- ja mikrorakennetarkastelu sekä raekoon määrittäminen Metlab Oy:n toimesta.

Materiaalitestaus antoi positiivisia tuloksia tulostetun materiaalin laadusta ottaen huomioon kohdeyrityksen vähäisen kokemuksen kyseiselle valmistusmenetelmälle. Hylkäykseen johtaneita virheitä ei koekappaleessa ilmaantunut ja rikkovan aineenkoetuksen numeeriset testit ylittivät koekappaleella vastaavalle 1.4404 materiaalille asetetut standardoidut minimiarvot.

WAAM-prosessin käyttö on vielä globaalisti suhteellisen vähäistä, mutta jatkuvasti kehittyvät hitsausprosessit ja CAM-ohjelmistot yhdessä lisääntyvän tutkimustiedon kanssa parantavat teollisten käyttökohteiden löytymisen edellytyksiä. Valmistusmenetelmällä on kuitenkin jo tässä vaiheessa tunnistettu olevan suuri potentiaali vastaamaan nopeisiin toimitusaikatarpeisiin tai parantamaan kappaleiden suorituskykyä uudelleensuunnittelun kautta. Valmistusmenetelmä kaipaa kuitenkin vielä paljon jatkokehitystä, menetelmien vakiointia sekä standardisointia saavuttaakseen täysimittaisen teollisen potentiaalinsa.

LÄHTEET

Aaltonen, O., Kauppinen, T. & Nuopponen, M. 2020. Ongoing Additive Manufacturing Revolution - Biggest Potential for ANDRITZ P&P. ANDRITZ Oy Nordic Talent Program. [verkkodokumentti]. [Viitattu 11.6.2020]. Saatavissa: https://connect.andritz.com/loc/0231/aoyhr/_layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=/loc/0231/aoyhr/Talent%20programme%20%20Final%20reports/2019_Group%203_Ongoing%20additive%20manufacturing%20revolution.pdf&action=default (Andritzin sisäinen intra-sivu)

AGA. 2020. Pienoisopas. Ruostumattoman teräksen MIG/MAG-hitsaukseen. [verkkodokumentti]. [Viitattu 15.6.2020]. Saatavissa: https://www.linde-gas.fi/fi/images/AGA%20Stainless%20Steel%20MIG%20MAG%20Welding%20Brochure%20105x210%20FI_tcm634-122435.pdf

Andritz. ANDRITZ Oy, Finland. 2020a. [Andritzin www-sivuilla]. [Viitattu 17.3.2020]. Saatavissa: <https://www.andritz.com/pulp-and-paper-en/locations/andritz-oy>

Andritz. ANDRITZ Savonlinna Works Oy. 2020b. [Andritzin www-sivuilla]. [Viitattu 17.3.2020]. Saatavissa: <https://www.andritz.com/pulp-and-paper-en/locations/savonlinna-works-oy>

Andritz. Who we are. 2020c. [Andritzin www-sivuilla]. [Viitattu 23.5.2020]. Saatavissa: <https://www.andritz.com/careers-en/who-we-are>

Appleyard, D. 2012. Welding Pelton Runners. Hydro Review, 4: 12. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 27.5.2020]. Saatavissa: <https://www.hydroreview.com/2012/07/01/welding-pelton-runners/>

Bekker, A. & Verlinden, J. 2018. Life Cycle Assessment of Wire + Arc Additive Manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel. Journal of Cleaner Production, 177. Ss. 438-447.

Bracell. Corporate Strategy. 2020. [Bracellin [www-sivuilla](#)]. [Viitattu 23.5.2020]. Saatavissa: <https://www.bracell.com/en/institutional/corporate-strategy/>

Busachi, A., Erkoyuncu, J., Colegrove, P., Martina, F. & Ding, J. 2015. Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications. CIRPe 2015 - Understanding the life cycle implications of manufacturing. Ss. 48-53.

Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U. & Dolen, M. 2017. The Role of Additive Manufacturing in the era of Industry 4.0. Procedia Manufacturing, 11. Ss. 545-554

European Environment Agency EEA. 2016. Sectoral greenhouse gas emissions by IPCC sector. [verkkodokumentti]. [Viitattu 23.5.2020]. Saatavissa: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/change-of-co2-eq-emissions-2#tab-dashboard-01>

Flir. FLIR A35. 2020. [FLIRin [www-sivuilla](#)]. [Viitattu 15.6.2020]. Saatavissa: <https://www.flir.com/products/a35/>

Fronius. The CMT weld process. 2020. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 14.5.2020]. Saatavissa: https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Brochures/PW_BRO_CMT_EN.pdf

Gefertec. 2020. Conventional manufacturing versus 3DMP. [Gefertecin [www-sivuilla](#)]. [Viitattu 15.6.2020]. Saatavissa: <https://www.gefertec.de/en/3dmp-process/#vorteile>

Greenhouse Gas Protocol. 2011. The Greenhouse Gas Protocol: Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard. [verkkodokumentti]. [Viitattu 23.5.2020]. Saatavissa: http://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2.pdf

Haleem, A. & Javaid, M. 2019. Additive Manufacturing Applications in Industry 4.0: A Review. Journal of Industrial Intergration and Management, 4: 4. 23 s.

Heider, M. 2019. WAAM Specialist in ANDRITZ HYDRO Ravensburg. Ravensburg, Saksa: haastattelu 30.9.2019. Haastattelijana Santeri Varis. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

He, H., Maple, C., Watson, T., Tiwari, A., Mehnen, J., Jin, Y. & Gabrys, B. 2016. The security challenges in the IoT enabled cyber-physical systems and opportunities for evolutionary computing & other computational intelligence. 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Ss 1015–1021.

Korpela, M. 2019. ISO/TC 261 - Additive manufacturing -teknisen komitean jäsen. Puhelinhaastattelu 1.11.2019. Haastattelijana Santeri Varis.

Lincoln Electric. 2020. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 29.4.2020]. Saatavissa: https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/ConsumableEU_MIGWires-LNM-LNM316LSi/LNM316LSI-ENG.pdf

Linde-Gas. 2020. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 29.4.2020]. Saatavissa: https://www.linde-gas.fi/fi/images/AGA_MISON_2He_Datasheet_FI_tcm634-120499.pdf

McAndrew, A., Rosales, M., Colegrove, P., Hönnige, J., Ho, A., Fayolle, R., Eyitayo, K., Stan, I., Sukrongpang, P., Crochemore, A. & Pinter, Z. 2018. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. Additive Manufacturing, 21. Ss 340–349.

Metal-AM. 2019. On-demand spare parts for Deutsche Bahn made using Gefertec AM machines. Metal-AM, 5: 2. S. 39.

Mondi. Who we are. 2020. [Mondin www-sivuilla]. [Viitattu 23.5.2020]. Saatavissa: <https://www.mondigroup.com/en/about-mondi/who-we-are/>

Ampower. 2020. Ampower Report 2020. Metal Additive Manufacturing. [verkköjulkaisu]. [Viitattu 15.6.2020]. Saatavissa: <https://additive-manufacturing-report.com/>

Nieminen, R. 2020. VS: 3D hitsatun koekappaleen lisätarkastelut [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Santeri Varis. Lähetetty 23.4.2020 klo 15:49 (GMT +0200).

Oksala, J. 2019. Greenhouse gas emission calculation model development for global industrial investment projects. Diplomityö, Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. 101 s.

Pat. US 1533300. 1925. Method of Making Decorative Articles. Ralph Baker. Hak. US 423647, 12.11.1920. Julk. 14.4.1925. 3 s.

Piili, H. 2020. Lasertyöstön ja 3D-tulostuksen professori LUT-yliopistossa. Puhelinkeskustelu 2.4.2020.

Scopus. 2020a. Analyze search results [verkkotietokanta]. [Viitattu 16.4.2020]. Saatavissa: <https://www-scopus-com.ezproxy.cc.lut.fi/term/analyzer.uri?sid=d3e3afbb6dafca3bd80347307693b927&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28metal+additive+manufacturing%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=43&count=6918&analyzeResults=Analyze+results&txGid=67deab02fe0a92ea5b0698e885838255>

Scopus. 2020b. Analyze search results [verkkotietokanta]. [Viitattu 16.4.2020]. Saatavissa: <https://www-scopus-com.ezproxy.cc.lut.fi/term/analyzer.uri?sid=2d784c9b648a6aa3894516129e4bea8a&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28wire+arc+additive+manufacturing%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=46&count=635&analyzeResults=Analyze+results&txGid=c25b0b0f0cd429c946655d52af25c670>

SFS-EN 1011-1. 2009. Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset. Osa 1: yleisohjeet kaarihitsaukselle. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 26 s.

SFS-EN 1011-3. 2018. Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset.

Osa 3: Ruostumattomien terästen kaarihitsaus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 51 s

SFS-EN ISO 14175. 2008. Hitsausaineet. Kaasut ja kaasuseokset sulahitsaukseen ja lähiprosesseille. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 25 s.

SFS-EN ISO/ASTM 52900. 2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 47 s.

Simpson, T. 2017. Disrupting Manufacturing One Layer at a Time. TEDxPSU. 12.2.2017. Pennsylvania, Yhdysvallat.

Stora Enso. Tarkoituksemme ja arvomme. 2020. [Stora Enson www-sivuilla]. [Viitattu 23.5.2020]. Saatavissa: <https://www.storaenso.com/fi-fi/about-stora-enso/our-purpose-and-values>

Tuominen, J. 2019. Hitsausmenetelmät ainetta lisäävässä valmistuksessa. Hitsaustekniikka, 2019: 5. Ss 6-11.

TWI. Arc-Based Additive Manufacturing. 2020. [TWI:n www-sivuilla]. [Viitattu 15.6.2020]. Saatavissa: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/arc-based-additive-manufacturing-137>

UPM. Arvomme. 2020. [UPM:n www-sivuilla]. [Viitattu 23.5.2020]. Saatavissa: [https://www.upm.com/fi/tyopaikat/keita-me-olemme/](https://www.upm.com/fi/tyopaikat/keita-me-olemme/arvomme/)

WAAMMat. Applications and Business Drivers. 2020a. [WAAMMatin www-sivuilla]. [Viitattu 15.6.2020]. Saatavissa: <https://waammat.com/about/business-drivers>

WAAMMat. The WAAMMat Programme. 2020b. [WAAMMatin www-sivuilla]. [Viitattu 15.6.2020]. Saatavissa: <https://waammat.com/about/waammat-programme>

DEKRA Industrial OyTuupakankuja 1
01740 VANTAA

Tel. (09) 878 020 Fax (09) 878 6653

Tunkeumanestetarkastuspöytäkirja**Liquid Penetrant Inspection Report**

Pöytäkirjan nro Report No.

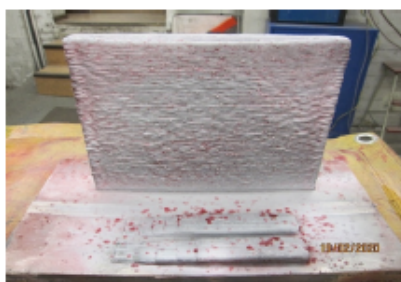
D103733

Tilaja Contractor Andritz Savonlinna Works Oy	Työnro Work No. R-05-985116-038-0081	Asiakas Customer Andritz Savonlinna Works Oy	Työnro Work No. R-05-985116-038-0081
Laitos Station		Valmistaja, asentaja Manufacturer, installed by Andritz Savonlinna Works Oy	Työnro Work No. -
Tarkastuskohde Inspection object 3D- tulostettu levy, ASW AM		Piirustus nro Drawing No.	

Hitsin tunnus / Hitsaaja Weld Identification / Welder ASW AM 140220	Perusaine Base material -
Pinnan laatu Surface condition Hitsattu	Lämpötila Temperature 20°C
	Lämpökäsittely Heat treatment Ei lämpökäsittelyä

Tekniikka Technique Väriäinen / Colour	Esipuhdistin Cleaner Bycotest C10	Eränro Batch No. 190611
Tunkeuma-aika Penetration time 30min	Tunkeumaneste Penetrant Bycotest RP 20	Eränro Batch No. 190505
Tunkeumanesteen poisto Penetrant removal Vesi	Puhdistin Cleaner Vesi / Water	Eränro Batch No.
Kehitysaika Developing time 20 min	Kehite Developer Bycotest D30 Plus	Eränro Batch No. 190708
Tarkastuspvm Insp. date 19.2.2020	Tarkastuspaikka Inspection place Savonlinna	Valaistus Light Kohdevalo
	Tunnus ID	Etäisyys Distance < 500 mm

Tarkastusohje Inspection procedure SFS-EN ISO 3452-1	Tarkastusajajuuks Extent of Inspection 100%
Laadunmääritysasiakirja Quality document SFS-EN ISO 23277	Laatuvaatimus Quality requirement SFS-EN ISO 23277 2X

Tulokset Results

Ei raportoitavia näyttämiä.

Liitteet Appendix **0** sivua pages

Tarkastustulokset Results of inspection	<input checked="" type="checkbox"/> Täyttävät vaatimukset Comply with the requirements	<input type="checkbox"/> Eivät täytä vaatimuksia Do not comply with the requirements
--	---	---

Tarkastaja Inspector Minna Mäkelä		Pätevyys Qualification EN ISO 9712/Nordtest Level 2 SNT-TC-1A Level 2 STUK	
Pvm ja allekirjoitus Date and signature 21.2.2020 Minna Mäkelä			

DEKRA Industrial Oy

Tuupakankuja 1
01740 VANTAA
Tel. (09) 878 020 Fax (09) 878 6653

Radiografinen tarkastus

Radiographic Inspection Report



Pöytäkirjan nro Report No.
D110658

Tilaja Contractor	Työnro Work No.	Asiakas Customer	Työnro Work No.											
Andritz Savonlinna Works Oy		Andritz Savonlinna Works Oy												
Laitos Station		Valmistaja, asentaja Manufacturer, installed by	Työnro Work No.											
Savonlinnan konepaja		Andritz Savonlinna Works Oy												
Tarkastuskohde Inspection object		Piirustus nro Drawing No.												
3D- tulostettu levy, ASW AM 140220		-												
Hitsausprosessi Welding process		Perusaine Base material												
111		CS												
Liitosmuoto Joint type	Railon muoto Welding preparation	Lämpökäsittely Heat treatment												
BW Päittäishitsi	-	Ei lämpökäsittelyä												
Merkintätapa Marking		Kuvauskaavio Inspection chart												
1		-												
Säteilylähde Radiation source	Koko Size	ID	Indikaattorin tyyppi ja sijoitus Type and location of IQI											
Andrex Smart 225/4	3,0	PT113	W 10 Fe S - Säteilysäteen puolella Source side F - Filmin puolella Film side											
Filmi ja vahvistuslevy Film and intensifying screen		Kehitystapa Processing technique												
Agfa D5 + 0,027 Pb		Koneellinen, 28 °C												
Kuvaustekniikka Inspection technique (EN 1435, EN ISO 17636-1)														
1. Levykuvaus Single wall penetration (fig. 1)		5. Elliptinen kuvaus Elliptic technique (fig. 11)												
2. Sektorikuvaus ulkopuolelta Source located outside and film inside (fig. 2)		6. Kohtisuora kuvaus Perpendicular technique (fig. 12)												
3. Keskeiskuvaus Source located centrally inside and film outside (fig. 5)		7. Sektorikuvaus kahden seinämän läpi Double wall penetration single image (fig. 14)												
4. Sektorikuvaus sisäpuolelta Source located inside and film outside (fig. 8)		8. Eri ainepaksuudet Different material thicknesses (fig. 19)												
Kuvauspvm Insp. date	Kuvauspaikka Inspection place	Kuvaaja(t) Inspector(s)	Pätevyys Qualification											
19.02.2020	Savonlinna	Jani Laamanen	EN ISO 9712/Nordtest											
Tarkastusohje Inspection procedure	Tarkastustaso Class	Tarkastuslaajuus Extent of inspection												
SFS-EN ISO 17636-1		yksi kuva, 10x48 filmille												
Laadunmääritysasiakirja Quality document		Laatuvaatimus Quality requirement												
SFS-EN ISO 9606-1		SFS-EN ISO 5817 B (C: 501, 502, 503, 504, 5214)												
Kuvan tunnus Film ID	Ulkohalk. O.D. [mm]	Selänmä Wall [mm]	Jännite Voltage [kV]	Valotus Exposure [min]	SFD [mm]	Kuv. tekn. Exam. tech.	Ind. sij. IQI loc.	Ind.lanka IQI wire	Mustuma Density min/max	Filmien lkm No. of films	Virhetyyppi Imperfection type	Hyv. Acc.	Hyl. Ref.	Hitsaaja/ Huomautus Welder/ Remarks
1	0-1	33,0	225	4	750	1	S	W15	3.8/3.8	1	602	X		-
/														
100 - Halkeama Crack; 2011 - Huukonien Gas pore; 2012 - Tasaanin huukotus Uniformly distributed porosity; 2013 - Huukotusryhmä Clustered porosity; 2014 - Huukojono Linear porosity; 2015 - Pitkänomainen huukonien Elongated cavity; 2016 - Madonreikähuukonien Worm-hole; 2024 - Insuutelo Crater pipe; 301 - Kuoraulkoisuus Slag inclusion; 3041 - Voltamulkoisuus Tungsten inclusion; 401 - Liitteenhe Lack of fusion; 402 - Väheä hitsautumattomuus Lack of penetration; 5011 - Jatkuva reunahaeve Continuous undercut; 5012 - Kalkkoinen reunahaeve Intermittent undercut; 5013 - Juurenpuoleinen reunahaeve Shrinkage groove; 502 - Korkea kupu Excess weld metal; 504 - Korkea juurikupu Excess penetration; 510 - Lämpölämmähtäminen Burn through; 511 - Väheä kupu Incompletely filled groove; 515 - Väheä juuri Root concavity; 517 - Dudelaerolaitteita Poor reheat														
Huomautukset Notes														
										Liitteet Appendix		0 sivua pages		
Luokitteija Interpreter										Pätevyys Qualification				
Jani Laamanen, Nordtest 6908										<input checked="" type="checkbox"/> EN ISO 9712/Nordtest Level 2 <input checked="" type="checkbox"/> SNT-TC-1A Level 2 <input checked="" type="checkbox"/> STUK				
Pvm ja allekirjoitus Date and signature														
16.4.2020 Jani Laamanen														
Rev. 4														

Tilaaja - Purchaser:
 Andritz Savonlinna Works Oy
 Lypsniemenkatu 5
 57100 Savonlinna

 Tilaajan tilaus n:o - Purchaser's order n:o
 5.3.2020 / Santeri Varis
 4502829524

Taustatiedot - Background information :

Tuote - Product :	3D welded test plate 305 x 220 x 33 mm
Hitsausohjelma - Welding program :	Fronius CrNi 19 9 / 19 12 3
Materiaali - Material :	316L type weld metal
Hitsauslisäaine - Welding consumable :	Lincoln LNM 316 LSi
Hitsausprosessi - Welding process :	135, MAG CMT
Hitsausasento - Welding position :	PA
Testit - Tests :	- 6 tensile tests - 4 bend tests - 2 series Charpy-V impact tests - 2 intergranular corrosion tests

Koestusstandardi - Testing standard: purchaser's instructions

Vetokokeet - Tensile tests # (SFS-EN ISO 6892-1:2016 A):

Testilaitte - Test device : Galdabini Quasar 200, no. VCVD 01

Koe n:o Test n:o	Paksuus/Halkaisija Thickness/Diameter	Mittapituus Gauge length L ₀	Venyysraja Proof strength Rp0.2	Murtolujuus Tensile strength R _m	Murtovenymä Elongation A	Murtokouroma Reduction of area Z	Näytteiden suunta Specimen orientation
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	
1	13.96	70	320	588	38.0	54	Longitudinal
2	13.95	70	317	590	37.5	53	Longitudinal
3	13.96	70	300	586	37.5	52	Transverse
4	13.94	70	310	592	34.0	53	Transverse
5	13.95	70	321	621	33.0	31	45° angle
6	13.95	70	322	615	37.0	36	45° angle

Taivutuskokeet - Bend tests # (SFS-EN ISO 7438:2016):

Testilaitte - Test device : Vakomet KR1000, no. 1347

Koe n:o Test n:o	Tyyppi ja tunnus Type and symbol	a	b	D	l	a	Tulos Result	Näytteiden suunta Specimen orientation
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°]		
7	Weld metal	10	30	40	70	180	Acceptable	Longitudinal
8	Weld metal	10	30	40	70	180	Acceptable	Longitudinal
9	Weld metal	10	30	40	70	180	Acceptable	Transverse
10	Weld metal	10	30	40	70	180	Acceptable	Transverse

Iskukokeet - Impact tests # (Charpy-V, SFS-EN ISO 148-1:2016):

Testilaitte - Test device : Galdabini Impact 750, no. VCVD 05

Koe n:o Test n:o	Näytteen mitat Specimen dimensions	Loven sijainti Notch location	Koelämpötila Test temperature	Iskutyö Absorbed energy KV2	Keskiarvo Average KV2	Näytteiden suunta Specimen orientation
	[mm]		[°C]	[J]	[J]	
11	10 x 10 x 55	Weld metal	+20	88 / 77 / 73	79	Transverse specimen, longitudinal notch
12	10 x 10 x 55	Weld metal	+20	113 / 131 / 129	124	Longitudinal specimen, transverse notch

Korroosiokokeet - Corrosion tests (SFS-EN ISO 3651-2:1998 Meth. A):

Koe n:o Test n:o	Paksuus Thickness	Leveys Width	Pituus Length	Taivutuskulma Bending angle	Tuunan halkaisija Mandrell diameter	Tulos Result	Huomautukset Remarks
	[mm]	[mm]	[mm]	[°]	[mm]		
13	4.97	25.00	77	90	5	Acceptable	Longitudinal
14	4.97	25.03	74	90	5	Acceptable	Transverse

Koe n:o Test n:o	Liitteet Enclosures
13	Exposure time in boiling test solution was 20 h
14	Exposure time in boiling test solution was 20 h

Huomautuksia - Remarks

- specimen directions are indicated with respect to the welding direction
- test pos. 13 and 14 specimens were tested in as-delivered state without sensitization heat treatment
- Test report 201008 Rev.1 issued on 11.5.2020, test pos. 11 and 12 result transfer errors corrected and specimen/notch orientations expressed more precisely

Tulopvm - Date of arrival

06.03.2020

Seloste pvm - Report date

11.05.2020

Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Accredited method. Statement is not accredited. -
 Selosteeseen osittainen kopioiminen on kielletty ilman Metlab Oy:n lupaa. The report shall not be partially reproduced without
 permission of Metlab Oy.
 * Asiakkaan toimittamia tietoja, joiden oikeellisuudesta Metlab Oy ei ole vastuussa. -
 Information provided by the customer, Metlab Oy is not responsible for the validity of this information.
 Metlab Oy ei ole vastuussa näytteenotosta. Tulokset pätevät vain asiakkaalta vastaanotetuille ja testatuille näytteille. -
 Metlab Oy is not responsible for the sampling stage. The test results relate only to as received and tested samples.
 Tulosten vaatimustenmukaisuus raportoidaan huomioiden tulosten mittausepävarmuutta.
 The measurement uncertainty of the results is not taken into consideration in statements of conformity.
 Mittausepävarmuus - Measurement uncertainty: 95% luotettavuustaso - 95% confidence level, k=2
 Kemiallinen analyysi: Mittausepävarmuustaulukko toimitetaan pyydettyäessä -
 Chemical analysis: Measurement uncertainty table is delivered upon request.
 Huoneenlämpötilan vetokoe - Room temperature tensile test: ReL, ReH±4.2%, Rp0.2±4.6%, Rm±1.6%, A±2.4%, Z±2.6%
 Korotetun lämpötilan vetokoe - Elevated temperature tensile test: ReL, ReH±6.3%, Rp0.2±6.9%, Rm±2.4%, A±2.4%, Z±2.6%
 Iskukoe, energiataso - Impact test, energy level: <50 J ±3.0 J, 50 - 100 J ±9.0 J, >100 J ±13.0 J
 Kovuuskokeet - Hardness tests: Vickers HV0.3 ±9.0%, HV1 ±7.0%, HVS-HV10 ±3.9%, HV30 ±3.6%
 Brinell: HBW 2.5/187.5 ±3.9%, HBW 5/750 ±3.3%, HBW 10/3000 ±2.4%
 Rockwell: HRC±2.4 HRC, HRBW 10 - 45 HRBW ±4.9 HRBW, >45 - 80 HRBW ±3.6 HRBW, >80 - 100 HRBW ±2.9 HRBW

METLAB OY



Risto Nieminen
 Testauksen valvoja - Supervisor of testing

Metlab Oy
 Nuutisarankatu 17
 33900 TAMPERE
 FINLAND

Puhelin - Phone
 03-3124 5800

metlab@metlab.fi

www.metlab.fi




TESTAUSSELOSTE - TEST REPORT
SFS-EN 10204-3.2
No. 201396
 Sivu - Page 1(2)

 Tilaaja - Purchaser:
 Andritz Savonlinna Works Oy
 Lypsniemenkatu 5
 57100 Savonlinna

 Tilaajan tilaus n:o - Purchaser's order n:o
 30.3.2020 / Santeri Varis
 4502869315

Taustatiedot - Background information :

Tuote - Product :	3D welded test plate 305 x 220 x 33 mm
Hitsausohjelma - Welding program :	Fronius CrNi 19 9 / 19 12 3
Materiaali - Material :	316L type weld metal
Hitsauslisäaine - Welding consumable :	Lincoln LNM 316 LSi
Hitsausprosessi - Welding process :	135, MAG CMT
Hitsausasento - Welding position :	PA
Testit - Tests :	- 2 pcs. macro and micro examinations - 2 pcs. grain size measurements

Koestusstandardi - Testing standard: purchaser's instructions

Makrorakennetarkastelu - Macro examination # (SFS-EN ISO 17639:2013):
Luokittelu - Classification SFS-EN ISO 5817:2014

Koe n:o Test n:o	Merkintä - Designation X-Y-a,b,c-D/E/F/gh	Huomautukset Remarks	Liitteet Enclosures
1	A-E-8.1-8.1/B.1	Longitudinal section	Images delivered as JPG-files
2	A-E-8.1-8.1/B.1	Transverse section	Images delivered as JPG-files

Mikrorakennetutkimus - Micro examination # (SFS-EN ISO 17639:2013):
Luokittelu - Classification SFS-EN ISO 5817:2014

Koe n:o Test n:o	Merkintä - Designation X-Y-a,b,c-D/E/F/gh	Huomautukset Remarks	Liitteet Enclosures
3	I-E-8.1-8.1/B.1	Longitudinal section	Images delivered as JPG-files
4	I-E-8.1-8.1/B.1	Transverse section	Images delivered as JPG-files

Merkinän selite - Key to designation :

Tarkastelun tyyppi - Examination type : X

A = makrotarkastelu - macro examination

I = mikrotarkastelu - micro examination

Näytteen tila - Specimen state : Y

E = syövytetty näyte - etched specimen

U = syövyttämätön näyte - unetched specimen

Tarkastelun kohteet - Objects of test : a, b, c

a, b = perusaine - parent metal 1, 2

c = hitsiaine - weld metal

Perus- ja hitsiaineet-Parent/weld metals: D,E,F

D, E= perusaine - parent metal 1, 2

F= hitsiaine - weld metal

Tunnukset - Markings : CEN ISO/TR 15608

Syövyte - Etchant : gh

syövytyksen numero CEN ISO/TR 16060 / nimi -

etchant number CEN ISO/TR 16060 / name

Raekokomittaukset - Grain size measurements (ISO 643:2012):

Koe n:o Test n:o	Raekoon keskiarvo Average grain size	Huomautukset Remarks
5	G11	Longitudinal section etched electrolytically with 80% nitric acid
6	G11	Transverse section etched electrolytically with 80% nitric acid

Huomautuksia - Remarks

- specimen directions are indicated with respect to the welding direction

Tulopvm - Date of arrival
30.03.2020

Seloste pvm - Report date
21.04.2020

Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Accredited method. Statement is not accredited. -
Selosteen osittainen kopioiminen on kielletty ilman Metlab Oy:n lupaa. The report shall not be partially reproduced without
permission of Metlab Oy.

• Asiakkaan toimittamia tietoja, joiden oikeellisuudesta Metlab Oy ei ole vastuussa. -
Information provided by the customer, Metlab Oy is not responsible for the validity of this information.
Metlab Oy ei ole vastuussa näytteenotosta. Tulokset pätevät vain asiakkaalta vastaanotetuille ja testatuille näytteille. -
Metlab Oy is not responsible for the sampling stage. The test results relate only to as received and tested samples.

Tulosten vaatimustenmukaisuus raportoidaan huomioiden tulosten mittausepävarmuutta.
The measurement uncertainty of the results is not taken into consideration in statements of conformity.

Mittausepävarmuus - Measurement uncertainty: 95% luotettavuustaso - 95% confidence level, k=2

Kemiallinen analyysi - Mittausepävarmuustaulukko toimitetaan pyydettyäessä -
Chemical analysis - Measurement uncertainty table is delivered upon request.

Huoneenlämpötilan vetokoe - Room temperature tensile test: ReL, ReH \pm 4.2%, Rp0.2 \pm 4.6%, Rm \pm 1.6%, A \pm 2.4%, Z \pm 2.6%

Korotetun lämpötilan vetokoe - Elevated temperature tensile test: ReL, ReH \pm 6.3%, Rp0.2 \pm 6.9%, Rm \pm 2.4%, A \pm 2.4%, Z \pm 2.6%

Istukoe, energiataso - Impact test, energy level: <50 J \pm 3.0 J, 50 - 100 J \pm 9.0 J, >100 J \pm 13.0 J

Kovuuskokeet - Hardness tests: Vickers HVD.3 \pm 9.0%, HV1 \pm 7.0%, HVS-HV10 \pm 3.9%, HV30 \pm 3.6%

Brinell: HBW 2.5/187.5 \pm 3.9%, HBW 5/750 \pm 3.3%, HBW 10/3000 \pm 2.4%

Rockwell: HRC \pm 2.4 HRC, HRRW 10 - 45 HRRW \pm 4.9 HRRW, >45 - 80 HRRW \pm 3.6 HRRW, >80 - 100 HRRW \pm 2.9 HRRW

METLAB OY



Risto Nieminen
Testauksen valvoja - Supervisor of testing

Metlab Oy
Nuutisarankatu 17
33900 TAMPERE
FINLAND

Puhelin - Phone
03-3124 5800
metlab@metlab.fi

www.metlab.fi



LNM 316LSi

CLASSIFICATION

AWS A5.9 - ER316LSi
ISO 14343-A - G 19 12 3 LSi

GENERAL DESCRIPTION

Solid wire with extra low carbon for welding stainless CrNiMo-steels
See also LNM 316L, high silicon for improved wettability

WELDING POSITIONS



SHIELDING GASES (ACC. ISO 14175)

M12 Mixed gas Ar+ 0.5-5% CO₂
M13 Mixed gas Ar+ 0.5-3% O₂

APPROVALS

ABS	BV	DNV	GL	LR	TÜV
+	+	+	+	+	+

CHEMICAL COMPOSITION (W%) TYPICAL WIRE

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
0.01	1.8	0.8	18.5	12.2	2.5

MECHANICAL PROPERTIES, TYPICAL, ALL WELD METAL

Typical values	Shielding gas	Condition	0.2% proof strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Impact ISO-V(J)		
						+20°C	-120°C	-196°C
	M12	AW	452	580	30	150	70	44

MATERIALS TO BE WELDED

Steel grades	EN 10088-1/-2	EN 10213-4	Mat. Nr	ASTM/ACI A240/A312/A351	UNS
Extra low carbon (C < 0.03%)					
	X2CrNiMo17 12 2		1.4404	(TP)316L	S31603
	X2CrNiMo18 14 3		1.4435	CF-3M	J92800
	X2CrNiMoN 17 11 2		1.4406	(TP)316L	S31603
	X2CrNiMoN 17 13 3		1.4429	(TP)316LN	S31653
Medium carbon (C > 0.03%)					
	X4 CrNiMo 17 12 2		1.4401	(TP)316	S31600
	X4 CrNiMo 17 13 3		1.4436		
	GX5 CrNiMo 19-11		1.4408	CF 8M	J92900
Ti-,Nb stabilized					
	X6 CrNiMoTi 17 12 2		1.4571	316 Ti	S31635
	X6 CrNiMoNb 17 12 2		1.4580	316 Cb	S31640
	X6 CrNiNb 18-10		1.4550	(TP)347	S34700
		GX5 CrNiNb 19-10	1.4552	CF-8C	J92710

PACKAGING AND AVAILABLE SIZES

Diameter (mm)	0.8	1.0	1.2	1.6	Other sizes and packaging on request
Unit : 5 kg plastic spool S200	X	X			
15 kg spool BS300	X	X	X	X	

LNM 316LSi: rev. EN 23

All information in this data sheet is accurate to the best of our knowledge at the time of printing. Please refer to www.lincolnelectric.eu for any updated information.
Fumes: Material Safety Data Sheets (MSDS) are available on our website.