



jamk

Hitsaustyön kehittäminen voimalaitos- kattilakomponenttien valmistuksessa

Sami Liukkonen

Opinnäytetyö, AMK

Kesäkuu 2024

Konetekniikka, Insinööri (AMK)

Liukkonen, Sami

Hitsaustyön kehittäminen voimalaitoskattilakomponenttien valmistuksessa

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Kesäkuu 2024, 65 sivua

Tekniikan ala. Konetekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö, AMK

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Tavoitteena oli hitsaustyön tuottavuuden ja laadun parantaminen toimeksiantajayrityksen sarjatuotantovalmistukseen. Työ tehtiin esitutkimuksellisenä työnä Sisä-Savon Pipe & Welding Service Oy:lle.

Työssä perehdyttiin hitsauskustannusten muodostumiseen yleisellä tasolla, selvitettiin yrityksen tämänhetkisten valmistusmenetelmien vaikutukset hitsauskustannuksiin, sekä pohdittiin eri hitsausprosessien soveltuvuutta kyseisen tuotteen sarjatuotantovalmistukseen, hyödyntäen aiheesta aiemmin tehtyjä tutkimustuloksia ja suorittamalla hitsaustestejä MIG/MAG pulssihitsausprosessilla. Testauksilla haluttiin selvittää päällehitsauksessa käytettävän nikkeliseosteisen hitsauslisäaineen hitsattavuutta kyseisellä prosessilla sekä hitsiaineen sekoittumisastetta perusaineen kanssa. Koehitsaukset suoritettiin kolmella eri suojakaasulla ja useita eri hitsausparametrejä kokeillen.

Käytettävissä olevien lähtötietojen pohjalta tehtiin vertailevat kustannuslaskelmat uusille valmistuksen hitsaussuunnitelmille. Laskelmien perusteella saatiin selville hitsauksen osa- ja kokonaiskustannusten muodostuminen tuotteen valmistuksessa kappale ja vuositasolla. Laskelmat tehtiin neljälle eri valmistusvariaatiolle ja ne huomioivat myös eri variaatioihin tarvittavat investoinnit. Työssä selvitettiin myös tarvittavien uusien menetelmäkokeiden suoritukseen ja hitsaajien pätevöintiin liittyviä yksityiskohtia.

Laskennan avulla selvisi, että eri hitsausprosesseilla on varsinkin päällehitsauksen osalta erittäin suuria eroja kustannusten muodostumisen suhteen. Etenkin CMT-prosessilla pystyttäisiin saavuttamaan päällehitsauksessa erittäin suuri hitsiainetuotto melko pienellä lämmöntuonnilla. Yksi erityinen huomio oli, että vaikka automaation hyödyntäminen ei näin vähäisellä konetuntimäärällä olisi yleisesti kannattavaa, niin tässä tapauksessa, kun hitsattaisiin huomattavan kalliilla lisäaineella ja voitaisiin hyödyntää prosessille ominaista pientä lämmöntuottoa, muuttuisi se kannattavaksi jo näinkin vähäisellä käyttöasteella.

Avainsanat (asiasanat)

Hitsaus (UDC), laadun kehittäminen (KOKO), manuaalihitsaus, robottihitsaus, MIG/MAG-hitsaus, CMT-hitsaus, päällehitsaus

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Liitteet 1–6 ovat salassa pidettäviä, ja ne on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste on Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 17, yrityksen liike- tai ammattisalaisuus. Salassapitoaika on kymmenen (10) vuotta, salassapito päättyy 5.6.2034.

Liukkonen Sami

Development of welding work in the manufacture of power plant boiler components

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, June 2024, 65 pages

Engineering and technology. Degree Programme in Mechanical and Manufacturing Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes/No

Language of publication: Finnish

Abstract

The objective was to improve the productivity and quality of welding work for the serial production manufacturing of the commissioning company. The work was carried out as a preliminary study for Sisä-Savon Pipe & Welding Service Oy

The study examined the formation of welding costs at a general level, investigated the impact of the company's current manufacturing methods on welding costs, and considered the suitability of different welding processes for the serial production of the specific product. This was done by utilizing previous research results on the subject and performing welding tests with the MIG/MAG pulse welding process. The tests aimed to determine the weldability of the nickel-alloyed filler material used in overlay welding with this process and the degree of mixing of the weld metal with the base material. Experimental welds were carried out with three different shielding gases and by testing various welding parameters.

Based on the available initial data, comparative cost calculations were made for new manufacturing welding plans. The calculations revealed the formation of partial and total welding costs for the product's manufacturing on both a unit and annual level. The calculations were performed for four different manufacturing variations, considering the investments required for each variation. The study also investigated the details related to the execution of necessary new method trials and the qualification of welders.

The calculations revealed that there are significant differences in cost formation among different welding processes, particularly in the case of overlay welding. Especially with the CMT process, a very high weld metal deposition rate could be achieved with relatively low heat input. A notable observation was that, although utilizing automation might not generally be profitable with such a low number of machine hours, in this case, given the use of a significantly expensive filler material and the ability to utilize the process's characteristic low heat input, it would become profitable even with this low utilization rate.

Keywords/tags (subjects)

Welding, development of quality, manual welding, robotic welding, MIG/MAG welding, CMT welding, overlay welding

Miscellaneous (Confidential information)

Attachments 1-6 are confidential and have been removed from public work. The basis for confidentiality is the Act on the Openness of Government Activities 621/1999 24§, paragraph 17, business or professional secret of the company. The confidentiality period is ten (10) years, the confidentiality ends on 5. June 2034.

Sisältö

1	Johdanto	4
2	Työn tausta ja tavoitteet	5
2.1	Ongelman kuvaus ja tämänhetkinen tilanne	5
2.2	Sisä-Savon Pipe & Welding Service Oy (PWS Oy).....	6
2.3	Työn rakenne.....	6
2.4	Tutkimusmenetelmä	7
3	Tietoperusta	8
3.1	Hitsaus.....	8
3.2	Yleiskatsaus yrityksen käytössä oleviin hitsausprosesseihin	8
3.2.1	Puikkohitsaus	8
3.2.2	TIG-hitsaus	10
3.2.3	MIG/MAG-hitsaus.....	11
3.2.4	Lisäaineen siirtyminen ja kaarityypit MIG/MAG-hitsauksessa	12
3.3	Päällehitsaus.....	13
3.4	Hitsiaineen sekoittumisen mittaaminen	15
3.5	Päällehitsausprosessit	16
3.6	Työturvallisuus hitsauksessa	22
3.7	Hitsauskustannukset	24
3.8	Robottiaseman investointi	32
3.9	Hitsausohjeet	34
4	Valmistuksen nykytila	38
4.1	Vuosittaiset tuotantomäärät ja ajat.....	38
4.2	Valmistusprosessin kuvaus.....	38
5	Toteutus ja tulokset	39
5.1	Päällehitsauksen testit ja tulokset	40
5.2	Tarvittavat menetelmäkokeet ja hitsausohjeet	44
5.3	Henkilöstön koulutus ja pätevyyskokeet	46
5.4	Hitsauskustannusten laskenta	47
6	Kustannuslaskennan tulokset	51
7	Pohdinta	55
	Lähteet	58
	Liitteet	60
	Liite 1. Hitsisaumojen pituudet ja railotyyppit manuaalihitsauksessa. (salainen).....	60

Liite 2. Hitsisaumojen pituudet ja railotyypit robotisoidussa hitsauksessa. (salainen)	61
Liite 3. Kustannusten muodostuminen manuaalihitsauksessa, prosesseilla TIG 141, MAG 135 ja puikko 111. (salainen)	62
Liite 4. Kustannusten muodostuminen manuaalihitsauksessa, prosesseilla TIG 141, MAG 135, MAG 136 ja MIG 131. (salainen)	63
Liite 5. Kustannusten muodostuminen prosesseilla TIG 141, MAG 135, MAG 136 ja CMT-robotti. (salainen)	64
Liite 6. Kustannusten muodostuminen prosesseilla TIG 141, MAG 135 ja robotti CMT + robotti MAG 135. (salainen)	65

Kuviot

Kuvio 1. Toimintatutkimuksen syklistyys (Kananen 2014, 13).....	7
Kuvio 2. Aineen siirtyminen puikkohitsauksessa (Lukkari 2002, 88).....	9
Kuvio 3. Eri kaarityyppien virta – jännite alueet (Raekorpi 2023, 12).....	13
Kuvio 4. Sekoittumisaste. (Kansainvälisen hitsaajan IW koulutus, 19).....	16
Kuvio 5. Makrohie CMT-hitsauksesta (Vainikka 2024).....	20
Kuvio 6. Mikrohie CMT-hitsauksesta (Vainikka 2024).....	20
Kuvio 7. CMT kierto (Fronius 2022,4)	22
Kuvio 8. CMT-prosessilla pinnoitettuja lämpökattilan osia (Vainikka 2024).....	22
Kuvio 9. Hitsauskustannusten muodostuminen MIG/MAG-hitsauksessa (Lukkari 2011, 2).....	26
Kuvio 10. Hitsiainetuotto hitsausvirran ja langan paksuuden suhteen umpilankahitsauksessa (Penttilä 2023b, 35).....	28
Kuvio 11. Hitsiainetuottoarvoja MAG rutiilitäytelankahitsaukseen (Lukkari 2022, 3).....	28
Kuvio 12. Kustannusten jakautuminen MAG-pienahitsauksessa (Lukkari 2011, 4).....	32
Kuvio 13. Hitsausrobottiaseman investoinnin vaiheistus (Penttilä & Hiltunen, 2022, 31).....	33
Kuvio 14. Kulkukaavio hitsausohjeiden laatimiseen (SFS-EN ISO 15607:2019, 14).....	35
Kuvio 15. XRF-analysaattori	41
Kuvio 16. Päällehitsaus Mison Ar suojakaasulla.....	43
Kuvio 17. Päällehitsaus SK2 suojakaasulla.....	43
Kuvio 18. Päällehitsaus Varigon He50 kaasulla.....	43
Kuvio 19. Päällehitsaus puikkohitsauksella.....	44
Kuvio 20. Putkikoekappale läpihitsatulle päittäisliitokselle (SFS-EN ISO 15614-1:2017 + A1:2019, 11)	45
Kuvio 21. Päällehitsauksen koekappaleen mitoitus (SFS-EN ISO 15614-7:2019, 11).....	45
Kuvio 22. Eri hitsausvariaatioiden kustannusjakaumat prosessikohtaisesti	51
Kuvio 23. Päällehitsauksen osakustannuksien kustannusjakaumat.....	52

Kuvio 24. Kokonaishitsaustyöaika vuositasolla.....	53
Kuvio 25. Hitsauksen kokonaiskustannusten muodostumisen vertailu eri variaatioiden välillä.	54

Taulukot

Taulukko 1. Hitsausenergia- ja välipalkolämpötilasuositukset eräille nikkeliseoksille (Lukkari ym. 2019, 144).	15
Taulukko 2. Kaarihitsausprosessien soveltuvuus eräille nikkeliseoksille (Lukkari ym. 2019, 143).	17
Taulukko 3. Hitsin sekoittumisasteita puikkohitsauksessa nikkeliseosteisilla lisäaineilla hitsattaessa (Lukkari ym. 2019, 148).....	18
Taulukko 4. Sekoittumisaste eri suojakaasuilla ja prosesseilla (Vainikka 2024).....	21
Taulukko 5. Hitsiainemäärät pienahitseissa (Valtanen 2016, 947).....	27
Taulukko 6. Hitsiainemäärät v-railoissa (Valtanen 2016, 946).	27
Taulukko 7. Hitsiaineen tuotto- ja kulutusarvoja MAG umpilankahitsaukseen (Valtanen 2016, 948).	29
Taulukko 8. Hitsausohjeiden hyväksymistavat (SFS-EN ISO 15607:2019, 8).....	36
Taulukko 9. Hitsausohjeen hyväksymistä koskevat vaiheet (SFS-EN ISO 15607:2019).....	36
Taulukko 10. Koekappaleiden tarkastus. (SFS-EN ISO 15614-7:2019, s.12)	37
Taulukko 11. Hitsiaineen sekoittuminen ja käytetyt parametrit koehitseissä.	41
Taulukko 12. Lisäaineryhmien kattavuusalueet (SFS-EN ISO 9606-1:2017, 15).....	46
Taulukko 13. Investointikustannukset.....	50

1 Johdanto

Kilpailukyvyyn ylläpitäminen konepajateollisuudessa, kuten muillakin teollisuuden aloilla on elintärkeää alati kiristyvässä yritysten välisessä kilpailussa. Yritys voi luoda itselleen edellytyksiä pärjätä kilpailussa muiden alan toimijoiden kanssa mm. laadun avulla. Hyvällä ja luotettavalla laadulla voidaan ylläpitää asiakkaiden ja yhteistyökumppaneiden tyytyväisyys tuotteeseen tai palveluun ja voidaan solmia mahdollisesti pitkiäkin toimitussuhteita sekä hankki uusia asiakkaita. Laadun mittareina voidaan käyttää esim. asiakastyytyväisyyttä, palautteiden ja reklamaatioiden määrää, tuotannossa syntyvien tuotepoikkeamien määrää, tuotteiden käyttöikää yms. Laadun tunnistamisen ja kehittämisen tueksi on olemassa paljon erilaisia maailmanlaajuisia standardeja, joista tunnetuimmat ovat ISO 9001 laadunhallintajärjestelmä, ISO 14001 Ympäristöjärjestelmä ja ISO 45001 Työterveys- ja työturvallisuusjärjestelmä. Eri teollisuuden aloille on luotu lisäksi lukemattomat määrät erilaisia alakohtaisia standardeja, joista esimerkkinä hitsaavan teollisuuden merkittävimmät laatustandardit EN ISO 3834 Hitsauksen laadunvarmistus sekä kantavien teräs- ja alumiinirakenteiden standardi EN ISO 1090.

Toinen merkittävä kilpailukyvyyn ylläpitoon ja parantamiseen vaikuttava tekijä on kustannusten hallinta. Tuotteen kustannuksiin voidaan vaikuttaa mm. pienentämällä tuotteen välittömistä- ja välillisistä kustannuksista koostuvia valmistuskustannuksia. Välittömät kustannukset koostuvat pääasiassa materiaalikustannuksista ja työkustannuksista ja välilliset kustannukset puolestaan ovat usean eri laskentakohteen yleiskustannuksia, kuten esim. kone- ja kalustokustannuksia tai hallinnon ja markkinoinnin aiheuttamia kustannuksia.

Tässä opinnäytetyössä on tavoitteena parantaa toimeksiantajayrityksen, Sisä-Savon Pipe & Welding Service Oy:n kilpailukykyä kehittämällä tuotannon hitsaustyön laatua sekä kustannustehokkuutta hitsausprosesseja kehittämällä. Lisäksi prosessien kehityksellä on suuri merkitys työergonomiaan, työturvallisuuteen, työnteon mielekkyyteen ja eteenkin työssä viihtymiseen, joka on suuri haaste nykypäivänä.

Työssä perehdytään eri hitsausprosessien käyttömahdollisuuksiin yrityksen tuotantoa silmällä pitäen ja tehdään parhaiten valmistukseen soveltuvalla prosessilla hitsauskokeita ja testejä. Tämän jälkeen voidaan testeistä saatujen tietojen ja aiheeseen liittyvän aiemman tutkimuksen perusteella tehdä alustavat hitsausohjeet sekä suorittaa hitsauskustannusten laskenta. Laskennan tulosten

perusteella päästään vertailemaan vaihtoehtoisten prosessien kustannusjakaumaa tällä hetkellä käytössä oleviin prosesseihin. Työ tehdään esitutkimuksellisella otteella, josta saatuja tuloksia toimeksiantajayritys voi hyödyntää projektin seuraavissa vaiheissa ja mahdollisia investointipäätöksiä tehdessään. Työssä perehdytään myös uusien hitsausprosessien käyttöönottoon liittyviin toimenpiteisiin, kuten tarvittavien menetelmäkokeiden suoritukseen ja hitsaajien pätevöintiin kyseisille prosesseille.

2 Työn tausta ja tavoitteet

2.1 Ongelman kuvaus ja tämänhetkinen tilanne

Yrityksessä on valmistettu erilaisia painelaitteita kuten voimalaitoskattiloiden komponentteja, putkistoja, tulistimia yms. jo yli 25 vuotta. Uusia tuotteita on tullut valmistukseen ajoittain ja joitain pitkäaikaisessa tuotannossa olevia tuotteita ja niiden valmistusta on kehitetty vuosien saatossa jonkin verran, mutta valmistusmenetelmät eivät ole kokeneet kovin suuria uudistuksia vuosien varrella. Kehitystyötä on toki ollut jonkin verran osavalmistuksen ja kokoonpanon suhteen, mutta hitsaustyön osalta on toimittu hyvin pitkälti samoilla menetelmillä.

Kilpailukyvyyn säilyttämiseksi ja laadun parantamiseksi yrityksessä päätettiin lähteä selvittämään valmistuksen kehittämismahdollisuuksia. Joidenkin jatkuvassa valmistuksessa olevien tuotteiden valmistuskustannuksia tarkasteltaessa selviää, että hitsaustyö ja lisäainekustannukset muodostavat hyvin merkittävän osuuden näiden tuotteiden kokonaiskustannuksista, joten näiden kustannusten vähentämisellä jo pienissä määrin voidaan saavuttaa vuositasolla merkittäviäkin säästöjä.

Tutkimuksella haetaan vastauksia kysymyksiin, joita ovat:

- Kuinka suuret ovat hitsauksen aiheuttamat osa- ja kokonaiskustannukset tuotteen valmistuksessa tällä hetkellä?
- Millä kustannusrakenteen muutoksilla ja mitä osakustannuksia pienentämällä valmistuksesta saadaan tuottavampaa?
- Mitä vaihtoehtoisia hitsausmenetelmiä tuotteen valmistuksessa voi käyttää ja pystyykö robotisoitua hitsausta hyödyntämään valmistuksessa?

- Millaisia vaikutuksia uusilla menetelmillä on mm. valmistuskustannuksiin, laatuun ja työturvallisuuteen?
- Mitä toimenpiteitä uusien menetelmien käyttöönotto edellyttää yritykseltä?

2.2 Sisä-Savon Pipe & Welding Service Oy (PWS Oy)

Opinnäytetyön toimeksiantajayritys on putkitaivutuksiin ja hitsaukseen sekä erilaisiin kattila- ja voimalaitosteollisuuden paineenalaisiin kokoonpanoihin erikoistunut alihankintakonepaja nimeltään Sisä-Savon Pipe & Welding Service Oy. Yrityksen henkilöstövahvuus on tällä hetkellä 20 henkilöä ja konepaja on kooltaan noin 2700 m². Yritys on toiminut vuodesta 1997 alkaen ja sen toimipiste sijaitsee Varkaudessa. Yrityksen konekantaan kuuluu mm. kaksi putkentaivutuskonetta kokoluokalle 21,3–114,3 mm, hydraulinen puristin, TIG, - MIG/MAG- ja puikkohitsauskoneita, kaksi lämpökäsittelyuunia, putkien viisteytyskoneita, metallisahoja ym. Eri projekteissa tarvittavat levytyöt, koneistukset, tarkastukset yms. ostetaan alihankintana. Henkilöstön työkokemus alalta vaihtelee muutamasta vuodesta reilusti yli 30 vuoden kokemukseen saakka. Yrityksellä ei ole tällä hetkellä omaa suunnitteluosastoa vaan eri projekteihin liittyvän suunnittelutyön toteuttaa, joko asiakasyritys tai tarvittaessa suunnittelu voidaan ostaa ulkopuoliselta yritykseltä.

2.3 Työn rakenne

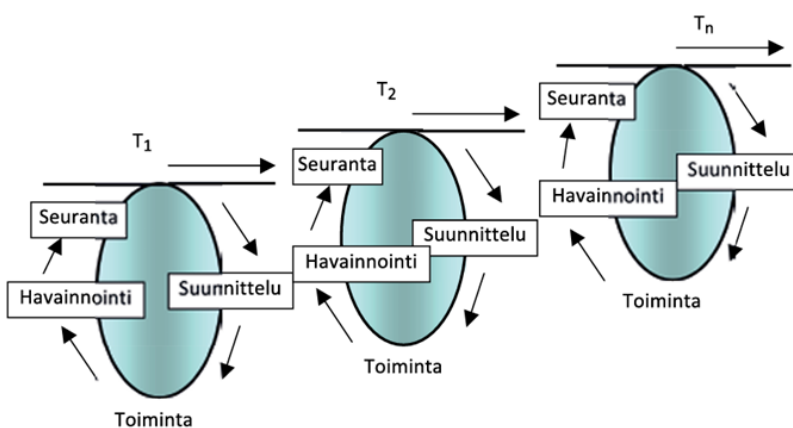
Opinnäytetyö jakautuu pääasiassa seuraaviin pääkohtiin. Työn aluksi on pieni yleiskatsaus yrityksen toimintaan ja siellä valmistettaviin tuotteisiin, sekä kehittämistehtävän määrittely ja työssä käytettävän tutkimusmenetelmän kuvaus. Seuraavaksi tutustutaan kirjallisuudesta, artikkeleista ja erilaisista sähköisistä lähteistä koostuvaan hitsausta käsittelevään lähdeaineistoon tällä hetkellä yrityksen käytössä olevien ja uusien käyttöön otettavien hitsausprosessien osalta, perehdytään hitsauskustannusten muodostumiseen ja niiden laskentaan sekä painelaitevalmistuksessa käytettävien hitsausohjeiden hyväksymismenettelyyn. Työn toteutusosiossa kuvataan ensin valmistuksen nykytilaa, jonka jälkeen selvitetään uusien prosessien käyttöönottoon liittyviä toimia käytännön testausten ja hitsausohjeisiin liittyvien asioiden, kuten menetelmäkokeiden ja henkilöstön koulutuksen ja pätevöinnin osalta. Testausten ja alustavien hitsausohjeiden pohjalta tehdään laskelmia hitsauskustannuksista tämänhetkisten ja vaihtoehtoisten prosessien osalta. Kustannuslaskelmien perusteella voidaan myöhemmin tehdä jatkosuunnitelmia mahdollisista tulevista investoinneista ja kehityssuunnista.

2.4 Tutkimusmenetelmä

Tutkimusmenetelmäksi tämän tyyppiseen opinnäytetyöhön, jossa toimitaan hyvin läheisesti tuotteen valmistusmenetelmien ja valmistuksen parissa työskentelevien ihmisten kanssa, soveltuu parhaiten kehittämistutkimus tai toimintatutkimus, joka on kehittämistutkimuksen yksi muoto. Näitä menetelmiä hyödyntäen pystytään keskittymään käytännön työelämän ongelmiin, niiden tiedostamiseen ja niiden poistamiseen toimintatapoja kehittämällä. Kehittämistutkimus ja toimintatutkimus ovat hyvin samantyyppisiä tutkimusmuotoja, sillä erotuksella, että toimintatutkimuksessa tutkimuksen tekijä osallistuu itse myös kehitystyöhön, kun taas kehittämistutkimuksessa tutkija toimii ikään kuin ulkopuolisena tutkijana. Toimintatutkimuksessa toteutuvat samalla kertaa sekä kehittäminen että tutkiminen, jonka ansiosta kehitystyön läpivientiaika lyhenee huomattavasti. (Kananen 2009, 7–10.)

Toimintatutkimuksessa on kyseessä ennemminkin tutkimusstrategia, eli sekoitus eri tutkimusmenetelmiä, toteaa Kananen (2009, 11). Toimintatutkimuksen tutkimusote ei myöskään sulje pois muiden tutkimusotteiden tiedonkeruu- ja aineiston analysointimenetelmien hyödyntämistä tutkimuksessa

Toimintatutkimus on jatkuvaan muutokseen ja kehittämiseen tähtäävä syklinen prosessi, jota on kuvattu kuvion 1 avulla.



Kuvio 1. Toimintatutkimuksen syklisyys (Kananen 2014, 13).

Omassa työssäni toimin hyvin läheisesti valmistusprosessien ja tuotannon henkilöstön parissa ja osallistun kehitysprosessiin aktiivisesti, joten luontevin tutkimusmenetelmä on toimintatutkimus. Työn tavoitteena on käytännön toiminnan kehittäminen, jonka tuloksena syntyy konkreettinen tuotos, joka vastaa suoraan työelämän tarpeisiin.

3 Tietoperusta

3.1 Hitsaus

Standardin SFS 3052:2020 (Hitsaussanasto. Yleistermi) määritelmän mukaan ”Hitsaus on liitosmenetelmä, jossa osia liitetään lisäaineen avulla tai ilman lisäainetta käyttämällä hyväksi lämpöä ja/tai puristusta siten, että osien välillä on jatkuva yhteys”. Hitsausprosesseja voidaan soveltaa myös päällystämiseen ja uudelleensulattamiseen. Vaikka päällystäminen ei täytä täysin standardin asettamia hitsauksen kriteerejä (ei liitetä osia toisiinsa), on kyse silti yhtä lailla hitsauksesta. Tällöin käytetään termiä päällehitsaus.

Hitsaus on tärkein eri metallien ja metalliseosten liittämismenetelmä, johon on kehitetty hyvin paljon erilaisia hitsausprosesseja ja menetelmiä. Hitsauksessa käytettävän lisäaineen sulamispisteen tulee olla samaa suuruusluokkaa liitettävän perusaineen sulamispisteen kanssa. Hitsausta voidaan käyttää lisäksi mm. muovien ja keraamien liittämiseen. (Lukkari 2002, 11.)

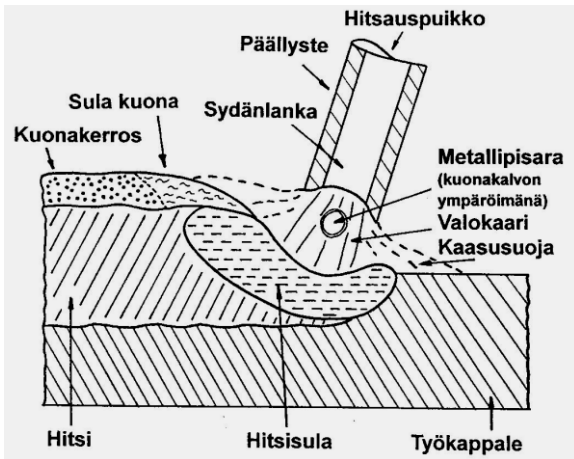
Tässä opinnäytetyössä käsitellään kaarihitsauksen eri prosessien soveltamista ja soveltuvuutta erityyppisten liitosmuotojen ja päällehitsauksen osalta.

3.2 Yleiskatsaus yrityksen käytössä oleviin hitsausprosesseihin

3.2.1 Puikkohitsaus

Puikkohitsaus, jota kutsutaan myös nimellä MMA (Manual Metal Arc welding), on ilman suojakaasuton metallikaarihitsausprosessi, jonka standardin SFS-EN ISO 4063 mukainen numerotunnus on 111. Puikkohitsausta käytetään pääasiassa terästen hitsaukseen, mutta se soveltuu laajasti muidenkin eri metallien ja seosten, kuten nikkelin, kuparin, valuraudan ja alumiinin hitsaukseen. Puikkohitsaus on edelleen hyvin yleisesti käytetty hitsausmenetelmä rakennusalalla, korjaustöissä, teollisessa valmistuksessa ja monissa muissa sovelluksissa, joissa tarvitaan luotettavaa laatua.

Periaate: Hitsauspuikon ja työkappaleen välille saadaan syntymään valoakaari sähkövirran avulla, jonka seurauksena hitsauspuikon sydänlanka ja pinnoite sulaa puikon kärjestä ja sula siirtyy valoakaaren läpi päällysteestä syntyvän kuonakalvon ympäröimänä pisaroina työkappaleen pinnassa olevaan sulaan muodostaen näin hitsisauman. Kuona jähmettyy jäähtyessään hitsin päälle kovaksi kerrokseksi, josta se lopuksi poistetaan. (Lukkari 2002, 88–89.) Kuviossa 2 on kuvattu puikkohitsauksessa tapahtuvaa aineensiirtymistä.



Kuvio 2. Aineen siirtyminen puikkohitsauksessa (Lukkari 2002, 88).

Puikon päällysteen ensisijaisena tehtävänä on suojata sulaa metallia ilmakehän epäpuhtauksilta. Tämän lisäksi päällysteellä on huomattava vaikutus puikon hitsausominaisuuksiin ja syttyvyyteen sekä syntyvän hitsin kemialliseen koostumukseen ja ominaisuuksiin. Päällyste voi koostua jopa 10–15 eri raaka-aineesta. Hitsauspuikot voidaan jakaa päällysteen koostumuksen perusteella neljään pääryhmään: emäs-, rutiili-, hapan- ja selluloosapäällyste. Lisäksi on olemassa näiden eri variaatioita. (Lukkari 2002, 97–101.)

Puikkohitsauksen etuja ovat mm. menetelmän joustavuus, hitsauslaitteiston yksinkertaisuus, parametrien säädön helppous, lisäainevalikoiman laajuus, hyvä ulottuvuus, toimintavarmuus ja hitsin laadukkuus. Huonoihin puoliin puolestaan lukeutuu huono tuottavuus, hankala mekanisoitavuus / automatisoitavuus, hitaus, puikkojen vaihdosta aiheutuvat jatkoskohdat hitsissä, korkeat ammattitaitovaatimukset, kuonan poistosta aiheutuva lisätyö, runsas savun muodostus ja lisäaineen kosteusarkuus. (Lukkari 2002, 91.) Puikkohitsauksen heikko lisäaineen tuotto on suurin syy, jonka vuoksi prosessi halutaan korvata parempituottoisella menetelmällä.

3.2.2 TIG-hitsaus

TIG- hitsaus on sulamattomalla elektrodilla tapahtuvaa kaasukaarihitsausta, jonka numerotunnus on 14, tästä yleisimmin käytetyt prosessit ovat TIG-umpilankahitsaus numero 141 ja lisäaineeton TIG-hitsaus, numero 142 (SFS-EN ISO 4063:2023, 6).

TIG-hitsausta käytetään sen synnyttämän hyvän ja puhtaan hitsin ansiosta paljon kohteissa, joissa laatu on ensisijaisen tärkeää, esim. paine- ja prosessiputkien valmistuksessa sekä ruostumattoman teräksen, alumiinin, titaanin ja kuparin hitsaukseen (Lukkari 2002, 255).

Periaate: Työkappaleen ja hitsaimessa olevan elektrodin välille synnytetään valokaari sähkövirran avulla. Sytytystapoja ovat raapaisu- sytytys, kontaktisytytys tai kipinäsytytys. Valokaari palaa hitsaimen syöttämän inertin suojakaasun (argon tai helium) ympäröimänä, joka estää sulan hapettumiselta. Valokaaren vaikutuksesta perusaineen pintaan saadaan syntymään hitsisula, johon syötetään lisäainetta joko manuaalisesti käsin tai mekanisoidusti. Hitsausvirta teräksiä hitsattaessa on pääsääntöisesti tasavirtaa ja elektrodi on kytketty miinusnapaan. Alumiinin hitsaus on suoritettava vaihtovirtaa käyttäen. TIG-hitsaus synnyttää yleensä merkityksettömän vähän huuruja teräksiä hitsattaessa. Sen sijaan ruostumattoman teräksen ja alumiinin hitsauksessa syntyy vaarallisia huuruja sekä merkittäviä määriä otsonia, jotka on otettava huomioon työturvallisuuden näkökulmasta. (Lukkari 2002, 249–254.)

TIG-hitsausta suoritetaan hyvin paljon manuaalisesti, mutta prosessi on myös helposti automatisoitavissa / mekanisoitavissa. Lisäksi on olemassa puoliautomaattisia sovelluksia, esim. Hitsauskonevalmistaja EWM:n kehittämä tigSpeed, jossa hitsaimen kuljetus suoritetaan manuaalisesti ja lisäainelangan syöttö hoidetaan langansyöttälaitteen avulla, jota ohjataan hitsaimessa olevalla kytkimellä. (EWM N.d.)

Prosessin etuja ovat mm. hitsaustapahtuman seurannan helppous ja hyvä hallittavuus, lisäaineetoman hitsauksen mahdollisuus, soveltuvuus ohuille ainevahvuuksille, syntyvän hitsin korkea metallurginen puhtausaste, hitsaushuurujen ja roiskeiden vähäisyys, vähäinen jälkikäsittelytarve, helppo säädettävyys ja lähes kaikkien metallien hitsauksen mahdollisuus. Huonoihin puoliin kuuluvat puolestaan hitaus paksujen railojen täyttöhitsauksessa, prosessin arkuus vedolle ja epäpuhtauksille sekä juuren puolen suojauksen tarve mm. ruostumattomilla materiaaleilla. (Lukkari 2002, 257.)

3.2.3 MIG/MAG-hitsaus

MIG/MAG-hitsaus kuuluu metallikaasukaarihitsauksen alaryhmään, jonka numerotunnus on 13. Ryhmä jaetaan kuuteen eri prosessiin: 131; MIG-umpilankahitsaus, 132; MIG-jauhetäytelankahitsaus, 133; MIG-metallitäytelankahitsaus, 135; MAG-umpilankahitsaus, 136; MAG-jauhetäytelankahitsaus ja 138; MAG-metallitäytelankahitsaus. (SFS-EN ISO 4063:2023, 6.)

MIG/MAG-hitsauksessa sähkövirran synnyttämän valokaaren vaikutuksesta saadaan aikaan lisäainelangan sulaminen ja sulapisaroiden siirtyminen perusaineen pinnassa olevaan sulaan. Valokaari palaa hitsisulaa hapettumiselta estävän suojakaasun ympäröimänä. Suojakaasu on MAG-hitsausprosessissa aktiivista, eli sulan kanssa reagoivaa ja MIG-hitsausprosessissa passiivista, eli reagoimattomaa kaasua. MAG-prosessia käytetään pääasiassa terästen hitsaukseen ja MIG-prosessia pääasiassa ei-rautametallien hitsaukseen. Lisäainelangan syöttö tapahtuu automaattisesti langansyöttölaitteen avulla. Hitsauskoneen virtalähde on ns. vakiojännitevirtalähde, joka tarkoittaa, että hitsauksen aikana jännite pysyy lähes vakiona ja hitsausvirta säätyy automaattisesti oikeassa suhteessa langansyöttönopeutta muutettaessa. Prosessin yksi hyvistä ominaisuuksista on ns. itsesäätvyvyys. Itsesäätvyvyys tarkoittaa lyhyesti laitteen kykyä säätää virran ja jännitteen suhdetta automaattisesti vapaalangan pituuden muuttuessa, jonka ansiosta valokaaren pituus saadaan pysymään lähes vakiona. (Lepola & Ylikangas 2021, 71–72.)

MIG/MAG-hitsauslaitteisto koostuu seuraavista neljästä pääosasta:

Virtalähde, joka muuntaa sähköverkosta saatavan sähkövirran prosessille soveltuvaksi hitsausvirraksi. Virtalähteet on tyypiltään nykyaikaisissa hitsauskoneissa invertteritekniikkaan perustuvia ja vanhemmissa vakiojännitteisiä tasasuuntaajia.

Langansyöttölaite, jonka tehtävä on siirtää lisäainelankaa halutulla nopeudella hitsisulaan. Laitteiston keskeisimpiä osia ovat lankakelan kannatin, kitkajarru, langansyöttömoottori, syöttöpyörästö, monitoimijohto ja hitsauspistooli.

Suojakaasulaitteisto, joka kuljettaa suojakaasun joko pullosta tai kaasunjakeluverkosta paineenalennusventtiiliin, magneettiventtiiliin, monitoimijohdon, hitsauspistoolin ja kaasusuuttimen välityksellä suojaamaan hitsisulaa.

Hitsauspistooli, jonka välityksellä ohjataan koneen toimintaa, sekä siirretään hitsausvirta virtasuuttimen välityksellä lisäainelankaan sekä ohjataan lisäaine hitsisulaan. Pistooleja on sekä kaasua että nestejäähdytteisiä. (Lepola & Ylikangas 2021, 71–77.)

3.2.4 Lisäaineen siirtyminen ja kaarityypit MIG/MAG-hitsauksessa

Lisäaineen siirtyminen perusaineen sulaan tapahtuu pieninä sulapisaroina. Siirtymismekanismiin, joka on joko suihkumaista tai oikosulkuihin perustuvaa vaikuttaa eri tekijät, kuten vallitsevat virta- ja jännitearvot, lisäaine, käytetty suojakaasu jne. (Lukkari 2002, 165–167.)

Aineensiirtymistapa määrittää eri kaarityypit, joita ovat:

Lyhytkaarihitsaus, jossa aineensiirtyminen tapahtuu oikosulkujen avulla käytettäessä pieniä hitsausparametrejä. Oikosulkujen taajuuteen, joka on noin 30–200 kertaa sekunnissa vaikuttaa virta, jännite, induktanssi ja suojakaasu. Oikosulun aikana valokaari sammuu ja virta alkaa kasvamaan, tämä saa aikaan langan pään kuroutumisen sulaessaan ja sulapisaran irtoamisen langan päästä. Tämän jälkeen valokaari taas syttyy. (Lukkari 2002, 168–169.)

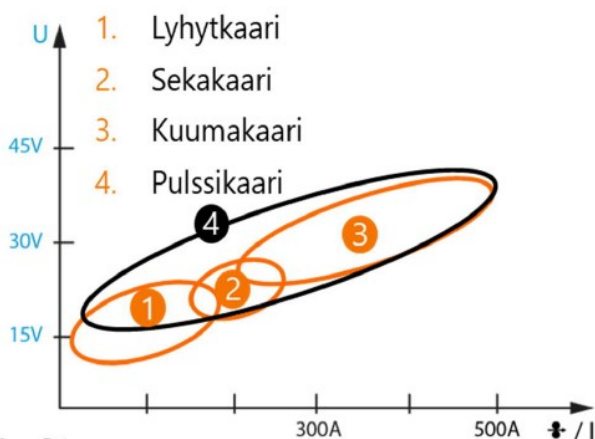
Sekakaarihitsaus on lyhytkaari- ja kuumakaarialueiden välimaastossa oleva alue, joka on näiden kahden yhdistelmä. Tässä tapahtuu sekä oikosulkuja, että suihkumaista siirtymistä. Syntyvät sulapisarot ovat suuria, joista aiheutuu paljon roiskeita. Yleensä tätä kaarialuetta pyritään välttämään. (Lukkari 2002, 169–170.)

Kuumakaari, jossa lisäaine siirtyminen hyvin pieninä pisaroina suihkumaisesti ja ilman oikosulkuja saadaan aikaan käyttämällä riittävän suurta hitsausvirtaa sekä soveltuvaa suojakaasua. Sulapisaran irtoaminen ennen oikosulkeutumista tapahtuu suuren valokaaren tehon ja langan päästä sulapisaran irti kurovan sähkömagneettisen pinch-voiman ansiosta. (Lukkari 2002, 169.)

Pulssikaari, on kaarityyppi, jossa saadaan aikaan kuumakaarelle tyypillinen suihkumainen oikosuluton ja roiskeeton aineensiirtyminen virtapulssien avulla. Tämän menetelmän ansiosta voidaan hitata roiskeettomasti kaikkien kaarityyppien tehoalueilla. (Lukkari 2002, 171.) Pulssikaareissa virtaa pulssitetaan siten, että jokaisen huippuvirtapulssin ansiosta langan päästä saadaan sulaan siirtymään sulapisara ilman oikosulkuja. Perusvirtatason avulla ylläpidetään valokaarta, joka pitää

langan pään sekä perusaineen sulana. Roiskeettomuuden lisäksi suurimpina etuina ovat hyvä hitsin ulkonäkö, suuri hitsausnopeus lyhytkaareen verrattuna, pieni hitsausenergia verrattuna kuumakaareen jne. Pulssihitsaus soveltuu hyvin kaikille yleisimmille materiaaleille. Sitä käytetään paljon ruostumattomien terästen sekä alumiinin hitsaukseen. Prosessi helpottaa myös mm. nikkeliseosten ja muiden hankalasti hitsattavien seosten hitsaamista ja aikaansaa näihin paremman hitsin ulkonäön. (Lepola & Ylikangas 2021, 82.) Pulssikaarihitsauksesta on kehitetty useita erilaisia modifioituja prosessivariaatioita, joissa kaaren ominaisuuksiin vaikutetaan pulssikäyrän muokkauksella. Näin saadaan parannettua erilaisia ominaisuuksia, kuten esim. pienennettyä lämmöntuottoa ja parannettua hitsausominaisuuksia hankalasti hitsattaville lisäaineille. Edellä mainittujen hyvien ominaisuuksien takia prosessia sovelletaan myös tähän työhön liittyvässä päällehitsauksessa, sekä robotisoidussa MAG-hitsauksessa.

Kuviossa 3 on esitetty eri kaarityypeille ominaiset virta – jännite alueet. Kuvioista näkyy kuinka pulssikaari kattaa kaikkien kaarityyppien alueen ja on näin ollen sovellettavissa kaikkien kaarityyppien virta alueilla. Suurin hyöty pulssikaarella saavutetaan sekakaarialueella, jossa päästään eroon alueelle tyypillisestä roiskeisuudesta.



Kuvio 3. Eri kaarityyppien virta – jännite alueet (Raekorpi 2023, 12).

3.3 Päällehitsaus

Päällehitsaus, josta käytetään myös nimitystä pinnoitushitsaus ja englanninkielisiä nimityksiä cladding, surfacing ja coating, tarkoittaa standardin SFS 3052:2020 mukaan hitsausmenetelmää, jossa perusaineen pinta päällystetään hitsaamalla. Päällehitsauksella voidaan parantaa kappaleen

pintakerroksen korroosion, syöpmisen tai hapettumisen kestoa, kovuusominaisuuksia, kulumiskestävyyttä ja liukuominaisuuksia. Lisäksi päällehitsausta käytetään myös pintakulumien täyttöhitsaukseen, jolla pyritään saamaan kappale haluttuihin mittoihin ja muotoon. (Penttilä 2023, 3.) Välikerroshitsaus eli bufferointi luokitellaan myös päällehitsaukseksi. Tämän menetelmän tarkoituksena on saada aikaan kappaleen pintaan hitsaamalla sellaiset ominaisuudet, jonka päälle voidaan hitsata tavoiteltavilta ominaisuuksilta oleva hitsi. Tätä menetelmää voidaan käyttää esim. eristämään perusaine varsinaisesta pinnoituskerroksesta sekoittumisen estämiseksi. Käytettävän hitsauslisäaineen valinta riippuu tavoiteltavasta ominaisuudesta. (Kyröläinen & Lukkari 1999, 286.)

Päällehitsauksessa on tärkeää saavuttaa syntyvään hitsiaineeseen vaadittu kemiallinen koostumus. Liiallisen sekoittumisen estämiseksi on hitsin tunkeuma pidettävä mahdollisimman pienenä, jotta perusaineen sekoittuminen hitsiaineeseen olisi vähäistä ja hitsiaineen ominaisuudet muuttuisivat mahdollisimman vähän alkuperäisestä. Usein tuotteelta vaaditut ominaisuudet tai tilaajan vaatimukset voivat olla sallitun ferriittipitoisuuden suhteen niin tiukat (esim. < 5 %), että ominaisuuksien saavuttaminen voi edellyttää erikoisprosessien käyttöä tai/ ja useita päällekkäisiä kerroksia, tämä tulee kyseeseen eteenkin puikkohitsauksessa, jossa sekoittuminen on suurta. (Lukkari, Kyröläinen & Kauppi 2019, 147–148.) Tässä opinnäytetyössä käsiteltävän päällehitsauksen laatuvaatimusten suhteen ei tällä hetkellä ole tiukkoja erikoisvaatimuksia, mutta prosessin ja suojaakaasun valinnalla sekä muilla vaikuttavilla tekijöillä pyritään saamaan sekoittumisaste lähtötilannetta pienemmäksi.

Nikkeliseoksia hitsattaessa on lämmöntuontia rajoitettava, jotta sekoittuminen olisi mahdollisimman vähäistä ja kuumahalkeiluriski pienempi, rajoittamisella saadaan estettyä myös haitallista rae-koon kasvua muutosvyöhykkeellä (Lukkari ym. 2019, 144). Taulukossa 1 on esitetty prosessikohtaisia hitsausenergian ja välipalkolämpötilan ylärajoja erityyppisten nikkeliseosten hitsaukseen. Myös tässä opinnäytetyössä tutkittavan päällehitsauksen osalta on sekoittumisasteen ja lämmöntuonnin minimointiin kiinnitettävä erityistä huomiota, koska käytettävä hitsauslisäaine on hyvin paljon nikkeliä sisältävä.

Taulukko 1. Hitsausenergia- ja välipalkolämpötilasuositukset eräille nikkelseoksille (Lukkari ym. 2019, 144).

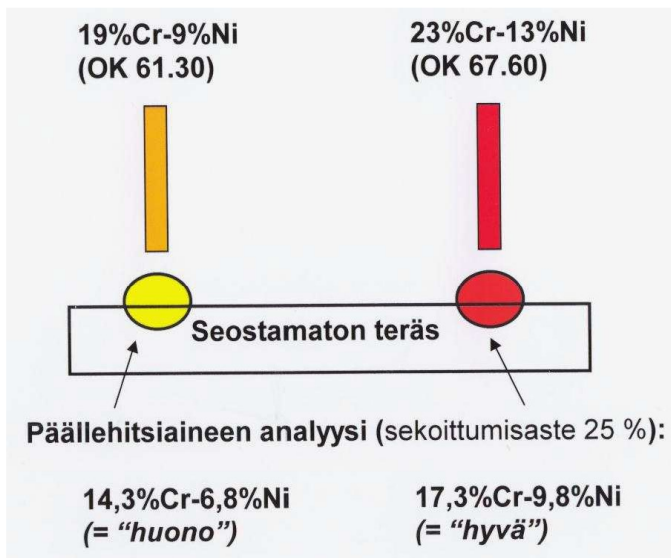
Seos, alloy ja (ainesnumero)	Hitsausprosessi ja hitsausenergia (kJ/cm)					Välipalko- lämpötila (°C) max
	TIG max	Kuumalanka-TIG max	Plasma max	MIG max	Puikko max	
Alloy 400 (2.4360)	8	6	10	11	7	150
Alloy 600 (2.4816)	10	6	11	7	7	"
Alloy 825 (2.4858)	10	6	10	11	7	"
Alloy 59 (2.4605)	8	6	10	8	7	"
Alloy C-4 (2.4610)	8	6	10	11	7	"
Alloy C-276 (2.4819)	8	6	10	11	7	"
Alloy C-22 (2.4602)	8	6	10	11	7	"

3.4 Hitsiaineen sekoittumisen mittaus

Hitsin sekoittumisastetta voidaan analysoida mm. ainetta tuhoamattoman röntgenfluoresenssi säteilyä mittaavan XRF-analysointilaitteen (X-Ray Fluorescence) avulla. Mittaus perustuu jokaiselle alkuaineelle ominaisen fluoresenssisäteilyn mittaamiseen, jota saadaan emittoitumaan näytteestä kiihdytettäessä sitä röntgenlähteellä. Mittauksen perusteella analysointilaitteella pystyy määrittämään materiaalin sisältämät alkuaineet ja niiden pitoisuudet. Analysoitavat näytteet voivat olla kiinteitä, jauhemaisia tai nestemäisiä. Mittalaitteita on kannettavia, jotka soveltuvat erityisesti kenttäkäyttöön sekä pöytämalleja. Huomioitavaa on, että XRF-analysointilaitteella ei pystytä mittaamaan hiilipitoisuutta. (Holger Hartmann Oy n.d.) Päällehitsauksen sekoittumissuhteen mittaukset suoritettiin tässä työssä hitsatuista koekappaleista Hitachin X-MET8000 XRF-analysointilaitteella.

Toinen yleisesti käytetty mittausmenetelmä on OES, eli optinen emissiospektrometria. Analysointilaitteen toiminta perustuu hetkellisesti virittyneiden alkuaineiden elektronien lähettämän heikon valon aallonpituuksien mittaamiseen ja prosessoimiseen. Alkuaineiden virittyminen ja valon emittoituminen saadaan aikaan, höyrystämällä koekappaleen pinnasta pieni määrä materiaalia analysointilaitteen mittapäässä valokaaren tai kipinän avulla. Mittausinformaatio esitetään kunkin alkuaineen prosenttiosuuksina. Menetelmä on nopea (2–3 min) ja tarkka, mittaustarkkuus 0,001 %. Tällä menetelmällä ei voida mitata kaasumaisia elementtejä ja näytteen on oltava sähköä johtava. (Hiltunen 2023, 38–39.)

Kuviossa 4, esitetään sekoittumisasteen vaikutusta hitsin kemialliseen koostumukseen normaalilla sekä yliseostetulla ruostumattomalla lisäaineella.



Kuvio 4. Sekoittumisaste. (Kansainvälisen hitsaajan IW koulutus, 19)

3.5 Päällehitsausprosessit

Päällehitsausta voidaan suorittaa periaatteessa lähes kaikilla ainetta lisäävillä hitsausprosesseilla. Yleisesti päällehitsauksessa käytetään etenkin suurilla pinnoitettavilla alueilla prosesseja, joiden lisäaineentuotto on suuri. Yleisimpiä suurille pinta-aloille käytettäviä prosesseja ovat jauhekaarihitsauksen eri sovellutukset. Alla luetteloitu yleisimpiä päällehitsauksessa käytettäviä hitsausprosesseja:

- MIG/MAG-hitsaus umpilangalla ja täytelangalla
- puikkohitsaus
- SAW, jauhekaarihitsaus langalla, nauhalla tai kuonahitsauksena
- TIG-hitsaus, sekä manuaalisesti, että isommissa kohteissa mekanisoituna
- dynaamiseen tai passiiviseen lisäaineen syöttöön perustuva laserhitsaus
- kaasuhitsaus (kovajuotto)

(Penttilä 2023a, 11).

Tässä opinnäytetyössä kehitettävän tuotteen muotoilun, tuotantomäärän ja laadun (sekoittumisaste) asettamien rajoitusten takia jauhekaari-, laser- ja kaasuhitsaus joudutaan soveltumattomuuden vuoksi jättämään heti alkuvaiheessa tarkastelun ulkopuolelle. Jäljelle jäävistä vaihtoehdoista tiedetään aiemmin hankitun kokemuksen ja aiheesta löytyvän tiedon perusteella puikkohitsauksen

(joka on käytössä tällä hetkellä) ja MIG/MAG-hitsauksen soveltuvan hyvin kyseisen tuotteen valmistukseen ja käytettävälle lisäaineelle. Mekanisoidun TIG-hitsausprosessin soveltaminen olisi mahdollista osaan pinnoitettavasta pinta-alasta, mutta joka kohtaan ei langansyöttölaitteella varustetulla hitsauspolttimella olisi mahdollisuuksia ulottua, jolloin kyseiset alueet olisi hitsattava täysin manuaalisesti. Taulukosta 2 nähdään eri kaarihitsausprosessien soveltuvuus erityyppisille nikkelseoksille.

Taulukko 2. Kaarihitsausprosessien soveltuvuus eräille nikkelseoksille (Lukkari ym. 2019, 143).

Seos	Puikko	Prosessi		
		TIG ja plasma	MIG	Jauhekaari
Puhdas nikkeli				
200	X	X	X	X
201	X	X	X	X
Liuoslujitetut nikkelseokset				
400	X	X	X	X
401	X	X	X	X
R-405	X	X	X	-
X	X	X	X	-
NICR 80	X	X	-	-
NICR 60	X	X	-	-
G	X	X	X	-
RA 333	-	X	-	-
600	X	X	X	X
606	X	X	X	X
625	X	X	X	X
20Cb3	X	X	X	X
800	X	X	X	X
825	X	X	X	-
B	X	X	X	-
C	X	X	X	-

Eri prosessivaihtoehtojen soveltuvuutta kyseiseen kohteeseen arvioitaessa, testattiin hitsausko- nevalmistaja EWM:n kehittämän EWM tigSpeed langansyöttölaitteella varustetun TIG-hitsausko- neen soveltuvuutta kohteen hitsaamiseen. Langansyöttölaitteen ominaisuuksiin kuuluvat kylmä- ja kuumalangansyöttö sekä dynaaminen langansyötön oskillointi, joiden ansiosta prosessilla ylletään valmistajan ja jälleenmyyjältä saamiene tietojen perusteella hitsausnopeuksissa ja sekoittuvuusas- teessa jopa MIG/MAG-prosessin tasolle (EWM). Haasteeksi prosessin käyttöön sulakourujen pääl- lehitsauksessa osoittautui aiemmin mainittu ulottuvuus ongelma, jonka vuoksi osa pinnoitetta- vasta alueesta jouduttaisiin hitsaamaan normaalilla TIG prosessilla. Tämä taas johtaisi valmistusajan pitenemiseen sekä sekoittumisasteen kohoamiseen näillä alueilla. Näistä syistä

prosessi rajattiin jo alkuvaiheessa pois. Työssä keskitytäänkin jatkossa pääasiassa MIG/MAG-hitsaukseen sekä sen vertailuun nyt käytössä olevaan puikkohitsauksen.

Puikkohitsaus päällehitsausprosessina:

Puikkohitsaus on paljon käytetty päällehitsausprosessi, jonka etuja ovat lisäainevalikoiman laajuus ja soveltuvuus monille perusaineille sekä lisäaineen helppo hankittavuus myös pieninä määrinä. Käytännöllisyytensä ansiosta sitä suositaan paljon työmailla suoritettavassa pinnoituksessa. Huonoja puolia ovat prosessille tyypilliset ominaisuudet, kuten pienestä tuotosta johtuva heikko kilpailukyky suuremmille pinnoitettaville alueille, suuri sekoittumisaste, ammattitaitovaatimukset, mekanisoinnin/ automatisoinnin vaikeus, hitsauksessa muodostuvat savut, huono työergonomia ym. (Penttilä 2023a, 5–6.) Nämä edellä mainitut huonot puolet tulevat kyseeseen myös tässä työssä käsiteltävän tuotteen päällehitsauksessa. Rajoittavana tekijänä prosessin käytölle joissain tapauksissa saattaa olla prosessille ominainen korkea sekoittumisaste. Taulukossa 3 on kuvattu sekoittumisesta aiheutuvaa ferriittipitoisuutta nikkeli-valtaisilla lisäaineilla hitsatessa. Jos pinnoitteelta vaadittu maksimi ferriittipitoisuus olisi esim. 5 % ja käytettävä lisäaine ENiCrMo-3, edellyttäisi tavoiteltavan sekoittumisasteen saavuttaminen taulukon arvojen perusteella, jopa kolme hitsikerrosta, joka taas lisäisi huomattavasti hitsausaikaa ja lisäainekustannuksia.

Taulukko 3. Hitsin sekoittumisasteita puikkohitsauksessa nikkeli-seosteisilla lisäaineilla hitsattaessa (Lukkari ym. 2019, 148).

Hitsauspuikko (AWS)	Palko No	Rauta-pitoisuus (Fe-%)
ENi-1 (Puhdas nikkeli)	1	35,2
	2	15,5
	3	4,6
ENiCu-7 (Monel 400)	1	24,6
	2	9,1
	3	3,3
ENiCrMo-3 (Alloy 625)	1	19,0
	2	7,0
	3	4,0
ENiCrFe-3 (Alloy 600)	1	23,8
	2	12,6
	3	8,9

MIG/MAG prosessi päällehitsauksessa:

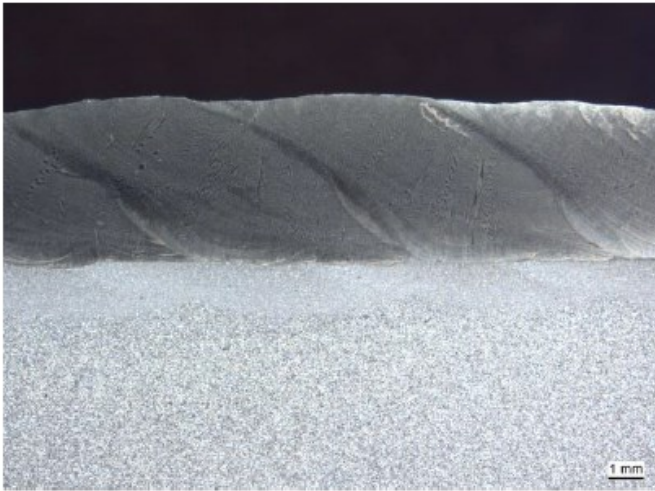
Prosessia on käytetty rajoitetun lisäainevalikoiman takia aiemmin pääasiassa ruostumattomien pinnoitteiden valmistuksessa, mutta laajentuvan lisäainevalikoiman ansiosta nykyään löytyy hyvin paljon myös erilaisia pinnoitukseen soveltuvia ydintäytelankoja (Penttilä 2023a, 8). Mm. lisäainevalmistajan WeldingAlloys tuotevalikoimasta löytyy paljon erilaisia pinnoitukseen kehitettyjä lisäainelankoja, kuten austeniittiset ruostumattomat ja duplex lisäaineet sekä erilaiset nikkeli- ja kobolttipohjaiset lisäaineet täytelankoina (FC) ja metallijauhetäytteisinä (MC) lankoina.

Prosessilla saavutettavat edut päällehitsauksessa ovat pitkälti samoja kuin prosessin edut yleisesti muunkin tyyppisessä hitsauksessa. Näitä ovat mm. suuri tuottoisuus verrattuna puikkohitsaukseen, helppo mekanisointavuus, hitsausprosessin yleisyys teollisuudessa, savuttomampi käytettäessä umpilankaa, pienemmän sekoittumisasteen saavutettavuus käytettäessä jo aiemmin esiteltyä pulssihitsausta tai CMT hitsausprosessia sekä muut prosessille ominaiset piirteet. (Penttilä 2023a, 8.)

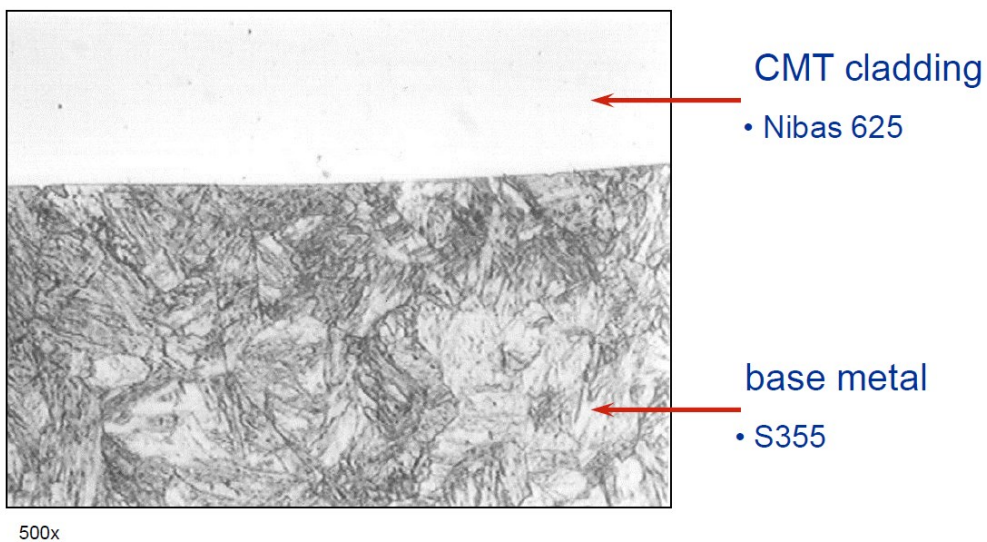
CMT hitsaus:

CMT (Cold Metal Transfer) hitsaus on laitevalmistaja Froniuksen kehittämä erityisesti pinnoitukseen ja ohuille ainevahvuuksille hyvin soveltuva MIG/MAG-hitsausprosessi, jossa lämmöntuonti on jopa 33 % pienempää ja sekoittuminen käytettäessä pinnoitukseen kehitettyä synergiäkäyrää jopa 75 % vähäisempää, kuin muilla MIG/MAG-prosesseilla. Pienemmän lämmöntuonnin takia prosessilla saavutetaan jopa kaksinkertainen hitsausnopeus verrattuna perinteiseen MAG-prosessiin, tunkeuman pysyessä ennallaan. Menetelmä perustuu Froniuksen kehittämään edistyneempään sulapisaran irroitusmenetelmään, jossa sulapisara saadaan irtoamaan lisäainelangan edestakaisen liikkeen vaikutuksesta. Käytännössä ero normaaliin MIG/MAG-hitsausprosessiin, jossa lisäainelankaa syötetään vakionopeudella, on siinä, että CMT prosessissa lisäainelangan koskettaessa hittavaan kappaleeseen valokaari sammutetaan ja lankaa vedetään takaisin päin, jolloin sulapisara irtoaa langan päästä. Lisäainelangan edestakainen liike on toteutettu erikoisvalmistetun hitsauspolttimen ja hitsauskaapelissa olevan lankabufferin avulla. Langan liiketaajuus, joka on 50–170 hertsin välillä, riippuu käytettävän lisäainelangan tyypistä, halkaisijasta ja suojakaasusta. Kuvioiden

5 ja 6 makro- ja mikrohieestä nähdään, kuinka vähäistä lisäaineen seostuminen perusaineen kanssa on esimerkin lisäainetyypillä käytettäessä suojakaasuna 100 % argonia. (Fronius N.d.)



Kuvio 5. Makrohie CMT-hitsauksesta (Vainikka 2024).



Kuvio 6. Mikrohie CMT-hitsauksesta (Vainikka 2024).

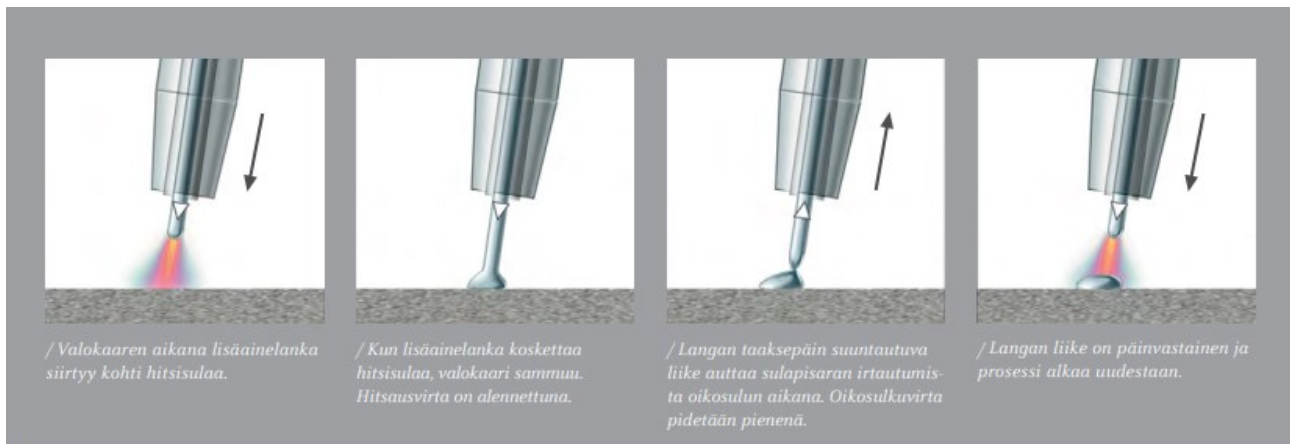
Taulukossa 4 vertaillaan eri CMT-prosesseilla saavutettavia sekoittumisasteita nikkelipohjaisella lisäaineella suoritettavassa päällehitsauksessa. Suojakaasuina on käytetty joko puhdasta argonia

tai 30 % heliumia ja 70 % argonia sisältävää seosta. Sekoittumisaste saadaan pysymään pienempänä käytettäessä pelkkää argonia, mutta heliumseostuksella saavutetaan hitsiaineen parempi juoksevuus ja täten tasaisempi pinnanlaatu tunkeuman hieman lisääntyessä. Froniuksen tekemien testien perusteella CMT-prosessilla saavutetaan käytettävän suojakaasun mukaan 3–6 % sekoittumisaste yhdellä 3–4 mm:n palkokerroksella. (Vainikka 2024.)

Taulukko 4. Sekoittumisaste eri suojakaasuilla ja prosesseilla (Vainikka 2024).

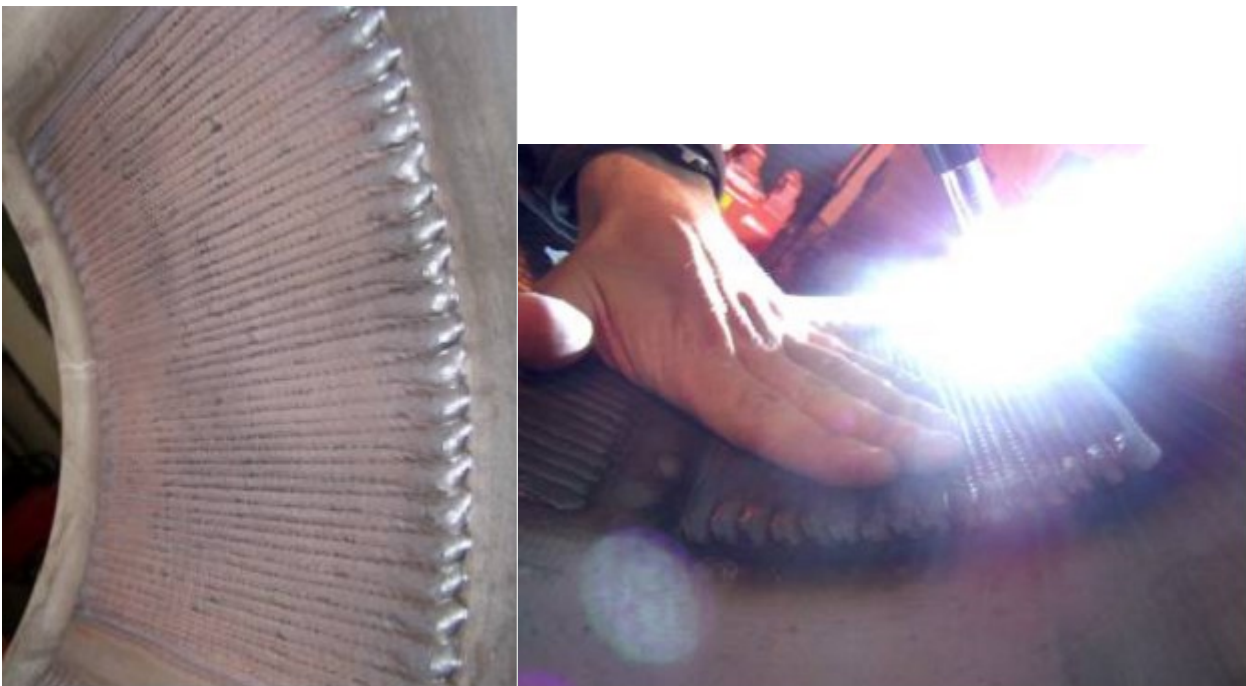
Sheet No. / Welding process	Filler material	vs [cm/min]	vd [m/min]	I [A]	U[V]	Shielding gas	Layer thickness [mm]	Dilution Ferrit content [%]	Deposition rate [kg/h]
1 / CMT	1. Layer: Nibas 625 //1,2 mm	60	10,5 - 12	220 - 240	17,5 - 20	30He/70Ar	3,5 - 3,8	5,99	5,9
	2. Layer: Nibas 625 //1,2 mm	60	10,5 - 12	220 - 240	17,5 - 20	30He/70Ar	3,5 - 3,8	0,99	5,9
2 / CMT	1. Layer: Nibas 625 //1,2 mm	60	10,1 - 11,5	215 - 240	16 - 18	Ar	3,5	3,59	5,9
	2. Layer: Nibas 625 //1,2 mm	60	10,1 - 11,6	215 - 240	16 - 18	Ar	3,5	0,76	5,9
3 / CMT	1. Layer: Nibas 625 //1,2 mm	45	9,5 - 11	220 - 240	15 - 17	Ar	4	3,72	5,34
	2. Layer: Nibas 625 //1,2 mm	45	9,5 - 11	220 - 240	15 - 17	Ar	3,5	0,6	5,34
4 / Puls	1. Layer: Nibas 625 //1,2 mm	40	9	205	26 - 27,5	Ar	3,5	10,9	4,8
	2. Layer: Nibas 625 //1,2 mm	40	9	205	28 - 30,5	Ar	3,5	2,21	4,8
5 / Puls	1. Layer: Nibas 625 //1,2 mm	40	9	205	28 - 30,5	30He/70Ar	3,5	14,49	4,8
	2. Layer: Nibas 625 //1,2 mm	40	9	205	28 - 30,5	30He/70Ar	3	2,31	4,8
6 / CMT	1. Layer: CN 23/12 //1,2 mm	45	8,5 - 9,0	230 - 250	15 - 16	Ar	4,2	67,71	4,6
	2. Layer: EAS 2 IG //1,2 mm	45	10,5 - 12	215 - 240	18 - 20	Ar	4	66,99	5,9
7 / Puls	1. Layer: CN 23/12 //1,2 mm	40	8	220 - 240	25,5 - 27,0	Ar	4	71,67	4,3
	2. Layer: EAS 2 IG //1,2 mm	40	8	193	25 - 26,5	Ar	3,5	68,22	4,3
8 / CMT	1. Layer: CN 23/12 //1,2 mm	45	9,0 - 10,0	245 - 260	15 - 16,5	Ar	4,5	62,59	5
	2. Layer: CN 23/12 //1,2 mm	45	9,0 - 10,0	245 - 260	16,0 - 17,5	Ar	4	61,03	5

CMT prosessista on kehitetty useita eri variaatioita, joissa yhdistelemällä CMT kiertoa, pulssikiertoa ja muuttamalla langan napaisuutta kierron aikana saadaan aikaan erilaisia hitsausominaisuuksia. Eri variaatioita ovat CMT Pulse (CMT kierron ja pulssikierron yhdistelmä), CMT Advanced (CMT kiertoon yhdistetty napaisuuden muuttaminen kierron eri vaiheissa) ja CMT Advanced Pulse (CMT Advanced kierron ja CMT Pulse kierron yhdistelmä). Seuraavassa kuviossa on havainnollistettu perus CMT prosessin kierto. Syklin toisen ja kolmannen vaiheen aikaisen alennetun hitsausvirran ansiosta prosessista saadaan lähes roiskeeton.



Kuvio 7. CMT kierto (Fronius 2022,4)

Alla kuvia CMT-prosessin soveltamisesta lämpökattilan osien pinnoitukseen.



Kuvio 8. CMT-prosessilla pinnoitettuja lämpökattilan osia (Vainikka 2024).

3.6 Työturvallisuus hitsauksessa

Hitsaajan työhön sisältyy useita erilaisia fyysikaalisia ja kemiallisia vaaratekijöitä sekä myös monia tapaturmariskejä. Eri tapaturmien ja vaaratekijöiden todennäköisyyteen sekä vaaran asteeseen vaikuttaa oleellisesti työympäristö, missä työskennellään. Esim. asennustyömailla riski pudota

telineeltä tai jäädä putoavan kappaleen alle on huomattavasti suurempi kuin konepajaympäristössä. Asennustyömailla usein myös työasennot, työympäristön lämpötila, työn kuormittavuus ym. tekijät ovat hyvin erilaisia kuin konepajoissa. Myös konepajojen välillä keskenään on suuria eroja työn fyysisessä kuormittavuudessa. Työturvallisuutta pohdittaessa onkin otettava aina tarkkaan huomioon työympäristö ja sen aiheuttamat vaarat ja riskit. Riskien arviointi ja hallinta on erittäin tärkeä osa hitsaavan teollisuuden työturvallisuustoimintaa. Hitsaustyössä vaaroja aiheutuu lisäksi myös mm. (Lukkari 2002, 286–291.)

- sähkölaitteiden aiheuttamasta tapaturmavaarasta
- kappaleiden kuumuudesta
- roiskeista ja kipinöistä
- hitsauksen aiheuttamasta säteilystä sähkömagneettisesta kentästä
- savuista, huuuista ja pölystä
- melusta ja tärinästä
- huonoista työasunnoista

Vaaratekijöistä mm. melu, tärinä, yksipuoliset liikkeet, staattinen kuormittavuus sekä ilman laatuun vaikuttavat tekijät ovat suuri riski sairastua hitsaajille hyvin yleisiin ammattitauteihin, joita hitsaajilla on ammattitautirekisterin mukaan huomattavasti enemmän, kuin muilla teollisuuden aloilla työskentelevillä. (Lukkari 2002, 286–291.)

Päällehitsaus, jota myös tässä työssä laajemmin käsitellään, sisältää lähes kaikki edellä mainituista riskeistä. Suurimmat vaaratekijät muodostuvat kuitenkin puikkohitsauksen synnyttämästä suuresta määrästä vaarallisia kromi ja nikkeli pitoisia hitsaussavuja, em. lisäaineiden hionnasta syntyvästä hienojakoisesta pölystä sekä hitsausasennon aiheuttamasta pitkäjaksoisesta staattisesta kuormituksesta. Vaikka hitsauspisteissä on käytössä savukaasun kohdepoistoimurit ja hitsaajat käyttävät raitisilmasuodattimella varustettuja maskeja, aiheutuu hitsauksesta silti ympäristöön suuri riskitekijä. Kohdepoistoimuri ei useinkaan saa imettyä kaikkea muodostuvaa savua ja tuotantotiloissa liikkuu paljon savulle altistuvia työntekijöitä, joilla ei ole henkilökohtaisia suojavarusteita päällään.

Päällehitsausprosessin muuttaminen puikkohitsauksesta MIG hitsaukseksi pienentää jo itsessään savun muodostumista oleellisesti, mutta tämän lisäksi hitsaussolujen sijoittamisella hieman kauemmas muusta tuotannosta, voidaan tilannetta parantaa. Yhtenä vaihtoehtona savu- ja

hiontapölyongelman ratkaisemiseksi on mietitty erillisten hitsaus/ hiontakoppien tekoa, joihin tulisi tehokkaampi ilmanvaihto.

Päällehitsauksessa käytetyn puikkohitsauksen muuttaminen manuaaliseksi MIG- tai CMT-hitsaukseksi voi lisätä käsiin kohdistuvaa fyysistä rasitusta, johtuen hitsauspistoolin ja kaapelin suuremmasta painosta (verrattuna puikonpitimeen). Tästä aiheutuva terveydellinen haitta on myös syytä ottaa huomioon. Ongelman ratkaisuna voisi kokeilla jonkin tyyppisen keventimen käyttöä apuvälineenä kannattelemaan pistoolia ja kaapelia.

3.7 Hitsauskustannukset

Hitsauskustannusten laskemisen perusteena on olemassa useita eri syitä, jotka ovat aina tapauskohtaisia ja voivat lähteä hyvinkin eri lähtökohdista eri yrityksissä ja eri tuotannon aloilla, usein niihin voi liittyä myös alan markkinatilanne, joka voi edellyttää tuotannon tehostamista ja lisäämistä. Tuotannon lisäämisen esteenä voi olla esim. nykyisen hitsausaseman aiheuttama pullonkaula, jonka poistaminen edellyttää laiteinvestointeja, tällöin halutaan selvittää mm. uuden koneen tuntihintaa ja pääomakustannuksia sekä mahdollisia saavutettavia kustannussäästöjä. Usein perusteena laskennalle on myös hitsauskustannusten suuruuden ja osuuden selvittäminen jo valmistettavien tuotteiden tai uusien tuotantoon tulevien tuotteiden kustannusrakenteesta, pyrkimys alentaa hitsauskustannuksia optimoimalla hitsausparametrejä tai siirtyminen manuaalisesta hitsauksesta automatisoituun tai mekanisoituun hitsaukseen. (Stenbacka 2011, 49–50.) Kustannusten laskenta on tärkeää myös vertailtaessa vaihtoehtoisia hitsausprosesseja ja valmistusmenetelmiä, arvioitaessa suunnittelun yhteydessä eri rakennevaihtoehtojen vaikutuksia kustannuksiin sekä tarjouslaskennan ja tuotteiden hinnoittelun kannalta (Lukkari 2011, 2).

Hitsauskustannusten muodostumiseen vaikuttavista tekijöistä, kuten materiaalikustannuksista, yritys- ja tapauskohtaisista kustannuksista, lisäaineiden hinnoista ja valmistettavaan tuotteeseen liittyvistä seikoista johtuen kustannuksista on vaikeaa esittää mitään yleispätevää mallia, joka soveltuisi joka tilanteeseen. Yleisesti kuitenkin seostamattomia teräslaatuja tavanomaisilla hitsausprosesseilla manuaalisesti suoritettavasta hitsaustyöstä ylivoimaisesti suurin kustannuseristä muodostuu Lukkarin (2011, 3) mukaan työkustannuksista, jotka ovat suurusluokaltaan 70–90 % kokonaiskustannuksista. Myös tämän kehitystyön laskelmien perusteella voidaan todeta, että haasteellisemmissä hitsauskohteissa, joissa pitää käyttää runsaasti seostettuja erikoisempia

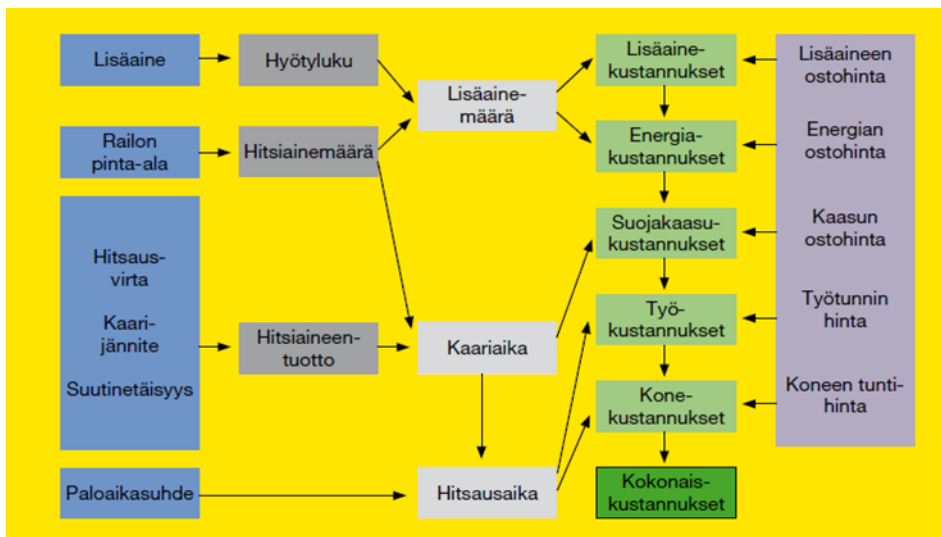
hitsauslisäaineita, ei kustannusten arvioinnin apuna voida käyttää minkäänlaisia seostamattomille teräslaaduille soveltuvia kustannusjakaumia.

Hitsauskustannuksiin voidaan vaikuttaa paitsi kehittämällä hitsausprosessia myös etsimällä ja minimoimalla tuottavuuden kannalta hidastavat tekijät, joita ovat hitsaustyötä edeltävistä toimista koostuva asetus aika, hitsauksen aikaisesta käsittelystä ja esivalmisteluista syntyvä käsittelyaika, kuonan ja roiskeiden poistosta tai puikon, lankakelan, kosketussuuttimen, kaasupullon yms. vaihdosta syntyvä kaarisivuaika sekä apuaika, jota ei suoranaisesti voida liittää hitsaustyöhön (Stenbacka 2011, 66-67). Varsinaisiin kaariajan synnyttämiin kustannuksiin voidaan vaikuttaa mm. optimoimalla prosessi, eli etsimällä parhaat mahdolliset parametrit laitteistoon, joilla saadaan paras mahdollinen hitsiainetuotto ja nopeus sekä laatu, vaihtamalla hitsausprosessi, vaihtamalla lisäainetyyppiä, pienentämällä railotilavuutta (jos mahdollista), automatisoimalla tuotantoa jne. (Stenbacka 2011, 49–50.)

Suurin vaikutus hitsauskustannuksiin on Lukkarin (2011, 3) mukaan hitsiaineentuotolla (tuotettu hitsiainemäärä aikayksikköä kohti, kg/h) ja paloaikasuhteella (kaariajan osuus kokonaistyöajasta, %). Vaikka korkea paloaikasuhte rinnastetaan usein korkeaan tuottavuuteen, ei asia kuitenkaan ole niin yksiselitteinen, kirjoittaa Stenbacka (2011, 71–72). Ajatellaan esimerkiksi tilannetta, jossa muut muuttujat pysyvät ennallaan, mutta hitsausnopeutta kasvatetaan esim. hitsausprosessia kehittämällä, josta seuraa kaariajan lyheneminen. Tässä tapauksessa siis tuottavuus kasvaakin, vaikka paloaikasuhte pienenee. Paloaikasuhte ei siis kerro kovinkaan paljoa itse tuottavuudesta, vaan ennemminkin hitsaukseen liittyvien ns. tuottamattomien aikojen suuruudesta. Luku toimiikin oikeastaan paremmin vertailtaessa eri prosessien tuottavuutta keskenään. (Stenbacka 2011, 71–72.)

Hitsiainetuoton suhteen voi usein tulla rajoittavaksi tekijäksi hitsattavien materiaalien ominaisuudet tai ainevahvuudet, jotka eivät kestä liian suurta lämmöntuottoa. Myös tässä työssä kehitettävän kohteen päällehitsauksessa käytettävää lisäainetuottoa rajoittaa huomattavasti perusaineen ainevahvuus.

Hitsauksen kokonaiskustannukset syntyvät viiden alakustannuksen summasta, joita ovat työkus-
tannukset, lisäaineista, suojakaasuista ja hitsausjauheista syntyvät ainekustannukset sekä hitsaus-
laitteistosta syntyvät konekustannukset, energiakustannukset ja kunnossapitokustannukset (Luk-
kari 2011, 2–3). Kuviossa 9 havainnollistetaan eri osakustannusten muodostumiseen vaikuttavat
tekijät. Joissain tapauksissa kustannuksiin kannattaa huomioida myös kiinteiden kustannusten
osuus, joita ovat mm. tilan käytöstä muodostuvat kustannukset sekä koulutuskustannukset yms.,
joiden jaottelu on hyvin paljon yrityskohtaista (Penttilä 2023b, 6). Tässä työssä kiinteiden kustan-
nusten huomiointi laskennassa ei ole järkevää, koska vertaillaan kahta eri prosessia, joilla kummal-
lakin nämä kulut olisivat suunnilleen samansuuruiset. Kustannukset lasketaan yleisesti metriä tai
tuotetta kohden.

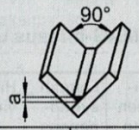
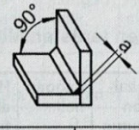
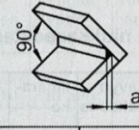
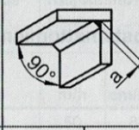


Kuvio 9. Hitsauskustannusten muodostuminen MIG/MAG-hitsauksessa (Lukkari 2011, 2).

Laskennassa tarvittavien hitsiainemäärien (kg/m) määrittämisessä on käytetty taulukoiden 5 ja 6 arvoja ja hitsiaineen tuoton (kg/h) määrittämisessä kuvioiden 10 ja 11 arvoja. MAG-hitsausprosessin hitsausvirtojen ja lisäainetuoton arviointiin on hyödynnetty lisäksi taulukon 7 arvoja. Päällehitsauksen kustannuslaskennassa hitsiainemäärä (kg/m) määritettiin hitsaamalla yksi hitsipalkko koe-kappaleeseen, jonka poikkileikkauksesta hitsipalon pinta-alan likiarvon pystyi mittaamaan ja laskemaan. Päällehitsauksen metrimääräinen arviointi oli pinnoitettavan alueen muodon takia vaikeaa, josta syystä se laskettiin yhden tuotteen päällehitsaukseen kuluva lisäainemäärän, lisäaineen hyötyluvun ja hitsiainemäärän (kg/m) perusteella. Energian kulutus ja ostohinta sekä

investoinnin korko on määritetty yleisten keskiarvojen mukaan, paloaikasuhte on arvioitu tapauskohtaisesti, lisäaineen hyötylukuna on käytetty lisäainevalmistajan ilmoittamia arvoja, lisäaineiden ja suoja kaasun ostohinnat vastaavat tämänhetkistä hintatasoa, koneiden huoltokustannuksina on käytetty yrityksen edellisvuotisia konekohtaisia kustannuksia.

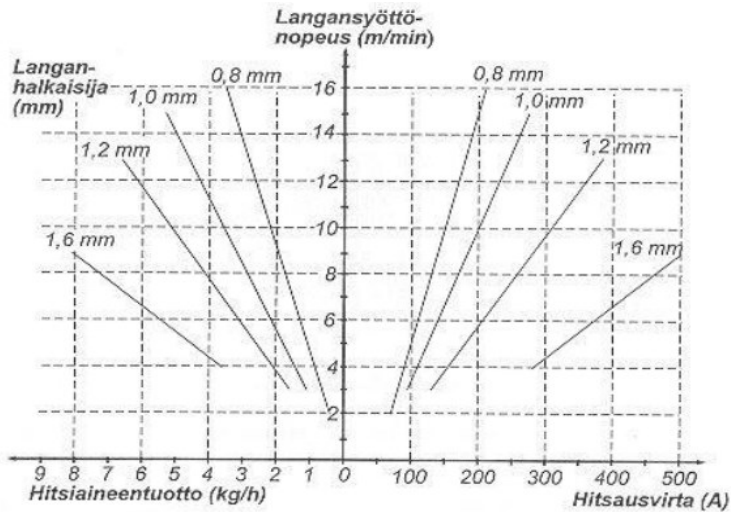
Taulukko 5. Hitsiainemäärät pienahitseissa (Valtanen 2016, 947).

a-mitta	Poikkipinta-ala (teor.)								
		v	g	v	g	v	g	v	g
mm	mm ²	cm ³ /m	kg/m	cm ³ /m	kg/m	cm ³ /m	kg/m	cm ³ /m	kg/m
2	4	5	0,04	6	0,05	5,5	0,04	5,5	0,04
2,5	6,5	7,5	0,06	8,5	0,07	8	0,06	8,5	0,07
3	9	10,5	0,08	12,5	0,10	11	0,09	12	0,09
3,5	12,5	14	0,11	16	0,13	15	0,12	16,5	0,13
4	16	18	0,14	21	0,16	19,5	0,15	22	0,17
4,5	20,5	22,5	0,18	26	0,20	24,5	0,19	26,5	0,21
5	25	27,5	0,22	31,5	0,25	30,5	0,24	33	0,26
5,5	30,5	33,5	0,26	37	0,29	36	0,28	40,5	0,32
6	36	40	0,31	42	0,33	43	0,34	47,5	0,37
6,5	42,5	46,6	0,37	49,5	0,39	51	0,40	56	0,44
7	49	54,5	0,43	57	0,45	56	0,44	65	0,51
7,5	56,5	60,5	0,47	65	0,51	64	0,50	73,5	0,58
8	64	70	0,55	73,5	0,58	76,5	0,60	82,5	0,65
9	81	88	0,69	94	0,47	95	0,75	109	0,86
10	100	108	0,85	114	0,89	116	0,91	130	1,02
11	121	131	1,03	138	1,08	143	1,12	157	1,23
12	144	154	1,21	163	1,28	168	1,32	187	1,42
13	169	179	1,41	190	1,49	195	1,53	220	1,73
14	196	207	1,62	224	1,76	227	1,78	257	2,02
15	225	237	1,86	248	1,95	264	2,07	294	2,31

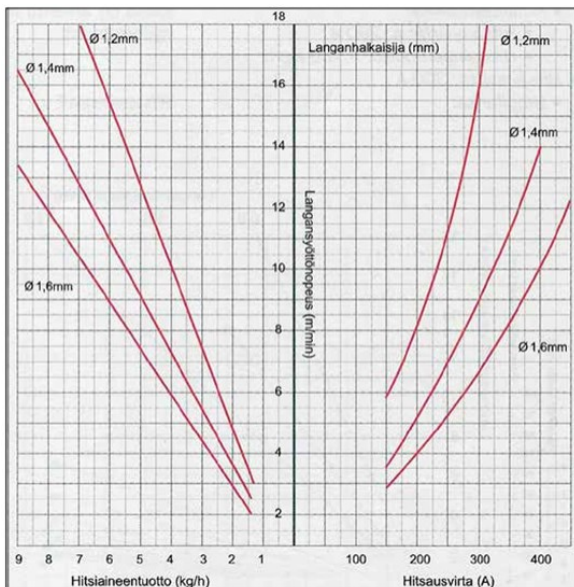
Taulukko 6. Hitsiainemäärät v-railoissa (Valtanen 2016, 946).

s	b	$\alpha = 50^\circ$ Jalkoasento			$\alpha = 60^\circ$ Jalkoasento		
		v	r	g	v	r	g
mm	mm	cm ³ /m	kg/m	kg/m	cm ³ /m	kg/m	kg/m
4	1	11,5	–	0,09	13	–	0,10
5	1	16,5	–	0,13	19,5	–	0,15
6	1	23	0,10	0,17	27	0,10	0,20
7	1,5	33,5	0,10	0,26	39	0,10	0,30
8	1,5	42	0,10	0,31	49	0,10	0,37
9	1,5	51	0,10	0,38	60,5	0,10	0,44
10	2	66,5	0,10	0,49	77,5	0,10	0,57
11	2	78,5	0,10	0,56	92	0,10	0,66
12	2	91	0,10	0,65	107	0,10	0,77
14	2	120	0,15	0,86	141	0,15	1,02
15	2	135	0,15	0,97	160	0,15	1,15
16	2	151	0,15	1,04	180	0,15	1,23
18	2	189	0,15	1,33	223	0,15	1,60
20	2	227	0,15	1,63	271	0,15	1,94
25	2	341	0,15	2,46	411	0,15	2,94

Lisäainetuoton määrää MAG-hitsauksessa määrittäessä, voidaan käyttää apuna alla olevia kuvaajia. Kuvaajista voidaan määrittää tuotto (kg/h) käytettävän hitsausvirran ja lisäainelangan pakkuuden avulla. Kuvaajista näkyy myös likimääräinen arvo langansyöttönopeudelle. Kuvion 10 kuvaaja soveltuu umpilangalle ja kuvion 11 rutiilitäytelangalle.



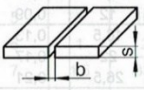
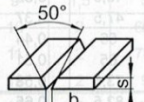
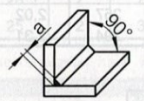
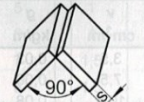
Kuvio 10. Hitsiainetuotto hitsausvirran ja langan paksuuden suhteen umpilankahitsauksessa (Penttilä 2023b, 35).



Kuvio 11. Hitsiainetuottoarvoja MAG rutiilitäytelangahitsaukseen (Lukkari 2022, 3).

Taulukon 7 avulla pystytään määrittämään suuntaa antavat hitsausvirran ja langansyöttönopeuden ym. arvot erityyppisille railomuodoille ja levyvahvuuksille.

Taulukko 7. Hitsiaineen tuotto- ja kulutusarvoja MAG umpilankahitsaukseen (Valtanen 2016, 948).

	Levyn paksuus	Ilmarako	Lisäai- neen kulutus	Langan halk.	Hitsi- aineen tuotto	Langan syöttö- nopeus	Hitsaus- virta	Kuljetusno- peus	
	s mm	b mm	kg/m	Ø mm	kg/h	m/min	A	m/h	cm/min
	1	0	0,02	0,6	1,0	7,0	60	50	83
	1,5	0,5	0,02	0,8	1,2	6,0	90	48	80
	2	1	0,03	0,8	1,5	6,8	110	50	83
	3	2	0,06	0,8	1,8	8,0	125	33	55
	3	2	0,06	1,8	2,1	6,0	150	38	63
	4	1	0,09	1,0	2,2	6,4	160	24	40
	5	1	0,09	1,0	2,2	6,4	160	17	28
	6	1,5	0,17	1,0/1,0	2,1/2,9	6,0/8,5	150/200	36/26	60/43
	8	1,5	0,30	1,0/1,2	2,1/3,9	6,0/7,6	150/260	26/17	43/28
	10	2	0,50	1,0/1,2	2,1/5,1	6,0/10,0	150/320	21/13	35/21
	a-mitta								
	2		0,05	0,6	1,2	8,4	70	24	40
	2		0,05	0,8	1,6	6,8	110	32	53
	3		0,10	0,8	1,9	8,3	130	19	32
	3		0,10	1,0	2,4	7,0	170	24	40
	4		0,16	1,0	2,7	8,2	190	17	28
	5		0,25	1,2	3,9	7,8	260	16	26
	6		0,33	1,2	3,9	7,8	260	12	20
6		0,33	1,2	4,8	9,5	300	14	22	
8		0,58	1,2	4,8	9,5	300	8,5	14	
	1,5		0,02	0,6	1,0	7,0	60	50	83
	2		0,03	0,8	1,6	6,8	110	53	88
	3		0,05	0,8	1,9	8,2	130	38	63
	4		0,07	0,8	2,0	9,0	140	29	48
	4		0,07	1,0	2,6	7,5	180	37	62
	5		0,10	1,0	2,6	7,5	180	26	43
	6		0,15	1,2	3,5	7,0	240	23	38
	8		0,26	1,2	3,7	7,5	250	18	30
10		0,40	1,2	5,0	10,0	320	12	20	
12		0,58	1,2	5,0	10,0	320	9	15	

Hitsauksesta syntyviä kokonaiskustannuksia määriteltäessä voidaan eri osakustannusten suuruudet laskea esimerkiksi seuraavaksi esitettyjen Stenbackan (2011, 87–89) ja Lukkarin (2002, 58–60) laskentakaavoja (1–7) käyttäen, joita soveltaen tämänkin työn kustannusten laskenta suoritettiin.

Kiinteät kustannukset hitsattua metriä kohden:

$$Kiinteät\ kustannukset = \frac{Kiinteät\ kustannukset\ (\text{€/h})}{Kaariaikasuhde\ (\%) * Hitsausnopeus\ (\text{m/h})} \quad (\text{€/m}) \quad (1)$$

Suojakaasun kustannukset (K_{Su})

$$K_{Su} = \frac{H_{Su} * V * M * 0,06}{T} \quad (\text{€/m}) \quad (2)$$

M = hitsiainemäärä (kg/m)

V = suojakaasun virtaus (l/min)

H_{Su} = kaasun ostohinta (€/m³)

T = hitsiaineen tuotto (kg/h)

0,06 = kerroin kaasuvirtaukselle, jos se annetaan yksikkönä l/min

Hitsauslisäainekustannukset (K_{Li})

$$K_{Li} = M * \frac{100}{N} * H_{Li} \quad (\text{€/m}) \quad (3)$$

M = hitsiainemäärä (kg/m)

H_{Li} = hitsiaineen ostohinta (€/kg)

N = riittoisuus / hyötyluku (%)

Työkustannukset (K_{Ty})

$$K_{Ty} = \frac{M}{T} * \frac{100}{e} * H_{Ty} \quad (\text{€/m}) \quad (4)$$

M = hitsiainemäärä (kg/m)

T = hitsiaineen tuotto (kg/h)

e = paloaikasuhte (%)

H_{Ty} = työtunnin hinta (€/h)

Energiakustannukset (K_{En})

$$K_{En} = M * E * H_{En} \quad (\text{€/m}) \quad (5)$$

M = hitsiainemäärä (kg/m)

E = energiankulutus (kwh/kg)

H_{En} = energian ostohinta (€/kwh)

Konekustannukset (K_{Ko})

$$K_{Ko} = \frac{M}{T} * \frac{100}{e} * H_{Ko} \quad (\text{€/m}) \quad (6)$$

M = hitsiainemäärä (kg/m)

T = hitsiaineen tuotto (kg/h)

e = paloaikasuhte

H_{Ko} = konetunnin hinta (€/h)

Koneen tuntihinta (H_{Ko})

$$H_{Ko} = (H_H * \left(\frac{1}{T_P} + \frac{P}{2*100}\right) + Y) * \frac{1}{T_K} \quad (\text{€/h}) \quad (7)$$

H_H = koneen hankintahinta (€)

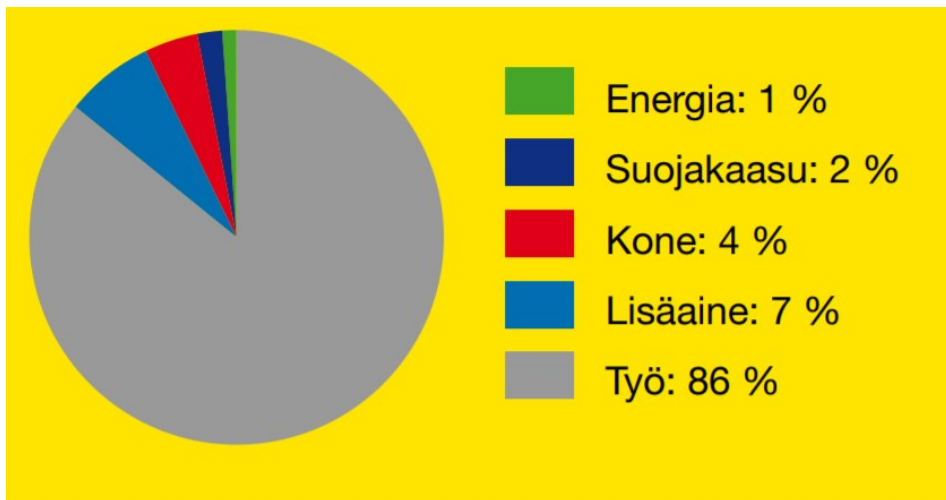
T_P = koneen poistoaika (V)

P = pääoman korko

Y = koneen vuosittaiset huoltokustannukset

T_K = koneen vuosittainen käyttöaika (h/V)

Hitsauskustannusten jakautumisesta seostamattomien terästen Mag-hitsauksessa umpilangalla saa hyvän käsityksen alla olevasta ”kustannuspiirakasta” (kuvio 12). Tämä jaottelumalli soveltuu yleisten saumatyyppien, kuten pienasaumojen suhteen, mutta vaativissa kohteissa esim. hankalissa paikoissa olevien paineenalaisten putkien korjaushitsauksessa työn osuus on vielä huomattavasti suurempi. Erikoisempien materiaalien, kuten esim. ruostumattomien ja haponkestävien hitsauksessa puolestaan lisäainekustannuksen osuus kasvaa huomattavasti. (Lukkari 2011, 4.)



Kuvio 12. Kustannusten jakautuminen MAG-pienahitsauksessa (Lukkari 2011, 4).

3.8 Robottiaseman investointi

Robottiaseman investointi voi tulla ajankohtaiseksi, mikäli tuotantomäärät kasvavat riittävän suu-riksi tai ammattitaitoisia hitsaajia ei ole riittävästi käytettävissä. Robotille pitää olla riittävästi töitä, että sen hankinta on kannattavaa. Yleispätevänä ohjeena voidaan pitää vähintään yhden työ-
vuoron aikaista käyttöastetta (noin 1600 h), mutta mitä enemmän käyttötunteja kertyy, sitä kan-
nattavammaksi investointi tulee. Kyseessä on kuitenkin suhteellisen suuri investointi, yhden robot-
tihitsaussolun kustannukset ovat yleisesti kokoluokkaa 150000 € - 300000 €. (Penttilä & Hiltunen,
2022, 31.)

Investointihanke sisältää karkeasti kaksi vaihetta, investoinnin suunnittelu ja -implementointi. In-
vestointiprosessi on yleensä hyvin paljon aikaa vievä, tästä syystä kaikki vaiheet on syytä suorittaa
huolellisesti, jotta projektin tulos saadaan hyödynnettyä mahdollisimman hyvin. Kuviossa 13 on
esitetty prosessin vaiheistus. (Penttilä & Hiltunen, 2022, 31.)



Kuvio 13. Hitsausrobottiaseman investoinnin vaiheistus (Penttilä & Hiltunen, 2022, 31).

Suunnitteluvaiheessa on tärkeää miettiä mihin kaikkeen robottia voidaan tämänhetkisessä tuotannossa käyttää ja miten hyvin tuotteet ovat hitsattavissa robotisoidusti. Simulointimallin avulla voidaan hahmotella solun varustusta ja sen soveltuvuutta ko. tuotteiden valmistukseen, tässä vaiheessa selvitetään mm., että millainen robotti on soveltuvin yrityksen tuotteiden valmistukseen. Tämän jälkeen voidaan suunnitella solun layout. Investointilaskelmat on hyvä tehdä mieluummin hieman yläkanttiin, koska aina voi tulla odottamattomia lisäkuluja. Kustannuksista karkeasti 50 % syntyy mekaanisista laitteista eli robotista, kappaleenkäsittelylaitteista ym. apulaitteista. Suunnittelun ja valmistelun osuus on noin 30 %, implementointivaiheen osuus noin 10 %, projektin hallintaan menee noin 5 % ja koulutuksen osuus on loput 5 %. Robottiaseman investoinnissa on hyvä muistaa, että koulutuksesta syntyy kustannuksia yleensä myös investoinnin jälkeen. (Penttilä & Hiltunen, 2022, 31–33.)

Robottiaseman ohjelmointi on käytännössä robotin liikeratojen määrittystä hitsausta varten, eli hitsausohjelmien tekoa. Hitsausohjelmien tekoa ajatellen etäohjelmointi on järkevää ottaa käyttöön heti alusta lähtien, eteenkin jos hitsattavien tuotteiden valikoima on laaja ja uusia tuotteita tulee usein hitsattavaksi. Käsin paikan päällä ohjelmoitaessa yhden minuutin hitsausohjelman teko

kestää karkeasti puolesta tunnista tuntiin. Testausvaiheessa ja menetelmäkokeiden teossa on kannattavaa etsiä maksimi hitsausparametrit ja nopeudet, että robotista saataisiin paras hyöty irti. Kalibrointi kannattaa suorittaa huolellisesti, että hitsauksessa päästään riittävään tarkkuuteen. Yleispätevänä ohjeena hitsausrobotin tarkkuudelle voidaan pitää < 1 mm. (Penttilä & Hiltunen, 2022, 31-33.)

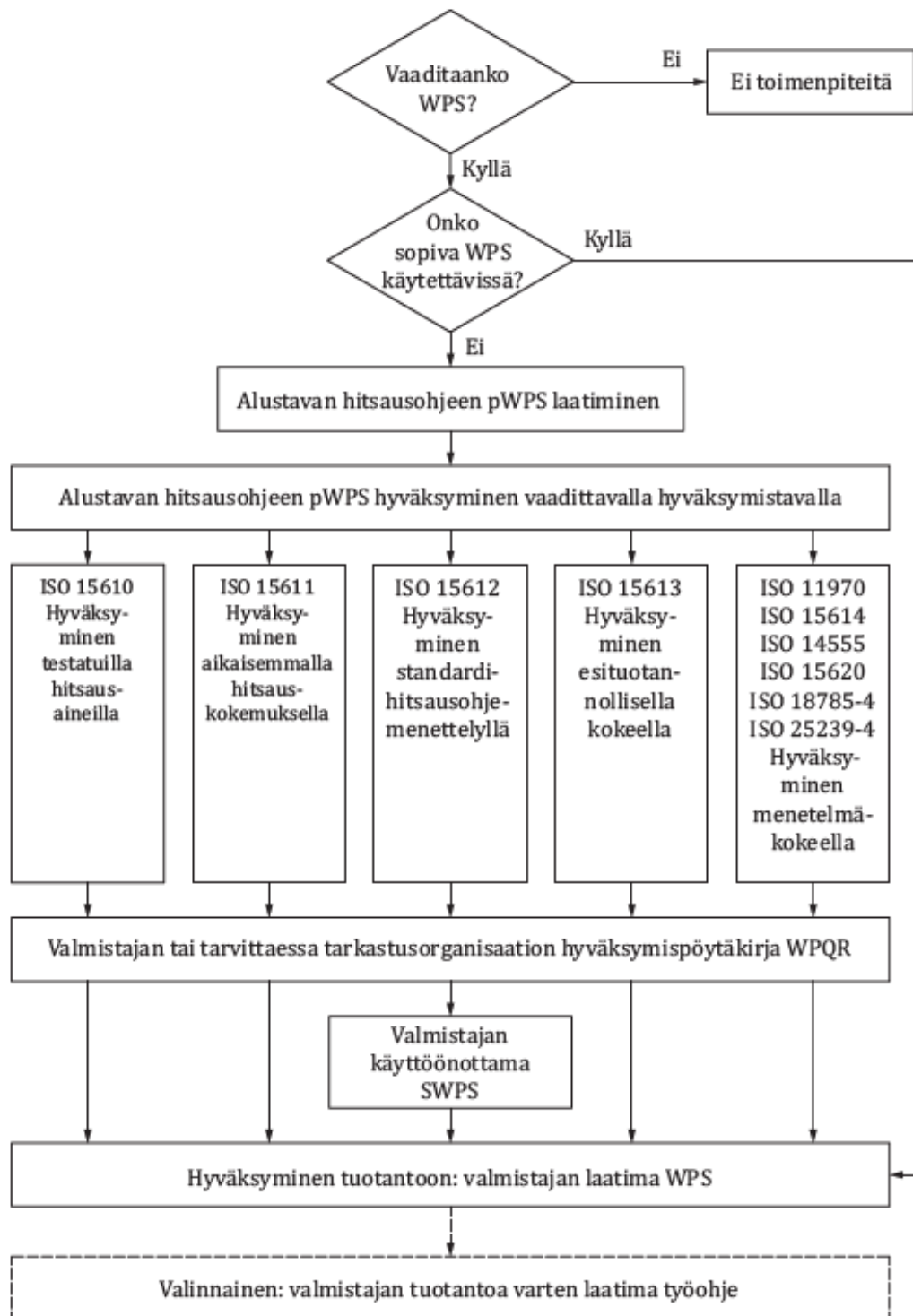
3.9 Hitsausohjeet

Huolellisesti suunnitellut ja laaditut hitsausohjeet sekä hitsauksen suoritus ohjeita noudattaen antaa hyvät lähtökohdat onnistuneen hitsauksen suorittamiseen. Toki tästäkin huolimatta ammattitaitoinen ja pätevyity henkilöstö on ensisijaisen tärkeää. Monet ammattitaitoiset hitsaajat osaavat kyllä asettaa oikeat hitsausparametrit ja tietävät oikean suoritustekniikan kokemuksen perusteellakin, mutta tämän varaan ei voida yrityksissä laskea jo pelkästään henkilöstön vaihtuvuuden takia. Valmistuksen lisäksi myös hitsaustöiden suunnittelu sekä laadunvalvonta perustuu hitsausohjeisiin. (Lukkari 2002, 55.)

Hitsaussanastoa käsittelevä standardi määrittelee hitsausohjeen seuraavasti: ”Hitsausohje on hyväksytty asiakirja, jossa esitetään vaadittavat hitsausmenetelmän muuttujat toistettavuuden varmistamiseksi tuotantohitsauksessa” (SFS 3052:2020, 79).

Koska nykyisillä NDT-menetelmillä ei pystytä määrittämään hitsauksen aiheuttamien metallurgisten poikkeavuuksien vaikutusta materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin on hitsausohjeiden hyväksymisprosessia varten laadittu säännöt, jotka määrittävät standardissa SFS-EN ISO 15607:2019. Hitsausohjeiden käyttöä valmistuksessa voi edellyttää mm. yrityksen oma laatujärjestelmä, tuotteen tilaaja, viranomaisvaatimus, tuotestandardi tai direktiivi.

Hitsausohjeiden laatiminen on monivaiheinen prosessi ja siinä tulee edetä kuvion 14 esittämässä järjestyksessä. Hyväksymistapa määräytyy tapauskohtaisesti ja siihen vaikuttavat mm. tuotteelta vaaditut ominaisuudet ja viranomaisvaatimukset yms.



Kuvio 14. Kulkukaavio hitsausohjeiden laatimiseen (SFS-EN ISO 15607:2019, 14)

Alla olevassa taulukossa on kerrottu minkälaiseen tuotantoon ja minkä tyyppisten tuotteiden valmistukseen mitään hyväksymistapaa voidaan soveltaa. Painelaittevalmistuksessa hyväksymistapa on oltava joko menetelmäkoee, tai joissain tapauksissa esituotannollinen koee.

Taulukko 8. Hitsausohjeiden hyväksymistavat (SFS-EN ISO 15607:2019, 8).

Hyväksymistapa	Sovellutus
Menetelmäkoe (ks. 5.2)	Voidaan aina käyttää, elleivät koekappaleet poikkea oleellisesti todellisten hitsausliitosten geometriasta, jännityksistä ja luoksepäästävyydestä.
Testatut hitsausaineet (ks. 5.3)	Käyttö on rajattu hitsausmenetelmille, joissa käytetään hitsausaineita. Hitsausaineiden testauksen on vastattava tuotannossa käytettävää perusainetta. Lisärajoituksia materiaaleihin ja muiden parametrien suhteen esitetään standardissa ISO 15610.
Aikaisempi hitsauskokemus (ks. 5.4)	Käyttö on rajattu hitsausmenetelmille, joita on käytetty aikaisemmin suurelle määrälle hitsejä verrattavissa olevissa kohteissa, liitoksissa ja materiaaleissa. Vaatimukset esitetään standardissa ISO 15611.
Standardihitsausohje (ks. 5.5)	Menetelmäkokeen kaltainen. Rajoitukset esitetään standardissa ISO 15612.
Esituotannollinen koe (ks. 5.6).	Voidaan periaatteessa aina käyttää, mutta vaatii koekappaleen valmistamista tuotanto-olosuhteissa. Sopii sarjatuotannolle. Vaatimukset esitetään standardissa ISO 15613.
HUOM. Liitteissä A ja B esitetään lisätietoja tietyn hyväksymistavan valitsemisesta.	

Koska painelaitedirektiivi 2014/68/EU (PED) edellyttää menetelmäkokeen avulla hyväksytyjen hitsausohjeiden käyttöä paineastioiden valmistuksessa ja korjauksessa, toteutetaan tämän opinnäytetyön yhteydessä tehtävien hitsausohjeiden hyväksynnät menetelmäkokeilla. Työn laskentaesimerkissä käytetyn tuotteen valmistus ei välttämättä edellyttäisi menetelmäkokeella hyväksyttyä hitsausohjetta, mutta tehtäviltä hitsausohjeilta halutaan kattavuutta myös muuta yrityksessä tapahtuvaa painelaittevalmistusta silmällä pitäen.

Taulukossa 2 on esitetty prosessin eri vaiheista syntyvät tulokset ja eri vaiheista vastaava organisaatio. Pinalaitedirektiivi edellyttää menetelmäkokeen valvontaan ja hyväksyntään aina tarkastusorganisaation.

Taulukko 9. Hitsausohjeen hyväksymistä koskevat vaiheet (SFS-EN ISO 15607:2019)

Toiminto	Tulos	Osapuoli
Hitsausohjeen laatiminen	pWPS	Valmistaja ^a
Hitsausohjeen hyväksyminen	WPQR mukaan lukien voimassaoloaika asianmukaisen hyväksymistapastandardiin perustuen	Valmistaja ^a ja, tarvittaessa, kokeen valvoja/tarkastusorganisaatio ^b
Hitsausohjeen viimeistely	WPS ko. hyväksymispöytäkirjaan WPQR perustuen	Valmistaja ^a
Hyväksyminen käytettäväksi tuotannossa	Hyväksytty hitsausohje tai työohje	Valmistaja
^a Muu kuin valmistajan organisaatio voi olla mukana SWPS:n hyväksymisessä.		
^b Erytistapauksissa voidaan vaatia ulkopuolista riippumatonta tarkastusorganisaatiota		

Standardi SFS-EN ISO 15609-1:2019 Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hitsausohjeet. Osa 1: Kaarihitsaus, määrittelee tarkasti hitsausohjeen teknisen sisällön, jonka mukaan WPS laaditaan.

Tähän opinnäytetyöhön liittyvien hitsausohjeiden hyväksyntä pyritään toteuttamaan menetelmäkokeilla siinä määrin, kun se valmistettavaa tuotetta silmällä pitäen on mahdollista, jos se ei syystä tai toisesta ole tuotteen valmistusta ajatellen soveltuva tapa, toteutetaan hyväksyntä valmistettavaa tuotetta vastaavalla esituotannollisella kokeella. Standardin, SFS-EN ISO 15614-7:2019 Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä menetelmäkokeella. Osat 1: Terästen kaari- ja kaasuhitsaus sekä nikkelin ja nikkelseosten kaarihitsaus sekä Osa 7: Päällehitsaus, määrittelevät tarkasti menetelmäkoekoiden suoritukseen liittyvät yksityiskohdat, kuten koekappaleesta otettavien koesauvojen määrän ja sijainnin koekappaleessa. Taulukosta 10 selviää päällehitausta koskevan menetelmäkoestandardin sisältämät tarkastukset ja niiden laajuudet. Menetelmäkokeen edellyttämät testit ovat tapauskohtaisia, eikä kaikkia taulukon testejä ole aina tarpeellista suorittaa kaikille koekappaleille. Tässä työssä tehtävä päällehitsaus on korroosio-päällehitausta, ja menetelmäkokeelta vaadittaviin testauksiin kuuluvat silmämääräinen- ja tunkeumanestetarkastus, makrohietutkimus, kemiallinen analyysi, deltaferriittipitoisuus sekä kovuuskoe.

Taulukko 10. Koekappaleiden tarkastus. (SFS-EN ISO 15614-7:2019, s.12)

Koekappale	Tarkastustyyppi	Tarkastuslaajuus	Ala-huomautus
Korroosio-päällehitsaus	— Silmämääräinen tarkastus (VT)	100 %	—
	— Ultraäänitarkastus (UT)	100 %	a
	— Tunkeumanestetarkastus (PT)	100 %	b
	— Sivutaivutuskoe (SBC)	2 koesauvaa	c, d
	— Makrohietutkimus	1 koesauva	—
	— Kemiallinen analyysi	1 koesauva	—
	— Deltaferriittipitoisuus/ferriittinumero (FN)	1 koesauva	a
	— Kovuuskoe	1 mittausrivi	—
Kovahitsaus	— Silmämääräinen tarkastus (VT)	100 %	—
	— Pintahalkeamien tarkastus (MT/PT)	100 %	b
	— Makrohietutkimus	1 koesauva	—
	— Kovuuskoe	1 mittausrivi	—

^a Vaadittaessa, sovellusstandardin mukaan.

^b Tunkeumanestetarkastus (PT) tai magneettijauh tarkastus (MT). Epämagneettisille materiaaleille tunkeumanestetarkastus.

^c Sivutaivutuskoe voidaan korvata kahdella lisämakrohietutkimuksella.

^d Sivutaivutuskokeen (SBC) orientaation on oltava poikittainen ensimmäisen palkokerroksen suuntaan nähden.

4 Valmistuksen nykytila

4.1 Vuosittaiset tuotantomäärät ja ajat

Tämän työn hitsauskustannusten laskennassa käytetyn tuotteen valmistus on yrityksen merkittävintä tuotetta niin työllisyysvaikutuksiltaan, kuin tulonlähteenä. Vuosittainen valmistusmäärä on 300–400 kpl, riippuen kysynnästä. Valmistus on hyvin pitkälti tilausohjautuvaa, mutta hiljaisempina jaksoina on pyritty tekemään myös jonkin verran varastoon. Valmistuskustannusten laskennassa käytetään kahden edellisen vuoden valmistusmäärien keskiarvoa, joka on 350 kpl. Työaikana mitattuna vuosittainen tuotanto vaatii tällä hetkellä käytössä olevilla työmenetelmillä valmistamaan noin 14500 tuntia. Pelkän hitsaustyön osuuden tarkka määrittäminen on melko hankalaa useiden valmistuksen aikaisten työpisteiden välisten siirtojen takia. Lisäksi usein myös kokoonpanija osallistuu hitsaustyöhön jossain määrin. Hitsaustyön osuus kokonaisvalmistusajasta on keskimäärin noin 55 %. Valmistusajan jakautumisen arvioinnissa käytettiin työntekijöiltä saatua arviota ajan käytöstä ja kourusarjojen työmääräimistä saatua valmistusajan jakautumista työntekijöiden kesken.

4.2 Valmistusprosessin kuvaus

Valmistusprosessi koostuu pääsääntöisesti seuraavista vaiheista: esivalmisteen teko, kokoonpano ja hitsaus, jälkilämpökäsittely, hiekkapuhallus, tarkastus ja mahd. korjaukset, testaus ja maalaus.

Esivalmistettaviin osiin kuuluvat levyosat ja osa putkiosista. Levyosien aihiot valmistetaan laserleikkaamalla alihankkijayrityksen toimesta, osiin tehtävät muut työt, kuten hitsausviisteiden teko, poraukset sekä hydraulipuristimella ja erilaisilla lesteillä tehtävä taivutustyö tehdään itse. Esivalmistettavat osat tehdään tilauskannan mukaan, yleensä noin 30–40 kappaleen erinä. Näiden työvaiheiden vaatima osuus on noin 7,5 % kokonaisajasta.

Kokoonpano ja hitsaus toteutetaan solutyypisessä yksikössä, jossa työskentelee tavallisesti kaksi henkilöä, tuotteen kokoonpanija ja hitsaaja. Kerrallaan valmistettavaan sarjakokoon voi vaikuttaa esim. kourutyypin, mutta tyyppillisesti se on viisi kappaletta. Tämä sarjakoko on todettu käytännössä valmistuksen kannalta optimaaliseksi. Tuotteen rakenteen määrittävän kokoamis- ja hitsausjärjestyksen vuoksi kouru vaatii valmistuksen aikana useita siirtoja työparin välillä. Valmistus

pyritään yleensä vaiheistamaan siten, että sarjan kaikkien kourujen valmistus etenisi suunnilleen samassa vaiheessa. Käytännössä työ etenee siten, että kokoonpanija silloittaa kussakin vaiheessa kiinnitettävät osat kuhunkin kouruun -> siirto hitsaukseen -> siirto seuraavien osien silloitukseen -> siirto hitsaukseen jne.

Kun tuote on muilta osin valmis, se siirretään päällehitsaukseen, jossa siitä pinnoitetaan määrätyn suuruiset alueet. Päällehitsaus pitää suorittaa tuotteen rakenteen takia pyörittäjää apuna käyttäen. Hitsausasento on pysyttävä mahdollisimman optimaalisena koko ajan, jotta hitsin pinnasta saataisiin mahdollisimman tasainen. Päällehitsattu alue hiotaan tasaiseksi hitsauksen jälkeen. Kokoonpanon ja hitsauksen osuus valmistuksen kokonaisajasta on noin 85,5 %

Lopuksi valmiille tuotteille tehdään jännityksenpoistohehkutus, joka poistaa hitsauksista aiheutuneet jännitystilat rakenteesta. Hehkutuksen jälkeen ne hiekkapuhalletaan, tarkastetaan, tehdään tarvittavat korjaukset ja suoritetaan testaus. Tarkastus käsittää 100 % visuaalisen tarkastuksen sekä lisäksi päällehitsattujen alueiden 100 % pt-tarkastuksen ja pinnoitteen paksuuden mittauksen. Näiden osuus on noin 7 % kokonaisajasta.

Hitsausprosesseina on tällä hetkellä käytössä TIG, - MAG- ja puikko hitsaus. TIG- hitsausta käytetään pääasiassa pohjapalkojen hitsaukseen, silloituksessa ja kohteissa, joiden hitsaaminen on hankalaa muilla prosesseilla. Suurin osa pienahitseistä ja pintapaloista hitsataan muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta puikkohitsauksena. Päällehitsaukset suoritetaan puikkohitsauksena. MAG-umpilankahitsausta ja täytelankahitsausta on testattu ja käytetty soveltuvien osien, mutta yleisesti käytettyä hitsausprosessia siitä ei ole vielä valmistukseen tullut.

5 Toteutus ja tulokset

Kehitystyön ensisijaisina lähtökohtina on parantaa hitsaustyön laatua ja tuottavuutta, eli käytännössä korvata puikolla suoritettavasta hitsaustyöstä niin suuri osuus kuin mahdollista, suurempi tuottoisella MIG/MAG-hitsausprosessilla. Prosessin vaihto on mahdollista käytännössä lähes kaikkien liitoshitsien kohdalla, yhtä kohdetta lukuun ottamatta, jossa luokse päästävyys on rajoittava tekijä. Lisäksi MAG-hitsauksella pyritään mahdollisuuksien mukaan korvaamaan tällä hetkellä TIG:llä hitsattavia pohjapalkoja kaikissa kohteissa, missä sen käyttö on mahdollista. Puikkohitsauksena tällä hetkellä tehtävät päällehitsaukset tullaan jatkossa korvaamaan kokonaisuudessaan

CMT- tai pulssihitsauksella, jolla voidaan saada kustannussäästöjä lyhentyneen hitsausajan ja pienempien lisäainekustannusten muodossa sekä saavuttaa vaadittu taso pinnoitteen sekoittumisasteen suhteen. Uudella hitsausprosessilla voidaan saavuttaa lisäksi myös parempi pinnanlaatu. Työn alkuvaiheessa pohdittiin myös täytelankahitsauksen mahdollisuuksia päällehitsausprosessina, mutta johtuen lisäaineen noin kaksinkertaisesta hinnasta verrattuna vastaavaan umpilankaan, päätettiin prosessista luopua jo alkuvaiheessa.

Koska yrityksellä olevat menetelmäkokeet on tehty pääasiassa TIG- ja puikko prosesseilla, etupäässä seostetummille teräksille, eikä MAG-prosessilla (135) ole ollut aiemmin tarvetta tehdä tähän tilanteeseen soveltuvaa menetelmäkoetta, päätettiin yksi tähän soveltuva menetelmäkoe tehdä. Materiaalista ja prosessista aiemmin hankitun kokemuksen perusteella pWPS:n ja menetelmäkokeen tekoon ei harjoitus- ja testikappaleita tarvinnut hitsata. Seostamattomalla täytelangalla hitsauksesta löytyi myös aiempaa kokemusta, jonka pohjalta alustava hitsausohje pystyttiin tekemään. Kummatkin menetelmät kannattaa hitsata esim. 60,3 mm:n putkelle 6–8 mm:n ainevahvuuteen, jotta saadaan kyseisen tuotteen valmistukseen hyvin soveltuva kattavuusalue.

5.1 Päällehitsauksen testit ja tulokset

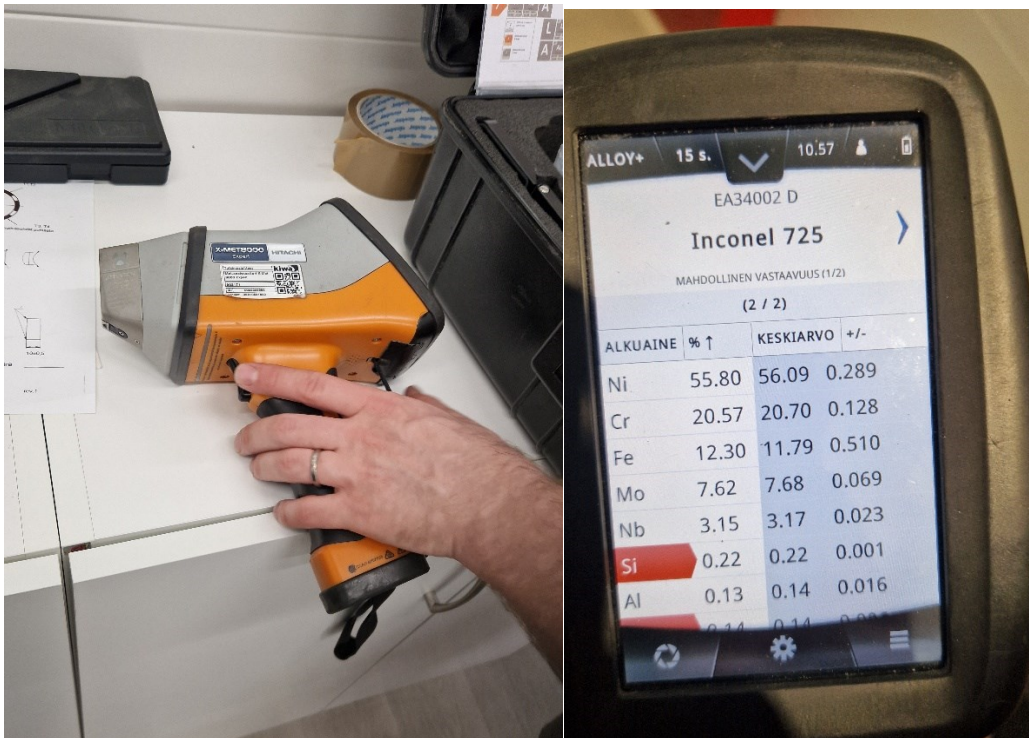
Päällehitsauksessa käytettävän lisäainetyypin hitsaamisesta MAG-pulssihitsausprosessilla ei yrityksellä ollut aiempaa kokemusta, joten testaukselle oli tarvetta. Koehitseillä haluttiin selvittää eri parametrien ja suojakaasujen vaikutusta hitsin tunkeumaan, pinnanlaatuun, sekoittumisasteeseen ja hitsattavuuteen yleensä. Analysoitavien koekappaleiden hitsaukset suoritettiin Kempin X5 hitsauskoneella ja ohjelmina käytettiin pinnoitukseen kehitettyä tuplapulssiohjelmaa sekä tavallista tuplapulssiohjelmaa. Koehitsit hitsattiin S355HG levyyn ja lisäaineena käytettiin Würth Mig 625 (ER-NiCrMo-3), 1,2 mm:n umpilankaa. Suojakaasuina testattiin kolmea eri vaihtoehtoa, Mison Ar (Ar + 0,03 % NO), Varigon He50 (AR + 50 % He ja SK2 (AR + 2 % co2). Varigon He50 ja SK2 suojakaasuilla hitsattiin kummallakin kaksi eri koetta eri parametrejä käyttäen. Argonilla hitsattiin vain yksi koe, koska hitsattavuus pienemmillä tehoilla oli niin huonoa, ettei sen hitsaamisesta olisi ollut testauksen kannalta hyötyä. Hitsaus suoritettiin manuaalihitsauksena poltinkulman ollessa hieman työntävä ja kallistettuna hieman edellistä palkoa päin. Palkokerroksia hitsattiin testikappaleisiin vain yksi, koska pinnoitettavan tuotteen valmistuksessakin hitsataan vain yksi kerros. Lisäksi vertailun vuoksi hitsattiin yksi testikappale tällä hetkellä käytössä olevalla puikkohitsausprosessilla, lisäaineena käytettiin Esab NiCrMo-3, 3,2 mm:n puikkoa. Taulukossa 11 on esitetty sekoittumisasteita

koehitseissä. Sekoittumisaste on laskettu koekappaleesta mitatun kemiallisen koostumuksen ja lisäaineen materiaalidistuksen kemiallisen koostumuksen suhteesta.

Taulukko 11. Hitsiaineen sekoittuminen ja käytetyt parametrit koehitseissä.

Hitsausprosessi	Lisäaine	Suojakaasu	Kulj. nop. (cm/min)	Lanka (m/min)	Hitsausvirta I (A)	Jännite U (V)	Kerrospaksaus (mm)	Tuotto (kg/h)	Nikkeli, Ni		Kromi, Cr		Molybdeeni, Mb		Niobi, Nb		Rauta, Fe
									Mitattu ptt. (%)	Muutos, (%)	Mitattu ptt. (%)	Sekoittuminen	Mitattu ptt. (%)	Sekoittuminen	Mitattu ptt. (%)	Sekoittuminen	Mitattu ptt. (%)
135, Pulsisi, cladding	ERNiCrMo-3	Mison Ar	56	5,5–6,5	160–180	20,3–21,5	3	3	53,28	-17,65 %	18,11	-17,94 %	7,34	-14,35 %	3,03	-17,89 %	17,24 %
135, Pulsisi	ERNiCrMo-3	Varigon He50	36	4,0–5,0	116–141	19,2–20,2	3	2,3	56,09	-13,31 %	20,70	-6,21 %	7,68	-10,39 %	3,17	-14,09 %	11,79 %
135, Pulsisi	ERNiCrMo-3	Varigon He50	56	6,5–7,5	182–206	23,7–24,7	3	3,5	52,55	-18,78 %	18,07	-18,12 %	7,37	-14,00 %	2,95	-20,05 %	18,42 %
135, Pulsisi, cladding	ERNiCrMo-3	SK2	38	4,0–5,0	115–150	20,8–22,0	3,5	2,3	54,70	-15,46 %	20,36	-7,75 %	7,60	-11,32 %	3,15	-14,63 %	13,73 %
135, Pulsisi, cladding	ERNiCrMo-3	SK2	50	6,0–7,0	170–190	23,2–24,3	4	3,3	50,94	-21,27 %	17,69	-19,85 %	7,14	-16,69 %	2,93	-20,60 %	21,00 %
111, Pulkkohtaus	ESAB, NiCrMo-3	-	19	-	99	-	3	1,9	48,34	-23,03 %	16,61	-23,46 %	7,11	-23,55 %	2,73	-17,27 %	24,27 %

Pinnoitteen kemiallinen koostumus mitattiin alla olevan kuvion kannettavalla XRF-analysaattorilla.



Kuvio 15. XRF-analysaattori

Sekoittumissuhteelle ei tällä hetkellä ollut määritetty selkeitä raja-arvoja, tavoitteena oli kuitenkin saada sekoittuminen pieneneään käytössä olevaan puikkoprosessiin verrattuna. Sekoittumissuhteet ja tunkeuma jäivät kaikilla suojakaasuilla ja hitsausparametreilla selvästi puikkoprosessia pienemmäksi. Aikataulullisista syistä koehitsejä kerettiin tekemään vain muutamia ja paljon jäi vielä selvittämättä eri muuttujien, kuten poltinkulman, kuljetusnopeuden palkojen limityksen ym. vaikutusta sekoittumiseen, mutta testien perusteella voidaan kuitenkin päätellä, että yleisesti hitsattavuus oli kohtuullisen hyvä ja tavoitteet ovat helposti saavutettavissa. Hitsausnopeus ja lisäaineentuotto saadaan varmasti tästä vielä kasvamaan, parhaiden hitsausparametrien löytyttyä. Varigon He 50 suojakaasu oli selkeästi hitsattavuudeltaan paras näistä kolmesta, joka johtui todennäköisesti heliumin lämpöä tuovasta vaikutuksesta valokaareen, tosin miinuspuolena tulee suurempi sekoittuminen. Optimaalisin suojakaasu olisi todennäköisesti vähemmän heliumia sisältävä esim. Varigon He 10 tai Varigon He 30. SK2 soveltui puolestaan hitsattavuudeltaan heikoiten tähän, koska prosessi meni käytännössä jo MAG-hitsauksen puolelle, johtuen kaasun sisältämästä hiilidioksidista. Sekoittumisaste pysyi kyseisellä kaasulla kuitenkin samalla tasolla muihin nähden. Kyseistä kaasua ei todellisuudessa suositella tälle lisäaineelle, mutta testimielessä tätä päätettiin kokeilla.

Kaikilla kaasuilla saavutettiin helposti pinnoitteen minimipaksuusvaatimus, joka on pinnoitteelle tarvittaessa suoritettavan hionnan jälkeen 2,5 mm. Testikappaleiden pinnoitteen paksuuteen vaikutti oleellisesti palkojen limitys ja poltinkulma, joka ei luonnollisestikaan pysynyt täysin vakiona käsin suoritettavan hitsauksen aikana. Tasalaatuisin ja luotettavin tulos olisi saatu robottihitsauksella, mutta testauksen aikana ei sellaista ollut käytettävissä. Toisaalta, kun tuotannossa hitsataan jatkossakin päällehitsejä käsin, saatiin tällä menetelmällä käytäntöä paremmin vastaava tulos. Testikappaleita suurempi paksuus olisi helposti saavutettavissa tiheämmällä palkojen limityksellä. Puikkohitsauksella sekä Mison Ar ja Varigon He 50 suojakaasuilla pinnoitteen paksuudeksi saatiin noin kolme millia ja SK2 suojakaasulla paksuutta tuli 3,5–4 mm. Mison Ar kaasulla tunkeuma oli välillä 0,2–0,8 mm, SK2 kaasulla 0,4–1,5 mm, Varigon He50 kaasulla 0,2–1,0 mm ja puikolla 0,5–1,5 mm. Tunkeumat mitattiin testikappaleista valmistetuista hieistä. Kuvioista 16–19 on nähtävissä tunkeuma, syvyys ja profiili. Kuvista nähdään selvästi esim. Mison Ar suojakaasulla hitsatun koekappaleen ja puikko prosessilla hitsatun kappaleen välinen ero perusaineen sulamissyvytydessä.



Kuvio 16. Päällehitsaus Mison Ar suojakaasulla.



Kuvio 17. Päällehitsaus SK2 suojakaasulla.



Kuvio 18. Päällehitsaus Varigon He50 kaasulla.



Kuvio 19. Päällehitsaus puikkohitsauksella.

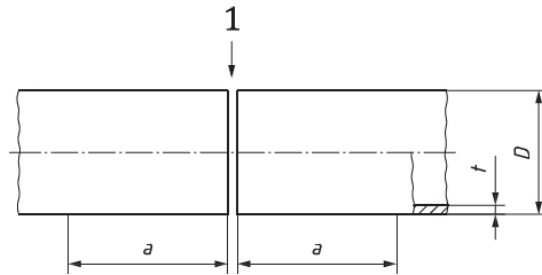
CMT-prosessilla ei päästy tämän opinnäytetyöprosessin aikana testauksia tekemään, koska käytävissä ei ollut kyseistä hitsauslaitteistoa. Testaukset suoritetaan lähitulevaisuudessa, kunnes saadaan kyseinen kone koekäyttöön. Koska Fronius on suorittanut omia kattavia testauksia juuri samalla lisäainetyypillä, päätettiin näitä arvoja käyttää tämän työn kustannusten laskennassa robottihitsauksen osalta. On huomioitava, että Froniuksen suorittamat testit on tehty hitsausrobotilla, sekä erilaisiin koekappaleisiin, kun mihin päällehitsausta tämän projektin tapauksessa tehdään. Ei siis voida suoraan olettaa, että, jos prosessilla hitsattaisiin käsin ja ohuempaan ainevahvuuteen, saavutettaisiin välttämättä yhtä pieni sekoittumisaste ja voitaisiin hitsata yhtä suurilla tehoilla. Lisäksi koska kyseessä on hyvin ”kylmä” prosessi, tuo se myös omat haasteensa hitsauksen suoritukseen. Tämän vuoksi manuaalihitsauksena suoritettava päällehitsaus laskettiin vain MIG-pulssihitsausprosessille.

5.2 Tarvittavat menetelmäkokeet ja hitsausohjeet

Menetelmäkokeiden suoritusta varten tehtiin alustavat hitsausohjeet. Ohjeiden mukaisesti suoritettuille koekappaleiden hitsauksille tulee tehdä standardien SFS-EN ISO 15614-1:2017 + A1:2019. Osa 1 (putken päittäisliitos) ja SFS-EN ISO 15614-7:2019. Osa 7 (päällehitsaus). Menetelmäkokeiden suoritus ja niiden pohjalta tehtävien varsinaisten hitsausohjeiden teko ei aikataulullisten haasteiden vuoksi onnistunut tämän työn kanssa samassa aikataulussa.

Kokoonpanohitsausta varten tehtiin MAG 135/ MAG136 yhdistelmäkokeeseen soveltuva pWPS, alla olevan kuvion dimensioiden mukaisesti. Perusaineena P265HG, MAG 135 lisäaineena

seostamaton OK AristoRod 12.50, MAG 136 lisäaineena OK E71T-1, liitosmuoto putken päittäisliitos (BW), putkikoko 60,3 mm x 6,3 mm.

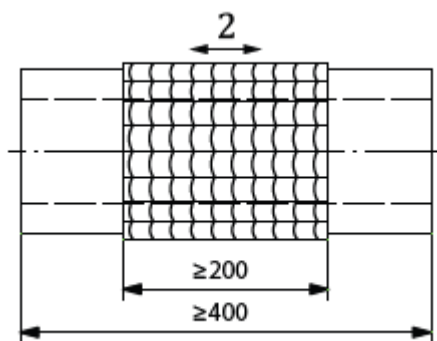


Selite

- 1 Railon valmistus ja sovitus alustavan hitsausohjeen (pWPS) mukaan
- a Vähimmäismitta 150 mm
- D Putken ulkohalkaisija
- t Aineenpaksuus

Kuvio 20. Putkikoekappale läpihitsatulle päittäisliitokselle (SFS-EN ISO 15614-1:2017 + A1:2019, 11)

Käsin suoritettavaa päällehitsausta varten tehtiin kuvion 21 esittämään, standardin mukaiseen päällehitsaus koekappaleeseen soveltuva pWPS. Hitsausprosessi 131 MIG pulssihitsaus, perusaine P265GH, putkikoko 60,3 mm x 6,3 mm, lisäaine ERNiCrMo-3, yksi palkokerros, jonka minimi paksuus on 3,0 mm.



Kuvio 21. Päällehitsauksen koekappaleen mitoitus (SFS-EN ISO 15614-7:2019, 11).

Koska CMT-hitsausprosessi poikkeaa lämmöntuonnin, tunkeuman, hitsausnopeuden ym. vuoksi hyvin paljon muista MIG/MAG-prosesseista, ei tavallisella pulssihitsausprosessilla tai muilla

kaarityypeillä tehty menetelmäkoe kata CMT-prosessia. Tämän vuoksi hitsausmenetelmän mahdollinen käyttöönotto tulevaisuudessa edellyttäisi uusien kokeiden tekoa. Lisäksi hitsauksen mahdollinen automatisointi tulevaisuudessa on myös syy, mikä edellyttää omat menetelmäkokeensa.

5.3 Henkilöstön koulutus ja pätevyyskokeet

Uusien hitsausprosessien käyttöönotto vaatii paitsi uusien hitsausohjeiden tekoa, myös hitsaajien koulutusta uusien prosessien käyttöön sekä hitsaajien pätevyyskokeiden suoritusta. Pätevyyskokeiden hitsaamisessa kannattaa huomioida pätevyyden kattavuusalueet ja kokeen hitsaus kannattaa suorittaa aina sellaisella lisäaineella ja koekappaleella, että kattavuus olisi mahdollisimman laaja, huomioiden tietysti aina valmistus ja tarve. Jos esim. tuotannossa hitsataan vain pienahitsejä lisäaineryhmän 1 lisäaineilla, on silloin turhaa hitsata pätevyyskoetta esim. putken päittäisliitokselle tai lisäaineryhmälle 4, vaikka näillä saisikin laajan kattavuuden pätevyyyksiin. Taulukoissa 12 on esitetty eri lisäaineryhmien kattavuusalueet. Jos taas tuotannossa hitsataan kaikenlaisia liitosmuotoja, kannattaa silloin koe hitsata ehdottomasti putkelle, jolla saadaan kattavuus myös pienahitseihin ja levyjen päittäisliitoksiin. Standardissa SFS-EN ISO 9606-1:2017 Hitsaajan pätevyyskoe. Sulahitsaus. Osa 1: Teräkset, on kerrottu yksityiskohtaisesti pätevyyskokeisiin liittyviin tuotemuotoihin, prosesseihin, ainevahvuuksiin, hitsausasentoihin ym. liittyvät yksityiskohdat ja kattavuusalueet.

Taulukko 12. Lisäaineryhmien kattavuusalueet (SFS-EN ISO 9606-1:2017, 15)

Lisäaine	Pätevyysalue					
	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6
FM1	x	x	-	-	-	-
FM2	x	x	-	-	-	-
FM3	x	x	x	-	-	-
FM4	x	x	x	x	-	-
FM5	-	-	-	-	x	-
FM6	-	-	-	-	x	x

x hitsausaineet, joille hitsaaja on pätevoitetty.
 - hitsausaineet, joille hitsaaja ei ole pätevoitetty.

Tämän kehitysprojektin tapauksessa pätevyyskoetta tarvitaan päällehitsaukseen, MAG 135 umpilankahitsaukseen ja MAG 136 täytelankahitsaukseen. Pätevyyskokeet TIG-hitsaukseen henkilöstöllä on jo

olemassa. Päällehitsauksen pätevyyskokeena tehdään putki - levy pienahitsi monipalkohitsauksena lisäaineryhmällä 6, materiaalivahvuudelle 6 mm, joka kattaa materiaalivahvuudet alueella 3–12 mm, lisäaineryhmällä 5, ruostumattomat ja tulenkestävät teräkset ja lisäaineryhmällä 6, nikkeli ja nikkelseokset. MAG 135 pätevyyskoe kannattaa hitsata vähintään levytasolle (mielellään putkitasolle) päittäisliitoksena yhdeltä puolelta ilman juuritukea ja monipalkohitsauksena. Tässä hyvin soveltuva materiaalivahvuus on esim. 8 mm, jolla saadaan kattavuusalueeksi 4–16 mm, tämä riittää laajalle yrityksen tuotantoa ajatellen. MAG 136 prosessilla hitsataan putki - levy pienahitsi monipalkohitsauksena lisäaineryhmällä 1.1 tai 1.2, materiaalivahvuudelle 6 tai 8 mm, joka riittää hyvin tämänhetkiseen tuotantoon.

5.4 Hitsauskustannusten laskenta

Hitsauskustannusten laskenta suoritettiin neljällä eri variaatiolla. Ensin laskettiin tällä hetkellä käytössä oleville TIG-, MAG 135- ja puikkohitsausprosesseille, toinen laskenta käsittää hitsauksen manuaalisesti TIG-, MAG 135- ja MAG 136-prosesseilla sekä MIG 131-prosessilla (päällehitsaus). Kolmas laskenta tehtiin manuaalisen TIG-, MAG 135- ja MAG 136-prosessin ja robotisoidun CMT-hitsauksen (päällehitsaus) yhdistelmälle. Lopuksi haluttiin vielä selvittää kustannukset nostettaessa robotisointiaste mahdollisimman korkealle, eli hitsaamalla kaikki kohtuullisen helposti automatisoitavissa olevat hitsit robotilla. Päittäisliitosten hitsaus robotilla edellyttäisi huomattavan paljon parannuksia myös osien istuvuuden railon valmistuksen ja suhteen, joten ne jäivät tässä tapauksessa edelleen käsin hitsattavaksi.

Koska työn varsinainen aihe ei käsitellyt hitsauksen automatisointia, ei teoriaosiossa lähdetty tästä syystä avaamaan aihetta muilta osin, kuin hieman investoinnin suunnittelun näkökulmasta. Robotihitsauksen kustannuslaskennassa käytettyjä muuttujia, kuten koneiden hintoja ei myöskään lähdetty selvittämään tarkasti, vaan päätettiin käyttää yleisiä keskiarvoja. Automatisoinnin kustannukset haluttiin ottaa mukaan laskentaan lähinnä sen takia, että saatiin karkeasti suuntaa antavaa tietoa kustannusrakenteen muodostumisesta ja suuruudesta, joiden perusteella voidaan arvioida kannattaako automatisointia ylipäänsä lähteä kehittämään näillä tuotantomäärillä.

Hitsauskustannuksia laskettaessa on ensin selvitettävä kullekin muuttujalle lähtöarvot mahdollisimman realistisesti, jotta tuloksesta saataisiin luotettava. Lähtöarvoina voidaan useissa tapauksissa käyttää yleispäteviä keskiarvoja, jos lasketaan kustannuksia esim. yleisillä prosesseilla ja

lisäaineilla hitsattaville perinteisille piena tai päittäisliitoksille. Joissain tapauksissa täytyy käyttää todellisia tuotannosta mitattuja arvoja, jotta tuloksesta saadaan riittävän luotettava.

Kustannuslaskennassa on käytetty yleisiä keskiarvoja mm. koneiden sähkönkulutuksen, suojakaasun kulutuksen, investointikustannusten ja korkokannan ym. arvioinnissa. Hitsiainemäärien ja lisäainetuoton määrittämisessä liitoshitsien osalta käytettiin jo aiemmin esiteltyjä taulukoita. Päälehitsauksen hitsiainemäärän arvioinnin suhteen on menetelty hieman eri tavalla, josta kerrottu erikseen myöhemmin. Hitsien railotyypit ja kokonaispituudet yhden tuotteen valmistusta kohden on eritelty prosessikohtaisesti liitteenä olevassa Excel taulukossa.

Paloaikasuhte, joka kertoo montako prosenttia työajasta on varsinaista hitsiä tuottavaa aikaa, on aina tapauskohtaista ja usein hieman vaikeaa tarkasti selvittää, manuaalihitsauksessa se on tavanomaisia prosesseja käytettäessä yleensä välillä 20–40 %. Etenkin tässä työssä prosessikohtaisten paloaikasuhteiden määrittäminen oli haastavaa, koska hitsaustyöhön sisältyy hyvin paljon kaikenlaisia apuaikoja ja kappaleen siirtelyä, lisäksi monessa työvaiheessa joudutaan hitsaamaan kahdella eri prosessilla. Paloaikasuhteen arviointi liitoshitsien osalta tehtiin käyttäen yleisiä prosessikohtaisia keskiarvoja. Paloaikasuhteen arvona manuaalihitsauksessa on käytetty kaikilla prosesseilla liitoshitseissä 20 %. Robottihitsauksen paloaikasuhteenä on käytetty 60 %.

Manuaalisesti suoritettavan päällehitsauksen paloaikasuhteen määrittämistä varten mitattiin tuotannosta todellinen toteutunut paloaikasuhte puikkohitsauksessa hitsauskaapeliin liitettävän Kempin valmistaman ArcTimer mittalaitteen avulla. Päälehitsauksessa mitattu paloaikasuhte on normaalia MIG/MAG tai puikkohitsausta huomattavasti korkeampi, johtuen siitä, että pyörittäjää apuna käyttäen kappaleen liikutteluun tarvittavan apuajan osuus jää hyvin pieneksi ja puikko tai lanka voi palaa lähes tauotta. Mittaamalla paloaikasuhteeksi saatiin puikkohitsauksen osalta 40 %, MIG-päälehitsauksessa käytetään tästä vielä hieman korkeampaa 43 %:n paloaikasuhdetta. Käsinsuoritettavan päällehitsauksen hitsauskustannukset laskettiin koehitsauksista saatujen tulosten perusteella MIG pulssihitsaukselle Mison Ar suojakaasulla hitsattaessa.

Robottihitsauksen kustannuslaskennassa käytetyt hitsausparametrit jouduttiin arvioimaan, koska testauksia ei tämän työn aikana ollut mahdollisuuksia tehdä. Hitsausprosessiksi robottihitsaukseen valittiin CMT-hitsaus. Aiemmin teoriaosuudessa esitettyjä Froniuksen tekemiä testaustuloksia

hyödyntäen arvioitiin hitsiainetuotoksi CMT-pulssi ohjelmalla ja Mison Ar suojavaasulla noin 5 kg/h hitsausvirran ollessa 205 ampeeria, käytettäessä 1,2 mm:n lisäainelankaa. Hitsausnopeudeksi näillä arvoilla saadaan pinnoitushitsauksessa noin 50 cm/min. Lisäainekustannuksena käytettiin sekä manuaali MIG-hitsauksessa, että robottihitsauksessa tämänhetkistä lisäaineen hintaa 52 €/kg.

Päällehitsaukseen tarvittavan metrimäärän määrittäminen piirustuksista tai hitsattavasta kappaleesta mittaamalla on tässä tapauksessa melko hankalaa ja epätarkkaa pinnoitettavan alueen geometrian takia, tästä syystä laskuissa käytetty hitsin kokonaispituus on määritetty hieman poikkeavasti hitsipalon poikkipinta-alaan perustuvan hitsiainemäärän (kg/m), yhden kappaleen pinnoitukseen käytetyn lisäainemäärän ja puikkokohtaisen hyötyluvun (56 %) perusteella. Tällä menetelmällä saatua hitsin pituutta 21 m, on käytetty myös MIG- ja CMT-hitsausprosessien hitsauskustannusten laskennassa.

Manuaali MIG/MAG-hitsauksen kustannuslaskennassa investointikuluihin on laskettu päällehitsausta varten rakennettavat kaksi hitsaustyöpistettä, joihin tarvitaan kaksi Kempin X5 hitsauskoneita, kolmiakseliset pyörituspöydät, savukaasuimurit, kappaleen siirtelyyn tarvittavat nostoapuvälineet, lisäksi on huomioitu menetelmäkokeeseen ja testaukseen kuluva osuus ja koneiden huoltokustannukset. Muulle hitsaukselle investointeja laskettu mukaan, koska yrityksellä on jo käytössään tähän soveltuvat koneet. Manuaalihitsauksen suuntaa antavat investointikustannukset on eritelty taulukossa 13.

Robotisoitua hitsausta varten täytyisi työturvallisuusnäkökohtien takia rakentaa joko aitaamalla tai kiinteillä seinillä ympäristöstä eristetty hitsaussolu. Hitsaussolun pääasialliset kustannukset syntyisivät sen rakennuskustannuksista, nivelvarsirobotista (3–6 kg), Froniuksen CMT-hitsauskoneesta, L-pyörituspöydästä, hitsauskiinnittimistä (2 kpl), savukaasuimurista, nostoapuvälineistä ja turvalaitteista. Lisäksi kustannuksia syntyisi menetelmäkokeiden koulutusten testausten ym. tuotannon ylös ajon edellyttämistä toimista. Huoltokustannusten arviointi oli tässä vaiheessa ja ilman kokemusta melko vaikeaa, mutta niihin arvioitiin kuluvan noin 2000 €/vuosi. Myöskään tässä laskelmassa ei huomioitu käsin hitsaamiseen käytettäviä koneita. Lisäksi hitsauspaikkoihin tarvittaisiin joitain käsityökaluja ym., joita ei tässä laskelmassa huomioitu. Robottihitsauksen edellyttämät investoinnit on esitetty taulukossa 13, ja ne ovat suuntaa antavia hinta-arvioita.

Taulukko 13. Investointikustannukset.

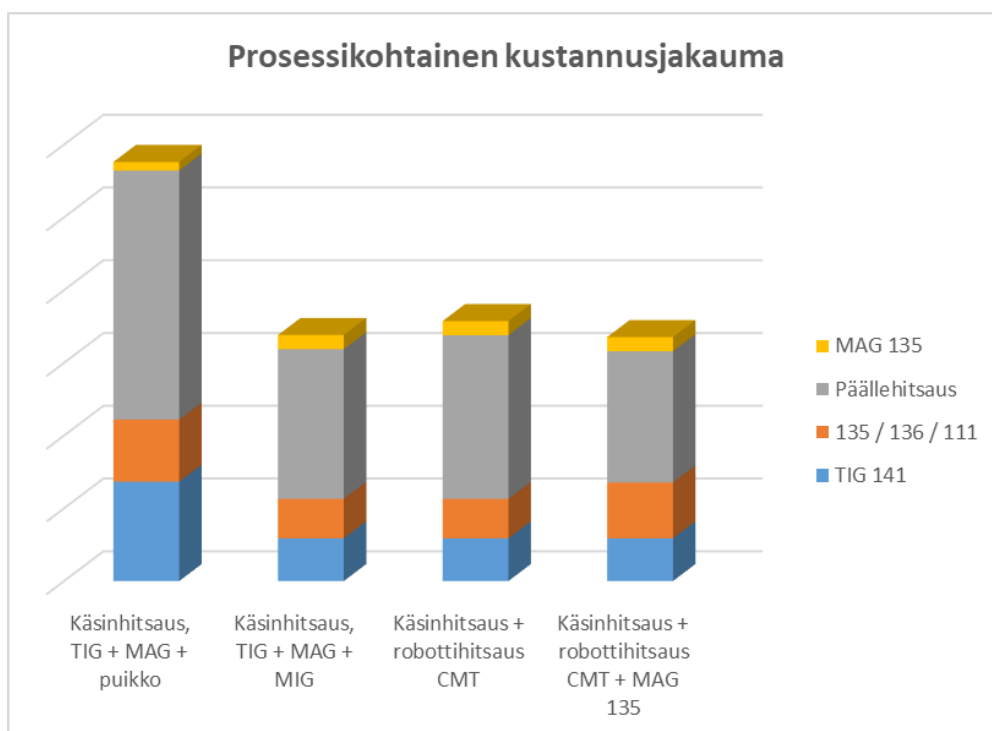
Kohde	Robotisoitu hitsaus	Manuaalihitsaus
Hitsausrobotti ja railonseuranta	45 000,00 €	0,00 €
Hitsauskoneet	20 000,00 €	20 000,00 €
Kappaleenkäsittelypöydät	30 000,00 €	20 000,00 €
Kiinnittimet	5 000,00 €	5 000,00 €
Turvalaitteet	15 000,00 €	0,00 €
Ilmanvaihto	10 000,00 €	10 000,00 €
Solun suunnittelu ja rakennus	25 000,00 €	5 000,00 €
Koulutus	10 000,00 €	5 000,00 €
Ohjelmointi	15 000,00 €	0,00 €
Menetelmäkokeet ja testaus	10 000,00 €	5 000,00 €
Projektin hallinta	10 000,00 €	0,00 €
Yhteensä	195 000,00 €	70 000,00 €

Puikkohitsauskustannusten laskennassa ei huomioitu investointeja, koska yrityksellä on jo kyseiset koneet käytössä, eikä investointeja tarvitse tässä tapauksessa tehdä. Puikkohitsauksen lisäainehintana on käytetty viime vuoden keskihintaa, joka oli 72 €/kg. Loput laskennassa käytetyt lähtötiedot löytyvät Excel laskentataulukoista ja ne ovat yleisesti käytettyjä keskiarvoja, eikä siten täysin tarkkoja.

6 Kustannuslaskennan tulokset

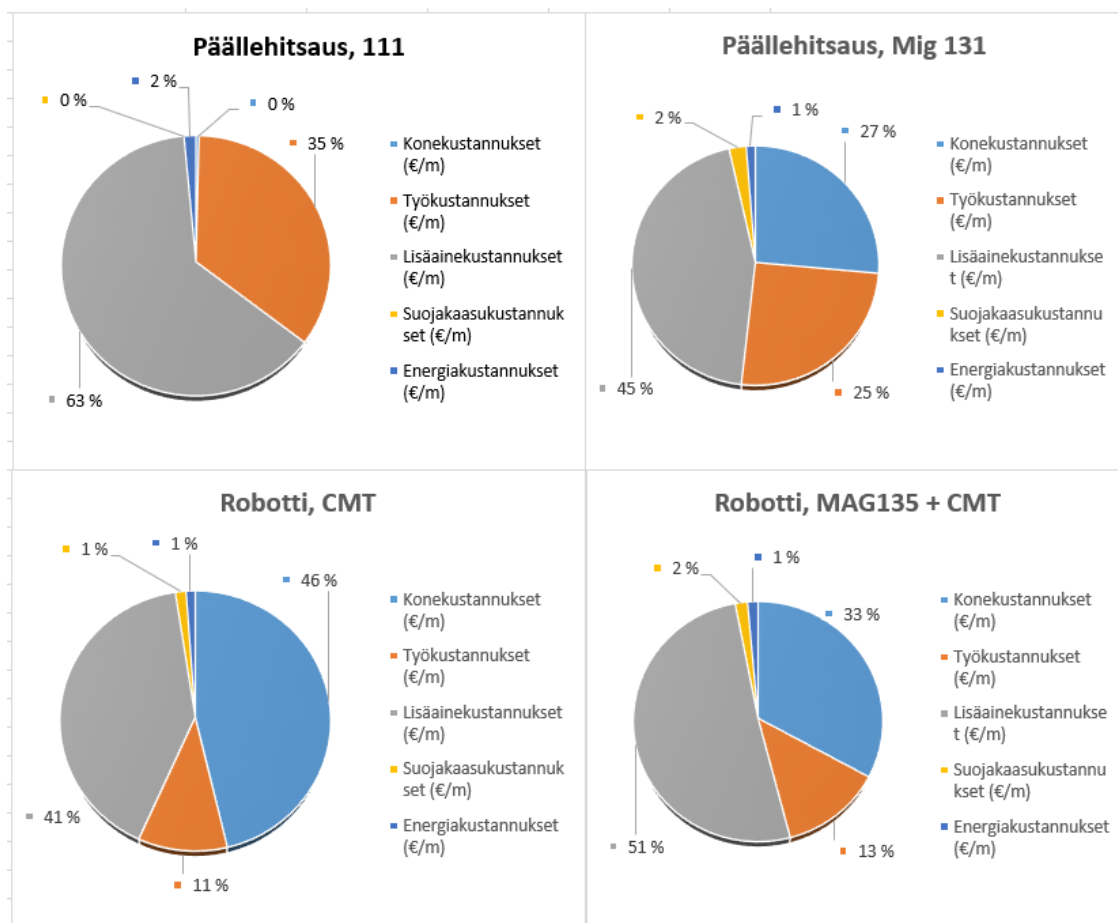
Hitsauskustannusten laskentaa varten tehtiin Excelillä laskentataulukot (liitteet 3–6) kullekin eri hitsaussuunnitelmalle. Taulukoihin oli helppoa syöttää tapauskohtaiset arvot kullekin prosessille ja saumatyypille. Lopputuloksena saatiin tuotekohtaiset hitsauskustannukset kappale ja vuositasolla vertailussa oleville prosesseille. Laskenta huomioi myös prosessikohtaisten investointien vaikutuksen lopputulokseen.

Kuvion 22 yhdistelmäkaaviossa on esitettyä kaikkien neljän eri hitsaussuunnitelman kustannusjakauma prosessikohtaisesti. Kaaviosta on selvästi havaittavissa, kuinka suuri osuus kustannuksista syntyy pelkästään päällehitsauksen aiheuttamista kustannuksista. Päällehitsaus synnyttää selvästi yli puolet hitsauksen kokonaiskustannuksista kaikissa tapauksissa. TIG-hitsaus on toiseksi suurin kustannusten aiheuttaja manuaalihitsauksessa, joka on hyvin nähtävissä kaavion ensimmäisessä pylväässä. Muissa kolmessa pylväässä TIG-hitsauksen osuus on pienentynyt jo yli puolella siitä syystä, että osa TIG-prosessilla hitsattavista hitseistä korvattiin MAG 135-prosessilla.



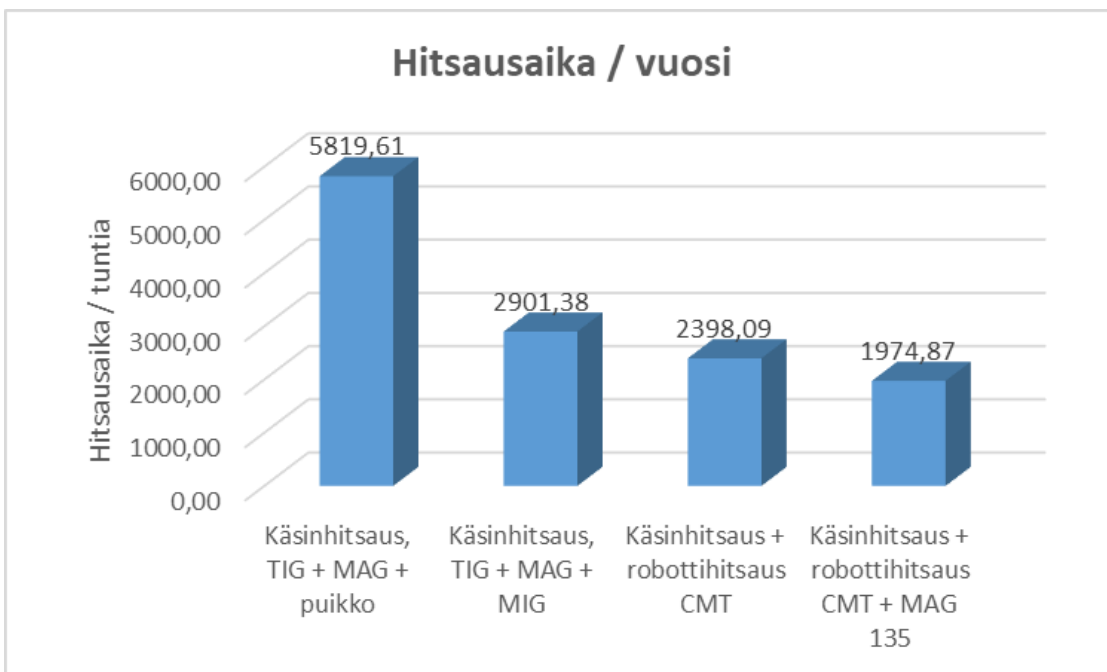
Kuvio 22. Eri hitsausvariaatioiden kustannusjakaumat prosessikohtaisesti

Alla olevassa kaaviossa on esitetty päällehitsauksen osakustannukset eri hitsaussuunnitelmiille. Huomattavaa on, kuinka suuren osuuden kokonaiskustannuksista lisäainekustannukset muodostavat. Puikkohitsauksessa osuus on jopa 63 %, joka johtuu puikkohitsauslisäaineen korkeammasta (noin 38,5 % suurempi) hinnasta sekä reilusti pienemmästä hyötyluvusta. Puikkohitsauksen aiheuttama tuotekohtainen lisäainekustannus oli noin 432 €, kun puolestaan 1,2 mm:n lisäainelangan ja suojakaasun yhteishinnaksi jäi ainoastaan noin 193 €. Lisäainekustannukset ovat muilla prosesseilla keskenään samansuuruiset, kustannusjakaumaero muiden prosessien välillä aiheutuu pääasiassa investointikustannusten ja työkustannusten eroista.



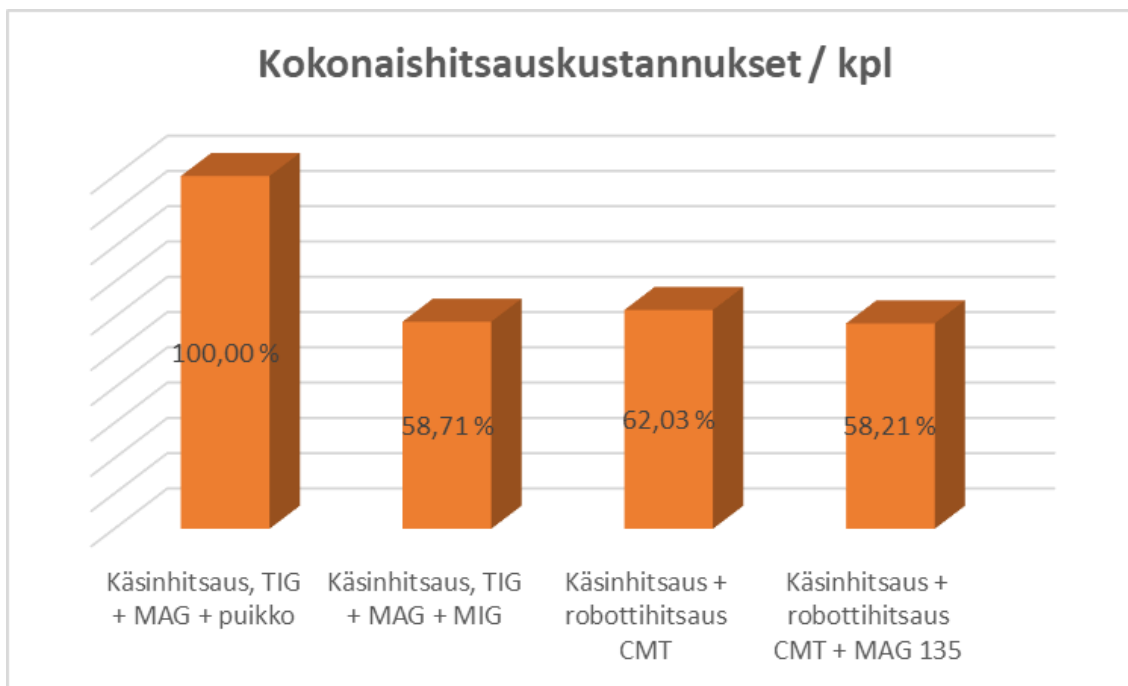
Kuvio 23. Päällehitsauksen osakustannuksien kustannusjakaumat.

Hitsaustyöaika kuvaavassa kaaviossa on eritelty eri suunnitelmien välisen erot vuosittaisena valmistusaikana. Laskelmien perusteella jo pelkästään puikko- ja TIG-hitsauksesta siirtyminen tuottavampaan MAG-hitsaukseen karkeasti puolittaisi hitsausajan ainakin laskennallisella tasolla mitattuna. Puikko- ja TIG-hitsauksen suuri hitsausaika johtuu pääasiassa jo aiemmin teoriaosuudessa kerrotusta prosesseille ominaisista huomattavasti MAG-prosessia heikommista lisäainetuotosta. Automatisoinnilla saataisiin tästäkin vähennettyä vielä noin kolmannes. Päällehitsaus muodostaa myös ajallisesti suurimman osuuden koko tuotteen hitsaukseen kuluva kokonaisajasta.



Kuvio 24. Kokonaishitsaustyöaika vuositasolla.

Hitsauksen muodostamat kokonaiskustannukset eri hitsausvariaatioiden suhteen on esitettyä seuraavassa kaaviossa. Tulosten perusteella voidaan todeta, että siirryttäessä puikko- ja TIG-hitsauksesta pääasiassa muihin prosesseihin, putoaa kustannukset muutoksen edellyttämistä investoinneista huolimatta keskimäärin kuuteenkymmeneen prosenttiin lähtötilanteesta kaikkien variaatioiden osalta. Automatisoinnin maksimoimisella saavutettaisiin näiden laskelmien tulosten perusteella jopa pienimmät kustannukset. Tulos on erikoinen siinä määrin, että vaikka hankittavan robotin investoinnista aiheutuisi 205000 € investointikustannukset kolmen vuoden kuoletusajalla, vuotuisten konekustannusten ollessa lähes 72000 € olisi investointi kannattava, vaikka konetunti-aika jäisi vain noin 750 tuntiin vuodessa. Lisäksi tässä kannattaa huomioida vielä robotti-investoinnin jäännösarvo kolmen vuoden päästä, joka on vielä huomattavan suuri.



Kuvio 25. Hitsauksen kokonaiskustannusten muodostumisen vertailu eri variaatioiden välillä.

7 Pohdinta

Tämän opinnäytetyön tärkeimpänä tavoitteena oli hitsaustyöstä aiheutuvien kustannusten pienentäminen ja laadun parantaminen yrityksessä sarjatyönä valmistettavan painelaitteen komponentin valmistuksessa. Kehittämistyötä pyrittiin tekemään myös yrityksen muuta valmistusta silmällä pitäen siten, että tuloksista olisi mahdollisesti hyötyä tulevaisuudessa muidenkin tuotteiden valmistuksessa.

Työn alussa esitettyihin tutkimustuloksien löydettiin mielestäni hyvin vastauksia. Lähtötilanteen valmistuskustannusten määrittäminen pystyttiin tekemään melko suurella tarkkuudella ja laskennasta saatuja tuloksia vertaillen yrityksen kirjanpitoon voitiin tulosten pitäen hyvin paikkansa. Laskennasta saatujen tulosten perusteella nähtiin selvästi, että suurimmat hitsauskustannukset syntyivät päällehitsauksen aiheuttamista lisäaine- ja työkustannuksista ja näitä kuluja pienentämällä saavutetaan suurin hyöty. Selvitystyön perusteella löydettiin huomattavasti kustannustehokkaampia vaihtoehtoja päällehitsaukseen, joiden avulla kustannuksista pystytään leikkaamaan helposti yli kolmannes. Myös muun puikko- ja TIG-hitsaamisen minimoinnilla näytti olevan merkittäviä kustannuksia alentavia vaikutuksia.

Lähtökohtana oli hitsausmenetelmien kehittäminen pääasiassa manuaalihitsausta silmällä pitäen, koska ainakaan vielä lähitulevaisuudessa valmistuksen automatisointiin ei ole tarkoitus ryhtyä. Automatisoinnin mahdollisuuksista ja kustannuksista tuotteen valmistuksessa haluttiin kuitenkin tehdä tämän työn yhteydessä suuntaa antavia laskelmia, joiden pohjalta jatkosuunnitelmia voidaan tulevaisuudessa kartoittaa.

Työn tuloksena syntyi alustavat laskelmat hitsauskustannuksista neljälle eri valmistusvariaatiolle, joista ensimmäinen käsitti tämänhetkisen valmistuksen, toisessa variaatiossa nykyinen puikkohitsaus korvattiin päällehitsauksen osalta MIG-prosessilla ja muiden hitsien osalta pyrittiin hyödyntämään mahdollisuuksien mukaan MAG-hitsausprosesseja niin paljon, kuin oli mahdollista. Kolmannessa suunnitelmassa päällehitsaus toteutettiin robotisoidusti CMT-prosessilla ja neljännessä robotisointia hyödynnettiin niin paljon kuin tuotteen valmistuksessa oli mahdollista. Lisäksi työssä perehdyttiin päällehitsauksen suoritukseen MIG-pulssihitsausprosessilla, jolla tehtiin myös joitain hitsauskokeita. Kokeiden tarkoituksena oli hitsiaineen ja perusaineen sekoittumisen ja tunkeuman määrittäminen karkealla tasolla. Kokeet suoritettiin erillisissä EduTec Oy:n (yksityinen koulutus- ja

testauspalveluja tuottava yritys Varkaudessa) testaustiloissa, josta löytyi tarvittavat hitsauslaitteistot, lisäaineet hitsaajan suojavarusteet sekä kaikki muu tarpeellinen. Koehitsaukset kävi tekemässä PWS:n oma hitsaaja EduTec:in henkilökunnan avustamana. Myös sekoittumisasteen mittaukset tehtiin kyseisen yrityksen laitteilla ja tiloissa. Työssä perehdyttiin myös uusien hitsausprosessien käyttöönotosta aiheutuviin muihin toimiin, kuten menetelmäkokeisiin ja hitsaajien pätevöintiin liittyviin asioihin, joihin tutkimuskysymyksissä haettiin vastauksia. Kyseisiin seikkoihin ja niiden ratkaisuihin on perehdytty tarkemmin työn toteutusosiossa. Jatkossa tarvittavan hitsaajien koulutuksen, hitsaajien pätevöinnin sekä menetelmäkokeiden teon toteuttaa EduTec Oy. Opinnäytetyöhön liittyvät salassa pidettävät tiedot, kuten henkilötiedot, tutkimustulokset, yrityksen liikesalaisuuden liittyvät tiedot sekä kaikki muut tiedot, jotka eivät ole lain mukaan julkista tietoa, oli koko opinnäytetyöprosessin ajan käytettävissä ainoastaan työtä varten ja itseni hallussa. Salassa pidettävät tiedot poistetaan kaikista tallennusvälineistä tämän työn valmistuttua.

Päällehitsauksen testien suorituksessa olisi kannattanut testata useampaa eri suojakaasua, jolloin olisi saatu luotettavampi käsitys eri kaasujen soveltuvuudesta hitsaukseen ja vaikutuksista tunkeumaan. Muutenkin testauksia olisi tehty enemmän, jos resurssit olisivat siihen riittäneet. Näin olisi päästy tutkimaan paremmin mm. hitsausparametrien, hitsauspolttimen kuljetusasennon, palkojen lomituksen, hitsausnopeuden, perusaineen ainevahvuuden, välipalkolämpötilan jne. vaikutusta hitsin tunkeumaan ja sekoittumiseen. Myös CMT-prosessin testaus manuaalihitsauksessa jäi tästä työstä resurssipulan vuoksi pois ja laskelmat voitiin tehdä vain aiemmin suoritettujen tulosten perusteella.

Päällehitsattavan tuotteen muodon ja materiaalivahvuuden vuoksi testausten tuloksia ei voida pitää täysin luotettavana, koska testit on tehty erilaisiin kappaleisiin, kuin mihin varsinainen hitsaus tulee. Koehitsaukset tulisi suorittaa vielä tuotannossa, jolloin nähtäisiin hitsauksen lämmöntuonnin ja kappaleen materiaalivahvuuden ja muiden mahdollisten muuttujien aiheuttamat vaikutukset sekoittumiseen ja tunkeumaan. Kappale saattaa kuumentua hitsauksen aikana melko paljon, koska hitsiä tulee huomattava määrä pienelle alueelle. Tämä saattaa aiheuttaa jäähdytystarvetta palkojen välillä, ettei välipalkolämpötila ylitä. Mahdollisen jäähdytystarpeen vaikutuksia kustannuksiin ei laskelmissa myöskään huomioitu, koska jäähdytyksen tarpeellisuudesta ei ollut vielä testattua tietoa. Huomioitavaa on, että jos jäähdytystarvetta ilmenee, vaikuttaa se hitsausaikaan ja nostaa näin ollen hitsauskustannuksia. Yksi hyvä jatkokehitysidea tähän projektiin olisi jonkinlaisen

ilma tai nestekiertoisen jäähdytysjärjestelmän kehittäminen kappaleen jäähdyttämiseksi hitsauksen aikana.

Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin mielestäni kustannuslaskelmien, suoritettujen testausten sekä muiden suunnitelmien osalta kohtuullisen hyvin. Alkuperäisestä tavoitteesta, joka sisälsi työn saattamisen käytännön tasolla pidemmälle yhtäaikaaisesti opinnäytetyöprosessin tekemisen tahdissa, jouduttiin käytännön syistä ja aikataulullisista rajoitteista johtuen luopumaan. Työstä saatiin kuitenkin hyvät suuntaa antavat lähtötiedot käytännön toteutuksen avuksi, joten työstä on varmasti hyötyä tulevaisuudessa ja tuloksia voidaan käyttää joiltain osin jopa hinnoittelun apuna.

Saatujen tulosten perusteella näyttää nykyisten hitsausprosessien korvaaminen suurempituottoisilla MIG/MAG-prosesseilla todella kannattavalta vaihtoehdolta. Vaikka muutostyö vaatii yritykseltä resursseja ja investointeja näyttävät ne silti pieniltä saavutettavissa olevien hyötyjen rinnalla. Vaikka tässä vaiheessa ei automatisointiin olekaan vielä aikomusta ryhtyä, kannattaa sen tuomat edut pitää tulevaisuudessa mielessä ja, jos tuotantomäärät alkavat kasvamaan entisestään, niin investointi voi tulla vielä ajankohtaisemmaksi. Tämänhetkisessä tilanteessa manuaalisesti suoritettavasta MIG/MAG-hitsauksesta saadaan kyllä jo suuri hyöty verrattuna puikkohitsaukseen, ja on muistettava, että hyöty ei jää ainoastaan kustannusten alenemiseen, vaan suuri hyöty saadaan lisäksi valmistuksesta vapautuvasta työvoimasta, jota voidaan käyttää muuhun tuottavaan työhön. Mielestäni hankkeen viemiseksi eteenpäin on selkeästi hyvät lähtökohdat. Mikäli yrityksessä lähdetäisiin automatisoimaan hitsaustyötä, olisi oma suositukseni ehdottomasti vaihtoehto, jossa automatisointitaso nostettaisiin mahd. ylös. Tämä edellyttäisi vähän enemmän toimia ja investointeja, mutta saavutettava hyöty olisi suuri ja robotin työaikaakin saataisiin korkeammaksi.

Lähteet

EWM. N.d. Viitattu 2.3.2024. <https://www.ewm-group.com/en/innovation-research/tig-welding-processes.html>.

Fronius. N.d. CMT cold metal transfer. Viitattu 15.4.2024. https://pronius.fi/wp-content/uploads/2021/11/Esite_CMT_FI-1.pdf.

Fronius. 2022. CMT cold metal transfer. Viitattu 10.5.2024. https://www.pronius.fi/wp-content/uploads/2022/01/Esite_CMT_FIN.pdf

Hiltunen, E. 2023. Hitsausliitoksen metallografinen tutkimus. Kansainvälisen hitsausinsinöörin IWE/IWT kurssimateriaali. Lappeenranta: LUT

Holger Hartmann Oy. Viitattu 25.2.2024. <https://www.holgerhartmann.fi/blogi/kuinka-xrf-analysaattori-toimii>.

Kananen, J. 2009. Toimintatutkimus yritysten kehittämisessä. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kananen, J. 2014. Toimintatutkimus kehittämistutkimuksen muotona. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kyröläinen, A. & Lukkari, J. 1999. Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaukset. MET- julkaisuja, 2, 1999.

Lepola, P. & Ylikangas, R. 2021. Hitsaustekniikka ja teräsrakenteet. Helsinki: Sanoma Pro.

Lukkari, J. 2002. Hitsaustekniikka. Perusteet ja kaarihitsaus. Helsinki: ISBN.

Lukkari, J. 2011. Hitsaustalous ja tuottavuus. Hitsaustekniikka lehti, 63, 3, 2–8. Helsinki: Suomen hitsausteknillinen yhdistys.

Lukkari, J. 2022. Hitsauskustannusten laskenta. Hitsaustekniikka lehti, 75, 2, 6. Helsinki: Suomen hitsausteknillinen yhdistys. Viitattu 20.5.2024. https://cdn1.utbudet.com/storage/ma/6f0b93ac52e74e188812b36bc971902a/f2abba3380514896b2fd36239dff3629/pdf/C6BFAC3806FE0E3AA57D935A817A1E0793AF2581/HT_2_2022_Hitsaustalous%20ja%20tuottavuus.pdf.

Lukkari, J., Kyröläinen, A. & Kauppi, T. 2019. Hitsauksen materiaalioppi 2B. Helsinki: Suomen hitsausteknillinen yhdistys.

Penttilä, S. 2023a. Pinnoitus ja pinnoitushitsaus. Kansainvälisen hitsausinsinöörin IWE/IWT kurssimateriaali. Lappeenranta: LUT.

Penttilä, S. 2023b. Hitsauskustannukset ja talous. Kansainvälisen hitsausinsinöörin IWE/IWT kurssimateriaali. Lappeenranta: LUT.

Penttilä, S., Hiltunen E. 2022. Hitsausrobotisolun investointihankinta. Hitsaustekniikka lehti, 75, 2, 31–34. Helsinki: Suomen hitsausteknillinen yhdistys. Viitattu 20.5.2024. https://cdn1.ut-budet.com/storage/ma/6f0b93ac52e74e188812b36bc971902a/f2abba3380514896b2fd36239dff3629/pdf/C6BFAC3806FE0E3AA57D935A817A1E0793AF2581/HT_2_2022_Hitsaustalous%20ja%20tuottavuus.pdf.

Raekorpi, P. 2023. Kemppi, MIG/MAG-hitsaus, prosessin teoria ja käytäntö. Kansainvälisen hitsaus-insinöörin IWE/IWT kurssimateriaali. Kemppi.

SFS-EN ISO 15607:2019. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Yleisohjeet. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Vahvistettu 1.11.2019. Viitattu 5.3.2024. <http://janet.finna.fi>, SFS Online.

SFS 3052:2020. Hitsaussanasto. Yleistermi. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Vahvistettu 28.1.2020. Viitattu 20.2.2024. <http://janet.finna.fi>, SFS Online.

SFS-EN ISO 4063:2023. Hitsaus, kovajuotto, juotto ja leikkaus. Prosessien nimikkeet ja numerotunnukset. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Vahvistettu 14.4.2023. Viitattu 20.2.2024. <http://janet.finna.fi>, SFS Online.

SFS-EN ISO 15614-1:2017 + A1:2019. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä menetelmäkokeella. Osa 1: Terästen kaari- ja kaasuhitsaus sekä nikkelin ja nikkelseosten kaarihitsaus. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Vahvistettu 30.8.2019. Viitattu 25.5.2024. <http://janet.finna.fi>, SFS Online.

SFS-EN ISO 15614-7:2019. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä menetelmäkokeella. Osa 7: Pällehitsaus. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Vahvistettu 5.12.2019. Viitattu 10.3.2024. <http://janet.finna.fi>, SFS Online.

Stenbacka, N. 2011. Hitsaustalous ja tuottavuus. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys.

Vainikka, R. 2024. Esimerkkejä CMT-pinnoituksesta. Sähköpostiviesti 23.4.2024. Vastaanottaja S. Liukkonen.

Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkirja. Mikkeli: Ganesis-Kirjat. 21p.

Nurminen, A. 2019. Ohjeita artikkelien kirjoittajille. Sähköpostiviesti 16.4.2019. Vastaanottaja T. Rautio. Viestinnän lehtorin ohjeet julkaisusarjaan kirjoittaville restonomeille Jyväskylän ammattikorkeakoulussa.

Welding alloys. Viitattu 25.2.2024. <https://www.welding-alloys.com/application/cladding-welding-consumables/>.

Liitteet

Liite 1. Hitsisaumojen pituudet ja railotyypit manuaalihitsauksessa. (salainen)

**Liite 2. Hitsisaumojen pituudet ja railotyyppit robotisoidussa hitsauksessa.
(salainen)**

Liite 3. Kustannusten muodostuminen manuaalihitsauksessa, prosesseilla TIG 141, MAG 135 ja puikko 111. (salainen)

Liite 4. Kustannusten muodostuminen manuaalihitsauksessa, prosesseilla TIG 141, MAG 135, MAG 136 ja MIG 131. (salainen)

Liite 5. Kustannusten muodostuminen prosesseilla TIG 141, MAG 135, MAG 136 ja CMT-robotti. (salainen)

Liite 6. Kustannusten muodostuminen prosesseilla TIG 141, MAG 135 ja robotti CMT + robotti MAG 135. (salainen)