ROBOTTIHITSATTAVAN TUOTTEEN SUUNNITTELUN VAATIMUKSET JA SOVELTUVUUS

DESING REQUIREMENTS AND APPLICABILITY OF A ROBOT-WELDED PRODUCT

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2024

Topi Laakkonen

Tarkastajat: TkT Sakari Penttilä

DI Hannu Lund

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT energiajärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Topi Laakkonen

Robottihitsattavan tuotteen suunnittelun vaatimukset ja soveltuvuus

Konetekniikan kandidaatintyö

2024

34 sivua, 17 kuvaa, 0 taulukkoa ja 0 liitettä

Tarkastajat: TkT Sakari Penttilä ja DI Hannu Lund

Avainsanat: Robottihitsaus, Suunnittelu, Liitosmuodot, Ilmaraon muuttuvuus, Robotisoitavan tuotteen suunnittelu

Tämän kandidaatintyö tehtiin osana Euroopan unionin osarahoittamaa Hitsaus osaksi Etelä-Karjalan elinvoimaa ja näkyvyyttä (HITOKSEEN)-hanketta. Tarkoitus oli selvittää robottihitsattavan tuotteen suunnitteluun liittyviä vaatimuksia ja ongelmia. Tutkinnan alla oli erilaiset liitosmuodot, railot ja hitsausasennot. Työssä käsiteltiin robottihitsausta ja robottihitsattavan tuotteen suunnittelua kirjallisuuskatsauksella, jossa lähteinä käytettiin hitsaus- ja suunnittelu kirjoja. Tämän lisäksi suoritettiin kokeellinen tutkimus, joissa testattiin eri liitosmuotoja, railoja ja ilmaraon muuttumisen vaikutusta hitsin onnistumiseen.

Kirjallisuuskatsauksen ja kokeellisen tutkimuksen perusteella saatiin selville, että kulmaliitos jalkoasennossa on paras mahdollinen liitosmuoto robotti hitsaukselle, koska siinä saadaan laadukasta hitsiä pienillä esivalmisteluvaatimuksilla. Kappaleita suunnitellessa pitää huomioida robottikäsivarren viemä tila ja sen jäykkyys verrattuna ihmiskäteen, kun hitsataan ahtaissa paikoissa. Myös vaikeita liitosmuotoja, kuten päittäisliitosta pitäisi välttää ja korvata se muilla liitos muodolla.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Topi Laakkonen

Desing requirements and applicability of a robot-welded product

Bachelor’s thesis

2024

34 pages, 17 figures, 0 tables and 0 appendices

Examiners: D.Sc Sakari Penttilä and M.Sc Hannu Lund

Keywords: Robotic welding, Desing, Joint types, Air gap variability, Design of a robotizable product

This bachelor's thesis was done as part of the Welding for Vitality and Visibility of South Karelia (HITOKSEEN) project, co-financed by the European Union. Purpose was to find out the requirements and problems related to the design of a robot-welded product. Various joint forms, grooves and welding positions were under investigation. The work dealt with robot welding and design of a robot-welded product with a literature review, where welding and design books were used as sources. In addition to this, test welds were performed. Where different joint forms, grooves and the effect of changing the air gap and the success of the weld were tested.

Based on the literature review and test welds, it was found that the corner joint in the flat position is the best possible joint form for robot welding, because it produces a high-quality weld with low pre-preparation requirements. When designing parts, you must take into account the space taken up by the robot hand and its stiffness compared to the human hand when welding in tight spaces. Difficult joint forms, such as butt joints, should also be avoided and replaced with another form of joint.

KIITOKSET

Kiitokset ohjaajilleni Sakari Penttilälle ja Hannu Lundille työssä auttamisesta ja ohjeistuksesta. Kiitokset myös LUT hitsauslaboratorion henkilökunnalle avusta koe hitsien suorittamisessa.

LYHENNELUETTELO

CAD	Computer Aided Desing
DOF	Degree Of Freedom
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas welding

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Kiitokset

Lyhenneluettelo

1 Johdanto ... 8
1.1 Tutkimuksen tausta ... 8
1.2 Tutkimusongelma ja kysymykset ... 8
1.3 Työn tavoitteet ja rajoitteet ... 8
2 Hitsausmenetelmät ... 10
2.1 MIG/MAG hitsaus ... 10
2.2 Liitosmuodot ja railonvalmistus ... 11
2.2.1 Päällekkäisliitos ... 12
2.2.2 Päittäisliitos ... 13
2.2.3 Kulmaliitokset ... 13
2.2.4 Reunaliitokset ... 13
2.2.5 Railonvalmistus ... 13
3 Vaatimukset robottihitsaukselle ... 15
3.1 Robottihitsaus ... 15
3.1.1 Toleranssit ... 15
3.1.2 Laadun vaatimukset ... 16
3.1.3 Robottiasemat ... 16
3.1.4 Hitsausasennot ... 16
3.2 Robottihitsattavan tuotteen suunnittelun haasteet ... 17
3.2.1 Luoksepäästävyys ja ulottuvuus ... 18
3.2.2 Liitosmuodon valinta ... 18
4 Menetelmät ... 19
4.1 Koejärjestelyt ... 19
4.2 Koekappaleet ... 20
5 Tulokset ja analyysi ... 23

5.1 Päittäisliitos 23
5.2 Kulmaliitos 24
5.3 Nurkkaliitos 26
5.4 Tulosten analyysi 28
6 Pohdinta 29
6.1 Vertailu 29
6.2 Tutkimuksen Luotettavuus 29
6.3 Virhetarkastelu 30
6.4 Johtopäätökset 30
6.5 Tuotettu uusitieto ja tulosten hyödynnettävyys 31
6.6 Mahdolliset jatkotutkimukset 31
7 Yhteenveto 32
Lähteet 33

1 Johdanto

Tässä kappaleessa käydään läpi työn tarkoitusta, tutkimuskysymyksiä ja tutkimusongelmaa. Lopussa rajataan tutkimuksen laajuutta ja kerrotaan tutkimuksen suorittamisesta.

1.1 Tutkimuksen tausta

Tämän työn on tarkoitus auttaa robottihitsattavien tuotteiden suunnittelussa ja helpottaa ennen käsin hitsattujen tuotteiden tekoa robottihitsaamalla. Hitsausrobotin käyttöasteen noustessa, siihen sijoitetut pääomat saataisiin nopeammin takaisin ja tuotannosta saataisiin tehokkaampaa. Robottihitsauksen käytöstä on myös työergonomisia ja työturvallisia hyötyjä, koska hitsareiden ei tarvitse olla huonoissa asennoissa hitsaamassa pitkiä aikoja ja hitsauksesta syntyvä UV-säteily ei altista hitsaajaa läheskään yhtä paljoa, kun operaattori voi olla kauempana hitsaus prosessista.

1.2 Tutkimusongelma ja kysymykset

Ongelmana on robottihitsattavaksi sopivien kappaleiden tunnistaminen ja niihin käytettäväksi sopivat liitosmuodot, railot ja hitsausasennot. Hitsausasemien eri layoutit ja hitsauksen laadulliset vaatimukset ovat myös osana ongelmaa, kuten läpihitsautumisen onnistuminen erilaisilla liitoksilla. Työ vastaa kysymyksiin ” Mitkä liitosmuodot ja kappaleet sopivat parhaiten robottihitsattavaksi?” ja ”Miten suunnitella robottihitsattavia tuotteita?”.

1.3 Työn tavoitteet ja rajoitteet

Tässä kandityössä keskitytään vain MIG/MAG hitsaukseen ja vain rakenneteräksestä valmistettuihin tuotteisiin. Syynä on, että työn kokeellinen osuus suoritetaan hitsausrobotilla, jossa on MIG/MAG varusteet kiinni ja kappale materiaalina terästä. Työssä käytetään Visual Components Robotics OLP -ohjelmistoa ja Motoman EA1900 hitsaus robottia, jossa on kääntöpöytänä MT1-1000. Työ sisältää kirjallisuuskatsauksen robottihitsauksesta,

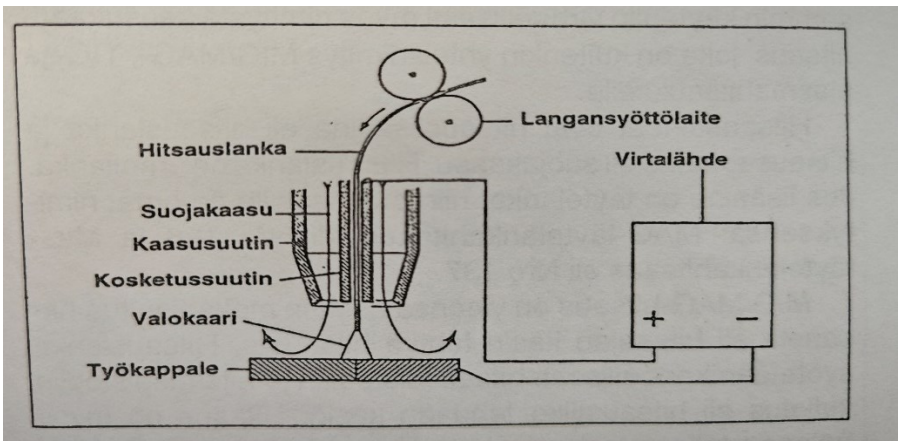
liitosmuodoista, railonvalmistuksesta ja hitsausasennoista. Tämän jälkeen kokeellisessa osuudessa testataan robotilla erilaisia railoja, liitosmuotoja ja hitsausasentoja, jonka pohjalta vastataan tutkimuskysymyksiin.

2 Hitsausmenetelmät

Tämä luku käsittelee hitsaukseen liittyviä perusasioita, kuten railonvalmistusta ja liitosmuotoja. Asioita käsitellään kuitenkin robottihitsauksen näkökulmasta, joten robottihitsaukselle epäolennaisia asioita ei käsitellä.

2.1 MIG/MAG hitsaus

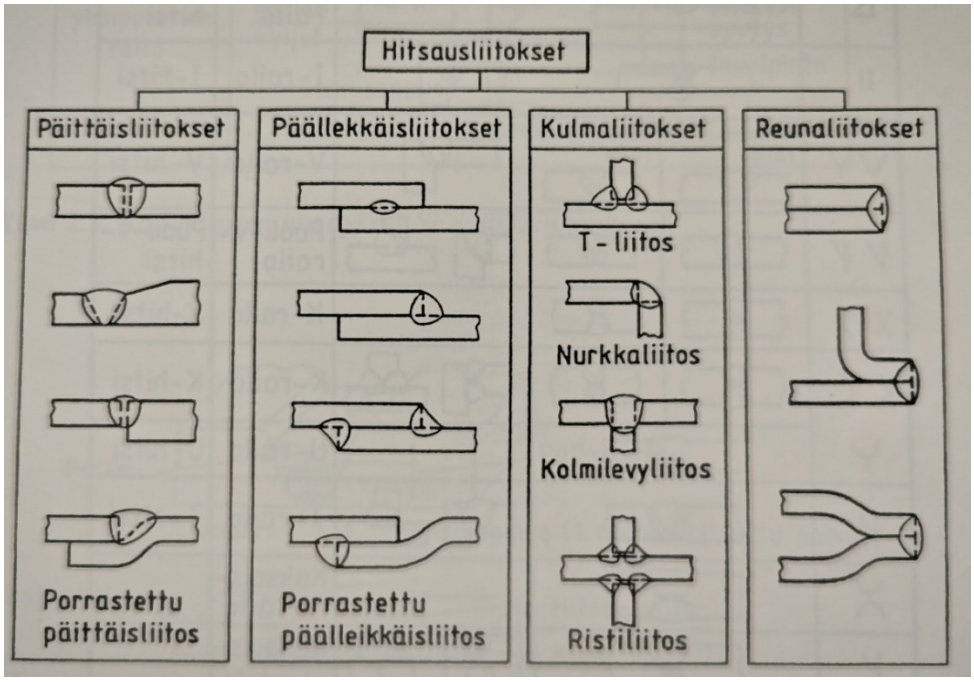
MIG/MAG hitsaus perustuu valokaaren palamiseen hitsauslangan ja hitsattavan kappaleen välillä, jota suojakaasu suojelee ympäröivältä ilmalta. Valokaari syttyy oikosululla, kun lanka koskettaa kappaletta, sitten oikosulku virta sulattaa hitsauslankaa ja muodostaa siitä pisaroita. Suojakaasuja on erilaisia, kuten aktiivisia ja inerttejä. Inertti suojakaasu vain suojaa hitsausprosessia, mutta aktiivinen suojakaasu myös osallistuu siihen reagoimalla hitsaus prosessiin. Lankaa syötetään tasaisella nopeudella lisää langansyöttölaitteella. Valokaari on itsesäätyvä, jolloin pienet suuttimen korkeuden muutokset eivät haittaa prosessia. (Lukkari, 2002, s159-162) Kuvassa 1 näkyy MIG/MAG hitsauksen periaate ja siihen liittyviä laitteita.



Kuva 1. MIG/MAG hitsauslaitteisto(Lukkarinen, 2002, s159)

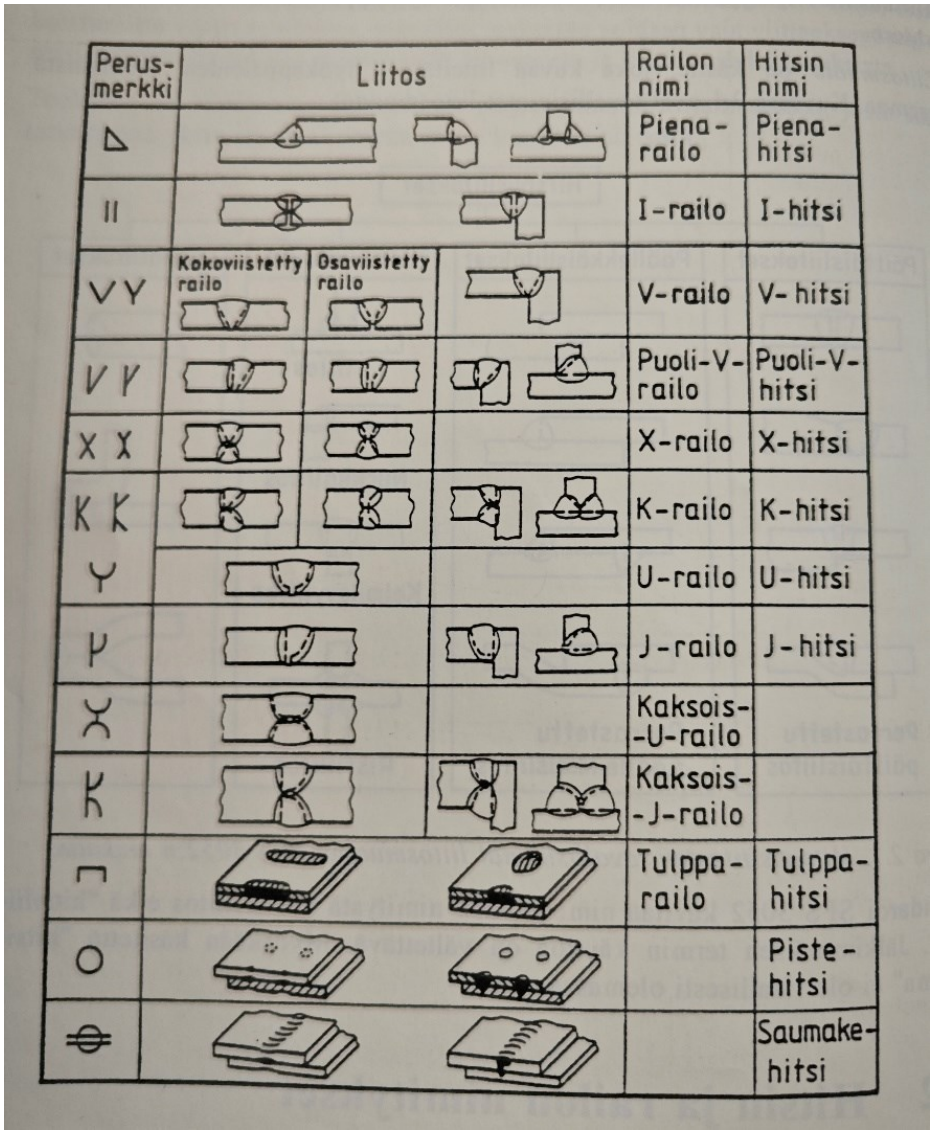
2.2 Liitosmuodot ja railonvalmistus

Liitosmuotoja ovat päittäisliitos, päällekkäisliitos, kulmaliitos ja reunaliitos, jotka näkyvät kuvassa 2. Liitosmuodoista valitaan sopivin riippuen tuotteen rasituksista, hitsattavuudesta ja hinnasta (Philips, 2023, s148).



Kuva 2. Liitosmuodot (Niemi,1993, s11)

Liitosmuotoihin valitaan sopiva railonvalmistus menetelmä riippuen tuotteen paksuudesta, rasituksista, hitsausasennosta, hitsattavuudesta, railonvalmistuksen ja hitsauksen yhteishinnasta (Galvery, 2007, s109). Optimaaliseen railonvalintaan vaikuttaa myös mahdollinen juurituen käyttö ja menetelmät, joita käytetään railonvalmistukseen kuten jyrsintä, polttoleikkaus, nakerrus ja höyläys (Niemi, 1993, s 287). Kuvassa 3 näkyy erilaisia railotyyppejä.



Kuva 3. railomuotoja (Niemi, 1993, s12)

2.2.1 Päällekkäisliitos

Päällekkäisliitos muodostuu, kun kaksi kappaletta menevät päällekkäin. Hitsi muodostuu päätyyn, joka jää toisien kappaleen päälle. liitos voidaan tehdä myös molemmin puolin, jolloin siitä tulee erittäin vahva. On tärkeää, että kappaleet ovat kiinnitoisissaan, eikä niiden väliin jää rakoa. (Miller, 2021) Päällekkäisliitos näkyy kuvassa 2 toisen haaran kohdalla.

2.2.2 Päittäisliitos

Päittäisliitoksessa liitetään kaksi kappaletta siten, että kappaleiden sivut ovat kohtisuorassa toisiaan vasten. Päittäisliitokset ovat oikein hitsattuina erittäin lujia. Päittäsi liitosta käytetään paljon putkien ja levyjen hitsauksessa. Railon tarpeen määrittää materiaalipaksuus. (Miller,2021) Päittäisliitos näkyy kuvassa 2 ensimmäisen haaran kohdalla.

2.2.3 Kulmaliitokset

Kulmaliitoksessa kappaleet on liitetty 90 asteen kulmassa toisiinsa. Kulmaliitos vaatii todella vähän esivalmisteluja ja ne on helppoja kasata. (Miller, 2021) Kulmaliitoksia valmistetaan paljon ilman minkäänlaista railoa, koska se on taloudellisempaa, mutta jos liitoksen kantokykyä pitää lisätä, voidaan käyttää erilaisia railoja. Ainepaksuuden noustessa railonvalmistus lisääntyy, koska ilman railoa vahvaan liitokseen menisi liian paljon lisäainelankaa, jolloin se ei olisi enää taloudellista. (Dwivedi, 2021, s344) Kulmaliitos näkyy kuvassa 2 kolmannen haaran kohdalla.

2.2.4 Reunaliitokset

Reunaliitoksessa kappaleiden reunat ovat yhden suuntaisia. Liitokseen ei saisi kohdistuja iskuja tai muuten suuria rasituksia. (Miller, 2021) Reunaliitos näkyy Kuvassa 2 aivan oikeassa reunassa.

2.2.5 Railonvalmistus

I-railo soveltuu noin 4 mm ainepaksuudeltaan oleviin kappaleisiin, kun hitsataan vain yhdeltä puolelta ja ilmarako on puolet paksuudesta. Hitsattaessa kappaletta molemmilta puolilta I-railoa käytettäessä ainepaksuus voi olla jopa 8 mm ja silloin ilmarakoa ei ole ollenkaan. Ainepaksuuden noustessa siirrytään V-railoon. (Lukkari, 2002, s220). I-railoa käytettäessä yli 10 mm ainepaksuuksilla muodostuu ongelmia hitsin läpäisyn kanssa. I-railossa hyvinä puolina on sen vähäinen valmistelun tarve. (Dwivedi, 2021, s343)

V ja puoli V-railot ovat helposti valmistettavissa ja hitsattaessa niissä on helppoa tuoda lämpöä railon juureen asti. Huonoina puolina on, että niihin menee paljon lisäainelankaa verrattuna muihin railoihin ja niissä muodostuu enemmän jäännösjännityksiä, kun U ja J-railoilla. (Dwivedi, 2021, s343). Molemmin puolin tehty V ja puoli V-railo on taloudellinen 19 mm railon syvyyteen asti. Läpihitsattuna molemmin puolin tehty V tai Puoli V-railo on erittäin vahva ja se sopii kaikille rasitustyypeille. (Singh, 2022, s43-44)

U ja J-railot ovat taloudellisia verrattuna V-railoihin, kun hitsataan paksuja hitsejä. Huonoina puolina on niiden valmistuksen vaikeus ja hitsin huono tunkeutuminen juureen asti. U ja J-railoilla syntyy vähemmän jäännösjännityksiä ja vääristymiä. Näiden railojen etuna on myös suuremmat hitsausnopeudet. (Dwivedi, 2021, s343)

3 Vaatimukset robottihitsaukselle

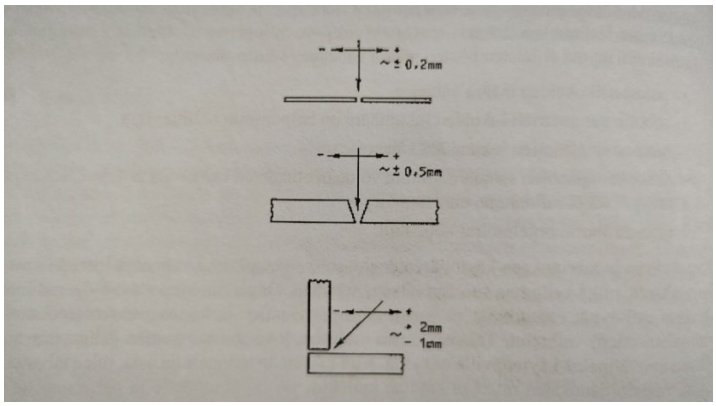
Tässä kappaleessa käydään läpi robottihitsausta ja siihen liittyviä vaatimuksia.

3.1 Robottihitsaus

Robottihitsauksessa hitsauksen suorittaa robotti. Robottia ohjataan robottiohjaimelta, jota ohjelmoidaan suorittamaan hitsaus prosessi. Robotille voidaan opettaa hitsauksen liikerata, mikä on aikaa vievää ja tämän aikana robotilla ei voi tuottaa mitään. Ohjelmoinnissa voidaan käyttää apuna offline ohjelmointia, jossa käytetään CAD ohjelmia. CAD ohjelmien avulla voidaan ratkaista ongelmia, visualisoida robotin liikkeitä ja suorittaa robotin ohjelmointi. (O'Brien, 1997, s436-439)

3.1.1 Toleranssit

Robottihitsauksessa on tärkeää, että railotoleranssit eivät saa ylittää 0.5–1 mm, eli ilmaraon on oltava tasainen. (Kah, 2021, s119) Pienaliitoksessa langankohdistus toleranssit ovat noin 1 mm pystysuunnassa ja 2 mm sivusuunnassa, kun päittäisliitoksessa langan kohdistus toleranssit ovat noin 0.5 mm, joka tekee pienaliitoksesta helpommin hitsattavan robotilla. Laajempaa toleranssi ikkunaa voidaan käyttää, mikäli käytetään vaaputusta tai juuritukea hitsauksessa apuna. Kuvassa 4 näkyy vielä langankohdistus toleranssi vaatimukset päittäis- ja pienaliitoksille. (Lempiäinen, 2003, s85-86)



Kuva 4. langankohdistus toleranssit (Lempiäinen, 2003, s86)

3.1.2 Laadun vaatimukset

Tässä kappaleessa käydään laadun vaatimuksia läpi standardin SFS-EN ISO 5817 perusteella. Hitsiluokat jaetaan kolmeen D, C ja B luokkaan, joista D on vähiten vaativa ja B vaativin. Virhetyyppejä on useita, mutta käydään läpi vain työnkannalta oleellisimmat, alimman ja korkeimman laatuluokan vaatimukset. Seuraavat virhetyypit ilmoitetaan siten, että ensin on alimman luokan arvo ja toisena korkeimman luokan arvo. Vajaa hitsautumissyvyys juuressa sallitaan vain luokassa D, jossa se on alle 20 prosenttia levyn paksuudesta ja enintään 2 mm. Korkea kupu päittäishitsissä saa olla välillä 25–10 prosenttia hitsin leveydestä plus 1 mm tai enintään 10–5 mm ja pienaliitoksessa sama, mutta enintään 5–3 mm. Korkeaa juurikupua saa olla 60–10 prosenttia juuren leveydestä plus 1 mm. Kaikissa näissä tilanteissa on vaatimuksena, että levyn paksuus on suurempi kuin 0.5 mm (SFS-EN ISO 5817, s10-11)

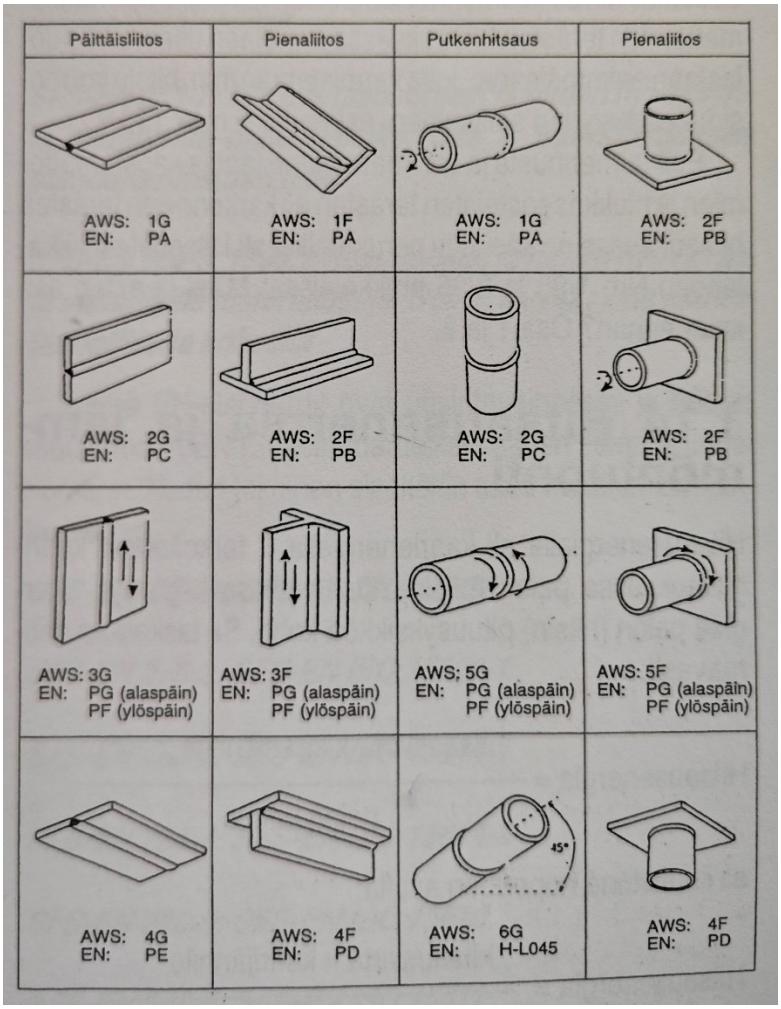
3.1.3 Robottiasemat

Robottiasemoita kuvaillaan DOF (Degrees of freedom) asteikolla, joka tarkoittaa vapaus astetta, kuinka monella akselilla robotti toimii. Robotti, jonka vapaus aste on 6 DOF voi olla taloudellisempi, vaikka kyseinen tehtävä ei tarvitsisi niin montaa DOF:ia, koska tällaiset asemat ovat erittäin suosittuja ja niitä on paljon tarjolla. Yritykset voivat käyttää samoja robotteja erilaisten tuotteiden valmistuksessa, koska robotit ovat monipuolisia. (Singh, 2020, s190-196) Kääntöpöytiä voidaan käyttää hitsausasemissa nopeuttamaan ja helpottamaan hitsausprosessia, koska sillä pystytään pitämään kappaletta optimaalisessa asennossa hitsaus suorituksen aikana. (Kah, 2021, s110) Kääntöpöydillä voidaan lisätä myös robottiaseman ulottuvuutta ja luokse päästävyyttä. Portaalilla, lineaariradoilla tai muilla kuljetintyypeillä voidaan lisätä robottiasemassa myös luoksepäästävyyttä ja ulottuvuutta. (Penttilä 2024)

3.1.4 Hitsausasennot

Hitsausasennot tarkoittavat sitä, minkälaisessa asennossa hitsaukset suoritetaan kappaleeseen. Kuvassa 5 on hitsausasentojen tunnuksia. (Lukkarinen, 2003, s53) Robottihitsauksessa suurin osa hitseistä on pienahitsejä. Piena hitsissä pitäisi käyttää mahdollisimman paljon

jalkoasentoa, joka on kuvassa 5 asento PA pienaliitoksessa, sillä se on taloudellisin ja vähiten toleransseja vaativa asento robottihitsauksessa. (Lempiäinen, 2003, s85-87) Alapiana-asennolla PB pääsee vastaavanlaiseen lopputulokseen, kun asennolla PA. Yleistettävästi robottihitsauksessa ei muita asentoja käytetä, vaan suositaan PB/PA asentoja. (Penttilä 2024)



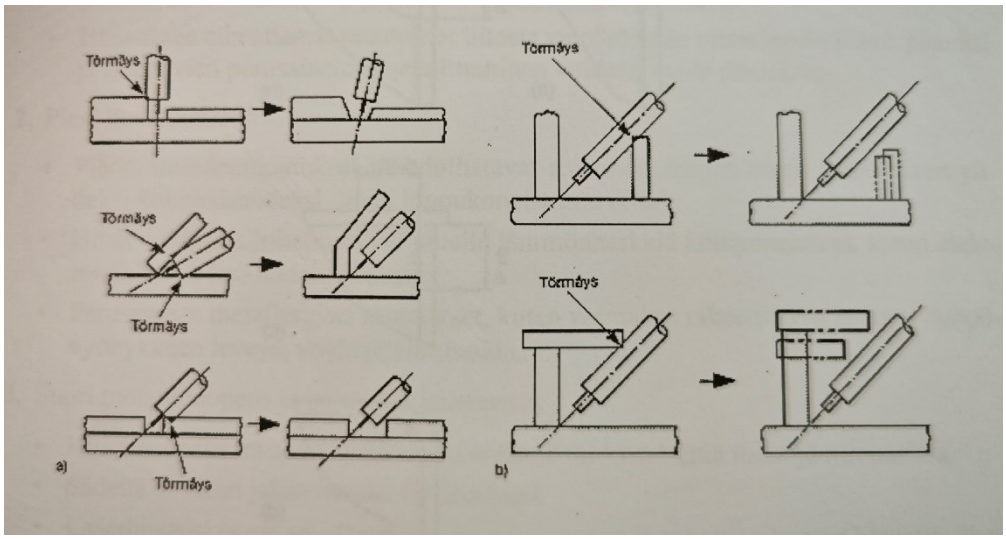
Kuva 5. Standardien AWS/ASME ja SFS-EN mukaiset tunnukset eri hitsausasennoille (Lukkarinen, 2002, s53)

3.2 Robottihitsattavan tuotteen suunnittelun haasteet

Robottihitsattavissa kappaleissa on erilaisia haasteita ja jokaista kappaletta ei voida hitsata robotilla. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi ongelmakohtia.

3.2.1 Luoksepäästävyys ja ulottuvuus

Tärkeää on huomioida, että kyseinen suunnitellun hitsin luo on mahdollista päästä hitsaus polttimella ja se on robotin säteen ulottuvilla. Robotti varsi vie jonkun verran enemmän tilaa, kuin ihmisen käsi ja on huomattavasti kömpelömpi. Robottihitsaamisessa on myös vältettävä teräviä nurkkia, koska niihin muodostuu helposti liitosvirheitä. Tämä johtuu siitä, kun vanhan hitsin päälle aloitetaan uusi hitsi. Tämä on varsinkin ongelmana sisänurkkien hitsauksessa ja nurkat olisi pyöristettävä, jos ne aiotaan hitsata robotilla. (Lempiäinen,2003, s90-91) Kuva 6 selventää polttimen luokse päästävyys ongelmaa.



Kuva 6. Hitsauspolttimon ulottuvuus ongelmat (Lempiäinen, 2003, s91)

3.2.2 Liitosmuodon valinta

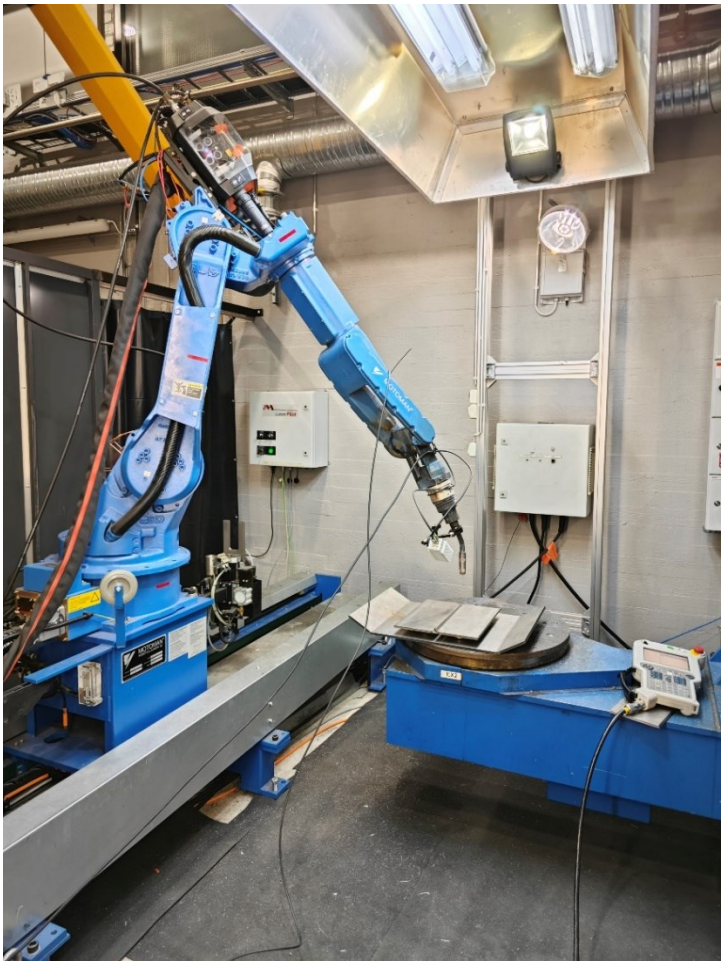
Robotilla hitsatessa pitäisi käyttää piena liitoksia, koska sillä on suurimmat toleranssit, varsinkin jos läpihitsautumista ei vaadita. Tällöin kappaleen valmisteluvaatimukset vähenevät ja hitsaus on helpompaa. Kaikista juurituettomista päittäisliitoksista pitäisi muuntaa joko piena tai päällekkäisliitoksia, koska luotettavasti yhdeltä puolelta läpihitsatun päittäisliitoksen tekeminen robotilla on lähes mahdotonta. Nurkkaliitokset pitäisi taas muuttaa pienaliitoksiksi, koska osien esivalmistelu työt ovat suuret ja on suuri vaara läpipalamiselle. Robottihitsauksessa pitäisi välttää ylimääräisiä aloituksia ja lopetuksia, koska suurin osa häiriöistä liittyy valokaareen ja sen syttymiseen. (Lempiäinen, 2003, s86-90)

4 Menetelmät

Työn kokeellinen osuus suoritettiin LUT yliopiston laboratoriossa käyttäen Motoman EA1900 Hitsausrobottia ja henkilökunnan apua ja ohjeistusta. Kokeellisessa osuudessa tehtiin kolme hitsauskoetta erilaisilla liitosmuodoilla ja railoilla. Hitsausta kuvattiin reaaliajassa Cavitar C300 kameralla.

4.1 Koejärjestelyt

Kokeellisessa osuudessa käytetty robottiasema näkyy kuvassa 7. Hitsaus laitteistona oli kempin AX500 virtalähde. Kääntöpöytää ei käytetty hitsauksessa apuna, koska sille ei ollut kappaleiden yksinkertaisuuden takia tarvetta.



Kuva 7. Hitsausasema, jolla kokeet suoritettiin

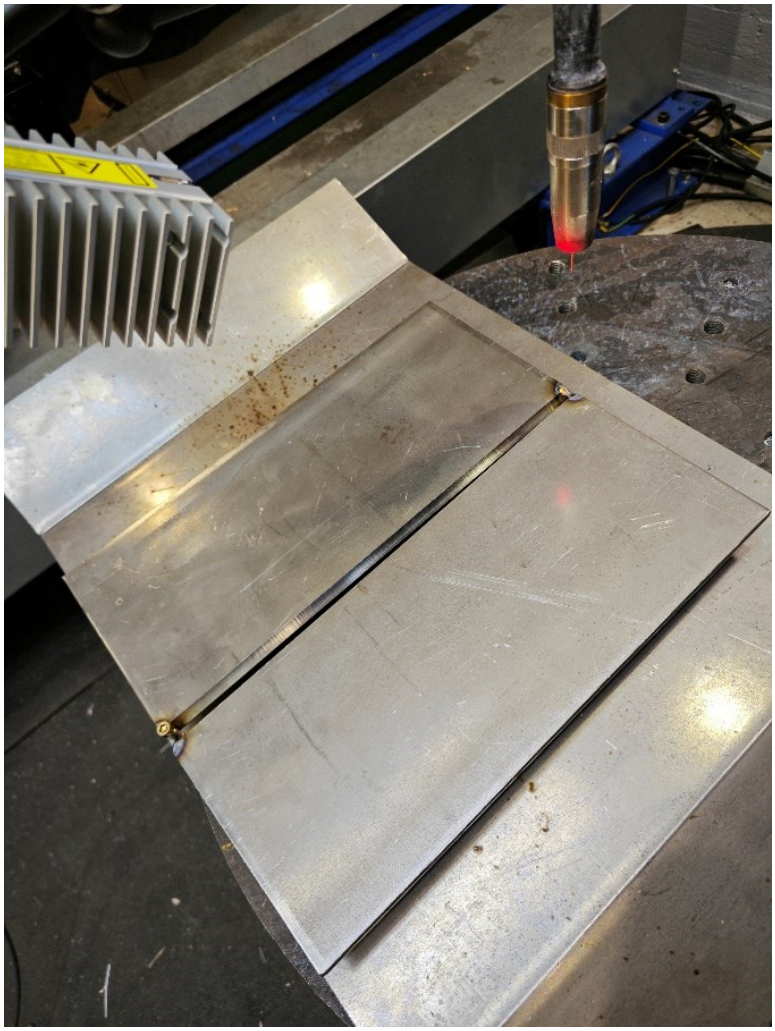
Kappaleet hitsattiin parametreilla, jotka näkyvät kuvassa 8, eli virta oli 227A, langan syöttö 10 m/min. Hitsauksessa käytettiin halkaisijaltaan 1 mm hitsauslankaa (OK AUTROD 12.51). Suojakaasuna käytettiin argon-hiilidioksidi seosta (88%Ar+12%CO2). Robotti on-line-ohjelmoitiin suorittamaan hitsaus ja se kulki suoraa linjaa, ilman vaaputusta tai railonseurantaa. Hitsauksissa tavoitteena oli saada epäonnistumisia ilmarakoa kasvattamalla, jolloin pystyttiin tarkastelemaan ja analysoimaan siihen johtavia syitä suurnopeuskameran avulla ja vertailemaan liitosmuotoja keskenään.

Kuva 8. Hitsausparametrit ja käyttöliittymä

4.2 Koekappaleet

Koekappaleita oli kolme ja niissä testattiin päittäis-, kulma- ja nurkkaliitosta. Perusaineen materiaalina oli rakenneteräs S355. Päittäis- ja kulmaliitos suoritettiin viisteellä ja nurkkaliitos ilman viistettä. Viistekulma oli molemmissa viistetyissä kappaleissa 60 astetta. Kappaleet kasattiin siten, että hitsin alussa ei ollut ilmarakoa ollenkaan ja loppua kohden ilmarako kasvoi koko ajan. Kuvassa 9 näkyy kulmaliitos, ainepaksuutena 8 mm ja railonkulmana 60 astetta. Kuvassa 10 päittäisliitos, ainepaksuus 8 mm ja railokulma 60 astetta. Kuvassa 11 reunaliitos, jonka ainepaksuus 6 mm ja siinä ei ole railoa. Kuviin merkitty tussilla ilmaraon suuruus kyseisessä kohdassa. Päittäisliitoksessa ilmarakomerkinnät näkyvät valmiissa kappaleessa, koska kuva on otettu vahingossa ennen merkintöjen laittoa.

Kuva 9. Kulmaliitos, ilmarako kasvaa oikealta vasemmalle ja ilmaraon koko on merkitty alalevyyn



Kuva 10. Päittäisliitos, ilmarako pienimmillään polttimen kohdalla ja suurenee mentäessä alaspäin

Kuva 11. Reunaliitos, Ilmarako on pienimmillään ylhäällä ja suurenee mentäessä alaspäin. Ilmarakomerkinnät näkyvät oikeanpuolimmaisessa levyssä.

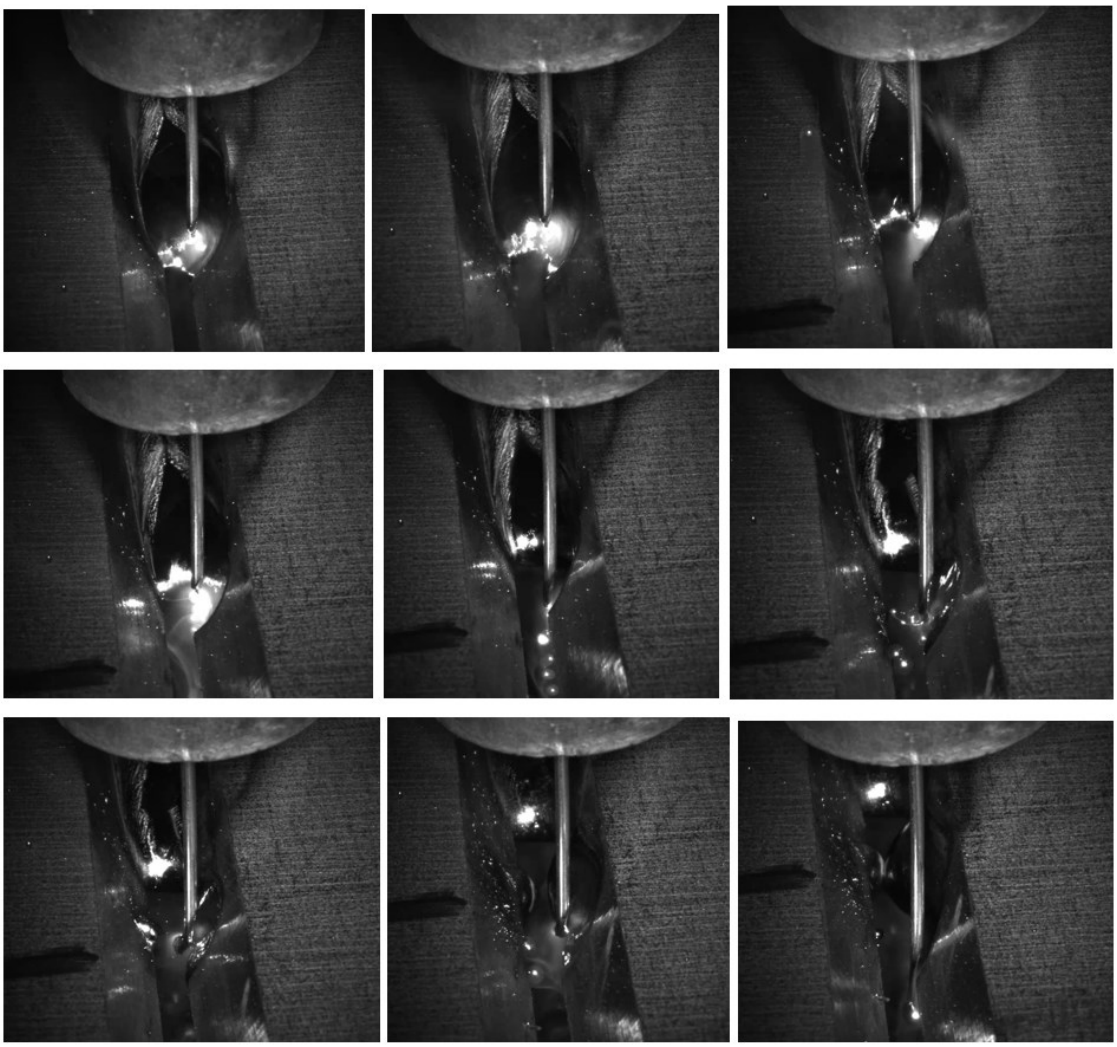
5 Tulokset ja analyysi

Kuvissa näkyvät lopulliset kappaleet hitsattuina. Jokaisella kappaleella saavutettiin tavoiteltu epäonnistuminen ilmaraon kasvaessa. Ilmarako merkinnät näkyvät kuvissa tussilla merkittyinä. Kuvaesityksissä näkyy hitsauksen epäonnistuminen kussakin koekappaleessa. Kuvaesitys etenee vasemmalta oikealle rivi kerrallaan.

5.1 Päittäisliitos

Päittäisliitoksessa hitsin epäonnistuminen tapahtui noin 2 mm ilmaraon kohdalla. Aluksi hitsi ei läpäissyt levyä kokonaan, jolloin juuri jäi vajaaksi. vihreällä on merkitty kuvaan 12, missä kohtaa hitsi alkoi onnistua ja missä kohtaa laadukas hitsi päättyi. Visuaalisesti laadukas hitsi alkoi noin 0.5 mm ilmaraon kohdalta ja päättyi noin 1.8 mm ilmaraon kohdalle. Päittäisliitoksessa robotti hitsasi hieman oikean levyn reunaa pitkin, joka varmasti vaikutti lopputulokseen, tämä on nähtävissä kuvassa 13. Robotin kohdistus reunaan auttoi luultavasti siinä, että hitsi ei palanut aikaisemmin läpi.

Kuva 12. Hitsatusta päittäisliitoksesta kuva, vasemmalla hitsaus puolelta ja oikealla kuva juurenpuolelta.

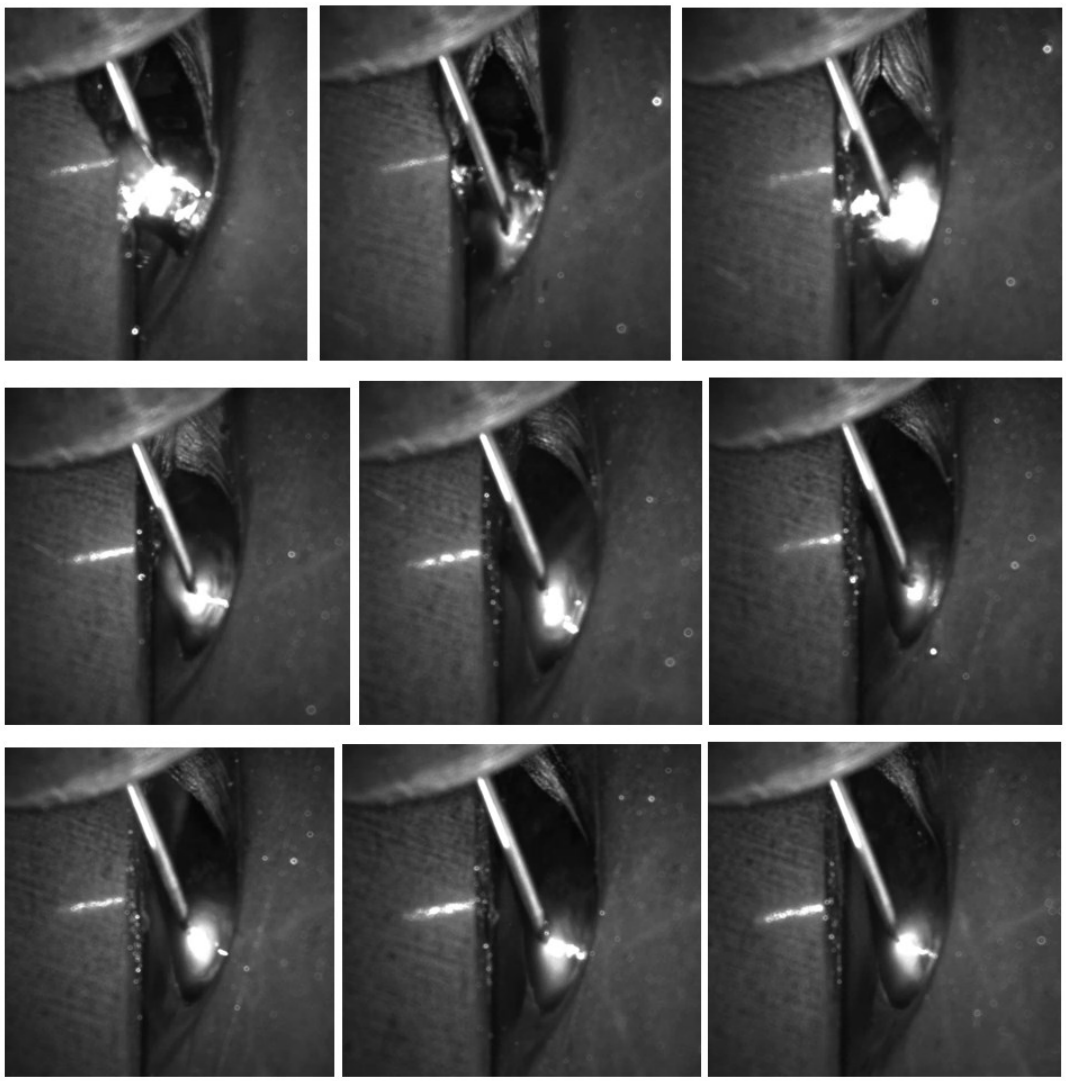


Kuva 13. Päittäisliitos epäonnistuminen, jossa näkyy polttimen kohdistuminen oikeaan reunaan.

5.2 Kulmaliitos

Kulmaliitoksessa epäonnistuminen tapahtui noin 3.7 mm ilmaraon kohdalla tämä on nähtävissä kuvassa 14. Kulmaliitos ei läpihitsaantunut missään kohtaa. Hitsauspoltin oli kohdistettu alalevyyn, jonka näkee kuvasta 15.

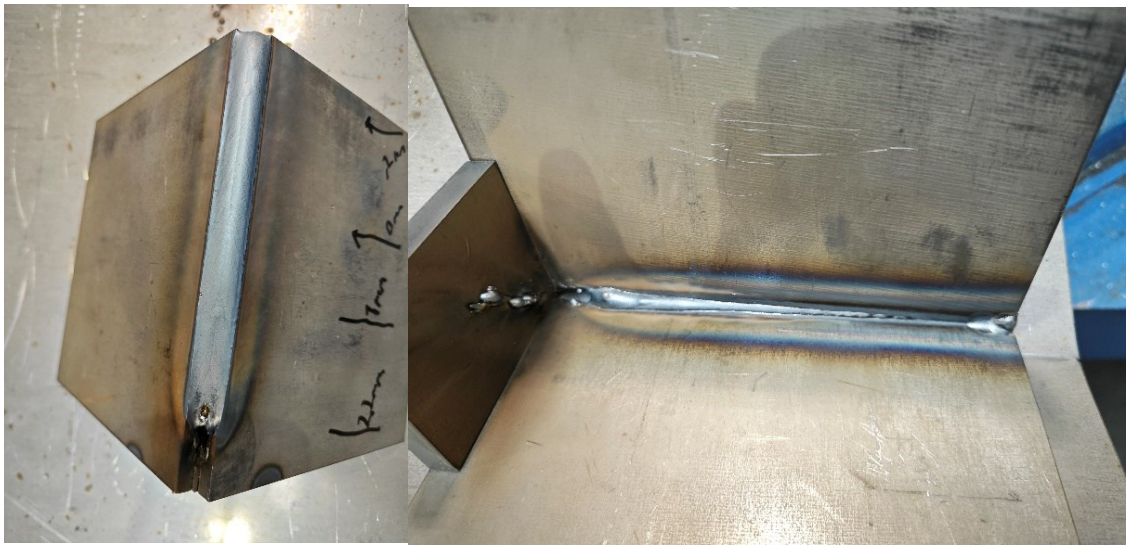
Kuva 14. Hitsatusta kulmaliitoksesta kuva, vasemmalla hitsaus puolelta ja oikealla kuva juurenpuolelta.



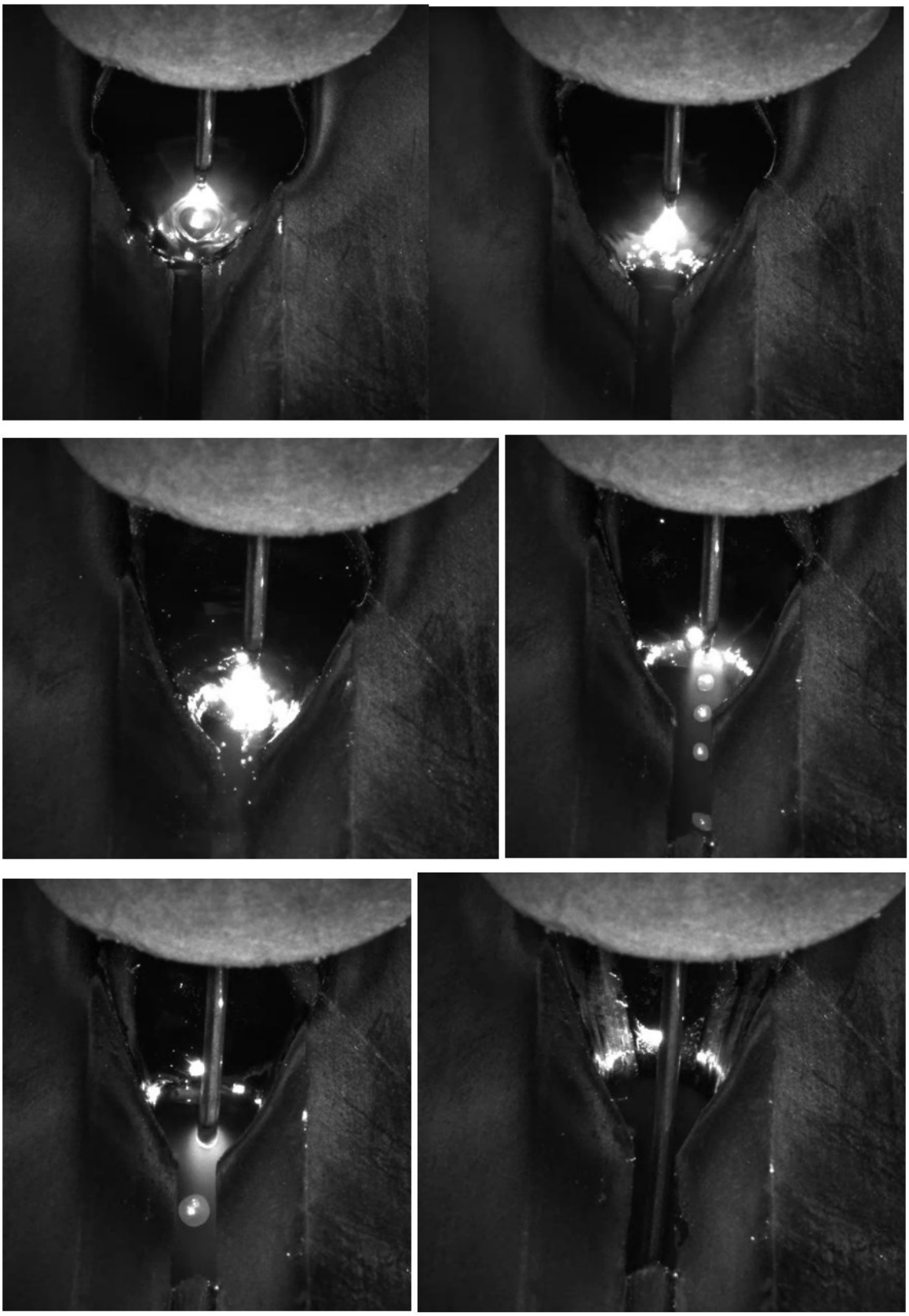
Kuva 15. Kulmaliitoksen epäonnistuminen, jossa näkyy polttimen kohdistus alalevyyn.

5.3 Nurkkaliitos

Nurkkaliitoksessa epäonnistuminen tapahtui noin 2.1 mm kohdalla, jonka näkee kuvasta 16. Ilmaraon kohdalla 0–1 mm hitsi näytti visualisesti hyvältä ja läpihitsautumista tapahtui. Poltin oli kohdistettu aivan keskelle rakoa, joka näkyy kuvassa 17, jonka takia tulokset eivät ole aivan vertailukykyisiä, koska päittäisliitoksessa oli erilainen polttimen kohdistus.



Kuva 16. hitsatusta nurkkaliitoksesta kuva, vasemmalla hitsaus puolelta ja oikealla kuva juurenpuolelta.



Kuva 17. Nurkkaliitoksen epäonnistuminen, jossa näkyy polttimen kohdistus keskelle railoa.

5.4 Tulosten analyysi

Kulmaliitos sieti huomattavasti paremmin ilmaraon muutosta, kuin päittäisliitos ja nurkkaliitos. Nurkkaliitos ja päittäisliitos sietivät kokeiden perusteella lähes saman verran, mutta polttimen erilainen kohdistus vaikutti tuloksiin selvästi, joten kappaleet eivät ole täysin vertailtavissa. Luultavasti samanlaisella poltin kohdistuksella nurkkaliitos olisi kestänyt paremmin ilmaraon muutosta, koska päittäisliitoksessa poltin oli kohdistettu reunaan, jonka avulla se ei päässyt palamaan läpi niin helposti, koska perusaine oli tukemassa sulan muodostumista. Kulmaliitoksessa ei tapahtunut läpihitsautumista, toisinkuin päittäis- ja nurkkaliitoksissa. tähän vaikutti se, että kaikissa liitosmuodoissa käytettiin samoja hitsausarvoja. Kulmaliitos on kokeiden perusteella soveltuvin liitosmuoto robottihitsaukseen.

6 Pohdinta

Tässä luvussa vertaillaan tuloksia keskenään, vastataan tutkimuskysymyksiin ja pohditaan tulosten hyödynnettävyyttä. Käydään läpi myös tutkimuksen luotettavuutta ja mahdollisia jatkotutkimuksia.

6.1 Vertailu

Tutkimuksessa tehdyssä kirjallisuusosiossa oli paljon yhtenäisyyksiä koetulosten kannalta, mutta myös joitakin poikkeamia.

Lempiäisen (2003, s86-90) kirjassa kerrottiin kulmaliitoksen olevan paras liitos muoto robottihitsaukseen, koska sen toleranssit ovat väljimmät. Koe hitsien perusteella tämä pitää paikkansa, koska kulmaliitoksessa oli suurin ilmaraon muutos, ennen kuin hitsi epäonnistui kokonaan.

Kah (2021, s119) mainitsi 0.5–1 mm maksimi rakotoleranssin robottihitsaukselle, joka piti paikkansa laadukkaan hitsin osuudessa nurkka ja päittäisliitoksissa, tosin epäonnistumisen rakotoleranssi oli huomattavasti suurempi eli noin 2 mm. Kulmaliitoksessa tätä on vaikea arvioida, koska läpihitsautumista ei tapahtunut ollenkaan, mutta epäonnistumisen rakotoleranssi oli huomattavasti suurempi kuin muissa liitosmuodoissa. Tämän perusteella voisi olettaa, että laadukkaan hitsin rakotoleranssit olisivat oikeilla hitsausarvoilla suuremmat kulmaliitoksessa, kuin päittäis- ja reunaliitoksissa, mutta tämä pitäisi varmistaa jatkotutkimuksissa uusinta kokeilla.

6.2 Tutkimuksen Luotettavuus

Tutkimus on suoritettu LUT hitsaus laboratorion henkilökunnan avustuksella, joten hitsaus robotin käyttö ja hitsaus suoritus on ollut luotettavaa ja ammattimaista. Hitsaus testejä olisi ollut hyvä tehdä enemmän, mutta rajallisten resurssien takia ja koe hitsien onnistumisten takia nämä testit ovat riittävät alustavan tutkimuksen kannalta. Tutkimuksen kirjallisuus osuudessa on käytetty lähinnä hitsaus kirjoja, joista osa on useita kymmeniä vuosia vanhoja

ja osa muutamia vuosia. Lähteiden vanhuus ei vaikuta tässä tapauksessa niiden luotettavuuteen, koska hitsaus prosessina ei ole muuttunut paljoa sillä railot, liitosmuodot ja hitsausasennot ovat edelleen samoja. Myös hitsaus robotteja on ollut käytössä jo vuosikymmeniä ja suuri osa niihin liittyvästä vanhasta tiedosta pitää edelleen paikkaansa. Käytettäessä vanhempia lähteitä on tarkkaan harkittu, onko tieto vielä relevanttia tutkimuksen kannalta.

6.3 Virhetarkastelu

Kokeiden vähäisen määrän takia tuloksia ei voi pitää täysin luotettavana ilman jatkotutkimuksia. Myös hitsaus suorituksessa on tekijöitä, jotka ovat voineet vääristää tuloksia, kuten langan kohdistus reunoihin on varmasti vaikuttanut tuloksiin. Hitsattavat levyt eivät olleet välttämättä aivan suoria, joten tämäkin on voinut vaikuttaa tuloksiin. Hitsaus parametrit eivät olleet aivan täydelliset kaikissa liitosmuodoissa, kuten nurkkaliitoksessa ja se vaikutti varmasti lopputulokseen.

6.4 Johtopäätökset

Tässä kappaleessa vastataan tutkimuskysymyksiin ja kerrotaan mitä kirjallisuuskatsauksen ja kokeiden pohjalta voidaan päätellä.

Mitkä liitosmuodot ja kappaleet sopivat parhaiten robottihitsattavaksi? Kaikki eivät sovi, koska robottihitsauksessa ongelmaksi muodostuu monimutkikkaissa kappaleissa robottikäsivarren kömpelyys verrattuna ihmiseen ja myös robottikäsivarren viemä tila, kuin myös sen ohjelmoiminen monimutkaisiin hitseihin. Osa liitosmuodoista on esivalmisteluvaatimuksiltaan ja toleransseiltaan niin vaativia, että niitä ei ole välttämättä järkeä hitsata robotilla. Parhaiten hitsaaminen onnistuu jalkoasennossa kulmaliitoksena tai päällekkäisliitoksena, joten näitä liitosmuotoja pitäisi suosia.

Miten suunnitella robottihitsattavia tuotteita? Robotilla hitsattavia tuotteita suunnitellessa pitää ottaa huomioon robotin ulottuvuuden riittävyys, hitsin luokse päästävyys robotilla ja liitosmuotojen toleranssi ja esivalmisteluvaatimukset, sekä pyrkiä aloituksien ja lopetuksien vähäiseen määrään. Tärkeää olisi osata muuntaa vaikeat liitosmuodot parempiin/parantaa

niitä esimerkiksi juurituella tai muuntaa tuotetta siten, että kyseiseltä vaikeasti hitsattavalta kohdalta vältyttäisiin. Railomuodot tulee myös valita materiaalipaksuuksien mukaan ja kappaleeseen kohdistuvista rasituksista riippuen.

6.5 Tuotettu uusitieto ja tulosten hyödynnettävyys

Tutkimuksen uutuusarvo koostuu robottihitsauksesta tehdystä tietopaketista, joka on koottu yhteen paikkaan. Suurnopeuskameran käyttö kokeellisessa osiossa lisää myös tutkimuksen uutuusarvoa ja sen avulla pystyttiin seuraamaan ja analysoimaan hitsausprosessia ja sen epäonnistumiseen liittyviä syitä.

Tuloksia voidaan hyödyntää tuotesuunnittelussa, koska tämä työ on koonnut tärkeitä asioita mitä pitää huomioida suunnitellessa robottihitsattavia tuotteita yhteen ja antaa yleiskuvan erilaisten liitosmuotojen toimivuudesta ja kannattavuudesta robottihitsauksessa, joka on tärkeää suunnitellessa onnistunutta robottihitsattavaa tuotetta.

6.6 Mahdolliset jatkotutkimukset

Työn kokeellisen osuuden suppeuden takia olisi hyvä tehdä jatkotutkimuksia suorittamalla useita kymmeniä kokeita. Tärkeää olisi toistaa samoja koe hitsejä, jotta nähdään oikeasti miten luotettavia tulokset ovat ja sen lisäksi ottaa muita liitosmuotoja mukaan kokeellisen osuuden testeihin. Kokeissa olisi myös hyvä kokeilla vaaputuksen, juurituen ja railonseurannan vaikutusta ilmaraon muuttuessa, sillä kirjallisuudessa mainittiin sen vaikuttavan positiivisesti toleransseihin. Kokeita olisi hyvä tehdä myös erilaisilla robotti layouteilla ja mahdollisesti myös erilaisilla materiaaleilla, kuten alumiineilla tai ruostumattomilla teräksillä. Hitsin laatua voisi myös tarkastella tarkemmin, kuin vain visuaalisesti.

7 Yhteenveto

Tässä työssä tarkoituksena oli selvittää robottihitsattavan tuotteen suunnittelun vaatimuksia ja parhaita liitosmuotoja, railomuotoja ja hitsausasentoja. Tutkimus suoritettiin kirjallisuuskatsauksena ja laboratoriossa tehdyillä koe hitseillä. Teoria osuudessa käytettiin lähteinä lähinnä hitsaus ja suunnittelu kirjoja. Kokeellinen osuus suoritettiin LUT hitsaus laboratoriossa ja siellä hitsattiin kolme koe kappaletta, joka olivat päittäisliitos, nurkkaliitos ja kulmaliitos. Kappaleet silloitushitsattiin siten, että ilmarako oli päädyssä noin nolla ja sitten se kasvoi toiseen päätyyn mentäessä. Näin tehtiin, jotta voitiin testata millä ilmaraolla hitsi epäonnistuu kokonaan ja nähtäisiin millä ilmarako toleransseilla hitsi näyttäisi visuaalisesti laadukkaalle.

Kokeellisessa osuudessa saavutettiin halutut hitsien epäonnistumiset. Kokeiden ja kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan sanoa, että kulmaliitokset sopivat parhaiten robottihitsattavaksi, varsinkin jalkoasennossa. Kulmaliitos vaatii vähiten esivalmisteluja ja sen toleranssit ovat löysimmät, myös mitä vähemmän kappaleessa on hitsauksen aloituksia ja lopetuksia, niin sitä paremmin sen hitsaus onnistuu robotilla. Päittäisliitoksia tulisi välttää ja niiden tilalla tulisi käyttää päällekkäisliitoksia tai muita korvaavia liitosmuotoja. Suunnitellessa robottihitsattavaa kappaletta pitää ottaa huomioon robottikäden viemä tila ja sen kömpelyys verrattuna ihmiseen.

Työssä saatiin siis vastauksia tutkimuskysymyksiin, mutta kokeellisen osuuden vähyyden takia tuloksia ei voida pitää täysin luotettavin. Olisi hyvä tehdä useita kymmeniä toistoja samoilla liitosmuodoilla, jotta saataisiin luotettavia tuloksia. Myös muiden liitosmuotojen, vaaputuksen ja juurituen ottaminen mukaan testeihin olisi järkevää.

Lähteet

Dwivedi, Dheerendra Kumar. “Design of Welded Joints: Weld Failure Modes, Welding Symbols: Type of Welds, Joints, Welding Position.” *Fundamentals of Metal Joining*. Singapore: Springer, 2021

Galvery, William L, William L Galvery, and Frank M Marlow. *Welding Essentials: Questions & Answers, Second Edition.* 2nd ed. New York: Industrial Press, 2007

Kah, Paul. *Advancements in Intelligent Gas Metal Arc Welding Systems: Fundamentals and Applications*. 1st ed. San Diego: Elsevier, 2021

Lempiäinen, Juhani., and Jari. Savolainen. *Hyvin suunniteltu - puoliksi valmistettu : lyhyt johdatus tuotteiden valmistettavuuteen ja kokoonpantavuuteen*. Helsinki: Suomen Robotiikkayhdistys, 2003

Lukkari, Juha. *Hitsaustekniikka : perusteet ja kaarihitsaus*. 4., tark. p. Helsinki: Opetushallitus, 2002

Miller, A Guide to the 5 Basic Types of Weld Joints and Tips for Improving Results , [Viitattu 24.2.2024]. Saatavissa: **https://www.millerwelds.com/resources/article-library/a-guide-to-the-5-basic-types-of-weld-joints-and-tips-for-improving-results**

Niemi, E. (Erkki), and Juha. Kemppi. *Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet*. Helsinki: Painatuskeskus, 1993

O\’Brien, Robert L, and American Welding Society. *Welding Encyclopedia (1997)*. 18th ed. Place of publication not identified: American Welding Society, 1997

Penttilä Sakari. 2024. TkT; LUT yliopisto. Suullinen haastattelu 30.4.2024. Haastattelijana Topi Laakkonen.

Phillips, David H. *Welding Engineering-an introduction (2nd Edition)*. Wiley-Blackwell, 2023

SFS-EN ISO 5817, 2023 Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sulahitsaus (paitsi sädehitsaus) Hitsiluokat, Painos 4. Julkaisija: Suomen standardisoimisliitto SFS ry

Singh, Ramesh. *Applied Welding Engineering: Processes, Codes, and Standards*. 3rd edition. San Diego: Elsevier Science & Technology, 2020

Singh, Ramesh. *Designing Weldments*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2022