



JAUHEKAARIHITSAUS PAKSULLA LISÄAINELANGALLA
SUBMERGED ARC WELDING WITH THICK FILLER WIRE

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Leevi Laukkanen

Tarkastajat: DI Esa Hiltunen, TkT Tuomas Skriko

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Leevi Laukkanen

Jauhekaarihitsaus paksulla lisäainelangalla

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

27 sivua, 23 kuvaa, 5 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat:

Avainsanat: Jauhekaarihitsaus, paksu lanka, cc/cv, hitsausvirta, kaarijännite

Työ käsittelee jauhekaarihitsausta paksulla lisäainelangalla. Työssä pyritään löytämään sopiva hitsausvirta/kaarijännite-yhdistelmä paksulle langalle, sekä tutkitaan virtalähteen cc/cv asetusten vaikutusta hitsausjälkeen. Työssä käydään myös läpi jauhekaarihitsauksen perusteet.

Tutkimukset on tehty kuudella kokeellisella hitsillä LUT:n laboratoriossa. Hitsaustuloksia tarkasteltiin visuaalisesti päältäpäin, makrohiekuvalla ja kovuuskokeella.

Tuloksien mukaan CC/CV virtalähteen asetus ei vaikuta hitsin laadulliseen lopputulokseen. Hitsauksen voi suorittaa 700 ampeerin hitsausviralla ja 34 voltin kaarijännitteellä. Tämä hitsausvirta ei anna kuitenkaan kovin hyvää tunkemaa, joten kovin paksuja yksipuolisia hitsejä sillä ei voi suorittaa. Muut koehitsit, jotka suoritettiin isommilla hitsausvirroilla eivät antaneet laadukkaita hitsaustuloksia. Laadun puute isomman hitsausvirran hitseissä johtui liian pienestä käytetystä kaarijännitteestä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Leevi Laukkanen

SUBMERGED ARC WELDING WITH THICK FILLER WIRE

Bachelor's thesis

2022

27 pages, 23 figures, 5 tables and 2 appendices

Examiners:

Keywords: submerged arc welding, thick wire, cc/cv, arc voltage, welding current

The work addresses powder arc welding with thick filler wire. The aim of the work is to find the right welding current and arc voltage combination for a thick wire. The effects of the power supply CC / CV settings to welding are also investigated. The basics of powder arc welding are covered in the work.

The studies have been performed with six experimental welds in LUT's laboratory. The welding result was examined visually from the outside, with a macrographic examination and with a hardness test.

According to the results, the setting of the CC / CV power supply does not affect the weld. Welding can be performed with a welding current of 700 amperes and an arc voltage of 34 volts. This welding current is not one that penetrates very well, so it is not possible to perform very thick one-sided welds on it. Other test welds performed at higher welding currents did not give high quality welding results. The lack of quality in the welds with a higher welding current was due to the low arc voltage used.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

d	halkaisija	[mm]
I	virta	[A]
Q	lämmöntuonti	[kJ/mm]
U	jännite	[V]

Lyhenteet

Al	Alumiini
Al ₂ O ₃	Alumiinioksidi
C	Hiili
CaO	Kalkki
CaF ₂	Kalsiumfluoridi
CC	vakio virta (constant current)
CV	vakio jännite (constant voltage)
Cr	Kromi
Cu	Kupari
DC	tasavirta (direct current)
HV5	Vickersin kovuus viiden kilon painolla (hardnes of Vickers, used 5 kg load)
LUT	Lappeenrannan-Lahden Teknillinen yliopisto (Lappeenranta-Lahti university of technology)
MgO	Magnesiumoksidi
mm	millimetri

Mn	Mangaani
MnO	Mangaanioksidi
Mo	Molybdeeni
Na ₂ O	Natriumoksidi
Nb	Niobium
Ni	Nikkeli
P	Fosfori
S	Rikki
Si	Pii
SiO ₂	Piioksidi
Ti	Titaani
TiO ₂	Titaanioksidi
TIG	volframi inerttikaasuhiatus (Tungsten Inert Gas welding)
ZrO ₂	Zirkoniumoksidi

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

(Symboli- ja lyhenneluettelo)

1	Johdanto.....	7
2	Teoria.....	8
2.1	Jauhekaarihitsaus.....	8
2.2	Perusteet.....	9
2.3	Jauhekaarihitsauksen käyttökohteita.....	11
2.4	Mahdolliset virheet hitsin laadussa.....	12
2.5	Menetelmät.....	15
3	Tulokset.....	22
3.3	Visuaalinen tarkastelu.....	22
3.4	Makrohiekuvat.....	23
3.5	Kovuustulokset.....	26
4	Analyysi.....	26
5	Johtopäätökset.....	27

Liitteet

Liite 1. Virtalähteen tarkemmat tiedot

Liite 2. Kokeellisen osan hitsausliitosten kovuusjakaumat

1 Johdanto

Työssä käydään läpi jauhekaarihitsauksen perusteita. Jauhekaarihitsausta paksulla lisäainelangalla on tutkittu Aasiassa, jossa menetelmä on tuotannollisessa käytössä, olisi siis hyvä tehdä tutkimuksia myös englanniksi tai suomeksi. Tutkielman avulla selvitetään parametrit paksumpien materiaalien tehokkaampaan hitsaamiseen. Työ tehdään AB Bayrock yritykselle, joka on erikoistunut hitsausalaan. Heitä kiinnostaa paksun lisäainelangan virtajännitealueet ja mikä vaikutus virtalähteen vakiojännite/-virta-asetuksilla (CC/CV) on. Hitsauskokeiden tulokset on tarkoitus esittää erillisessä lehtiartikkelissa, jotta tulokset saadaan niitä tarvitsevien käyttöön. (Lahti, haastattelu, 27.1.2022)

Aiempiä hitsauskokeita on tehty ohuemmilla langoilla, esimerkiksi 3.2 millimetrin langalle on tehty tutkimuksia. On tutkittu hitsausvirran, kaarijännitteen ja hitsausnopeuden vaikutusta hitsin leveyteen, korkeuteen sekä tunkeumaan. Hitsausvirta ja hitsausnopeus vaikuttavat hitsin tunkeumaan ja kaarijännite leveyteen. (Karaoglu, Secgin, 2007) Hitsatun liitoksen kestävyys vaikuttaa hitsaustapahtuman lämmöntuonti. Lämmöntuontiin vaikuttavia tekijöitä on yksinkertaisimmillaan hitsausvirta, kaarijännite sekä hitsausnopeus. Liian suuri lämmöntuonti heikentää hitsin sitkeysominaisuuksia (Chandel, Seow & Cheong, 1997). Lämmöntuonti vaikuttaa myös hitsin kovuusominaisuuksiin, esimerkiksi liian pieni lämmöntuonti nostaa kovuusarvoja (Esab 2005, 12). Langanpaksuus ja hitsausvirta ovat keskeiset arvot hitsiaineentuotossa, sillä suurempi lanka tarvitsee suuremman virran päästäkseen samaan hitsiaineentuottoon. (Lukkari 2002, 152)

Ongelmana on, että emme tiedä, millä hitsauslaitteen asetuksilla saadaan laadukas lopputulos, koska aiempia tutkimuksia ei ole paksulle langalle. Tavoitteena on selvittää kirjallisuudesta sopivat hitsausvirta/kaarijännitealueet 4.8 millimetriä paksulle langalle ja selvittää virtalähteen CC/CV-asetuksien vaikutukset syntyvän hitsin laatuun sekä valita oikea asetus 4.8 mm langalle. Parametrit verifioidaan hitsauskokeilla hitsaustekniikan laboratoriossa. Testit suoritetaan LUT:n laboratoriossa koulun henkilökunnan toimesta. Tavoitteena käytännön kokeilla on löytää asetukset, joilla saadaan hitsi, joka täyttää visuaalisen tarkastuk-

sen vaatimukset. Lisäksi makrohietarkastelulla varmistetaan hitsin laadukas poikkileikkausmuoto ja kovuusmittauksella liitoksen kovuusjakauman hyväksyttävyys. Visuaalisessa tarkastelussa hitsiä tutkitaan päältäpäin ilman apuvälineitä. Makrohiekuvassa hitsi katkaistaan poikittain keskeltä ja tutkitaan hitsiä sisältäpäin. Tutkielmassa käydään läpi jauhekaarihitsauksen perusteet ja hitsausparametrejä sekä koemenetelmät. Lopuksi analysoidaan tulokset. Lähteet voivat olla vanhoja, sillä perinteinen jauhekaarihitsaus ei ole paljoa muuttanut ja testit tehdään perinteisellä yksilankahitsauksella ilman mitään uutta teknologiaa.

Rajauksena työllä on se, että pyritään löytämään vain sopivan kaarijännitteen ja hitsausvirran, ei syvennytä tai perehdytä enempää muihin parametreihin. Virtalähteen CC/CV tutkimuksessa rajataan tutkimus käytettyyn Panda-virtalähteeseen, koska virta lähteet voivat olla hyvinkin erilaisia, siis tuloksia ei voi liiammin yleistää.

2 Teoria

Luvussa käydään läpi jauhekaarihitsauksen teoriaa ja käydään tutkimusmenetelmä läpi.

2.1 Jauhekaarihitsaus

Jauhekaarihitsaus patentoitiin vuonna 1930 Yhdysvalloissa Robinofin, Paineen ja Quillen toimesta. Vuosien varrella on kehitetty monenlaisia sovelluksia yksilankahitsauksesta monilankahitsaukseen. Jauhekaarihitsausta käytetään esim. paksujen levyjen päittäis- ja pienahitsaukseen, telakkateollisuudessa I ja T palkkien hitsaukseen, sekä painekattiloiden kehä ja pituussuuntaiset hitsit tehdään jauhekaari hitsauksella. Käytetään raskaassa ja keskiraskaassa teollisuudessa lähinnä suuren hitsiaineen tuoton ja mekaanisuuden vuoksi. (Lukkari 2002, 127)

Suurinta osaa teräksiä voi hitsata jauhekaarihitsauksella, tällaisia ovat esimerkiksi ruostumattomat-, kuumalujat, lujat, hienorae ja seostamattomat teräkset. Tämä antaa mahdolli-

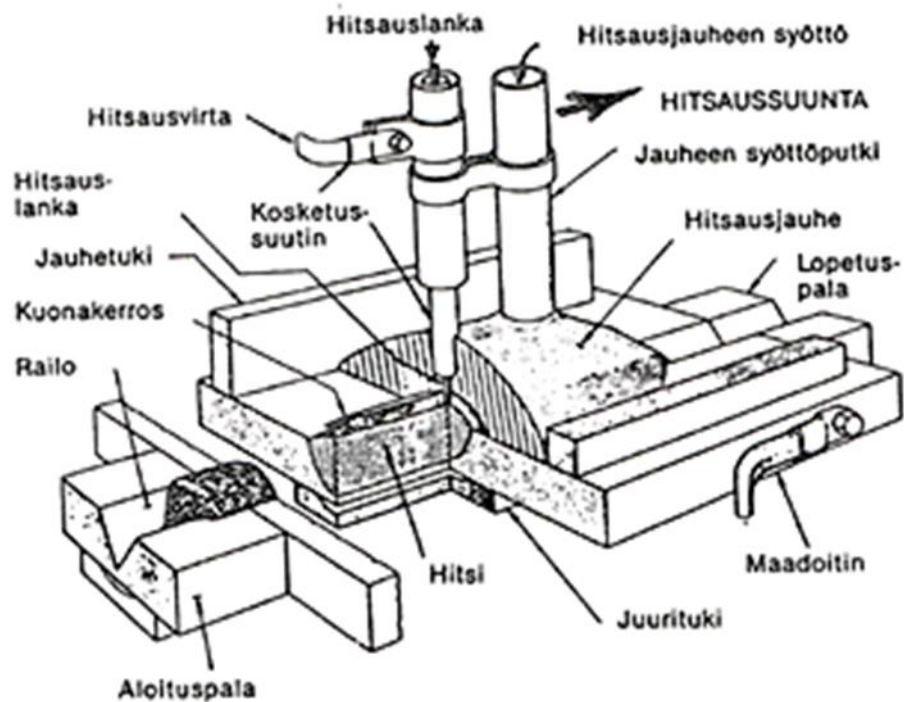
suuden menetelmän laajalle käytölle teollisuudessa. Hitsattavien kohteiden paksuus on pienimmillään noin 5 mm (Esab 2017)

Jauhekaarihitsauksen etuja on muun muassa jauhepeti, joka antaa hitsaustapahtumalle suojan ympäristöltä. Hitsauslaitteet toimivat pitkään eikä toimintakatkoksia tule usein, mikä antaa varmuutta menetelmälle. Menetelmänä jauhekaarihitsaus on myös tehokas, hitsiainetta menetelmä tuottaa normaalisti noin 6–12 kilogrammaa tunnissa (kg/h). Hitsianeen tuoton voi kuitenkin nostaa kymmeneen kiloihin tunnissa, jos käytetään suurtehojauhekaariprosessia. (Esab 2017)

Hyötynä menetelmässä on myös työturvallisuus, sillä se on jauhekaarihitsauksessa parempi kuin monessa muussa hitsausmenetelmässä. Mekanisoituna menetelmänä hitsausprosessi ei hitsaus aiheuta lihas- tai nivelvammoja. Turvallisuutta parantaa myös se, että valokaari palaa jauhepedin alla, joten kirkas hitsauskaari ei vaurioita silmiä.

2.2 Perusteet

Jauhekaarihitsauksessa käytetään nimensä mukaisesti jauhetta peittämään valokaari ja suojaamaan syntyvää hitsiä ilman haitallisilta vaikutuksilta. Jauhe syötetään joko suoraan hitsauslangan eteen tai langan ympärille. Kuvasta 1 nähdään, miten jauhetta tuetaan paloilla, jotta jauhe ei leviä. Hitsaustapahtuman jälkeen ylimääräinen jauhe kerätään talteen uudelleen käytettäväksi. Hitsaustapahtuman alkaessa käytetään usein aloituspalaa sillä, tapahtuman alkaessa parametrien arvot eivät ole heti halutun kaltaiset. Samasta syystä käytetään myös lopetuspalaa, kun hitsaus lopetetaan parametrit laskevat halutuista arvoista. Alku ja lopetuspalojen tarkoitus on siis pitää hitsin laatu hyvänä vaaditulla alueella. Juurituki asetetaan hitsin alapuolelle estämään mahdollinen hitsianeen valahtaminen juuresta läpi. (Lukkari 2002, 121)

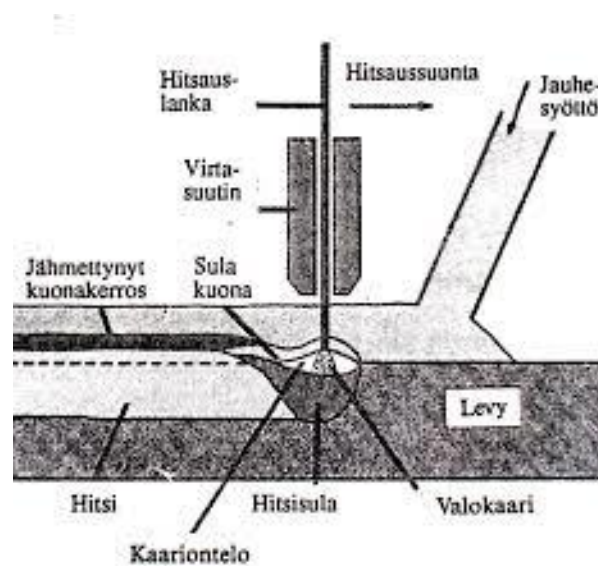


Kuva 1. Jauhekaarihitsauksen toimintaperiaate (Lukkari 2002, s. 121.)

Kappaleen ja hitsauselektrodin välillä on jännite-ero ja hitsaus aloitetaan raapaisemalla kappaleen pintaa, millä saadaan valokaari syttymään. Hitsisula siirtyy langasta pisaroina, joiden koko riippuu käytetystä hitsausvirrasta. Hitsauslanka on kelalla, josta syöttölaite syöttää langan kosketussuuttimen läpi. Hitsausvirta tuodaan virtalähteen kautta kosketussuuttimeen ja siitä hitsauslankaan. (Lukkari 2002, 121–122)

Valokaari palaa kaariontelossa, jonka päälle sulaa hitsausjauheesta sulakuonakerros, joka jäähmettyy jäädyttyessään. Jäähtynyt kuonakerros irrotetaan koputtamalla hitsin päältä. Kaariontelossa tapahtuu kemiallisia reaktioita metallin ja kuonan välillä sekä hitsauksessa syntyneiden kaasujen ja metallin välillä. Hitsiaineessa tapahtuu näiden reaktioiden toimesta eri aineiden saantia tai häviöitä, tapahtumat antavat hitsille halutut ominaisuudet ja riippuvat käytetyistä materiaaleista. Kuvasta 2 nähdään, kuinka hitsauslanka, perusmateriaali sekä hitsausjauhe muodostaa hitsin. (Lukkari 2002, 121)

Hitsatessa joko hitsattava kappale tai hitsauslaite liikkuu. Hitsauslaite voi kulkea esimerkiksi kiskoilla. Liike tuotetaan yleensä koneella. Hitsaustapahtumaa ei voi kuitenkaan kutsua automaattihitsaukseksi sillä kappaletta täytyy käsitellä ja hitsauslaitteelle täytyy antaa halutut arvot. (Lukkari 2002, 122)



Kuva 2. Lämpileikkaus hitsaustapahtumasta (Lukkari 2002, s.121.)

2.3 Jauhekaarihitsauksen käyttökohteita

Jauhekaarihitsausta käytetään raskaassa ja keskiraskaassa teollisuudessa. Jauhekaarihitsausta käytetään paksuille materiaaleille ja yksinkertaisille muodoille. Soveltuu paksujen palkkien hitsaukseen, esimerkiksi raskaiden I- palkkien pienahitsaukseen. Erilaisia raskaita palkkeja käytetään rakentamisen alalla muun muassa rakennuksissa ja rakenteissa, kuten laivoissa, silloissa ja stadioneissa. (Kärki 2021) Kuvassa 3 hitsataan pitkän ja paksun I-palkin pienahitsiä.



Kuva 3. I-palkin valmistus (bestkenda.com)

Jauhekaarihitsausta käytetään myös painekattiloiden ja raskaiden putkien valmistamiseen. Putkia valmistetaan esimerkiksi päittäisliittämällä lyhyitä paloja pitkäksi putkeksi. (Kärki 2021) Kuvassa 4 valmistettu putkirakenne monesta pienemmästä osasta jauhekaarihitsaamalla.



Kuva 4. Jauhekaarihitsattu putki (pemamek.com)

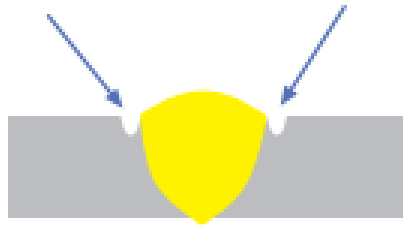
Kuten kuvista 3 ja 4 huomaa usein täytyy rakentaa suuret tasot ja laitteistot, jotta hitsaaminen järkevästi ja sujuvasti onnistuu.

Jauhekaarihitsausta käytetään päällehitsaamiseen eli kappaleen pinnoittamiseen. pinnoittaessa kappaleen pinnalle hitsataan uusi ehjä pinta. Pinnoittaminen on hyödyllistä, kun kokonaan uuden osan valmistaminen olisi hankalaa ja kallista. (ampweldingfabrication.com) (Kärki 2021)

2.4 Mahdolliset virheet hitsin laadussa

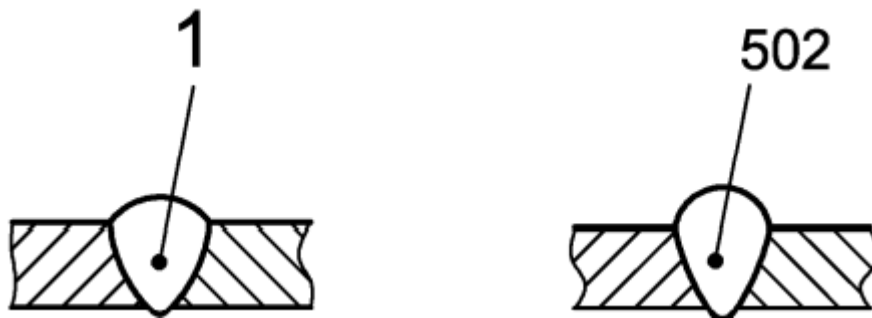
Mahdollisia hitsausvirheitä on paljon ja seuraavassa käydään läpi hitsauskokeissa ilmaantuneita virheitä.

Hitsiin voi syntyä reunahaava, reunahaavalla tarkoitetaan lovea hitsauspalon reunassa. Kuvassa 5 esimerkki reunahaavasta. Reunahaava voi syntyä molemmille tai vain toiselle puolelle hitsiä tai juuren puolelle. Reunahaavan syntyminen voi johtua liian suuresta hitsausvirrasta tai esimerkiksi lisääineen vääränlaisesta syöttämisestä. (Lukkari 2001, s. 13)

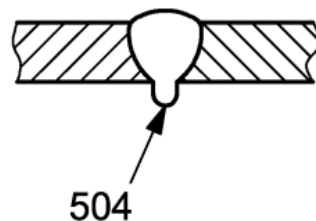


Kuva 5. reunahaavauma hitsisissä (Lukkari 2001, s. 13)

Korkea kupu tai korkea juurikupu ovat hitsausvirheitä. Liian korkealla kuvulla tarkoitetaan sitä, että hitsin pinnalla on liikaa hitsiainetta. Korkealla juurikuvulla tarkoitetaan samaa mutta juuren puolella hitsiainetta on liian paljon yli perusaineen tason. Korkea kupu voi johtua esimerkiksi liian hitaasta hitsausnopeudesta verrattuna hitsiaineentuottoon. Korkea juurikupu voi johtua muun muassa liian suuresta hitsausenergiasta ja liian hitaasta hitsausnopeudesta. (Lukkari 2001, s. 13). Kuvassa 6 esitetään korkea kupu ja kuvassa 7 on korkea juurikupu. Numerot kuvissa 6-8 on hitsien virhekoodeja.

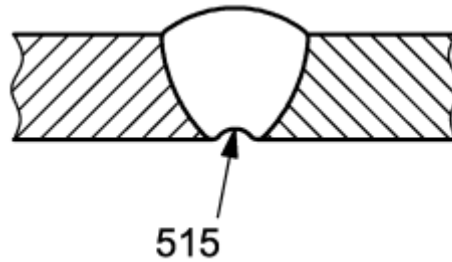


Kuva 6. Vasemmalla normaalikupu ja oikealla korkea kupu. (SFS-EN ISO 6520-1:2008, 22.)



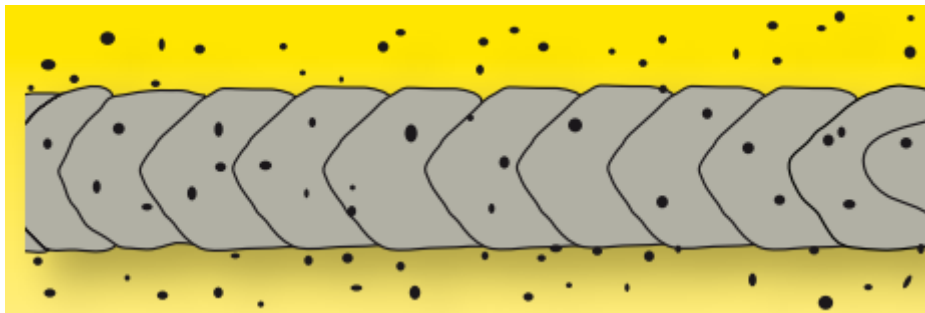
Kuva 7. korkea juurikupu (SFS-EN ISO 6520-1:2008, 23.)

Kuvassa 8 on vajaa juuri. Vajaa juuri on hitsin juuren syntynyt railo, eli hitsi ei ole yhtenäinen juuresta. Vajaa juuri voi johtua liian pienestä ilmaraosta, liian pienestä hitsausenergiasta tai liian korkeasta juuripinnasta. (Lukkari 2001 s. 14)



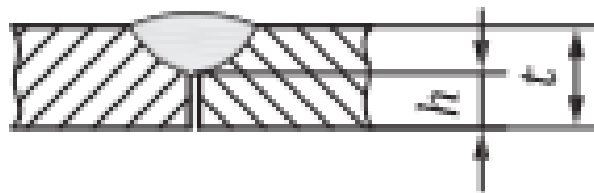
Kuva 8. Vajaa juuri (SFS-EN ISO 6520-1:2008, 26.)

Roiskeet ovat pieniä hitsausaine pisaroita hitsin pinnalla, syitä näiden muodostumiselle on esimerkiksi liian suuri virta, virran ja jännitteen suhde ei ole oikea tai magneettinen puhallus. (Lukkari, 2001 s. 13) Kuvassa 9 kuvataan roiskeita hitsissä



Kuva 9. Roiskeita hitsissä (Esab, 2010)

Hitsaus syvyys voi jäädä vajaaksi juuresta. Kuvassa 10 esimerkki tapauksesta.



Kuva 10. vajaa hitsi (SFS-EN ISO 5817:2014, 10)

Hitsausluokka D:n mukaan $h \leq 0.2 t$ ja enimmillään 2 mm. Pieni t tarkoittaa perusmateriaalin paksuutta ja h tarkoittaa etäisyyttä hitsin juuresta perusmateriaalin hitsaamattomalle puolelle. Hitsiluokassa D on löyhimmät raja arvot hitsausvirheille. Hitsausluokkien avulla arvostellaan hitsin laatua. (SFS-EN ISO 5817:2014, 10)

2.5 Menetelmät

Tutkimuksessa tutkitaan kaarijännitteen, hitsausvirran sekä virtalähteen cc/cv asetuksen vaikutusta hitsin laatuun. Aluksi tehtiin harjoituskokeita, joissa etsittiin millä hitsausnopeudella voidaan hitsauskokeet suorittaa halutulla tutkimusalueella. Harjoitukset tehtiin päällehitsaamalla.

Lopullinen koe tehtiin päittäisliitoksena I- railolla, 1 mm raolla ja 8 mm juurituella. Kuva 11 ja 14 havainnollistaa kokeiden asettelua. Aloitus ja lopetuspaloja ei kokeessa käytetty, joten hitsin alkua ja loppua ei tarkastella. Kokeessa hitsattiin 10 mm paksua terästä. Perusaine on painelaiteterästä mallia P265GH. P265GH teräs, joka kestää korkeita lämpötiloja ja sitä käytetään muun muassa kaasui- ja kemianteollisuudessa (Astwood 2016). Lisäainelanka ja hitsausjauheena käytettiin Lincoln Electric:n tuotteita. Lisäainelanka oli jauhekaarihitsaukseen tarkoitettua lankaa. Lanka on ISO 14171-A (EN 756) standardi koodiltaan S2Si ja sisältää Lincolnin mukaan muun muassa mangaania ja vähän piitä sekä hiiltä. (Lincoln Electric 2017, 534) Hitsausjauhe on ISO 14174 (EN 760) koodiltaan S A AR/AB 1 78 AC H5. Hitsausjauhe sisältää alumiinioksidi/rutiili ja alumiinioksidi/emäs seoksia. (Lincoln Electric 2017, 568) Tarkemmat hitsausmateriaalien tiedot näkyvät taulukoissa 1–3. Hitsauslanka pidettiin 90 asteen kulmassa hitsattavaan kappaleeseen nähden.

Taulukko 1. Painelaatta teräksen seosaineet, [%] (Garstka T 2010, s.83)

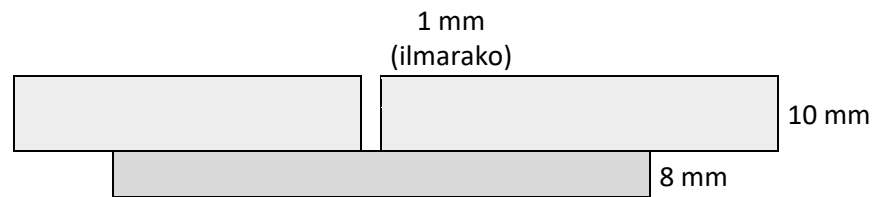
C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V
0.13	0.18	0.73	0.011	0.01	0.045	0.02	0.03	0.004	0.002	0.01	0.001	0.002

Taulukko 2. Täytelangan seosaineet, [%] (Lincoln Electric 2017, s. 534)

C	Mn	Si
0.1	1	0.25

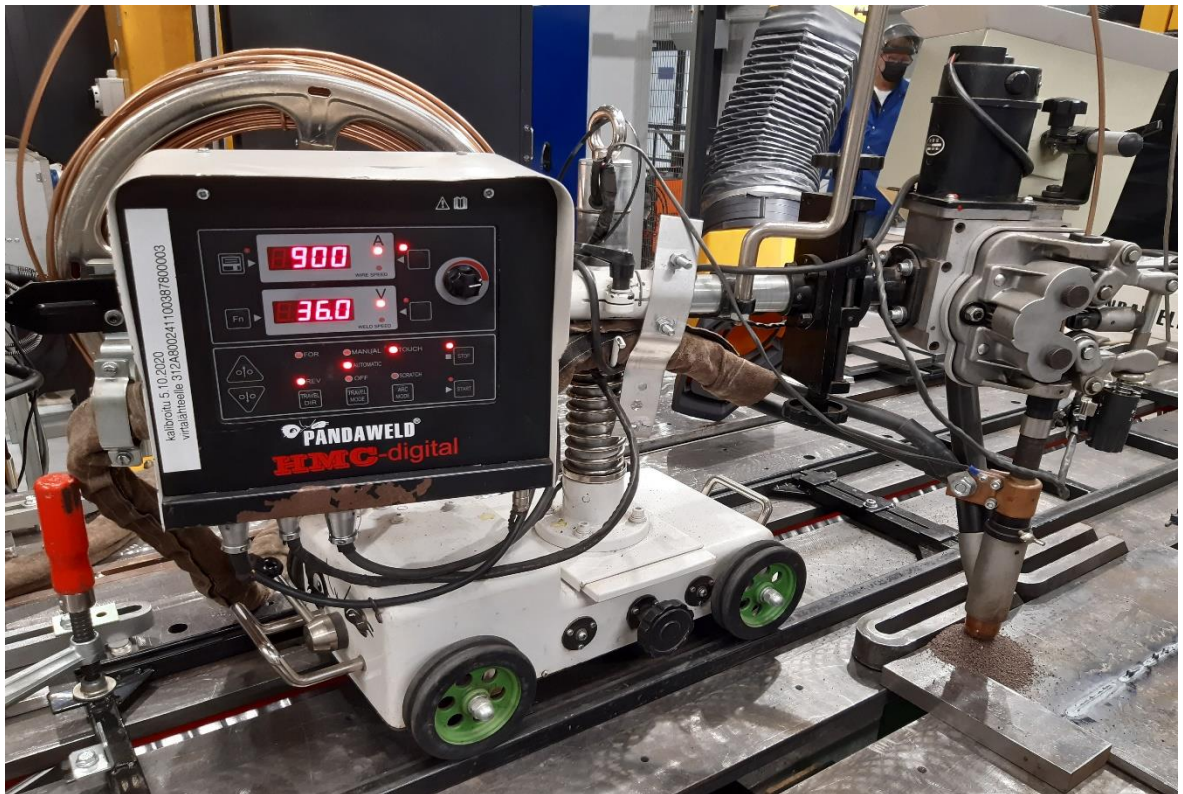
Taulukko 3. Hitsausjauheen kemiallinen koostumus, [%] (Lincoln Electric 2022)

Al ₂ O ₃	CaF ₂	MgO	MnO	Na ₂ O	SiO ₂	TiO ₂	seosmetalle- ja	CaO	ZrO ₂
39	11	3	16	2	15	8	5	0	0



Kuva 11. Hitsauksen asettelu

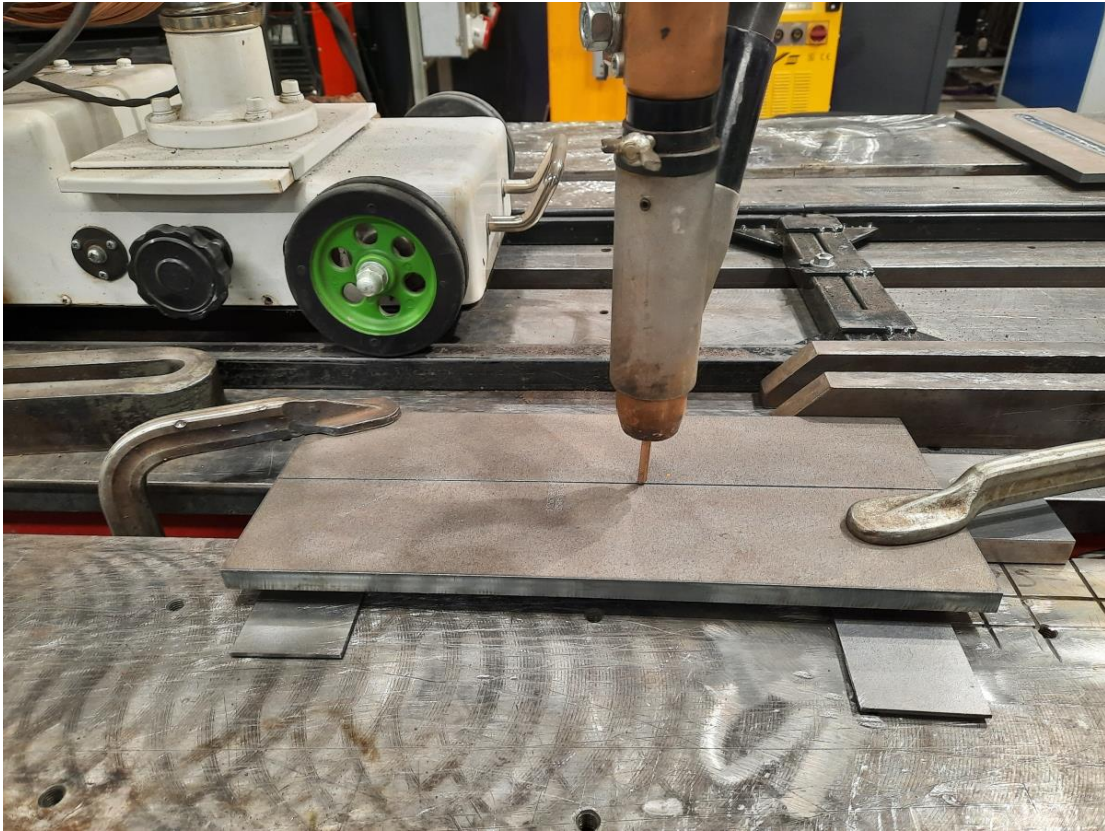
Kokeet ajettiin AB Bayrockin rekisteröimän tavaramerkin Pandaweld-hitsaustraktorilla käyttäen Panda 1250 virtalähdettä. Kuvassa 12 hitsausvaunu ja monitori, kuvassa 13 virtalähde ja liitteessä 1 kuva virtalähteen tiedoista. Kuvassa 12 suoritetaan kokeen harjoitusta. Kaikki kokeet suoritettiin LUT:n Lappeenrannan laboratoriossa.



Kuva 12. Vaunu sekä monitori



Kuva 13. Virtalähde ja taustalla hitsaustraktori



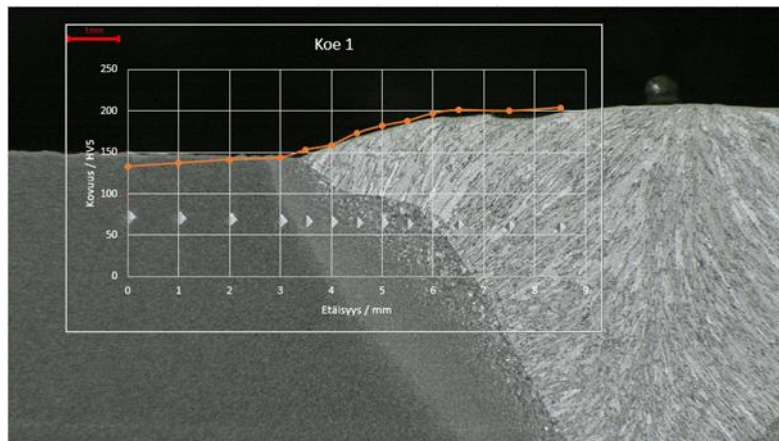
Kuva 14. Hitsauksen asettelu

Taulukosta 4 nähdään asetukset, joilla kokeet tehtiin. CC ja CV virtalähde asetuksilla suoritettiin identtiset kokeet. Hitsausnopeus ja vapaalanganpituus pysyi muuttumattomana ja hitsausvirtaa ja kaarijännitettä muutettiin. Hitsaus suoritettiin tasaviralla (DC) ja + napaisena eli lisäaine oli kytketty positiiviseen napaan. DC tarkoittaa sitä, että virran kulkusuunta ei muutu. Hitsauslaite kertoi CV asetuksella hitsatessa langansyöttönopeuden, mutta ei CV:llä hitsatessa.

Taulukko 4. Hitsauskokeiden parametrit

Koe	CC/CV	Hitsausnopeus [cm/min]	Vapaa-lanka [mm]	Hitsausvirta [A]	Kaarijännite [V]	Langansyöttö [cm/min]	lämmöntuonti (kJ/mm)
1	CC	90	40	700	34	-	1.6
2	CC	90	40	900	36	-	2.2
3	CC	90	40	1100	38	-	2.8
4	CV	90	40	700	34	14.1	1.6
5	CV	90	40	900	36	17.2	2.2
6	CV	90	40	1100	38	23.6	2.8

Hitsatuista liitoksista otettiin makrohiekuvat, kovuustestit ja päältä kuvat. Kovuustesti suoritettiin Struers DuraScan 70 automaattisella Vickers-kovuusmitarilla. Vickers-kovuus testataan painamalla neliöpyramidi materiaalin pintaan tietyllä voimalla. Painaumasta mitataan lävistäjät ja niistä lasketaan keskiarvo. Näiden arvojen avulla lasketaan vickersin kovuus. (Lehto, ei julkistusaikaa) Hitsejä testattiin monesta kohtaan esimerkkinä kuva 15.



Kuva 15. Hitsausliitoksen kovuusjakauma kokeessa 1.

2.4 Parametrit

Parametreja hitsauksessa on hitsausvirta, kaarijännite, hitsaus nopeus, napaisuus, vapaa-
langan pituus, langan paksuus, langan asento, jauhekerroksen paksuus, virtalaji (Lukkari
2002, 149). Tässä työssä hitsausvirta ja kaarijännite ovat parametrit, jotka käydään tar-
kemmin läpi, sekä virtalähteen CC ja CV asetukset.

Hitsausvirta vaikuttaa hitsin tunkemaan. Liian suurella virran arvolla hitsi palaa läpi ja
liian pienellä virralla hitsiaine ei tunkeudu tarpeeksi syvälle perusaineeseen ja hitsistä tulee

heikko. Myös hitsausnopeus vaikuttaa tunkemaan. Hitsausvirta vaikuttaa hitsiaineentuottoon sekä perusaineen ja lisäaineiden seostumiseen. Hitsausvirran vaikutus riippuu myös langan halkaisijasta, esimerkiksi liian pieni virta vaikeuttaa valokaaren syttymistä ja liian suuri virta valokaaren rauhattomuutta. Perussääntönä on, että hitsausvirta saa olla vähimmillään 100x langan mitta ja enimmillään 200x. (Lukkari 2002, 149–150) Tutkimuksessa käytettiin hitsausvirran arvoja, jotka ovat enimmäispäädyssä ja yli, koska korkeilla hitsausvirran arvoilla saadaan suurempi hitsausaineen tuotto ja parempi tunkeuma, mitkä ovat haluttuja asioita paksuja materiaaleja hitsatessa.

Kaarijännite vaikuttaa hitsin leveyteen ja hitsikuvun korkeuteen, se kuvaa lisäainelangan ja hitsisulan välistä potentiaaliero. Kaarijännitteeseen vaikuttaa valokaaren pituus sekä suutinetäisyys. Valokaaren pidentyessä valokaari levenee kartiomaisesti alaspäin, mistä johtuu se, että mitä suurempi jännite sitä leveämpi hitsi ja matalampi hitsikupu. Kaarijännite valitaan yleensä 28–36 V väliltä yksilanka hitsauksessa. (Lukkari 2002, 152) Suuntaa antava kaarijännite U hyvälle jauhekaarihitsaukselle voidaan laskea kaavalla.

$$U = I/(4*(d+1)) \quad (1)$$

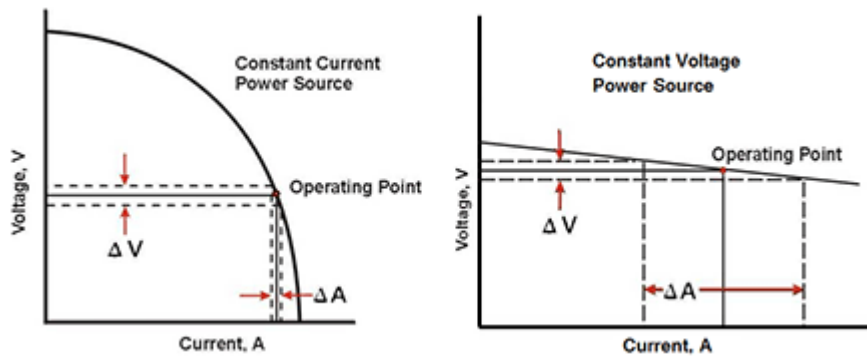
Yhtälössä 1 hitsausvirta on I ja d on hitsauslangan halkaisija (Lukkari 2002, 152).

Taulukosta 5 voidaan tarkastella, että minkä suuruisia kaarijännitteiden arvoja kaava ehdottaisi kokeissa käytetyille hitsausvirran arvoille.

Taulukko 5. Kaavan 1. avulla lasketut kaarijännitteet

Langan halkaisija [mm]	Hitsausvirta [A]	Kaarijännite [V]
4.8	700	30.2
4.8	900	38.8
4.8	1100	47.4

CV ja CC virtalähteen asetukset vaikuttavat siihen pidetäänkö haluttua kaarijännitettä lähellä vakioarvoa vai pidetäänkö hitsausvirtaa lähellä vakioarvoa. Käytettäessä esimerkiksi CC virtalähdettä virtalähde pyrkii pitämään hitsausvirran niin lähellä haluttua kuin mahdollista ja kaarijännitteen arvo vaihtelee sitten enemmän halutun kaarijännitteen arvon ympärillä. Kuvassa 16 nähdään esimerkkutilanne tasavirta ja tasajännite virtalähteen toiminasta, kuinka toista parametria priorisoidaan toisen yli. Eri virtalähteillä on eri ominaisuudet, joten tutkimustuloksia ei voi liikaa yleistää muihin virtalähteisiin. Eri hitsaustavoissa suositetaan yleensä jompaakumpaa virtalähteen asetusta, esimerkiksi puikolla hitsatessa Lincoln suosittelee CC virtalähdettä. Jauhekaarihitsaukselle käy sekä CC että CV virtalähde, mutta hitsausnopeus ja langan paksuus voi vaikuttaa asetuksen valintaan. (lincolnelectric, ei julkistusaikaa). CC virtalähdettä käytetään yleensä jauhekaarihitsauksessa 4 mm ja yli paksuilla langoilla hitsatessa (Grill 2021). Paksuilla langoilla hitsatessa tarvitaan suurempaa virtaa, jolloin virta on hyvä pitää tasaisena, koska heilahdukset valitun parametrin ympärillä vaikuttaa enemmän esimerkiksi lisääineen sulamiseen ja tunkemaan. Jauhekaarihitsauksessa CC/CV asetukset eivät vaikuta niin paljon hitsin jälkeen kuin muissa hitsaustavoissa, sillä hitsaus on mekaanista. Esimerkiksi hitsauslanganpään etäisyys kappaleesta ei vaihtele yhtä paljon kuin vaikka TIG hitsauksessa.

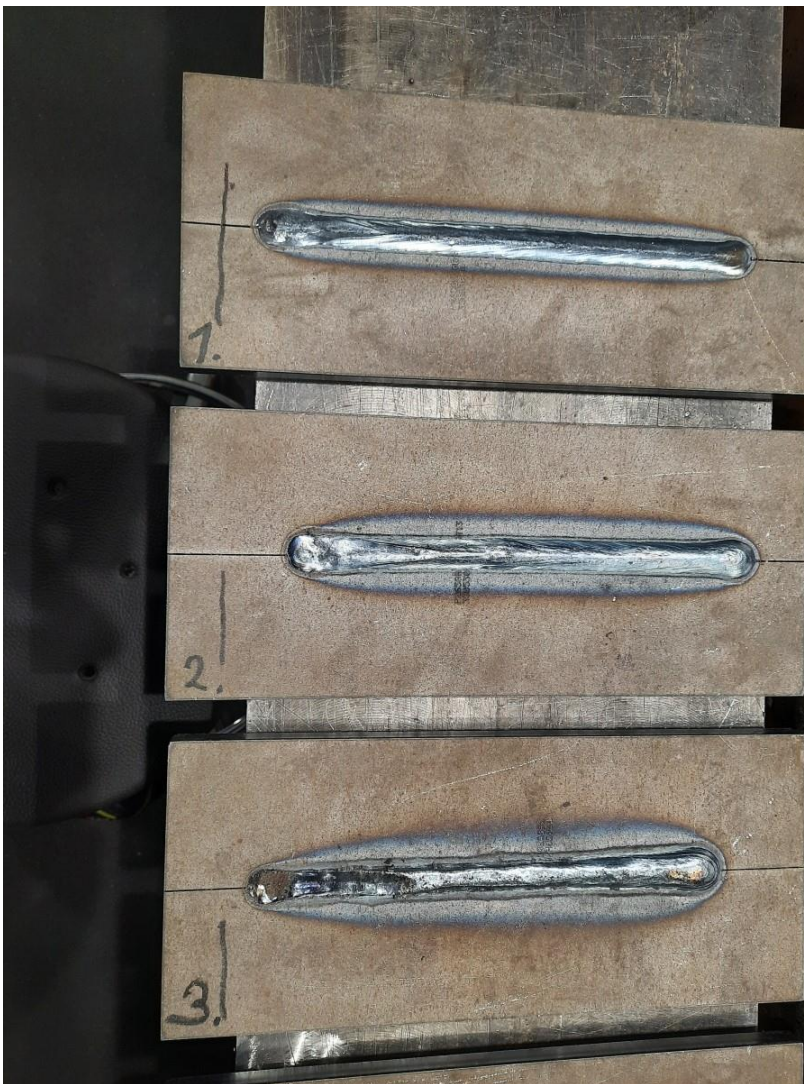


Kuva 16. Tasavirran ja tasajännite virtalähteiden lähtökäyrät. (Lincoln Electric)

3 Tulokset

3.3 Visuaalinen tarkastelu

Hitsausjäljen tarkastelu paljaalla silmällä päältäpäin. Kuvassa 17 on CC hitsatut palot ja kuvassa 18 CV hitsatut palot.



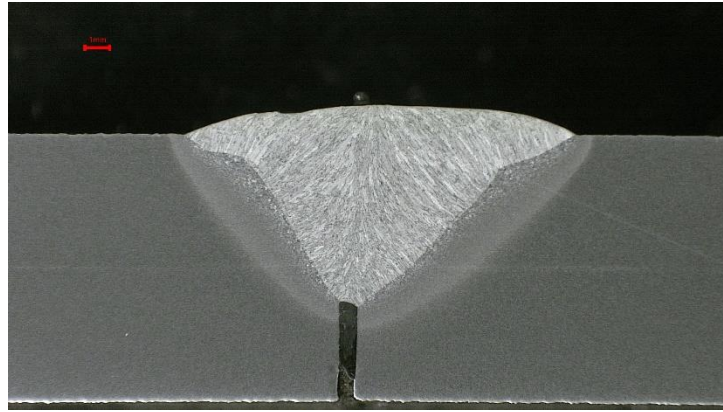
Kuva 17. Kokeet 1–3



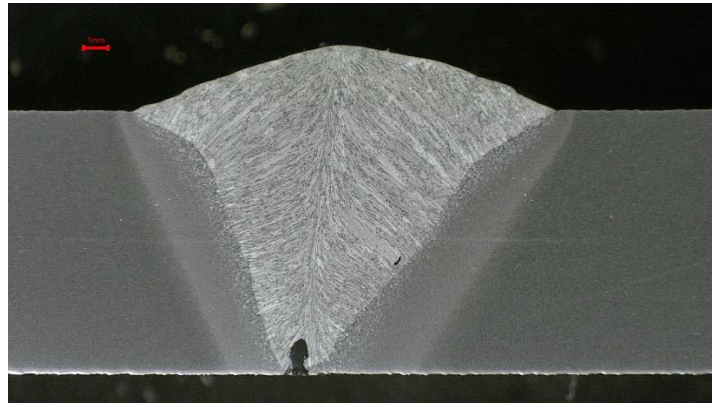
Kuva 18. kokeet 4–6

3.4 Makrohiekuvat

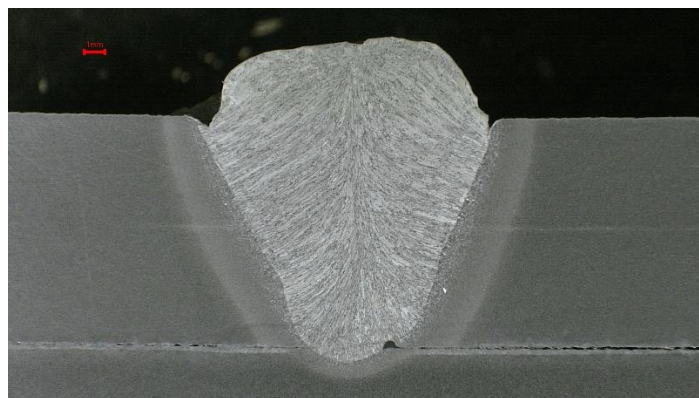
Tulokset makrohiekuvista, kuvissa 19–21 kokeet 1–3 ja kuvissa 22–24 kokeet 4–6. Kuvat on otettu keskeltä hitsausta ja kuvien vasemmassa yllä kulmassa on punaisella merkattu mittakaavaviiva, joka kuvastaa yhtä millimetriä.



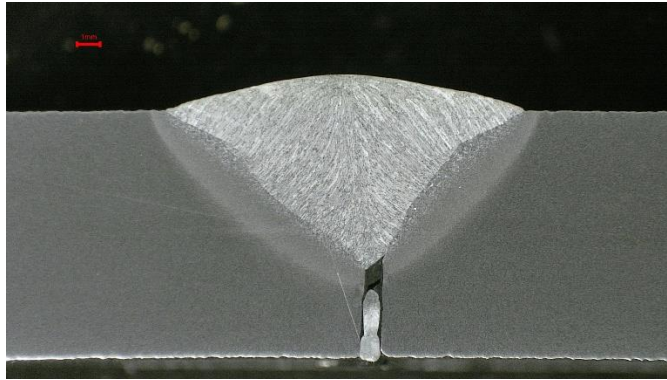
Kuva 19. Koe 1 CC, 700A, 34V



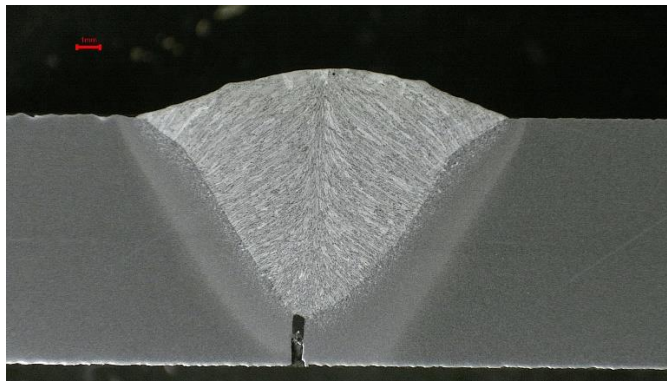
Kuva 20. Koe 2 CC, 900A, 36V



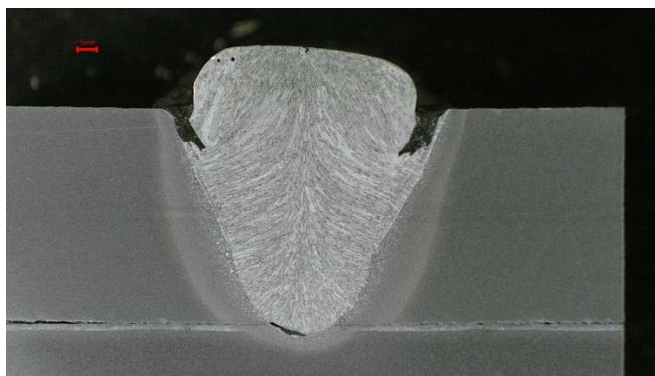
Kuva 21. Koe 3 CC, 1100A, 38V



Kuva 22. Koe 4 CV, 700A, 34V



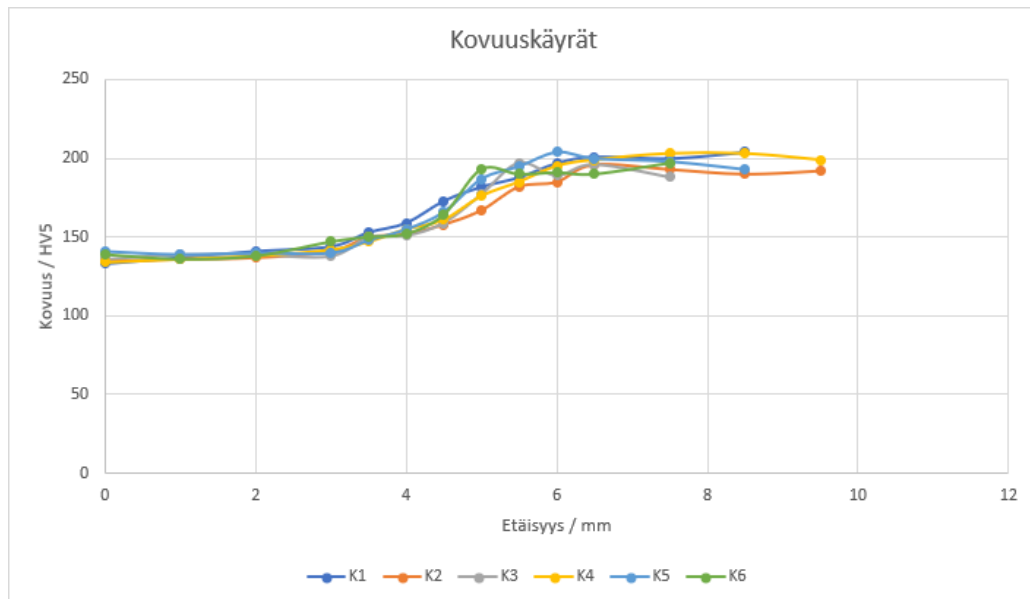
Kuva 23. Koe 5 CV, 900A, 36V



Kuva 24. Koe 6 CV, 1100A, 38V

3.5 Kovuustulokset

Kuvassa 25. on kovuuskokeiden tulokset. Pystyakselilla oleva HV5 tarkoittaa Vickersin kovuutta. Tarkemmat numeeriset arvot liitteessä 2.



Kuva 25. Kokeiden kovuustulokset grafiikalla kuvattuna

4 Analyysi

Visuaalisesti päältäpäin tarkasteltuna CC/CV asetuksilla ei näytä olevan suurta vaikutusta hitsin pintaan. Hitsien pinnat ovat matalilla virroilla tasaisia mutta 1100 ampeerilla hitsatuissa hitseissä ilmenee hitsien pinnassa roiskeita. Roiskeet voivat johtua liian suuresta virrasta tai väärästä jännitteen ja virran suhteesta. Makrohiekuvista nähdään, että CC asetuksilla hitsatuilla hitseillä on hiukan parempi tunkema. Varsinkin 900 ampeerin hitsien tunkemilla on suuri ero. Kokeet 1 ja 4 ovat parhaat tunkeman ja hitsin leveyden suhteen, hyvässä hitsissä leveys on suurempi kuin syvyys, mutta hitseillä ei ole tarpeeksi tunkemaa 10 mm paksulle perusaineelle. Hitsauskokeissa 2 ja 5 tunkemaa on tarpeeksi, mutta hitsit

ovat tunkemaan nähden liian kapeita ja hitseillä on korkeat kuvut. Hitsissä 2 ilmenee myös vajaa juuri, jonka voi aiheuttaa liian pieni hitsausenergia.

Hitseillä 3 ja 6 on liian korkea kupu ja juurikupu, ja ne ovat liian kapeita ja niissä on reunaavaa. Näitä ongelmia on mahdollista korjata kasvattamalla kaarijännitettä ja laskemalla hitsausvirtaa.

Suuria kovuuseroja hitseillä ei ole, suurin ero on koe 6 ja koe 2 välillä 5 mm kohdalla, hitsi 6 on tällä kohdalla 16.6 HV5 kovempi. Kovuudeltaan hitsit ovat kovempia kuin perusaine. Perusaineen kovuus ei ole lämmönvaikutuksesta juurikaan muuttunut missään hitsissä. Hitsien kovuudet ovat johdonmukaisesti samanlaisia, joten voidaan päätellä, että kovuus ei ole lämmöntuonnin takia kasvanut liikaa tai jäänyt liian pieneksi.

5 Johtopäätökset

Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään CC/CV Panda 1250 virtalähteen asetuksien vaikutus hitsaus tuloksiin, sekä löytää sopivat hitsausvirta ja kaarijännite parametrit 4.8 mm langan hitsaukseen. Tutkimuksista kävi ilmi että CC/CV asetukset eivät antaneet erilaisia tuloksia. Virtalähteen asetuksia voisi tutkia ottamalla samasta hitsausnäytteestä useampia makrohiekuvia eri kohdista, koska perusaineen pinnan muutokset vaikuttavat valokaaren pituuteen, mikä taas vaikuttaa hitsausvirta ja kaarijännite arvoihin. Näin nähtäisiin CC ja CV virtalähteen asetusten vaikutus hitsausjälkeen paremmin. Täydellisiä hitsausparametri alueita ei löydetty, mutta esimerkiksi 700 ampeerilla ja 34 voltilla voi hyvin hitsata 4.8 mm langalla. Tämä tulos on siinä mielessä keho, että kun hitsataan paksulla langalla, haluttaisiin hitsata paksuja materiaaleja. 700 ampeerin hitsausvirralla ei voi esimerkiksi kokeen mukaista yhdeltä puolelta hitsattua liitosta tehdä liian pienen tunkeuman takia. Vaikka 900 ja 1100 ampeerin kokeet eivät antaneet hyviä tuloksia, sanotaan kuitenkin, että 900–1100 ampeerin hitsausvirralla voi kokeenmukaisen hitsin suorittaa. Täytyy vain löytää sopiva kaarijännitteen arvo. 34 voltia 900 ampeerille ja 38 voltia 1100 ampeerille olivat aivan

liian pienet arvot. Pitäisi siis suorittaa kokeita suuremmilla kaarijännitteen arvoilla, jotta nähtäisiin paremmin millä parametreillä hitsin voi suorittaa parhaiten.

Se että CC/CV asetukset eivät vaikuttaneet juurikaan tuloksiin oli kirjallisuuskatsauksen perusteella oletettavissa. Kokeiden tulokset ovat yhdenmukaisia aiempien tutkimuksien kanssa siitä, että hitsausvirta on 100x – 200x hitsauslangan paksuus. Tutkimuksessa kohdassa kaarijännite, annetaan kaava, jonka avulla voi laskea sopiva kaarijännite. Tämän kaavan mukaan kokeessa käytettiin liian pieniä jännitteitä muissa kuin 700 A kokeessa, joten tulokset liian pienen kaarijännitteen käytöstä ovat yhdenmukaisia aiempien tutkimuksien kanssa.

Lähteet

Kari, L. 2022. Pohjoismaiden aluemyyntipäälikkö. EWM AG. Haastattelu 27.1.2022

Astwood. 2016. EN 10028 – P265GH. Masteel. [Verkkosivu]. [Viitattu 28.6.2022]. Saatavilla: <https://masteel.co.uk/en-10028-p265gh/>

Beam automatic saw machine with double gun. 2017. bestkenda. [Verkkosivu]. [Viitattu 22.6.2022]. Saatavilla: <http://bestkenda.com/project/beam-automatic-saw-machine-with-double-gun>

Chandel R.S, Seow H.P, Cheong F.L. 1997. Effect of increasing deposition rate on the bead geometry of submerged arc welds. Journal of materials processing technology Vol 72. nro 1. S. 124-128.

Constant Current vs. constant voltage output. Ei julkistusaikaa. Lincoln Electric. [Verkkosivu]. [Viitattu 10.04.2022]. Saatavilla: <https://www.lincolnelectric.com/en/welding-and-cutting-resource-center/process-and-theory/constant-current-vs-constant-voltage-output>

Garstka T, Koczurkiewicz B, Golanski G. 2010. Diagnostic Examination of P265GH Boiler Steel Plate Using the Barkhausen Method. Vol 10. nro 4. S. 83.

Grill, Jeff. 2021. Submerged Arc Welding (SAW). Weld Guru. [Verkkosivu]. [Viitattu 05.04.2022]. Saatavilla: <https://weldguru.com/submerged-arc-welding/>

Karaoğlu, Serdar. Seçgin, Abdullah. 2007. Sensitivity analysis of submerged arc welding process parameters. Journal of materials processing technology. S. 500–507.

Lehto, Vesa-Pekka. Ei julkistusaikaa. Kovuusmittaus. Materia materiaalitutkimuskeskus. [Verkkosivu]. [Viitattu 14.04]. Saatavilla: <https://www.materiaakeskus.fi/tutkimuspalvelut/metallit/menetelmat/kovuusmittaus/>

Linconweld 780. 2022. lincolnelectric. [Verkkosivu]. [Viitattu 26.6.2022]. Saatavilla: https://www.lincolnelectric.com/en/Products/lincolnweld780_saw

Lukkari, Juha. 2002. Hitsaustekniikka – perusteet ja kaarihitsaus. 4. Painos. Helsinki, Edita Prima Oy. S. 121–152.

Lukkari, Juha. 2005. Hitsausuutiset. nro 1. ESAB. S. 12.

Lukkari, Juha. 2001. Hitsien laatu ja hitsausvirheet. hitsausuutiset nro 2. ESAB. S. 13–14.

Esabin osaamiskeskus. 2017. ESAB. [Verkkosivu]. [Viitattu 15.04.2022]. Saatavilla: <https://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/jauhekaarihitsaus.cfm>

Hitsausvirheitä – syitä ja estäminen. 2010 ESAB. [Pdf asiakirja]. [Viitattu 20.4.2022]. Saatavilla:

<https://www.esab.fi/fi/fi/support/documentation/educational/upload/xa00152112a.pdf>

Hitsaus. 2014. Terästen, nikkelin, titaani ja niiden seosten sulahitsaus (paitsi sädehitsaus). Hitsiluokat. SFS-EN ISO 5817:2014. S. 10.

Hitsaus ja lähiprosessit. 2008. Geometristen hitsausvirheiden luokittelu metallisissa materiaaleissa. Osa 1: Sulahitsaus. SFS-EN ISO 6520-1:2008. S. 22–26.

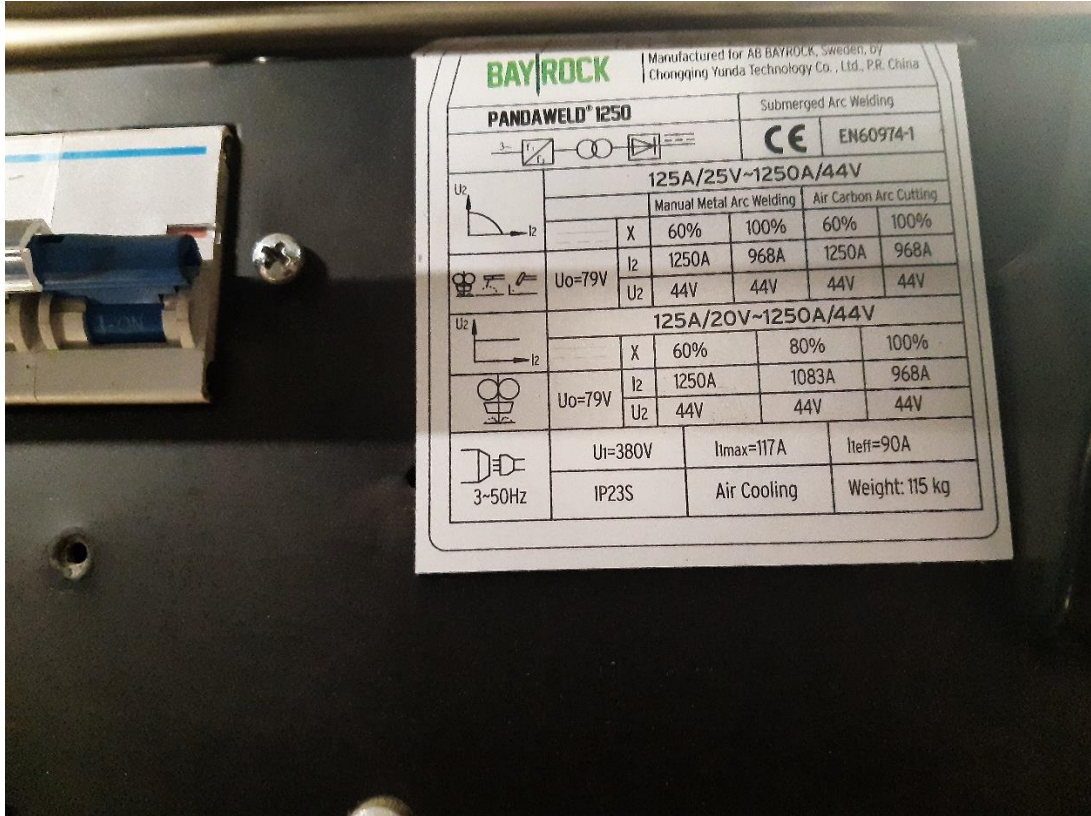
Kärki, Timo. 2021. Jauhekaarihitsaus (BK10A3600 Valmistus - ja tuotantotekniikka). LUT. [Pdf asiakirja]. [Viitattu 28.6.2022]. Saatavilla: https://moodle.lut.fi/pluginfile.php/491485/mod_resource/content/1/Jauhekaarihitsaus.pdf

Saw welding, an efficient and high-quality welding process. 2020. Pemamek. [Verkkosivu]. [Viitattu 22.06.2022]. Saatavilla: <https://pemamek.com/discover/saw-welding-an-efficient-and-high-quality-welding-process/>

Surfacing welding. 2022. amp welding fabrication. [Verkkosivu]. [Viitattu 22.06.2022]. Saatavilla: <https://ampweldingfabrication.com/surfacing-welding/>

Welding Consumables Product Catalogue. 2017. Lincoln Electric. [Pdf asiakirja]. [Viitattu 12.4.2022]. Saatavilla: <https://www.lincolnelectric.com/assets/EU/EN/consumables-catalogue-eng.pdf> S. 534,568.

Liite 1. Virtalähteen tarkemmat tiedot



Liite 2. Kokeiden 1–6 kovuuslukemat

Näyte	Sarja	Mittauspiste	Menetelmä	X-etäisyys aloituspaikkaan (mm)	Kovuus
JK1	Sarja 1	1	HV 5	0,000	133
		2	HV 5	1,000	137
		3	HV 5	2,000	141
		4	HV 5	3,000	144
		5	HV 5	3,500	153
		6	HV 5	4,000	159
		7	HV 5	4,500	173
		8	HV 5	5,000	182
		9	HV 5	5,500	188
		10	HV 5	6,000	197
		11	HV 5	6,500	201
		12	HV 5	7,500	200
		13	HV 5	8,500	204

Näyte	Sarja	Mittauspiste	Menetelmä	X-etäisyys aloituspaikkaan (mm)	Kovuus
JK2	Sarja 1	1	HV 5	0,000	135
		2	HV 5	1,000	136
		3	HV 5	2,000	137
		4	HV 5	3,000	141
		5	HV 5	3,500	150
		6	HV 5	4,000	152
		7	HV 5	4,500	158
		8	HV 5	5,000	167
		9	HV 5	5,500	182
		10	HV 5	6,000	185
		11	HV 5	6,500	196
		12	HV 5	7,000	193
		13	HV 5	8,000	190
		14	HV 5	9,000	192

Näyte	Sarja	Mittauspiste	Menetelmä	X-etäisyys aloi- tuspäikkaan (mm)	Kovuus
JK3	Sarja 1	1	HV 5	0,000	136
		2	HV 5	1,000	139
		3	HV 5	2,000	139
		4	HV 5	3,000	138
		5	HV 5	4,000	150
		6	HV 5	4,500	151
		7	HV 5	5,000	159
		8	HV 5	5,500	177
		9	HV 5	6,000	197
		10	HV 5	6,500	189
		11	HV 5	7,500	196
		12	HV 5	8,500	188

Näyte	Sarja	Mittauspiste	Menetelmä	X-etäisyys aloi- tuspäikkaan (mm)	Kovuus
JK4	Sarja 1	1	HV 5	0,000	134
		2	HV 5	1,000	136
		3	HV 5	2,000	138
		4	HV 5	3,000	142
		5	HV 5	3,500	147
		6	HV 5	4,000	155
		7	HV 5	4,500	161
		8	HV 5	5,000	176
		9	HV 5	5,500	185
		10	HV 5	6,000	195
		11	HV 5	6,500	199
		12	HV 5	7,000	203
		13	HV 5	8,000	203
		14	HV 5	9,000	199

Näyte	Sarja	Mittauspiste	Menetelmä	X-etäisyys aloituspaikkaan (mm)	Kovuus
JK5	Sarja 1	1	HV 5	0,000	141
		2	HV 5	1,000	139
		3	HV 5	2,000	140
		4	HV 5	3,000	140
		5	HV 5	3,500	148
		6	HV 5	4,000	155
		7	HV 5	4,500	166
		8	HV 5	5,000	187
		9	HV 5	5,500	195
		10	HV 5	6,000	204
		11	HV 5	6,500	200
		12	HV 5	7,500	198
		13	HV 5	8,500	193

Näyte	Sarja	Mittauspiste	Menetelmä	X-etäisyys aloituspaikkaan (mm)	Kovuus
JK6	Sarja 1	1	HV 5	0,000	139
		2	HV 5	1,000	136
		3	HV 5	2,000	138
		4	HV 5	3,000	147
		5	HV 5	3,500	150
		6	HV 5	4,000	152
		7	HV 5	4,500	164
		8	HV 5	5,000	193
		9	HV 5	5,500	190
		10	HV 5	6,000	191
		11	HV 5	7,000	190
		12	HV 5	8,000	197