LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

HITSAUSNOPEUDEN VAIKUTUS TUNKEUMAAN JAUHEKAARIHITSAUKSESSA VAKIOVIRRALLA JA VAKIOJÄNNITTEELLÄ HITSATTAESSA

THE EFFECT OF WELDING SPEED TO DEPTH OF PENETRATION IN SUBMERGED ARC WELDING WHILE WELDING WITH CONSTANT-CURRENT AND CONSTANT-VOLTAGE

Lappeenrannassa 13.4.2015
Olli Mansikkaniemi
Tarkastaja: Professori Jukka Martikainen

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO

1 **JOHDANTO** 5
1.1 Tavoite ja rajaus 5
1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset 6
2 **JAUHEKAARIHITSAUS** 7
2.1 Prosessikuvaus sekä laitteisto 7
2.1.1 Materiaalit ja liitosmuodot 10
2.1.2 Hitsien laatu 10
2.1.3 Vakiovirta CC 10
2.1.4 Vakiojännite CV 11
2.2 Parametrit 11
2.2.1 Muut parametrit kuin hitsausnopeus 12
2.2.2 Hitsausnopeus 15
2.3 Käyttökohteet 16
3 **TUNKEUMA** 19
3.1 Hitsipalon muoto 19
3.2 Hitsautumissyvyyden vaikutus kappaleen metallurgisiin ominaisuuksiin 19
4 **HITSAUSKOKEET JA TULOKSET** 21
4.1 Materiaali 22
4.2 Laitteisto 22
4.3 Tulokset vakiovirralla hitsattaessa 23
4.4 Tulokset vakiojännitteellä hitsattaessa 26
4.5 Tulosten vertailu 27
5 **YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET** 29

LIITTEET

Liite 1. Ainestodistus
Liite II. Vakiovirta makrokuvat
Liite III. Vakiojännite makrokuvat

LYHENNELUETTELO

A	Virran yksikkö, ampeeri
CC	Vakiovirta, constant-current
CV	Vakiojännite, constant-voltage
d	Hitsauslanganhalkaisija
E	Hitsausenergia [kJ/cm]
HAZ	Lämpövaikutukselle altistunut alue hitsissä, heat-affected-zone
I	Hitsausvirta [A]
U	Hitsausjännite, kaarijännite [V]
v	Hitsausnopeus [cm/min]
V	Jännitteen yksikkö, voltti

1 JOHDANTO

Jauhekaarihitsaus on eräs vanhimpia hitsausprosesseja, joka kehitettiin 1930-luvulla Yhdysvalloissa. Aluksi jauhekaarihitsauksella hitsattujen hitsien mekaaniset ominaisuudet olivat suhteellisen heikot, johtuen suurista hitsausvirroista sekä paksuista hitsauslangoista. Lisäksi alkuaikoina hitsaukset suoritettiin suurillekin ainepaksuuksille joko yhdeltä puolelta hitsauksena yhdellä palolla tai kahdelta puolelta kaksipalkohitsauksena. Myöhemmin alettiin pitää suurta hitsausnopeutta tärkeämpänä kuin suurta hitsiaineentuottoa, joten nykyisin hitsiaineentuotto on 6–8 kg/h, kun ennen se saattoi olla yli 20 kg/h. (Lukkari, 1986, s. 3.) Nykyisin tosin 20 kg/h hitsiaineentuotto ei ole tavatonta (Lukkari, 1997, s. 151).

Jauhekaarihitsaus on metallikaarihitsausta, jossa valokaari palaa ilmakehältä suojassa hitsausjauheen alla. Hitsausjauhe jähmettyy kuonakerrokseksi valmiin hitsin päälle, josta se lopuksi poistetaan esimerkiksi käsin. Tarvittava lämpö hitsin syntymiseen saadaan valokaaresta. Tärkein ero muihin hitsausprosesseihin on valokaaren palaminen näkymättömissä jauheen alla. (Lukkari, 1986, s. 3.)

1.1 Tavoite ja rajaus

Tämä työ on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsaustekniikan laboratoriolle. Työssä käytetään yliopiston Pandaweld-jauhekaarihitsauslaitteistoa. Työssä tutkitaan nopeuden vaikutusta hitsausprosessin tunkeumaan sekä kuvun muotoon, hitsattaessa vaihtoehtoisesti joko vakiovirtalähteellä tai vakiojännitelähteellä.

Jauhekaarihitsauksessa hitsin tunkeuma on optimaalinen tietyllä optiminopeudella, joka ei ole liian nopea, mutta toisaalta ei liian hidas (Lukkari, 1997, s. 152). Työn tarkoituksena on löytää käytetylle laitteistolle optimaaliset asetukset nopeuden suhteen siten, että sekä hitsautumissyvyys että hitsipalon muoto ovat optimaaliset. Työ on jatkoa aikaisemmalle tutkimukselle, jossa tutkittiin pelkästään vakiovirran ja vakiojännitteen vaikutusta tunkeumaan.

Työssä selvitetään aluksi perusasiat jauhekaarihitsauksesta prosessina, vakiovirran ja vakiojännitteen erot hitsauksessa, sekä eri parametrien vaikutukset hitsauslopputulokseen, keskittyen erityisesti nopeuden vaikutukseen. Hitsauskokeissa keskitytään selvittämään millä nopeudella hitsauksen tunkeuma sekä palkomuoto ovat optimoituja. Lopuksi selvitetään mahdolliset jatkotutkimuskohteet ja tehdään yhteenveto saaduista tuloksista.

1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset

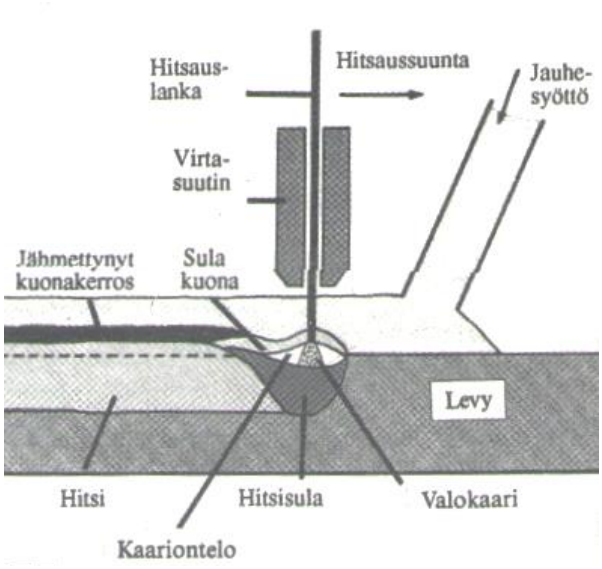
Työn tutkimuskysymys on: Milloin hitsautumissyvyys ja sekoittumisaste ovat parhaimmillaan suhteessa hitsausnopeuteen? Tutkimusongelmana on: Onko järkevämpää käyttää tasavirta- vai tasajännite-ohjausta hitsattaessa kyseisellä laitteistolla?

2 JAUHEKAARIHITSAUS

Tässä kappaleessa keskitytään jauhekaarihitsauksen teoriaan. Prosessikuvauksessa kerrotaan erikseen vakiovirralla ja vakiojännitteellä hitsauksesta. Parametreissa ja niiden vaikutuksissa keskitytään erityisesti nopeuden vaikutukseen hitsauslopputuloksessa.

2.1 Prosessikuvaus sekä laitteisto

Jauhekaarihitsaus on mekanisoitu hitsausprosessi, jossa valokaari palaa hitsausjauheen alla työkappaleen ja lisäainelangan välissä. Hitsausjauheen tarkoitus hitsausprosessissa on toimia suojana ympäröivää ilmaa vastaan. Osa jauheesta jää irtonaiseksi hitsin päälle, ja osa taas muodostaa myöhemmin puhdistettavan kuonakerroksen. Jauhekaarihitsauksen periaate on esitetty kuvassa 1. (Lepola & Makkonen, 2005, s. 10.)



Kuva 1. Jauhekaarihitsauksen periaate (Lukkari, 1997, s. 121).

Valokaari palaa kaasujen ja metallihöyryjen täyttämässä tilassa, jota kutsutaan kaariontelokSi. Kaariontelon yläpuolella on kuonakerros, takana hitsisula ja edessä sula perusaine. Aineensiirtyminen tapahtuu hitsausvirrasta riippuen joko suurina tai pieninä pisaroina. Virran ollessa suuri, sulapisarat lentävät suoraan hitsisulaan langan päästä, pienellä virralla pisaroiden siirtymä tapahtuu kuonaseinämän kautta. Jauhekaarihitsauksessa ei ole näkyvää valokaarta, sillä hitsausprosessi on jauheen alla

suojassa. Valokaaren sytytys tapahtuu yleensä raapaisutyyppisesti. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että aluksi lisäainelankaa liikutetaan hitaasti kohti työkappaleen pintaa, jolloin langan pää alkaa raapia työkappaletta, jolloin valokaaren syttyminen tapahtuu. Valitut hitsausarvot kytkeytyvät päälle vasta kun valokaari on syttynyt. (Lukkari, 1997, s. 121–122.)

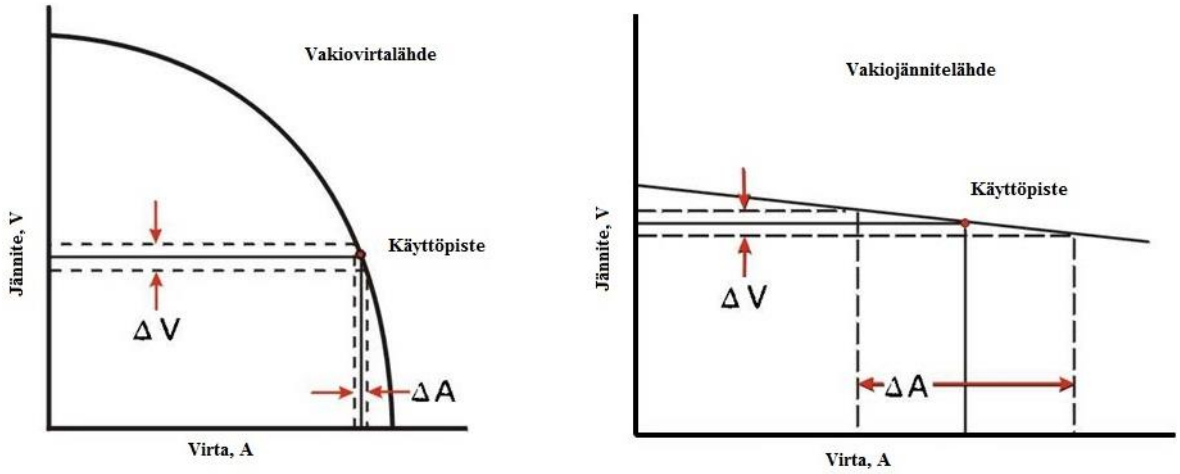
Hitsaustapahtumassa lisäainelanka syötetään kosketussuuttimen läpi valokaareen. Kosketussuuttimessa lisäainelankaan johdetaan myös hitsausvirta. Hitsausjauhetta syötetään jauhesäiliöstä hitsaustapahtumaan syöttöputken kautta joko langan eteen tai lisäaineen ympärille. Kosketussuuttimen etäisyys kappaleesta määritellään langanhalkaisijan mukaan siten, että vapaalanka, ja sitä kautta suutinetäisyys, on maksimissaan kymmenen kertaa langanhalkaisija. Kuten jo aikaisemmin mainittiin, jauhekaarihitsaus on mekanisoitua hitsausta ja työliike on yleensä koneellinen, jolloin hitsausliike saadaan aikaan esimerkiksi puomilla tai hitsausvaunulla. Toinen variaatio on liikuttaa työkappaletta esimerkiksi pyöritysrullaston tai pyörityspöydän avulla. (Lukkari, 1997, s. 121.)

Jauhekaarihitsauksessa käytettäviä hitsausaineita ovat hitsausjauhe ja hitsauslisäaine, joka voi olla joko hitsauslanka tai hitsausnauha. Hitsauslanka voi olla joko täytelanka, tai umpilanka. Hitsausjauheiden kemiallinen koostumus vaihtelee, mutta yleisesti ottaen hitsausjauhe on raemaista, sulavaa, mineraalista ja metallista alkuperää olevaa. (Lukkari, 1997, s. 122.)

Jauhekaarihitsaukselle ominaisia piirteitä ovat suuri hitsausvirta ja suuri hitsausenergia. Suuren hitsausvirran avulla saadaan aikaiseksi suuri tunkeuma, ja näin ollen jauhekaarihitsauksella voidaan hitsata hyvinkin paksuja kappaleita. Suuren tunkeuman vuoksi hitseissä on myös usein enemmän sulanutta perusainetta, mikä taas vaikuttaa hitsin mekaanisiin ominaisuuksiin yleensä siten, että iskusitkeys laskee ja lujuus nousee. Iskusitkeyden laskua pyritään välttämään turvautumalla monipalkohitsaukseen sekä rajoitettuun hitsausenergiaan. (Lukkari, 1997, s. 123.)

Jauhekaarihitsauksen ohjausyksiköitä on yleisimmin kahta eri tyyppiä; jänniteohjattu säätö ja virtaohjattu säätö. Vakaan hitsaustapahtuman takaamiseksi langan syöttönopeuden ja

sulamisnopeuden välillä tulee olla tasapaino. Syöttönopeus määrittyy hitsausvirran mukaan. Valokaaren säätötoiminto pitää yllä säädetyt virta- ja jännitearvot ja sitä kautta langan sulamisnopeuden sekä valokaaren pituuden. Näitä ohjausyksikkötyyppejä ovat siis jänniteohjattu ja virtaohjattu. Molemmissa tapauksissa virtalähteellä tulee olla laskeva ominaiskäyrä, jänniteohjatulla tosin loivempi. Kuvassa 2 on havainnollistettu molempien ominaiskäyrien muotoa. (Lukkari, 1997, s. 124.)



Kuva 2. Vakiovirta- ja vakiojännitteen ominaiskäyrät (mukaillen, Constant current vs. constant voltage output, 2015).

Yleisemmin käytössä on virtaohjattu säätö, erityisesti yli 2,4 mm:n langoilla. Langansyöttömoottorin nopeutta säädellään hitsausvirran avulla siten, että kun valokaaren pituus muuttuu, niin moottorin nopeus muuttuu varsinaisen virran ja virran asetusarvon eron mukaan. Alle 2,4 mm langoilla käytetään yleensä jänniteohjattua säätöä, jota on jännitteestä riippuen kahta eri tyyppiä. Ensimmäinen, vakiolangansyöttö, toimii ainoastaan jännitteen ollessa alle 26 V. Tällöin langansyöttö tapahtuu säädetyllä vakionopeudella, mutta mikäli valokaaren pituus esimerkiksi lyhenee, tapahtuu myös hitsausvirrassa nousu, joka on ominaiskäyrän mukainen. Virran noustessa lanka palaa nopeammin, kunnes valokaaren pituus muuttuu takaisin alkuperäiseksi. Mikäli jännite on yli 26 V, on kyseessä varsinainen jänniteohjattu säätö, jossa kaarijännitettä mitataan ja langansyöttömoottorin nopeus vaihtelee mittaustuloksien mukaan. (Lukkari, 1997, s. 124.)

2.1.1 Materiaalit ja liitosmuodot

Tavallisia jauhekaarihitsattavia materiaaleja ovat matala- ja keskihiiliset teräkset, niukkaseosteiset suurlujuusteräkset, nuorrutusteräkset sekä monet ruostumattomat teräkset. Myös kupari- ja nikkeliseoksia on hitsattu kokeellisesti. Ilman railon valmistusta voidaan hitsata noin 1,6 mm paksua levyä. Railon valmistuksen avulla voidaan yhdellä palolla hitsata 6,4–25 mm teräksiä. Hitsattaessa usealla palolla materiaalin paksuudella ei käytännössä ole ylärajaa. (Cary & Helzer, 2005, s. 137.)

Liitosmuodot jauhekaarihitsauksessa voivat olla joko päittäis-, päällekkäis- tai kulmaliitoksia. Jauhekaarihitsausta voidaan suorittaa jalko-asennossa sekä pienahitsejä hitsattaessa myös alapiena-asennossa. Vaakahitsien hitsaus on erityisjärjestelyillä mahdollista, mutta haastavaa johtuen hitsausjauheen valumisesta ja hitsisulan vaikeasta hallinnasta. (Lukkari, 1986, s. 8.)

2.1.2 Hitsien laatu

Jauhekaarihitsauksella tuotettujen hitsien laatu on yleensä tasainen, sillä mekanisoinnista johtuen hitsaus etenee tasaisesti ja hitsausarvoissa ei tapahdu muutoksia. Toisin kuin esimerkiksi puikkohitsauksessa, jauhekaarihitsauksen avulla tehtyyn hitsiin ei synny useita aloitus- ja lopetuskohtia, jotka ovat riskitekijöitä virheiden syntymisen kannalta. Hitsin jähmettymisen suunnan vuoksi kuonasulkeumia tai huokosia ei juuri esiinny, samoin liitosvirheiden määrä on pieni johtuen vakiona pysyvästä hyvästä tunkeumasta. Lisäksi hitsien muoto on hyvä, kupu on matala, pinnanlaatu on hyvä ja hitsi liittyy perusaineeseen ”juohevasti”. (Lukkari, 1986, s. 10.)

2.1.3 Vakiovirta CC

Vakiovirtalähdettä (Constant-Current) käytetään useimmiten hitsattaessa yli 4 mm langalla. Vakiovirtalähde on vakiojännitelähdettä monimutkaisempi, sillä systeemi joutuu aistimaan jännitteen kaaresta ja muuttelemaan langan syöttönopeutta ylläpitääkseen oikean jännitteen. (Cary & Helzer, 2005, s. 391.)

Vakiovirtalähdettä käytetään yleensä paksumpien levyjen hitsaukseen. Tämä johtuu siitä, että haettaessa suurempaa tunkeumaa, on kaari vakiovirralla vakaampi kuin mitä vakiojännitteellä. (Lucas & Westgate, 2003, s. 10/18)

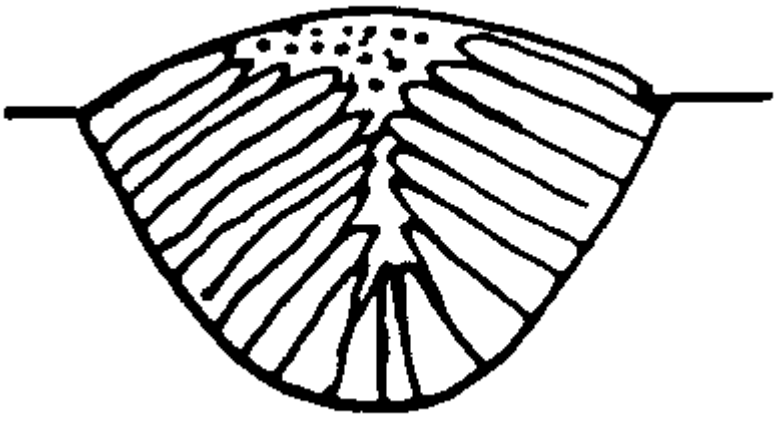
2.1.4 Vakiojännite CV

Vakiojännitelähde (Constant-Voltage) on itsestään säätyvä, joten siinä ei ole tarvetta monimutkaiselle langansyöttöjärjestelmälle, vaan vakionopeudella toimiva langansyöttö riittää. Luonnollisesti tällöin myöskään ei ole tarvetta virran tai jännitteen aistijalle. Langan syöttönopeus sekä langan halkaisija säätelevät valokaaren virtaa ja virtalähde taas kaarijännitettä. (O'Brien, 1997 s. 509.)

Vakiojännitteellä toimivat virtalähteet ovat yleisimpiä virtalähteitä jauhekaarihitsauksessa. Niitä käytetään yleensä nopeaan hitsaukseen tai kun hitsataan ohuita levyjä. (O'Brien, 1997 s. 509.)

2.2 Parametrit

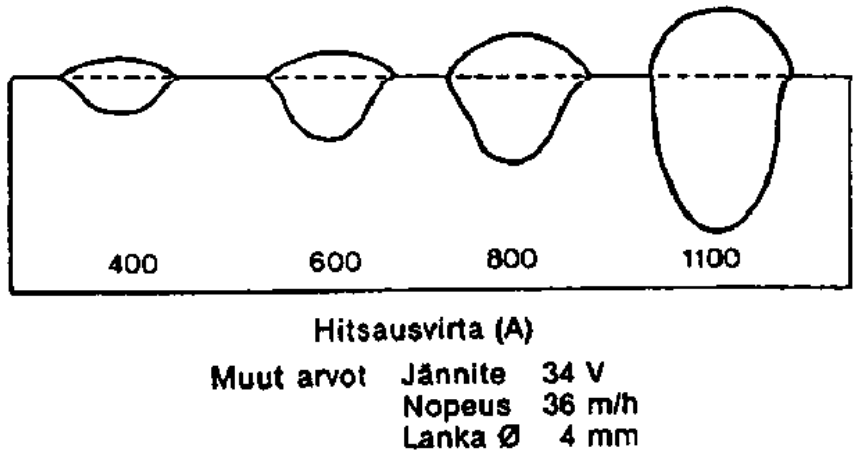
Kuten muissakin hitsausprosesseissa, myös jauhekaarihitsauksessa on joukko parametreja, joita muuttamalla saadaan aikaan erilaisia tuloksia, erityisesti tällä vaikutetaan hitsin palkomuotoon. Oikeanlainen palon leveys/syvyys-suhde on esitetty kuvassa 3. Tässä kappaleessa tutustutaan eri parametreihin, sekä keskitytään erityisesti nopeuden vaikutukseen hitsausprosessissa.



Kuva 3. Kuvassa oikeantyyppinen palkomuoto, jossa leveys/syvyys-suhde on >1. Lisäksi jähmettymisrintamat ovat suuntautuneet oikealla tavalla kohti hitsin pintaa, jolloin epäpuhtaudet eivät jää hitsiin. (Lukkari, 1997, s. 151.)

2.2.1 Muut parametrit kuin hitsausnopeus

Hitsausvirta on suurin tunkeumaan sekä palkomuotoon vaikuttava tekijä. Virta vaikuttaa myös lisäaineen sulamisnopeuteen sekä hitsiaineentuottoon. Hitsausvirta tulee säätää oikean suuruiseksi, sillä liian suurella hitsausvirralla saadaan aikaiseksi valokaaren rauhattomuutta, sulan ylikuumenemista sekä reunahaavataipumusta. Liian pieni hitsausvirta taas vaikeuttaa valokaaren syttymistä sekä aiheuttaa epävakaisuutta hitsaustapahtumassa. Hitsausvirran vaikutus palkomuotoon on esitetty kuvassa 4. Perustavanlaatuisena sääntönä on: Hitsausvirta (A) = Noin 100–200 x langan halkaisija (mm). (Lukkari, 1997, s. 149–150.)

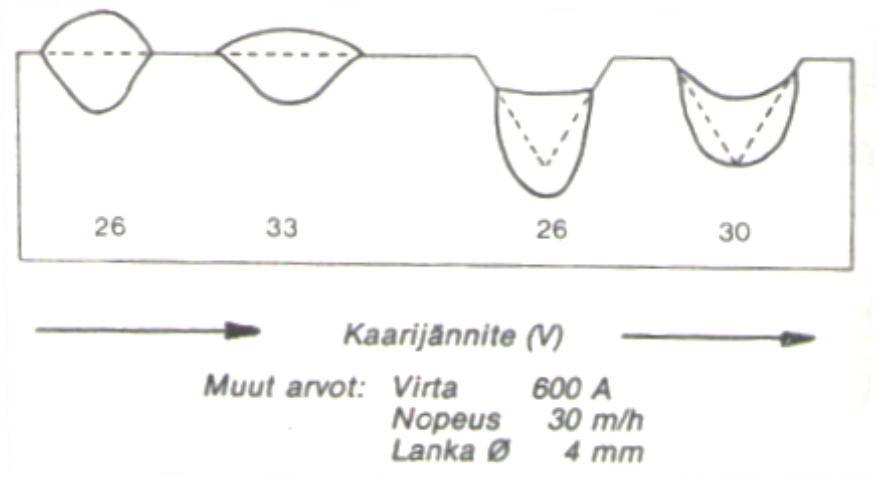


Kuva 4. Palkomuodon riippuvuus hitsausvirrasta (Lukkari, 1997, s. 151).

Kaarijännitettä säätämällä voidaan vaikuttaa hitsin kuvun korkeuteen ja leveyteen. Kaarijännitteellä on myös suuri vaikutus hitsausjauheen kulumiseen, sillä kaarijännite määrää kuonaksi muuttuvan jauheen määrän. Tarkasti ottaen kaarijännite kertoo langan pään sekä hitsisulan välisen potentiaalieron. Kaarijännite riippuu valokaaren pituudesta, suutinetäisyydestä, sekä kaarivälin johtumiskyvystä, johon taas hitsausjauhe vaikuttaa. Kaarijännitteen ollessa liian pieni kuvun korkeus kasvaa, liian suuri kaarijännite taas aiheuttaa reunahaavaa. Molemmissa tapauksissa kuona tarttuu palon reunojen koloihin. Kaarijännitteen valintaan vaikuttavat hitsausjauhe, prosessisovellus, railo sekä hitsausvirta. (Lukkari, 1997, s. 150–151.) Hitsausjännitteen määrittelyn nyrkkisääntö on esitetty kaavassa 1.

$$U = \frac{I}{4 \text{ x } (d+1)} \ (V) \qquad (1)$$

jossa I on hitsausvirta ja d on langanhalkaisija. Kuvassa 5 on esitetty kaarijännitteen vaikutusta palkomuotoon. (Lukkari, 1997, s. 150–151.)

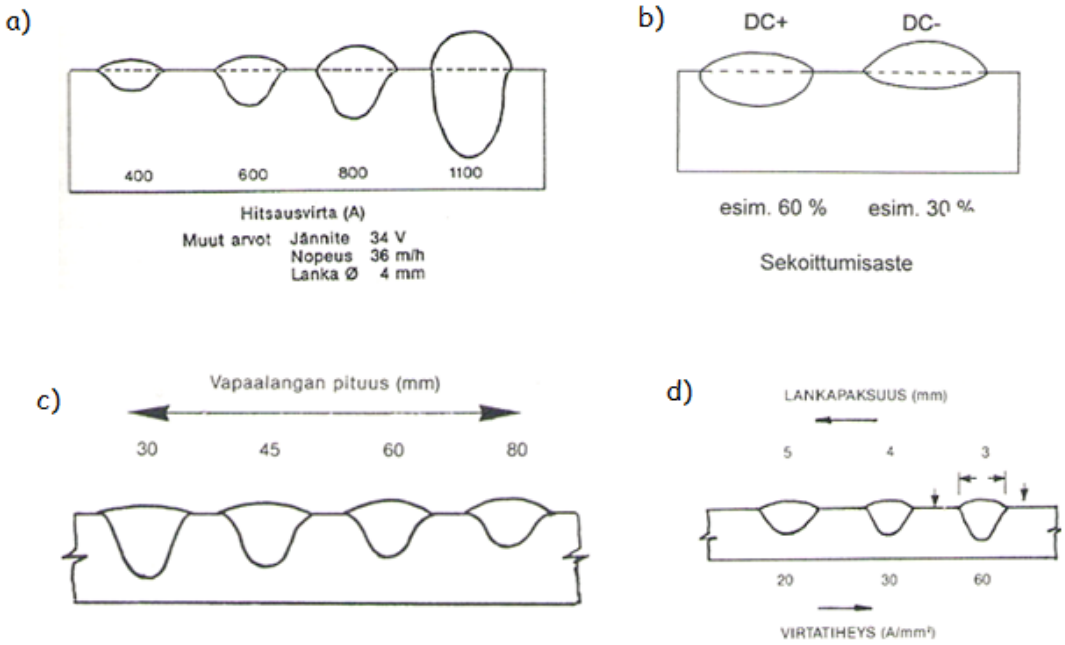


Kuva 5. Kaarijännitteen ja palkomuodon välinen riippuvuus (Lukkari, 1997, s. 152).

Langan paksuudella voidaan vaikuttaa tunkeumaan, hitsin leveyteen, kuvun korkeuteen ja langan sulamisnopeuteen. Esimerkiksi ohuella langalla hitsattaessa tunkeuma kasvaa, hitsi kapenee, kuvun korkeus kasvaa ja lanka sulaa nopeammin. Tämä johtuu suuremmasta virtatiheydestä. Mikäli halutaan suuri tunkeuma, valitaan ohut lanka ja suuri virta. Mikäli taas virta pidetään samana ja kasvatetaan langan paksuutta, tunkeuma pienenee. (Lukkari, 1997, s. 153.)

Virtalajilla ja napaisuudella voidaan vaikuttaa suuresti hitsiin, erityisesti tunkeumaan ja langan hitsiaineentuottoon. Tavallisesti jauhekaarihitsaus tapahtuu tasavirralla langan ollessa plus-navassa, jolloin tunkeuma on suuri, palkomuoto on hyvä ja myös tiiviys on hyvä. Mikäli halutaan kasvattaa tuottoa, voidaan lanka kytkeä miinus-napaan, jolloin tuotto nousee 20–40 %. Erityisesti päällehitsauksessa hyödynnetään miinusnapalankaa. Vaihtovirtaa käytetään lähinnä tandemhitsauksessa. (Lukkari, 1997, s. 153.) Kuvan 6 kohdassa b on selvennetty napaisuuden vaikutusta hitsin kokoon.

Suutinetäisyydellä ja vapaalangalla vaikutetaan hitsin tunkeumaan ja langan sulamisnopeuteen. Pitkällä vapaalangalla hitsattaessa langan pää esikuumenee vastuslämmöstä johtuen, ja näin ollen se myös sulaa nopeammin. Tunkeuma pienenee tämän johdosta. Mikäli vapaalanka on liian pitkä, voi tunkeuma olla liian pieni. Lisäksi liian pitkä vapaalanka aiheuttaa rauhattomuutta hitsaustapahtumassa sekä vaihteluita palkomuodossa. Asiaa on selvennetty kuvan 6 kohdassa c. Nyrkkisääntö on, että vapaalanka on enintään kymmenen kertaa langanhalkaisija. (Lukkari, 1997, s. 153.)



Kuva 6. Kuvassa on esitetty a) hitsausvirran vaikutus palkomuotoon, b) tasavirran napaisuuden vaikutus palkomuotoon, c) vapaalangan pituuden vaikutus palkomuotoon sekä d) langan paksuuden vaikutus palkomuotoon (Lukkari, 1997, s. 151- 153).

Langan asennolla vaikutetaan palkomuotoon. Lanka voi olla hitsaussuuntaan nähden vetävässä asennossa, pystysuorassa, tai työntävässä asennossa. Yleensä käytetään pystysuoraa langan asentoa. Nopeuden ollessa pieni, asento voi olla vetävä, jolloin sula ei pääse hitsin eteen johtuen kaaripaineesta. Suurella nopeudella taas voidaan käyttää työntävää asentoa, jolloin saadaan aikaiseksi matalampi palko ja myös parempi kuonan irtoavuus. (Lukkari, 1997, s. 153–154.)

Muita vaikuttavia tekijöitä ovat maadoituksen paikka ja hitsausjauhekerroksen paksuus. Maadoituksen paikalla on vaikutusta magneettiseen puhallukseen, jolla taas on vaikutusta tunkeumaan. Yleensä hitsaus tehdään maadoituksesta poispäin. Jauhekerroksen paksuuden pitää olla sopiva, ei liian paksu eikä liian ohut. Liian ohut kerros ei peitä valokaarta, jolloin hitsin pinta on huokoinen ja karkea. Liian paksu jauhekerros ei päästä kaikkia kaasuja pois hitsistä ja hitsin pinta tulee karkeaksi. (Lukkari, 1997, s. 154.)

2.2.2 Hitsausnopeus

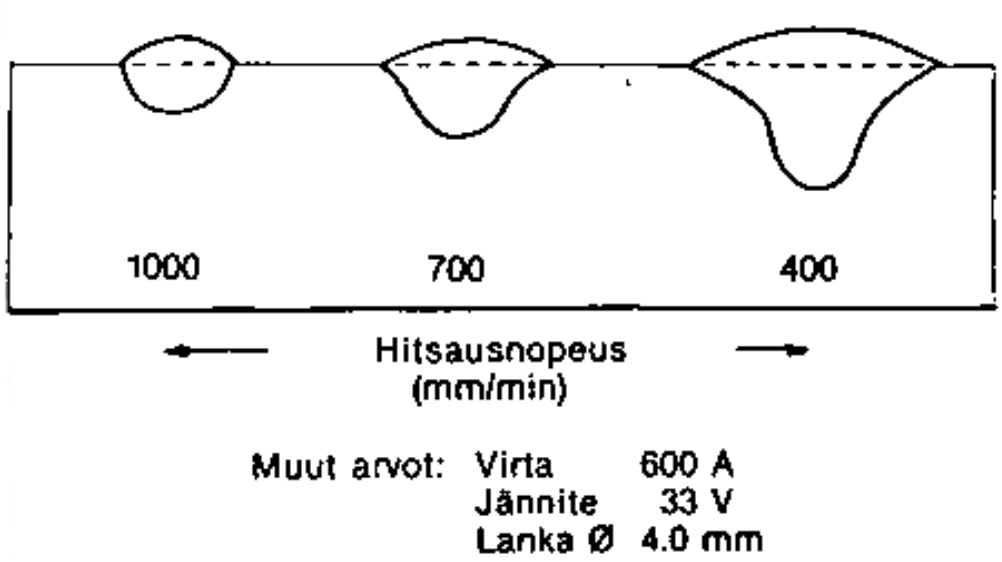
Hitsausnopeuden valinnalla voidaan vaikuttaa kokonaisvaltaisesti hitsin muotoon, niin tunkeumaan kuin hitsipalon leveyteen. Yleisesti ottaen suurella nopeudella hitsattaessa tuloksena on kapeampi hitsi, pienempi kupu sekä pienempi tunkeuma. Nopeutta suurempi vaikutus tunkeumaan on vain hitsausvirralla. (Dixon, Liby & Olson, 1990, s. 28.)

Hitsausnopeudella on suuri vaikutus myös hitsin mekaanisiin ominaisuuksiin, sillä hitsausnopeudella voidaan vaikuttaa helposti hitsausenergiaan. Hitsausliitoksen mekaaniset ominaisuudet ovat riippuvaisia jäähtymisnopeudesta ja näin ollen myös hitsausenergiasta sekä lämmönjohtumisolosuhteista. Hitsausenergian ja hitsausnopeuden keskinäinen riippuvuus nähdään kaavasta 2.

$$E = \frac{UxAx60}{vx1000} \tag{2}$$

jossa
E = hitsausenergia [kJ/cm]
U = kaarijännite [V]
v = Hitsausnopeus [cm/min]
(Lukkari, 1986, s. 61–62.)

Hitsausnopeuden laskiessa hitsausenergia suurenee ja lankaa sulaa enemmän, jolloin tunkeuma kasvaa, hitsi levenee ja kupu kasvaa. Suoraan tätä sääntöä ei kuitenkaan voida soveltaa, sillä tunkeuma on suurimmillaan tietyllä optiminopeudella. Mikäli hitsausnopeus on liian suuri, hitsausenergia jakaantuu liikaa, jolloin tunkeuma pienenee. Liian pienestä nopeudesta taas seuraa liian suuri hitsisula, jolloin valokaari palaa osaksi sulan päällä. Kuvassa 7 on havainnollistettu nopeuden vaikutusta palkomuotoon. (Lukkari, 1986, s. 62.)



Kuva 7. Hitsausnopeuden vaikutus palkomuotoon (Lukkari, 1997, s. 152).

Liian suurella nopeudella hitsattaessa hitsiin voi syntyä reunahaavoja ja lisäksi huokosvaara kasvaa johtuen kaasujen poistumisen estymisestä. ”Suurin hitsausnopeus, jonka ylittyessä tulee häiriöistä ja reunahaava, riippuu hitsausvirrasta.” Liian hitaalla hitsausnopeudella hitsattaessa hitsisula saattaa valua valokaaren edelle sekä alle, jolloin seurauksena voi olla kuonasulkeumat ja liittymisvirheet. Liian hidas nopeus voi myös aiheuttaa valokaaren palamisen jauhekerroksen läpi. (Lukkari, 1986, s. 62.)

2.3 Käyttökohteet

Jauhekaarihitsaus on tehokkuutensa ansiosta suosittua erityisesti raskaassa ja keskiraskaassa teollisuudessa. Sitä pyritään käyttämään mahdollisimman paljon telakkateollisuudessa, kattiloiden, säiliöiden ja paineastioiden valmistuksessa, palkkiteollisuudessa sekä suurien putkien hitsauksessa. (Lukkari, 1997, s. 127–128.)

Telakkateollisuudessa jauhekaarihitsausta käytetään esimerkiksi kansien hitsaamiseen traktorien avulla. Lisäksi laivojen erilaisia I- ja T-palkkeja valmistetaan jauhekaarihitsauksena. Usein myös erityisillä levyjen päittäishitsaustuotantolinjoilla suositaan jauhekaarta. (Lukkari, 1997, s. 127–128.)

Kattiloita, säiliöitä ja paineastioita hitsataan niin ulkopuolelta kuin sisäpuoleltakin jauhekaaren avulla. Lieriöiden kehä- ja pituushitsit ovat myös sopivia kohteita

jauhekaarihitsaukselle. Kuvassa 8 on esitetty säiliön ulkopuolista hitsausta hitsaustornin avulla. (Lukkari, 1997, s. 127–128.)

Kuva 8. Säiliön jauhekaarihitsausta (Welding handbook: Submerged arc welding, 2015).

Palkkien hitsaamista tehdään myös jauhekaarihitsauksella. Yleisesti ottaen hitsataan joko yksi tai kaksi hitsiä kerralla joko pienahitsejä, läpihitsejä tai osittain läpihitsattuja hitsejä. Levynpaksuudet voivat vaihdella suuresti, esimerkiksi välillä 10–60mm. (Lukkari, 1997, s. 127–128.)

Suuret putket, kuten maakaasuputket on yleensä valmistettu jauhekaarihitsauksen avulla. Maakaasuputkien lisäksi muiden putkien sisäpuolisia hitsauksia voidaan suorittaa jauhekaarihitsauksena, mikäli vain traktori mahtuu putken sisälle, muutoin tarvitaan erityinen hitsauspää. Kuvassa 9 on esitelty putken sisäpuolista hitsausta. (Lukkari, 1997, s. 127–128.)

Kuva 9. Kuvassa jauhekaarilaitteisto on sijoitettu putken sisälle Putkea pyöritetään rullaston avulla (Robotic welding automation, 2015).

3 TUNKEUMA

Tässä kappaleessa keskitytään hitsautumissyvyyden, eli pitkittäissuuntaisen tunkeuman, teoriaan. Tunkeumaan vaikuttavat parametrit on käyty läpi edellisessä kappaleessa, joten tässä ei niitä enää käsitellä sen syvällisemmin. Hitsautumissyvyys on määritelty SFS:n standardissa seuraavalla tavalla: Hitsin paksuus railon kohdalla mitattuna perusaineen pinnan tasosta. (SFS 3052, 1995, s. 44.)

3.1 Hitsipalon muoto

Hitsipalon muoto voi vaihdella paljon riippuen hitsausparametreista. Optimaalinen hitsi on sellainen, että hitsin leveys on suurempi kuin syvyys. Hitsin leveydellä tarkoitetaan tässä tapauksessa nimenomaan pintapalon leveyttä. Optimaalinen palkomuoto on esitetty aikaisemmin sivulla 11 kuvassa 3. Hitsin ollessa liian syvä suhteessa leveyteen, on se alttiina pitkittäisille halkeamille hitsin keskilinjassa, toisin sanoen kuumahalkeilulle. Liian syvässä hitsissä jähmettyminen etenee reunoilta kohti hitsin keskilinjaa, jolloin viimeiseksi jähmettyvään kohtaan kerääntyy epäpuhtauksia, jotka taas voivat aiheuttaa hitsin halkeilua. (Lukkari, 1997, s. 149.)

Leveyden ollessa syvyyttä suurempi jähmettymisrintamien suunta on reunoilta ylöspäin, jolloin epäpuhtaudet nousevat hitsin pintaan, jolloin taas kuumahalkeilun riski on pienempi. Myös seosaineilla voidaan vaikuttaa kuumahalkeilualttiuteen. Hiili, rikki ja fosfori kasvattavat halkeamien mahdollisuutta, kun taas mangaani estää halkeilua. (Lukkari, 1997, s. 148.)

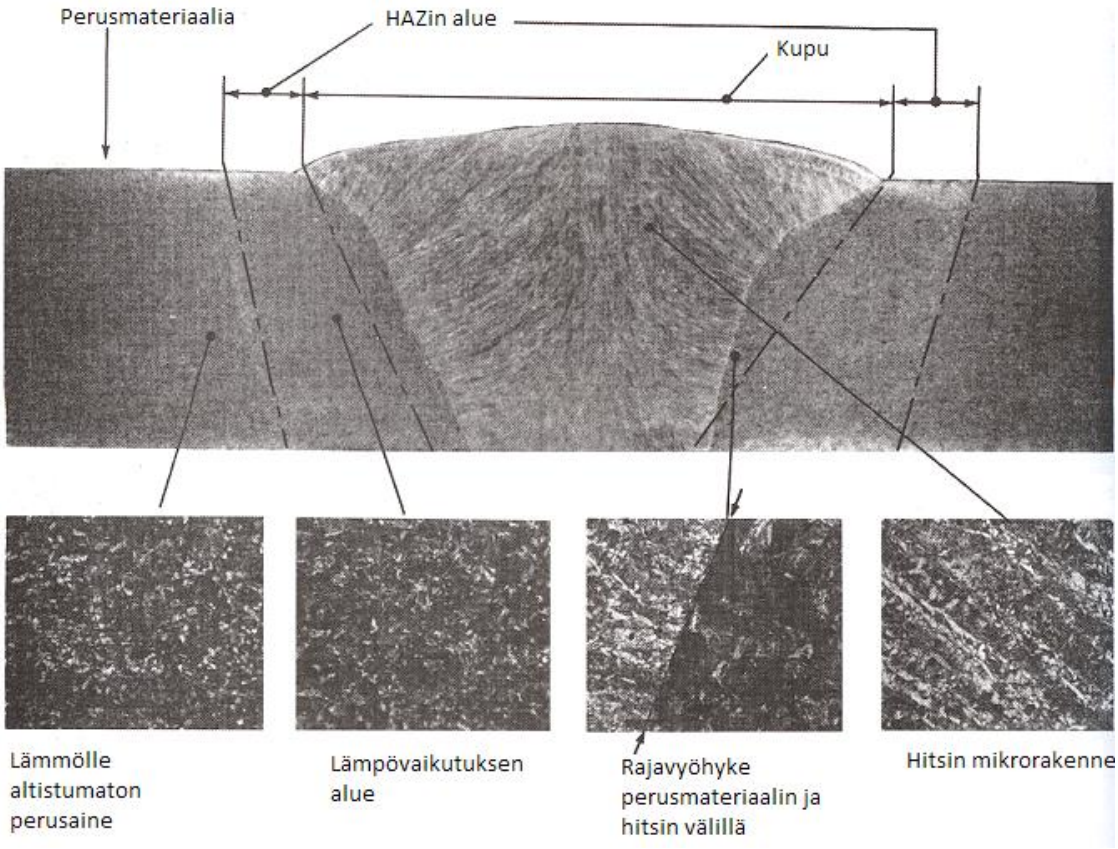
3.2 Hitsautumissyvyyden vaikutus kappaleen metallurgisiin ominaisuuksiin

Kuten aiemmin todettiin, jauhekaarihitsauksessa käytetään yleensä suhteellisen suuria hitsausvirtoja. Suuret hitsausvirrat taas nostavat hitsausenergiaa, kuten kaavasta 2 sivulla 15 nähdään.

Suuri hitsausenergia tuottaa hitsiin enemmän lämpöä, joka taas vaikuttaa lopputuotteen metallurgisiin ominaisuuksiin. Luonnollisesti lämmöntuonnin haittavaikutukset riippuvat suuresti myös teräksen seostuksessa käytetyistä alkuaineista. (Cary & Helzer, 2005, s.

390–392.) Yleisesti ottaen suuri lämmöntuonti aiheuttaa sisäisiä jännityksiä ja iskusitkeyden heikkenemistä erityisesti HAZ:in (heat-affected-zone) alueella, joka taas johtuu rakeenkasvusta. (Cary & Helzer, 2005, s. 395)

Kuten aikaisemmin todettiin, lämmöntuonti vaikuttaa suuresti kappaleen metallurgiaan. Tämä johtuu siitä, että metallin lämmetessä sen kiderakenne muuttuu. Osa kiteistä kasvaa, osa pienenee ja kaiken kaikkiaan metallin mikrorakenne muuttuu. Kuvassa 10 on esitetty hitsi eri vyöhykkeineen, lisäksi kuvassa nähdään erilaisia mikrorakenteita. (Cary & Helzer, 2005, s. 400–401.)



Kuva 10. Hitsauksen eri vyöhykkeet sekä eri vyöhykkeiden mikrorakenteita (mukaillen Cary & Helzer, 2005, s. 402).

Lämmöntuonnista, jäähtymisnopeudesta ja seostuksesta riippuen teräs karkenee, eli siihen syntyy martensiittinen mikrorakenne. Martensiitti on kovaa, sillä on alhaisempi iskusitkeys kuin esimerkiksi perliitillä, ja näin ollen se saattaa heikentää koko rakenteen lujuutta. (Cary & Helzer, 2005, s. 400–401.)

4 HITSAUSKOKEET JA TULOKSET

Hitsauskokeet suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsauslaboratoriossa. Kokeissa käytettiin laitteistona Pandaweld-merkkistä hitsausvirtalähdettä sekä traktoria. Kuvat virtalähteistä löytyvät kuvasta 11 ja traktori kuvasta 12. Kokeet suoritettiin kolmessa erässä siten, että ensimmäisellä kerralla käytettiin nopeuksia 50 cm/min, 65 cm/min ja 80 cm/min. Tuloksia analysoitiin, jonka jälkeen päätettiin suorittaa jatkotutkimuksia nopeuksilla 90 cm/min. Viimeiset testit tehtiin nopeuksilla 70 cm/min, 75 cm/min ja 85 cm/min. Muut parametrit olivat: virta 500 A, jännite 30 V ja vapaalanka 25 mm. Kokeissa käytettiin 3,2 mm paksua Hyundai A-3 lankaa ja Hyundai S800P hitsausjauhetta.

Kuva 11. Kuvassa molemmat laboratoriosta löytyvät jauhekaarihitsaukselle tarkoitetut Pandaweld-virtalähteet.

Kuva 12. Hitsauspää ja traktori.

Kaikki hitsit tehtiin päällehitsauksena valmiiksi leikattuihin levyihin, jolloin jokaisen hitsin lähtökohdat olivat samanlaiset ja jolloin päästiin myös eroon railomuodon mahdollisista vaikutuksista tuloksiin. Hitsauksen jälkeen leikattiin koepalat, joista saatiin vertailukelpoiset makrokuvat. Makrokuvista saatiin tarvittavat mitat käyttämällä apuna Autocad-piirustusohjelmaa.

Hitsausnopeus määritettiin siten, että hitsauspäällä ajettiin tietyn pituinen koeajo ja samalla otettiin sekuntikellon avulla aikaa. Tästä laskettiin hitsaustraktorin todellinen nopeus, sillä laitteen kalibrointi ei ollut täysin tarkka. Samoin laitteen jännite- ja virta-arvot varmistettiin siihen tarkoitetulla työkalulla.

4.1 Materiaali

Käytetty materiaali oli 10 mm paksua, kuumavalssattua F40SW laivanrakennukseen tarkoitettua terästä. Materiaali on valmistettu täyttämään venäläinen GOST R52927-2008-standardi. Materiaalin ainestodistus alkuainepitoisuuksineen löytyy liitteestä 1.

4.2 Laitteisto

Käytetty laitteisto oli Pandaweld-hitsauslaitteisto, johon kuuluu hitsausvirtalähde sekä hitsaustraktori. Kaksi ensimmäistä koekertaa suoritettiin laiteviasta johtuen Pandaweld 630 hitsausvirtalähteellä ja viimeinen Pandaweld 1250 virtalähteellä. Virtalähteet ovat

käytännössä identtiset, mutta 1250:sta saadaan tarvittaessa enemmän tehoa irti. Suoritettuihin kokeisiin riitti myös 630-virtalähteen tehot. Molemmat virtalähteet olivat tasavirtainvertteri-virtalähteitä, jotka on suunniteltu jauhekaarihitsaukseen. Virtalähteiden ominaisuuksiin kuuluvat valinta vakiovirran (CC) ja vakiojännitteen (CV) välillä sekä reaaliaikainen jännite- ja virta-arvojen seuranta. 1250-virtalähde oli säädettävissä välillä 125–1250 A ja 630-virtalähteen säätöväli oli 50–630 A. Molempien laitteiden maksimijännite oli 44 V.

Traktorina käytettiin hitsausnopeudeltaan säädettävää Pandaweld-hitsaustraktoria. Traktorin nopeus oli säädettävissä välillä 0,2–2,2 m/min. Langansyöttönopeus oli säädettävissä välillä 0,3–6 m/min. Traktoriin kuului lisäksi hitsausjauheensyöttöjärjestelmä, langansyöttöjärjestelmä, hitsausarvojen säätöpaneeli sekä tarvittavat säätölaitteet. Hitsaustraktori kulki kiskojen päällä. Kappaleen kiinnitykseen käytettiin puristuskiinnittimiä.

4.3 Tulokset vakiovirralla hitsattaessa

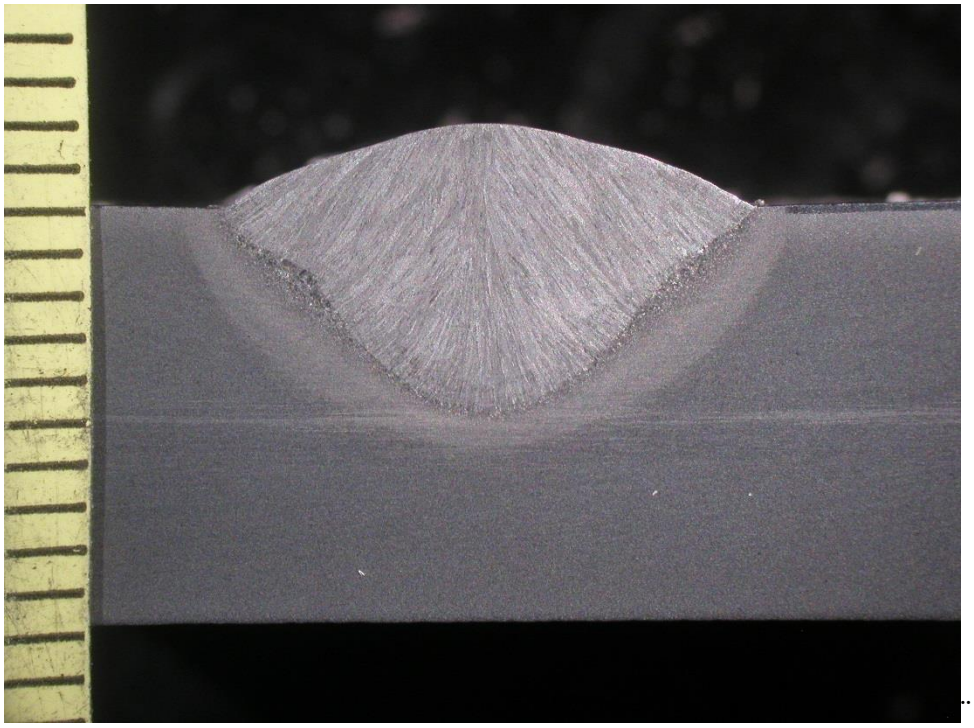
Käytetyt hitsausarvot ja saadut tulokset on esitetty numeroarvoina taulukossa 1. Kappaleista otetut makrokuvat löytyvät liitteestä 2, jossa kappaleet on esitetty kahdessa rivissä hitsausnopeuden mukaan hitaimmasta nopeimpaan. Sekoittumisasteella tarkoitetaan sulaneen perusaineen osuutta koko hitsistä. Taulukon 1 sekoittumisasteet on laskettu siten, että Autocad-ohjelman avulla on ensin laskettu hitsistä tarvittavat pinta-alat, jonka jälkeen on laskettu sekoittumisaste.

Taulukko 1. Käytetyt hitsausarvot sekä saadut tulokset.

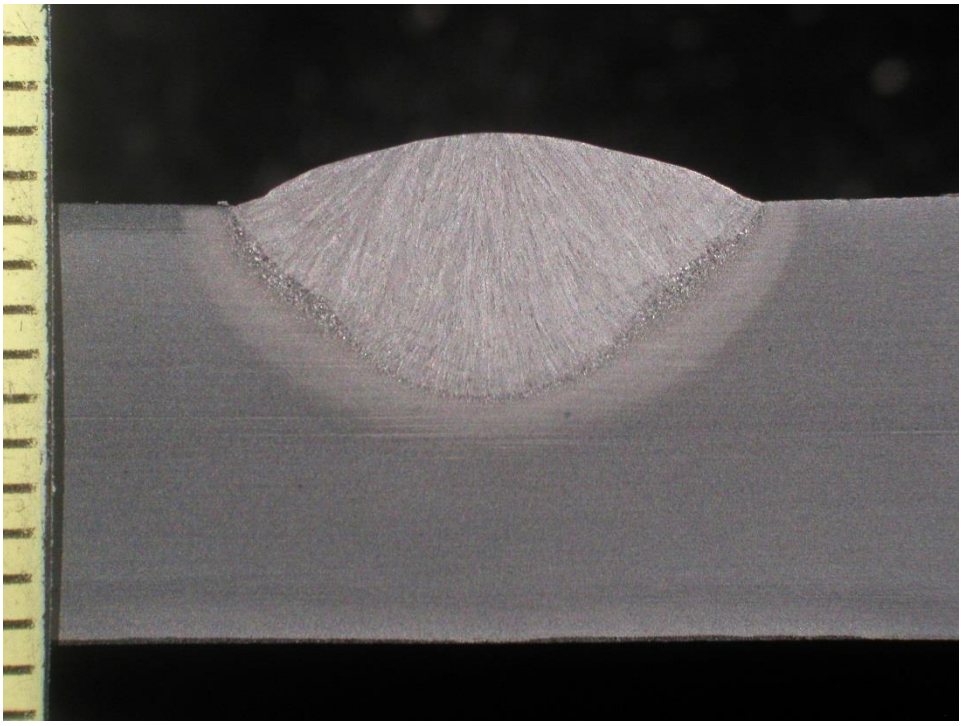
	Virta [A]	Jännite [V]	Hitsaus-nopeus [cm/min]	Hitsautumis-syvyys [mm]	Palon leveys [mm]	Hitsipalon korkeus [mm]	Leveys/ syvyys	Sekoittu-misaste [%]
CC 1	500	30	50	5,0868	18,3601	2,2706	3,61	65
CC 2	500	30	65	4,6253	15,5486	2,4874	3,36	64
CC 5	500	30	70	5,2541	16,0963	1,9340	3,06	70
CC 6	500	30	75	4,2353	14,3947	2,0537	3,40	67
CC 3	500	30	80	5,0986	13,4714	2,1571	2,64	68
CC 7	500	30	85	4,6051	12,7370	1,8047	2,77	72
CC 4	500	30	90	4,1867	12,8768	2,0638	3,08	65

Vakiovirralla hitsattaessa tuloksissa ei ollut hitsautumissyvyyden suhteen suurta vaihtelua, vaan tulokset pysyttelivät noin 1 millimetrin haarukassa. Hitsauspalon leveys sen sijaan pieneni mitä suurempi hitsausnopeus oli, aivan kuten teoriaosuuden mukaan tulisikin tapahtua. Hitsipalon, tai kuvun, korkeudessa ei tosin huomattavaa pienenemistä tapahdu nopeuden kasvaessa, vaikka sellaista kirjallisuuden mukaan tulisi ilmetä.

Jokaisen koehitsin leveys/syvyyssuhde on huomattavasti yli optimiarvon, mutta kun otetaan huomioon sekoittumisaste, saavutettiin parhaat hitsit nopeudella 80 cm/min ja 85 cm/min. Kuvasta 13 nähdään, että CC3-hitsin sulaprofiili on suhteellisen hyvä, joskin kupu on hieman korkeahko. Hitsi on myös hieman levinnyt. Kuvassa 14 nähtävä CC7-hitsin tunkeuma on hieman pienempi, mutta sulaprofiili on hyvä. Myös sekoittumisaste on hyvä, kupu on suhteellisen pieni ja hitsi on tunkeutunut syvälle perusmateriaaliin.



Kuva 13. Hitsausnopeudella 80 cm/min vakiovirralla hitsatun hitsin makrokuva.



Kuva 14. Hitsausnopeudella 85 cm/min vakiovirralla hitsatun hitsin makrokuva.

4.4 Tulokset vakiojännitteellä hitsattaessa

Käytetyt hitsausarvot ja vakiojännitteellä hitsattujen kappaleiden tulokset on esitetty numeroarvoina taulukossa 2. Kappaleiden makrokuvat löytyvät liitteestä 3, jossa ne on esitetty kahdessa rivissä hitaimmasta nopeimpaan hitsausnopeuden mukaan. Sekoittumisaste on laskettu kappaleessa 4.3 esitetyllä tavalla.

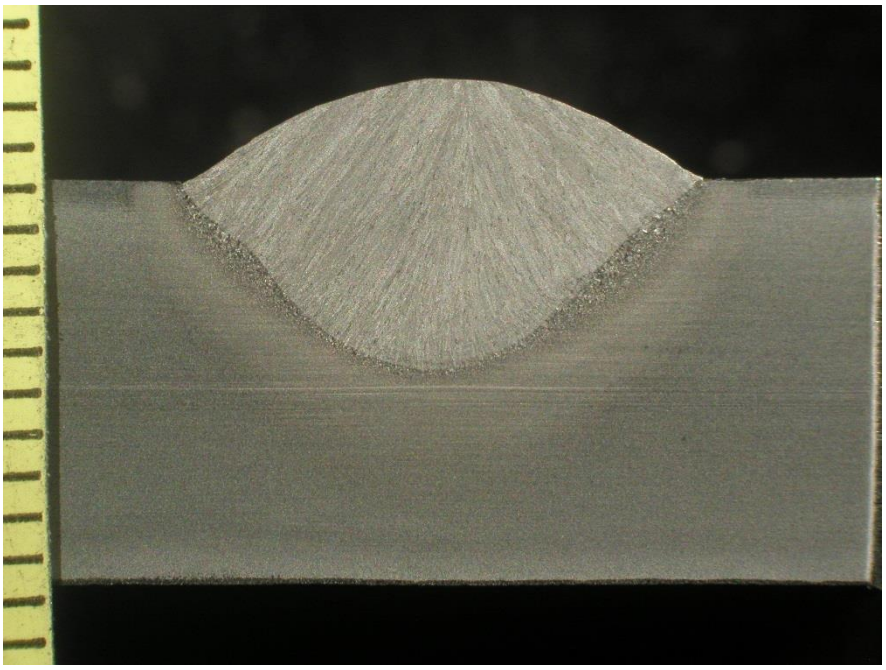
Taulukko 2. Vakiojännitteen hitsausarvot ja tulokset

	Virta [A]	Jännite [V]	Hitsaus-nopeus [cm/min]	Hitsautumis-syvyys [mm]	Palon leveys [mm]	Hitsipalon korkeus [mm]	Leveys/ Syvyys	Sekoittu-misaste [%]
CV 1	500	30	50	3,6722	16,7974	2,2036	4,57	59
CV 2	500	30	65	4,2374	14,5788	2,2478	3,44	63
CV 5	500	30	70	4,9043	13,6652	2,7557	2,79	64
CV 6	500	30	75	4,4954	13,5054	2,2171	3,00	67
CV 3	500	30	80	4,639	12,5507	1,9771	2,71	69
CV 7	500	30	85	4,1144	12,2020	2,1269	2,97	67
CV 4	500	30	90	3,9331	12,1526	1,9056	3,09	66

Vakiojännitteellä hitsatuissa kappaleissa on nähtävissä hitsautumissyvyyden suurin arvo. Hitsausnopeuden ollessa 70 cm/min, on tunkeuma suurimmillaan. Hitaammin ja nopeammin hitsattaessa tunkeuma on pienempi, aivan kuten teoriaosuudessa käsiteltiin. Palon korkeudessa on myös nähtävissä ainakin jollain tasolla teoriaosuuden mukaista laskua.

Kuvassa 15 nähdään CV5-hitsin mikrokuva. Kuvasta 15 ja taulukosta 2 nähdään, että vaikka hitsillä on koepaloista syvin tunkeuma, on hitsin kupu erittäin korkea, joten profiili ei ole optimaalinen. Liitteen 3 kuvia vertailemalla huomataan että CV3-hitsin profiili

näyttää optimaaliselta. CV3:n tunkeuma on vain hieman pienempi kuin CV5:n, mutta profiili on huomattavasti parempi. CV3:llä on myös vakiojännitteellä hitsatuista koepaloista korkein sekoittumisaste.

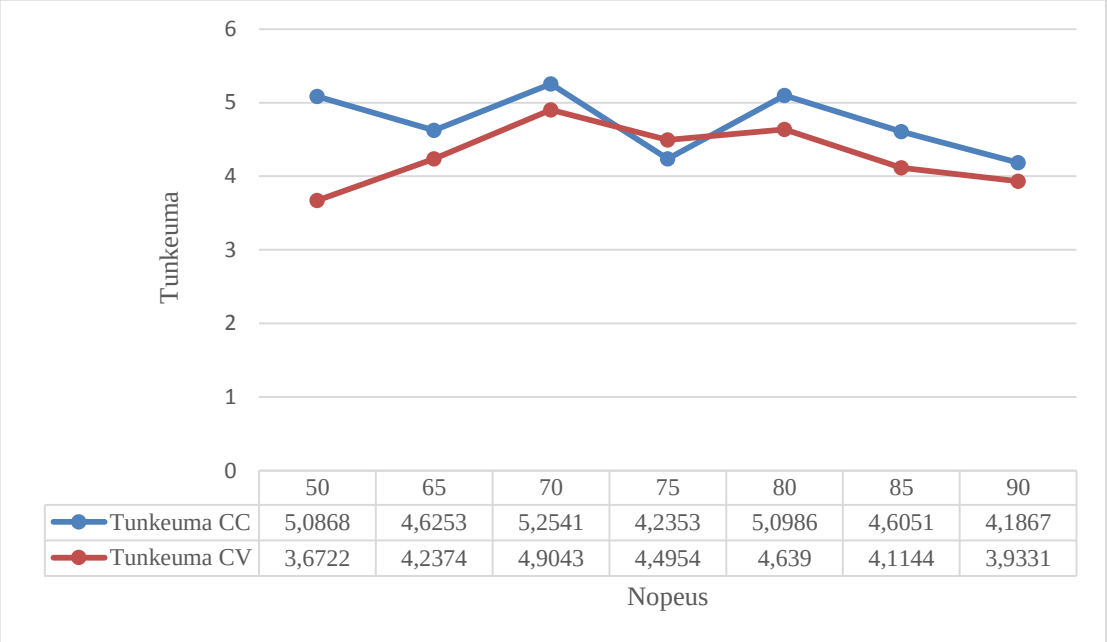


Kuva 15. Hitsausnopeudella 70 cm/min vakiojännitteellä hitsattu koehitsi

4.5 Tulosten vertailu

Kuvassa 16 on esitetty graafisesti hitsauskokeiden tulokset siten, että CC:n hitsautumissyvyys on sinisellä värillä, ja CV:n punaisella. Kuten graafista nähdään, on CC:n hitsautumissyvyys melkein kaikilla nopeuksilla parempi. CC:n tunkeuman keskiarvo on 4,73 mm, CV:n 4,29. CC:n tunkeuma oli siis keskimäärin 9 % suurempi.

Sekoittumisasteet ovat jokaisella hitsillä suhteellisen pienet. Tyypillisesti jauhekaarihitsauksen sekoittumisaste on suuri, esimerkiksi päittäisliitoksessa noin 80 %. (Lukkari, 1997, s. 123.)



Kuva 16. Vertailugraafi tunkeuman suhteen.

Tulosten perusteella voidaan sanoa, että syvää hitsautumissyvyyttä haettaessa on kannattavampaa suosia vakiovirtaohjattua säätöä. Kuitenkin hitsiprofiilia ja hitsautumissyvyyksiä vertaillessa huomataan, että mikäli käytetään molempien ohjaustapojen optiminopeuksia, on molempien hitsautumissyvyys miltei sama. Vakiovirtaa käytettäessä sekoittumisaste on kuitenkin hieman suurempi, joten tässäkin tapauksessa vakiovirran käyttö on suositeltavaa. Mikäli kuitenkin halutaan kapeampi hitsi, voidaan käyttää vakiojänniteohjattua säätöä.

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Vertailtaessa CC:n ja CV:n makrokuvia, sekä taulukon 1 ja 2 lukuja, on selvää, että CC:llä hitsatuissa kappaleissa päästään pääsääntöisesti syvempään tunkeumaan. Mikäli kuitenkin tuotteen valmistuksessa tarvitaan kapeampaa hitsiä, on CV:n käyttö hyvä vaihtoehto. Hitsautumissyvyys oli CC:n kohdalla parhaimmillaan nopeudella 70 cm/min, mutta kun otetaan sekoittumisaste huomioon, on suositeltavin nopeus 85 cm/min. CV:n optiminopeus profiilin ja tunkeuman valossa oli 80 cm/min.

Makrokuvista, sekä taulukoista 1 ja 2 nähdään, että vakiojännitteellä hitsattujen hitsien pintapalko on useassa tapauksessa suuri verrattuna vakiovirran vastaaviin. Kuvassa 3 sivulla 11 esitettiin oikeanlainen hitsin palkomuoto, josta nähdään, että pintapalon tulisi olla selvästi matalampi kuin mitä hitsautumissyvyys on. Voidaan siis todeta, että vakiojännitteellä hitsattaessa huonon palkomuodon mahdollisuus on suurempi kuin vakiovirralla hitsattaessa.

Teoriaosuudessa esitettiin, että jauhekaarihitsaus on tehokkuutensa vuoksi suosittua erityisesti raskaassa ja keskiraskaassa teollisuudessa. Näin ollen jauhekaaren avulla hitsaavassa yrityksessä halutaan todennäköisesti mahdollisimman suuri hitsiaineentuotto, jolloin vakiovirtalähteen käyttö on järkevämpää. Vakiovirtalähteen avulla voidaan käyttää suurempaa hitsausnopeutta, jolla saadaan myös suurempi hitsautumissyvyys, jolloin myös valmiita tuotteita pystytään valmistamaan nopeammalla tahdilla.

Aikaisemmin ”Parametrit”-kappaleessa käytiin läpi hitsauksen lopputulokseen vaikuttavia tekijöitä. Näistä parametreista voi valita käytännössä minkä tahansa muuttujaksi, ja suorittaa jatkotutkimuksia. Selkeimpiä jatkotutkimuksen arvoisia kohteita olisi langanpaksuuden ja lankatyypin vaikutus hitsautumissyvyyteen. Lisäksi suutinetäisyyden vaikutus voisi olla sopiva jatkotutkimuksen aihe.

LÄHTEET

Cary, H. & Helzer, S. 2005. Modern Welding Technology, 6. painos. Upper Saddle River NJ: Pearson/Prentice Hall. 715 s.

Constant current vs. constant voltage output. 2015. [Lincoln Electricin www-sivuilla]. [Viitattu 1.3.2015]. Saatavissa: http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/constant-current-vs-constant-coltage-output.aspx

Dixon, L., Liby, A. & Olson, D. 1990. Welding: theory and practice. Amsterdam: Elsevier science publisher B.V. 389 s.

Lepola, P. & Makkonen M. 2005. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. Helsinki: WSOY. 429 s.

Lucas, W. & Westgate, S. 2003, Welding and Soldering In: Electrical engineer's reference book. Laughton, M. A. & D. F. Warne. 16th. edition. Newnes. 2003.

Lukkari, J. 1986. Jauhekaarihitsaus. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus. 154 s.

Lukkari, J. 1997. Hitsaustekniikka: Perusteet ja kaarihitsaus 3. Painos. Helsinki: Opetushallitus. 292 s.

O'Brien, R. 1997. Jefferson's welding encyclopedia. 18. painos. American Welding Society. 758 s.

SFS 3052. 1995. Hitsaussanasto. Yleistermit. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry. 122s. Vahvistettu 25.9.1995

Robotic welding automation. 2015. [Robotic welding automationin www-sivuilla]. [Viitattu 1.3.2015]. Saatavissa: http://www.roboticweldingautomation.com/images/submerged-arc-welding-machines.png)

Welding handbook: Submerged arc welding. 2015. [www- tuotedokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon): ESAB, 2015. [Viitattu 1.3.2015]. Saatavissa http://www.esab.com/de/de/support/upload/XA00136020-Submerged-Arc-welding-handbook.pdf

СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА / QUALITY CERTIFICATE NO. 1 DT. 31.10.2013

Изготовитель/ Manufacturer:
ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Россия
FSUE CRISM "Prometey", RUSSIA

Получатель/ Consignee:
Технологический университет г. Лаппеенранта, Финляндия
LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY,
FINLAND

ДОГОВОР О ПАРТНЕРСТВЕ ОТ 01.02.2012 «Развитие материалов и технологий для Арктики». Изменение № 4 от 12.09.2013 / PARTNERSHIP AGREEMENT DATED 01/02/2012 "Arctic Materials Technologies Development". Amendment № 4 dt. 12.09.2013.

Наименование продукции (изделий): Образец
Product (goods) description: Specimen

Марка стали F40SW , стандарт поставки: ГОСТ Р52927-2008
Steel grade F40SW, standard: GOST R52927-2008

Способ изготовления: горячекатаный листовой прокат
Production method: hot-rolled steel plates

№ п/п Ord. No	Габариты, мм Dimensions, mm	Номер плавки Heat number	Маркировка Marking	Кол-во, шт Quantity, pcs	Масса, кг Weight, kg
1	10 x 150 x 350	ЭЛ37264	1-1	1	4,15
2	10 x 150 x 350	ЭЛ37264	1-2	1	4,15
3	10 x 150 x 350	ЭЛ37264	1-3	1	4,15
4	10 x 150 x 350	ЭЛ37264	1-4	1	4,15
5	10 x 150 x 350	ЭЛ37264	1-5	1	4,15
6	10 x 150 x 350	ЭЛ37264	1-6	1	4,15
7	10 x 150 x 350	ЭЛ37264	1-7	1	4,15
8	10 x 150 x 350	ЭЛ37264	1-8	1	4,15
9	10 x 150 x 350	ЭЛ37264	1-9	1	4,15
10	10 x 150 x 350	ЭЛ37264	1-10	1	4,15
11	10 x 150 x 350	ЭЛ37264	1-11	1	4,15
12	10 x 150 x 350	ЭЛ37264	1-12	1	4,15
13	10 x 150 x 350	ЭЛ37264	1-13	1	4,15
14	10 x 150 x 350	ЭЛ37264	1-14	1	4,15

Signature/Подпись:

Показатели качества товара /Quality characteristics of goods
Химический состав плавки, % / Composition of heat,%

Номер плавки Heat number	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Cu	Cr	Ni	Mo	N	As	Sn	Pb	Ca	Pcm
ЭЛ37264	0,09	0,23	1,20	0,009	0,002	0,04	0,035	0,02	0,22	0,06	0,74	0,007	0,001	0,005	0,013	0,003	0,03	0,18

Механические свойства / Mechanical properties

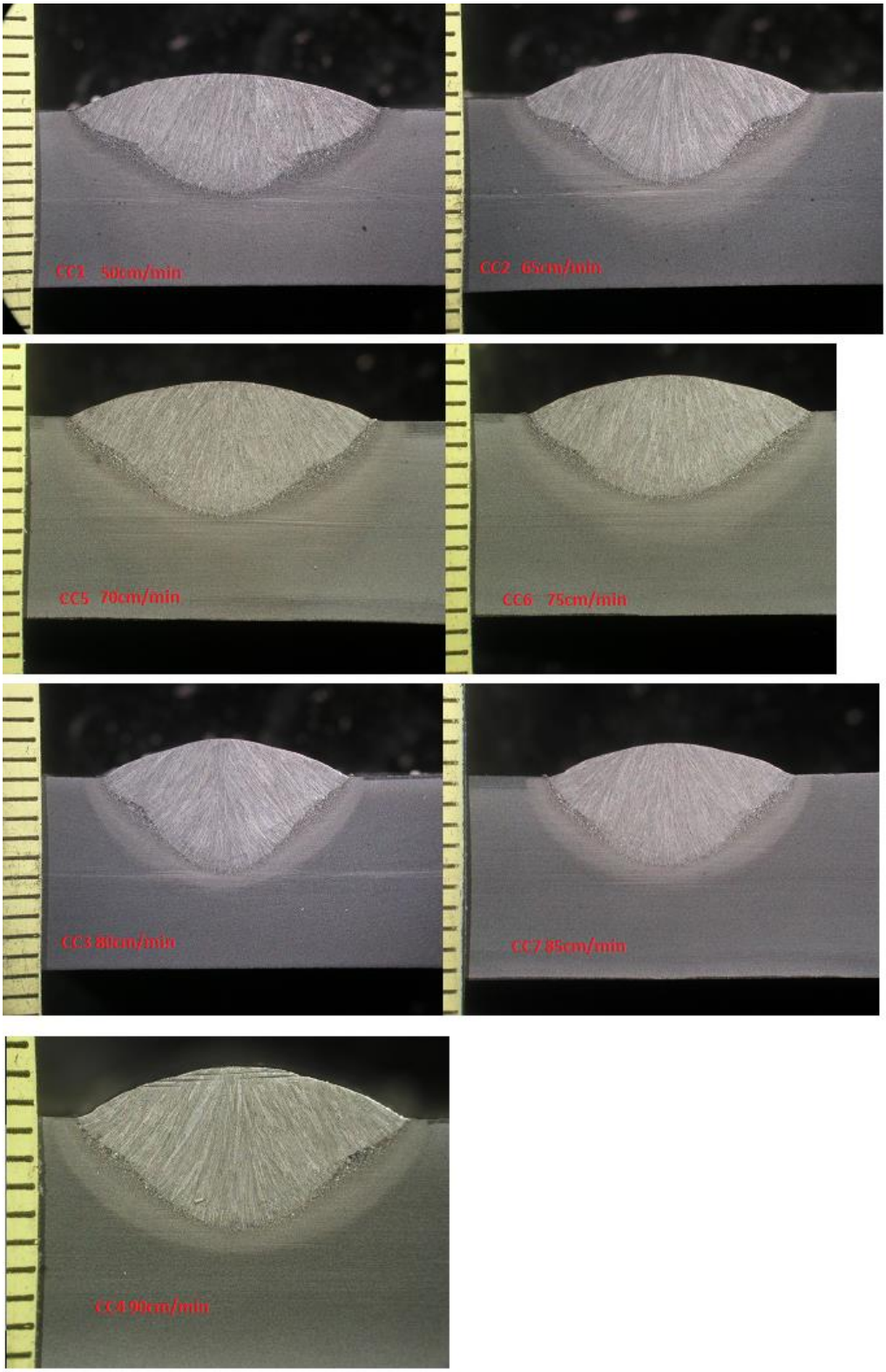
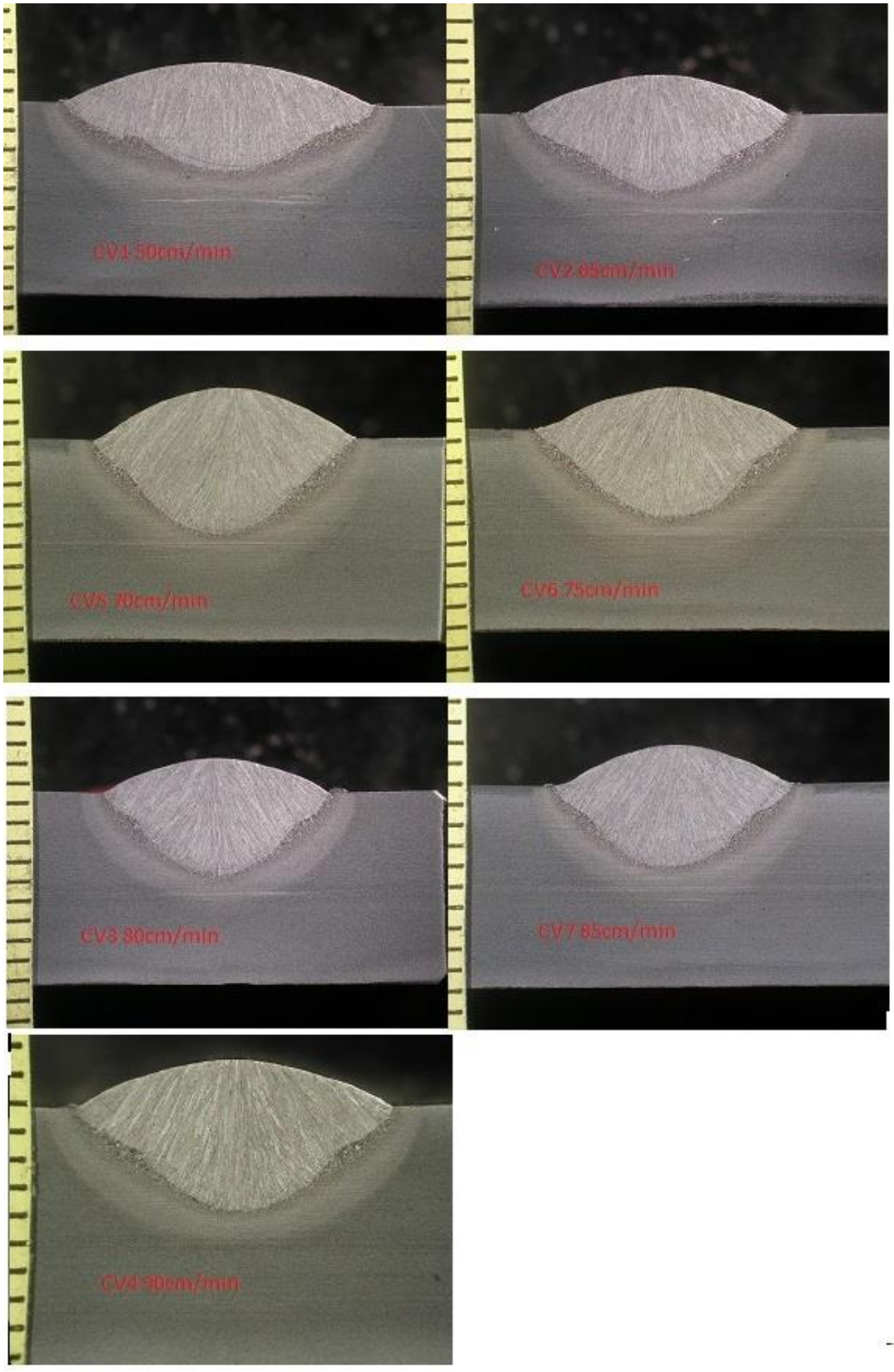
Предел текучести, МПа Yield strength, R $p_{0.2}$ MPa	Временное сопротивление, МПа Tensile strength, R m, MPa	Относительное удлинение, % Relative elongation, A_5, %	Волокнистая составляющая в изломе, % Fibre, %	Работа удара при T = -60°C, KV, Дж Impact value KV at T = -60°C, J
450/460	540/530	31/26	100/100	254/280/254 266/275/286

Signature/Подпись:

Liite I, 2

Liite II

Vakiovirralla hitsattujen hitsien makrokuvat



Vakiojännitteellä hitsattujen hitsien makrokuvat