

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

JAUHEKAARIHITSAUKSEN TUNKEUMASYVYYDEN VERTAILU
VAKIOVIRRALLA JA VAKIOJÄNNITTEELLÄ HITSATTAESSA
PENETRATION DEPTH COMPARISON OF SUBMERGED ARC WELDING BY
USING CONSTANT-CURRENT AND CONSTANT-VOLTAGE

Lappeenrannassa 18.8.2014

Aleksi Toiviainen

Jaakko Joensuu

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	6
1.1	Tavoite ja raja	7
2	JAUHEKAARIHITSAUS	8
2.1	Prosessikuvaus	8
2.1.1	Hitsaustapahtuma.....	11
2.2	Prosessisovellukset	12
2.2.1	Hitsaus pitkällä vapaalangalla	13
2.2.2	Kaksoislankahitsaus.....	14
2.2.3	Tandem-hitsaus	14
2.2.4	Hitsaus metallijauheliällä	15
2.2.5	Kuumalanka- ja kylmälankahitsaus	15
2.2.6	Täytelankahitsaus.....	16
2.2.7	Nauhahitsaus	16
2.2.8	Kapearailohitsaus.....	16
2.2.9	Robotisoitu jauhekaarihitsaus	16
2.3	Hitsauslaitteisto.....	17
2.4	Hitsauksen virta- ja jänniteohjattu säätö	19
2.5	Hitsaus vakiovirralla ja vakiojännitteellä	20
3	TUNKEUMA	22
3.1	Palkomuodot jauhekaarihitsauksessa.....	24
3.2	Tunkeumaan vaikuttavat hitsausparametrit jauhekaarihitsauksessa	25
3.2.1	Hitsausvirta	26
3.2.2	Kaarijännite.....	26

3.2.3	Hitsausnopeus	27
3.2.4	Muut parametrit	28
4	HITSAUSKOKEET	30
4.1	Materiaali	31
4.2	Käytetty hitsauslaitteisto	31
4.3	Koejärjestelyt	32
4.4	Hitsauskoe vakiovirralla (CC)	33
4.4.1	Tulokset	34
4.5	Hitsauskoe vakiojännitteellä (CV)	37
4.5.1	Tulokset	37
5	TULOSTEN VERTAILU JA NIIDEN ANALYSOINTI	41
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO	46
6.1	Jatkotutkimuskohteet	47
	LÄHTEET	48
	LIITTEET	

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

A	Virran yksikkö, ampeeri
AC	Vaihtovirta (Alternating Current)
A/mm ²	Virtatiheys, ampeeria neliömillimetriä kohden
C	Alkuaineen tunnus, hiili
CC	Vakiovirta (Constant-Current)
CC1	Vakiovirralla hitsattu ensimmäinen koehitsi
CC2	Vakiovirralla hitsattu toinen koehitsi
CC3	Vakiovirralla hitsattu kolmas koehitsi
cm	Pituuden yksikkö, 10 ⁻² metriä
CV	Vakiojännite (Constant-Voltage)
CV1	Vakiojännitteellä hitsattu ensimmäinen koehitsi
CV2	Vakiojännitteellä hitsattu toinen koehitsi
CV3	Vakiojännitteellä hitsattu kolmas koehitsi
DC ⁺	Positiivinen tasavirta (Direct Current +)
DC ⁻	Negatiivinen tasavirta (Direct Current -)
EN	Eurooppalainen standardisoimisjärjestö
kJ	Työn ja energian yksikkö, 10 ³ joulea
MAG	Metallikaasuhitsaus aktiivisella suojakaasulla (Metal-arc Active Gas welding)
MIG	Metallikaasuhitsaus inertillä suojakaasulla (Metal-arc Inert Gas welding)
min	Ajan yksikkö, minuutti
mm	Pituuden yksikkö, 10 ⁻³ metriä
Mn	Alkuaineen tunnus, mangaani

MPa	Paineen yksikkö, 10^6 Pascalia
Nb	Alkuaineen tunnus, niobium
P	Alkuaineen tunnus, fosfori
S	Alkuaineen tunnus, rikki
SAW	Jauhekaarihitsaus (Submerged Arc Welding)
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
Si	Alkuaineen tunnus, pii
S355	Yleinen rakenneteräs, jonka myötölujuus on 355MPa
V	Jännitteen yksikkö, voltti
w/d	Leveys/syvyys -suhde (Wide/Depth -ratio)
γ	Pintajännitysvakio
T	Lämpötila

1 JOHDANTO

Jauhekaarihitsaus on yksi vanhimmista kaarihitsausmenetelmistä, jonka käyttö alkoi 1930-luvulla. Menetelmänä jauhekaarihitsausta on tutkittu vähän tietyiltä osin sen laajaan käyttömäärään nähden. Tutkimusten painopiste on rajoittunut hitsausprosessilla syntyneen palon mekaanisiin ominaisuuksiin, eikä varsinaisesti sen tunkeumaan ja tunkeumaprofiiliin. Laitteistoa voidaan käyttää joko vakiovirralla tai vakiojännitteellä, joilla tuotettujen hitsien tunkeuman eroista ei ole tarkkaa tietoa.

Jauhekaarihitsaus on kaarihitsausprosessi, jossa valokaari palaa lisäainelangan ja työkappaleen välillä. Siinä hitsausaineina käytetään lisäainelankaa ja metallijauhetta. Metallijauhe suojaa valokaarta prosessin aikana, mikä ehkäisee ilman suoran kosketuksen hitsisulan kanssa. Jauhe synnyttää hitsausprosessin aikana kuonakerroksen hitsin päälle, mikä kerää hitsausprosessissa syntyneet palokaasut ja epäpuhtaudet. Kuonakerros poistetaan mekaanisesti tapahtuman jälkeen jäähtyneen hitsin päältä. Prosessista on kehitetty monia sovelluksia, joita käytetään raskaassa ja keskiraskaassa konepajateollisuudessa, sekä laivanrakennuksessa.

Jauhekaarihitsausta käytetään paljon hitsaavassa teollisuudessa sen tehokkuuden vuoksi. Prosessia on tutkittu sen synnyttämän hitsin mekaanisten ominaisuuksien puolesta, mutta tunkeuman tarkastelu on jäänyt vähäiseksi. Prosessilla voidaan hitsata vakiojännitteellä ja -virralla, joista vakiojännitehitsaus on menetelmänä vanhempi kuin vakiovirtahitsaus. Vakiovirtahitsausta pyritään nykyään kehittämään, koska sen tunkeuman uskotaan olevan syvempi erityisesti paksuilla langoilla hitsattaessa. Vakiojännitehitsaus on vakiovirtahitsausta käytetympi prosessi, mutta niiden tunkeumien syvyyksistä ei ole tarkkaa tutkittua tietoa. Kirjallisuus väittää kuitenkin vakiovirtahitsauksen olevan parempi paksuilla langoilla kuin vakiojännitehitsaus, minkä vuoksi tässä kandidaatintyössä tutkitaan molempien hitsausprosessien tunkeumia käyttäen identtisiä hitsausparametreja. (Miller, 2014.)

1.1 Tavoite ja rajaus

Kandidaatintyö tehdään Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsaustekniikan laboratorioon, johon on hankittu uusi Pandaweld-merkkinen jauhekaarihitsauslaitteisto. Laitteiston toimittajan pääkonttori sijaitsee Ruotsissa (AB Bayrock, www.bayrock.se) ja itse laitteisto valmistetaan Kiinassa. Laitteiston virta- ja jänniteohjatun säädön ominaisuuksista ei ole tarkkaa tietoa ja niiden käytännön merkitystä tunkeumaan ei tiedetä. Työn tarkoituksena on toimia apuna laboratoriohenkilökunnalle ja pohjana muille tutkimuksille, joita suoritetaan LUT:n hitsaustekniikan laboratoriossa.

Tämän työn tavoitteena on tutkia jauhekaarihitsauksessa käytettyjen vakiojännite- ja vakiovirtasäätöjen vaikutusta tunkeumaprofiiliin ja erityisesti tunkeumaan, sekä tekijöihin, joilla voidaan hallita tunkeumaa. Työ rajoittuu vakiovirralla ja vakiojännitteellä hitsattujen hitsien tunkeuman tarkasteluun ja niiden vertailuun. Vertailussa käytetään apuna tunkeuman määrittäviä parametreja, joiden avulla voidaan todeta tunkeuman hallintaan vaikuttavat parametrit.

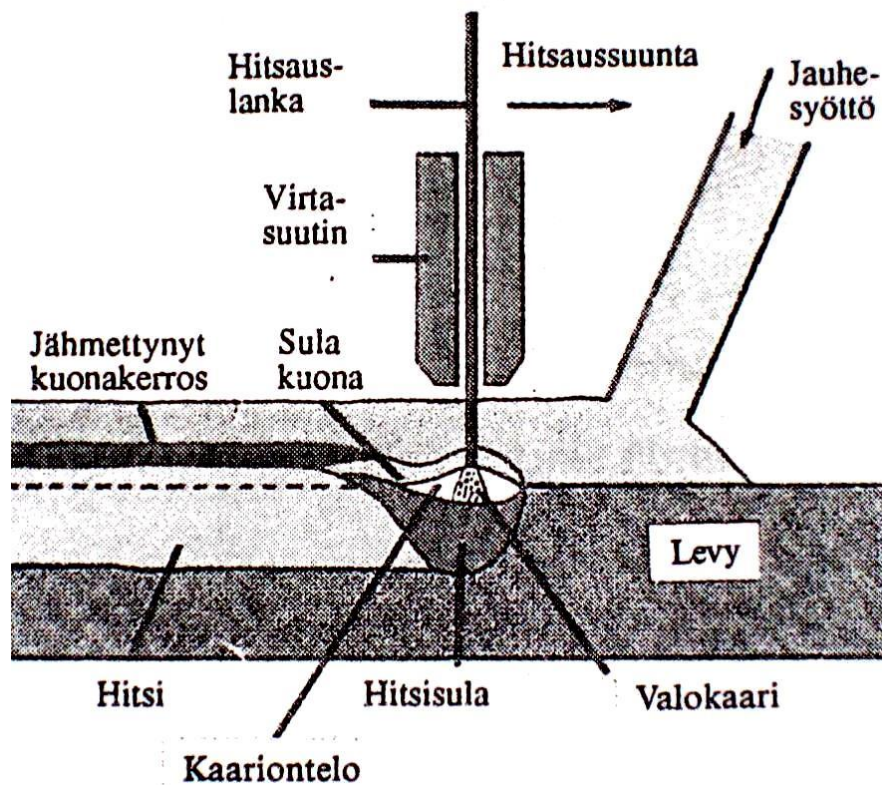
Aluksi työssä tarkastellaan yleisesti jauhekaarihitsausprosessia, sekä sen teoriaa laitteistoineen ja sovelluskohteineen. Lisäksi syvennytään tunkeuman teoriaan ja analysointiin pohjautuviin tekijöihin, sekä tunkeumaan vaikuttaviin voimiin ja hitsausparametreihin. Kokeellisessa osuudessa vertaillaan ja analysoidaan vakiojännitteellä ja vakiovirralla tehtyjä koehitsauksia. Vertailussa ja analysoinnissa syvennytään tarkemmin vakiojännite- ja vakiovirtahitsien tunkeumien ja tunkeumaprofiilien eroavaisuuksiin. Työn johtopäätöksissä pohditaan eroavaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä.

2 JAUHEKAARIHITSAUS

Jauhekaarihitsaus on yksi vanhimmista hitsausprosesseista, joka on historian aikana kokenut voimakasta kehitystä itse menetelmän suhteen, sekä laitteiden ja hitsausaineiden osalta aina 1930-luvulta lähtien (Esab, 2005). Jauhekaarihitsaus on tehokas prosessi, jota käytetään runsaassa määrin keskiraskaan ja raskaan hitsaavan teollisuuden parissa, kuten esimerkiksi telakoilla, kattila-, säiliö- ja paineastiavalmistuksessa, sekä rakenneteollisuudessa. Suosituksi jauhekaarihitsauksen tekee sen suuri hitsiaineentuotto, hitsin hyvä laatu, työympäristöystävällisyys ja suuren tunkeuman mahdollistaminen. Lisäksi sitä ei pidetä virhealttiina hitsausprosessina ja se on lähes aina mekanisoitua, mikä edesauttaa hitsaustuotantoa. (Lukkari, 2002, s. 126–129.)

2.1 Prosessikuvaus

Jauhekaarihitsaus on metallikaarihitsausprosessi, joka tunnetaan lyhenteellä SAW (Submerged arc welding). Jauhekaarihitsauksessa luodaan hitsaustapahtuma, jossa valokaari palaa lisäainelangan ja työkappaleen välillä hitsausjauheen alla. Hitsaustapahtuma suojataan ympäröivältä ilmalta hitsausjauheella, joka syötetään hitsattavan kappaleen pintaan. Osa jauheesta muodostaa ensin sulan kuonakerroksen, joka hitsauksen edetessä jähmettyy kiinteäksi kuonaksi. Osa jauheesta jää irtonaiseksi hitsin päälle ja voidaan kerätä talteen, sekä käyttää uudelleen. Valokaari palaa sulan hitsausjauheen ja työkappaleen välille muodostuvassa kaariontelossa, joka on hitsauskaasujen ja metallihöyryjen täyttämä. Kaariontelon seinämät muodostuvat edessä sulasta perusaineesta, takana hitsisulasta ja yläpuolella kuonakerroksesta. Jauhekaarihitsauksen hitsaustapahtuma on esitetty kuvassa 1. (Lukkari, 2002, s. 121; The Lincoln Electric Company, 1973, 5.2-1.)



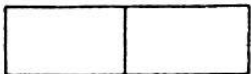
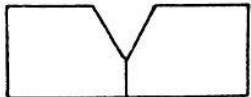
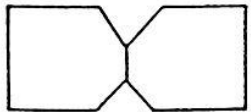
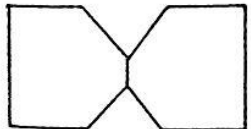
Kuva 1. Hitsaustapahtuma jauhekaarhitsauksessa. (Lukkari, 2002, s. 121).

Hitsausprosessina jauhekaarhitsaus on lähes aina mekanisoitua tai automatisoitua. Hitsausliike suoritetaan koneellisesti joko hitsauslaitteistoa kuljettamalla tai pitämällä hitsauslaitteisto paikallaan ja liikuttamalla hitsattavaa kappaletta esimerkiksi pyörityspöydän, vastapöytäparin tai pyöritysrullaston avulla, kuten säiliöhitsauksessa. Hitsauslaitteistoa voidaan kuljettaa esimerkiksi erilaisten hitsauskuljettimien, liikkuvan puomin tai robotin avulla. Lisäainelanka syötetään mekanisoidusti langansyöttölaitteella kosketussuuttimen läpi valokaareen ja lisäksi kosketussuuttimessa lankaan johdetaan hitsausvirta. Hitsausjauhe voidaan syöttää joko ohjaamattomasti erillisestä suppilosta painovoimaa hyödyntäen tai paineilman avulla, joka vähentää robotisoidun hitsauksen rajoituksia. (Lukkari, 2002, s. 122; The Lincoln Electric Company, 1973, 5.2-1.)

Hitsausprosessi tapahtuu yleensä tasavirtaa käyttäen, minkä virta-arvot vaihtelevat langanhalkaisijan ja hitsauskohteen mukaan 300–1200 A:n välillä. Vaihtovirran käyttö rajoittuu pääasiassa monilankaprosesseihin. Jauhekaarhitsaus mahdollistaa suurien hitsausvirtojen ansiosta suuren tunkeuman, mikä kasvaa lähes suoraviivaisesti hitsausvirran kanssa, mistä syystä jauhekaarhitsauksen käyttötarkoitus onkin pääosin

paksujen materiaalien hitsauksessa. Esimerkiksi kaksipalkohitsauksena voidaan hitsata I-railossa 20 mm asti, Y-railossa 25 mm asti ja X-railossa jopa 40 mm asti siten, että hitsataan yksi palko molemmille puolille. Yhdeltä puolelta hitsaamiseen jauhekaarihitsaus vaatii erillisen juurituen tai railon pohjan käsittelemisen jollain muulla prosessilla. Monipalkohitsauksessa hitsattavan kappaleen ainepaksuudelle ei käytännössä ole ylärajaa. (Lukkari, 2002, s. 123–125.)

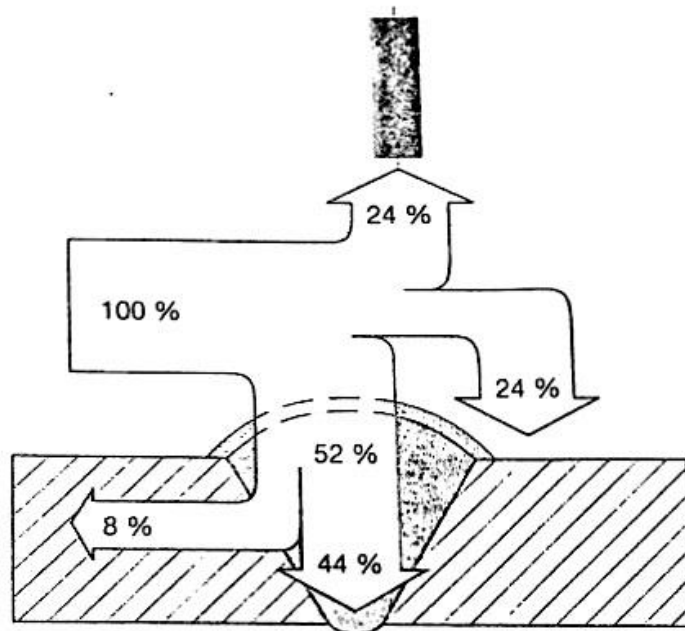
Suuresta tunkeumasta johtuen jauhekaarihitsauksen sekoittumisaste on yleensä paljon muita hitsausprosesseja suurempi eli jauhekaarihitsiaineessa on enemmän sulanutta perusainetta kuin muiden prosessien hitsiaineissa. Tyypillisesti kaksipalkohitseissä lisääineen osuus jää noin 25 %:iin ja perusaineen osuus vastaavasti 75 %:iin, mistä johtuen hitsiaineen lujuus yleensä nousee ja sitkeys laskee. Hitsattaessa monipalkohitsejä lisääineen osuus nousee ja perusaineen osuus laskee. Erityyppisten railojen sekoittumisasteita on esitetty kuvassa 2. (Lukkari, 2002, s. 122–123.)

Railo- muoto	Levyn- paksuus mm	Palko- määrä kpl/ puoli	Sekoittumis- aste (= sulaneen perusaineen osuus) %
	< 15	1	~80
	15–20	1	~70
	20–25	2–3	50–60
	> 25	> 3	< 50

Kuva 2. Erityyppisten railojen tyypillinen sekoittumisaste (Lukkari, 2002, s. 123).

2.1.1 Hitsaustapahtuma

Hitsausjauheen takia hitsausympäristö on työ- ja ympäristöystävällinen, sillä hitsausjauhe estää tehokkaasti ympäristöön kohdistuvat roiskeet ja säteilyn. Lisäksi hitsausjauhe toimii osaltaan hyvänä lämmöneristeenä, joten suuri osa hitsausenergiasta saadaan kohdistettua suoraan lisäainelangan ja perusaineen sulattamiseen, toisin kuin avointa valokaarta käytettäessä. Hitsauslämmöstä saadaan kohdistettua jopa 76 % sulattamiseen. Jauhekaarihitsauksen lämpötase on esitetty kuvassa 3. Hitsausjauhe voidaan syöttää erillisellä syöttöputkella joko keskeisesti hitsauslangan ympärille tai sen eteen. (Lukkari, 2002, s. 122.)



Kuva 3. Lämpötase jauhekaarihitsauksessa (Lukkari, 2002, s.122).

Hitsiä suojatessaan hitsausjauhe pitää valokaaren näkymättömissä, mikä estää itse hitsaajan näköyhteyden valokaaren asemaan ja hitsisulaan. Tämän takia jauhekaarihitsaus vaatii tarkan asemoinnin lisäainelangan ja railon suhteen ennen hitsauksen aloittamista. Aseman korjaus kesken hitsauksen on mahdollistettu vaaka- ja pystyluistien avulla. Aseman korjaukset ovat kuitenkin ennakoivia korjausliikkeitä, joiden apuna käytetään usein valopistelamppua, mikä on kohdistettu railoon hitsauspään edessä. Asemoinnin helpottamiseksi on kehitetty erilaisia railonseurantalaitteistoja. Railonseuranta voi toimia joko mekaanisesti tai sähkömekaanisesti. Yleisin on sähkömekaaninen järjestelmä, jossa

tuntoelin seuraa railoa hitsauspään edessä ja välittää tietoa servomoottoreille, mitkä liikuttavat vaaka- ja pystyluisteja tiedon mukaan. Lisäksi on kehitetty lähinnä adaptiivisen jauhekaarhitsauksen yhteydessä käytettäviä laseriin perustuvia railonseurantalaitteita. (Lukkari, 2002, s. 124–125.)

Hitsausjauhe tarjoaa hitsaustapahtumalle hyvän suojan, minkä takia kuonasulkeuma- ja huokosvaara on vähäinen. Suurien hitsausvirtojen ja tunkeuman takia myös liitosvirheiden määrä pysyy yleensä jauhekaarhitsauksessa vähäisenä. Hitsin laatu on yleensä tasainen ja hyvä koko hitsin matkalla, eikä hitsissä juurikaan näy sytytys- tai lopetuskohtia, kuten muissa prosesseissa. (Lukkari, 2002, s. 125.)

2.2 Prosessisovellukset

Jauhekaarhitsaus käsitetään usein yksilankahitsauksena, mutta siitä on kehitetty useita eri prosessisovelluksia. Sovellukset nostavat prosessin tehokkuutta, sekä lisäävät sen käyttökohteiden määrää. Teollisuudessa on myös käytössä eri sovelluksien yhdistelmiä, jotka ovat omiaan nostamaan prosessin tehokkuutta. Jauhekaarhitsauksen tärkeimmät prosessisovellukset ovat:

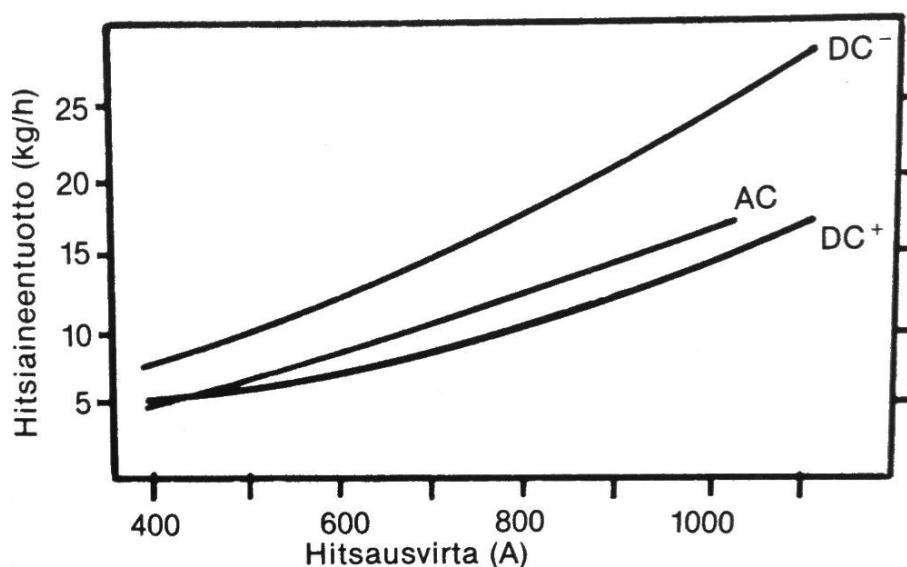
- hitsaus -navassa
- hitsaus vaihtovirralla
- hitsaus pitkällä vapaalangalla
- kaksoislankahitsaus
- tandem- ja monilankahitsaus
- hitsaus rautajauhetta käyttäen
- kylmälankahitsaus
- hitsaus täytelangalla
- kuumalankahitsaus
- nauhahitsaus
- kapearailohitsaus
- robotisoitu jauhekaarhitsaus

(Lukkari, 2002, s. 132-140; Orsini & Gerbec, 2010).

Yleensä jauhekaarhitsauksessa käytetään tasavirtaa hitsattaessa positiivisella navalla, koska sillä saavutetaan paras tunkeuma. Langan ollessa kytkettynä – napaan saadaan

nopeampi hitsiaineentuotto, joka on 60% suurempi kuin + navalla hitsattaessa. Vaikka hitsiaineentuotto nouseekin – navalla hitsattaessa, sen tunkeuma pienenee noin 22%. Tunkeuman pienyydestä johtuen – navalla hitsattaessa tehdään yleensä päällehitsauksia. (Lukkari, 2002, s. 132–140; Orsini & Gerbec, 2010.)

Virtalajia vaihdettaessa vaihtovirtaan tunkeuma ja hitsiaineentuotto sijoittuvat edellä mainittujen tasavirran napaisuuksien välille. Hitsiaineentuotot AC:lla, DC⁺:lla ja DC⁻:lla on esitetty kuvassa 4. Vaihtovirtahitsauksessa valokaari pysyy stabiilina eli menetelmällä vältytään magneettiselta puhallukselta, jota ilmenee tasavirtahitsauksessa lähellä hitsattavan kohteen kulmia ja maadoitusta. (Lukkari, 1986, s. 63; Orsini & Gerbec, 2010.)



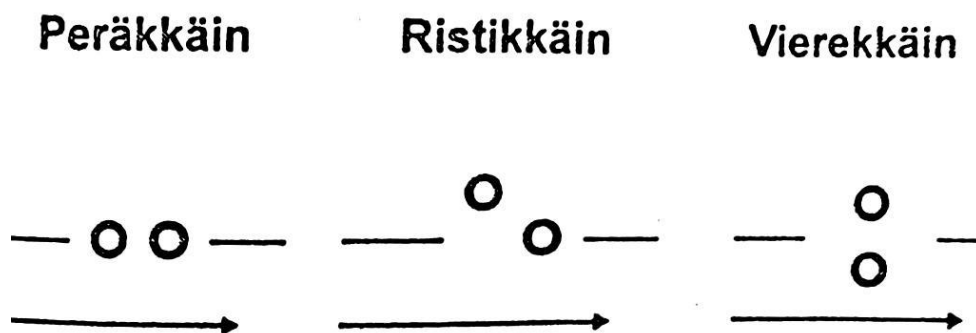
Kuva 4. Napaisuuden vaikutus hitsiaineentuottoon (Lukkari, 1986, s. 26).

2.2.1 Hitsaus pitkällä vapaalangalla

Pitkällä vapaalangalla hitsattaessa käytetään normaalia pidempää vapaalankaa. Hitsausvirrasta ja langanhalkaisijasta riippuen hitsiaineentuotto kasvaa noin 20–50%. Tuoton kasvaminen johtuu pitkän vapaalangän esikuumentumisesta vastuslämmön vaikutuksen seurauksena, joka johtaa nopeampaan sulamiseen. Menetelmä tarvitsee sähköisesti eristetyn langanohjaimen, jotta vapaalanka estyy heilumasta. Tapa on yksinkertainen ja halpa keino lisätä hitsiaineentuottoa, vaikka se pienentääkin hitsin tunkeumaa. (Lukkari, 2002, s. 132.)

2.2.2 Kaksoislankahitsaus

Kaksoislankahitsauksessa hitsausvirta johdetaan yhdestä virtalähteestä molempiin lisäainelankoihin, jotka ovat ohuempia kuin yksilankahitsauksessa. Laitteistossa on yhteinen langansyöttölaite, joka syöttää lankoja kaksireikäisen kosketussuuttimen läpi yhteen hitsisulaan. Kosketussuutin asemoi langat lähekkäin toisiaan ja ne voidaan asetella kuvan 5 esittämällä tavalla. Käytössä olevien ohuiden lankojen vuoksi virtatiheys ja vastuskuumeminen ovat suurempia. Tekijät johtavat nopeampaan sulamisnopeuteen ja hitsiaineentuoton lisääntymiseen, sekä mahdollistavat suuremmat hitsausnopeudet. (Lukkari, 2002, s. 132.)



Kuva 5. Lankojen asemointi kaksoislankahitsauksessa (Lukkari, 2002, s. 133).

2.2.3 Tandem -hitsaus

Tandem-hitsaus on prosessi, jossa hitsiaineentuottoa ja hitsausnopeutta nostetaan usean erillisen lisäainelangan avulla. Yksilankahitsaukseen verrattuna hitsiaineentuotto tandem-hitsauksessa on lähes kaksinkertainen. Kullakin lisäainelangoista on oma virtalähde, langansyöttölaite ja ohjausyksikkö. Lisäainelangat voidaan syöttää joko samaan hitsisulaan tai pitää ne erillään erillisten kosketussuuttimien ansiosta. Yleensä langat ovat paksuja esimerkiksi 5+5 mm ja niiden etäisyys toisistaan on noin 20 mm. Lankojen etäisyys vaikuttaa hitsin tunkeumaan ja palkomuotoon. Prosessissa ensimmäisellä langalla pyritään tekemään mahdollisimman suuri tunkeuma ja jälkimmäisellä langalla levitetään hitsipalko, jonka vuoksi ensimmäisessä langassa on suuri hitsausvirta, kun taas toisessa langassa on suuri kaarijännite. (Lukkari, 2002, s. 133–134.)

Tandem -prosessissa käytetään erilaisia virtalajien ja napaisuuksien variaatioita riippuen käyttökohteesta. Tandem -hitsauksessa tasavirralla hitsattaessa ilmentyy magneettista puhallusta, jonka vuoksi yleensä toiseen lankaan syötetäänkin vaihtovirtaa. Tandem-

hitsauksen periaatetta on käytetty myös monilankahitsauksessa. Erona tandem-hitsaukseen siinä on useita, jopa 6 lankaa, joiden avulla saadaan suurempi tunkeuma ja hitsiaineentuotto. Monilankahitsaus kuitenkin useasti mielletään tandem-hitsauksena. (Lukkari, 2002, s. 133–134.)

2.2.4 Hitsaus metallijauheliisällä

Metallijauhetta syöttämällä hitsiin nostetaan hitsiaineentuottoa. Kun jauhetta syötetään hitsiin, tarttuu jauhe magneettisesti langan ympärille kuljettaen sen näin hitsisulaan. Jauhekaarihitsauksen prosessissa syntyvä kaarienergia on tarpeeksi suuri, mikä mahdollistaa lisäaineen sulattamisen ilman lisäenergian tarvetta. Metallijauhetta voidaan syöttää hitsiin noin 40–80% hitsauslangan määrästä. Jauhetta ei käytetä pohjapalon hitsaukseen, koska jauheenkäyttö pienentää tunkeumaa. Metallijauheen syöttöä käytetään niin yksilanka- kuin tandem -hitsauksessakin. (Lukkari, 2002, s. 135–136.)

2.2.5 Kuumalanka- ja kylmälankahitsaus

Kuumalankahitsauksessa hitsauspolttimen etupuolelta syötetään erillistä lisäainelankaa hitsiin. Lisäainelanka on virallinen ja sillä on oma langansyöttölaitteisto, sekä oma virtalähde. Kuumalangan ja hitsisulan välille muodostuu oikosulku, mistä johtuvan vastuslämmön vaikutuksesta lisäainelanka kuumenee punahehkuseksi. Prosessin etuna saavutetaan hitsiaineentuoton kasvu pienellä energianlisäyksellä. Kuumalankahitsauksen käyttö on vähäistä johtuen sen häiriöalttiudesta ja tunkeuman pienentymisestä verrattuna tavalliseen yksilankahitsaukseen. (Lukkari, 2002, s. 136–137.)

Kylmälankahitsaus toimii samalla periaatteella kuin kuumalankahitsaus. Siinä lisäainelanka on virraton ja sitä syötetään 45 ° kulmassa samalla syöttönopeudella hitsisulaan kuin kaarilankaa. Lisäainelankaa voidaan syöttää joko polttimen etu- tai takapuolelta. Kylmälankahitsauksen etuja verrattuna yksilankahitsaukseen on korkeampi hitsiaineentuotto ja pienempi lämmöntuonti vastaavan palkomäärän suhteen. Kuten kuumalankahitsauksessa myös kylmälankahitsauksessa tunkeuma pienenee vastaavaan yksilankaprosessiin verrattuna. Mekaanisilta ominaisuuksiltaan hitsit ovat iskusitkeitä. Iskusitkeyden vuoksi menetelmä soveltuu käyttökohteisiin, jossa lämmöntuonti on rajoittava tekijä. (Lukkari, 2002, s. 136–137.)

2.2.6 Täytelankahitsaus

Jauhekaarihitsauksessa lisäainelankana voidaan käyttää myös täytelankaa. Jauhekaarihitsauksen täytelangat ovat samantyyppisiä kuin MIG/MAG -hitsauksessa. Täytelankojen koostumus määräytyy käytettävän jauheen ja käyttäjän tarpeiden mukaan. Lankoja on emästäytteisiä ja metallitäytteisiä, ja niiden käyttö määräytyy hitsattavan perusaineen mukaan. Täytelankahitsausta käytetään nostamaan hitsiaineentuottoa ja hitsausnopeutta. Se soveltuu esimerkiksi pienahitseihiin ja päittäisliitoksiin. (Lukkari, 2002, s.137.)

2.2.7 Nauhahitsaus

Nauhahitsauksessa käytetään lisäainelangan tilalla lisäainenauhaa, jonka vuoksi se tarvitsee erillisen nauhahitsauspään. Yleinen käytetty nauhakoko on 0,5 * 60 mm. Nauhahitsauksessa valokaari ei pala tasaisesti koko leveydeltä, vaan se palaa yhdessä tai useammassa paikallisessa pisteessä liikkuen nauhan leveydellä edestakaisin. Tämä erityispiirre pienentää tunkeumaa ja sekoittumista verrattuna perinteiseen lankahitsaukseen. Nauhahitsausta käytetään päällehitsausprosessina johtuen sen tehokkuudesta ja suuresta hitsiaineentuotosta. (Lukkari, 2002, s. 138-140.)

2.2.8 Kapearailohitsaus

Kapearailohitsauksessa hitsattava railo on usein U -railo, jonka sivut ovat lähes pystysuorat ja ilmarako vaihtelee 10–30 mm riippuen hitsattavasta materiaalista ja prosessista. Kapearailohitsaus on sovellus paksujen levyjen päittäisliittämiseen yhdeltä puolelta, jolla parannetaan tuottavuutta ja vähennetään tarvittavan hitsiaineen määrää. Kapearailohitsaus on yleensä monipalkohitsausta, missä hitsataan yksi tai kaksi palkoa kerrosta kohden. Palkojärjestyksellä ja kohtuullisella energian tuonnilla on vaikutusta hitsattavan hitsin mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten iskusitkeyteen. Menetelmä tarvitsee erityisen hitsauspään, joka on kapea, levymäinen ja eristetty. Hitsauspää tarvitsee myös erillisen kääntölaitteen, jotta lisäainelanka saadaan asemoitua railoon. Asemointia ja hitsausta helpottaa myös railonseurantalaite. (Lukkari, 2002, s. 138; Lukkari, 2011.)

2.2.9 Robotisoitu jauhekaarihitsaus

Jauhekaarihitsaus on aina mekanisoitua, mutta se voi olla myös automatisoitua. Automatisointia on pidetty vaativana erityisesti jauheenkäsittelyn kannalta. Nykyään

käsittelystä on saatu luontevampaa esimerkiksi koaksiaalisen jauheensyöttön avulla. Robotisoitu jauhekaarihitsaus mahdollistaa kaarevien ja monimutkaisten muotojen hitsaamisen, joita mekanisointilaitteilla on lähes mahdotonta hitsata. Robotisoitua jauhekaarihitsausta käytetään pääasiassa raskaassa konepajateollisuudessa, kuten laivanrakennuksessa. Robotisoinnin avulla saavutettuja hyötyjä jauhekaarihitsaukseen ovat:

- kokonaistuottavuuden lisääntyminen
- operaattorin henkilökohtaisen työn tehostaminen
- monimutkaisempien työkappaleiden hitsaus
- väliaikojen lyhentäminen monipalkohitsauksessa
- synkronoidut liikkeet robotin ja käsittelylaitteen välillä
- erinomainen toistettavuus
- työturvallisuuden lisääminen

(Pemamek Oy, 2012; Lincoln Electric, 2009.)

2.3 Hitsauslaitteisto

Jauhekaarihitsauslaitteisto koostuu seuraavista laitteista: hitsauslaitteesta, virtalähteestä ja työlaitteesta. Itse hitsauksen suorittava hitsauslaite sisältää seuraavat pääosat: hitsauspään ja sen asetuslaitteet eli luistit, langansyöttö- ja oikaisulaitteen, mikä oikaisee hitsauslangan ennen sen syöttämistä hitsiin, sekä jauheen käsittelylaitteen ja ohjausyksikön. Jauheen käsittelylaite sisältää säiliön ja suppilon, jonka kautta jauhe ohjataan hitsiin, ja lisäksi siihen voidaan liittää imuri, jonka avulla jauhe voidaan kierrättää takaisin säiliöön. Hitsauslaitteen oheislaitteeksi on saatavilla erilaisia railonseurantalaitteita, joiden avulla voidaan kohdistaa hitsauslangan paikka railossa. Railonseuranta voidaan toteuttaa joko mekaanisesti, sähkömekaanisesti tai laserin avulla. (Lukkari, 2002, s. 140–141.)

Suurien hitsausvirtojen takia hitsausvirtalähteet ovat suuritehoisia ja niiden teho vaihtelee 600–1600 A:n välillä. Yhdellä langalla hitsattaessa jauhekaarihitsauksessa käytetään yleensä tasavirtaa, mistä syystä virtalähteet ovatkin yleensä tasasuuntaajia. Prosessista riippuen voidaan käyttää myös vaihtovirtalähteitä, kuten esimerkiksi tandem-hitsausprosessissa, jossa ainakin toinen langoista on kytketty vaihtovirtaan. Virtalähteiden käyttö on yleensä mahdollistettu hitsauslaitteen ohjauspaneelin avulla ja itse virtalähde on kytketty kaapeleita käyttäen hitsauslaitteeseen. (Lukkari, 2002, s. 141–142.)

Mekanisoidussa jauhekaarihitsauksessa suoritetaan itse hitsausliike eli työliike koneellisesti työlaitteella. Hitsausliike toteutetaan joko hitsauslaitetta liikuttamalla tai hitsattavaa kappaletta liikuttamalla. Hitsattavaa kappaletta liikuttavia laitteita ovat esimerkiksi erilaiset hitsauskiinnittimet, sekä pyöritysrullastot ja -pöydät, kun taas hitsauslaitetta voidaan liikuttaa mm. erilaisten liikkuvien hitsaustornien avulla. Lisäksi yleinen ratkaisu on hitsauslaitteeseen integroidut kulkuvaunut, kuten hitsaustraktorit. Esimerkki hitsaustraktorista on esitetty kuvassa 6. (Lukkari, 2002, s. 140–141.)



Kuva 6. Jauhekaaritraktori hitsauslaitteineen (AB Bayrock, 2014).

Jauhekaarihitsaus voi olla myös automatisoitua, jolloin useat erilaiset työlaitteet toimivat synkronoidusti keskenään. Yleisimmin automatisoitua laitteistoa käytetään putkien hitsauksessa, jossa työliikettä suoritetaan sekä pyöritysrullaston että hitsaustornin avulla. Kuvassa 7 on esitetty esimerkki Esab- hitsauslaitevalmistajan automatisoidusta laitteistosta. Aihiot ovat silloitettu ensin toisiinsa MIG/MAG -hitsausta käyttäen, jonka jälkeen hitsaus suoritetaan sisäpuolisella ja ulkopuolisella jauhekaariyksiköllä

pyöritysrullaston päällä. Hitsaus suoritetaan monipalkohitsauksena molemmin puolin. Ulkopuoliset hitsauspää on esitetty kuvassa 8. (Esab, 2014.)



Kuva 7. Automatisoitu hitsauslaitteisto (Esab, 2014).



Kuva 8. Ulkopuolinen hitsausyksikkö (Esab, 2014).

2.4 Hitsauksen virta- ja jänniteohjattu säätö

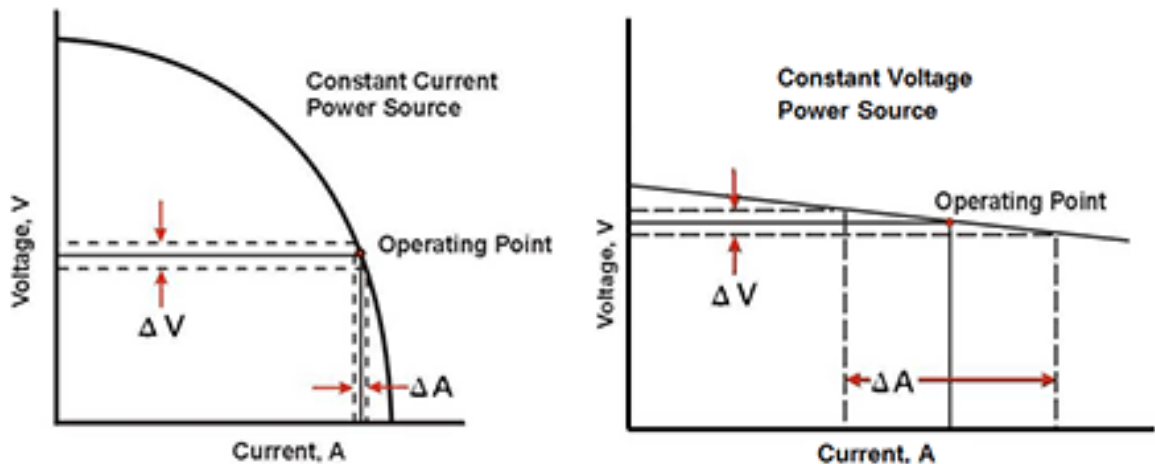
Jauhekaarhitsauksessa langansyöttölaite syöttää lisäainelankaa jatkuvasti valokaareen. Siinä langan syöttönopeus määräytyy joko säädetyn hitsausvirran tai hitsausjännitteen

mukaan. Stabiilin valokaaren palamisen edellytyksenä on, että langan syöttönopeus ja sulamisnopeus ovat tasapainossa. Jotta valokaaren pituus, sekä langan sulamisnopeus saadaan pysymään hitsauksen aikana vakiona, pidetään säädetyt virta- ja jännitearvot säätötoimintojen avulla oikeina. Prosessissa tapahtuvaa langansyöttöä voidaan ohjata virta- tai jänniteohjattua säätöä käyttämällä, jotka ovat valittavissa virtalähteen valintakytkimestä. (Lukkari, 2002, s. 124.)

Virtaohjatussa säädössä langansyöttönopeus säätyy hitsausvirran muutoksien mukaan. Mikäli hitsausvirrassa tapahtuu hetkellisesti muutoksia toteutuvan hitsausvirran ja asetetun hitsausvirran välillä, se vaikuttaa vastaavasti langansyöttönopeuteen niin kauan, että hitsaustapahtuman tasapaino saavutetaan. Jänniteohjattua säätöä käytetään useimmin ohuemmilla langoilla hitsattaessa niiden vaatiman suuren langansyöttönopeuden takia. Alhaisilla hitsausjännitteillä eli alle 26V jännitteillä hitsattaessa käytetään vakiolangansyöttöä ja hitsaustapahtuma pidetään stabiilina itsesäätöisen valokaaren avulla, jossa valokaaren pituuden muutos aiheuttaa nopean muutoksen hitsausvirrassa, jolloin lisäainelangan sulaminen tapahtuu hetkellisesti nopeammin ja hitsaustapahtuma pysyy tasapainossa. Korkeammilla jännitteillä käytetään varsinaista jänniteohjattua säätöä, jolloin langansyöttönopeus säätyy kaarijännitteen muutoksien mukaan siten, että hitsaustapahtuma pysyy tasapainossa. (Lukkari, 2002, s. 124.)

2.5 Hitsaus vakiovirralla ja vakiojännitteellä

Jauhekaarihitsaus tapahtuu joko vakiovirralla tai vakiojännitteellä. Hitsauksessa valokaari on kuitenkin aina dynaaminen, joten terminä ”vakio” on hieman suhteellinen. Virtalähde säätää molempia hitsausarvoja millisekunneissa, jotta valokaari ja hitsaustapahtuma pysyvät stabiilina. Vakiovirta eli Constant-Current (CC) on menetelmä, jossa virtalähde pyrkii pitämään hitsausvirran arvon suhteellisen vakiona ja tekemään muutokset käytetyssä hitsausjännitteessä. Vakiojännite eli Constant-Voltage (CV) menetelmässä virtalähde taas pyrkii pitämään hitsausjännitteen suhteellisen vakiona ja säätämään hitsausvirran arvoja laajemmalla alueella. Kumpaakin menetelmää varten virtalähde pitää sisällään omat ominaiskäyrät, joiden mukaan hitsausarvoja säädetään. Virtalähteen periaatteelliset ominaiskäyrät niin CC:lla kuin CV:lla on esitetty kuvassa 9, jossa Δ tarkoittaa muutosta. (Lincoln Electric, 2014; O’Brien, 1991, s. 196-198.)



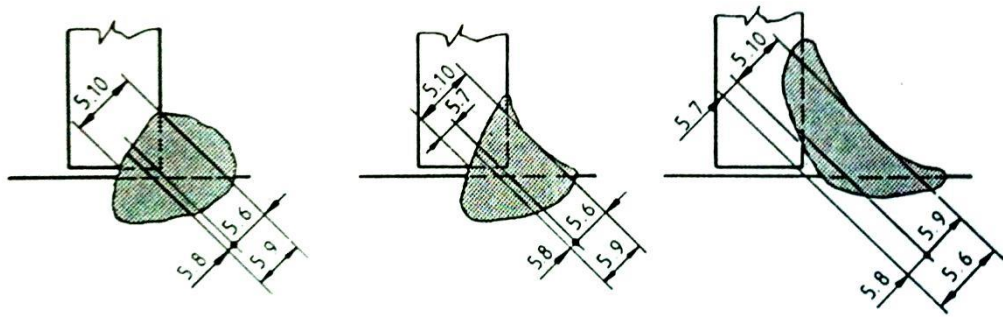
Kuva 9. Havainnollistava kuva virtalähteen ominaiskäyristä, jossa vasemmalla vakiovirran eli CC:n ominaiskäyrä ja oikealla vakiojännitteen eli CV:n käyrä. (Lincoln Electric, 2014)

Aikaisemmin vakiojännitteellä ja vakiovirralla hitsaukseen on tarvittu erilliset virtalähteet, mutta nykyisin hitsaus vakiovirralla ja vakiojännitteellä on mahdollista samalla virtalähteellä ja vaihto niiden välillä onnistuu virtalähteen valintakytkimestä. Vakiovirralla hitsattaessa lisäainelangan langansyöttönopeutta säädetään muuttuvan kaarijännitteen mukaan. Hitsaus vakiovirralla sopii erityisesti paksuille lisäainelangoille, koska ohuemmilla langoilla käytetään suurempia langansyöttönopeuksia, mikä vaikeuttaa langansyöttönopeuden säätämistä muuttuvan kaarijännitteen mukaan. Vakiovirtahitsaus tarjoaa stabiilin ja luotettavamman tunkeuman erityisesti paksuja materiaaleja hitsattaessa. (Miller, 2014.)

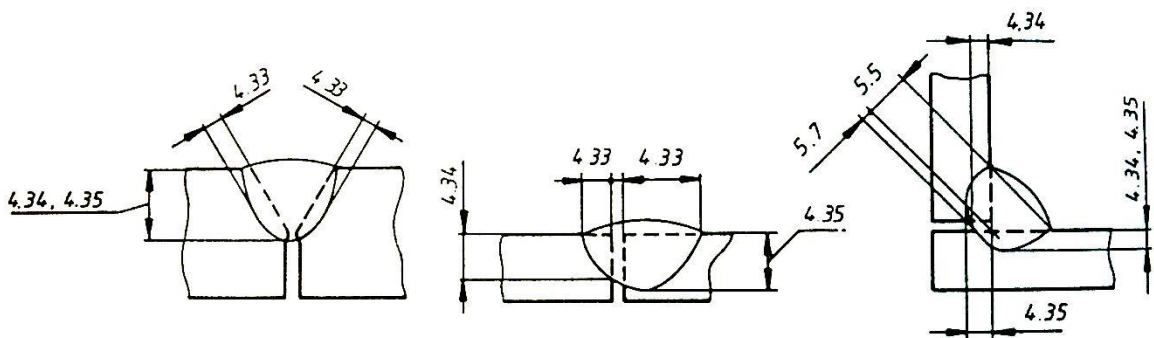
Vakiojännitteellä hitsattaessa lisäainelangan langansyöttönopeus pidetään vakiona ja hitsaustapahtumaa kontrolloidaan hitsausvirtaa säätämällä. Vakiojännitehitsauksessa valokaari ja sen pituus pysyvät stabiilina vakiolangansyöttönopeuden ja virran vaihtelun seurauksena. Hitsausjännitteen laskiessa hitsausvirta kasvaa nopeasti ja lisäainelangan sulaminen kiihtyy kunnes tilanne on jälleen stabiili. Vakiojännitehitsaus soveltuu parhaiten ohuemmille alle 12mm:n materiaaleille ja mahdollistaa suorita hitsejä, joissa hitsisulan leveys pysyy vakiona. (Miller, 2014; Retco, 2014.)

3 TUNKEUMA

Tunkeuma sisältää erilaisia käsitteitä, jotka ovat määritelty standardissa SFS 3052. Määrittelyssä termit ovat erilaisia kuin hitsauksen suunnittelussa ja palon yksityiskohtien tarkastelussa. Tunkeuma eli juuritunkeuma ja tehollinen tunkeuma ovat hitsauksen suunnitteluun liittyviä käsitteitä, jotka ovat esitetty kuvassa 10. Yksityiskohtia tarkastellaan tunkeumaan liittyvien käsitteiden, kuten sulatunkeuman, hitsautumissyvyyden ja sulamissyvyyden avulla, jotka on esitetty kuvassa 11. (Suomen Standardisoimisliitto, 1996, s. 37-50.)



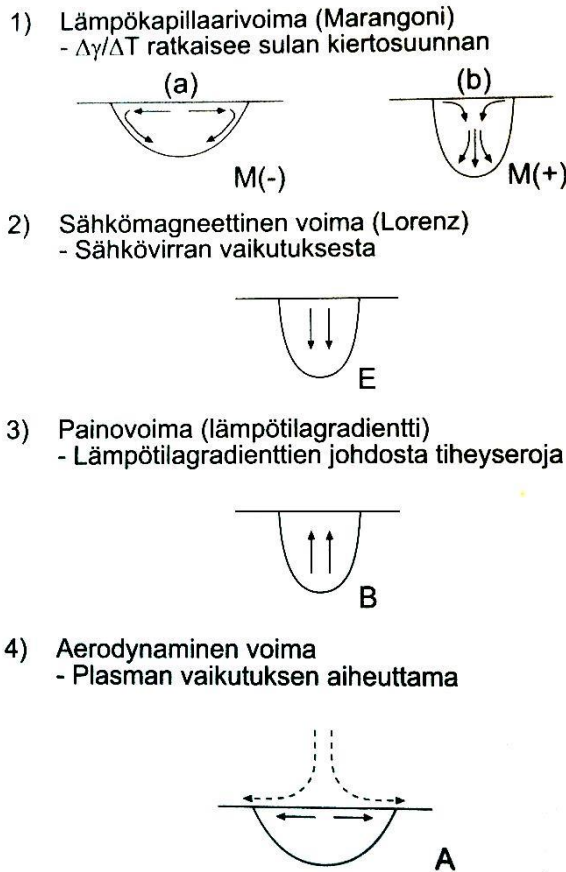
Kuva 10. Suunnitteluun liittyviä käsitteitä; juuritunkeuma 5.7 ja tehollinen tunkeuma 5.8 (Suomen Standardisoimisliitto, 1996, s. 44).



Kuva 11. Hitsien yksityiskohdat; sulatunkeuma 4.33, hitsautumissyvyys 4.34 ja sulamissyvyys 4.35 (Suomen Standardisoimisliitto, 1996, s. 47).

Hitsaustekniikassa tunkeuma määritellään perusaineen ja mahdollisen lisäaineen muodostaman sulamisyöhykkeen avulla, mikä on esitetty hitsipalon syvyytenä ja leveytenä. Kaarihitsauksessa valokaaren synnyttämä lämpö sulattaa perusainetta ja levittää sula-alueen hitsisulan pinnalta hitsin pohjalle muodostaen samalla tunkeumaa. Lämpö

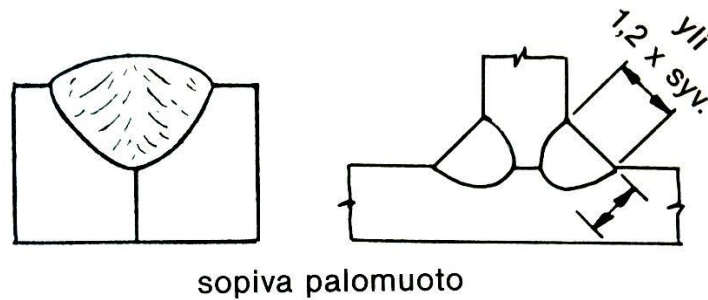
siirtyy hitsisulassa sulan virtauksen eli konvektion seurauksena. Konvektioon vaikuttavat voimat on esitetty kuvassa 12. (Kyröläinen & Lukkari, 1999, s. 53-57.)



Kuva 12. Konvektiovoimat kaarihitsauksessa (Kyröläinen & Lukkari, 1999, s. 54).

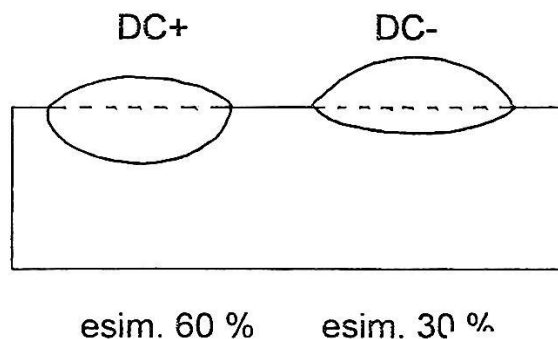
Lämpökapillaarivoimassa $\Delta\gamma$ on pintajännitysvakion muutos ja ΔT on lämpötilan muutos. Sulan kiertosuunta määräytyy $\Delta\gamma/\Delta T$ suhteesta. Jos $\frac{\Delta\gamma}{\Delta T} > 0$ sula virtaa keskeltä alas syventäen tunkeumaa, kun taas mikäli $\frac{\Delta\gamma}{\Delta T} < 0$, sula leviää keskeltä reunoille pienentäen tunkeumaa. (Kyröläinen & Lukkari, 1999, s.54–55.)

Yleisesti tutkimuksissa tunkeuma määritellään hitsipalon leveyden/syvyyden -suhteena tai pelkästään sulamissyvyytenä tutkimuskohteesta riippuen. Hitsauspalko on optimaalisen muotoinen, kun hitsin leveys/syvyys-suhde on yli 1,2. Leveys/syvyys-suhde on esitetty kuvassa 13. (Kyröläinen & Lukkari, 1999, s.53–57.)



Kuva 13. Leveys/syvyys-suhde (Lukkari, 1986, s.57).

Tunkeuma voidaan myös määrittellä sekoittumisasteen avulla, missä tarkastellaan hitsin poikkileikkauksen ylä- ja alapuolista pinta-alaa, jonka rajaa perusaineen rajapinta. Sekoittumisastetta kuvaa prosenttiluku, joka kertoo palon alapuolisen tunkeuman pinta-alan prosentteina koko hitsipalon pinta-alasta. Alapuolinen tunkeuma eli sulaprofiili koostuu sulaneesta lisäaineesta sekä perusaineesta ja yläpuolinen lisäaineesta. Sekoittumisaste on esitetty eri jauhekaarihitsauksen virtalajien avulla kuvassa 14. (Kyröläinen & Lukkari, 1999, s. 443–444.)

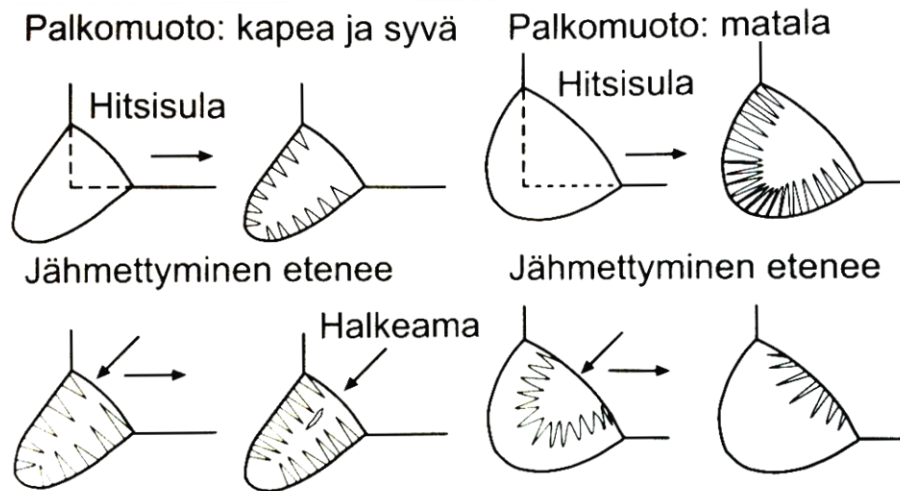


Kuva 14. Sekoittumisasteen määrittely (Lukkari, 2002, s. 153).

3.1 Palkomuodot jauhekaarihitsauksessa

Jauhekaarihitsin palkomuotoon vaikuttavat käytettävät hitsausparametrit. Palkomuoto on sidoksissa hitsin tunkeumaan ja sekoittumiseen, joten se voi vaihdella hyvin laajalla alueella. Palkomuoto, joka on liian syvä verrattuna leveyteen, on altis pitkittäisille kuumahalkeamille, jotka syntyvät hitsin keskilinjalle. Liian syvässä palossa jäähmettymisrintamat etenevät suoraan reunoilta kohti keskilinjaa, jolloin mahdolliset epäpuhtaudet kerääntyvät hitsin keskelle ja voivat synnyttää halkeamia. Kun hitsin leveys

on suurempi kuin syvyys, jähmettymisrintamat suuntautuvat kaarevasti ylöspäin ja mahdolliset epäpuhtaudet nousevat pintaan, joten alttius halkeamille laskee. Erilaisten palkomuotojen jähmettymisen eteneminen on esitetty kuvassa 15. (Lukkari, 2002, s.149–150.)



Kuva 15. Hitsien jähmettyminen erimuotoisissa paloissa (Kyröläinen & Lukkari, 1999, s.103).

3.2 Tunkeumaan vaikuttavat hitsausparametrit jauhekaarihitsauksessa

Jauhekaarihitsauksessa on monia tekijöitä, jotka vaikuttavat hitsipalon muotoon. Näitä ovat muun muassa hitsausparametrit ja hitsattavan materiaalin ominaisuudet. Esimerkiksi teräksen happi- ja rikki pitoisuus vaikuttavat tunkeuman vaikutussuuntaan. Hitsausparametrien ja muuttujien tunteminen on tärkeää, jotta operaattori tietää niiden vaikutukset ja osaa korjata niitä hitsauksen aikana, koska parametrien vaikutus hitsin tunkeumaan ei kuitenkaan ole yksiselitteinen. Jauhekaarihitsauksen hitsausparametreja ovat:

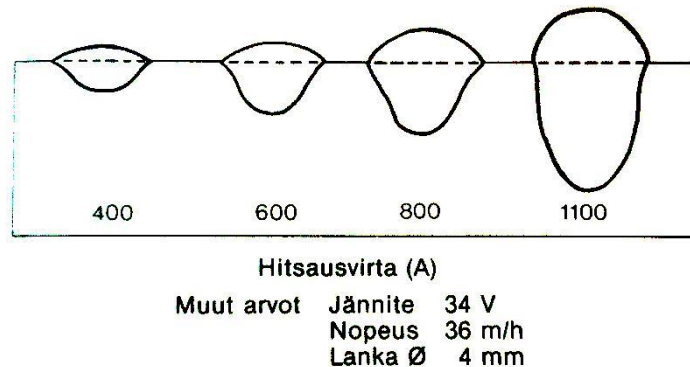
- Hitsausvirta
- Kaarijännite
- Hitsausnopeus
- Virtatiheys ja langan halkaisija
- Virtalaji ja napaisuus
- Vapaalangan pituus
- Langan asento

- Työkappaleen asento
- Maadoituksen paikka
- Jauhekerroksen paksuus

(Lukkari, 2002, s. 149; Kyröläinen & Lukkari, 1999, s. 53–57.)

3.2.1 Hitsausvirta

Hitsausvirralla on parametreistä suurin vaikutus tunkeumaan, sekä palkomuotoon ja sekoittumiseen. Virralla on suoraviivainen vaikutus perusaineen sulamiseen, sekoittumiseen, lisäainelangan sulamisnopeuteen ja hitsiaineentuottoon. Hitsausvirran lisäämisellä on suora vaikutus tunkeuman kasvuun, ja esimerkiksi päällehitsauksessa tunkeuman syvyys kasvaa noin millimetrin 100A kohti. Valokaaren kohdistuessa railon sivuille tunkeuma pienenee verrattuna samoilla parametreillä hitsatun päällehitsauksen tunkeumaan. Virran vaikutus tunkeumasyvyyteen päällehitsauksessa on esitetty kuvassa 16. Jotta hitsausvirta valitaan oikein, on huomioitava seuraavia tekijöitä, kuten levynpaksuus, tavoiteltu tunkeuma, lämmöntuontirajoitukset, palkomäärä ja langan halkaisija. (Lukkari, 2002, s. 149–150.)

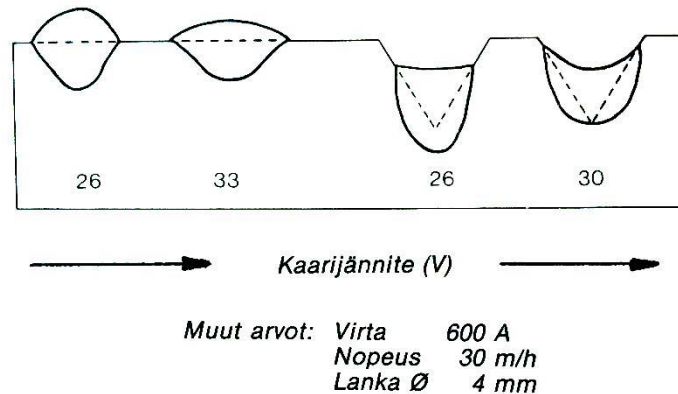


Kuva 16. Hitsausvirran vaikutus tunkeumaan (Lukkari, 2002, s. 151).

3.2.2 Kaarijännite

Kaarijännite kertoo hitsisulan ja lisäainelangan välisestä potentiaalierosta: mitä pitempi valokaari on, sitä suurempi on kaarijännitteen arvo. Kaarijännitteeseen vaikuttaa suutinetäisyys ja käytetty hitsausjauhe, jolla on vaikutus valokaaren johtumiskykyyn kaariontelossa. Valokaaren muoto on kartiomainen ja levenee kohti hitsattavaa materiaalia. Suurella kaarijännitteellä sulatetaan perusainetta leveältä alueelta eli pitkällä valokaarella saadaan aikaan leveä ja matala palko. Kun taas kaarijännite on pieni eli valokaari on lyhyt,

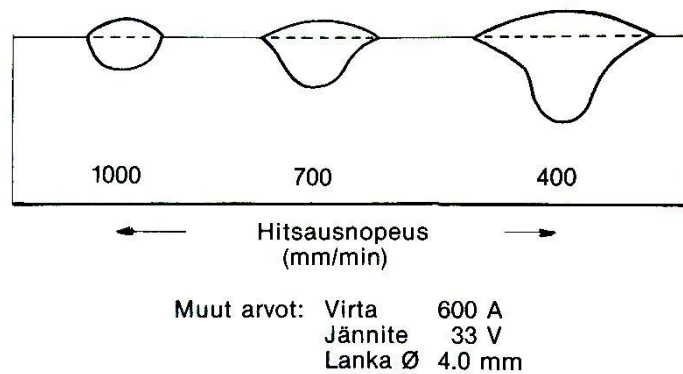
syntyy korkeampi ja kapeampi palko. Kaarijännitteen 1,5 V nostolla saavutetaan noin 1 mm lisä hitsipalon leveyteen, mutta samalla se vähentää tunkeumaa noin 0,5 mm. Yleisesti kaarijännitteellä on vähäinen vaikutus tunkeumaan. Kaarijännitteen valintaan vaikuttaa hitsausjauhe, prosessisovellus, railo ja hitsausvirta. Kaarijännitteen vaikutus palkomuotoon on esitetty kuvassa 17. (Lukkari, 2002, s. 150–152.)



Kuva 17. Kaarijännitteen vaikutus palkomuotoon päällehitsauksessa ja railohitsauksessa (Lukkari, 2002, s. 152).

3.2.3 Hitsausnopeus

Hitsausnopeudella on suuri vaikutus hitsin leveyteen ja tunkeumaan: mitä suurempi nopeus on, sitä pienempi on myös tunkeuma ja hitsin leveys. Tunkeuman ja leveyden muutos johtuu perusainetta sulattavan hitsausenergian pienemisestä korkeammilla hitsausnopeuksilla. Nopeuden ollessa pieni hitsisula estää valokaaren tunkeutumasta syvemmälle hitsiin pienentäen tunkeumaa. Parhaan tunkeuman antaa hitsausnopeus, joka on keskiarvo nopeasta ja hitaasta hitsausnopeudesta. Hitsausnopeuden vaikutus tunkeumaan on esitetty kuvassa 18. Hitsausnopeuden valintaan vaikuttaa lämmönjohtumisolosuhteet, levynpaksuus ja hitsausvirta. (Lukkari, 2002, s. 152–153.)



Kuva 18. Hitsausnopeuden vaikutus tunkeumaan ja palon leveyteen (Lukkari, 2002, s. 152).

3.2.4 Muut parametrit

Ohuella langalla virtatiheys (A/mm^2) on suurempi kuin paksummalla, kun käytetty hitsausvirta tapauksissa on sama. Suurempi virtatiheys kasvattaa tunkeumaa, kaventaa hitsiä ja nostaa kuvun korkeutta, sekä nostaa hitsiaineentuohtoa. (Lukkari, 2002, s. 153.)

Hitsiaineentuohtoa ja tunkeumaa voidaan kasvattaa virtalajin ja napaisuuden valinnalla. Jauhekaarihitsauksessa käytetään tasa- tai vaihtovirtaa, joista tasavirta on käytetympi virtalaji. Hitsattaessa DC^+ :lla saavutetaan suurempi tunkeuma, parempi palkomuoto ja parempi hitsin tiiveys kuin DC^- :sta käyttämällä, vaikka DC^- :lla hitsattaessa onkin korkeampi hitsiaineentuohtoa. Vaihtovirtaa käytetään tandem –hitsauksen jälkilangassa, jotta vältetään magneettiselta puhallukselta. Magneettinen puhallus taittaa valokaarta, jolla on vaikutus hitsipalkoon. (Lukkari, 2002, s. 153.)

Suutinetäisyys ja vapaalangan pituus vaikuttavat tunkeumaan ja lisäainelangan sulamisnopeuteen. Pitkä vapaalanka kuumenee vastuslämmön vaikutuksesta, joten mitä pidempi vapaalanka on, sitä nopeammin se sulaa. Nopea sulaminen vaikuttaa pienentävästi tunkeumaan, koska korkea kaariontelo vaikeuttaa valokaaren tunkeutumista. Vajaa tunkeuma, muutokset palkomuodossa ja epävakaa hitsaustapahtuma ovat merkkejä liian pitkän vapaalangan käytöstä. (Lukkari, 2002, s. 153.)

Jauhekaarihitsauksessa käytetään vetävää tai työntävää poltinkulmaa. Poltinkulma vaikuttaa palkomuotoon kaaripaineen osalta. Suurella nopeudella hitsattaessa käytetään

työntävää kulmaa, jolloin palko mataloituu ja kuona irtoaa helpommin. Hitaammilla nopeuksilla käytetään vetävää poltinkulmaa, jolloin kaaripaine ehkäisee sulan työntymistä lisäainelangan edelle. Työkappaleen asennolla on vastaava merkitys kuin langan asennolla. Työntäväkulma vastaa hitsausta alamäkeen ja vetäväkulma vastaa ylämäkeen hitsausta. (Lukkari, 2002, s. 153–154.)

Maadoituksen asema vaikuttaa magneettisen puhalluksen suuntaan ja suuruuteen. Tunkeuma voi vaihdella ja palko voi olla sivussa, jos hitsauksessa on esiintynyt magneettista puhallusta. Hitsaus pyritään suorittamaan poispäin maadoituksesta. (Lukkari, 2002, s. 154.)

Hitsausjauhetta tulee olla riittävän paljon hitsissä, jotta se peittää hitsaustapahtuman ja valokaaren. Jos jauhetta ei ole tarpeeksi, valokaari palaa jauheesta läpi, mikä aiheuttaa karkean ja huokoisen hitsin. Mikäli jauhetta on liikaa, hitsi on karkea ja epätasainen. Lisäksi palokaasut eivät pääse pois hitsistä, vaan jäävät huokosiksi tunkeumaan. (Lukkari, 2002, s. 154.)

4 HITSAUSKOKEET

Jauhekaarihitsauskokeet suoritettiin vakiojännitteellä eli CV:lla ja vakiovirralla eli CC:lla tunkeuman tarkastelua varten. Hitsauskokeet suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsaustekniikan laboratoriossa jauhekaarihitsauslaitteistolla. Hitsattavana materiaalina käytettiin S355 -terästä ja hitsaus suoritettiin päällehitsauksena, joten railon esivalmistelua ei tarvinnut tehdä ja kaikkiin hitseihin saatiin täsmälleen samanlaiset lähtökohdat. Hitsauskokeissa hitsattiin yhteensä kuusi koehitsiä ja muutama laitteiston testaushitsi. Koehitseistä kolme hitsattiin vakiojännitettä käyttäen ja kolme vakiovirtaa käyttäen. Hitsatut koehitsit näkyvät kuvassa 19. Hitsauskokeiden jälkeen hitseistä otettiin makrokuvat LUT:n metallurgian laboratoriossa jokaisen hitsin tunkeuman määrittämistä varten.



Kuva 19. Yleiskuva koehitseistä, jossa CV tarkoittaa vakiojännitteellä hitsattuja koehitsejä ja CC vakiovirralla hitsattuja koehitsejä.

4.1 Materiaali

Hitsauskokeiden materiaalina käytettiin 12 mm paksua RUUKIN S355N rakenneterästä, joka täyttää terässtandardien EN 10025-2 ja 10025-3 vaatimukset. Materiaalina kyseinen rakenneteräs tarjoaa hyvän muovattavuuden, sekä erinomaisen hitsattavuuden. Levyarkkina toimitettu materiaali oli polttoleikattu pienemmiksi paloiksi hitsauskokeita varten. Materiaalin aineodistus on liitteessä 1 ja Ruukin ilmoittamat materiaalin sisältämien seosaineiden enimmäismäärät on esitetty taulukossa 1. (Ruukki, 2013.)

Taulukko 1. Materiaalin (S355N) seosaineiden pitoisuuksien enimmäismäärät (Ruukki, 2013).

Seosaine	C	Si	Mn	P	S	Nb
Pitoisuus (%)	0,18	0,50	1,60	0,025	0,020	0,05

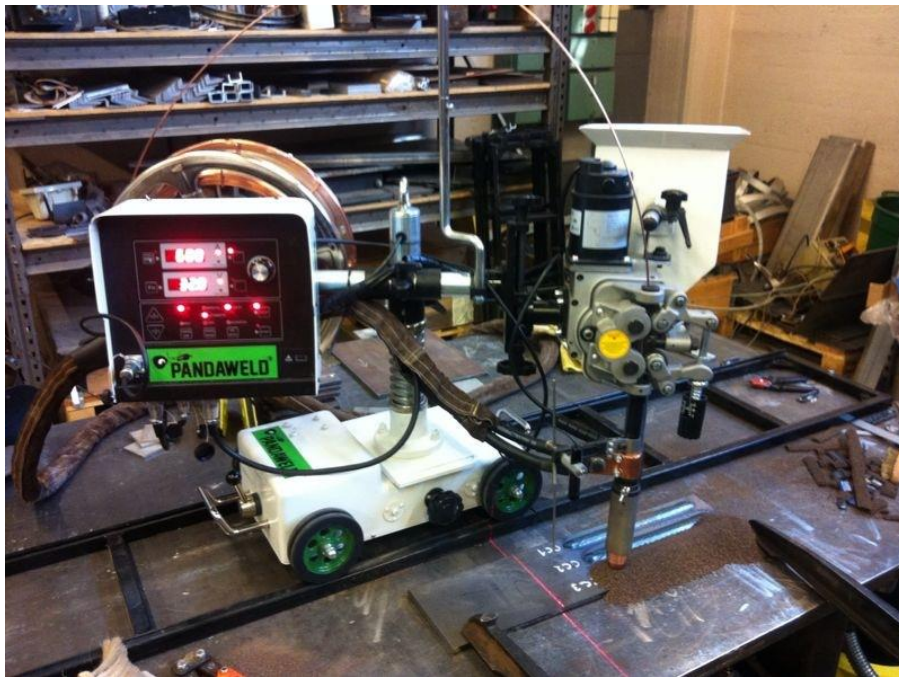
4.2 Käytetty hitsauslaitteisto

Koehitsauksissa käytettiin Pandaweld jauhekaarhitsauslaitteistoa, joka koostui virtalähteestä sekä hitsauskuljettimesta ja hitsauslaitteesta eli hitsaustraktorista. Virtalähde oli Pandaweld 1250 tasavirtainverterivirtalähde, joka on suunniteltu mekanisoituun jauhekaarhitsaukseen. Virtalähteen antama virta oli säädettävissä 125 A:n ja 1250 A:n väliltä ja jännitteen maksimiarvo oli 44 V. Virtalähteen säätöominaisuuksista oli valittavissa hitsaus joko CC:lla tai CV:lla, sekä reaaliaikaisista monitoreista luettavissa virtalähteen antamat virta- ja jännitearvot hitsausta suorittaessa. Käytetty virtalähde on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Pandaweld 1250 virtalähde.

Hitsaustraktorina käytettiin Pandaweld -traktoria, jonka kuljetusnopeus oli portaattomasti säädettävissä 0,2-2,2 m/min väliltä. Traktori piti sisällään jauheensyöttöjärjestelmän, hitsauspään ja sen säädettävät luistit, langansyöttöjärjestelmän oikaisulaitteineen, sekä ohjausyksikön ja reaaliaikaiset monitorit. Lisäksi käytettiin puristavia hitsauskiinnittimiä sekä traktorin liikesuuntaa ohjaavaa kuljetusrataa. Pandaweld -traktori on kuvassa 21.



Kuva 21. Kokeessa käytetty Pandaweld -hitsaustraktori.

4.3 Koejärjestelyt

Kokeissa leikattiin hitsattavaksi materiaaliksi valitusta 12mm S355N teräksestä kaksi erillistä palaa, joihin toiseen hitsattiin vakiovirralla hitsatut hitsit ja toiseen vakiojännitteellä hitsatut hitsit. Hitsit hitsattiin kappaleisiin vierekkäin käytetyn hitsausvirran suuruuden mukaan niin, että hitsattava materiaali jäähtyi palkojen välissä. Koehitsit hitsattiin positiivisella tasavirralla (DC^+) materiaalin valssaussuuntaan ja kohti maadoitusta. Hitsausjauheena käytettiin neutraalia Esab:n OK Flux 10.71- hitsausjauhetta, jota kierrätettiin erillisen imurin avulla. Lisäainelankana käytettiin Hyundai Welding:in 3,2mm paksuista M-12K umpilankaa. Hitsausparametreiksi valittiin kyseiselle langanpaksuudelle soveltuvat minimi- ja maksimiarvot, sekä näiden väliltä optimaaliset

arvot. Hitsauslaitteeseen koehitseissä asetetut hitsausarvot, sekä laskennallinen lämmöntuonti on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Hitsausparametrit ja laskennallinen lämmöntuonti koehitsauksissa.

Koehitsi	Hitsausvirta (A)	Jännite (V)	Laskennallinen lämmöntuonti (kJ/mm)
CC1/CV1	400	28	1,3
CC2/CV2	500	30	1,8
CC3/CV3	600	32	2,3

Jokaisen koehitsin hitsausnopeus säädettiin vakioksi arvoon 50 cm/min, jonka lisäksi toteutunut hitsausnopeus mitattiin hitsauspään laser-osoittimen ja sekuntikellon avulla. Suutinetäisyys asetettiin jokaisen hitsin kohdalla arvoon 25 mm eli pidettiin vakiona. Koehitsit hitsattiin vuorotellen niin, että ensin hitsattiin molempien virtatyyppien ensimmäiset hitsit, seuraavaksi toiset ja viimeiseksi kolmannet hitsit, jokainen hitsi hitsattiin jäähtyneeseen materiaaliin. Hitsauspään poltinkulma oli noin kolme astetta työntävä koko koesarjan ajan.

4.4 Hitsauskoe vakiovirralla (CC)

Hitsattiin kolmen hitsin koesarja käyttäen CC:ta. Hitsien tunkeuman tarkastelua varten jokaisesta hitsistä otettiin makrokuvat, joita on tarkasteltu tulokset osiossa. Koesarjan hitsien hitsausparametrit on esitetty taulukossa 3, jossa virta- ja jännitearvojen vaihteluväli on luettu virtalähteen monitoreista ja todellinen hitsausnopeus laskettu kokeen aikana mitattujen suureiden mukaan.

Taulukko 3. Vakiovirtakokeen (CC) toteutuneet hitsausparametrit.

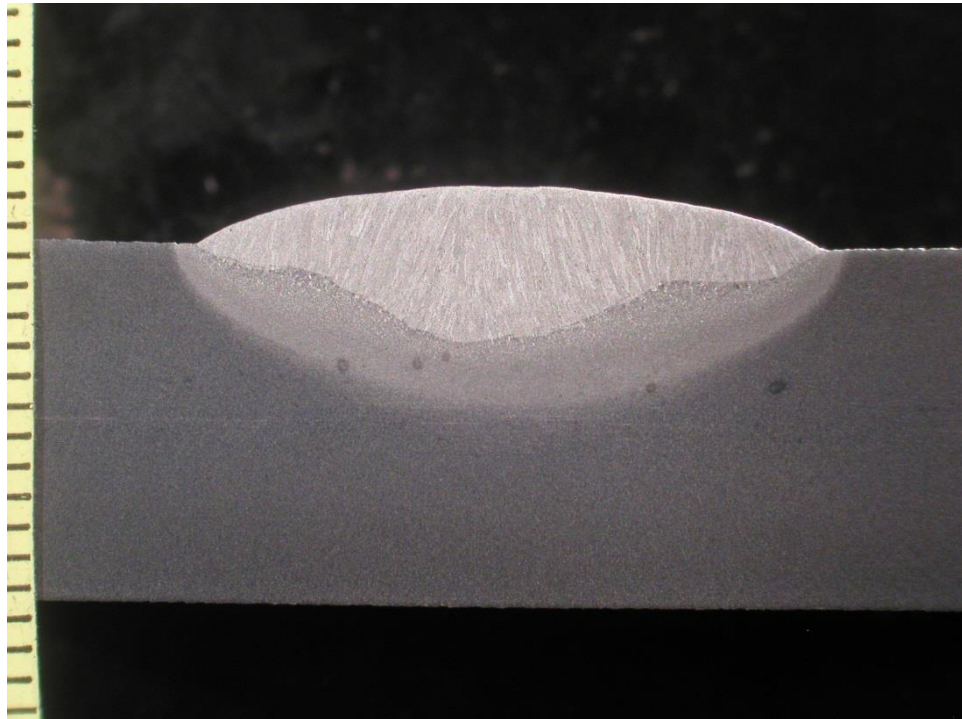
Koehitsi	Hitsausvirta (A)	Jännite (V)	Hitsausnopeus (cm/min)
CC1	410...414	27...29	34,4
CC2	498...502	29...31	34,2
CC3	600...602	32...34	33,5

Vakiovirtaa käytettäessä kyseinen virtalähde pyrkii pitämään hitsausvirran vakiona ja säätämään langansyöttöä jännitteen muuttuessa hitsausympäristön muutoksien mukaan, joten hitsausvirran vaihteluväli on prosentuaalisesti alhaisempi kuin jännitteen vaihtelu.

4.4.1 Tulokset

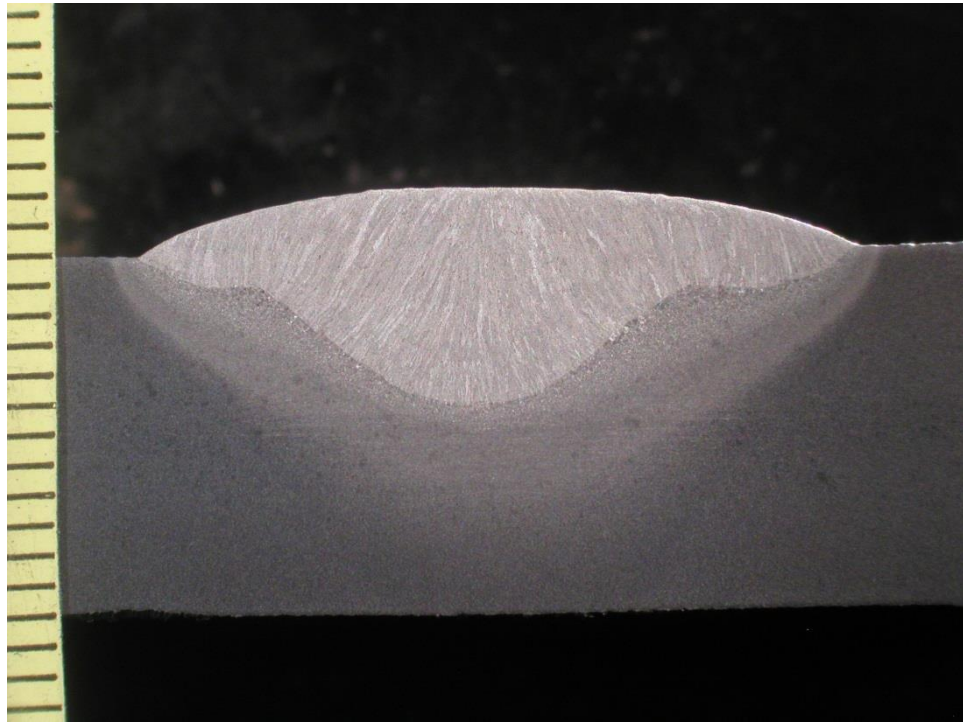
Koehitseistä otetuista makrokuvista saatiin jokaiselle hitsille tarvittavat tunkeumaprofiilin mitat tunkeuman arviointia varten. Apuna käytettiin JMicroVision -ohjelmaa, joka kalibroitiin makrokuvissa näkyvän mittanauhan avulla. JMicroVisionin avulla saatiin hitsin tarkat mitat, sekä tarkka kokonaispinta-ala ja alapuolinen pinta-ala. Mittojen avulla laskettiin jokaiselle hitsille sekoittumisaste ja leveys/syvyys- suhde eli w/d -suhde.

Ensimmäinen koehitsi eli CC1 hitsattiin matalimmilla hitsausparametreilla. Sen sekoittumisasteeksi saatiin 54 % ja w/d -suhteeksi 3,5. Koehitsin makrokuva on esitetty kuvassa 22. Tunkeuman sulamissyvyys on lähes sama kuin kuvun korkeus, joten syvyysprofiili on tunkeuman kannalta huono, mistä syystä koehitsin sekoittumisaste on alhaisempi kuin tyypillisesti positiivisella tasavirralla hitsattaessa. Palon leveys on syvyyteen nähden liian suuri, mikä näkyy korkeana w/d -suhteena.



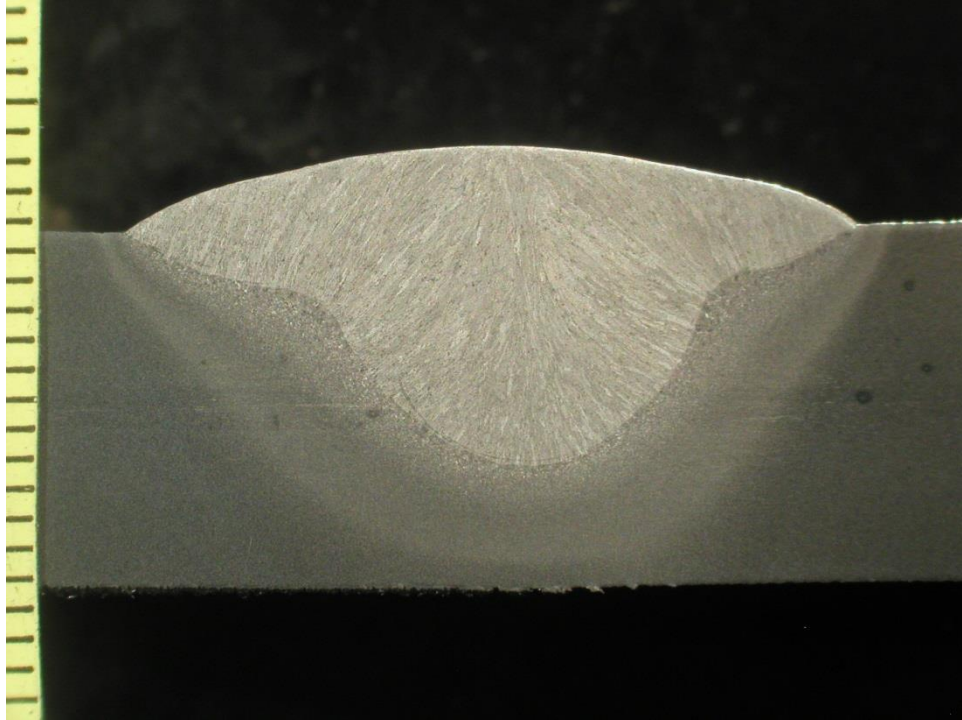
Kuva 22. Makrokuva CC1 hitsistä. 412A, 28V ja 34,4cm/min.

Toinen koehitsi eli CC2 hitsattiin lisäainelangan optimaalisilla arvoilla. Sen w/d -suhteeksi saatiin 3,2 ja sekoittumisasteeksi 62 %. Toisen koehitsin makrokuva on esitetty kuvassa 23. Sekoittumisaste on normaali positiivisella tasavirralla hitsatuksi hitsiksi. Tunkeuman sulamissyvyyden ja itse palon syvyyden perusteella hitsin syvyysprofiili on kohtuullinen, mutta w/d -suhteen perusteella palon leveys on liian suuri verrattaessa syvyyteen. Palkomuodoltaan CC2 hitsi on siis leveä, mutta sulaprofiililtaan huono.



Kuva 23. Makrokuva CC2 hitsistä. 500A, 30V ja 34,2 cm/min.

Korkeimmilla hitsausparametreilla hitsatun koehitsin eli CC3, jonka makrokuva on esitetty kuvassa 24, sekoittumisasteeksi saatiin 66 % ja w/d -suhteeksi 2,7. Syvyysprofiililtaan palko on hyvä, sillä tunkeuman sulamissyvyys on lähes 80 % koko palon syvyydestä, mikä näkyy hyvänä sekoittumisasteena. W/d -suhde on koehitseistä alhaisin, mutta kuitenkin korkea verrattaessa sopivan palon määritelmään, joka on yli 1,2. Kuten aiemmissakin koehitseissä palon leveys on suuri verrattaessa syvyyteen. Lisäksi sulaprofiili on pyrkinyt kääntymään, eikä sulamissyvyyden korkein arvo ole syntynyt keskelle hitsiä.



Kuva 24. Makrokuva CC3 hitsistä. 601A, 33V ja 33,5cm/min.

Vakiovirralla hitsattujen koehitsien w/d -suhdetta tarkasteltaessa huomataan, että jokaisella hitsillä se ylittää kirjallisuudessa mainitun sopivan palkomuodon määritelmän eli suhde on suurempi kuin 1,2 (Kyröläinen & Lukkari, 1999, s. 57). W/d -suhde on korkeimmallakin hitsausvirralla lähes kolminkertainen optimiarvoon nähden eli palon syvyys ei kasva tarpeeksi hitsausvirran kasvaessa, vaan palko pyrkii levenemään entisestään. Koehitsien perusteella käytetyllä hitsausvirralla on suora vaikutus tunkeuman sulamissyvyyteen ja leveyteen, sekä sitä kautta sekoittumisasteeseen ja w/d -suhteeseen. Hitsausvirtaa kasvatettaessa sekoittumisaste nousee ja w/d- suhde lähenee sopivaa arvoa. Mitat ja niiden avulla lasketut tunkeuman arviointiperusteet eli leveys/syvyys -suhde ja sekoittumisaste on esitetty taulukossa 4. Koehitsien sulaprofiili on kaikissa kolmessa hitsissä hieman maljamainen, mikä korostuu hitsausvirtaa kasvatettaessa.

Taulukko 4. Vakiovirralla (CC) hitsattujen hitsien tunkeumaprofiilien arviointikriteerit.

Koehitsi	Hitsausvirta (A)	Sekoittumisaste (%)	Sulamissyvyys (mm)	Leveys (mm)	Syvyys (mm)	w/d - suhde
CC1	410...414	54	3,4	20,9	5,9	3,5
CC2	498...502	62	5,4	23,8	7,3	3,2
CC3	600...602	66	8.1	28,9	10,8	2,7

4.5 Hitsauskoe vakiojännitteellä (CV)

Hitsauskokeessa hitsattiin kolmen hitsin koesarja CV:lla. Hitsauksen jälkeen hitsatuista paloista tehtiin hiepalat, joista otettiin makrokuvat tunkeuman tarkastelua varten. Hitsauskokeiden hitsausparametrit ovat esitetty taulukossa 5. Hitsausvirran ja jännitteen suurin ja pienin arvo on luettu invertterivirtalähteen näytöltä ja todellinen hitsausnopeus laskettiin kokeen aikana mitattujen arvojen avulla.

Taulukko 5. Vakiojännitekokeen (CV) toteutuneet hitsausparametrit.

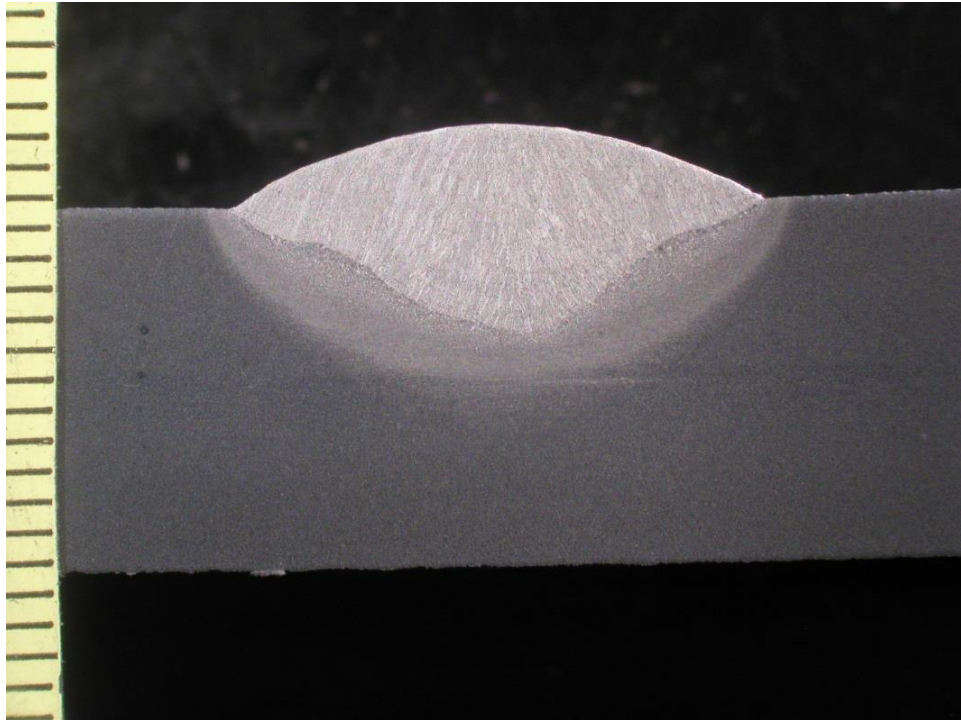
Koehitsi	Hitsausvirta (A)	Jännite (V)	Hitsausnopeus (cm/min)
CV1	407...415	27,7...27,8	34,4
CV2	489...501	28,7...29,8	34,2
CV3	584...605	30,8...31,9	32,5

Kyseinen jauhekaarilaitteisto vakiojännitesäädöllä pyrkii pitämään jännitteen ja langansyöttönopeuden vakiona ja pitää hitsaustapahtuman vakaana hitsausympäristön muuttuessa säätämällä hitsausvirtaa.

4.5.1 Tulokset

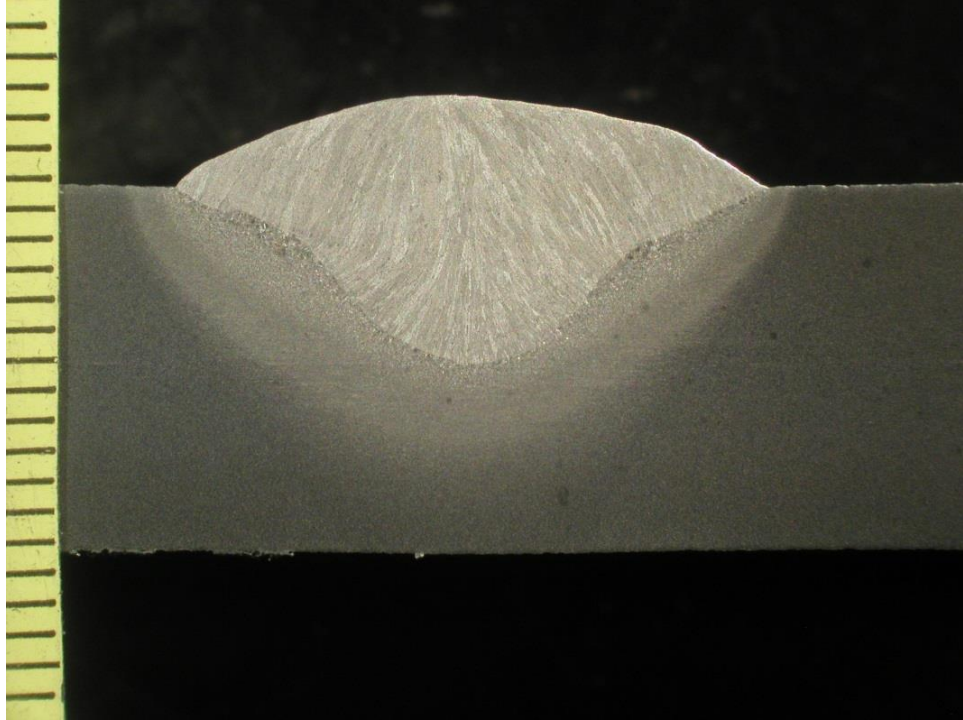
Koehitsisarjan kolmesta hitsauspalosta otettiin makrokuvat, joita analysoitiin JMicroVision- ohjelmalla. Kalibrointi suoritettiin makro kuvissa näkyvän mittanauhan avulla. Analysoinnissa tutkittiin tunkeumaprofiilin mittoja, jotka olivat muun muassa sekoittumisaste, sulamissyvyys ja leveys/syvyys -suhde eli w/d -suhde.

Ensimmäinen vakiojännitteellä hitsattu koehitsi eli CV1 hitsattiin lisäainelangalle ilmoitetuilla minimiarvoilla, ja hitsin w/d -suhteeksi saatiin 2,6 ja sekoittumisasteeksi 57 %. Ensimmäisen koehitsin makrokuva on esitetty kuvassa 25. W/d -suhde CV1:ssä on korkea, joka kertoo leveästä palosta sen syvyyteen nähden. Lukuarvona sekoittumisaste palossa on matala, joka kertoo sulan tasaisesta sekoittumisesta. Tasaisessa sekoittumisessa tunkeumaprofiilin kokonaispinta koostuu yhtä suuresta kuvun ja sulaprofiilin pinta-alasta. Palkomuodoltaan CV1 on kohtuullinen, sillä leveys on kuitenkin tunkeumaan nähden suuri.



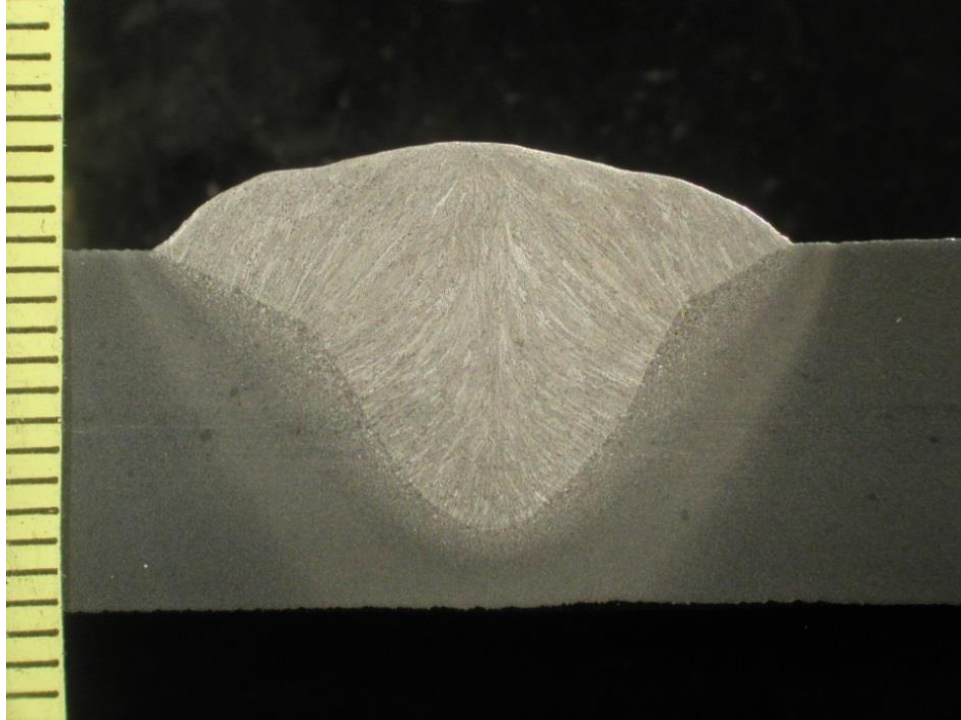
Kuva 25. Makrokuva CV1 hitsistä. 411A, 27,75V ja 34,4cm/min.

Toinen koehitsi eli CV2 suoritettiin lisäainelangan optimaalisilla arvoilla, jolloin w/d -suhteeksi saatiin 2,2 ja sekoittumisasteeksi 59 %. Toisen koehitsin makrokuva on esitetty kuvassa 26. Leveys/syvyys-suhde kertoo leveästä, mutta matalasta palosta sen leveyteen nähden. Sulamissyvyyden osalta palon sulaprofiili on suuri, mutta vastaavasti kuvun korkeus on myös suuri, mikä näkyy sekoittumisasteessa. Palkomuodoltaan CV2 hitsi on hyvä, mutta riittämätön käyttökohteisiin, joissa vaaditaan syvää tunkeumaa.



Kuva 26. Makrokuva CV2 hitsistä. 495A, 29,25V ja 34,2cm/min.

Viimeisessä koehitsissä eli CV3:ssa hitsattiin lisäainelangalle ilmoitetuilla maksimi-arvoilla. Tässä koehitsissä w/d-suhteeksi saatiin 1,6 ja sekoittumisasteeksi 65 %. Palon w/d-suhde voidaan katsoa erittäin hyväksi, sillä se on lähellä ohjearvoa 1,2, joka kertoo optimaalisesta palkomuodosta. Sekoittumisaste palolla on vakiojännitteellä hitsatuista koehitseistä korkein, mikä kertoo parhaasta sulaprofiilin ja kupuprofiilin suhteesta. Makrokuva CV3:sta on esitetty kuvassa 27. Tunkeuman osalta CV3 sopii käyttökohteisiin, joissa vaaditaan syvää tunkeumaa.



Kuva 27. Makrokuva CV3 hitsistä. 595,5A, 31,35V ja 32,5cm/min.

Vakiojännitekokeissa jännitteen nostolla on merkitys tunkeumaprofiilin mittoihin. Leveys/syvyys -suhteesta huomataan, että jokainen koetulos ylittää ohjearvon 1,2, mikä kuvaa sopivaa palkomuotoa. Jännitteen nostolla on suoraviivainen vaikutus sekoittumisasteeseen ja sulamissyvyyteen: mitä suurempi on syötetty jännite, sitä suurempi on myös sekoittumisaste ja sulamissyvyys. Erityisesti kolmannessa hitsauskokeessa palkomuoto on erinomainen, sillä se on kohtuullisen lähellä ohjearvoa. Kun w/d -suhde on > 1 , hitsin halkeamisen vaara on minimoitu. Makrokuvista mitatut ja lasketut tulokset ovat esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Vakiojännitteellä hitsattujen hitsien tunkeumaprofiilien arviointikriteerit.

Koehitsi	Jännite (V)	Sekoittumisaste (%)	Sulamissyvyys (mm)	Leveys (mm)	Syvyys (mm)	w/d - suhde
CV1	27,7...27,8	57	4,5	17,6	6,9	2,6
CV2	28,7...29,8	59	5,9	19,5	8,9	2,2
CV3	30,8...31,9	65	9,5	21,2	12,9	1,6

5 TULOSTEN VERTAILU JA NIIDEN ANALYSOINTI

Tulosten vertailussa ja analysoinnissa vertaillaan vakiovirralla ja vakiojännitteellä hitsattujen hitsauskokeiden tuloksia. Tulokset ovat kirjattu taulukoihin, jotka sisältävät kunkin koesarjan vastaavilla hitsausparametreilla hitsatut koehitsit. Jokaista koehitsiparia tarkastellaan tunkeuman kannalta ja vertaillaan tunkeuman määrittäviä parametrejä, kuten sekoittumisastetta, w/d -suhdetta ja sulamissyvyyttä.

Ensimmäisten koehitsien CC1:n ja CV1:n sekoittumisasteet, sulamissyvyydet, kuvun korkeudet, leveydet, syvyydet, w/d- suhteet ja toteutuneet hitsausnopeudet ovat esitetty taulukossa 7. Molemmissa koehitseissä sekoittumisaste jää alle 60 %:n, mikä tarkoittaa, että hitsien syvyysprofiili on tunkeuman kannalta huono. Tunkeuman sulamissyvyys on pieni verrattaessa palon kokonaissyvyyteen. CC1 hitsi on CV1 hitsiä leveämpi ja vastaavasti CV1 on tunkeutunut syvemmälle kuin CC1, vaikka suutinetäisyys on ollut molemmissa kokeissa sama. Sulaprofiilin kannalta CV1 on parempi, mikä näkyy huomattavasti parempana w/d -suhteena.

Taulukko 7. CC:lla ja CV:lla hitsattujen ensimmäisten koehitsien vertailtavat parametrit.

Koehitsit	CC1	CV1
Sekoittumisaste (%)	54	57
Sulamissyvyys (mm)	3,4	4,5
Kuvun korkeus (mm)	2,5	2,4
Leveys (mm)	20,9	17,6
Syvyys (mm)	5,9	6,9
w/d -suhde	3,5	2,6
Hitsausnopeus (cm/min)	34,4	34,4

Toisten koehitsien CC2:n ja CV2:n vertailtavat parametrit on esitetty taulukossa 8. Näistä koehitseistä CC2:lla on korkeampi sekoittumisaste, mutta CV2:lla parempi w/d -suhde. CC2 hitsissä sulamissyvyyden suhde palon kokonaisuuteen on parempi kuin CV2:ssa, mikä johtaa parempaan sulan sekoittumiseen. Sulaprofiililtaan CV2 on selkeästi parempi kuin CC2, minkä vuoksi CV2:n w/d -suhde on parempi. CC2 on sulaprofiililtaan huomattavasti liian leveä syvyyteen nähden, sekä siinä syvyystunkeuma on paljon maljamaisempi kuin CV2:ssa. Vaikka CV2 on sekoittumisasteeltaan CC2:ta huonompi, CV2:lla päästään kuitenkin syvempään kokonaistunkeumaan.

Taulukko 8. CC:lla ja CV:lla hitsattujen toisten koehitsien vertailtavat parametrit.

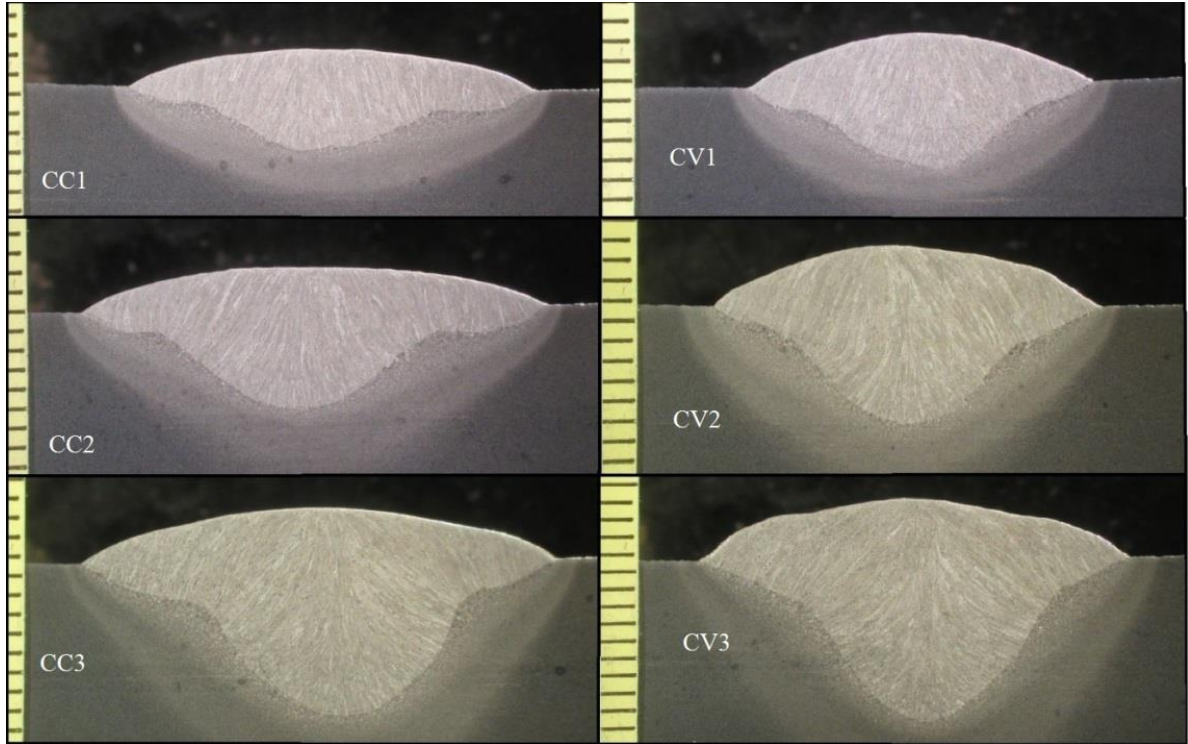
Koehitsit	CC2	CV2
Sekoittumisaste (%)	62	59
Sulamissyvyys (mm)	5,4	5,9
Kuvun korkeus (mm)	1,9	3,0
Leveys (mm)	23,8	19,5
Syvyys (mm)	7,3	8,9
w/d -suhde	3,2	2,2
Hitsausnopeus (cm/min)	34,2	34,2

Kolmansien koehitsien CC3:n ja CV3:n vertailtavat parametrit on koottu taulukkoon 9. Sekoittumisasteet ovat molemmissa hitseissä lähes samat, mutta CV3 hitsissä on huomattavasti parempi w/d -suhde. Syvyysprofiililtaan CC3 on parempi kuin CV3, sillä CV3:ssa lisäaine nostattaa kuvun korkeutta enemmän kuin CC3:ssa. CC3:ssa lisäaine kertyy enemmän kuvun reunoille ja pyrkii levittämään palkoa, jolloin syvyystunkeuman suhde kuvun korkeuteen on CC3:ssa parempi. CV3:ssa kokonaistunkeuma on parempi ja CC3 on huomattavasti leveämpi, jonka vuoksi CV3:n w/d -suhde on matalampi. Sulaprofiililtaan CV3 on hyvä, kun taas CC3:ssa syvyystunkeuma ei ole kohdistunut niin hyvin koko palon alueelle.

Taulukko 9. CC:lla ja CV:lla hitsattujen kolmansien koehitsien vertailtavat parametrit.

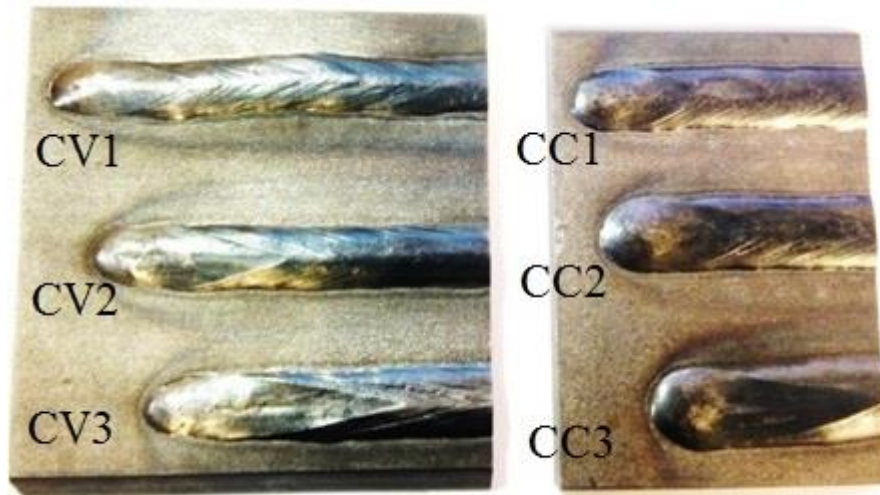
Koehitsit	CC3	CV3
Sekoittumisaste (%)	66	65
Sulamissyvyys (mm)	8,1	9,5
Kuvun korkeus (mm)	2,7	3,4
Leveys (mm)	28,9	21,2
Syvyys (mm)	10,8	12,9
w/d -suhde	2,7	1,6
Hitsausnopeus (cm/min)	33,5	32,5

Molemmilla menetelmillä hitsausarvoja nostettaessa sulamissyvyys kasvaa, w/d -suhde paranee, sekä sekoittumisaste nousee. CC:ta käytettäessä palko levenee huomattavasti, kun vastaavasti CV:lla palon leveys kasvaa vain hieman ja palon korkeus kasvaa enemmän. Hitsauslangan optimiarvoilla hitsatuissa koehitseissä tunkeuman sulamissyvyyksissä on vain 0,5mm ero CV:n hyväksi. CC2:n leveämmän palon takia w/d -suhde on kuitenkin CV2 hitsissä huomattavasti parempi. Vastaavasti CC2:n sekoittumisaste on parempi, sillä sen kuvun korkeus on 1,1mm matalampi. Palkoprofiililtaan CV hitsit ovat korkeampia kuin CC hitsit, mutta sulaprofiililtaan niiden syvyystunkeuma on levinnyt paremmin koko hitsin alueelle, kun vastaavasti CC hitsien syvyystunkeuma on keskittyneempi ja varsinkin korkeammilla hitsausarvoilla maljamaisempi. Kokonaisuutena kaikilla CV hitseillä saavutetaan CC hitsejä parempi syvyystunkeuma ja w/d -suhde. Toteutuneiden hitsausnopeuksien muutokset koehitsien välillä ovat pienet, mutta selkeästi ennen hitsausta asetettua hitsausnopeutta alhaisemmat. Molempien koesarjojen makrokuvat on koottu kuvaan 28 siten, että kuvassa vasemmalla on CC:lla hitsatun koehitsin makrokuva ja oikealla vastaavilla hitsausparametreillä hitsatun CV koehitsin makrokuva.



Kuva 28. Koehitsien kootut makrokuvat. Vasemmalla CC:lla hitsatut hitsit ja oikealla CV:lla hitsatut hitsit.

Koehitsien silmämääräisestä tarkastelusta huomataan, että CV:lla hitsatut hitsit poikkeavat osittain keskilinjasta enemmän. Lisäksi lopetussulan koko kasvaa ja muoto muuttuu hitsausarvojen kasvaessa, sekä niiden muoto on erilainen verrattaessa CV:lla hitsattuja CC:lla hitsattuihin. Kuvassa 29 on esitetty vakiovirta- sekä vakiojännitehitsien lopetussulan muoto ja koko. Hitsauksien aikana tehtiin myös huomioita syttymisen ja hitsausäänen osalta. CV:llä hitsatuissa hitseissä oli ongelmia hitsauksen syttymisen osalta, sekä hitsauksesta lähtevä ääni oli epätasaisempi



Kuva 29. Kuva koehitseistä, jossa näkyy lopetussulan muoto ja koko. Kuvassa vasemmalla on vakiojännitteellä hitsatut hitsit ja oikealla vakiovirralla hitsatut hitsit.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Vakiojännitteillä hitsattujen koehitsien tunkeuma oli kaikilla hitsausarvoilla syvempi ja kapeampi kuin vastaavilla hitsausarvoilla hitsatuissa vakiovirtahitseissä. Vakiojännitehitseissä palon yläpuolinen profiili ei ole yhtä tasainen ja suora kuin vakiovirtahitseissä, vaan sula kiemurtelee palon päällä enemmän eikä lopetussulan muodosta tule yhtä tasainen. Vakiovirtahitseissä saavutetaan vakiojännitehitsejä maltillisempi kuvun korkeus, mutta palosta tulee leveämpi.

Hitsauskokeiden tulosten perusteella hitsausarvojen nostaminen jauhekaarihitsauksessa vaikuttaa syntyvään palkomuotoon monella eri tavalla: tunkeuman sulamissyvyys kasvaa, sekoittumisaste paranee, sekä w/d -suhde paranee. Vakiovirtaa käytettäessä palko levenee huomattavasti hitsausarvojen noston myötä, mutta samalla tunkeuman sulamissyvyyden suhde palon yläpuoliseen korkeuteen paranee. Vakiojännitteellä hitsattaessa palon leveys kasvaa vain hieman, mutta kuvun korkeus nousee liian korkeaksi suhteutettuna leveyteen.

Tunkeuman sulamissyvyyden osalta vakiojännitteellä saavutetaan vakiovirtaa parempi tunkeuma. Sulaprofiililtaan vakiojännitteellä hitsattaessa saavutetaan tasaisemmin tunkeutunut palko, kun taas vakiovirralla syvyystunkeuma pyrkii kasaantumaan keskelle. Lisäksi vakiovirralla syvyystunkeuma pyrkii kääntymään hieman sivuun, mikä voi olla seurausta suuntauksen mahdollisesta muuttumisesta hitsien välillä. Huomioitavaa on kuitenkin, että vakiovirralla palon yläpuolinen profiili on matalampi ja parempi. Paras sulamissyvyys ja palon w/d -suhde saavutettiin vakiojännitteellä hitsatussa hitsissä, jossa käytettiin hitsauslangalle soveltuvia maksimaalisia hitsausarvoja.

Vakiovirralla hitsattaessa langansyöttönopeus määräytyy säätyvän kaarijännitteen mukaan, kun taas vakiojännitteellä langansyöttönopeus pysyy vakiona. Hitsauskokeissa toteutunut hitsausnopeus jäi kyseisellä laitteistolla reilusti alle asetetun 50cm/min, joten oletettavasti langansyöttönopeus oli liian korkea toteutuneeseen hitsausnopeuteen (32,5–34,4 cm/min) nähden. Langansyöttönopeuden ollessa vakiona valokaaren pituus on stabiilimpi ja pysyy lyhyempänä kuin säätyvää langansyöttönopeutta käytettäessä, joten valokaaren aiheuttama lämpöenergia jakaantuu leveämmälle alueelle vakiovirtaa käytettäessä. Osaltaan tästä

syystä vakiovirtahitseissä on suurempi palon leveys ja matalampi sulamissyvyys kuin vakiojännitteellä. Vakiolangansyöttönopeudesta aiheutuneesta lyhyemmästä valokaaresta ja hitaasta hitsausnopeudesta johtuen vakiojännitteellä hitsausarvojen kasvaessa sulaa lisäainetta alkaa kertyä palon keskelle nostattaen kuvun korkeutta.

Hitsauskokeen muina huomioina todettiin vakiojännitteellä heikompi kaaren syttyminen ja epätasaisempi ääni. Epätasaisen äänen osalta voidaan olettaa, että se johtuu osittain vakiojännitehitsauksessa käytettävästä vakiolangansyöttönopeudesta. Syttymisongelmat voivat johtua esimerkiksi lisäainelangan ja perusaineen välisestä huonosta kosketuksesta tai virtalähteen vakiojännitteellä käyttämästä alhaisemmasta tyhjäkäyntijännitteestä.

Tutkimuksissa toteutunut hitsausnopeus on alhainen tyypilliseen jauhekaarhitsaukseen, joten hitsauskoe tulisi suorittaa korkeammalla hitsausnopeudella tai käytetyn laitteiston ohjausyksikkö tulisi kalibroida siten, että asetettu hitsausnopeuden arvo vastaa toteutuvaa hitsausnopeutta. Tällöin nähtäisiin saavutetaanko vakiojännitteellä korkeammillakin hitsausnopeuksilla syvempi tunkeuma kuin vakiovirralla.

6.1 Jatkotutkimuskohteet

Jauhekaarhitsauksessa tunkeumaan ja palkomuotoon vaikuttavia parametreja on useita, kuten myös muissakin kaarihitsausprosesseissa. Vakiojännitteen ja vakiovirran tunkeuman välisiä eroja tulisi tutkia myös muilla hitsausparametreilla, kuten esimerkiksi korkeammalla hitsausnopeudella, eripaksuisella lisäainelangalla ja eripituisilla suutinetäisyyksillä. Mahdollisia jatkotutkimuskohteita kyseisestä aiheesta voisivat olla esimerkiksi:

- suutinetäisyyden vaikutuksen tutkiminen
- hitsausnopeuden vaikutuksen tutkiminen
- lisäainelangan paksuuden merkitys
- magneettisen puhalluksen vaikutus palkomuotoon

LÄHTEET

AB Bayrock, www.bayrock.se. 2014.

Esab, 2005. Hitsiaineentuotto. Hitsausuutiset. 2/2005, Nro 2/2005, s. 8-9

Esab, Spiral welding. [Esab:n [www-sivuilla](http://www.esab.com)] Päivitetty 2014, [Viitattu 25.4.2014].
Saatavissa: <http://www.esab.com/automation/en/industries/pipemills/Spiral-welding.cfm>.

Kyröläinen, A. & Lukkari, J. 1999. Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 530 s. ISBN 951-817-695-7.

Lincoln Electric. [Lincoln Electric:in [www-sivuilla](http://www.lincolnelectric.com)] Päivitetty 2009, [Viitattu 29.5.2014].
Saatavissa:
https://www.oemeyer.com/Media/Default/Industrial/Automation/arcweldingrobotics/customrobotssystem/robotic_saw.pdf

Lincoln Electric. [Lincoln Electric:in [www-sivuilla](http://www.lincolnelectric.com)] Päivitetty 2014, [Viitattu 27.4.2014].
Saatavissa: <http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/constant-current-vs-constant-voltage-output.aspx>.

Lukkari, J. 1986. Tekninen tiedotus 10/86 - Jauhekaarihitsaus. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 154 s. ISBN 951-817-296-x.

Lukkari, J. 2002. Hitsaustekniikka – perusteet ja kaarihitsaus. 4. Painos. Helsinki: Edita PrimaOy. 292 s. ISBN 952-13-1409-5.

Lukkari, J. 2011. Kapearailojauhekaarihitsaus järeiden paineastioiden valmistuksessa. Hitsaustekniikkalehti. Nro 3/2011, s. 15-18.

Miller. [Miller:in [www-sivuilla](http://www.millerwelds.com)] Päivitetty 2014, [Viitattu 31.5.2014]. Saatavissa: <http://www.millerwelds.com/pdf/Submerged.pdf>.

O'Brien, R. L. 1991. AWS Welding Handbook Volume 2. Eighth Edition. Miami: American Welding Society. 955 s. ISBN 0-87171-354-3.

Orsini, T. & Gerbec, D. [The Fabricator:in www-sivuilla] Päivitetty 2010, [Viitattu 24.4.2014]. Saatavissa: <http://www.thefabricator.com/article/arcwelding/improving-productivity-with-submerged-arc-welding> .

Pemamek Oy. 2012. Robotised submerced arc welding. Pemanews. s. 3-5.

Retco. [Retco:n www-sivuilla] Päivitetty 2014, [Viitattu 27.4.2014]. Saatavissa: <http://www.retco.fi/fi/tuotteet/11/39/293>

Ruukki, 2013. Multisteel Rakenneteräkset. [Ruukin www-sivuilla] Päivitetty 2013, [Viitattu 25.4.2013]. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Hot-rolled-steels/Rakenneterakset/Multisteel-rakenneterakset>.

Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry, 1996. SFS-Käsikirja 54: Hitsaussanasto. 2. Painos. Helsinki: SFS-Julkaisut. 479 s. ISBN 952-9591-84-5.

The Lincoln Electric Company, 1973, The procedure handbook of arc welding. Twelfth Edition. Ohio: Cleveland.

LIITTEET

Liite 1. Aines- ja analyysitodistus

Liite 1. Aines- ja analyysitodistus

AINESTODISTUS TEST REPORT

EN 10 204-3.1 (2004)

3/4
A 10559 -001
20.02.2013

RUUKKI
Tilaja / Purchaser:
RUUKKI METALS OY
Tilaus nro / Order No.:
4500552936
Lähtökohta / Origin:
MULTISTEEL N/S355N/S355K2+N
Laatuvaatimukset / Quality Specifications:
WELDABLE FINE-GRAIN STEEL FOR STRUCTURAL PURPOSES

Vaasanoitaja / Consignee:
RUUKKI METALS OY
Asiakkaan merkki / Shipping mark:
Lisävaatimukset / Additional requirements:
Jatkuvaleikkaus happolanäistä / Oxygen steel, continuous casting
Fully killed, Fine grain practiced

Pos. Item	Sulatus, kera nro / Cast. test No.	T-tila Cond	Tensioke / Tensile test	Velokoe K2	REH MPa	REH MPa	REH MPa	RM MPa	RM MPa	RM MPa	AS	REH / RM	RAZ %	Kestävyyden keskiarvo / Average	RAZ %	Kestävyyden keskiarvo / Average	Huom No	Plastiin Temperointi / °C	
010	65278	041	NR	11	451	569	29	1	2	3	50	80	200	1	2	3	1	2	3
NR-NORMALIZING ROLLING																			
Pos. Item	Sulatus, kera nro / Cast. test No.	T-tila Cond	Iskukeuh Impact test	K3	°C	1	2	3	Kestävyyden keskiarvo / Average	1	2	3	Kestävyyden keskiarvo / Average	1	2	3	Huom No	Plastiin Temperointi / °C	
010	65278	041	115 - 020	183	170	178	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	

K3: 115=CH-V/ISO-V(J),7.5X10;TOP.LONGIT,KV600

Raabe Steel Works
Testaus ja tarkastus / Testing and Inspection

JAAKKO JUUSO
JAAKKO JUUSO
Valtuutettu tarkastaja / Authorized inspection representative
Yhtiön nimi / Company Name: **RUUKKI METALS OY**
Kotipaikka / Registered Office: **HELSINKI**

Tilien todistaminen, ettei toimittua on tilausvahvistuksen mukainen.
We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order confirmation.

Puhelin / Telephone: 020 5911
Faksin / Fax: 020 5911
Telekopio / Telex: 020 592 2736

Y-tunnus / Business ID: 2389445-7



ANALYYSITODISTUS ANALYSIS CERTIFICATE
 ANALYSEBESCHEINIGUNG COMPOSITIO CHIMIQUE CERTIFICAT
 СЕРТИФИКАТ АНАЛИЗА

4/4
 A 10559 - 001
 20.02.2013

Prepared Date Datum Date Date
 21.02.2013

IV

Chemical composition % Zusammensetzung % Composition Chimique %
 (*-ppm)

Koe no Test No № пробы	Postilo Item № позиции	Ceolv C С	SI SI	MN Mn	P P	S S	AL Al	NE Ne	V V	TI Ti	CU Cu	CR Cr	NI Ni	MO Mo	N N	B B
65278	010 .40	.154	.44	1.36	.012	.005	.031	.041	.009	.003	.016	0.06	0.04	.005	.004	.0002

CEQ=C+Mn/6+(CR+MO+V)/5+(NI+CU)/15

Raahе Steel Works

Testing and Inspection
 Prüfing und Kontrolle
 Essais et Contrôle
 Yritys ja komponenttien
 Kvaliteetti ja materiaalin
 Tarkastus

Jukka Juuso
 JAAKKO JUUSO
 Valtuutettu tarkastaja
 Sächswärständer
 Authorized inspection representative
 Inspektor autorisat

Yrityksen nimi Company Name: RAUKKI METALS OY
 Korpanteikka Registered Office: HELSINKI
 Yrityksen osoite Address: PL 83, P.O. Box 83
 FIN-00101 ROOHE, FINLAND
 Yrityksen puhelinnumero Telephone: 020 5911
 +358 20 5011
 Yrityksen faksi Fax: 020 592 2736
 +358 20 5011

Steel manufactured and supplied by Raahе Steel Works is free from radiation.
 Valmistettu ja toimitettu Raahе Steel Worksin tuottamana ei säteilyä sisältävänä
 valmistettu teräs on vapaa säteilyä sisältävästä materiaalista.

Yrityksen Business ID: 2389446-7

