

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

KUUMAHALKEILUN ESTÄMINEN AUSTENIITTISEN RUOSTUMATTOMAN
TERÄKSEN HITSAUKSESSA

PREVENTING HOT CRACKING IN WELDING OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL

Lappeenrannassa 29.1.2012

Anne Kalliosaari

0083592

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	4
1.1	Tutkimusongelma ja tavoite	4
1.2	Toimeksiantajan esittely	4
2	AUSTENIITTINEN RUOSTUMATON TERÄS AISI 316L.....	5
3	KUUMAHALKEILU.....	6
3.1	Kuumahalkeilun syyt.....	9
3.1.1	Metallurgiset tekijät.....	10
3.1.2	Jännitys- ja geometriset tekijät.....	12
3.1.3	Muut kuumahalkeiluun vaikuttavat seikat.....	14
3.2	Kuumahalkeilun estäminen.....	14
3.2.1	Kuumahalkeilun estäminen metallurgisesti	15
3.2.2	Kuumahalkeilun estäminen hitsauksen suoritustekniikan avulla	18
4	KOEHITSAUKSET	19
4.1	Hitsattava tuote	19
4.2	Laitteisto ja hitsauslisäaineet.....	21
4.3	Lämmöntuonnin määrittäminen ja laskeminen.....	22
4.4	Koehitsausten kulku	24
4.4.1	Pohjapalkojen TIG-hitsaus.....	24
4.4.2	Pohjapalkojen MAG-hitsaus.....	25
4.5	Geometriamuutokset kappaleisiin.....	26
4.6	Ferriittipitoisuudet ja mikrorakenteet.....	27
5	TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET	31
6	YHTEENVETO.....	32
	LÄHDELUETTELO	34
	LIITTEET	

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

A	austeniittinen
AF	auteniittis-ferriittinen
FA	ferriittis-austeniittinen
F	ferriittinen
I	hitsausvirta [A]
I_b	perusvirta pulssitetussa hitsauksessa [A]
I_m	keskivirta pulssitetussa hitsauksessa [A]
I_p	huippuvirta pulssitetussa hitsauksessa [A]
k	hitsausprosessin terminen hyötysuhde
Q	lämmöntuonti [kJ/mm]
T_b	perusvirran kesto pulssitetussa hitsauksessa [ms]
T_p	huippuvirran kesto pulssitetussa hitsauksessa [ms]
U	kaarijännite [V]
v	hitsausnopeus [mm/min]
316	300-sarjaan kuuluva austeniittinen ruostumaton teräs
316L	austeniittinen ruostumaton teräs, jonka hiilipitoisuus on alle 0,03 %
AISI	American Iron and Steel Institute
BTR	Brittleness Temperature Range (lämpötila-alue, jolla jähmettyvän metallin sitkeys alenee)
FN	Ferrite Number (ferriittinnumero)
MAG	Metal Active Gas Welding (MAG-hitsaus)
MIG	Metal Inert Gas Welding (MIG-hitsaus)
PVR	Programmierter Verformungsriß-Versuch (kuumahalkeamakoe, ei vakiintunutta suomennosta)
TIG	Tungsten Inert Gas Welding (TIG-hitsaus)
WRC	Welding Research Council

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimusongelma ja tavoite

Tämä kandidaatintutkielma käsittelee teoreettisesti ja kokeellisesti Rämö Oy:n toimeksiannosta venttiilin ja toimilaitteen välille tulevan jatkoputken kuumahalkeiluongelmaa. Teoreettisessa osassa esitellään jatkoputken materiaali, haponkestävä ruostumaton teräs AISI 316L, ja käsitellään kuumahalkeilun syitä ja estämistä. Kokeellisessa osuudessa etsitään keinoa estää kuumahalkeilu, kun hitsattava materiaali on ruostumaton teräs AISI 316L ja käytettävissä olevat hitsausprosessit ovat mekanisoitu TIG- tai mekanisoitu MAG-hitsaus.

Työn tavoitteena on tunnistaa teorian perusteella jatkoputken kuumahalkeilua edistävät tekijät ja esittää kokeellisen osuuden lopuksi hitsausparametrit, joilla jatkoputki voidaan hitsata ilman kuumahalkeilua.

1.2 Toimeksiantajan esittely

Rämö Oy on imatralainen yritys, jonka toimintaa leimaa vahvasti pyrkimys hyvään laatuun ja asiakastyytyväisyyteen. Yritys valmistaa paperi-, kartonki- ja pahviteollisuuden koneita, venttiilin vaimentimia sekä muita venttiileihin liittyviä osia ja rauditusverkkoja.

Konepajan puolella valmistettavat osat ovat tilauksesta tehtäviä tuotteita ja ne ovat tavallisesti yksittäiskappaleita. Tuote voidaan valmistaa yhdessä paikassa alusta loppuun, sillä konepaja koostuu levy- ja koneistusosastojen lisäksi pintakäsittelyosastosta. Teräsverkkotehtaan puolella valmistetaan varastoitavien vakioverkkojen lisäksi määrämittäisiä suoria verkkoja ja taivutettuja verkkoraudotteita.

Viimeisimmän vahvistetun tilinpäätöksen mukaan Rämö Oy:n liikevaihto oli noin 8,36 miljoonaa euroa. Yrityksen henkilöstömäärä oli 73. Tällä määrällä se ylittää lähes 10 suurimman työnantajan joukkoon Imatralla.

2 AUSTENIITTINEN RUOSTUMATON TERÄS AISI 316L

AISI 316L kuuluu austeniittisiin ruostumattomiin teräksiin. Maailmanlaajuisesti austeniittisten terästen osuus kaikkien ruostumattomien terästen tuotannosta on noin 70 % (Arantes & Trevisan 2007, s. 407). Austeniittisiä teräksiä käytetään laajalti hyvien korroosionkesto- ja kuumankesto-ominaisuuksien vuoksi (Zumelzu et al. 1999, s. 36) ja niitä luonnehditaan lisäksi sitkeiksi, kylmämuovattaviksi ja hitsattaviksi (Lukkari 1999). Austeniittisiä teräksiä käytetään mm. öljy- ja kaasuteollisuudessa, kemian teollisuudessa, paperi- ja selluteollisuudessa, elintarviketeollisuudessa, koneenrakennuksessa ja ajoneuvoissa. Koska austeniittiset teräkset ovat alhaisissakin lämpötiloissa sitkeitä eikä niillä ole lohkomurtuma-alttiutta, niitä käytetään rakenneaineina mm. nesteytettyjen kaasujen säiliöissä (Lukkari 1999).

Austeniittinen ruostumaton teräs sisältää vähintään 8 % nikkeliä, jotta austeniittinen faasi jää pysyväksi alhaisissakin lämpötiloissa ja noin 18 % kromia, jotta teräksen korroosionkesto muodostuu riittäväksi (Korinko & Malene 2001, s. 61). Ruostumaton teräs AISI 316L sisältää kromia noin 16,5 – 19,0 %, nikkeliä 10 – 15 % ja molybdeenia 2,0 – 3,0 %. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 35) Molybdeenilisäys parantaa korroosionkestoja erityisesti kloridolosuhteissa (Lukkari 1999, s. 27). Tästä syystä teräslaatua AISI 316L kutsutaan haponkestäväksi.

Eräänä austeniittisten ruostumattomien terästen hyvänä ominaisuutena pidetään karkenemattomuutta. Karkenemattomuudesta johtuen suuri lämmöntuonti ei aiheuta tavallisesti lujuuden tai sitkeyden alentumista muutosvyöhykkeellä (Kyröläinen & Lukkari 2002). Lisäksi vähähiilisen ($C < 0,03$ %) AISI 316L erityisominaisuuksiin kuuluu, ettei se ole altis herkistymiseksi kutsutulle ilmiölle, sillä alhainen hiilen määrä estää kromikarbidiinien syntymistä hitsauksen aikana. Tällöin perusaineen korroosionkesto ei heikenny. (Korinko & Malene 2001, s. 61)

Austeniittisen ruostumattoman teräksen fysikaaliset ominaisuudet on koottu taulukkoon 1. Taulukkoon on vertailun vuoksi koottu myös ferriittisen, austeniittis-ferriittisen sekä martensiittisen ruostumattoman teräksen fysikaaliset ominaisuudet.

Taulukko 1. Ruostumattomien terästen fysikaalisia ominaisuuksia. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 37)

	Magneet- tisuus	Lämmön- johtavuus 20 °C W/Km	Pituuden lämpölaaje- nemiskerroin 20 – 100 °C 10 ⁻⁶ 1/K	Kimmo- moduuli 20 °C 10 ⁵ N/mm ²	Tiheys 20 °C g/cm ³	Resistiivisyys 20 °C Ω mm ² /m
Austeniittiset	ei	13 – 15	15 – 17,5	2,0	7,9 – 8,0	0,7 – 1,0
Ferriittiset	on	23 – 25	10 – 10,5	2,2	7,7	0,6 – 0,7
Austeniittis- ferriittiset	on	16	13	2,0	7,8	0,8
Martensiittiset	on	25	10,5	2,2	7,7	0,6 – 0,8

Taulukosta 1 voidaan havaita, että austeniittisten terästen lämmönjohtavuus on pienempi ja lämpölaajenemiskerroin suurempi kuin muilla ruostumattomilla teräksillä. Tästä johtuen austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat muita ruostumattomia teräksiä alttiimpia hitsausmuodonmuutoksille. Austeniittisillä ruostumattomilla teräksillä on myös alttius kuumahalkeilulle.

3 KUUMAHALKEILU

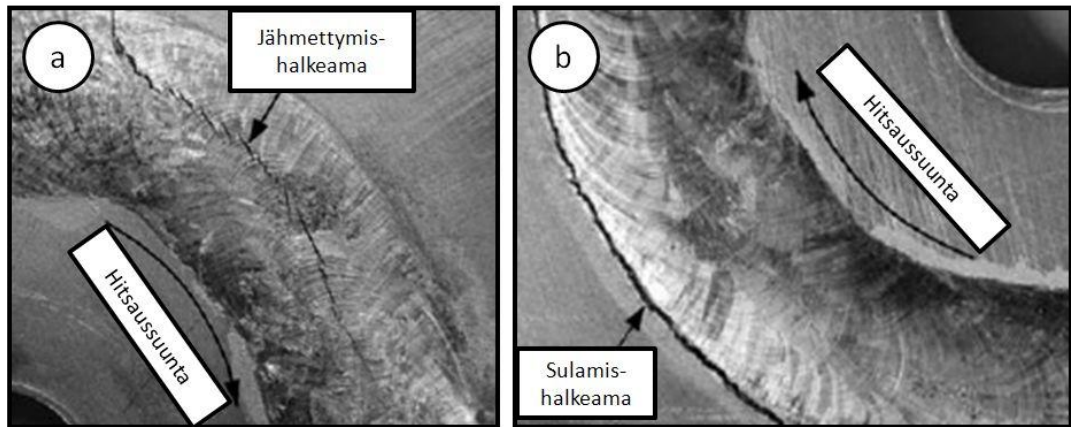
Vähähiilisten austeniittisten ruostumattomien terästen sanotaan olevan hyvin ja halkeamattomasti hitsattavissa tavallisesti käytössä olevilla kaariprosesseilla, sillä näiden prosessien maltillisen lämmöntuonnin johdosta myös jäähtymisnopeus ja sulan jähmettymisnopeus pysyvät kohtuullisina. (Korinko & Malene 2001, s. 62). Tilanne ei ole kuitenkaan näin yksinkertainen, sillä kuumahalkeilu on monimutkainen ilmiö, johon vaikuttavat monet toisistaan riippuvat tekijät. Näin ollen merkittävä osuus austeniittisten ruostumattomien terästen hitsausta käsittelevistä teksteistä keskittyy kuumahalkeilun syihin ja estämiseen.

Kuumahalkeilulla tarkoitetaan halkeilua, joka ilmenee hitsauksen, valamisen tai muun kuumatyöstön aikana lämpötilassa, joka on lähellä materiaalin sulamispistettä. Kuumahalkeamia ei koskaan muodostu täysin jähmettyneeseen hitsiin, joten halkeamien syntyminen edellyttää, että hitsissä on sekä jähmettyneitä että sulassa tilassa olevia faaseja. Sula esiintyy tällöin kalvoina raerajoilla. (Wolf et al. 2008, s. 247; Wolf et al. 2005, s. 78)

Halkeilu jaotellaan tavallisesti sulamis- tai jähmettymishalkeiluksi. Näistä jähmettymishalkeilua pidetään haitallisempana ja tästä syystä sitä on tutkittu enemmän (Shankar et al. 2003A, s. 359). Lee et al. (2009, s. 154) jaottelevat kuumahalkeilun kolmeen eri tyyppiin halkeaman esiintymispaikan sekä sen kehittymiseen vaikuttavan lämpötilan mukaan. Suomenkielisessä kirjallisuudessa kuumahalkeilu jaotellaan jähmettymishalkeiluun ja sulamishalkeiluun (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 102), mutta Leen mainitsema kolmannelle kuumahalkeamatyypille (ductility-dip cracking) ei ole suomenkielistä nimitystä. Tässä tutkielmassa ei jaotella kuumahalkeilua eri tyyppeihin, vaan kaikista eri kuumahalkeamatyypeistä käytetään nimitystä kuumahalkeama.

Kuumahalkeamat ilmenevät rakeiden tai dendriittien välisinä halkeamina, jotka voivat pituudeltaan olla vain muutaman mikrometrin mittaisia tai koko hitsin pituudelle ylettyviä. Kuumahalkeamat voivat olla niin suuria, että ne ovat silmin havaittavissa tai ne voivat olla mikrohalkeamia, joiden olemassa olo ilmenee erityisen kylmissä olosuhteissa. Tällöin puhutaan lämpötiloista, jotka ulottuvat aina -196 °C lämpötilaan saakka. Toisaalta mikrohalkeamien olemassaolo voi ilmetä myös silloin, kun hitsiin kohdistuu suuria rasituksia, joten halkeamien syntymisen välttäminen on erityisen tärkeää turvallisuuden kannalta. (Wolf et al. 2008; Zumelzu et al. 1999, s. 36)

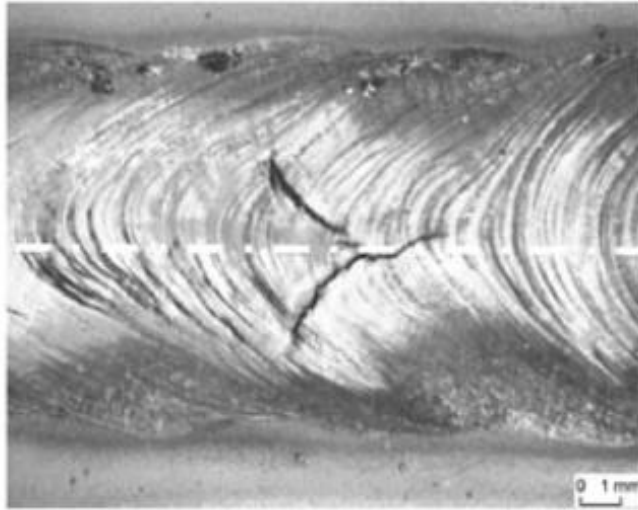
Kuumahalkeamat esiintyvät joko hitsin viimeiseksi jäätyvässä osassa, ts. hitsin keskellä jähmettymishalkeamina tai hitsin vieressä sulamishalkeamina hitsin osittain sulaneella vyöhykkeellä (Kou 2003A). Kuvassa 1 sivulla 8 on nähtävissä sekä hitsin keskellä että hitsin osittain sulaneella vyöhykkeellä esiintyvää halkeilua. Osittain sulanut vyöhyke voi perusaineen lisäksi muodostua myös hitsipalkoon. Näin on tilanne monipalkohitsauksessa, jossa jo aiemmin hitsatun palon päälle hitsataan uusi palko. Kyröläisen & Lukkarin (2002, s. 110) mukaan monipalkohitsauksen aiheuttamat osittain sulaneella vyöhykkeellä ilmenevä kuumahalkeilu lienee yleisempi ilmiö kuin perusaineen osittain sulaneen vyöhykkeen kuumahalkeilu.



Kuva 1. Kuumahalkeilu voi esiintyä joko hitsin keskellä jähmettymishalkeamina (tapaus a) tai sulamishalkeamina hitsin osittain sulaneella vyöhykkeellä (tapaus b). (Kou 2003A, s 38)

Koska kuumahalkeilu on merkittävä ongelma austeniittisen teräksen hitsauksessa eikä kuumahalkeilualttiutta pystytä pelkän materiaalin seostuksen perusteella ennustamaan, on kehitetty erilaisia kokeita, joilla pyritään mittaamaan perusaineen, hitsauslisäaineiden tai näiden yhdistelmien kuumahalkeilualttiutta. Kokeet voidaan jakaa kolmeen ryhmään sen mukaan, minkälainen voima hitsiin kokeen aikana vaikuttaa. Yksinkertaisimmillaan kuumahalkeilualttius voidaan todeta T-liitoskokeen avulla, jossa ensin hitsattu suurempi hitsi aiheuttaa jälkimmäiseen hitsiin rasituksen. Halkeilualttius todetaan sen perusteella, syntyykö jälkimmäiseen hitsiin halkeamia vai ei. (Heuser 2008, s. 308)

Toiseen ryhmään kuuluvissa kokeissa käytetään ulkoista ei-mitattavissa olevaa voimaa ja kolmannessa mitattavissa olevaa ulkoista voimaa. Näistä eniten käytettyjä ovat kolmannen ryhmän Varestraint-testit, joita ovat Varestraint-, Transvarestraint- ja modifioitu Varestraint-testi eri versioineen. Paljon käytetty on myös PVR (Programmierter Verformungsriß-Versuch) -koe. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 111 – 112; Heuser 2008, s. 313) Näillä testeillä halkeamat ilmestyvät siihen kohtaan hitsiä, jossa jähmettyvän hitsin sitkeys on alhaisimmillaan. Kuvassa 2 on nähtävissä Varestraintin testillä aikaansaatuja halkeamia hitsissä, joka on hitsattu TIG-prosessilla.



Kuva 2. Kuumahalkeiluherkkyttä testaavalla Varestaintin testillä aikaansaatuja halkeamia TIG-prosessilla päällehitsatussa AISI 316L -hitsissä. (Wolf et al. 2008)

Testien ongelmana on pidetty sitä, että kuumahalkeilua ei välttämättä voida välttää, vaikka testien mukaan materiaali ei olisi kuumahalkeilulle altis, sillä hitsisulan ympärille paikallisesti muodostuvat jännitystilat voivat tietyssä rakenteessa olla varsin erilaiset testin koekappaleisiin verrattuna. Toisaalta testeissä ei oteta huomioon kaikkia tekijöitä, joilla on merkitystä kuumahalkeamien syntymiseen. Tällaisena tekijänä pidetään mm. hitsisulan geometriaa. (Wolf et al. 2008, s. 77) Lisäksi testien antamien tulosten ongelmana on pidetty sitä, että kuumahalkeilualttiutta ei voida ilmoittaa absoluuttisena arvona siitäkään huolimatta, että paikalliset jännitystekijät olisivat tiedossa, vaan sitä voidaan arvioida ainoastaan suhteessa toisiin materiaaleihin. (Wolf et al. 2005) Tulevaisuuden suuntaus on, että kuumahalkeilua pyritään simuloimaan siten, että simuloinnissa voidaan ottaa huomioon erilaisia muuttujia, mm. hitsausnopeus, lämmöntuonti, seosainepitoisuus, hitsin geometria ja hitsauskiinnittimet. (Cross & Coniglio 2008, s. 55)

3.1 Kuumahalkeilun syyt

Kuumahalkeiluun vaikuttavat tekijät on tunnistettu kirjallisuudessa varsin hyvin, mutta eri tekijöiden välillä vallitsevien suhteiden ja korrelaatioiden tunnistaminen on jo huomattavasti hankalampaa. Tyypillisesti kuumahalkeiluun vaikuttavat tekijät jaotellaan metallurgisiin ja mekaanisiin tekijöihin, vaikka näillä tekijöillä onkin yhteys toisiinsa. Jaottelu tehdään tavallisesti siten, että metallurgiset tekijät vaikuttavat hitsiin

muodostuviin faaseihin. Mekaanisiin tekijöihin puolestaan kuuluvat hitsiin vaikuttavat jännitys- ja rasitustekijät. (Cross 2005, s. 4)

Tässä tutkielmassa noudatetaan edellä mainittua tapaa jaotella kuumahalkeiluun vaikuttavat tekijät, tosin jännityksellisiin tekijöihin lasketaan tässä kuuluvaksi myös geometriset ja rakenteen jäykkyyteen liittyvät tekijät. Sen lisäksi käsitellään muita, lähinnä hitsauksen suoritustekniikkaan liittyviä tekijöitä omassa kappaleessaan.

3.1.1 Metallurgiset tekijät

Joko suoraan tai epäsuorasti seosaineisiin sekä mikrorakenteisiin liittyviä kuumahalkeiluun vaikuttavia tekijöitä ovat mm.

1. jähmettymislämpötila-alue
2. primäärinen faasi
3. raerakenne
4. jähmettyvän hitsin sitkeys
5. jähmettyvän hitsin taipumus kutistua (Kou 2003B, s. 268; Kou 2003A, s. 38)

Metallurgiset tekijät ovat ainakin osittain tekemisessä myös jännitystekijöiden kanssa, sillä ne vaikuttavat siihen, millä lailla hitsi suhtautuu kutistumisesta aiheutuviin jännityksiin. Tästä syystä jähmettyvän hitsin sitkeyttä ja taipumusta kutistua käsitellään myös kappaleessa 3.1.2, jossa käsitellään kuumahalkeiluun vaikuttavia jännityksellisiä tekijöitä.

Kuumahalkeilua esiintyy vain silloin, kun metallissa on sekä sulassa että jähmeässä tilassa olevia faaseja. Mitä laajempi metallin jähmettymislämpötila-alue, sen pidempään se on halkeamien syntymiselle alttiissa tilassa, sillä sulan metallin lujuus on alhaisempi jähmettyneeseen metalliin verrattuna. On havaittu, että jähmettymislämpötila-alueeseen vaikuttavat erityisesti epäpuhtaudet, jotka muodostavat alhaisissa lämpötiloissa sulavia yhdisteitä, jolloin jähmettymislämpötila-alue pääsee laajenemaan. (Kou 2003B) Austeniittisen teräksen AISI 316/316L sulamislämpötila on noin 1419 °C ja jähmettymisalue noin 85 °C. Alhaisissa lämpötiloissa sulavien yhdisteiden tyypilliset sulamislämpötilat ovat noin 1000 – 1200 °C. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 65; Shankar et al. 2003A, s. 370)

Kun tarkastellaan epäpuhtauksia ja seosaineita nimenomaan jähmettymislämpötila-alueen laajenemisen kannalta, haitallisina voidaan pitää rikkiä, fosforia, booria, niobia, titaania ja piitä, sillä niillä kaikilla on voimakas taipumus muodostaa alhaisissa lämpötiloissa sulavia yhdisteitä raudan, kromin ja nikkelin kanssa. (Shankar et al. 2003A, s. 371)

Vaikka niobi, titaani ja pii ovat kuumahalkeilua edistäviä seosaineita, on niillä merkityksensä ruostumattomien terästen seosaineina ja siksi ei voida ajatella, että mainittuja seosaineita ei tulisi käyttää lainkaan ruostumattoman teräksen valmistuksessa. Titaanin ja niobin merkitys on siinä, että ne sitovat hiiltä karbideiksi ja siten estävät herkistymistä. Lisäksi titaani hienontaa raekokoa, ja pii toimii deoksidointiaineena ja parantaa hilseilynkestoa. (Lukkari 1999) Toisaalta myös rikillä on merkityksensä hitsauksessa, sillä sen on todettu parantavan tunkeumaa (Korinko & Malene 2001, s. 65).

Epäpuhtauksista haitallisimpia ovat rikki ja fosfori, jotka kumpikin muodostavat raudan, kromin ja nikkelin kanssa helposti raerajoille leviäviä sulfidi- ja fosfidikalvoja. Raerajoilla ne sekä alentavat jähmettymislämpötilaa sekä alentavat lujuutta. Sulfidikalvojen tiedetään muodostuvan austeniittiseen mikrorakenteeseen jopa niinkin pienellä painoprosenttiosuudella kuin 0,005. (Shankar et al. 2003B, s. 176)

Hitsin primäärinen mikrorakenne vaikuttaa kuumahalkeiluun merkittävästi. Ferriitin hilarakenne on tilakeskinen kuutiollinen, austeniitin taas pintakeskinen kuutiollinen. Näistä ferriitin hilarakenne on avoimempi, kun taas austeniitin hilarakenne on tiiviimpi eikä niin altis diffuusiolle. (Kou 2002, s. 244) Tämä selittää, miksi epäpuhtaudet ovat huonosti austeniittiin liukenevia. Austeniittinen mikrorakenne hylkii epäpuhtauksia, jolloin ne pääsevät rikastumaan voimakkaasti raerajoille. Täysausteniittinen mikrorakenne onkin siten kaikkein altein kuumahalkeilulle. Onkin esimerkiksi havaittu, että lämpötilassa 1147 °C fosforin liukenevuus austeniittiseen mikrorakenteeseen on vain 0,25 painoprosenttia, kun taas lämpötilassa 1050 °C sen liukenevuus ferriittiseen mikrorakenteeseen on 2,8 painoprosenttia. (Shankar et al. 2003A, s. 371) Austeniittista mikrorakenteen muodostumista edistäviä seosaineita ovat nikkeli, mangaani, hiili, typpi ja kupari. (Díez & Liu 2007, s. 1) Näin ollen esimerkiksi typpilisäys suojaasuun voi lisätä kuumahalkeilutaipumusta (Shankar et al. 2003B, s. 180).

Hienorakeinen mikrorakenne ei ole yhtä altis kuumahalkeilulle kuin karkearakeinen. Tämä selittyy sillä, että hienorakeisessa mikrorakenteessa on enemmän raerajoja kuin karkearakeisessa, jolloin syntyvät jännitykset pääsevät jakaantumaan tasaisemmin raerajoille. Koska hienorakeisessa mikrorakenteessa raerajat ovat kapeita, ei raerajoille pääse muodostumaan suuria kuumahalkeilualttiutta lisääviä epäpuhtauskeskittyviä. (Kou 2003A, s. 41; Cross 2005, s. 10)

Austeniittinen mikrorakenne on alttiimpi kuumahalkeilulle myös suoraviivaisen raerakenteensa vuoksi. Austeniittisen mikrorakenteen raerakennetta voidaan kuvata suoraksi ja jatkuvaksi, jolloin halkeamat pääsevät etenemään rakeiden välillä huomattavasti helpommin kuin ferriittisessä mikrorakenteessa, jossa raerajat mutkittelevat. (Cross 2005, s. 9) Mikrorakenne myös vaikuttaa jähmettyvän hitsin sitkeyteen sekä hitsiaineen kutistumiseen. Korkeissa lämpötiloissa ferriitti on austeniittia sitkeämpää. Ferriittinen mikrorakenne myös kutistuu jähmettyessään vähemmän kuin austeniittinen. (Shankar et al. 2003A, s. 369)

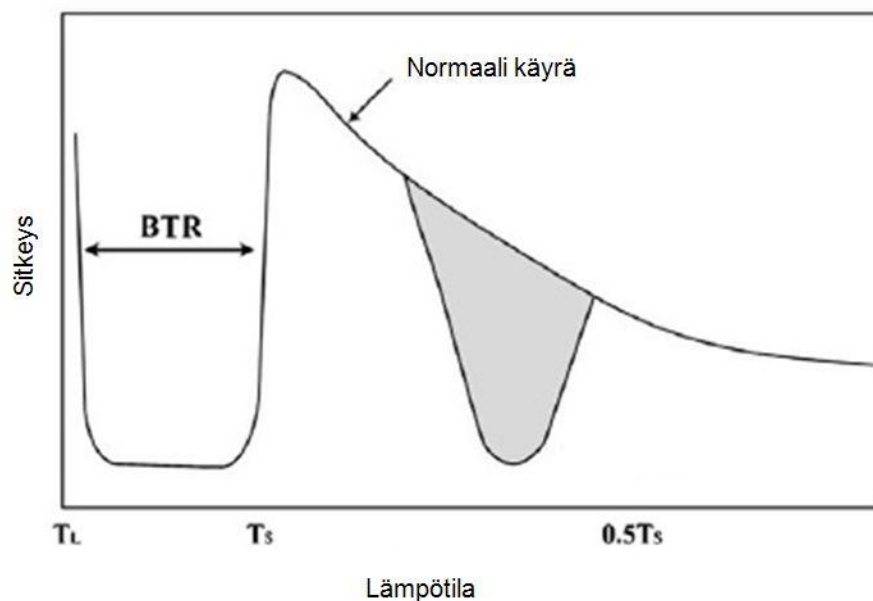
3.1.2 Jännitys- ja geometriset tekijät

Metallit ja metalliseokset kutistuvat tavallisesti jähmettyessään. Kutistuminen johtuu jähmettymiskutistumisesta ja lämpökutistumisesta. Kutistumisesta johtuva tilavuuden muutos vaihtelee metalleilla noin 3 – 6 % välillä (Dong et al. 2006, s. 461). Jos kutistuminen pääsee tapahtumaan vapaasti niin, että se aiheuttaa hitsattuun rakenteeseen muodonmuutoksia, ei kuumahalkeamia todennäköisesti pääse syntymään. Koska muodonmuutokset yleensä pyritään estämään hitsauskiinnittimin, muodostuu hitsiin jännityksiä. Myös hitsin ympärillä oleva hitsauksen aikana vähemmän lämmennyt perusaine estää hitsiä kutistumasta sitä määrää, jonka se vapaasti jähmettyessään kutistuisi, jolloin pääsee syntymään jännitystiloja. (Kou 2003B, s. 263) Austeniittisilla teräksillä on korkea lämpölaajenemiskerroin, mistä syystä niiden alttius kuumahalkeilulle kasvaa. (Kou 2003A, s. 39)

Halkeilua ilmenee, kun jähmettyvän hitsin muodonmuutoskyky ja sitkeys alenevat tietyllä lämpötilavälillä jähmettymisen aikana. Halkeilua ei ilmene niin pitkään, kun hitsiin kohdistuvat jännitykset eivät ylitä jähmettyvän hitsin kestävän jännityksen raja-arvoa tai niin kauan kuin sula metalli pääsee korjaamaan jo syntyneet halkeamat. (Wolf et al. 2005, s. 246) Hitsin jähmettyä ei kuumahalkeilua pääse enää tapahtumaan. On myös esitetty, että suuri jähmettymislämpötila-alue vaikuttaa myös kutistumiseen ja sen

aiheuttamiin jännityksiin. Tämän käsityksen mukaan metalleilla laajempi jäähmettymislämpötila-alue johtaa suurempiin kutistumisesta aiheutuviin jännityksiin. (Cross 2005, s. 4)

Kuvassa 3 on yleinen esitys hitsin sitkeyden muutoksista lämpötilan suhteen. Siinä kuvaajan pystyakselilla on sitkeys ja vaaka-akselilla lämpötila. BTR (brittleness temperature range, lyhenteelle ei ole vakiintunutta suomennosta) kuvastaa lämpötilaväliä, jolla hitsin sitkeys alenee. Tällainen sitkeyden alenema tapahtuu eri materiaaleilla erilaisena, joten eri materiaaleille on laadittu omia käyriään. Kuvassa harmaana näkyvä sitkeyden alentuma puolestaan tapahtuu usein monipalkkohitsauksessa lämpötilassa, joka on austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä noin 50 – 70 % sulamislämpötilasta (Jang et al. 2011; Lee et al. 2009, s. 157). Lee et al. (2009, s.158) havaitsivat ruostumattoman teräksen AISI 304L monipalkkohitsauksessa, että alentuneeseen sitkeyteen liittyvää halkeilua tapahtuu 600 – 900 °C lämpötilassa.



Kuva 3. Hitsin sitkeyden aleneminen lämpötilan suhteen. T_L = sulamislämpötila, T_S = jäähmettymislämpötila. (Jang et al. 2011)

Kuumahalkeiluun vaikuttavia geometrisiä tekijöitä ovat käytettävä railomuoto ja hitsattavan rakenteen jäykkyys. (Wolf et al. 2005) Rakenteen jäykkyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat aineenpaksuus ja voimakkaat aineenpaksuusmuutokset. Aineenpaksuuden suureneminen lisää kuumahalkeilualttiutta. Suuri aineenpaksuus lisää kuumahalkeiluherkkyttä, sillä mitä suurempi aineenpaksuus on, sitä vähemmän

jännitykset pystyvät laukeamaan muodonmuutosten ansiosta. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 109)

Hitsipalon geometria vaikuttaa kuumahalkeiluun kahdella tapaa. Syvät ja kapeat palot ovat matalia ja leveitä alttiimpia kuumahalkeilulle, sillä kapeissa paloissa dendriitit pääsevät kasvamaan lähes toisiaan kohden. Se edistää epäpuhtauksien suotautumista hitsin keskelle, jolloin jännitykset pääsevät repimään hitsiin halkeamia. Myös kuvun muoto vaikuttaa, sillä tasainen tai kupera palko toimii koveraa palkoa paremmin kuumahalkeilun estäjänä. (Kou 2003B, s. 294)

3.1.3 Muut kuumahalkeiluun vaikuttavat seikat

On havaittu, että pisaranmuotoisessa hitsisulassa epäpuhtaudet rikastuvat hitsin keskilinjalle, mikä puolestaan edistää kuumahalkeilua. Pisaranmuotoinen hitsisulasta muodostuu silloin, kun hitsausnopeus on suuri. Toisaalta myös austeniittisen teräksen alhainen lämmönjohtavuus pidentää hitsisulaa (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 60; Cross & Cognilio 2008, s. 53). Jähmettyvät rakeet pyrkivät kasvamaan kohtisuoraan sulan rajaa vastaan, koska se on suunta, johon lämpö poistuu hitsisulasta nopeimmin. Jos hitsausnopeus on suuri, dendriitit pääsevät kasvamaan lähes suorassa toisiaan vastaan, jolloin ne törmäävät toisiinsa hitsisulan vastakkaiselta reunalta kasvaneisiin dendriitteihin. Tällöin on vaarana epäpuhtauksien suotautuminen hitsin keskilinjalle. Alhaisella hitsausnopeudella hitsisula on elliptinen ja rakeet jähmettyvät kaareutuvasti. (Kou 2003B, s. 174 – 176)

Lämmöntuonti vaikuttaa muodostuvaan raekokoon ja myös mikrorakenteeseen. Kun lämmöntuonti on pieni ja jäähtymisnopeus siten suuri, ei kaikki ferriitti ehdi muuttua austeniitiksi, vaan suuri osa jää jäännösferriitiksi. Vastaavasti, jos lämmöntuonti on suuri, on jäähtymisnopeus hidas, jolloin ferriittipitoisuus hitsissä jää pienemmäksi kuin nopeassa jäähtymisessä. (Lin & Chen 2001, s. 167) Raekokoon jäähtymisnopeus vaikuttaa siten, että raekoko muodostuu nopeassa jäähtymisessä hienommaksi. (Kumar & Shahi 2011)

3.2 Kuumahalkeilun estäminen

Kuumahalkeamat ovat monen tekijän summa. Halkeamien syntymiseen vaikuttavat mm. epäpuhtauksien suotautuminen, haitallisten yhdisteiden syntyminen, karkea

raerakenne sekä kutistumisen aiheuttamat jännitystekijät. Tavallisin tapa estää kuumahalkeilua on vaikuttaa metallurgisiin tekijöihin, sillä ne vaikuttavat osittain myös jännitystekijöihin. Koun (2003A, s. 39) mukaan kuumahalkeilu voidaan estää vaikuttamalla hitsin seosaineisiin, raerakenteeseen ja hitsausolosuhteisiin. Hitsausolosuhteiden tulkitaan tässä tarkoittavan yleisesti hitsausprosessia ja -parametreja.

3.2.1 Kuumahalkeilun estäminen metallurgisesti

Tavallinen tapa estää kuumahalkeamien syntyminen austeniittisen teräksen hitseihin on käyttää hitsauksessa lisäaineita, joilla saadaan vaikutettua hitsin primäärisesti muodostuvaan faasiin ja jäännösferritin määrään. Ferritin kuumahalkeilua estävä vaikutus havaittiin jo vuonna 1938, kun huomattiin, että 5 – 35 % ferriittiä hitsissä estää austeniittisen teräksen kuumahalkeilun. (Shankar et al. 2003A, s. 360) Nykykäsityksen mukaan 5 – 10 % jäännösferrittiä riittää estämään kuumahalkeilun, kunhan hitsin mikrorakenne muodostuu primäärisesti ferriittis-austeniittiseksi tai ferriittiseksi. (Kou 2003, s. 39)

Ferriitti toimii kuumahalkeilun estäjänä monin tavoin. Shankar et al. (2003A, s. 369) ovat listanneet ferriitin hyödyiksi mm., että

- Epäpuhtaudet liukenevat ferriittiin paremmin, mikä puolestaan vähentää niiden suotautumista dendriittien väliseen sulaan.
- Ferriitin lämpölaajenemiskerroin on pienempi kuin austeniitin. Ferriittisen mikrorakenteen kutistuminen ei ole siten yhtä suurta kuin austeniittisen mikrorakenteen.
- Ferriitti on korkeissa lämpötiloissa austeniittia sitkeämpää, jolloin se myös sietää jännityksiä paremmin.
- Ferriitillä on pienempi jähmettymislämpötila-alue kuin austeniitilla.

Käytännössä ferriitin määrään hitsissä voidaan vaikuttaa hitsauslisäaineella. Syntyvän ferriitin pitoisuuteen vaikuttavat seosaineiden lisäksi myös valokaaren pituus, suojakaasu, juurikaasu ja palkojen määrä. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 95) Myös jäähtymisnopeus vaikuttaa, sillä ferriitin muodostuminen austeniitiksi perustuu diffuusion. Nopeassa jäähtymisessä diffuusiota ei ehdi tapahtua, jolloin suuri osa ferriitistä jää liitokseen jäännösferritiksi. (Yan et al. 2010, s. 516). Vastaavasti

austeniittisen mikrorakenteen muodostumista edistäviä seosaineita esimerkiksi kaasun joukossa tulee välttää.

Koska primäärisesti muodostuva faasi on olennaisessa roolissa kuumahalkeilun estäjänä, on primääristä faasia pyritty ennustamaan kromi- ja nikkeli-ekvivalenttien avulla. Kromi-ekvivalentin laskennassa otetaan huomioon ne seosaineet, jotka edistävät ferriittisen mikrorakenteen muodostumista ja nikkeli-ekvivalentissa otetaan huomioon ne seosaineet, jotka edistävät austeniittisen mikrorakenteen muodostumista. Koska faasien määrä riippuu enemmän mikrorakenteisiin vaikuttavien seosaineiden suhteesta kuin todellisista seosaineiden määristä, lasketaan tavallisesti ekvivalenttien suhde, Cr_{eq}/Ni_{eq} . Tyypillisesti ferriitti muodostuu primäärisesti faasiksi silloin kun $Cr_{eq}/Ni_{eq} > 1,5$. (Díez & Liu 2007) Korenkon & Malenen (2001) mukaan tyypin 316L teräkselle kuumahalkeilun estämiseen sopiva kromi- ja nikkeli-ekvivalentin suhde vaihtelee 1,42 – 1,90 välillä. Käytännössä on otettava lisäksi huomioon muut liitokseen vaikuttavat seikat, sillä ferriitti primäärisenä faasina ja riittävänä pidetty ferriittimäärä eivät riitä estämään kuumahalkeilua, jos rakenne on erityisen jäykkä tai hitsauksen lämmöntuonti liiallinen.

Ensimmäiset ekvivalenttien laskemiseen käytettävät yhtälöt esitti Schaeffler vuonna 1949, sittemmin yhtälöitä ovat kehittäneet myös DeLong, Hull, Hammar ja Svensson sekä Siewert ja Kotecki. (Korinko & Malene 2001, s. 64) Tässä työssä käytetään ekvivalenttien laskentaan Siewertin ja Koteckin yhtälöitä, jotka tunnetaan kirjallisuudessa lyhenteellä WRC-1992 (Welding Research Council). WRC-1992:n mukaan kromi-ekvivalentti lasketaan yhtälöstä (1)

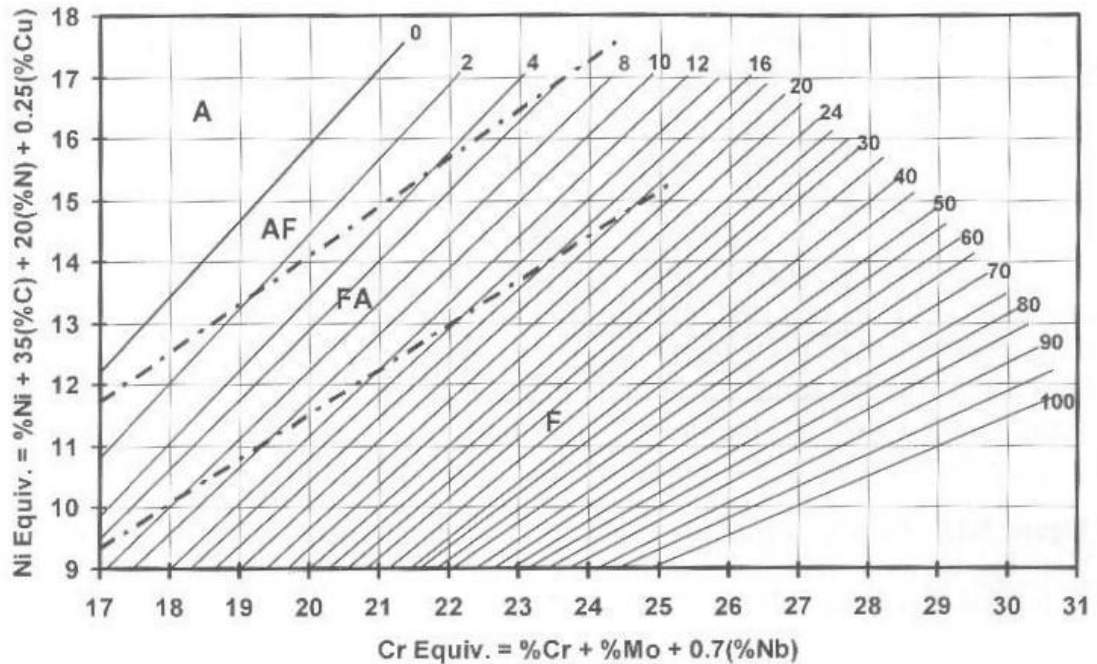
$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0.7Nb \quad (1)$$

ja nikkeli-ekvivalentti yhtälöstä (2)

$$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0.25Cu \quad (2)$$

Seosaineiden pitoisuudet sijoitetaan yhtälöihin sellaisenaan. Laskemalla saatujen ekvivalenttien arvojen perusteella voidaan määrittää hitsin mikrorakenne ja ferriittipitoisuus. Tämä tapahtuu sivulla 18 olevan WRC-1992-diagrammin (kuva 4) avulla. Diagrammiin on merkitty pistekatkoviivalla, millä kromi- ja nikkeli-ekvivalentin arvoilla hitsiin muodostuu ferriittis-austeniittinen (FA) mikrorakenne. Lisäksi siihen on

merkitty austeniittisen (A), austeniittis-ferriittisen (AF) ja ferriittisen (F) mikrorakenteen alueet. Vinoittain kulkevat viivat kuvastavat hitsiaineeseen muodostuvaa ferriittipitoisuutta ferriittinumeroissa ilmaistuna. Diagrammissa kromiekvivalentin arvot ovat vaaka-akselilla ja nikkeli- ja kromiekvivalenttien arvot pystyakselilla.



Kuva 4. WRC-1992-diagrammi. Diagrammin ja kromi- ja nikkeli- ja kromiekvivalenttien avulla voidaan määrittellä hitsiin primäärisesti syntyvä mikrorakenne sekä ferriittipitoisuus. A = austeniittinen, AF = austeniittis-ferriittinen, FA = ferriittis-austeniittinen ja F = ferriittinen mikrorakenne. (Kou 2003B, s. 225)

Koska rikki ja fosfori ovat erityisen haitallisia kuumahalkeilun kannalta, tulisi niiden määrä ottaa huomioon sopivaa ferriitin määrää arvioitaessa. Arantesin & Trevisanin (2007, s. 408) mukaan täysin austeniittinen mikrorakenne ei ole kuumahalkeilulle altis, jos rikin ja fosforin yhteismäärä jää alle 0,02 %. Kun rikin ja fosforin määrä on korkeintaan 0,03 %, jäännösferriitin määrän ferriittinumerona (FN) ilmaistuna tulisi olla 4, jotta kuumahalkeilulta voidaan välttyä. Vastaavasti ferriitin määrän tulisi olla 8 FN, kun epäpuhtauksien yhteismäärä on korkeintaan 0,04 % ja 12 FN, kun rikin ja fosforin määrä yhteensä on 0,05 %.

Toisinaan ferriittisen mikrorakenteen muodostumista ei voida sallia mm. siksi, että ferriitti on magneettista, sen sitkeys ei ole riittävää alhaisissa lämpötiloissa, sen korroosiokestokyky ei ole riittävä tai että se saattaa olla korkeissa lämpötiloissa altis hauraiden metallien välisten yhdisteiden syntymiseen. (Rajasekhar et al. 1997, s. 53)

Lisäksi liian suuri ferriittimäärä edistää vetyhalkeilua. Erityisesti austeniitin ja ferriitin rajapinnat toimivat vetyansoina. (Luppo et al. 1999) Tällaisessa tilanteessa kuumahalkeiluongelma täytyy ratkaista muilla tavoilla.

3.2.2 Kuumahalkeilun estäminen hitsauksen suoritustekniikan avulla

Ferriittinen mikrorakenne ei riitä estämään kuumahalkeamien syntymistä, jos lämmöntuonti muodostuu liialliseksi, sillä lämmöntonnin kasvaessa myös kutistumisesta aiheutuvat jännitykset kasvavat. (Zumelzu et al. 1999, s. 36) Näin ollen hitsausprosessi sekä valittavat hitsausparametrit ovat merkittävässä asemassa kuumahalkeamien ehkäisyssä. Palkojen välinen maksimilämpötila austeniittisten terästen monipalkohitsauksessa on tyypillisesti 150 – 250 °C. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 163.)

Syntyviä jäännösjännityksiä voidaan tehokkaimmin välttää käyttämällä hitsausprosesseja, joilla on suuri tehotiheys. Tavanomaisilla kaarihitsausprosesseilla jännityksiä voidaan vähentää pienentämällä lämmöntuontia esimerkiksi pulssituksen avulla.

Hitsipalon leveys-syvyys-suhteeseen vaikuttamalla voidaan ehkäistä hitsin keskilinjalle syntyviä kuumahalkeamia. Syvä ja kapea hitsi on alttiimpi kuumahalkeilulle kuin matala ja leveä. Nyrkkisääntönä pidetään, että kuumahalkeilun estämiseksi hitsipalon tulisi olla 1,5 – 2 leveys-syvyys-suhteeltaan. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 187) Kuvuiltaan palkojen tulisi olla mieluummin kuperia kuin koveria.

Hitsin raerakennetta voidaan pienentää oskilloinnilla (Kou 2003A, s. 291) tai raekokoa pienentävillä seosaineilla (titaani). Toisaalta hitsin muutosvyöhykkeelle syntyvään raekokoon voidaan myös vaikuttaa hitsausprosessin valinnalla. Yan et al. (2010) havaitsivat, että laserilla tai laser-TIG-hybridillä hitsattaessa raekoko muodostui pienemmäksi kuin TIGillä hitsattaessa, mikä selittyy ensin mainittujen prosessien TIG-prosessia pienemmällä lämmöntonilla. Oskillointi toimii kuumahalkeilua tai ainakin halkeamien etenemistä ehkäisevästi myös toisella tavalla. Kun jähmettyvän metallin rakeiden kasvusuunta vaihtelee, ei halkeamilla ole mahdollisuuksia edetä suoraviivaisesti. (Kou 2003B, s. 292) Hitsausnopeuden alentaminen voi olla joskus tarpeellista, jotta voitaisiin välttyä epäpuhtauksien suotautumiselta hitsin keskiviivalle.

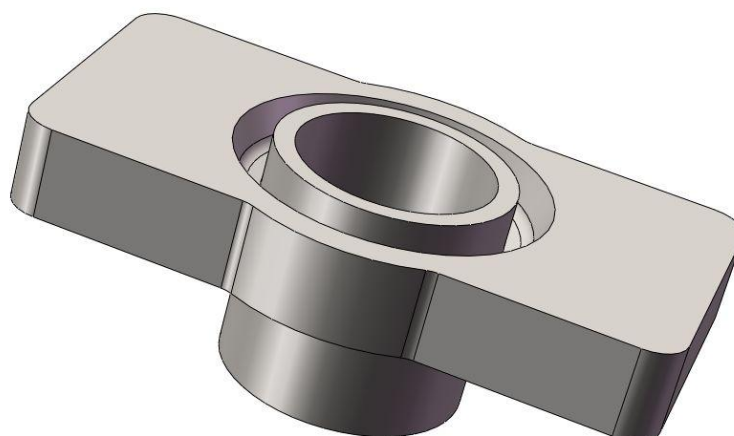
Suuri lämmöntuonti, korkea palkojen välinen lämpötila ja merkittävät kutistumat hitsissä voivat aiheuttaa halkeilua hitsin riittävästä ferriittipitoisuudesta huolimatta. (Zumelzu et al. 1999, s. 36) Näin ollen hitsaajan työn tekeminen hitsausohjeiden mukaan korostuu, sillä halkeilun estämiseksi on välttämätöntä pysyä määritellyissä lämmöntuontirajoissa. Jos kaikki kuumahalkeamien syntymisen ehkäisemiseksi tehtävät toimet on tunnistettu ja määritelty, lopputulos on hitsaajan ammattitaidosta ja asenteesta kiinni. Jos manuaalisen hitsauksen laatu on syystä tai toisesta liian vaihtelevaa ja kuumahalkeamia pääsee syntymään tästä syystä, hitsaus voi olla tarpeellista mekanisoida tai robotisoida.

4 KOEHITSAUKSET

Koehitsauksien tarkoituksena oli löytää sopivat hitsausparametrit, joilla voidaan ehkäistä pohjapalkojen kuumahalkeilu sekä laatia hitsausohje koko kappaleen hitsaamista varten. Koska kuumahalkeilua esiintyi ainoastaan pohjapaloissa, tämän tutkielman kokeellinen osuus keskittyy käsittelemään ainoastaan pohjapalkojen hitsausta. Koehitsaukset suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsaustekniikan laboratoriossa.

4.1 Hitsattava tuote

Jatkoputki on toimilaitteen ja venttiilin väliin tuleva osa, joka koostuu putkesta ja sen päihin tulevista laipoista. Kuvassa 5 on nähtävissä 3D-projektio jatkoputken koehitsauskappaleesta. Jatkoputket ovat tilauksesta tehtäviä yksittäiskappaleita, joten laippojen ja putken mitat vaihtelevat tilauksesta toiseen. Koehitsattujen laippojen mitat olivat joko 40 tai 50 mm, putken ulkohalkaisija 107 mm ja putken seinämän paksuus 14 mm.



Kuva 5. 3D-projektio jatkoputken koehitsauskappaleesta. Laipan paksuus 40 mm.

Jatkoputken railomuoto oli kaksois-J. Railoa käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.5, jossa käydään läpi koehitsausten aikana laippoihin ja putkiin tehtyjä geometriamuutoksia.

Sekä laipat että putki olivat austeniittista ruostumatonta terästä AISI 316L. Eri toimituserien aineodistuksista kerätyt seosainepitoisuudet on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Eri toimituserien seosainepitoisuudet painoprosentteina ilmoitettuna.

Eränumero	C	Cr	Mn	Mo	N	Ni	P	S	Si
Laippa									
B2E6	0,018	16,818	1,234	2,085	0,043	10,324	0,032	0,001	0,348
263897	0,014	16,500	1,63	2,06	0,0366	10,190	0,040	0,001	0,260
263996	0,016	17,07	1,60	2,04	0,0573	10,02	0,04	0,003	0,30
Putki									
521370	0,009	16,69	1,77	2,05	0,039	11,19	0,026	0,022	0,57

Kuumahalkeilun kannalta tuotteen kuumahalkeilua lisääviä tekijöitä ovat epäpuhtaudet, melko suuret aineenpaksuudet sekä syvä ja kapea railo. Epäpuhtaustekijöistä erityisesti rikki ja fosfori ovat haitallisia kuumahalkeilun kannalta. Näiden epäpuhtauksien yhteismäärä vaihtelee eri toimituserissä välillä 0,033 – 0,048 %.

4.2 Laitteisto ja hitsauslisäaineet

Koehitsauksissa käytettiin välineitä, joita tullaan myöhemmin käyttämään Rämö Oy:ssä käytännön hitsaustyössä. Siltahitsit hitsattiin hitsauskoneella MasterTIG MLS 3003 ACDC ja täyttöpäloet MIG/MAG-hitsauskoneella FastMIG Pulse 450. Hitsattavien kappaleiden pyörittämiseen käytettiin pyörittäspöytää Bestis400, jossa kiinnitys tapahtuu kappaleen sisäpuolelta. Hitsauspistooli kiinnitettiin manuaalisesti säädettävään omalla jalalla seisovaan hitsauspistoolinpitimeen FTS-1020. Täyttöpalkojen hitsauksessa vaaputukseen käytettiin BUG-O Systemsin heilurioskillointilaitetta Bug-6352. Koehitsausjärjestelyt käyvät ilmi kuvasta 6.



Kuva 6. Koehitsauksessa kappaleiden pyörittämiseen käytetty pyörittäspöytä ja hitsauspistoolinpidin.

Hitsaukseen käytettiin tyypillisesti austeniittisten terästen hitsaukseen käytettäviä lisäaineita. Hitsauskaasuksi MIG/MAG-hitsaukseen valittiin seoskaasu, joka sisältää 98 % argonia ja 2 % hiilidioksidia. Silloitushitsauksen hitsauskaasuna sekä ensimmäisen pohjapalon juuren suojaukseen käytettiin puhdasta argonia.

Koehitsauksissa pohjapalkojen hitsaamiseen käytetyt hitsauslisäaineet olivat Elgan Cromatig 316LSi, Cromamig 316LSi ja Cromamig 308LSi. Hitsauslisäaineiden keskimääräiset seosainepitoisuudet on koottu taulukkoon 3. Hitsauslisäaineilla Cromatig 316LSi ja Cromamig 316LSi on samanlaiset seosainepitoisuudet. Valmistajan mukaan keskimääräinen ferriittinnumero hitsauslisäaineelle 316LSi on 8. Hitsauslisäaineen 308LSi tyypillinen ferriittinnumero on 9. Silloituksessa käytettiin hitsauslisäainetta Cromatig 308LSi.

Taulukko 3. Hitsauslisäaineiden Cromatig 316LSi, Cromamig 316LSi ja Cromamig 308LSi tyypilliset seosainepitoisuudet. (Cromamig 308LSi; Cromamig 316LSi; Cromatig 316LSi)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
Cromatig 316LSi	0,015	0,85	1,75	0,015	0,01	18,5	12,0	2,7	0,1	0,06
Cromamig 316LSi	0,015	0,85	1,75	0,015	0,01	18,5	12,0	2,7	0,1	0,06
Cromamig 308LSi	0,02	0,8	1,75	0,02	0,01	20,0	10,0	0,1	0,1	0,05

Koehitsauksissa käytettiin kokeilumielessä myös hitsauslisäainetta OK Tigrod 19.81. Sitä ei suositella ruostumattoman teräksen AISI 316L hitsaamiseen, joten sen koostumusta ei tässä ilmoiteta eikä siitä myöskään lasketa kokeellisen osuuden analyysissä kromi- tai nikkeli-ekvivalenteja.

4.3 Lämmöntuonnin määrittäminen ja laskeminen

Austeniittiselle ruostumattomalle teräkselle AISI 316L ei ole määritelty täsmällisiä lämmöntuonnin minimi- tai maksimiarvoja. Usein ainut ohjeistus on ylimalkainen ilmaisu, jonka mukaan lämmöntuonnin tulee pysyä maltillisena. Kyröläisen & Lukkarin (2002, s. 163) mukaan austeniittiselle ruostumattomalle teräkselle sopiva hitsausenergian määrä vaihtelee levynpaksuus ja terästyypin huomioiden välillä 1,5 – 3,0 kJ/mm. Kun otetaan huomioon terminen hyötysuhde - joka on TIG-hitsauksella 0,6 ja MIG/MAG-hitsauksella 0,8 – saadaan lämmöntuonnin raja-arvoiksi austeniittiselle ruostumattomalle teräkselle 0,9 – 2,4 kJ/mm.

Kumar & Shahi (2011, s. 3617) ovat käyttäneet austeniittisen ruostumattoman teräksen AISI 304 TIG-hitsaukseen lämmöntuontiarvoja, jotka vaihtelivat palkokohtaisesti välillä

1,28 kJ/mm (pieni lämmöntuonti) ja 1,52 kJ/mm (suuri lämmöntuonti). Heidän taulukoimistaan arvoista voidaan laskea, että laskelmissa käytetty terminen hyötysuhde TIG-hitsaukselle oli 0,8.

Paitsi että liian suuri lämmöntuonti vaikuttaa kuumahalkeilua edistävästi, liiallisen lämmöntuonnin on havaittu myös vaikuttavan haitallisesti liitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin. Kumarin & Shahin (2011) mukaan lämmöntuonnin suuruus vaikuttaa muodostuvien dendriittien kokoon siten, että suurella lämmöntuonnilla dendriiteistä muodostuu suurempia kuin pienellä lämmöntuonnilla. Tämä vaikuttaa edelleen liitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin siten, että karkea raerakenne heikentää teräksen sitkeys- ja lujuusominaisuuksia.

Koehitsauksista päätettiin, että lämmöntuontia ei pyritä rajoittamaan liikaa, koska hitsauksessa oli otettava myös huomioon läpihitsautumisvaatimus. Toisaalta hitsauksessa oli myös otettava huomioon se, että hitsien ja kappaleen välille ei saanut jäädä liitosvirheitä. Kirjallisuuden perusteella palkojen väliseksi maksimilämpötilaksi määrättiin 150 – 250 °C. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 163)

Pohjapalkojen hitsausta käsittelevissä kappaleissa ilmoitetut lämmöntuonnit on laskettu yhtälöjen (3) ja (4) avulla. Lämmöntuonti Q lasketaan yleisesti yhtälön (3) mukaan

$$Q = k \times \frac{UI \times 60}{1000 \times v}, \quad (3)$$

jossa Q = lämmöntuonti (kJ/mm), k = hitsausprosessin terminen hyötysuhde, U = kaarijännite (V), I = hitsausvirta (A) ja v = hitsausnopeus (mm/min)

Pulssitetussa hitsauksessa keskivirta lasketaan yhtälön (4) mukaisesti (Giridharan & Murugan 2009, s. 480), muutoin lämmöntuonti lasketaan yhtälön (3) mukaisesti. Pulssitetussa hitsauksessa keskivirran laskennassa otetaan perus- ja huippuvirran vaihtelu ja virran vaihtelujen kesto huomioon yhtälön (4) mukaan

$$I_m = \frac{I_p \times T_p + I_b \times T_b}{T_p + T_b}, \quad (4)$$

jossa I_m = keskivirta, I_p = huippuvirta (A), T_p = huippuvirran kesto (ms), I_b = perusvirta (A), T_b = perusvirran kesto (ms)

4.4 Koehitsausten kulku

4.4.1 Pohjapalkojen TIG-hitsaus

Alkuperäinen suunnitelma oli, että silloitushitsit hitsataan käsin TIG-hitsauksella, pohjapalot mekanisoidulla TIG-hitsauksella ja täyttöpäloet mekanisoidulla MAG-hitsauksella. Hitsauslisäaineena silloitukseen käytettiin Elgan Cromatig 308LSi. Hitsausvirta oli noin 125 A, jännite 11 V, virtalajina tasavirta -navassa. Hitsauskaasuna käytettiin puhdasta argonia kaasunvirtauksella 8 litraa minuutissa. Muut silloituksen parametrit on koottu tutkielman liitteenä olevaan hitsausohjeeseen (Liite 1). Ensimmäisen pohjapalon hitsauksessa käytettiin juurikaasuna puhdasta argonia.

Koska jatkoputkien hitsaus oli päätetty mekanisoida, mutta TIG-hitsaukseen ei ollut käytettävissä mekanisoitua langansyöttöä, pyrittiin pohjapalot hitsaamaan ilman hitsauslisäainetta. Matalaksi jääneestä lämmöntuonnista (0,6 kJ/mm) huolimatta halkeamia ilmaantui etenkin hitsin loppupäähän. Kuvassa 7 sivulla 25 on nähtävissä erään koekappaleen pohjapalkoon syntyneitä halkeamia.

Hitsin loppupään halkeilun välttämiseksi hitsaus päätettiin toteuttaa siten, että hitsin alkupää hitsataan ilman hitsauslisäainetta, mutta hitsin loppupäähän syötetään manuaalisesti hitsauslisäainetta 316LSi. Hitsauksessa käytettiin pulssitusta lämmöntuonnin pienentämiseksi. Pulssituksen taajuus oli 1,2 Hz, pulssisuhde 30 %, perusvirta 83 A ja huippuvirta suuruus 193 A. Jännite oli noin 10,5 V ja pyöritysnopeus oli 67 mm/min. Lämmöntuonnin suuruus jäi TIG-hitsauksen termisellä hyötysuhteella (0,6) korjattuna tasolle 0,65 kJ/mm. Hitsauslisäaineen syöttäminen hitsin loppupäässä ja matala lämmöntuonti eivät ehkäisseet kuumahalkeamien syntymistä.

Tämän jälkeen kuumahalkeiluongelma koetettiin korjata hieman erikoisemmalla tavalla, puskurointihitsauksella. Puskurointihitsauksessa putkeen tehtyyn uraan hitsattiin manuaalisesti hitsi, joka myöhemmin koneistettiin sivuilta tasaiseksi 1,5 mm korkeaksi kannakseksi. Puskurointihitsin hitsaamiseen käytettiin kokeilumielessä erikoishaponkestävien terästen hitsaamiseen suositeltua hitsauslisäainetta OK Tigrod 19.81. Lämmöntuonti pohjapalkojen hitsaamiseksi oli noin 0,85 kJ/mm. Hitsiin muodostui kuumahalkeamia.



Kuva 7. Hitsin loppupäähän syntyneitä kuumahalkeamia.

Tässä vaiheessa koehitsauksia päätettiin luopua pohjapalkojen TIG-hitsauksesta ja hitsata pohjapalot MAG-hitsauksella. Tähän oli ennen kaikkea syynä se, että pohjapalkojen TIG-hitsaus olisi vaatinut jatkuvaa langansyöttöä. Langan syöttäminen manuaalisesti olisi tullut aiheuttamaan hitsaukseen liikaa vaihtelua ja se olisi myös ollut ristiriidassa sen ajatuksen kanssa, että hitsauksen tuli tapahtua mahdollisimman pitkälle mekanisoidusti.

4.4.2 Pohjapalkojen MAG-hitsaus

Pohjapalkojen MAG-hitsaus aloitettiin hitsauslisäaineella Cromamig 316LSi. Pohjapalot kärsivät kuumahalkeilusta, joten pohjapalkoihin päätettiin kokeilla hitsauslisäainetta 308LSi, jota suositellaan tavallisesti ruostumattoman teräksen 304L hitsaukseen. Lisäaineet eroavat toisistaan lähinnä kromin, nikkelin ja molybdeenin seosainepitoisuuksien suhteen. 308LSi sisältää 316LSi:hin verrattuna enemmän ferriitin muodostumista edistävää kromia ja vähemmän austeniitin muodostumista edistävää nikkeliä. Molybdeenia se ei sisällä juuri lainkaan.

Lisäaineen vaihtamisen jälkeen koehitsauksissa päästiin haluttuun tulokseen, sillä kuumahalkeilua ei enää esiintynyt. Hitsausvirran suuruus ensimmäistä palkoa hitsattaessa oli noin 157 A, jännite 23,6 V ja hitsausnopeus 126 mm/min. Hitsauskaasun virtaus oli 10 litraa minuutissa.

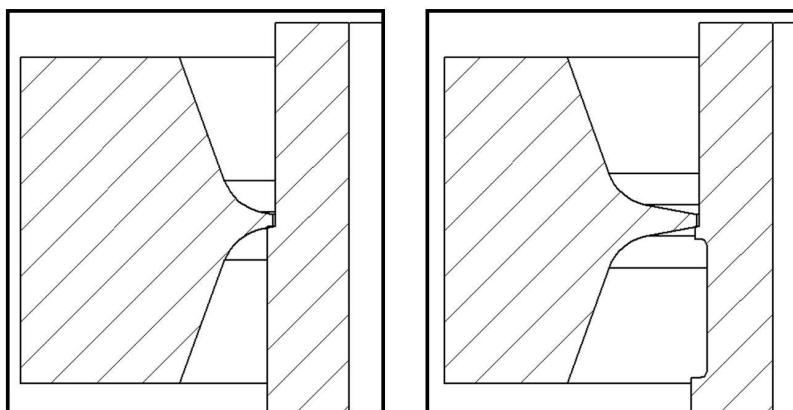
Toisen palon hitsauksessa hitsausvirta oli noin 270 A, jännite 30,3 V ja hitsausnopeus 240 mm/min. Lämmöntuonti muodostui näin ollen MAG-hitsauksessa huomattavasti suuremmaksi kuin TIG-hitsauksessa. TIG-hitsauksessa lämmöntuonti jäi pääsääntöisesti tasolle 0,70 – 0,85 kJ/mm, kun taas MAG-hitsauksessa lämmöntuonti oli 1,42 kJ/mm (ensimmäinen pohjapalko) ja 1,63 kJ/mm (toinen pohjapalko). Lämmöntuontiarvojen laskennassa on otettu huomioon MAG-hitsauksen terminen hyötysuhde 0,8.

Pohjapalkojen hitsausparametreja jouduttiin tämän jälkeen vielä säätämään, jotta voitiin varmistua läpihitsausvaatimuksen täyttymisestä. Lopullinen suositus ensimmäisen pohjapalon lämmöntuonniksi on 1,0 – 1,1 kJ/mm ja toisen pohjapalon lämmöntuonniksi on 1,7 – 1,8 kJ/mm. Suositeltava hitsausvirta-alue ensimmäiselle pohjapalolle on 255 ± 10 A, jännite-alue $26,9 \pm 0,3$ V ja hitsausnopeus 312 mm/min. Toiselle palolle vastaavat suositukset ovat 294 ± 10 A, $29,8 \pm 0,3$ V ja 240 mm/min. Muut jatkoputken hitsauksen onnistumiseen oleellisesti vaikuttavat parametrit, kuten esimerkiksi poltin- ja kallistuskulma, ovat nähtävissä 40 mm paksun laipan täyttöpalkojen hitsausohjeesta (liite 2). Hitsauspistoolin kuljetusasento oli vetävä kaikille sekä TIG- että MAG-hitsauksella hitsatuille paloille.

4.5 Geometriamuutokset kappaleisiin

Laippoihin ja putkiin jouduttiin koehitsausten aikana tekemään eräitä geometriamuutoksia, joilla pyrittiin ennen kaikkea parantamaan läpihitsautumista ja estämään liitosvirheitä. Siihen ei voida ottaa kantaa, olisiko geometriamuutoksilla voitu estää kuumahalkeilu hitsauslisäainetta 316LSi käytettäessä, sillä siinä vaiheessa kun geometriamuutokset kappaleisiin tehtiin, oli pohjapalot jo saatu hitsattua halkeamattomasti hitsauslisäaineella 308LSi.

Jatkoputkien railomuoto on kaksois-J. Koehitsaukset aloitettiin koekappaleilla, joiden railon leveys-syvyys-suhde oli noin 0,8. Alkuperäinen railo on nähtävissä kuvassa 8 vasemmalla. Koska hitsauspolttimen suuntaaminen osoittautui kapeassa ja syvässä railossa hankalaksi, railoa päätettiin leventää tasaisesti 4,5 mm. Levennyksen jälkeen railon leveys-syvyys-suhde oli noin 1. Railo muutosten jälkeen on nähtävissä kuvassa 8 oikealla.



Kuva 8. Kappaleiden geometriat railon kohdalta koehitsausten alussa (vasemmalla) ja geometriamuutosten jälkeen (oikealla).

Geometriamuutoksia tehtiin myös putkiin. Koehitsausten aikana huomattiin, että etenkin toiseen pohjapalkoon pyrki jäämään liitosvirhettä putken puolelle. Tästä syystä putkeen tehtiin 1,5 mm syvä ura, jonka reunat on pyöristetty. Uran ansiosta hitsauspoltinta oli helpompi suunnata ja pyöristetty kulma oli jouhevampi hitsata. Putkeen tehty ura näkyy kuvassa 8 oikealla.

4.6 Ferriittipitoisuudet ja mikrorakenteet

Kuumahalkeilusta kärsineistä kappaleista (perusaine + hitsauslisäaine Cromamig 316LSi tai Cromatig 316LSi) ei tehty hieitä. Myöskään ferriittipitoisuuksia ei ollut pohjapalkojen halkeilusta kärsineistä kappaleista mahdollista mitata, sillä ferriittimittari ei ollut tarpeeksi kapea, jotta se olisi mahtunut syvän ja kapean railon pohjalle. Näin ollen halkeilusta kärsineiden hitsien ferriittipitoisuuksia ja mikrorakenteita voidaan tässä yhteydessä käsitellä ainoastaan teoreettisesti kromi- ja nikkelielkvivalenttien avulla.

Kahdesta kappaleesta, joista oli hitsattu pelkät pohjapalot halkeamattomasti MAG-hitsauksella, otettiin hieet. Hieet hiottiin, kiillotettiin ja sen jälkeen syövytettiin elektrolyyttisesti 10 % oksaalihapolla. Syövytyksessä käytetty jännite oli 15 V ja virta 2 A. Syövytysaika oli 60 sekuntia. Hieistä otettiin makroskooppi- ja mikroskooppikuvat, joista tarkasteltiin läpihitsautumista sekä hitsin mikrorakennetta. Lisäksi hieistä mitattiin ferriittipitoisuudet. Kuvassa 9 sivulla 28 on nähtävissä halkeamattomasti hitsatut pohjapalot, jotka täyttävät läpihitsautumisvaatimuksen.



Kuva 9. Makroskooppikuva lisäaineella 308LSi MAG-hitsatuista pohjapaloista. Palon 2 syvyys on noin 10 mm ja leveys 14 mm.

Eri toimituserien seosainepitoisuudet ovat nähtävissä taulukossa 2 sivulla 19. Ne ovat peräisin ainestodistuksista, mutta hitsauslisäaineiden seosainepitoisuudet sen sijaan ovat valmistajan ilmoittamia tyypillisiä seosainepitoisuuksia. Hieet otettiin kappaleista, joiden laippojen eränumero oli joko B2E6 tai sitä ei ollut ilmoitettu. Koska laippojen seosainepitoisuudet ovat melko samalla tasolla, on tässä päädytty oletamaan, että kaikki laipat olivat erää B2E6. Putket olivat erää 521370. Hitsauslisäaineiden tyypilliset seosainepitoisuudet on ilmoitettu aiemmin taulukossa 3 sivulla 22.

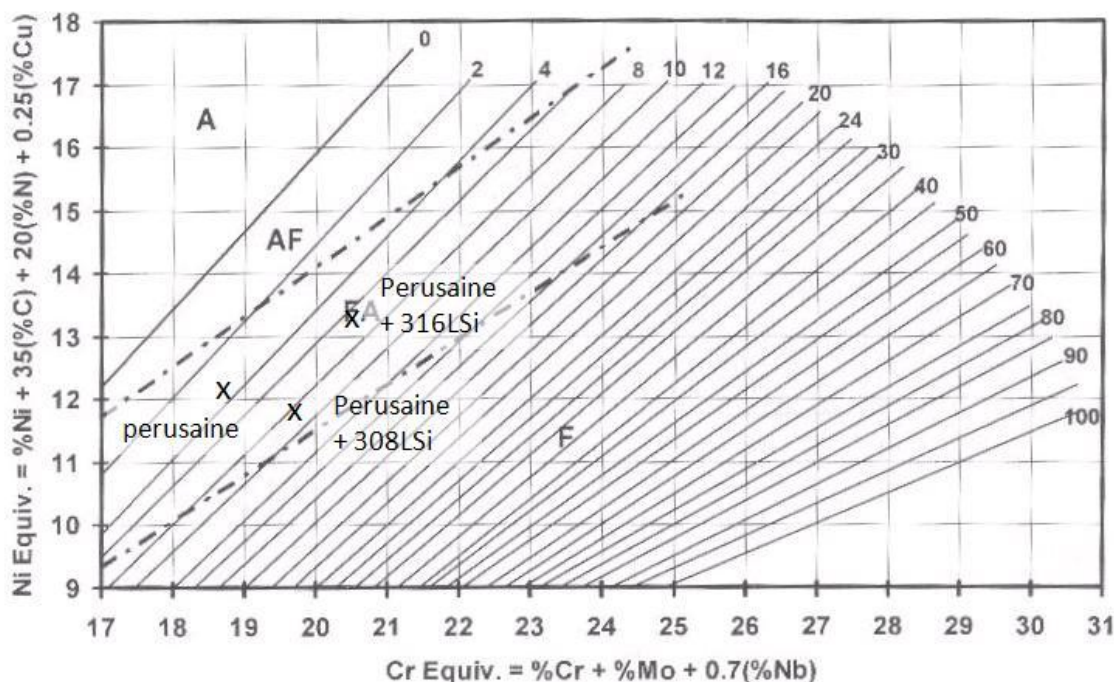
Hitsin mikrorakenteen ja ferriittipitoisuuden ennustamiseen käytettiin teoriassa esitettyjä yhtälöitä (1) ja (2), joiden perusteella saatiin selville kromi- ja nikkeli-ekvivalentit. Perusaineen ja lisäaineen (Cromamig 316LSi, Cromatig 316LSi tai 308LSi) sekoittumisasteeksi arvioitiin 30 % ja sekoittumisen oletettiin olevan tasaista. Perusaineen seosainepitoisuutena käytettiin erien B2E6 ja 521370 seosaineiden keskiarvoa. Kromi- ja nikkeli-ekvivalentit ja niiden suhdeluvut on koottu taulukkoon 4. Taulukkoon on lisäksi laskettu pelkän perusaineen kromi- ja nikkeli-ekvivalentit.

Taulukko 4. Hitsien kromi- ja nikkeli-ekvivalentit

	Cr-ekvivalentti	Ni-ekvivalentti	Cr_{eq}/Ni_{eq}
Perusaine	18,82	12,05	1,56
Perusaine + 316LSi	20,49	13,24	1,55
Perusaine + 308LSi	19,72	11,82	1,67

Kun ekvivalentit sijoitetaan WRC-1992-diagrammiin (kuva 10), huomataan, että sen perusteella sekä halkeilleiden (perusaine + Cromamig/Cromatig 316LSi) että halkeamattoman (perusaine + Cromamig 308LSi) hitsin mikrorakenteen olisi pitänyt olla ferriittis-austeniittinen. Ferriittinumeroiden olisi pitänyt diagrammin perusteella olla 7, kun hitsauslisäaineena oli 316LSi ja 8, kun hitsauslisäaineena oli 308LSi. Prosentteissa ilmaistuna ferriittipitoisuudet ovat lähes samat tässä tapauksessa.

Halkeilleista hitseistä ei voitu mitata ferriittipitoisuutta. Halkeamattomista pohjapaloista mitatut ferriittipitoisuudet vaihtelivat välillä 6,0 – 6,7 %. On huomattava, että kromi- ja nikkeli-ekvivalentit on laskettu hitsauslisäaineiden keskimääräisistä eikä todellisista seosainepitoisuuksista.

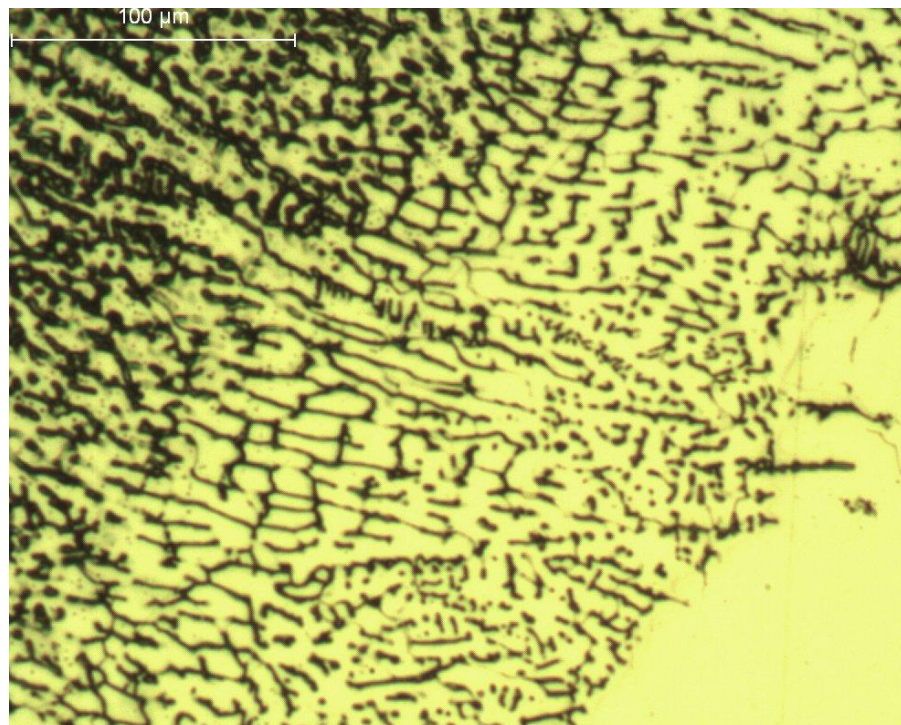


Kuva 10. Perus- ja hitsauslisäaineiden sijoittuminen WRC-1992-diagrammiin. (Kou 2002, s. 225)

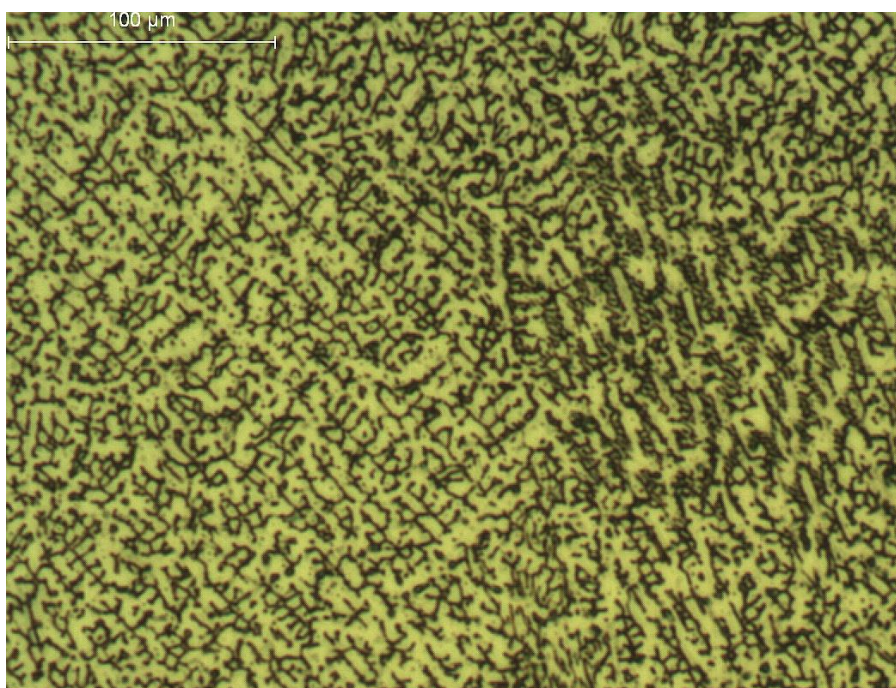
Teoriaosuudessa todettiin, että kun kromi- ja nikkeli-ekvivalenttien suhde on välillä 1,42 – 1,90, syntyvä faasityyppi on ferriittis-austeniittinen ja tällöin kuumahalkeilulta olisi mahdollista välttyä. Hitsauslisäaineella 316LSi ekvivalenttien suhteeksi muodostui 1,55. Hitsauslisäaineella 308LSi ekvivalenttien suhde on selvästi parempi kuumahalkeilun estämisen kannalta, sillä sen ekvivalenttien suhteeksi muodostui 1,67. On kuitenkin syytä muistaa, että ekvivalentit on laskettu lisäainevalmistajan

ilmoittamista keskimääräisistä seosainepitoisuuksista, ei todellisista seosainepitoisuuksista.

Toisen hieen muutosvyöhykkeeltä ja hitsistä otetut mikroskooppikuvat (kuvat 11 ja 12) vahvistavat sen, että hitsiin muodostui ferriittis-austeniittinen mikrorakenne, kuten WRC-1992-diagrammin ja kromi- ja nikkeliekvivalenttien perusteella oli mahdollista päätellä. Ferriitti näkyy kuvissa tummana ja austeniitti vaaleana.



Kuva 11. Muutosvyöhykkeen (hitsi kuvassa ylävasemmalla) ferriittis-austeniittinen mikrorakenne. Ferriitti näkyy kuvassa tummana ja austeniitti vaaleana.



Kuva 12. Hitsin ferriittis-austeniittinen mikrorakenne. Ferriitti näkyy kuvassa tummana ja austeniitti vaaleana.

5 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kokeellisessa osuudessa kävi ilmi, että jatkoputken hitsauksessa perusainetta vastaava hitsauslisäaine 316LSi ei toimi kuumahalkeilua estävästi. Tämä selittyy teorian perusteella siten, että vaikka hitsistä muodostuisi ferriittis-austeniittinen ja ferriittipitoisuus olisi riittävä, kuumahalkeilua voi esiintyä, jos rakenne on kovin jäykkä ja hitsauksen jälkeiset muodonmuutokset suuria. Jatkoputkessa merkittävimpana kuumahalkeilua aiheuttavana tekijänä voidaan pitää rakenteen jäykkyyttä. Jäykkyyteen vaikuttavat laipan suuri aineenpaksuus ja syvä ja kapea railo. Perusainetta vastaavalla hitsauslisäaineella 316LSi mikrorakenteeseen ei pääse muodostumaan riittävästi kuumahalkeilua estävää ferriittiä. Näin ollen kuumahalkeilun estämiseksi on valittava hitsauslisäaine, jolla mikrorakenteeseen saadaan muodostumaan riittävästi ferriittiä.

Teoriassa esitettiin ferriitin riittävää määrää koskeva näkemys, jonka mukaan jäännösferriitin määrää kuvaavan ferriittinumeron tulisi olla 8, kun rikin ja fosforin yhteismäärä on korkeintaan 0,04 %. Jos ferriittinumero on 0,05 %, tulisi ferriittinumeron olla peräti 12. Eri toimituseristä fosforin ja rikin yhteismäärä oli suurin erällä 521370, jossa fosforin ja rikin yhteismäärä oli 0,048 %. Tähän erään kuuluivat kaikki

koehitsauksissa hitsatut putket. Koehitsauksista saadut tulokset eivät tue edellistä näkemystä, sillä MAG-hitsauksella hitsattujen pohjapalkojen ferriittipitoisuudet vaihtelivat välillä 6,0 – 6,7 % eikä niissä esiintynyt kuumahalkeamia.

Kokeellisen osuuden perusteella johtopäätöksenä voidaan esittää, että jatkoputken pohjapalkojen MAG-hitsauksessa kuumahalkeilun välttämiseksi on hyvä käyttää hitsauslisäainetta 308LSi, jotta hitsiin pääsee muodostumaan ferriittis-austeniittinen mikrorakenne ja jotta jäännösferriitin määrä jää riittäväksi. Riittävä ferriittimäärä 40 – 50 mm korkeiden laippojen hitsaamiseen on noin 6 – 7 %. Sopiva lämmöntuonti ensimmäiselle pohjapalolle on tällöin 1,0 – 1,1 kJ/mm ja toiselle pohjapalolle 1,7 – 1,8 kJ/mm. Koska täyttöpalkojen hitsaamisessa ei ole kuumahalkeiluvaaraa, voidaan täyttöpalkot hitsata perusainetta vastaavalla lisäaineella 316LSi. Tämän pitäisi riittää varmistamaan jatkoputken hitsien riittävä korroosionkestävyys.

Jos jatkoputken hitsaamisessa ei syystä tai toisesta voida sallia käytettävän muuta kuin perusainetta vastaavaa hitsauslisäainetta 316LSi, on tällöin muutettava kappaleen rakennetta. Kun otetaan sekä valmistukselliset että taloudelliset näkökohdat huomioon, ei railon leventämistä voitane pitää hyvänä vaihtoehtona, vaan siinä tapauksessa olisi järkevintä suunnitella kappaleen rakenne kokonaan toisenlaiseksi.

6 YHTEENVETO

AISI 316L kuuluu austeniittisten ruostumattomien terästen ryhmään. Austeniittisten terästen hyvinä ominaisuuksina pidetään korroosionkestoa ja sitkeyttä alhaisissakin lämpötiloissa. Koska AISI 316L sisältää vain vähän hiiltä, se ei ole altis herkistymiselle. Sen sijaan sillä on alttius kuumahalkeiluna tunnetulle ilmiölle.

Kuumahalkeilu ilmenee yleensä hitsin keskiviivalla tai hitsin osittain sulaneella vyöhykkeellä. Halkeamien syntyyn vaikuttavat tekijät jaetaan tavallisesti metallurgisiin ja jännityksellisiin tekijöihin. Metallurgisista tekijöistä kuumahalkeamien syntymisen kannalta merkittäviä ovat dendriittien tai rakeiden väliin suotautuvat epäpuhtaudet, sillä ne muodostavat raudan, kromin ja nikkelin kanssa alhaisissa lämpötiloissa sulavia yhdisteitä ja laajentavat siten hitsiaineen jähmettymislämpötila-aluetta ja myös alentavat hitsin sitkeyttä. Jännitykselliset tekijät koostuvat siitä, että hitsauksessa vähemmän lämmennyt perusaine ei salli hitsin kutistua vapaasti ja toisaalta siitä, että

hitsausmuodonmuutokset pyritään yleensä estämään hitsauskiinnittimillä. Hitsattavan kappaleen jäykkä rakenne lisää jännityksiä ja edistää siten kuumahalkeilua. Austeniittisilla teräksillä suuri lämpölaajenemiskerroin lisää jäännösjännityksiä.

Kuumahalkeilu pyritään yleensä estämään primäärisesti ferriittis-austeniittisella mikrorakenteella ja riittävän suurella jäännösferritin määrällä. Sopivana ferriitin määränä pidetään 5 – 10 %. Muita tapoja estää kuumahalkeilua ovat mm. hitsausnopeuden pienentäminen, oskilloinnin käyttäminen ja hitsausrailon leventäminen.

Jatkoputken hitsauksessa kuumahalkeilua aiheuttaviksi tekijöiksi tunnistettiin teräksen epäpuhtaudet sekä jatkoputken jäykkä rakenne, johon vaikuttivat laipan ja putken välinen syvä ja kapea railo sekä laipan suuri aineenpaksuus. Koehitsausten hitsausprosessit olivat mekanisoitu TIG- ja mekanisoitu MAG-hitsaus.

Koehitsausten aikana havaittiin, että kuumahalkeilu ilmenee ainoastaan pohjapaloissa. Koska alhainen lämmöntuonti (0,6 – 0,8 kJ/mm) ja perusainetta vastaavan lisäaineen (316LSi) käyttäminen eivät toimineet kuumahalkeilun estäjänä, valittiin hitsauslisäaineeksi 308LSi. MAG-hitsauksessa lämmöntuonnilla 1,0 – 1,8 kJ/mm ja hitsauslisäaineella 308LSi pohjapalot pystyttiin hitsaamaan halkeamattomasti. Pohjapalkoihin muodostui tällöin ferriittis-austeniittinen mikrorakenne ferriittipitoisuudella 6 – 7 %.

LÄHDELUETTELO

Arantes, F. & Trevisan R. 2007. Experimental and theoretical evaluation of solidification cracking in weld metal. Journal of achievements in materials and manufacturing engineering. Vol. 20, 1 – 2, s. 407 – 410.

Cromamig 308LSi. [verkkodokumentti] [viitattu 13.9.2011] Saatavissa:
<http://www.elgawelding.com/pdf/pds/GMAW%20-%20MIG%20MAG%20Stainless%20Steel/Cromamig%20308LSi.pdf>

Cromamig 316LSi. [verkkodokumentti] [viitattu 12.9.2011] Saatavissa:
<http://www.elgawelding.com/pdf/pds/GMAW%20-%20MIG%20MAG%20Stainless%20Steel/Cromamig%20316LSi.pdf>

Cromatig 316LSi. [verkkodokumentti] [viitattu 12.9.2011] Saatavissa:
<http://www.elgawelding.com/pdf/pds/GTAW%20-%20TIG%20Stainless%20Steel/Cromatig%20316LSi.pdf>

Cross, C. 2005. On the origin of weld solidification cracking. Teoksessa Hot cracking phenomena in welds. Toim. Toim. Böllinghaus, T. & Herold, H. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. S. 3 – 18.

Cross, C. & Coniglio, N. 2008. Weld solidification cracking: critical conditions for crack initiation and growth. Teoksessa Hot Cracking Phenomena in Welds II. Toim. Böllinghaus, T. Herold, T. Cross, C. & Lippold, C. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. S. 39 – 58.

Díez, F. & Liu, S. 2007. Compositional boundary between primary austenitic and ferritic Mn-Cr and Ni-Cr steel weld metals. Materials science and engineering. Vol. 452 – 453, 15, s. 1 – 7.

Dong, Z., Wei, Y. & Yanli, X. 2006. Predicting weld solidification cracks in multipass welds of SUS310 stainless steel. Computational materials science. Vol 38, X, s. 459 – 466.

- Giridharan, P & Murugan, N. 2009. Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets. *International journal of advanced manufacturing technology*. Vol. 40, 5 – 6, s. 478 – 489.
- Heuser, H. 2005. Value of different hot cracking tests for the manufacturer of filler metals. *Teoksessa Hot cracking phenomena in welds*. Toim. Böllinghaus, T. & Herold, H. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. S. 305 – 327.
- Jang, A., Lee, D., Lee, S., Shim, J., Kang, S. & Lee, H. 2011. Effect of Cr/Ni equivalent ratio on ductility-dip cracking in AISI 316L weld metals. *Materials & design*. Vol. 32, 1, S. 371 – 376.
- Korinko, P. & Malene, S. 2001. Considerations for the weldability of types 304L and 316L stainless steel. *Journal of failure analysis and prevention*. Vol. 1, 4, s. 61 – 68.
- Kou, S. 2003A. Solidification and liquation cracking issues in welding. *Journal of the minerals, metals and materials society*. Vol. 55, 6, s. 37 – 42.
- Kou, S. 2003B. *Welding Metallurgy*. 2nd Edition. New Jersey, John Wiley & Sons Inc.
- Kumar, S. & Shahi, A. 2011. Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints. *Materials and Design*. Vol. 32, 6, s. 3617 – 3623.
- Kyröläinen, A. & Lukkari, J. 2002. *Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus*. 2. painos. Helsinki, Metalliteollisuuden Kustannus Oy.
- Lee, D., Byun, J., Sung, J. & Lee, H. 2009. The dependence of crack properties on the Cr/Ni Equivalent ratio in AISI 304L austenitic stainless steel weld metals. *Materials Science and Engineering*. Vol. 513 – 514,15, s. 154 – 159.
- Lin, Y. & Chen, P. 2000. Effect of nitrogen content and retained ferrite on the residual stress in austenitic stainless steel weldments. *Materials Scienced and Engineering*. Vol 307, 1 – 2, s. 165 – 171.

Lukkari, J. 1999. Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus. Lukkari, J. 1999. Kunnossapitokoulu [pdf-julkaisu] nro 50. Kunnossapitoyhdistys Promaint ry:n julkaisu. Saatavissa: www.promaint.net/downloader.asp?id=75&type=1

Luppo, M., Hazaravedian, A, & Ovejero-García, J. 1999. Effects of delta ferrite on hydrogen embrittlement of austenitic stainless steel welds. *Corrosion Science*. Vol. 43, 1, s. 87 – 103.

Rajasekhar, K., Harendranath, C., Raman, R. & Kulkarni, S. 1997. Microstructural evolution during solidification of austenitic stainless steel weld metals: a color metallographic and electron microprobe analysis study. *Materials Characterization*. Vol. 38, 2, s. 53 – 65.

Shankar, V., Gill, T., Mannan, S. & Sundaresan, S. 2003A. Solidification cracking in austenitic stainless steel welds. *Sadhana – Academy Proceedings in Engineering Sciences*. Vol 28, 3 – 4, s. 359 – 382.

Shankar, V., Gill, T., Mannan, S. & Sundaresan, S. 2003B. Effect of nitrogen addition on microstructure and fusion zone cracking in type 316L stainless steel weld metals. *Materials Science and Engineering*. Vol. 343, 1 – 2, s. 170 – 181.

Wolf, M., Kannengießer, T. & Böllinghaus, T. 2008. Determination of critical strain rate for solidification cracking by numerical simulation. S. Teoksessa *Hot cracking phenomena in welds II*. Toim. Böllinghaus, T., Herold, H., Cross, C. & Lippold, C. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. S. 77 – 92.

Wolf, M., Schobbert, H. & Böllinghaus, T. 2005. Influence of the weld pool geometry on solidification crack formation. Teoksessa *Hot cracking phenomena in welds*. Toim. Böllinghaus, T. & Herold, H. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

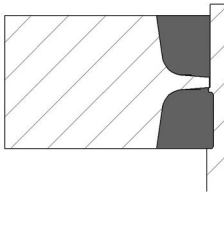
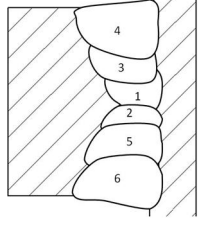
Yan, J., Gao, M. & Zeng, X. 2010. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding. *Optics and lasers in engineering*. Vol. 48, 4, s. 512 – 517

Zumelzu, E., Sepúlveda, J. & Ibarra, M. 1999. Influence of microstructure on the mechanical behaviour of welded 316 L SS joints. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol 94, 1, s. 36 – 40.

LIITE 2

LUT Metalli

Hitsausohje pWPS / täyttöpälot

Perusaineet	AISI 316L				
Aineenpaksuus	Laippa 40 mm				
Putken ulkohalkaisija	106 mm				
Hitsausmenetelmä	Mekanisoitu MAG				
Hitsausasento	PA				
Railon valmistus	Koneistus				
Railon puhdistus	Rst. teräsharja				
Kappaleen kiinnitys	Pyörityspöytään				
Silloitus	TIG				
Juuren avaus				Elektrodi	
Juurituki				Teroituskulma	
	Lisäaineet ja hitsauskaasut		Poltinkulma	vetävä 15 – 17°	
Lisäaineen luokittelumerkintä	AWS 5.9 ER 308LSi EN ISO 14343 G 19 9 LSi	Kallistuskulma	Vaihtelee, ks. palkokohtainen ohjeistus		
	AWS 5.9 ER 316LS EN ISO 14343 G 19 12 3 LSi	Etäisyys työkappaleesta			
		Työlämpötila			
Lisäaineen kauppamerkintä	Elga Cromamig 308LSi Elga Cromamig 316LSi	Korotettu työlämpötila			
Lisäaineen halkaisija	1,2 mm	Palkojen välinen lämpötila	max. 150 °C		
Jauhe		Esikuumennusmenetelmä			
Suojakaasu	Argon + 2% CO ₂	Työlämpötilan mittaus			
Virtausnopeusalue	10 l/min	Jälkilämpökäsittely			
Plasmakaasu		Menetelmä			
Virtausnopeusalue		Kuumennusnopeus			
Juurikaasu	Argon	Pitolämpötila			
Virtausnopeusalue	22 l/min	Pitoaika			
Virtalaji	DC	Jäähdytysnopeus			
Napaisuus	+	Jälkikäsittely			
Huomautuksia: Juurensuojaus vain 1. palkoon. Levityksen arvot ovat oskillointilaitteen säätimen arvoja. Lämmöntuonin laskennassa on otettu huomioon hitsausprosessin terminen hyötysuhde (MIG/MAG-hitsaukselle 0,8)		Pvm ja laatija: 3.10.2011 Anne Kalliosaari			

Palko	Lisä- aine	Hitsaus- virta alue (A)	Kaari- jäännite- alue (V)	Hitsaus- nopeus alue (mm/s)	Lämmön- tuonti- alue (kJ/mm)	Langan- syöttö- nopeus (m/min)	Vapaa- langan- pituus (mm)	Levitys	Levitys- nopeus	Vasem- man reunan viipymä	Oikean reunan viipymä	Kallistus- kulma
1	308LSi	255 ± 10	26,9 ± 0,3	5,2	1,0 – 1,1	13	22					23–25 °
2	308LSi	294 ± 10	29,8 ± 0,3	4	1,7 – 1,8	15	22					23–25 °
3	316LSi	273 ± 10	30,9 ± 0,5	4	1,6 – 1,8	12,5	18	0,8	3,5	1,0	2,0	18–20 °
4	316LSi	277 ± 10	30,5 ± 0,5	4	1,6 – 1,8	12,6	18	1,0	3,5	1,0	2,0	15 °
5	316LSi	270 ± 10	31,5 ± 0,5	4	1,6 – 1,8	12,6	22	0,8	3,5	1,0	2,0	15 °
6	316LSi	289 ± 10	31,0 ± 0,5	2,7	2,4 – 2,8	12,6	22	1,0	2,4	1,0	1,0	18–20 °