

**KEMI-TORNION AMMATTIKORKEAKOULU
TEKNIikka**

Anttila Tuomas

**Ferriittisten ruostumattomien terästen hitsauksessa
syntyvien mikrorakenteiden vaikutus lämpövyöhykkeen
mekaanisiin ominaisuuksiin**

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelman opinnäytetyö
Konetekniikka
Kemi 2010

ALKUSANAT

Ensimmäiseksi haluaisin kiittää mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta ja työn valvomisesta tutkijayliopettaja Timo Kauppia. Haluaisin myös kiittää perhettäni sekä ystäviäni tukemisestani opiskeluideni ja tämän opinnäytetyön ajalta. Luokkatovereitani haluan kiittää hienoista opiskeluvuosista. JaloteräsStudion henkilöstöä haluan kiittää aineenkoetuskappaleiden valmistuksesta. Lopuksi haluan osoittaa vielä kiitokset seuraaville henkilöille:

Mari-Selina Kantanen, opinnäytetyön ohjauksesta ja avustuksesta työn suorituksessa.
Ari Pikkarainen, opinnäytetyön valvonnasta.
Heidi Kalliosalo, avustuksesta työn suorituksessa.
Terhi Rantajärvi, mikroskooppinäytteiden valmistuksesta.
Marko Ylitolva, opastuksessa vetokoneen käytössä.

TIIVISTELMÄ

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Tekniikan yksikkö	
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Opinnäytetyön tekijä	Tuomas Anttila
Opinnäytetyön nimi	Ferriittisten ruostumattomien terästen hitsauksessa syntyvien mikrorakenteiden vaikutus lämpövyöhykkeen mekaanisiin ominaisuuksiin
Työn laji	Opinnäytetyö
Päiväys	14.1.2011
Sivumäärä	52 + 22 liitesivua
Opinnäytetyön ohjaaja	TkL Timo Kauppi, Ins. (YAMK) Ari Pikkarainen.
Yritys	Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, T&K, materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmä
Yrityksen yhteyshenkilö/valvoja	DI Mari-Selina Kantanen

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia ferriittiseen ruostumattomaan teräkseen hitsauksessa syntyviä mikrorakenteita ja niiden vaikutuksia teräksen lujuusominaisuuksiin. Työssä pyrittiin selvittämään, pystytäänkö hitsausparametreilla vaikuttamaan syntyvään mikrorakenteeseen ja valituista hitsausparametreista ne, jotka johtavat parhaisiin lujuusominaisuuksiin. Työn osana oli myös laatia testikappaleiden valmistusohjeistusta sekä testaukseen osallistuminen vetokokeiden ja mikrorakennetutkimusten osalta.

Työtä rajattiin käsittämään ferriittiset teräslaadut EN 1.4003, EN 1.4016 ja EN 1.4509. Hitsaukset suoritettiin MAG- ja TIG-hitsausmenetelmillä. Referenssilaituna työssä käytettiin austeniittista ruostumatonta terästä EN 1.4301. Materiaalinpaksuus rajattiin ainoastaan 2 mm vahvuisiin materiaaleihin ja vetokoe suoritettiin ainoastaan MAG-menetelmällä hitsatuille näytteille.

Hitsaukset suoritettiin Steelpoliksessa Raahessa. Testikappaleet koneistettiin JaloteräsStudiolla Torniossa. Vetokokeet suoritettiin Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun T&K-puolen käytössä olevalla vetokoneella, joka on sijoitettu ammattiopisto Lappian tiloihin. Mikrorakennetutkimukset tehtiin valomikroskoopilla ja ne suoritettiin T&K-puolen laboratoriotiloissa.

Tehtyjen kokeiden perusteella voidaan todeta, että ferriittiset ruostumattomat teräkset eivät yllä hitsattuina mekaanisilta ominaisuuksiltaan austeniittisen teräslaadun tasolle. Kuitenkin ferriittisen ruostumattoman teräksen mekaaniset ominaisuudet voidaan säilyttää parhaiten rajoittamalla hitsauksessa tapahtuvaa lämmöntuontia niin paljon, kuin se on laadukkaan hitsisauman kannalta mahdollista. Paras ferriittinen teräslaatu austeniittisen korvaajaksi oli tehtyjen mittausten perusteella EN 1.4509, koska sen mikrorakenteessa eikä mekaanisissa ominaisuuksissa tapahdu suuria muutoksia millään lämmöntuonnin arvolla.

Asiasanat: ferriittinen ruostumaton teräs, hitsaus, lujuus.

ABSTRACT

Kemi-Tornio University of Applied Sciences, Technology	
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Name	Tuomas Anttila
Title	Research of Weldability of Ferritic Stainless Steels
Type of Study	Bachelor's Thesis
Date	14 January 2011
Pages	52 + 22 appendices
Instructor	Timo Kauppi, Lic. Tech. Ari Pikkarainen, M.Eng.
Company	Kemi-Tornio University of Applied Sciences, Technology, R&D
Contact Person/Supervisor from Company	Mari-Selina Kantanen, MSc (Tech.)

The target of the study was to examine microstructures of welded ferritic stainless steels and how these microstructures affect the strength of these steel grades. The target was also to find out if different welding parameters can affect the microstructure and find the parameters which lead to the optimal strength properties. Part of the study was also to compile instructions for the manufacturing of the test pieces and participate in the tensile tests.

The project was defined to contain ferritic steel grades EN 1.4003, EN 1.4016 and EN 1.4509. The test welds were welded with MAG- and TIG-welding processes. Austenitic EN 1.4301 steel was used as a reference grade. Test material thickness was 2 mm and the tensile tests were made only for MAG-welds.

The welds were made in Steelpolis which is located in Raahe. The test pieces were machined in JaloteräsStudio which is located in Tornio. The tensile tests were made with a tester which is placed at Lappia Vocational College premises. Microstructure studies were made with a light illumination microscope in R&D department laboratory.

The results showed that the mechanical properties of welded ferritic stainless steels are not as good as austenitic grade. However, the mechanical properties of ferritic grade can be improved by keeping heat input as low as possible in order to achieve good weld. The best material to replace austenitic grade is ferritic dual stabilized EN 1.4509. EN 1.4509 is the best choice because heat input did not affect the microstructure of the steel and grain size remained fairly small compared with other tested ferritic grades. Welding affected mechanical properties only a little.

Keywords: stainless steel, welding, strength.

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	I
ABSTRACT	III
SISÄLLYSLUETTELO.....	IV
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET	VI
1. JOHDANTO	1
1.1. Jalosauma-projekti	1
1.2. Opinnäytetyön tavoitteet ja tulosodotukset.....	2
2. RUOSTUMATON TERÄS	3
2.1. Austeniittiset ruostumattomat teräokset.....	4
2.2. Ferriittiset ruostumattomat teräokset.....	5
2.2.1. EN 1.4016 Stabiloimaton ferriittinen ruostumaton teräs	6
2.2.2. EN 1.4509 kaksoisstabiloitu ferriittinen ruostumaton teräs.....	7
2.2.3. EN 1.4003 Niukkahiilinen ferriittis-martensiittinen ruostumaton teräs.....	8
3. TERÄKSEN HITSAUS JA HITSATTAVUUS	9
3.1. Kaasukaarihitsaus.....	9
3.1.1. MIG/MAG-hitsaus (Metal Inert/Active Gas welding).....	10
3.1.2. TIG-hitsaus (Tungsten Inert Gas welding)	10
3.2. Hitsattavuus.....	11
3.2.1. Rakenteellinen hitsattavuus.....	12
3.2.2. Valmistuksellinen hitsattavuus.....	12
3.2.3. Perusaineen hitsattavuus	12
3.3. Lisäaineen valinta.....	13
3.4. Ferriittisten terästen hitsausmetallurgia.....	14
3.4.1. Hitsausvyöhykkeet	14
3.4.2. Kaarienergia, lämmöntuonti ja niiden vaikutus rakenteeseen.....	15
3.4.3. Jäähymisaika, $t_{8/5}$	16
3.4.4. Fe-Cr seoksen faasirakenteet.....	19
3.4.5. Seosaineiden vaikutus faasitasapainoon	20
3.4.6. Mikrorakenteen ennustaminen	21
4. FERRIITTISTEN TERÄSLAATUJEN ONGELMAT HITSAUKSESSA.....	22
4.1. Raerajakorroosio	22
4.2. Haurausilmiöt	23
4.2.1. Rakeenkasvuhauraus	24
4.2.2. Sigmahauraus	24
4.2.3. 475°C hauraus	25
4.3. Vetyhalkeilu (kylmähalkeilu).....	25
5. KÄYTETYT MATERIAALIT JA MENETELMÄT	27
5.1. Käytetyt perus- ja lisäaineet	27
5.2. Hitsaukset.....	28
5.3. Hitsisauman jälkikäsitteilyt ja aineenkoetuskappaleiden valmistus	29
5.4. Käytetyt testausmenetelmät	31
5.4.1. Vetokoe	31
5.4.2. Metallografia	33
6. TYÖN SUORITUS	34
6.1. Vetokokeiden esitellit	34

6.2.	Vetokokeet	38
6.2.1.	Hitsaamattomat verrokkisauvat.....	38
6.2.2.	Hitsien vetokokeet.....	40
6.3.	Mikrorakenne tarkastelut	43
6.3.1.	EN 1.4003	44
6.3.2.	EN 1.4016	44
6.3.3.	EN 1.4509	45
6.3.4.	EN 1.4301	45
7.	TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET	46
7.1.	Ferriittiset teräslaadut.....	46
7.1.1.	EN 1.4003	46
7.1.2.	EN 1.4016	47
7.1.3.	EN 1.4509	48
7.2.	Austeniittinen referenssilaatu.....	48
8.	YHTEENVETO	49
9.	LÄHDELUETTELO.....	50
10.	LIITELUETTELO	53

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

EN 1.4003	Ferriittinen ruostumaton teräslaatu
EN 1.4016	Ferriittinen ruostumaton teräslaatu
EN 1.4509	Ferriittinen ruostumaton teräslaatu
EN 1.4301	Austeniittinen ruostumaton teräslaatu
T&K	Tutkimus- ja kehitys
PK-yritykset	Pienet ja keskiuuret yritykset
TEKES	Tekniikan kehittämiskeskus
MIG	Metal Inert Gas welding
MAG	Metal Active Gas welding
TIG	Tungsten Inert Gas welding
SFS EN 10088	Euroopan standardisointilaitoksen ruostumattomat teräslaadut erittelevä standardi
Cr	Kromi
γ	Austeniitti
δ	Ferriitti
α	Ferriitti, martensiitti
C	Hiili
Si	Pii
Mn	Mangaani
Ni	Nikkeli
Mo	Molybdeeni
Ti	Titaani
Nb	Niobi
Cu	Kupari
N	Typpi
S	Rikki
P	Fosfori
PKK	Pintakeskinen kuutiohila
TKK	Tilakeskinen kuutiohila
Duplex	Kaksifaasinen ruostumaton teräslaatu
R_m	Murtolujuus
$R_{p0.2}$	Myötölujuuden 0.2 raja
R_{eL}	Alempi myötöraja
R_{eH}	Ylempi myötöraja
Ar	Argon
He	Helium
CO ₂	Hiilidioksidi
H	Vety
HAZ	Heat Affected Zone, hitsin muutosvyöhyke
$t_{8/5}$	Jäähtymisaika tarkasteluvälillä 500 - 800°C
SFS 3052	Suomen standardoimisliitto, hitsaussanasto
CE	Hiiliekvivalentti
MPa	Megapascal
V	Vanadiini

1. JOHDANTO

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun Tekniikan T&K-materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmä on tutkinut aiemmin ruostumattomien terästen käytettävyyttä, mm. Jalosärmä-projektissa. Nyt aloitetussa projektissa on tarkoitus viedä ruostumattomien teräksien tutkimusta eteenpäin ja tutkia ruostumattomien terästen käytettävyyttä hitsauksen kannalta. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun Tekniikan T&K-puolen tarkoitus on kehittää suoraan käytäntöön sovellettavaa tietoa ruostumattomien terästen käytettävyydestä, jolla pyritään parantamaan PK-yritysten kilpailukykyä yhä tiukentuvilla markkinoilla. Materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmä on aloittanut toimintansa vuonna 2008 Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun yhteyteen rakennetuissa tiloissa. Tutkimusryhmällä on käytettävissä kattava valikoima testauslaitteita erilaisiin käyttötarkoituksiin. Laitteiden ja ammattitaitoisen henkilökunnan avulla materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmä pystyy tarjoamaan laadukkaita tutkimus- ja testauspalveluita asiakkailleen. /12/, /22/

1.1. Jalosauma-projekti

Ruostumattomien terästen käyttö Suomessa on kovassa kasvussa. Ferriittisillä laaduilla pyritään korvaamaan austeniittisia laatuja, koska ferriittisten laatuojen valmistuksessa ei käytetä nikkeliä ja näin ollen niiden hinta on paljon austeniittisia laatuja vakaampi ja alhaisempi. Jalosärmä-projektin yhteydessä lähes jokaisen osallistujayrityksen kohdalla tuli esille ferriittisen ruostumattoman teräksen hitsattavuus ja siihen liittyvä tiedonpuute. Hitsaukseen liittyvän tiedonpuutteen pohjalta materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmä käynnisti vuoden 2010 alussa TEKESin ja elinkeinokeskuksen rahoittaman Jalosauma-projektin, jossa tutkitaan materiaalin paksuuden, railon leveyden, hitsausmenetelmän ja lämmöntonnin vaikutuksia teräksen kiderakenteeseen ja ominaisuuksiin valituilla ferriittisillä ruostumattomilla teräslaaduilla, EN 1.4016, EN 1.4509 ja EN 1.4003. /12/

Projektin hitsauskokeet suoritetaan Kemi-Tornionlaakson koulutuskuntayhtymä Lappian hallinnoiman JaloteräsStudion sekä Raahen seudun teknologiakeskus Oy:n hallinnoiman Steelpolis-tuotantostudion laitteistolla. Jäännösjännitysten simulointi toteutetaan yhteistyössä Luulajassa sijaitsevan Svensk Verktygsteknik Ab:n kanssa. Hitsausnäytteiden aineenkoetus tehdään Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun Tekniikan T&K-laboratorion laitteilla. /12/

Steelpolis on Raahen seutukunnassa sijaitseva metallialan tuotantostudio. Steelpolis tekee tutkimustyötä liittyen teräksiin, niiden teknologiaan, tuotteisiin ja tuotantoprosesseihin. Erikoisosaamisalueena Steelpoliksella on teräsrakenteiden materiaali- ja liittämisteknologia sekä niiden tutkimus. Steelpoloksen vetäjänä toimii Raahen seudun teknologiakeskus Oy ja yhteistyökumppaneina toimivat mm. Raahen seudun kehittämiskeskus, Raahen seudun yrityspalvelut ja Raahen Teollistamisyhtiö. /30/

JaloteräsStudio on osa materiaalien käytettävyyden tutkimusresursseja ja sijaitsee Torniossa ammattiopisto Lappian tiloissa. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun hallinnoima JaloteräsStudio on erikoistunut ruostumattomien terästen soveltavaan tutkimukseen ja se tuottaa yrityksille palveluita ruostumattomiin teräksiin liittyen mm. tuotesuunnittelua, protovalmistusta, teknologiaselvityksiä, asiantuntijapalveluita, koulutusta, jne.. Vuonna 2010 JaloteräsStudio yhdistettiin osaksi Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun tekniikan TKI:n materiaalien käytettävyyden tutkimusta, jonka avulla JaloteräsStudion resursseja voidaan jatkossa hyödyntää mahdollisimman paljon. /8/

1.2. Opinnäytetyön tavoitteet ja tulosodotukset

Työssä on tarkoitus selvittää hitsauksen vaikutusta ferriittisen ruostumattoman teräksen mikrorakenteeseen ja lujuusominaisuuksiin. Opinnäytetyön aihe on rajattu koskemaan ferriittisiä ruostumattomia teräksiä EN 1.4016, EN 1.4509 ja EN 1.4003. Referenssilaauna ferriittisille laaduille käytetään austeniittista EN 1.4301-laata. Hitsausmenetelmistä opinnäytetyöhön on rajattu ainoastaan MIG/MAG- ja TIG-hitsaus. Aihetta rajattiin koskemaan ainoastaan 2 mm vahvuisia materiaaleja ja rikkovia aineenkoetustestejä suoritettiin ainoastaan MAG-menetelmällä hitsatuille testikappaleille. Opinnäytetyön tavoitteita ovat:

- Selvittää valittujen ferriittisten ruostumattomien terästen käyttäytyminen hitsauksessa.
- Selvittää hitsatuissa ferriittisissä ruostumattomissa teräksissä esiintyvät mikrorakenteet.
- Tutkia hitsattujen ferriittisten ruostumattomien terästen lujuusominaisuuksia ja vertailla niitä austeniittisen ruostumattoman teräksen EN 1.4301 vastaaviin lujuusarvoihin.
- Selvittää mekaaniseen aineenkoetukseen liittyviä tekijöitä ja parametreja.

Opinnäytetyön tuloksena on tarkoitus syntyä valmistusohjeistus rikkovassa aineenkoetuksessa käytettävien vetosauvojen ja mikrohieiden valmistukseen. Tarkoitus on myös kerätä aiheeseen liittyviä standardeja ja suosituksia sekä laatia suunnitelma tutkimusnäytteiden merkintää, dokumentointia ja varastointia varten. /10/

2. RUOSTUMATON TERÄS

Ruostumattomilla teräksillä tarkoitetaan yleisesti teräslaatuja, joiden valmistuksessa on käytetty seosaineena kromia (Cr). Standardi SFS EN 10088 määrittelee ruostumattoman teräksen seuraavasti; ” Ruostumattomalla teräksellä tarkoitetaan teräksiä, joissa korroosionkestävyys on keskeisin ominaisuus, joissa hiilipitoisuus on enintään 1,2 % ja joissa kromipitoisuus on vähintään 10,5 %”. Ruostumattoman teräksen korroosionkesto perustuu seosaineena käytetyn kromin kykyyn muodostaa teräksen pintaan, yhdessä ilmassa olevan hapen kanssa, hyvin ohut, passiivinen oksidikalvo. Passiivikalvo on myös uusiutumiskykyinen. Passiivikalvon muodostukseen tarvitaan kromia vähintään standardissa määritelty määrä 10,5 % . /5/, /9/

Muilla seosaineilla voidaan parantaa teräksen ominaisuuksia, mm. sitkeyttä, lujuutta ja hitsattavuutta. Seosaineilla saadaan myös teräkseen haluttu mikrorakenne. Seostuksesta riippuen ruostumattomissa teräksissä esiintyy pääasiassa kolmea metallurgista faasia: austeniitti (γ), ferriitti (α tai δ) tai martensiitti (α). Ruostumattomien terästen yleisimmät seosaineet ja niiden vaikutukset teräksen ominaisuuksiin on esitelty seuraavassa taulukossa. /16/

Taulukko 1. Yleisimmät ruostumattomien terästen seosaineet. /19/

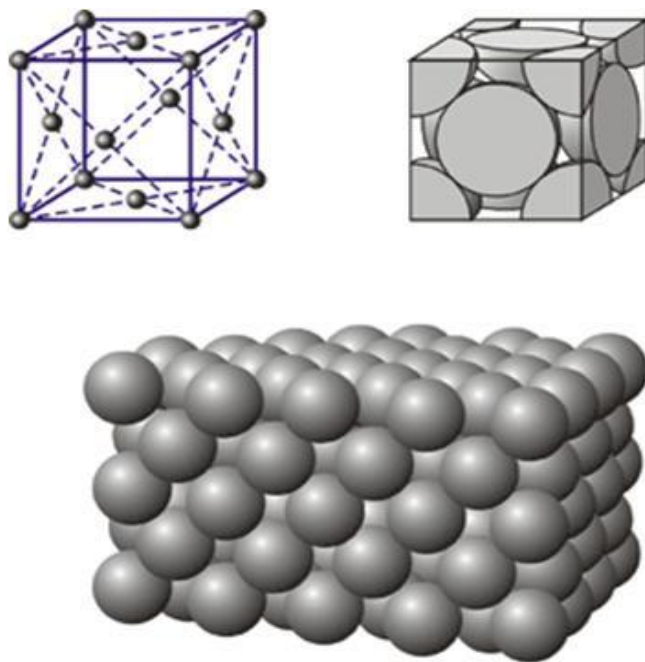
Seosaine:	Vaikutus teräksessä:
Hiili (C)	Suosii austeniittia, lisää lujuutta, lisää herkistymisen riskiä.
Pii (Si)	Suosii ferriittia, toimii deoksidaatioaineena, parantaa hilseilynkestävyyttä
Mangaani (Mn)	Suosii austeniittia, estää kuumahalkeilua.
Kromi (Cr)	Suosii ferriittia, antaa perustan korroosionkestolle, parantaa hilseilynkestoa.
Nikkeli (Ni)	Suosii austeniittia, parantaa korroosionkestoa, parantaa sitkeyttä.
Molybdeeni (Mo)	Suosii ferriittia, parantaa korroosionkestoa, erityisesti pistekorroosionkestoa, nostaa lujuutta korkeissa lämpötiloissa.
Titaani (Ti)	Suosii ferriittia, stabilointiaine herkistymistä vastaan, hienontaa raekoko.
Niobi (Nb)	Suosii ferriittia, stabilointiaine herkistymistä vastaan.
Kupari (Cu)	Suosii austeniittia, parantaa korroosionkestoa joissain hapoissa.
Typpi (N)	Suosii austeniittia, parantaa lujuutta, parantaa pistekorroosionkestoa.
Rikki (S)	Epäpuhtaus, huonontaa korroosionkestoa, parantaa lastuttavuutta, lisää kuumahalkeiluvaaraa.
Fosfori (P)	Epäpuhtaus, huonontaa korroosionkestoa, parantaa lastuttavuutta, lisää kuumahalkeiluvaaraa.

Ruostumattomat teräkset luetaan yleisesti kolmeen pääryhmään, jotka ovat: austeniittiset-, ferriittiset- ja martensiittiset ruostumattomat teräkset.

Ruostumattomien terästen yleisimpiä käyttökohteita ovat kemianteollisuus, puunjalostusteollisuus ja energiateollisuus, joissa ruostumaton teräs on ylivertainen sen korroosionkeston takia. Ruostumattoman teräksen hygieenisuus taas antaa hyvät edellytykset elintarviketeollisuuteen, sairaalalakalustusteiden ja -instrumenttien sekä ruokailuvälineiden ja pesukoneiden valmistukseen. Ulkonäöllisistä syistä ruostumatonta terästä käytetään arkkitehtuurissa paljon ja sen käyttö on alkanut lisääntyä kovasti myös sovellutuksissa, joissa sen korroosionkestoa ja esteettistä ulkonäköä voidaan hyödyntää samanaikaisesti. Näitä sovellutuksia ovat mm. pakoputkistot, katalysaattorit sekä kuljetus- ja liikennevälineet. /16/

2.1. Austeniittiset ruostumattomat teräkset

Austeniittista mikrorakennetta suosivia seosaineita ovat hiili, mangaani, nikkeli, kupari ja typpi. Austeniitti muodostaa pintakeskisen kuutiollisen hilarakenteen, ns. tiivispakkaus kiteen. Tässä hilarakenteessa atomit ovat pakkautuneet $\{111\}$ -tasolle mahdollisimman tiheään. Pintakeskisessä hilarakenteessa suurin tyhjä kolo on 41,4 % hilan atomin halkaisijasta, jonka ansiosta teräksen seostus onnistuu melko helposti. Pintakeskisen kuutiohilan rakenne näkyy kuvassa 1. /12/, /16/

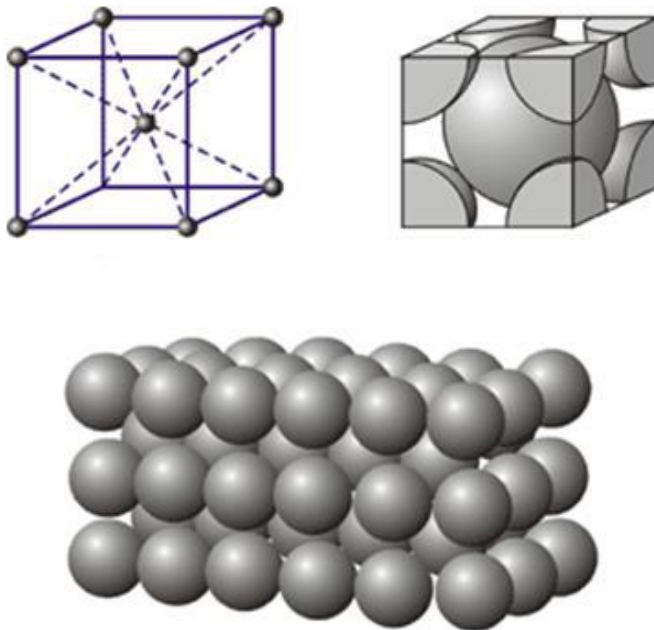


Kuva 1. Pintakeskinen kuutiohila. /12/

Austeniittisille ruostumattomille teräksille on ominaista hyvä sitkeys matalissakin lämpötiloissa ja ne ovat erinomaisia muovattavuudeltaan sekä hitsattavuudeltaan. Ominaisuuksiensa ansiosta austeniittinen ruostumaton teräs soveltuu mitä moninaisimpiin käyttökohteisiin. Austeniittisiä laatuja käytetään mm. prosessi- ja selluloosateollisuudessa, kuljetusvälineissä sekä kotitaloustarvikkeissa. Austeniittisten ruostumattomien terästen huonoja puolia ovat seosaineiden korkea hinta, taipumus jännityskorroosiolle sille suotuisissa olosuhteissa sekä kuumahalkeilu ja vetely hitsattaessa. /16/

2.2. Ferriittiset ruostumattomat teräkset

Ferriittiä suosivia seosaineita puolestaan ovat pii, kromi, molybdeeni, titaani ja niobi. Ferriittisillä teräksillä nikkelipitoisuus on yleisesti alle 0,5 %. Ferriitillä hilarakenteena on tilakeskinen kuutiohila (kuva 2). Poiketen pintakeskisestä, tilakeskinen hilarakenne ei ole tiivispakkauksellinen, vaan sen tihein taso on {110}. Tilakeskisessä rakenteessa suurin tyhjä kolo on vain 29 % hilan atomin halkaisijasta, joten teräksen seostus onnistuu huomattavasti nopeammin kuin pintakeskisen rakenteen omaavilla teräksillä. /12/, /16/



Kuva 2. Tilakeskinen kuutiohila. /12/

Tilakeskiselle rakenteelle tyypillisiä ominaisuuksia ovat hauraus, lujuus ja huonohko muovattavuus. Mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet ovatkin hiiliterästen luokkaa lukuun ottamatta korroosionkestoa. Ferriittinen ruostumaton teräs on osittain karkeneva, joka johtuu sen, korkeissa lämpötiloissa (yli 900 °C), sisältämästä austeniitista. /12/, /16/

Ferriittisiin laatuihin luetaan yleisesti myös kaksifaasiset duplex-teräkset. Duplex-teräksissä kiderakenne on austeniittis-ferriittinen noin 50/50 suhteessa. Pääseosaineina duplex-teräksillä käytetään kromia, nikkeliä ja molybdeenia. Duplex-teräkset ovat normaaleista ferriittisistä poiketen melko hyviä hitsattavia ja niiden sitkeys pysyy melko hyvänä matalissakin lämpötiloissa. Suositeltu käyttölämpötila duplex-teräksillä on -50... +250 °C, koska +500...800 °C lämpötilassa niissä saattaa esiintyä sigma- ja 475 °C haurautta. /16/

2.2.1. EN 1.4016 Stabiloimaton ferriittinen ruostumaton teräs

Ensimmäinen tutkittavista teräslaaduista on stabiloimaton ferriittinen laatu EN 1.4016 (ASTM 430, UNS S43000, X8Cr17). Teräksen mekaaniset ominaisuudet ja koostumus on esitelty taulukoissa 2 ja 3. /3/

Taulukko 2. EN 1.4016 Mekaaniset ominaisuudet /3/

Teräslaatu	Myötölujuus Rp0.2 [MPa]	Murtolujuus, Rm [MPa]	Venymä A5 [%]
EN 1.4016	280	450 - 600	20

Taulukko 3. EN 1.4016 Kemiallinen koostumus /3/

Teräslaatu / Outokummun nimike	Kromin määrä, Cr [%]	Hiilen määrä, C max. [%]
EN 1.4016 / 4016	16-18	0.08

EN 1.4016 kuuluu stabiloimattomien ferriittisten ruostumattomien terästen ryhmään ja on yksi käytetyimpiä ferriittisten ruostumattomien terästen laaduista. Erityisesti tällä teräslaadulla tulee korkean hiilipitoisuuden vuoksi hitsauksessa ongelmaksi HAZ-vyöhykkeelle sijoittuva rakeenkasvuhauraus, martensiittihauraus sekä raerajakorroosio. Nämä ongelmat ilmenevät iskusitkeyden menetyksenä, haurautena ja ruostumisena HAZ-vyöhykkeellä. Hitsattaessa stabiloimattomia laatuja onkin syytä kiinnittää huomiota lämmöntuontiin ja käyttää tarvittaessa esikuumennusta näiden ongelmien välttämiseksi. Nämä teräslaadut eivät ole erityisen alttiita kylmähalkeilulle, mutta niitä hitsattaessa suositellaan kuitenkin käytettäväksi suojakaasua, joka ei sisällä vetyä. Hitsauslisäaineeksi näille teräksille suositellaan yleensä austeniittisia EN 19 9 L- ja EN 23 3 L-lisäaineita. /3/

EN 1.4016-teräksen tyypillisimmät käyttökohteet ovat tuotteissa, joissa vaaditaan lujuutta ja korroosion kestoja sekä matalia valmistuskustannuksia, kuten elintarviketeollisuus, kodinkoneet, ruokailuvälineet ja sisustusmateriaalit. Sen hapettumattomuuden vuoksi sitä käytetään myös jonkin verran savukaasukanavistojen rakennuksessa. /3/

2.2.2. EN 1.4509 kaksoisstabiloitu ferriittinen ruostumaton teräs

Toinen tutkittavista teräslaaduista on EN 1.4509, (AISI 441, UNS S43940, X2CrTiNb18), jossa käytetään sekä niobi, että titaanistabilointia. EN 1.4509-teräslaadun ominaisuuksia ovat: /4/

Taulukko 4. EN 1.4509 mekaaniset ominaisuudet /4/

Teräslaatu	Myötölujuus Rp0.2 [MPa]	Murtolujuus, Rm [MPa]	Venymä A5 [%]
EN 1.4509	min. 250	430 - 630	min. 18

Taulukko 5. EN 1.4509 kemiallinen koostumus /4/

Teräslaatu	C [wt-%]	Cr [wt-%]	Mn [wt-%]	Ni [wt-%]	Ti+Nb [wt-%]	Fe [wt-%]
EN 1.4509	0,02	18,0	-	-	0,6	Bal.

EN 1.4509-laadulla, kuten muillakin stabiloituilla teräksillä martensiitin muodostuminen ja herkistyminen estetään sitomalla hiili ja typpi stabiileiksi karbonitrideiksi. Stabiloinnin ansiosta teräksen mikrorakenne on kaikissa lämpötiloissa ferriittinen. Stabilointiaineina käytetään pääasiassa titaania, niobia tai molempia, kuten testattavassa EN 1.4509-laadussa. Nämä teräkset ovat jonkin verran parempia hitsattavia kuin stabiloimattomat laadut, mutta näilläkin laaduilla on syytä ottaa lämmöntuonti huomioon rakeenkasvun estämiseksi. On myös esitetty, että stabiloituja ruostumattomia teräksiä hitsattaessa liennut stabiloitu vety erkautuu jäähtymisen yhteydessä uudelleen kromirikkaaksi nitridiksi, joka aiheuttaa haurautta hitsissä erityisesti matalissa lämpötiloissa. Tästä ilmiöstä on tehty myös joitain tutkimuksia, mutta täysin varmaa näyttöä siitä ei toistaiseksi ole. Stabiloiduille laaduille suositellaan yleisesti austeniittisiä hitsauslisäaineita, esim. EN 18 8 Mn ja EN 23 3 L. /4/, /6/, /16/.

EN 1.4509-teräslaadun tavallisimpia käyttökohteita ovat mm. sylinterimäiset tuotteet auto- ja prosessiteollisuudessa, kuten lämmönvaihtimet ja katalysaattorit. Sitä käytetään myös arkkitehtuurissa esim. hisseissä, ovien pintamateriaalina. Joissain tapauksissa sitä käytetään myös ravintola- ja kotitaloustarvikkeissa. Tietyissä käyttökohteissa EN 1.4509-laadulla voidaan korkean kromipitoisuutensa vuoksi myös korvata tavallisia austeniittisiä teräslaatuja. EN 1.4509-laatua ei suositella käytettäväksi kloridipitoisessa ympäristössä, koska otollisissa olosuhteissa kloridin vaikutuksesta teräkseen voi syntyä piste- ja rakokorroosiota. Näitä korroosionmuotoja edistäviä tekijöitä ovat mm. kloridin konsentraatio, lämpötila, pH-arvo, jne. /4/

2.2.3. EN 1.4003 Niukkahiilinen ferriittis-martensiittinen ruostumaton teräs

Tunnetuin tämän ryhmän teräksistä on testattava EN 1.4003 (UNS 40977, X2CrNi12)
Tämän teräslaadun ominaisuuksia ovat: /5/

Taulukko 6. EN 1.4003 mekaaniset ominaisuudet. /5/

Teräslaatu	Myötölujuus Rp0.2 [MPa]	Murtolujuus, Rm [MPa]	Venymä A5 [%]
EN 1.4003	320	450	20

Taulukko 7. EN 1.4003 kemiallinen koostumus. /5/

Teräslaatu	C [wt-%]	Cr [wt-%]	N [wt-%]	Ni [wt-%]
EN 1.4003	max. 0,030	10,5 – 12,5	max. 0,030	0,30 – 1,00

Tässä teräksessä hiili- ja typpipitoisuudet ovat rajoitettu hyvin alas (0,01 – 0,03 %). Tämän teräksen sitkeysominaisuudet ovat muista ferriittisistä poiketen parhaat, kun HAZ-vyöhykkeen rakenne on martensiittinen. Hiilen- ja typpipitoisuuden rajoituksen ansiosta HAZ-vyöhykkeelle hitsauksessa syntyvä martensiitti on niukkahiilistä sälemartensiittia, jonka sitkeys on hyvä. Testattavista laaduista EN 1.4003 on hitsauksen kannalta paras, koska se pysyy sitkeänä myös matalissa lämpötiloissa ja haurastumista ei esiinny kovinkaan helposti, vaikka hitsausenergiaa kasvatettaisiin. Sopivia hitsauslisäaineita ovat mm. austeniittiset EN 23 2 L ja EN 19 9 L. /5/, /16/.

EN 1.4003-teräksen tyypillisimpiä käyttökohteita ovat samat käyttökohteet kuin normaaleilla rakenneteräksillä. Näissä käyttökohteissa EN 1.4003-teräksellä vahvuutena on hyvä korroosionkestokyky. Näitä käyttökohteita ovat mm. liikennevälineet (bussit, junanvaunut, rekat, kontit..). Jonkin verran materiaalia käytetään myös teollisuudessa mm. silloissa, kuljettimissa, jne. /5/

3. TERÄKSEN HITSAUS JA HITSATTAVUUS

Hitsauksella tarkoitetaan yleisesti tapahtumaa, jossa metalli- tai muovikappaleet liitetään toisiinsa tai päällystetään ilman erillistä sitovaa väliainetta. Hitsaustapahtumassa kiinteä liitos syntyy, kun metallin rakeet tai muovin molekyylit liittyvät toisiinsa. Hitsausprosessit jaetaan kahteen pääryhmään, joita ovat sulahitsaus ja puristushitsaus. /9/, /17/

Sulahitsauksessa liitoskohdat kuumennetaan sulaan lämpötilaan, jolloin liitettävien kappaleiden rakeet tai molekyylit muodostavat kiinteän liitoksen. Sulahitsaus voidaan suorittaa joko lisäaineen kanssa tai ilman lisäainetta, yleensä kuitenkin lisäainetta käytetään. /9/

Puristushitsaus on prosessi, jossa liitospinnat kuumennetaan tahdasmaiseen lämpötilaan ja puristetaan yhteen niin suurta voimaa käyttäen, että liitettävien kappaleiden välille syntyy kiinteä hitsiliitos. /9/

3.1. Kaasukaarihitsaus

Kaasukaarihitsaus on sulahitsauksen käytetyimpiä hitsausmenetelmiä. Kaasukaarihitsauksessa valokaari muodostuu liitettävän pinnan ja hitsauspistoolin tai lisäaineen välille. Lisäaine voidaan tuoda hitsaustapahtumaan käsin tai langansyöttölaitteistoa käyttäen. Hitsaustapahtumassa valokaari palaa suojakaasuvaipan sisällä, jolloin ilmassa oleva happi ja epäpuhtaudet eivät pääse vaikuttamaan hitsisulaan. Suojakaasu johdetaan hitsaustapahtumaan hitsauspistoolissa olevan suuttimen kautta. Kaasukaarihitsauksessa käytettävä suojakaasu on prosessista riippuen joko inerttiä, eli reagoimatonta tai aktiivista. Käytetyimpiä kaasukaarihitsausprosesseja ovat MIG/MAG- ja TIG-hitsaus /9/

3.1.1. MIG/MAG-hitsaus (Metal Inert/Active Gas welding)

MIG- ja MAG-prosessit ovat käytännössä samanlaisia, ero niiden välillä on käytettävissä suojakaasuissa. MIG-hitsauksessa käytetään inerttiä suojakaasua, joita ovat mm. argon (Ar) ja helium (He). MAG-hitsauksessa puolestaan käytetään aktiivista suojakaasua, joita ovat mm. argonin ja hiilidioksidin (CO₂) seoskaasu tai puhdas hiilidioksidi. MIG/MAG-hitsauksessa valokaari palaa hitsattavan kappaleen ja lisäainelangan välillä suojakaasun muodostaman vaipan sisällä. MIG/MAG-hitsaus voidaan suorittaa erilaisilla kaarimuodoilla, joita ovat lyhyt-, seka-, kuuma- ja pulssikaari. /9/, /16/, /23/

MIG/MAG-hitsauslaitteisto pitää sisällään suojakaasu- ja langansyöttölaitteiston, virtalähteen ja hitsauskaapelin, polttimen sekä maadoituskaapelin. Peruskoneissa kaikki laitteet on kasattu samoihin kuoriin ja teollisuuteen tarkoitetuissa koneissa langansyöttölaitteisto sekä virtalähde ovat yleensä omina yksiköinä. 9/, /23/

Käytettävä lisäainelanka on umpi- tai täytelankaa. Umpilanka valmistetaan kuumavalssatusta teelmästä, joka vedetään sopivaan halkaisijaan. Yleisimpiä lisäainelangan halkaisijoita ovat 0,8, 1,0 ja 1,2 mm. Umpilanka vastaa koostumukseltaan perusainetta. Täytelanka taas valmistetaan kourumaisesta lanka-aihiosta, joka täytetään hitsauspuikon päällystettä vastaavalla rutiili- tai emäspäällysteellä. Tämän jälkeen kouru puristetaan poikkileikkaukseltaan ympyrän muotoiseksi ja valssataan sekä vedetään lopullisiin mittoihin. /9/, /16/, /23/

3.1.2. TIG-hitsaus (Tungsten Inert Gas welding)

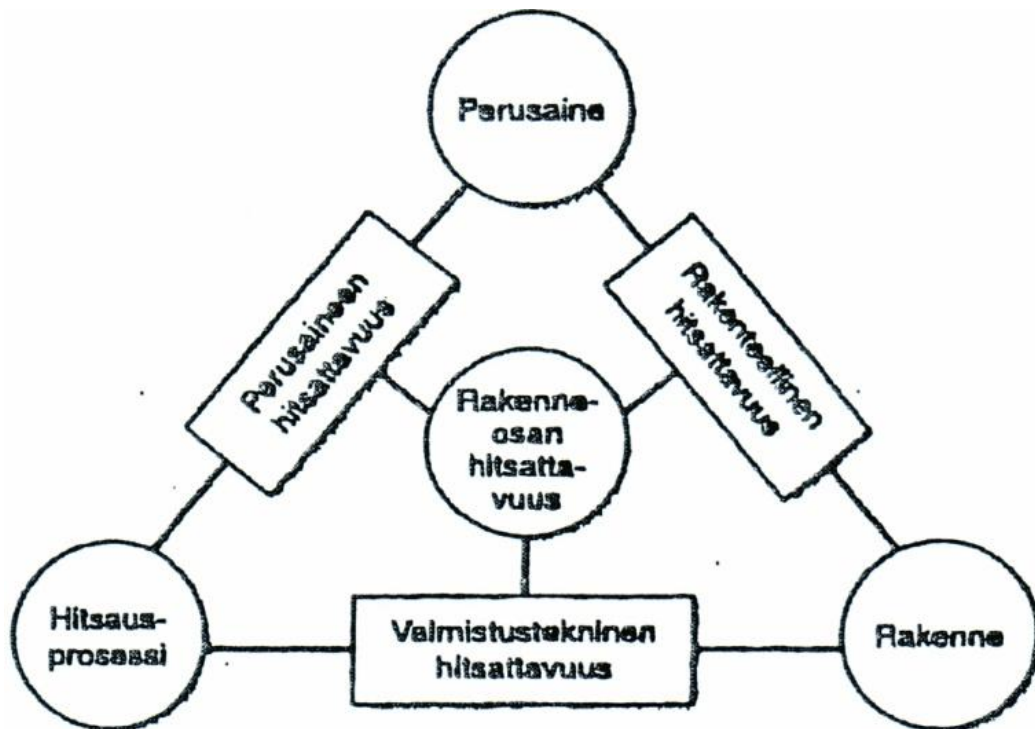
TIG-hitsausprosessissa valokaari palaa työkappaleen ja sulamattoman elektrodin välillä. Kuten MIG/MAG-hitsauksessa, TIG-hitsauksessakin valokaari palaa suojakaasuvaipan suojaamana ja suojakaasu johdetaan hitsaustapahtumaan pistoolissa olevan suuttimen avulla. TIG-hitsaus voidaan suorittaa joko lisäainetta käyttäen tai ilman lisäainetta. Yleensä lisäaine tuodaan TIG-hitsauksessa sulaan käsin. TIG-hitsaus soveltuu hyvin ohuille materiaaleille, koska prosessissa hitsausenergian ja lisäaineen tuonti ovat toisistaan riippumattomia. Näin ollen sulan ja tunkeuman hallinta on helpompaa ja hitsauksessa voidaan käyttää huomattavan pieniä virta-arvoja. TIG-hitsaus soveltuu kaikkien metallisten materiaalien hitsaukseen, mutta se soveltuu erittäin hyvin mm. alumiinille ja ruostumattomalle teräkselle. /9/, /16/, /23/, /33/

TIG-hitsauslaitteet ovat yleensä hyvin kompakteja paketteja. Yleensä laitteistoon kuuluu virtalähde, hitsauskaapeli ja -pistooli sekä maakaapeli ja suojakaasulaitteisto. Nämä kaikki ovat pakattu pieneen ja helposti liikuteltavaan pakettiin. Mekanisoituun hitsaukseen on saatavana myös erillisiä langansyöttölaitteita. /32/

Lisäainelangat on valmistettu samalla tavalla ja pääosin samoista materiaaleista, kuin MIG/MAG-lisäainelangat. TIG-lisäainelangat toimitetaan yleensä 1000 mm mittaisina pätkinä. Yleisimmät langanvahvuudet TIG-hitsauksessa ovat 1,6, 2,0 ja 3,0 mm. Mekanisoituun hitsaukseen tarkoitetut langat toimitetaan vastaavilla keloilla kuin MIG/MAG-langat. /16/, /32/

3.2. Hitsattavuus

Standardissa SFS 3052 on määritelty hitsattavuus seuraavalla tavalla: ”Teräksen hitsattavuus on hyvä, jos siihen voidaan ilman erityisiä lisätoimenpiteitä valmistaa hitsausliitos, joka täyttää asetetut vaatimukset.” Hitsattavuus on siis sitä parempi, mitä helpommin siihen voidaan laitteiden, lisäaineiden ja hitsauksen suorituksen kannalta valmistaa säännökset täyttävä hitsausliitos. Standardi jakaa hitsattavuus käsitteen kolmeen eri osaan, rakenteelliseen-, valmistusteknilliseen- ja perusaineen hitsattavuuteen. Ruostumattomilla teräksillä hitsattavuuskäsite sisältää yleensä myös korroosionkeston säilyttämisen hitsattaessa. Kaavio hitsattavuuskäsitteestä on esitelty kuvassa 3. /9/, /25/, /26/



Kuva 3. Hitsattavuuskäsite. /9/

3.2.1. Rakenteellinen hitsattavuus

Rakenteellinen hitsattavuus huomioi hitsattavan kappaleen rakenteelliset ominaisuudet. Hitsattavuus on rakenteellisesti hyvä, jos hitsattava rakenne pystyy ottamaan suunnitellusti vastaan sille asetetut kuormitusvaatimukset, huolimatta ainepaksuuksista, hitsausseamojen sijainnista ja hitsattavan kappaleen muotoseikoista. Mitä helpommin nämä vaatimukset täyttyvät, sitä parempi rakenteellinen hitsattavuus on. /9/, /23/

3.2.2. Valmistuksellinen hitsattavuus

Valmistukselliseen hitsattavuuteen vaikuttavat hitsauksen suoritukseen liittyvät seikat. Näitä seikkoja voivat olla mm. hitsausasento, railomuoto, ympäristöolosuhteet ja mahdolliset tarvittavat jälkikäsittelyt. Valmistuksellisen hitsauksen katsotaan olevan sitä parempi, mitä paremmin säännösten mukainen hitsisauma voidaan valmistaa kaikenlaisissa työympäristöissä, ilman erityisiä esivalmisteluja ja jälkikäsittelyjä. /9/, /23/

3.2.3. Perusaineen hitsattavuus

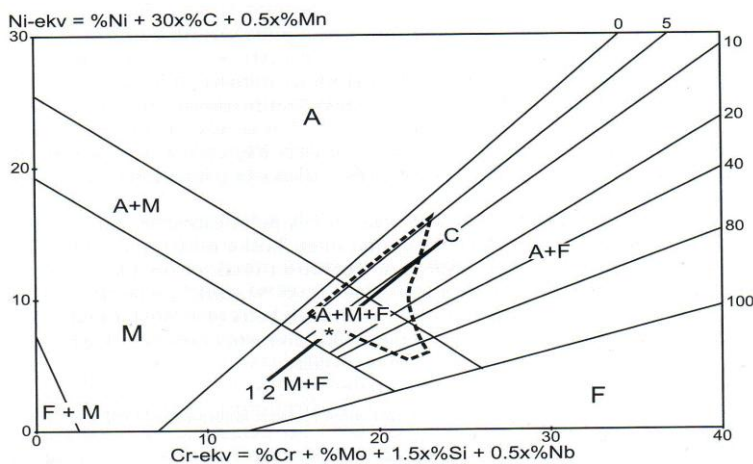
Perusaineen hitsattavuus käsittää käytettävän perusaineen metallurgiset ominaisuudet. Perusaineen hitsattavuuteen vaikuttaa mm. materiaalin herkkyys erilaisille haurastumis- ja korroosiolajeille, kiderakenne sekä lujuusominaisuudet. Perusaineen hitsattavuus on sitä parempi, mitä vähemmän materiaalin ominaisuuksia täytyy huomioida hitsausparametreja valittaessa. /9/, /23/

3.3. Lisäaineen valinta

Austeniittisia laatuja hitsattaessa, suositellaan käytettäväksi koostumukseltaan suunnilleen perusainetta vastaavaa lisäainetta. Yleensä kuitenkin valitaan hieman runsaammin seostettu lisäaine, koska hitsauksen aikana tapahtuvien palohäviöiden ja seosaineiden suotautumisen takia korroosionkesto voi jäädä muuten haluttua matalammaksi. /16/

Myös ferriittisille teräksille yleisenä suosituksena on, että hitsauksessa käytetään austeniittista lisäainetta. Austeniittisen hitsiaineen sitkeysominaisuudet ovat ferriittistä paremmat ja niinpä se pystyy ottamaan paremmin vastaan hitsauksessa syntyviä jännityksiä. Austeniittisia lisäaineita käytettäessä on kuitenkin muistettava, että lisäaineen kromipitoisuus täytyy olla vähintään perusaineen pitoisuus siksi, että korroosionkesto saadaan säilytettyä. Myös niukkahiilisiä ferriittisiä laatuja hitsattaessa suositellaan käytettäväksi austeniittisia lisäaineita, koska austeniitti luottaa vetyä (H) ferriittiä paremmin. Tämän ansiosta muutosvyöhykkeen vetypitoisuus saadaan pidettyä alhaisena ja estettyä ns. kylmähalkeilut. On kuitenkin todettu, että ferriittisiä laatuja hitsattaessa hitsiin syntyy jäähtymisen yhteydessä jäännösjännityksiä, joiden uskotaan juontavan juurensa austeniittisen lisäaineen erilaisesta lämmönjohtamisesta ja lämpölaajenemisesta. /11/, /16/, /23/, /33/

Lisäaineen valintaan käytetään apuna mm. Schaefflerin diagrammia (kuva 4), jonka avulla saadaan ennustettua hitsiin syntyvä mikrorakenne. Perus- ja lisäaineiden koostumuksien perusteella laskettujen kromi- ja nikkeliäkvivalenttien sekä sekoittumisasteen perusteella nähdään diagrammista syntyvä mikrorakenne. Diagrammissa keskellä oleva katkoviivalla merkitty alue on ns. ”hyvä alue”, jossa hitsin mikrorakenteessa esiintyy kaikkia kolmea faasia, ferriittiä, austeniittia ja martensiittia. Tällöin hitsin ominaisuudet ovat parhaat mahdolliset ja lisäaine pyritäänkin valitsemaan siten, että se osuu tälle alueelle. Jos teräksen seostuksessa on käytetty tyypeä, olisi suositeltavaa käyttää lisäaineen valinnassa WRC-diagrammia tai Schaeffler-Delong -diagrammia, koska Schaefflerin diagrammi ei huomioi tyyppien vaikutusta teräksessä. /16/, /20/, /25/



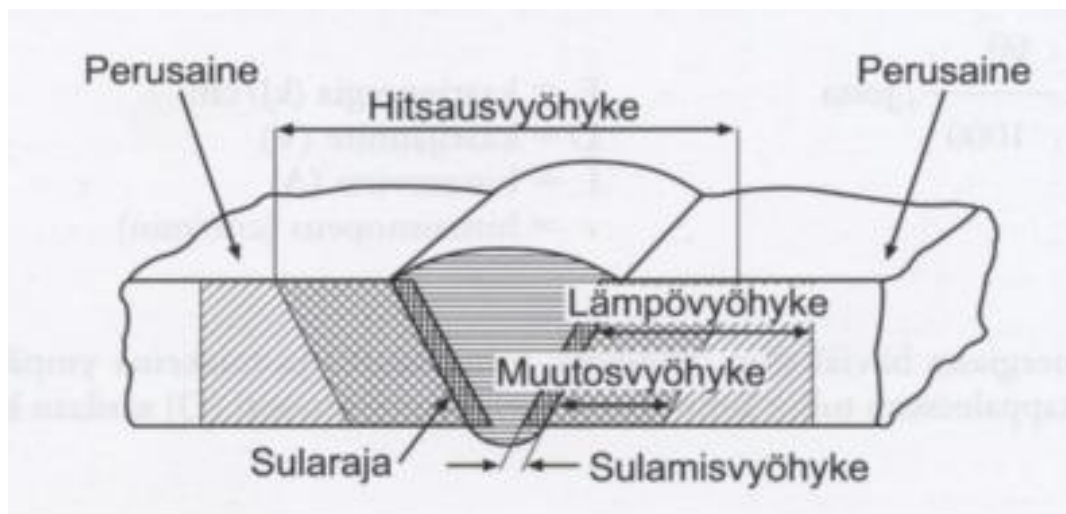
Kuva 4. Lisäaineen valinta Schaefflerin diagrammilla. (Kuvassa perusaine EN 1.4003 ja lisäaine EN 23 12 L). /16/

3.4. Ferriittisten terästen hitsausmetallurgiaa

3.4.1. Hitsausvyöhykkeet

Hitsauksen yhteydessä liitoskohtaan ja sen välittömään läheisyyteen syntyy lämpövaikutuksen myötä erilaisia vyöhykkeitä. Vyöhykkeiden jakautuminen on nähtävissä kuvassa 5. Näitä vyöhykkeitä on määritelty kuusi kappaletta ja ne ovat: /16/

- hitsiaine: perusaine sekä mahdollinen lisäaine, jotka ovat käyneet sulassa tilassa hitsauksen yhteydessä
- sularaja: raja hitsauksessa sulamattoman materiaalin ja hitsiaineen välissä
- muutosvyöhyke (HAZ, Heat Affected Zone): perusaineen osa, jossa hitsauslämpö on noussut niin korkeaksi, että on tapahtunut rakennemuutoksia
- hitsausvyöhyke: hitsin ja HAZ:in muodostama vyöhyke
- sulamisvyöhyke: perusaineen osa, joka on käynyt sulana hitsauksen yhteydessä
- lämpövyöhyke: perusaineen osa, jossa on tapahtunut hitsauksesta johtuvaa lämpötilan nousua



Kuva 5. Hitsausvyöhykkeet. /16/

3.4.2. Kaarienergia, lämmöntuonti ja niiden vaikutus rakenteeseen

Terästä hitsattaessa perusaineen sulattamiseen tarvittava lämpömäärä saadaan tuotettua hitsattavan kappaleen ja elektrodin välillä palavan valokaaren avulla. Ferriittisiä teräksiä hitsattaessa suuresta lämmöntuonnista yleisimmin aiheutuvia ongelmia ovat raekoon kasvu ja martensiitti hauraus hitsin muutosvyöhykkeessä (HAZ) sekä herkistyminen raerajakorroosiolle. Suuren lämmöntuonnin vaikutuksesta teräksessä saattaa esiintyä myös vetelyitä sekä haitallisia jäännösjännityksiä, mutta nämä ovat kuitenkin ferriittisillä laaduilla melko harvinaisia, johtuen niiden hyvästä lämmönjohtokyvystä ja pienestä lämpölaajenemiskertoimesta. /16/

Hitsattavaan rakenteeseen tuotava lämpömäärä ilmoitetaan yleensä energiamääränä senttimetriä kohden (kJ/cm). Tuotavaa energiaa nimitetään kaarienergiaksi ja se saadaan laskettua kaavasta 1. /16/, /25/

$$E = \frac{U \times I}{v} \times \frac{60}{1000} \quad (1)$$

missä

E on kaarienergia (kJ/cm)

U on kaarijännite (V)

I on hitsausvirta (A)

v on hitsausnopeus (cm/min)

Hitsaustapahtumassa ei kuitenkaan koko tuotava energiamäärä kohdistu hitsattavaan kappaleeseen, vaan siinä tapahtuu häviöitä, joissa kaarienergia häviää ympäristöön mm. roiskeina, säteilynä ja johtumisena. Häviöiden jälkeen jäljelle jäänyttä lämpöenergiämäärää kutsutaan lämmöntuonniksi ja se saadaan kaavasta 2. /16/, /25/

$$Q = k \times E \quad (2)$$

missä

Q on lämmöntuonti (kJ/cm)

k on termien hyötysuhde

E on kaarienergia (kJ/cm)

Termisen hyötysuhteen arvo on riippuvainen käytettävästä hitsausprosessista. Standardissa EN 1011 määritellään termisen hyötysuhteen arvoksi MIG/MAG-hitsaukselle 0.8 ja TIG-hitsaukselle 0.6, mutta se voidaan myös laskea kaavasta 3. /16/, /25/

$$k = \frac{Q \times t_{weld}}{Q_{Nominal} \times t_{weld}} = \frac{Q}{Q_{Nominal}} = \frac{Q}{EI} \quad (3)$$

missä

Q on kappaleeseen tullut lämpö

$Q_{Nominal}$ on Virtalähteen teho

t_{weld} on hitsausaika

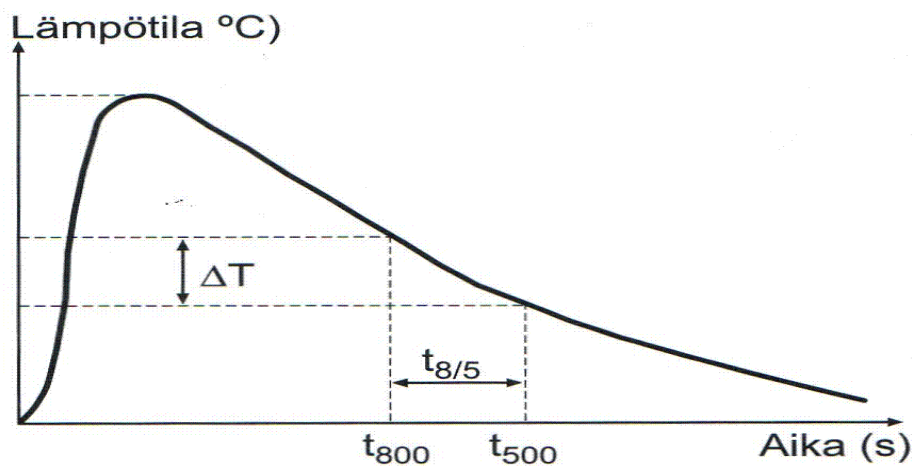
E on kaarienergia

I on hitsausvirta

3.4.3. Jäähtymisaika, $t_{8/5}$

Hitsin jäähtyessä eri haurausilmiöillä ja rakennemuutoksilla on omat lämpötila-alueensa, jotka ovat kriittisimpiä erilaisten haurastumis- ja halkeiluilmiöiden muodostumisen kannalta. Hitsin lämpöjaksoa ja jäähtymisnopeutta tarkastellaan haluttujen ominaisuuksien ennustamiseksi sekä varmistamiseksi hitsissä. Lämpöjakssoon vaikuttavia tekijöitä ovat mm. lämmöntuonti, liitosmuoto, työlämpötila sekä tiettyyn rajaan saakka materiaalin ainepaksuus. /16/

Jäähtymisnopeutta tutkittaessa käytettävä suure on jäähtymisaika. Tämä suure kuvaa aikaa, joka kuluu ennen kuin kriittinen lämpötila-alue on ohitettu. Ferriittisillä teräksillä hitsauksen kannalta merkittävimmät rakennemuutokset ja haurausilmiöt tapahtuvat lämpötilavälillä 500 – 800 °C. Tätä lämpötilaväliä kuvaamaan käytetään jäähtymisajan suuretta $t_{8/5}$. Jäähtymisaikaa voidaan tarkastella erityisellä kuvaajalla, jonka periaate on esitelty kuvassa 6. /16/



Kuva 6. Hitsauksesta aiheutunut lämpöjakso. /16/

Jäähtymisen yhteydessä on erotettavissa kaksi erilaista lämmönjohtumistyyppiä, kaksi- ja kolmedimensionaalinen jäähtyminen. /19/

2D-jäähtymisessä lämmönjohtumista tapahtuu vain lähinnä kappaleen tasossa, jolloin kappaleen ainepaksuus vaikuttaa jäähtymisaikaan. 2D-jäähtymisessä, jäähtymisaika $t_{8/5}$ lasketaan kaavasta 4. /16/, /19/, /25/

$$t_{8/5} = (0,67 - 5 \times 10^4 \times T_0) \eta \times E \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) F_3 \quad (4)$$

missä

$t_{8/5}$ = jäähtymisaika (s)

T_0 = työlämpötila (°C)

η = terminen hyötysuhde

E = hitsausenergia (kJ/cm)

F_3 = hitsityyppikerroin

3D-jäähtyminen on lähinnä paksujen kappaleiden lämmönjohtumistyyppi. 3D-jäähtymisessä lämmönjohtuminen voi tapahtua sekä kappaleen tasossa että sen paksuussuunnassa. 3D-jäähtymisen yhteydessä ainepaksuus ei vaikuta jäähtymisaikaan. 3D-jäähtymisessä jäähtymisaika $t_{8/5}$ saadaan kaavasta 5. /16/, /19/, /25/

$$t_{8/5} = (0,043 - 4,3 \times 10^{-5} \times T_0) \times \frac{\eta^2 \times E^2}{d^2} \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] F_2(5)$$

missä

$t_{8/5}$ = jäähtymisaika (s)

T_0 = työlämpötila (°C)

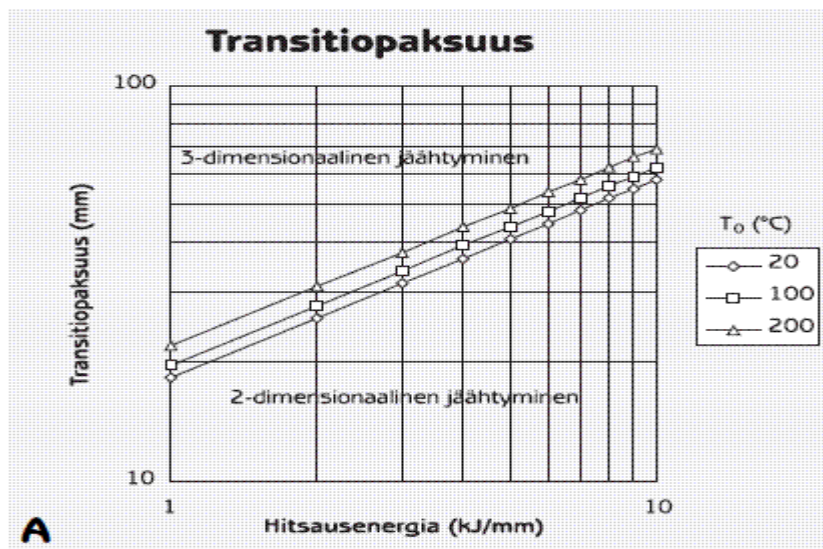
η = termien hyötysuhde

E = hitsausenergia (kJ/cm)

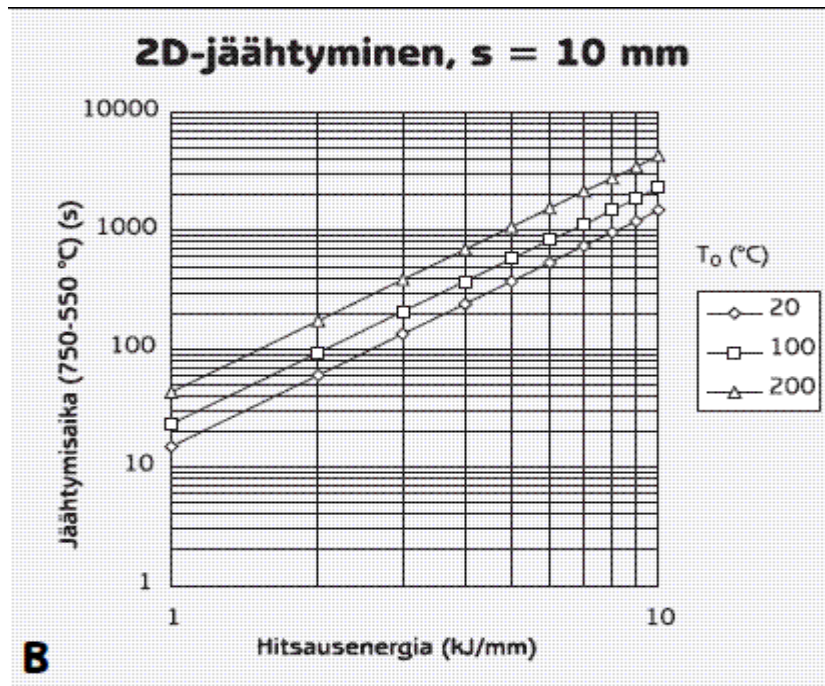
F_2 = hitsityyppikerroin

d = hitsattavan aineen paksuus

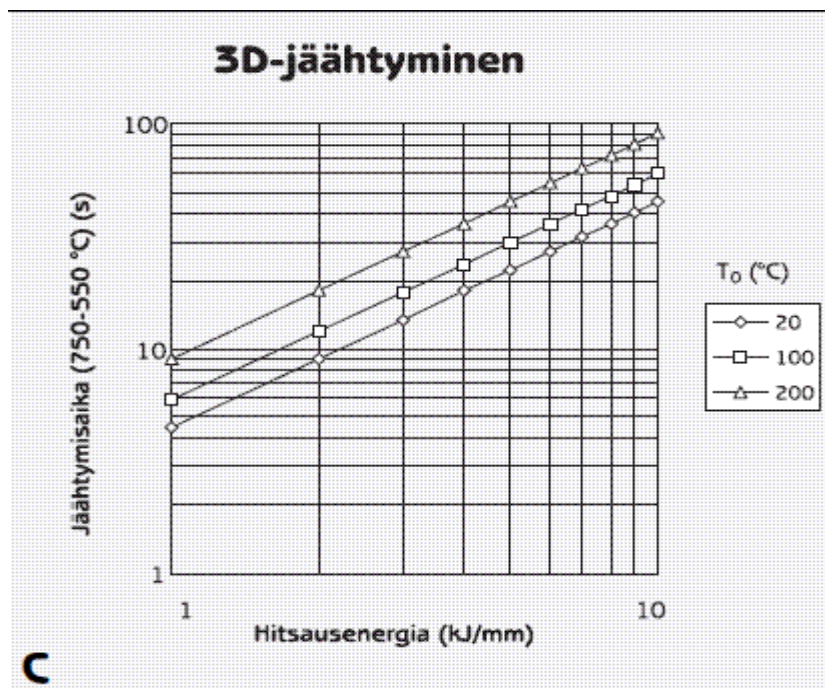
Se, onko kyseessä 2D- vai 3D-jäähtyminen, määritetään aineenpaksuuden perusteella kuvan 7 transitiopaksuusdiagrammia käyttäen. Tähän vaikuttaa myös käytetty työlämpötila. Diagrammin luku tapahtuu siten, että jos sen antama transitiopaksuus on suurempi kuin hitsattavan materiaalin paksuus, niin kyseessä on 2D-jäähtyminen. Muutoin kyseessä on 3D-jäähtyminen. Jäähtymisaikojen määrittäminen tapahtuu kuvien 8 ja 9 diagrammien perusteella. /16/, /19/, /25/



Kuva 7. Transitiopaksuus. /19/



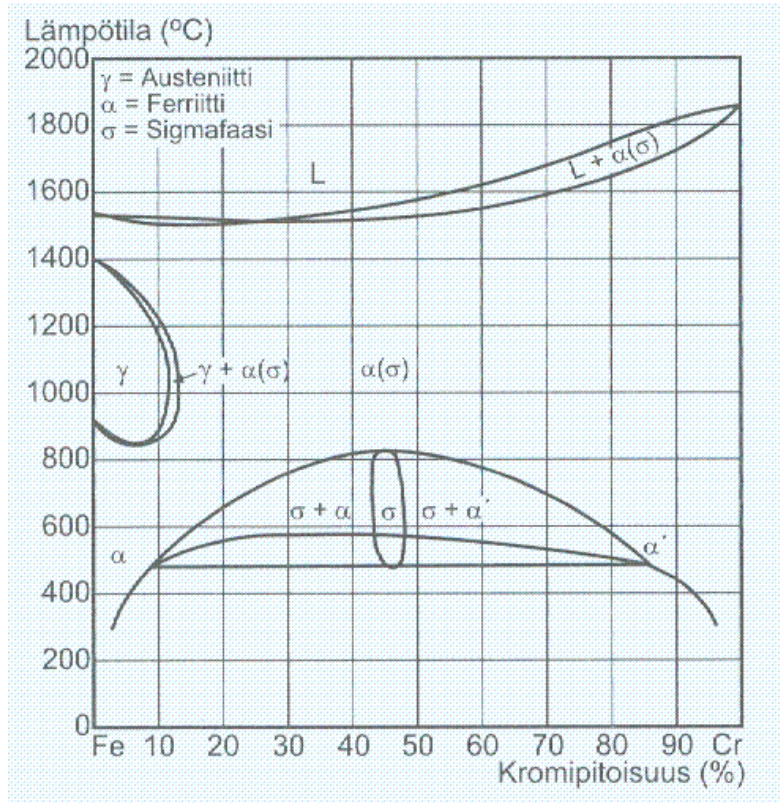
Kuva 8. 2D-jäähtyminen päällehitsille. /19/



Kuva 9. 3D-jäähtyminen päällehitsissä. /19/

3.4.4. Fe-Cr seoksen faasirakenteet

Eri seosaineet vaikuttavat ferriittisen ruostumattoman teräksen faasitasapainoon vaihtelevasti. Periaate on, että ferriittisen ruostumattoman teräksen rakenne on täysin ferriittinen aina sulamislämpötilaan saakka, kromipitoisuuden ollessa ≥ 13 % . /10/



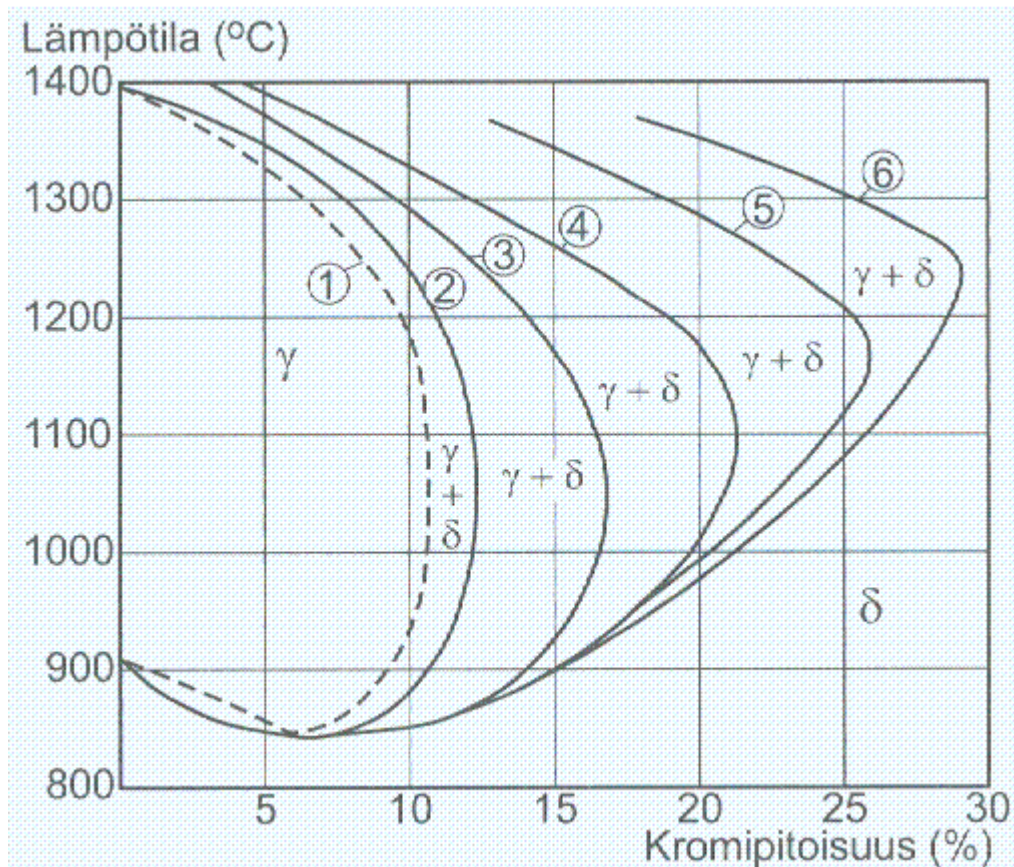
Kuva 9. Fe-Cr tasapainopiirros. /16/

Kuten kuvasta 8 voidaan havaita, pienillä kromipitoisuuksilla (≤ 13 %) tasapainopiirroksessa esiintyy alue, jossa austeniitti on stabiili faasi. Tätä aluetta kutsutaan ns. γ -luupiksi. Tällaisessa tapauksessa teräksen rakenteeseen syntyy lähes poikkeuksetta korkeissa lämpötiloissa pieniä määriä austeniittia, joka jäähtyessään muuttuu martensiittiseksi rakenteeksi. /10/

Kuvasta nähdään myös, että kromiseostuksen ollessa noin 45 – 50 % ja lämpötilan ollessa 500 – 810 °C esiintyy alue, jossa kova ja hauras σ -faasi on stabiili. Liikuttaessa tällä alueella on vaarana, että teräs altistuu sigma-hauraudeksi kutsutulle ilmiölle. σ -faasia esiintyy ferriitin ja martensiitin ohella myös laajalla kromipitoisuudella, mutta vaara altistua sigma-hauraudelle esiintyy lähinnä pitoisuuksilla 45 – 50 %. /10/, /16/

3.4.5. Seosaineiden vaikutus faasitasapainoon

Seosaineilla on voimakas vaikutus γ -luupin sijaintiin ja A_{c1} -lämpötilaan. Ferriittiä stabiloivia seosaineita ovat Cr, Mo, Si, Al, Ti ja Nb. Austeniittia suosivat C, N, Ni, Mn ja Cu. Voimakkaimmin vaikuttavia seosaineita ovat hiili ja typpi. Seosaineet vaikuttavat siten, että ferriittiä stabiloivat seosaineet pienentävät γ -luupin aluetta ja austeniittia stabiloivat aineet taas suurentavat $\alpha + \gamma$ kaksifaasiaaluetta. Kuvassa 10 on esitelty seosaineiden vaikutus γ -luuppiin. /10/



Kuva 10. Seosaineiden vaikutus austeniittialueeseen /16/

3.4.6. Mikrorakenteen ennustaminen

Hitsisauman ominaisuuksien kannalta siihen syntyvä mikrorakenne on ratkaiseva ja se pyritään huomioimaan yleensä jo suunnitteluvaiheessa. Syntyvää mikrorakennetta pyritään ennustamaan erilaisten diagrammien avulla. Ferriittisillä teräslaaduilla ehkä käytetyin on ferriitti-martensiitti -diagrammi. /16/, /19/

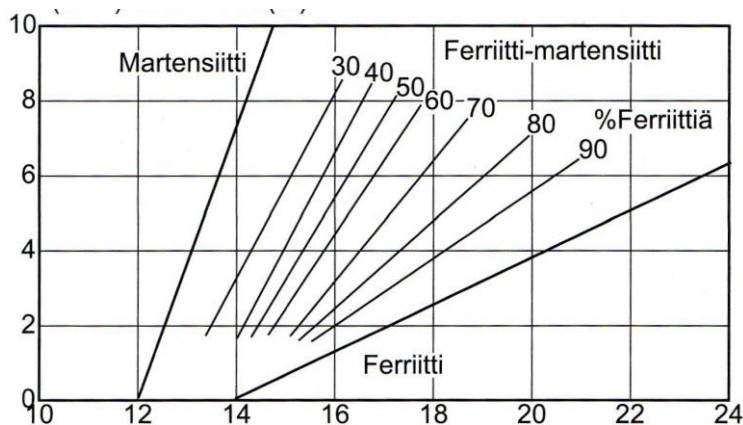
Hitsauksen yhteydessä ferriittiseen teräkseen voi jähmettyessä syntyä kolmea erilaista kiderakennetta. Nämä kiderakenteet ovat: /16/

- Täysin ferriittinen
- Ferriittis-martensiittinen
- Täysin martensiittinen

Syntyvän kiderakenteen koostumus riippuu metallissa olevien faasiin jähmettymisjärjestyksestä. Ferriitti-martensiitti -diagrammissa (kuva 11) kiderakenne pyritään ennustamaan teräksen koostumuksen perusteella. Diagrammissa muuttujina ovat pystyakselilla nikkeliäkvivalentti ja vaakakselilla kromiäkvivalentti, jotka saadaan kaavoista 6 ja 7. /16/, /19/

$$Cr_{ekv} = Cr + 6 \times Si + 8 \times Ti + 4 \times Mo + 2 \times Al(\%) \quad (6)$$

$$Ni_{ekv} = 40 \times (C + N) + 2 \times Mn + 4 \times Ni(\%) \quad (7)$$



Kuva 11. Ferriitti-martensiitti diagrammi. /16/

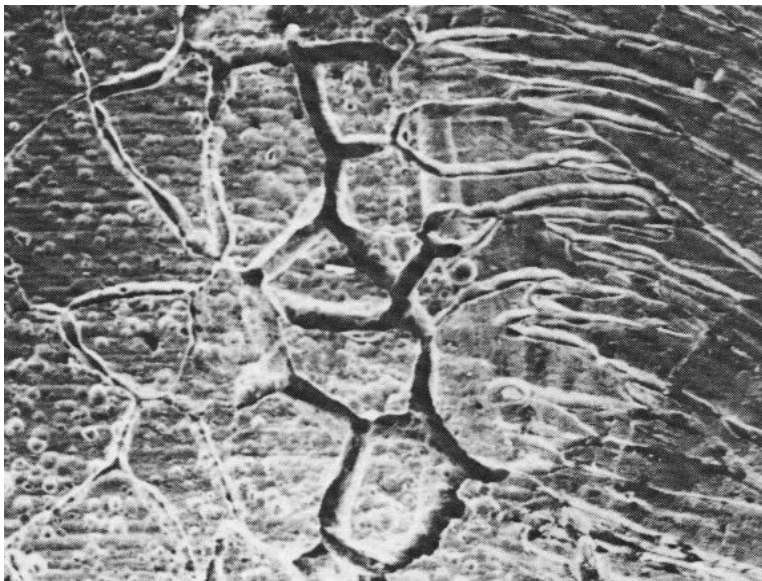
Niukkahiilisillä ferriittis-martensiittisillä teräksillä, joita myös Jalosauma-projektissa testattava laatu EN 1.4003 edustaa, mikrorakenteen ennustamisessa on käytössä Kaltenhauserin ferriittitekijä FF (Ferrite Factor). FF-arvoa voidaan tulkita siihen tarkoitettuun Lefevren-Kaltenhauser -diagrammin avulla, mutta on todettu, että arvolla $FF \leq 8$, teräs on hitsauksen jälkeen martensiittinen ja arvolla $FF \geq 14$ teräs on ferriittinen. Jos arvo on välillä 8 ja 14, teräs on ferriittis-martensiittinen. Ferriittitekijä saadaan laskettua kaavasta 8. /16/

$$FF = Cr + 6xSi + 4xMo + 8xTi + 2xAl - 40x(C + N) - 4xNi - 2xMn (\%) \quad (8)$$

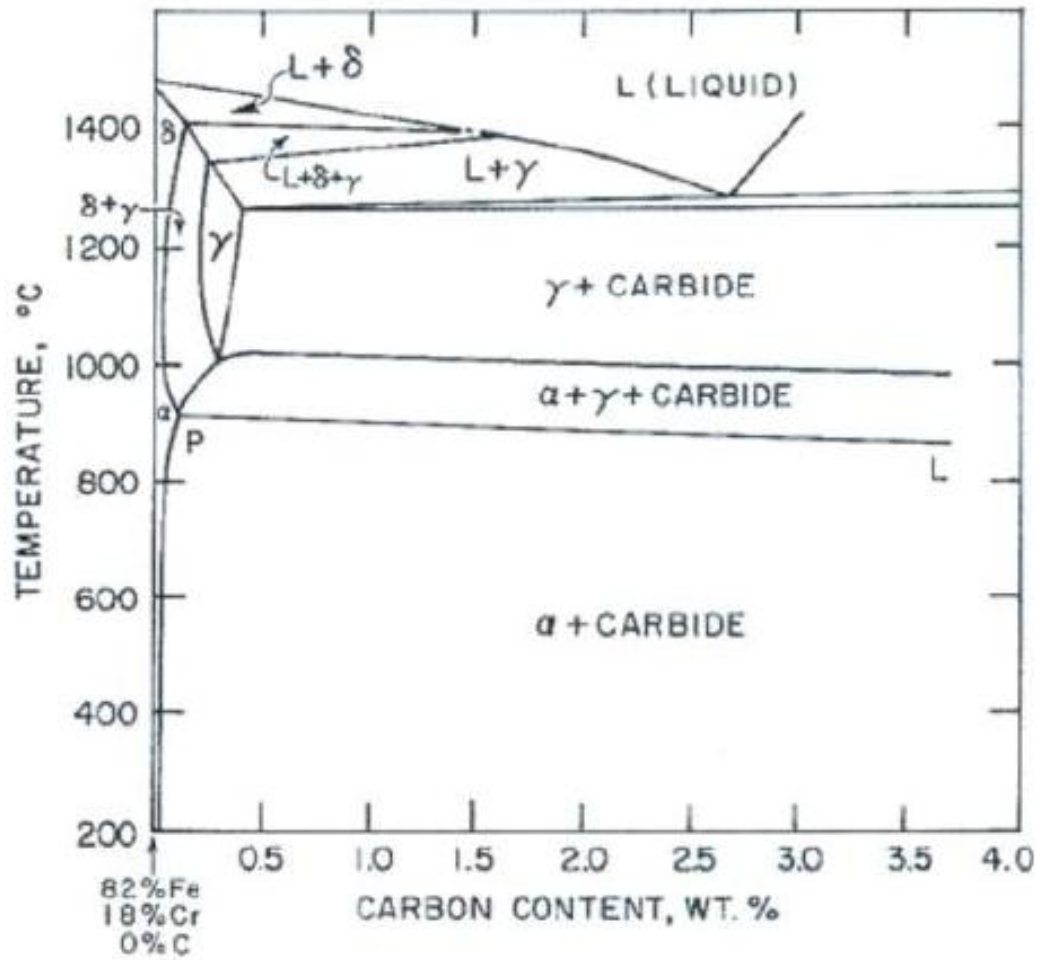
4. FERRIITTISTEN TERÄSLAATUJEN ONGELMAT HITSAUKSESSA

4.1. Raerajakorroosio

Raerajakorroosio on erityisesti stabiloimattomilla ferriittisillä ruostumattomilla teräksillä esiintyvä korroosimuoto. Raerajakorroosion aiheuttajana on yleensä suuri lämmöntuonti hitsauksessa, jonka vaikutuksesta kromikarbidit alkavat erkautua teräksen raerajoille (herkistyminen). Raerajoille syntyy kromiköyhiä alueita, joissa alhaisen kromipitoisuuden takia passiivikalvon muodostus ei ole enää mahdollista. Herkistyminen tapahtuu yleensä hitsin muutosvyöhykkeellä, mutta ferriittisiä lisäaineita käytettäessä erkautumista voi tapahtua myös hitsiaineessa. Herkistymisen riskiä lisää korkea hiilipitoisuus (yli 0,05 %). Austeniittisilla teräksille herkistymisen kannalta merkittävin lämpötilaväli on 550 – 880 °C, kun taas ferriittisillä laaduilla altistuminen herkistymiselle tapahtuu 925 °C:n lämpötiloissa, koska tämän lämpötilan jälkeen hiilen liukoisuus ferriittiin kasvaa merkittävästi. Tämä alue on esitetty P-L -linjana kuvassa 13. Jäähdytyksessä hiilen ja typen liukoisuus pienenee, minkä johdosta karbidit ja nitridit erkautuvat raerajoille ja niiden läheisyyteen muodostuu kromiköyhiä alueita. Herkistymisen ferriittisessä teräksessä voi aiheuttaa esimerkiksi hitsaus, jonka johdosta lämpötila nousee P-L linjan yläpuolelle. Herkistyminen sijoittuu lähinnä hitsisauman ja muutosvyöhykkeen yhteyteen. Herkistyminen voidaan eliminoida ferriittisestä materiaalista hehkuttamalla sitä uudelleen yli 800 °C. Kuvassa 12 on mikrorakennekuva raerajakorroosiosta. /13/, /14/, /15/, /19/, /25/,



Kuva 12. Mikroskooppikuva raerajakorroosiosta /13/



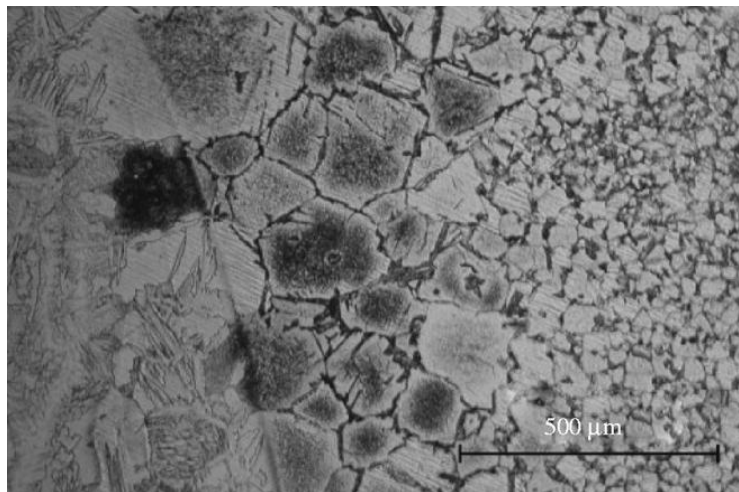
Kuva 13. 18Cr-seoksen faasidiagrammi hiilipitoisuuden muuttuessa. /15/

4.2. Haurausilmiöt

Hitsauksen kannalta yksi ferriittisten teräslaatuojen kompastuskivi on niiden alttius erilaisille haurausilmiöille. Näitä haurausilmiöitä ovat rakeenkasvuhauraus, sigmahauraus, 475 °C hauraus ja vetyhauraus.

4.2.1. Rakeenkasvuhauraus

Rakeenkasvuhauraus on erityisesti stabiloimattomien- ja superferriittisten laatuojen ongelma. Rakeenkasvu kasvaa hehketettaessa terästä yli 900 °C lämpötilassa. Rakeenkasvu sijoittuu pääasiassa hitsin muutosvyöhykkeelle ja ilmenee siellä iskutkeyden heikkenemisenä, mutta perusainetta vastaavia lisäaineita käytettäessä rakeenkasvua voi tapahtua myös hitsiaineessa. Usein erityisesti ferriittisillä laaduilla esiintyy rakeenkasvun yhteydessä martensiittihaurautta. Martensiittihauraus on suuren hiilipitoisuuden aikaansaama haurausilmiö, jossa korkeissa lämpötiloissa teräksen mikrorakenteeseen syntyy austeniittia, joka jäähtyessään muuttuu martensiitiksi. Nämä kaksi haurausilmiötä saavat aikaan hitsin muutosvyöhykkeelle suurirakeisen martensiittisen mikrorakenteen, joka haurastuttaa teräksen erityisesti matalissa lämpötiloissa, mutta voi johtaa lähes koko iskutkeyden menettämiseen jo huoneenlämmössä. Austeniitin muodostusta pystytään estämään stabilointiaineilla, joita ovat pääasiassa titaani ja niobi. Austeniitin muodostumisen estyessä teräs on kaikissa lämpötiloissa ferriittinen ja näin haurasta martensiittista rakennetta ei pääse syntymään. Kuvassa 14 näkyy rakeenkasvua ferriittisen teräksen mikrorakenteessa. /12/, /13/, /26/



Kuva 14. Rakeenkasvua ferriittisessä HAZ:ssa.
[/http://sight.cjb.net/fig/1280560403003.png/](http://sight.cjb.net/fig/1280560403003.png/)

4.2.2. Sigmahauraus

Sigmahaurautta voi esiintyä runsas kromisilla ferriittisillä teräksillä. Seosaineista molybdeeni, titaani ja pii lisäävät sigmahaurauden riskiä. Sigmahauraus on ilmiö, jossa kovat sigma-, chi-, ja lavesfaasit alkavat erkautua mikrorakenteessa. Erkautuminen tapahtuu lähinnä lämpötilavälillä 600 –800 °C. Sigmahaurauden yhteydessä teräksen kovuus kasvaa huomattavasti ja siitä tulee haurasta. Sigmahaurauden aiheuttava erkautuminen voi myös heikentää korroosionkestoa. /16/, /27/

4.2.3. 475 °C hauraus

475 °C hauraus on samantyyppinen ruostumattomien terästen haurastumisilmiö kuin sigmahauraus. 475 °C haurautta esiintyy sigmahaurauden tapaan runsas kromisilla teräksillä, mutta erityisen herkkiä sille ovat runsaasti seostetut teräslaadut. 475 °C haurauden kannalta kriittinen lämpötilaväli on 400 –550 °C. 475 °C hauraus aiheuttaa teräksessä suurta kovuuden nousua sekä haurastumista ferriittiin erkautuvien kovien faasien vuoksi. 17 % kromia sisältävillä teräksillä tämän haurausilmiön eteneminen on kuitenkin suhteellisen hidasta ja tulee kysymykseen lähinnä pitkäaikaisessa käytössä kriittisellä lämpötila-alueella. /13/, /27/

4.3. Vetyhalkeilu (kylmähalkeilu)

Vetyhalkeilu on erityisesti ferriittisillä ruostumattomilla teräksillä esiintyvä halkeiluilmiö. Vetyhalkeilun aiheuttaa, nimensäkin mukaisesti, hitsiaineeseen joutunut vety. Vetyä hitsiaineeseen voi joutua mm. lisääineen sekä perusaineen kosteudesta ja epäpuhtauksista, ilmakehän kosteudesta ja suojakaasusta. Vetyhalkeilua voi esiintyä muutosvyöhykkeessä sekä hitsiaineessa. Vetyhalkeilua esiintyy yleensä hitsin lämpötilan jäähtyttyä 150 °C alapuolelle. Vetyhalkeilu on sikäli hankala halkeiluilmiö, että halkeamia saattaa syntyä hitsiin vielä useiden vuorokausien jälkeen hitsin jäähtymisestä. /5/, /7/, /16/, /26/, /33/

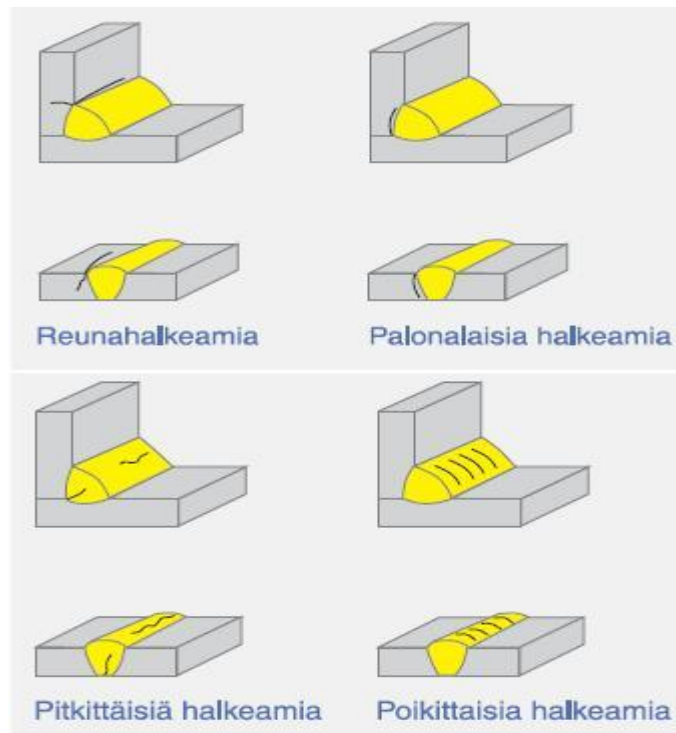
Vetyhalkeilulla on esitetty olevan kolme syntytekijää, joita ovat: /7/

- Hitsauksessa syntynyt kova ja hauras mikrorakenne
- Hitsiin liuennut vety
- Hitsauksessa syntyneet jännitykset

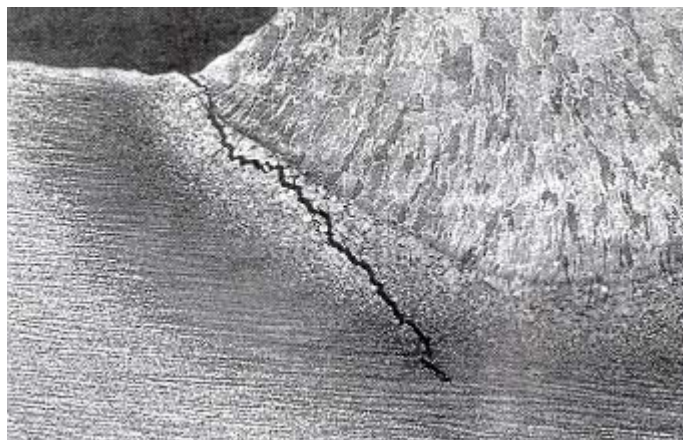
Vetyhalkeilun muutosvyöhykkeellä aiheuttaa hehkutuksessa syntynyt, ainakin osittain martensiittinen rakenne. Martensiittinen rakenne on kovaa ja haurastuu vedyn vaikutuksesta. Rakenteen haurastuminen yhdessä syntyneiden jännitysten kanssa aiheuttaa halkeilua hitsin jäähtyessä. Halkeamat esiintyvät yleensä kohtisuoraan hitsissä vallitsevia vetojännityksiä vastaan. Vetyhalkeiluriskiä pyritään hitsin muutosvyöhykkeellä arvioimaan ns. hiiliekvivalentin (CE) avulla. Hiiliekvivalentti saadaan laskettua teräksen koostumuksen avulla kaavasta 9. /7/, /16/, /33/

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo-V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (9)$$

Hyvän hitsattavuuden rajana pidetään yleisesti CE-arvoa 0,40 %, jonka jälkeen hitsattaessa on syytä käyttää jo esikuumennusta. Kuvasta 15 voidaan nähdä, että vetyhalkeamia voi muodostua erilaisiin paikkoihin hitsin alueelle. Kuvassa 16 taas näkyy vetyhalkeama hitsin mikrorakennekuvassa. /33/



Kuva 15. Erityyppisiä vetyhalkeamamuotoja. /7/



Kuva 16. Vetyhalkeama /<http://www.twi.co.uk/twiimages/jk45f3.jpg/>

Terästen kehittyessä yhä niukkahiilisemmiksi, vetyhalkeiluilmio on siirtynyt vähitellen hitsin muutosvyöhykkeeltä hitsiaineeseen. Vetyhalkeilua voi siis esiintyä hitsiaineessa lähinnä niukkahiilisiä, lujia teräksiä hitsattaessa. Hitsiaine voi tulla määrääväksi esikuumennukselle puhuttaessa 500 – 600MPa:n myötölujuusrajaan. Vetyhalkeilua pyritään estämään mm. matalahiilisillä teräslaaduilla, käyttämällä austeniittisiä lisäaineita, huolehtimalla lisä- ja perusaineiden puhtaudesta sekä kuivuudesta ja käyttämällä esikuumennusta sekä vedynpoisto- ja jälkilämpökäsittelyjä. /5/,/7/, /16/, /33/

5. KÄYTETYT MATERIAALIT JA MENETELMÄT

5.1. Käytetyt perus- ja lisäaineet

Tutkimuksissa käytetyistä teräslaaduista kolme kappaletta edustivat erilaisia ferriittisiä teräslaatuja, jotka olivat stabiloimaton EN 1.4016, niukkahiilinen EN 1.4003 ja kaksois-stabiloitu 1.4509. Referenssilaatuna käytettiin austeniittista EN1.4301 peruslaatua. Valmistajan ilmoittamat keskimääräiset koostumukset on esitelty taulukossa 8 ja valuerien analysoidut koostumukset taulukossa 9. /1/, /12/

Taulukko 8. Outokummun ilmoittamat seosainepitoisuudet käytetyille materiaaleille. /2/, /3/, /4/, /5/, /29/

Outokummun nimike	EN	ASTM	C	Cr	Ni	N	Mo	Muut	Suosittelut Lisäaineet
4003	EN 1.4003	S40977	0.02%	11,5%	0,3 - 1,0%		0.5%		13 tai 19 9 L
4016	EN 1.4016	430	0.04%	16,5%					13 tai 19 9 L
4509	EN 1.4509	S43932	0.02%	18%				Nb 0,5% , Ti 0,3%	19 9 Nb tai 18 8 Mn
4301	EN 1.4301	304	0.04%	18,1%	8,2%				19 9 L

Taulukko 9. Materiaalina käytettyjen valuerien analysoidut seosainepitoisuudet. /28/

Materiaali	EN 1.4003	EN 1.4016	EN 1.4509	EN 1.4301
Sulatusnro.	81617	79835	78309	83006
Rullanro.	816174	798351	783094	830068
Paksuus	2mm	2mm	2mm	2mm
C %	0,011	0,048	0,011	0,051
Cr %	11,18	16,11	18,45	18,22
Ni %	0,44	0,2	0,29	8,1
Mn %	1,39	0,5	0,47	1,49
Mo %	0,02	0,02	0,02	0,31
N %	0,015	0,029	0,015	0,045
Ti %	0,001	0,001	0,117	0,007
Nb %	0,006	0,004	0,448	0,009
Cu %	0,12	0,1	0,11	0,44
S %	0,002	0,001	0,001	0,001
P %	0,026	0,029	0,025	0,031
V %	0,042	0,054	0,067	0,07
Co %	0,029	0,019	0,021	0,172
Ca %	0	0,001	0	0
Al %	0,003	0,003	0,009	0,002
O %	0,006	0,004	0	0,003

5.2. Hitsaukset

Hitsaukset suoritettiin Raahan Steelpoliksessa työssä tutkittujen näytteiden osalta. Hitsauksia varten valittiin kolme eri lämmöntuontiarvoa, joilla näytteitä hitsattiin. Eri arvoilla oli tarkoituksena selvittää lämmöntuonnin vaikutuksia teräksen ominaisuuksiin. Valitut lämmöntuontiarvot olivat suuruudeltaan pieni: 0,15kJ/mm, keskisuuri: 0,23kJ/mm ja suuri: 0,35kJ/mm

Hitsausmenetelmänä levyille käytettiin MAG-hitsausta sekä TIG-hitsausta. Kokeissa hitsatut levyt olivat kooltaan 150 mm x 300 mm sekä paksuudeltaan 2 mm. Hitsaukset suoritettiin kaikilla materiaaleilla samaan suuntaan ja hitsaus tapahtui yhdeltä puolelta ilman juuritukea. Ilmarako pyrittiin pitämään vakioarvossa, joka oli 0,5 mm. Muutamissa levyissä esiintyi pientä heittoa ilmaraon arvossa (näyte 3A 0 mm ja näyte 2A 0,3 mm), joka on myös osittain sidoksissa hyvän sauman saavuttamiseen. Hitsaukset suoritettiin ilman railon työstämistä, leikattuun pintaan.

MAG-hitseissä lisäaineena kaikilla materiaaleilla käytettiin teräksen valmistajan suosittelemaa austeniittista ja matalahiilistä Lincoln LNM 304LSi-lisäainelankaa, jonka tärkeimmät lujuusominaisuudet sekä suojakaasusuositus on esitetty taulukossa 10. Hitsauskaasuna käytettiin argonin ja hiilidioksidin seoskaasua sekä juurikaasuna puhdasta argonia.

TIG-hitsaukset suoritettiin suoraan päällehitsinä ilman lisäainetta, käyttäen puhdasta argonia suojakaasuna.

MAG-hitsausnäytteet hitsattiin Kemppi pro -merkkisellä mekanisoidulla hitsauskoneella, jossa ohjelmana käytettiin Kemppi pro duplex ArHeO₂ -ohjelmaa. TIG-hitsausnäytteet hitsattiin käyttäen Kemppi MasterTig MLS 2300 ACDC -hitsauskonetta. /1/, /12/

Taulukko 10. Lisäaineen koostumus. /18/

Nimike	EN 12072	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Suojakaasu
Lincoln LNM 304LSi	G/W 19 9LSi	0.010%	0.8%	1.7%	20%	10%	0.2%	Ar (100%), Ar + >0-5% O ₂ , Ar + >0-3% CO ₂
Hitsaus menetelmä	R_{p0.2} [N/mm²]	R_m [N/mm²]	Venymä	Isku sitkeys +20°C [J]	Isku sitkeys +20°C [J]		Isku sitkeys -196°C [J]	
MAG	420	570	45		85		55	
TIG	390	590	36	120			50	

5.3. Hitsisauman jälkikäsitteilyt ja aineenkoetuskappaleiden valmistus

Hitsauksen jälkeen hitsisaumat peitattiin JaloteräsStudiolla korroosionkeston palauttamiseksi. MAG-hitsatut näytteet peitattiin käyttäen Polinox p-rapid -peittauspastaa. Peittausaikoina käytettiin ferriittisille 20 minuuttia ja austeniittisille 30 minuuttia. TIG-hitsisaumat peitattiin elektrolyyttipeittauksella ja siihen käytettiin Fronius' magic cleaner -laitetta. Vaikuttavana aineena käytettiin Electrolyte "red" cleaning -peittausainetta. Peittausaikana TIG-hitseille käytettiin 10 sekuntia ja virtana 10A. Kuvissa 17 ja 18 näkyy hitsattu levy peittaamattomana ja peitattuna.

Aihoiden leikkaaminen levystä edellytti hitsikuvun koneistuksen matalammaksi. Koneistus suoritettiin jyrsimällä ammattiopisto Lappian Tornion toimitiloissa. Hitsin kupu jyrsittiin lähes hitsin pinnan tasalle, kuitenkin välttämällä työstölämmön aiheuttamia rakennemuutoksia.



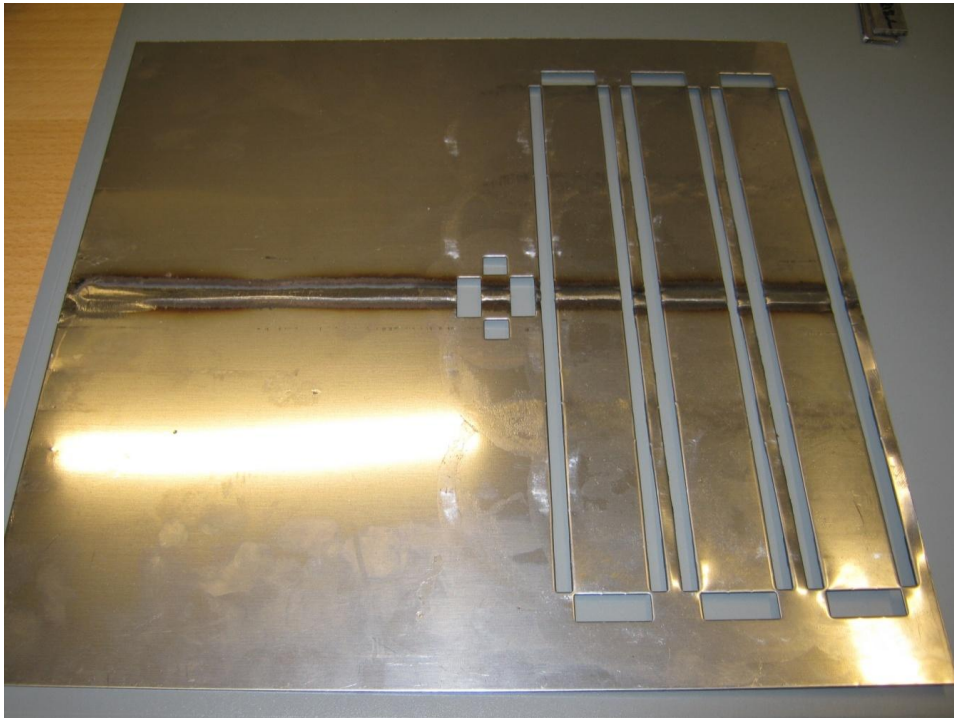
Kuva 17. EN 1.4003-materiaali ennen peittämistä.



Kuva 18. EN 1.4003-materiaali peittämisen jälkeen.

Aineenkoetusaihioiden leikkaus hitsatuista levyistä suoritettiin myös Torniossa ammattiopisto Lappialla. Leikkausmenetelmänä käytettiin meistoa ja työstökoneena CNC-ohjattua Murata Wiedemann centrum 1000/Q -levytyökeskusta. Aihiot leikattiin levyistä siten, että vältettiin levyissä hitsattuina olleiden lämpöanturien paikkojen osumista aihioiden pinta-alalle. Mikrohieaihioiden valmistaminen meistämällä osoittautui vaikeaksi, koska pienet palat eivät pysyneet ”pitsien” avulla kiinni levyssä koko työstön ajan vaan irtoilivat ja hukkuivat siten koneen sisälle. Tämän takia suurin osa mikroskooppinäytteiden aihiosta valmistettiin sahaamalla vetosauva-aihioiden väliin jääneestä, ylimääräisestä materiaalista, sopivan kokoisia paloja. Kuvassa 19 on testilevy aihioiden leikkausta varten.

Aihioiden leikkauksen jälkeen näytteet työstettiin lopulliseen mittaansa jyrsimällä ne ammattiopisto Lappian tiloissa Torniossa. Aineenkoetustesteissä käytetyn vetosauvan työpiirustus löytyy kuvasta 20.



Kuva 19. Vetosauva- ja mikrohie-aihiot meistettynä harjoituskappaleesta.

5.4. Käytetyt testausmenetelmät

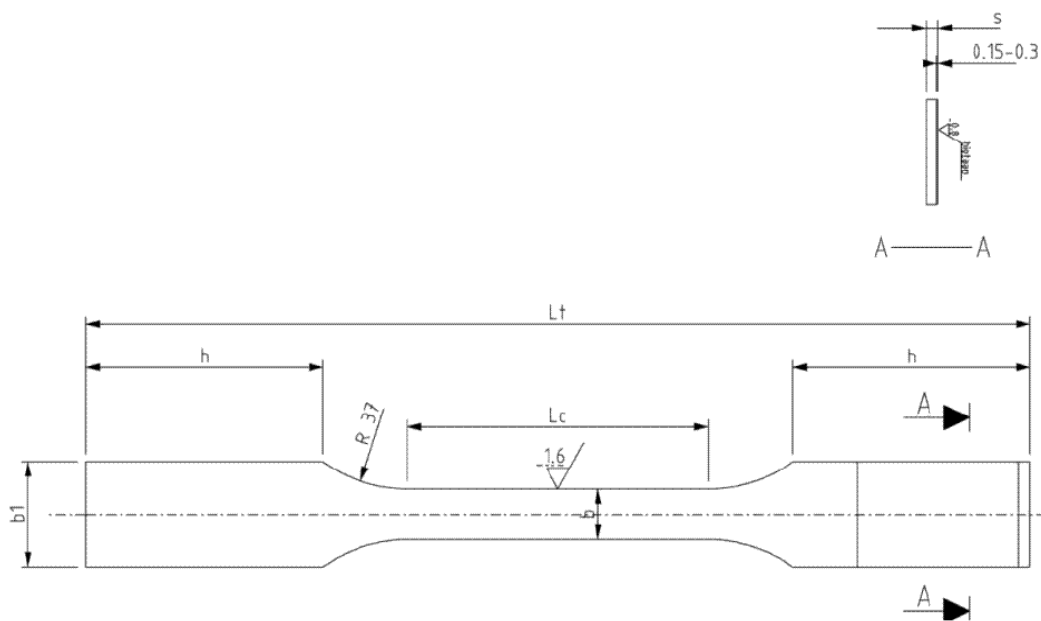
5.4.1. Vetokoe

Vetokoe on ainetta rikkova testausmenetelmä, jossa vedetään standardissa määritellyn muotoista vetokoesauvaa, joko katkeamiseen asti tai kunnes voiman arvo ei enää kasva. Tärkeimmät määritettävät ominaisuudet ovat mm. ylempi ja alempi myötöraja R_{eH} ja R_{eL} , suhteellisuus myötöraja $R_{p0.2}$, murtolujuus R_m sekä kimmokerroin E , tasavenymä A_g ja murtovenymä A_t . Myötöraja on voiman raja-arvo, jonka jälkeen rakenteeseen alkaa syntyä plastista eli pysyvää muodonmuutosta. Selvä ylempi ja alempi myötöraja (kuva 22) on erotettavissa lähinnä TKK-hilarakenteen omaavilla hiiliteräksillä. Suhteellisuusraja $R_{p0.2}$ (kuva 21) puolestaan on käytössä PKK-hilarakenteen omaavilla laaduilla sekä hyvin yleisesti ferriittisillä ruostumattomilla teräksillä sekä niukasti C+N-seostetuilla hiiliteräksillä. Murtolujuus puolestaan on suurin voima, jonka materiaali kestää murtumatta. Kimmokerroin E on suure, joka kuvaa kappaleen poikkipinta-alaa (S_0) suhteessa venyttävään voimaan F . Kimmokerroin on voimassa ainoastaan elastisella alueella, eli ennen plastista muodonmuutosta. Tasavenymä on pysyvä venymä, joka on syntynyt ennen kuroutumisen alkua. Murtovenymä on venymä sauvan murtumahetkellä.

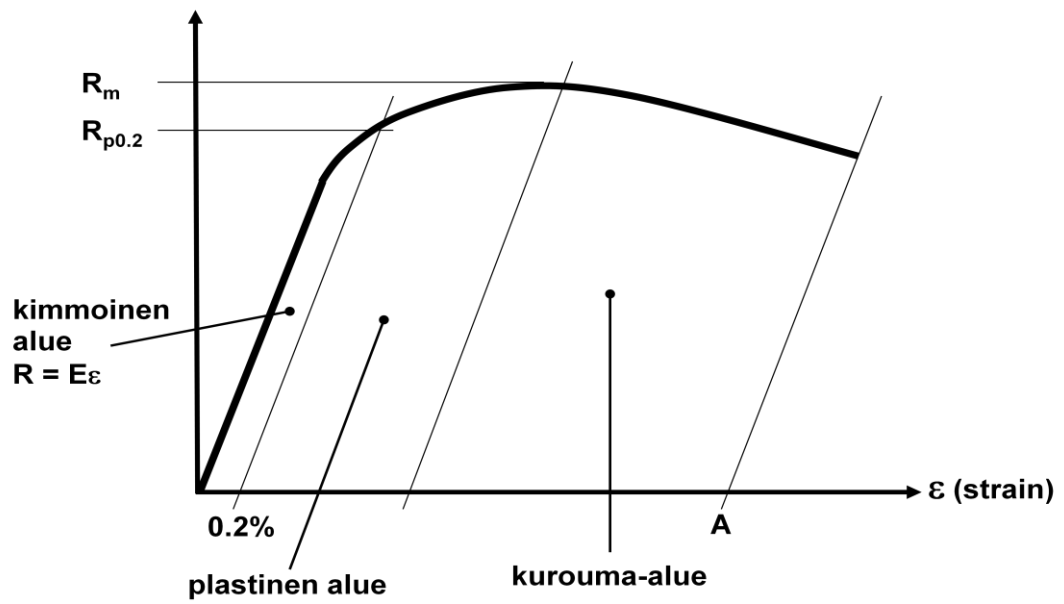
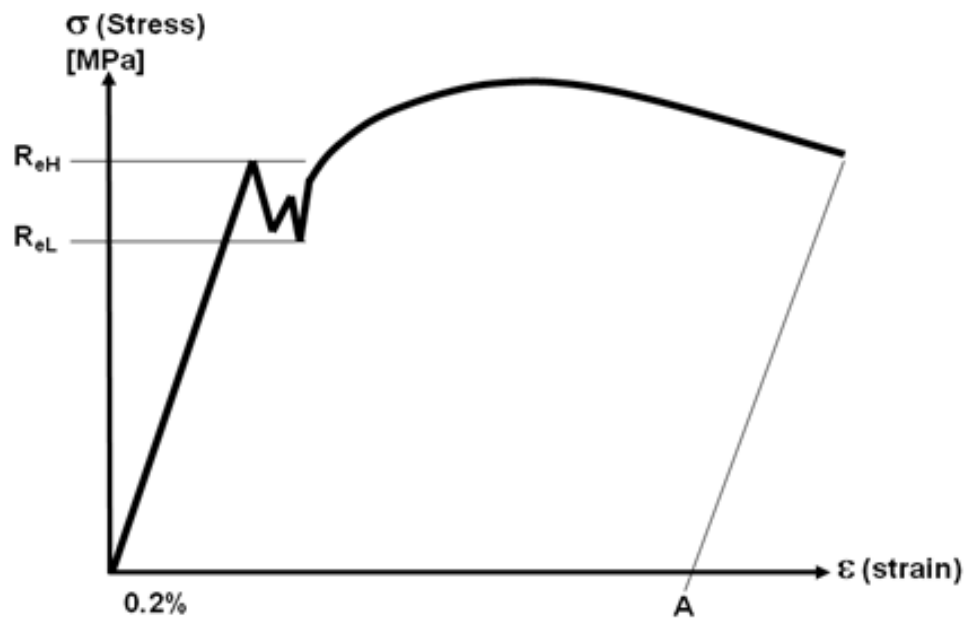
Vetokokeet suoritettiin standardin SFS-EN 10002-1 mukaisella koejärjestelyllä. Koesauvana käytettiin Outokumpu Stainlessin käyttämien mittojen mukaan valmistettuja vetosauvoja. Sauvan mitat löytyvät taulukosta 11 ja kuvasta 20. /13/, /31/, /34/

Taulukko 11. Vetosauvan mitat.

Lt [mm]	Lc [mm]	h [mm]	b [mm]	b1 [mm]	s [mm]
235	75	40	12	25	2



Kuva 20. Vetosauva.

Kuva 21. Suhteellisuusraja $R_{p0.2}$. /13/

Kuva 22. Ylempi ja alempi myötöraja jännitys-venymäkäyrässä. /13/

Vetokokeet suoritettiin käyttäen Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun Zwick allround-floor Z250kN -vetokonetta (kuva 23), joka on sijoitettu ammattiopisto Lappian tiloihin Kemissä. Koneella voidaan selvittää mm. testattavan kappaleen lujuusominaisuudet, sitkeysominaisuudet, muovattavuutta kuvaavat suureet ja kimmokerroin. Lisäksi koneella voidaan suorittaa 3-pistetaivutuksia. Testauksia pystytään suorittamaan $-80 \dots + 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilavälillä vetokoneen olosuhdekammion avulla. /34/



Kuva 23. Zwick allround-floor -vetokone. /34/

5.4.2. Metallografia

Metallografia on ainetta rikkomaton tutkimusmenetelmä, joka koostuu useista eri menetelmistä tutkia materiaalin mikrorakennetta. Metallografiassa käytetään usein tutkittavina kappaleina mikroheitä, jotka ovat yleensä nappiin valettuja tarkasteltavan materiaalin palasia, joista on tarpeen ja tutkittavan ominaisuuden mukaan hiottu ja kiillotettu mikrorakenne näkyviin.

Metallografiassa tarkasteluvälineinä käytetään pääasiassa erityyppisiä mikroskooppeja. Näitä mikroskooppeja ovat muun muassa valomikroskooppi, jolla voidaan tarkastella kappaleen pintaa sekä elektronimikroskooppi, jota voidaan käyttää kappaleen läpivalaisuun, tarkastella pintaa tai määrittää alkuainepitoisuuksia. Tämän työn suorituksessa käytettiin kuitenkin ainoastaan valomikroskooppia. /21/

6. TYÖN SUORITUS

6.1. Vetokokeiden esitestit

Ennen varsinaisia vetokokeita suoritettiin joukko esitestejä. Esitesteillä pyrittiin selvittämään hitsikuvun vaikutusta vetokokeen lopputulokseen sekä mahdollista tarvetta vetosauvan kaventamiselle hitsisauman sekä hitsin muutosvyöhykkeen läheisyydestä.

Testattavina sauvoina käytettiin 2 mm vahvuisesta EN 1.4016- ja EN 1.4003-materiaalista valmistettuja sauvoja. Hitsikuvun vaikutuksen selvittämiseksi testattavat sauvat jaettiin kahteen ryhmään, jotka olivat hitsikuvulliset ja hitsikuvuttomat sauvat. Hitsikuvuttomat sauvat koneistettiin siten, että vetosauvan keskellä kulkevan hitsisauman kupu koneistettiin perusaineen pinnan tasalle. Esitesteissä käytettyjen levyjen hitsaukseen käytettiin samaa austeniittista 304LSi -lisäainetta kuin varsinaisille testisauvoillekin. Hitsauslisäaineen tiedot löytyvät taulukosta 10. Sauvat valmistettiin samojen mittojen mukaan kuin varsinaiset vetosauvatkin. Eri koesarjojen vetosauvojen ominaisuudet on esitelty taulukoissa 13 – 15.

Vetokokeessa käytettiin Outokummun käyttämiä testiparametreja, jotka on esitelty taulukossa 12. Samoja asetuksia käytettiin myös varsinaisissa vetokokeissa ja esitesteillä oli myös tarkoitus varmistaa asetusten toiminta varsinaisissa testeissä.

Taulukko 12. Vetokokeen parametrit hitsauskuvun vaikutuksen testauksessa.

Esijännitys	Testipituus	Nopeus, arvon E määräyksessä	Testinopeus	Nopeus, myötöalue
4 N/mm ²	50 mm	20 N/mm ² s	0,033 1/s (Position controlled)	0,00075 1/s

Taulukko 13. Sauvojen mitat, esitestien koesarja 1.

Näyte:	Kavennus	Paksuus hiksi	Paksuus perusaine1	Paksuus perusaine2	Leveys (hiksi)	Perusaine
1	-	1.963mm	1.943mm	1.943mm	11,97mm	EN 1.4016
2	-	2.010mm	1.951mm	1.953mm	11,95mm	EN 1.4016
3	-	2.047mm	1.946mm	1.946mm	11,95mm	EN 1.4016
1ku	-	3.391mm	1.944mm	1.944mm	12,08mm	EN 1.4016
2ku	-	3.366mm	1.943mm	1.943mm	12,08mm	EN 1.4016
3ku	-	3.324mm	1.947mm	1.947mm	12,06mm	EN 1.4016
0,1	0,1mm	2,050mm	1,938mm	1,939mm	11,74mm	EN 1.4016
0,2	0,2mm	2,075mm	1,940mm	1,939mm	11,52mm	EN 1.4016
0,1ku	0,1mm	3,358mm	1,938mm	1,935mm	11,82mm	EN 1.4016
0,2ku	0,2mm	3,552mm	1,939mm	1,938mm	11,54mm	EN 1.4016

Taulukko 14. Sauvojen mitat, esitestien koesarja 2

Näyte	Kavennus	Paksuus Hitsi	Paksuus perusaine 1	Paksuus perusaine 2	Leveys (hitsi)	Perusaine
0,25_1	0,25mm	2,217mm	1,972mm	1,971mm	11,47mm	EN 1.4003
0,25_2	0,25mm	2,440mm	1,967mm	1,964mm	11,46mm	EN 1.4003
0,30_1	0,30mm	2,456mm	1,974mm	1,971mm	11,36mm	EN 1.4003
0,30_2	0,30mm	2,214mm	1,969mm	1,968mm	11,49mm	EN 1.4003
0,35_1	0,35mm	2,228mm	1,965mm	1,966mm	11,30mm	EN 1.4003
0,35_2	0,35mm	2,393mm	1,967mm	1,964mm	11,31mm	EN 1.4003
0,40_1	0,40mm	2,281mm	1,956mm	1,954mm	11,15mm	EN 1.4003
0,40_2	0,40mm	2,468mm	1,975mm	1,973mm	11,18mm	EN 1.4003
0,45_1	0,45mm	2,387mm	1,972mm	1,97mm	11,12mm	EN 1.4003
0,45_2	0,45mm	2,318mm	1,973mm	1,97mm	11,10mm	EN 1.4003
0,50_1	0,50mm	2,367mm	1,966mm	1,965mm	11,04mm	EN 1.4003
0,50_2	0,50mm	2,282mm	1,96mm	1,96mm	11,05mm	EN 1.4003

Taulukko 15. Sauvojen mitat, esitestien koesarja 3

Näyte	Kavennus	Paksuus hitsi	Paksuus perusaine1	Paksuus perusaine2	Leveys (hitsi)	Perusaine
0,55_1	0,55mm	1,757mm	1,950mm	1,949mm	10,94mm	EN 1.4016
0,55_2	0,55mm	1,994mm	1,941mm	1,948mm	11,13mm	EN 1.4016
0,60_1	0,60mm	1,940mm	1,942mm	1,942mm	11,05mm	EN 1.4016
0,60_2	0,60mm	1,949mm	1,945mm	1,945mm	10,88mm	EN 1.4016
0,65_1	0,65mm	1,858mm	1,945mm	1,945mm	10,85mm	EN 1.4016
0,65_2	0,65mm	1,872mm	1,950mm	1,949mm	10,65mm	EN 1.4016
0,70_1	0,70mm	1,880mm	1,944mm	1,944mm	10,59mm	EN 1.4016
0,70_2	0,70mm	1,860mm	1,944mm	1,944mm	10,77mm	EN 1.4016
0,75_1	0,75mm	1,911mm	1,942mm	1,942mm	10,69mm	EN 1.4016
0,75_2	0,75mm	2,023mm	1,944mm	1,944mm	10,51mm	EN 1.4016
0,80_1	0,80mm	1,946mm	1,946mm	1,946mm	10,51mm	EN 1.4016
0,80_2	0,80mm	1,915mm	1,941mm	1,941mm	10,35mm	EN 1.4016

Esitestejä suoritettiin kaiken kaikkiaan kolmen koesarjan verran, koska heti ensimmäisestä koesarjasta lähtien ongelmaksi osoittautui, että hitsin vetomurtolujuus oli suurempi kuin itse perusaineen. Hitsin lujuuden takia sauvat katkeilivat perusaineesta (kuva 24). Ongelmaa lähdettiin ratkomaan kaventamalla sauvojen kylkiä hitsin ja hitsin muutosvyöhykkeen alueelta. Ensimmäisen testisarjan perusteella pääteltiin, että hitsikuvulla ei ole vaikutusta testituloksiin ja niinpä se koneistettiin pois toisen testisarjan sauvoista. Toisessa testisarjassa käytettiin materiaalina EN 1.4003-terästä. Kyseisen materiaalin hitsiliitos osoittautui kuitenkin testeissä niin paljon perusainetta lujemmaksi, että materiaali päätettiin tämän vuoksi vaihtaa takaisin alkuperäiseen. Koesarja 3 osoitti, että EN 1.4016-materiaalilla kaikki yli 0,5 mm:n kavennukset aiheuttivat katkeamisen hitsin läheisyydestä. Sauvojen kavennuksessa esiintyi työstön jäljiltä niin suuria heittoja, että tämän perusteella pääteltiin kavennuksen 0,45 mm riittävän varsinaisille koesauvoille. Koesarjojen tulokset on esitelty taulukoissa 16 – 20 ja vetokäyrät liitteissä 1 – 4.



Kuva 24. Perusaineesta katkennut sauva.

Taulukko 16. Koesarja 1, tulokset. (kimmokerroin E , myötölujuus $R_{p0.2}$, murtolujuus R_m , tasavenymä A_g , murtovenymä A_t)

Kappale	E [GPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_t [%]
testi 1	177	342	494	12,9	22,4
testi 2	166	308	455	12,7	22,9
testi 3	191	347	498	12,4	21,3
testi 1ku	173	341	491	11,5	15,1
testi2ku	165	338	490	11,8	19,8
testi3ku	161	340	490	12,3	20,9

Taulukko 17. Esitestit, koesarja 2 tulokset. (kimmokerroin E, myötölujuus $R_{p0.2}$, murtolujuus R_m , tasavenymä A_g , murtovenymä A_t)

Kappale	E [GPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_t [%]
0,25_1	183	377	536	11,6	17,4
0,25_2	181	372	530	10,7	16,7
0,30_1	180	379	537	10,9	16,5
0,30_2	184	377	538	11,3	18,3
0,35_1	188	369	529	10,8	16,5
0,35_2	180	378	538	10,3	15,4
0,40_1	183	378	541	10,8	16,1
0,40_2	184	376	538	10,6	15,7
0,45_1	181	380	541	9,9	14,7
0,45_2	162	367	511	6,4	8,5
0,50_1	179	376	537	9,9	14,8
0,50_2	190	378	537	9	13,5

Taulukko 18. Esitestit, koesarja 3 tulokset. (kimmokerroin E, myötölujuus $R_{p0.2}$, murtolujuus R_m , tasavenymä A_g , murtovenymä A_t)

Kappale	E [Gpa]	$R_{p0.2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	A_g [%]	A_t [%]
0,55_1	189	351	486	7,7	11,4
0,55_2	170	356	514	12,7	19,5
0,60_1	197	361	511	10,2	15
0,60_2	184	362	516	11,3	16,4
0,65_1	124	-	502	9,3	14
0,65_2	160	351	504	9,3	13,9
0,70_1	176	358	507	9,7	13,9
0,70_2	172	361	492	7,7	11,9
0,75_1	194	356	501	8,9	13,5
0,75_2	192	355	505	9,2	13,9
0,80_1	161	359	505	8,6	13,7
0,80_2	192	354	503	8,9	14,1

6.2. Vetokokeet

Varsinaisten vetokokeiden tarkoituksena oli selvittää mahdollisten haurausilmiöiden syntymistä hitsiin sekä hitsin muutosvyöhykkeelle ja niiden vaikutusta hitsatun materiaalin vetomurtolujuuteen. Kuten esitettävät osoittivat, varsinaisia vetokokeita ei pystytty enää suorittamaan standardien mukaisissa puitteissa, koska sauvan katkeaminen muutosvyöhykkeeltä vaati yli 0,12 mm:n suuruisen kavennuksen, joka taas on standardissa SFS EN 10002-1 määritelty suurimmaksi sallituksi, standardin mukaiseksi kavennukseksi.

6.2.1. Hitsaamattomat verrokkisauvat

Vertailuarvoina hitsattujen sauvojen arvoille käytettiin samasta valusta valmistetuista, hitsaamattomista verrokkisauvoista saatuja vetokoearvoja. Verrokkisauvoista saaduista mekaanisista ominaisuuksista vertailun kannalta tärkeimpiä olivat lähinnä myötölujuus, murtolujuus ja venymä. Sauvoja valmistettiin 2 kappaletta jokaista materiaalia kohden, valssaussuunta pitkittäin ja poikittain vetosauvan pituusakseliin nähden. Verrokkisauvojen perustiedot löytyvät taulukosta 19.

Taulukko 19. Verrokkisauvojen testisarja.

Näyte nro.	Materiaali	Paksuus	Valssaussuunta
1	4016	2mm	Pitkittäin
2	4016	2mm	Poikittain
3	4509	2mm	Pitkittäin
4	4509	2mm	Poikittain
5	4003	2mm	Pitkittäin
6	4003	2mm	Poikittain
7	4301	2mm	Pitkittäin
8	4301	2mm	Poikittain

Verrokkisauvojen tuloksia verrattiin valmistajan ilmoittamiin arvoihin, joista ilmeni, että kaikki vedetyt sauvat olivat mekaanisilta ominaisuuksiltaan materiaalin valmistajan ilmoittamien raja-arvojen sisällä. Ferriittisillä materiaaleilla valssaussuunta vaikutti mekaanisiin ominaisuuksiin siten, että murto- sekä myötölujuudet kasvoivat ja venymä pieneni, kun valssaussuunta oli poikittain sauvan pituusakseliin nähden. Austeniittisilla materiaaleilla taas poikittainen valssaussuunta tuotti pienemmät lujuusarvot. Nämä poikkeavat arvot johtuivat todennäköisesti teräksen muokkauslujittumisesta vedettäessä materiaalia poikittain valssaussuuntaan nähden. Verrokkisauvojen testitulokset on esitelty taulukossa 20 ja outokummun ilmoittamat raja-arvot testimateriaaleille taulukossa 21. Materiaalikohtaiset vetokäyrät on esitelty liitteessä 3.

Taulukko 20. Verrokkisauvojen testitulokset (kimmokerroin E, murtolujuus R_m , myötölujuus $R_{p0.2}$, Tasavenymä A_g ja murtovenymä A_t).

Näyte	Valssauss.	E [GPa]	R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A_g [%]	A_t [%]
1.4003	Pitkit.	160	491	331	15,2	26
1.4003	Poikit.	188	502	357	13,7	19
1.4016	Pitkit.	167	480	332	16	28,9
1.4016	Poikit.	205	490	341	12,6	16,6
1.4509	Pitkit.	163	510	364	13,9	16,7
1.4509	Poikit.	195	525	390	14,4	26,3
1.4301	Pitkit.	173	617	285	38,4	39,9
1.4301	Poikit.	113	612	299	41,8	43,8

Taulukko 21. Outokummun ilmoittamat mekaaniset ominaisuudet. /2/, /3/, /4/, /5/, /29/

Materiaali	Myötölujuus $R_{p0.2}$ [MPa]	Murtolujuus R_m [MPa]	Venymä [%]
EN 1.4003	320	450	20 (A_{80})
EN 1.4016	280	450 ... 600	20 (A_5)
EN 1.4509	Min. 250	430 ... 630	Min. 18 (A)
EN 1.4301	Min. 230	540 ... 750	Min. 45 (A)

6.2.2. Hitsien vetokokeet

Varsinaisia vetokokeita varten sauvat jyrjettiin kyljistä mittaan 0,45 mm, mikä esitesteissä aiheutti haurailua materiaaleilla katkeamisen muutosvyöhykkeen alueelta. Hitsattuja sauvoja valmistettiin jokaista materiaalia kohden 3 kappaletta riittävän tarkkojen tulosten varmistamiseksi. Taulukoissa 22 – 24 on esitelty näytteiden hitsauksissa käytetyt parametrit. /1/

Taulukko 22. Hitsausparametrit, menetelmä MAG ja materiaali 2mm levy. /1/

Näyte	Menetelmä	Laatu	Paksuus [mm]	Ilmarako [mm]	Virta [A]	Jännite [V]	Langan syöttö [m/min]	Kuljetus nopeus [mm/min]	Suutin etäisyys [mm]	Lämmön tuonti [kJ/mm]	Kallistus kulma [°]
1A	pMAG	EN 1.4003	2	0,5	145	22,5	7,1	1050	11	0,149	0
2A	pMAG	EN 1.4003	2	0,5	140	23,7	7,1	710	11	0,224	0
3A	pMAG	EN 1.4003	2	0,5	144	24	7,1	480	11	0,346	0
4A	pMAG	EN 1.4016	2	0,5	146	22,4	7,1	1040	10	0,151	0
5A	pMAG	EN 1.4016	2	0,5	147	23,2	7,1	710	10	0,231	0
6A	pMAG	EN 1.4016	2	0,5	145	25	7,1	490 ^x		0,355	0
7A	pMAG	EN 1.4509	2	0,5	144	23	7,1	1050	10	0,151	0
8A	pMAG	EN 1.4509	2	0,5	x	x	x	x	x	0,23	0
9A	pMAG	EN 1.4509	2	0,5	144	25,1	7,1	490	11-12	0,354	0
10A	pMAG	EN 1.4301	2	0,5	144	22,7	7,1	1050	10	0,149	0
11A	pMAG	EN 1.4301	2	x	144	23,3	7,1	700	10	0,23	0
12A	pMAG	EN 1.4301	2	x	141	22,7	7,1	570	11	0,27	0

Taulukko 23. Hitsausparametrit, menetelmä TIG ja materiaali 2mm levy. /1/

Näyte	Menetelmä	Laatu	Paksuus [mm]	Ilmarako [mm]	Virta [A]	Jännite [V]	Langan syöttö [m/min]	Kuljetus nopeus [mm/min]	Suutin etäisyys [mm]	Lämmön tuonti [kJ/mm]	Kallistus kulma [°]
13A	TIG	EN 1.4003	2	x	54	9,6	x	110	4/0,8	0,17	0
14A	TIG	EN 1.4003	2	x	61	9,6	x	110	4/0,8	0,192	0
15A	TIG	EN 1.4016	2	x	54	9,6	x	110	4/0,8	0,17	0
16A	TIG	EN 1.4016	2	x	64	9,7	x	100	4/1,0	0,223	0
17A	TIG	EN 1.4509	2	x	61	9,8	x	170	4/0,8	0,127	0
18A	TIG	EN 1.4509	2	x	53	9,6	x	130	4/0,8	0,141	0
19A	TIG	EN 1.4301	2	x	56	9,8	x	130	4/0,8	0,152	0
20A	TIG	EN 1.4301	2	x	78	8	x	130	4/0,8	0,173	0

Varsinaisia vetokokeita varten muutettiin vielä hiukan vetokoneen testiparametreja. Parametreista korjattiin mm. testinopeutta, josta oli jäänyt verrokkisauvoja vedettäessä yksi nolla pois, ($0,033\frac{1}{s} \Leftrightarrow 0,0033\frac{1}{s}$), eli nopeus oli liian suuri. Lisäksi testinopeus asetettiin venymän mukaan kontrolloiduksi, kun se verrokeilla oli leukojen paikan mukaan kontrolloitu. Nämä muutokset on otettava huomioon verrattaessa hitsattujen sauvojen tuloksia verrokkisauvojen tuloksiin. Käytetyt parametrit ovat taulukossa 24.

Taulukko 24. Vetokokeessa käytetyt parametrit

Esijännitys	Testipituus	Nopeus, E arvon määrittäminen	Testinopeus	Nopeus, myötöalue
4 N/mm ²	50 mm	20 N/mm ² s	0,0033 1/s (Strain controlled)	0,00075 1/s

Myös vetosauvojen kiinnityskohtaa muutettiin varsinaisiin testeihin, koska vetotapahtumat kuvattiin GOM-mittausjärjestelmällä (kuva 25). Laitteistolla saatiin mitattua vetotapahtumasta muun muassa ns. insinöörivenymät. Kiinnityskohdan vaikutus tuloksiin testattiin ennen varsinaisia kokeita ja sillä ei todettu olevan vaikutusta tuloksiin.

EN 1.4003-materiaalin kohdalla kaikki sauvat katkesivat perusaineesta kavennuksesta huolimatta, eli hitsiliitos oli siis kyseisen materiaalin kohdalla perusainetta lujempi. Pienen ja keskisuuren lämmöntonin välillä lujuus- ja venymäarvoissa ei ollut juurikaan eroavaisuuksia. Suurella lämmöntonilla kaikki lujuusarvot sen sijaan putosivat rajusti. Verrattuna pieneen ja keskisuuren lämmöntonin, suurella lämmöntonilla venymäprosentit putosivat lähes puoleen.

EN 1.4016-materiaali ei käyttäytynyt kokeissa aivan odotetusti, vaan ainoastaan suurella lämmöntonilla hitsatut sauvat katkesivat hitsin muutosvyöhykkeeltä. Pienellä ja keskisuurella lämmöntonilla hitsatut sauvat käyttäytyivät keskenään hyvin samankaltaisesti, eli lujuus- ja venymäarvoissa ei juurikaan ollut eroavaisuuksia. Suurella lämmöntonilla on taas nähtävissä pientä lujuuden nousua, ~20MPa. Tasavenymän arvo putosi rajusti suurella lämmöntonilla hitsatun näytteen kohdalla. Murtovenymää ei saatu määritettyä, koska sauva katkesi heti myötöalueen alettua.

Myös EN 1.4509-materiaalilla kaikki sauvat katkesivat perusaineen puolelta. Lämmöntoniarvojen välillä ei esiintynyt juurikaan eroja. Lujuus- ja kimmokerroin-arvot pysyivät kutakuinkin samoissa lukemissa. Murto- ja tasavenymän arvot puolestaan pienenevät lämmöntonin kasvattamalla hieman.

Materiaalilla EN 1.4301 testisauvat katkesivat yhtä lukuun ottamatta keskeltä hitsisaumaa. Katkeamispaikalla ei kuitenkaan ollut oleellista vaikutusta tuloksiin. Lujuusarvoissa ei syntynyt suuria eroja eri lämmöntoniarvojen välillä. Huomioitavaa kuitenkin on, että keskisuurella lämmöntonilla kimmokerroimen arvo E ja lujuusarvot jäivät alhaisimmaksi. Myös tasavenymän arvo jäi keskisuurella lämmöntonilla muita lämmöntoniarvoja alemmaksi. Austeniittisilla sauvoilla vetokoneen ohjelma ei jostakin syystä määrittänyt tuloksiin murtovenymää ja tästä johtuen se jouduttiin määrittämään vetokäyrästä. Tuloksissa tähdellä (*) merkityt tulokset ovat vetokäyrästä määritettyjä arvoja.

Taulukko 25. Vetokokeen tulokset (kimmokerroin E, myötölujuus $R_{p0.2}$, murtolujuus R_m , murtovenymä A_t , tasavenymä A_g)

Näyte	Materiaali	Lämmön tuonti	E [GPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]	A_g [%]
1A	4003	Pieni	184	374	527	16,3	10,2
2A	4003	Keski	192	372	527	16,2	10,7
3A	4003	Suuri	168	369	506	9,9	5,9
4A	4016	Pieni	185	362	521	20,2	12,1
5A	4016	Keski	181	357	521	18	11,7
6A	4016	Suuri	186	371	539	-	4,4
7A	4509	Pieni	189	395	545	18,6	11,2
8A	4509	Keski	176	398	537	17,3	10,1
9A	4509	Suuri	181	397	542	15,4	9,1
10A	4301	Pieni	181	312	586	33,1*	29,9
11A	4301	Keski	160	311	568	27,8*	24,7
12A	4301	Suuri	172	317	592	33,2*	29



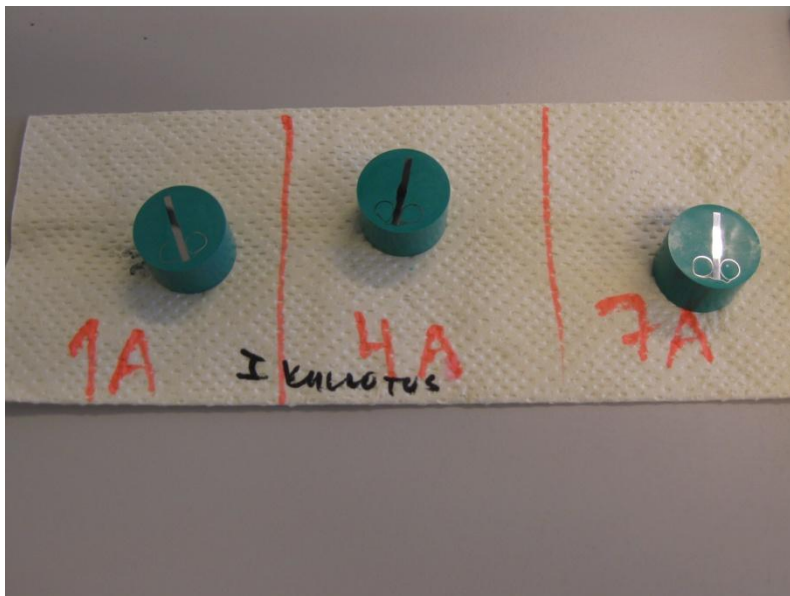
Kuva 25. Vetokokeen kuvausta GOM-laitteistolla.

6.3. Mikrorakenne tarkastelut

Metallografiaa varten hitsatuista levyistä leikattiin 10x20 mm kokoisia palasia, osa paloista leikattiin vetosauvojen väliin jääneestä ylijäämämateriaalista, jolloin palat olivat hieman pienempiä. Leikatut näytepalat valettiin muoviseen nappiin Struers Citopress-1 -valukoneella, kuumavalua käyttäen. Nappiin valun jälkeen näytteet hiottiin SIC 320, 800 ja 1000 -hiomapapereilla sekä kiillotettiin mekaanisesti timanttisuspension avulla, käyttäen Labo-Pol 6 -tasohiomakonetta. EN 1.4016- ja EN 1.4509-materiaaleille tehtiin lisäksi elektrolyyttinen kiillotus 32V-jännitettä käyttäen. /24/

Näytteet viimeisteltiin syövyttämällä materiaalin mikrorakenne esiin. Materiaalien erilaisen syöpymisen takia jouduttiin käyttämään erilaisia syövytteitä, jotta saatiin mikrorakenne esille. EN 1.4016- ja EN 1.4509-laaduille käytettiin syövytteenä 39 %:sta typpihappoa, EN 1.4301 40 %:sta typpihappoa ja EN 1.4003-materiaalille vilella liuosta (50ml $C_6H_3N_3O_7$ 1,2 %, 3-8 tippaa H_2O_2 3 %, 10-15ml C_2H_5OH , 2,5ml HCl). Syövytyksessä käytetty virta laskettiin periaatteella $40mA/cm^2$, eli pienemmille näytteille virta-arvo oli 8mA ja isommille 16mA. Syövytyksessä esiintyi muutamien näytteiden kohdalla ongelmia, koska käytössä olleet laitteet ja kemikaalit eivät olleet parhaita mahdollisia näiden ongelmanäytteiden syövytystä ajatellen. Ongelmia lisäsi se, että kyseisiä materiaaleja ei oltu materiaalien käytettävyyden puolella aikaisemmin syövytetty, eli tarvittava tietotaito ei ollut ihan parhaalla mahdollisella tasolla. /24/

Tässä työssä mikrorakennetarkastelussa käytettiin materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmän käytössä olevaa Leica DMI5000M -valomikroskooppia. Mikroskooppitarkastelun tavoitteena oli selvittää teräkseen hitsauksen yhteydessä syntynyt mikrorakenne sekä selvittää hitsauksen lämpövaikutusalueen laajuus sekä mahdolliset, hitsauksessa syntyneet haurausilmiöt mahdollisuuksien mukaan.



Kuva 26. Mikroheitä ensimmäisen kiillotusvaiheen jälkeen.

6.3.1. EN 1.4003

Mikrorakennetarkastelut osoittivat ferriittis-martensiittisen EN 1.4003-laadun kohdalla, että MAG-menetelmällä hitsatuissa näytteissä karkearakeinen muutosvyöhyke muuttui mikrorakenteeltaan teorian mukaisesti martensiittiseksi, riippumatta lämmöntuontiarvosta. Karkearakeista muutosvyöhykettä seurasi kaikissa näytteissä hienorakeinen muutosvyöhyke, jossa oli havaittavissa martensiittikiteelle tyypillistä linssimäistä rakennetta. Voidaan siis olettaa martensiittipitoisuuden kasvaneen myös hienorakeisessa muutosvyöhykkeessä. Lämmöntuontiarvon vaikutus näkyi karkearakeisessa vyöhykkeessä siten, että vyöhyke leveni hitsin pohjapalkoa kohden. Hienorakeisessa vyöhykkeessä lämmöntuontiarvon muutos näkyi vain vähäisenä levenemisenä. Lisäksi muutosvyöhykkeiden raekoko kasvoi lämmöntuontiarvon kasvattamisen myötä. /Liite 6/, /Liite 9/

TIG-menetelmällä hitsatuissa näytteissä myös hitsi oli mikrorakenteeltaan martensiittinen aina pienirakeiseen vyöhykkeeseen saakka, koska TIG-menetelmällä hitsaus tapahtui ilman lisäainetta, perusainetta sulattamalla. Myös TIG-hitseissä karkearakeisen muutosvyöhykkeen perään muodostui hienorakeinen vyöhyke, jossa martensiittipitoisuuden voidaan olettaa lisääntyneen. Lämmöntuontiarvon vaikutus näkyi mikrorakenteessa varsinkin karkearakeisen vyöhykkeen rajuna laajenemisena kahden eri hitsausarvon välillä. Raekoko ei kasvanut merkittävästi eri lämmöntuontiarvojen välillä. /Liite 7/, /Liite 10/

6.3.2. EN 1.4016

Stabiloimattoman EN 1.4016, eli ns. ”perusferriittisen” laadun kohdalla MAG-hitsausmenetelmällä ja austeniittisella lisäaineella hitsatuissa näytteissä raekoon kasvu muutosvyöhykkeellä oli merkittävää ja sitä esiintyi kaikilla lämmöntuontiarvoilla. Raekoon kasvu oli huomattavaa myös eri lämmöntuontiarvojen välillä. Kaikissa näytteissä ferriittikiteiden raerajoilta oli erotettavissa sinne muodostunut erilainen faasirakenne, jonka oletettiin olevan martensiittia, mitä myös teoria tukee. Myös raerajoille muodostuneen erilaisen faasin määrä oli sidoksissa lämmöntuonnin määrään. /Liite 6/, /Liite 9/

TIG-menetelmällä hitsatuissa näytteissä ei raekoossa ja lämpövaikutusalueessa ollut merkittävää eroa eri lämmöntuontiarvojen välillä, mutta suuremmalla lämmöntuontiarvolla martensiitin muodostus oli selvästi runsaampaa. Kiderakenne muutosvyöhykkeellä pysyi kuitenkin ferriittivoittoisena. Molemmilla lämmöntuontiarvoilla esiintyi myös huomattavaa raekoon kasvua hitsin muutosvyöhykkeellä. Pienellä lämmöntuontiarvolla martensiitin muodostus oli aavistuksen lievempää, kuin MAG-hitseissä. /Liite 7/, /Liite 10/

6.3.3. EN 1.4509

Titaani- ja niobistabiloidun EN 1.4509-laadun kohdalla esiintyi jo aiemmin mainittua ongelmaa näytteiden syövytyksessä ja näin ollen rakennetta ei saatu aivan kunnolla esiin, mutta halutut ominaisuudet saatiin kuitenkin kutakuinkin näkyviin. MAG-menetelmällä hitsatuissa näytteissä mikrorakenne pysyi kaikkien näytteiden kohdalla ferriittisenä. Raekoko ja muutosvyöhykkeen laajuus oli kuitenkin tämänkin materiaalin kohdalla sidoksissa lämmöntuonnin kasvattamiseen. Suurilla lämmöntuontiarvoilla raekoko kasvoi, mutta raekoon muutos ei ollut kuitenkaan niin rajua, kuin stabiloimattomalla 4016-materiaalilla. /Liite 6/, /Liite 9/

TIG-menetelmällä hitsatut näytteet käyttäytyivät suurin piirtein samalla tavalla kuin MAG-menetelmälläkin hitsatut. Mikrorakenne pysyi ferriittisenä ja raekoko kasvoi lämmöntuonnin mukaan, mutta raekoon kasvu sijoittui selvästi kapeammalle vyöhykkeelle kuin MAG-hitsissä eikä raekoko kasvanut yhtä suureksi kuin MAG-hitseissä. /Liite 7/, /Liite 10/

6.3.4. EN 1.4301

Myös austeniittisen EN 1.4301-materiaalin syövytyksessä oli samanlaisia ongelmia, kuin EN 1.4509-materiaalin kanssa. MAG-menetelmällä hitsattujen levyjen mikrorakenne pysyi kaikilla käytetyillä lämmöntuontiarvoilla austeniittisena. Myöskään merkittävää raekoon kasvua ei näytteissä esiintynyt. Muutosvyöhykkeen alueella oli havaittavissa tummia alueita austeniitin raerajojen läheisyydessä, jotka teorian mukaan voisivat olla kromikarbidien ja eri seosaineiden erkaumia. /Liite 6/, /Liite 9/

TIG-menetelmällä hitsatuissa näytteissä ei ollut merkittävää eroa verrattuna MAG-hitseihin. Mikrorakenne oli austeniittinen ja merkittävää raekoon kasvua ei esiintynyt. Kuitenkin samoja tummia alueita oli erotettavissa raerajoilta myös TIG-menetelmällä hitsatuissa näytteissä. /Liite 7/, /Liite 10/

7. TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1. Ferriittiset teräslaadut

Ferriittiset teräslaadut käyttäytyivät testeissä hieman odotettua sitkeämmin. Niin sanottua haurasta murtumaa esiintyi vain yhden materiaalin kohdalla ja sekin ainoastaan suurella lämmöntuonnilla hitsattuna.

7.1.1. EN 1.4003

Niukkahiilisen ferriittis-martensiittisen materiaalin kohdalla muutosvyöhykkeen mikrorakenne pitäisi teorian mukaan muuttua martensiittiseksi. Muutosvyöhykkeelle muodostuva martensiitti on sälemartensiittia, joka on hieman sitkeämpää ja lujempaa, kuin tavanomainen levymartensiitti. Sälemartensiitti muodostuu hitsin jähmettyessä ferriittisen kiderakenteen austenisoitumisen kautta. Lopullinen martensiittinen rakenne muodostuu hitsin jäähtyessä muodostuneen austeniitin ja matalan hiilipitoisuuden ansiosta.

Mikrorakennetarkasteluista voitiin nähdä teorian paikkansapitävyys. Jokaisen näytteen muutosvyöhykkeelle syntyi martensiittinen muutosvyöhyke, jonka leveys oli sidoksissa lämmöntuontiarvon nousuun. Martensiittisen rakenteen muodostuminen näkyy myös vetokoetuloksissa lujuuden nousuna sekä venymän pienenemisenä. Sälemartensiitin muodostumista tukee myös se seikka, että koesauvat katkesivat perusaineen puolelta, eli hitsi oli näin ollen perusainetta lujempi.

Hitsattujen sauvojen vetokoetuloksia (taulukko 25, liite 4/1) verrattaessa hitsaamattomien verrokkisauvojen tuloksiin voidaan nähdä, että kaikilla lämmöntuontiarvoilla myötö- ja murtolujuus on noin 20MPa suurempi kuin verrokkisauvoilla riippumatta verrokkisauvan valssaussuunnasta. Kuitenkin suurimmalla lämmöntuontiarvolla lujuusarvot tipahtivat lähes verrokkisauvojen tasolle. Tasa- ja murtovenymät olivat puolestaan hieman verrokkisauvojen venymiä alempana (4 – 5 %), lukuun ottamatta suurta lämmöntuontiarvoa, jolla venymäarvot putosivat reilusti. Suurella lämmöntuontiarvolla lujuuden ja sitkeyden menetyksen aiheuttaa todennäköisesti martensiitin kasvava raekoko.

7.1.2. EN 1.4016

EN 1.4016 on teorian mukaan testattavista materiaaleista heikoin. Hitsauksen lämpösyklin vaikutuksesta rakenteeseen muodostuu austeniittia, joka jäähtyessään muuttuu martensiitiksi. Martensiitin muodostus on sidoksissa jäähtymisaikaan, eli mitä kauemmin hitsin lämpötila pysyttelee jäähtyessään kriittisellä $t_{8/5}$ alueella, sitä enemmän martensiittia rakenteeseen ehtii muodostua.

Mikroskooppikuvista voidaan havaita, että jo alhaisimmasta lämmöntuontiarvosta lähtien ferriitin raerajoille muodostuu neulamaista faasia, joka mitä todennäköisimmin on martensiittia. Raerajalle muodostuvan faasin määrä on sidoksissa lämmöntuontiarvoon siten, että lämmöntuonin kasvaessa, tätä faasirakennetta esiintyy yhä enemmän. Myös raekoko hitsin muutosvyöhykkeellä kasvoi merkittävästi jo heti alhaisimmalla lämmöntuontiarvolla. Rakeenkasvu oli huomattavaa myös eri lämmöntuontiarvoja vertailtaessa. Suurimmalla lämmöntuonnilla neulamaista faasirakennetta oli erotettavissa jo sularajan välittömässä läheisyydessä olevien ferriittikiteiden sisältäkin.

”Perusferriittisen” 4016 materiaalin kannalta vetokoetulokset (taulukko 25) olivat jopa hieman yllättäviä. Ainoa lämmöntuontiarvo, joka aiheutti sauvan katkeamisen muutosvyöhykkeeltä, oli suuri lämmöntuonti 0,35kJ/mm. Teorian pohjalta odotettiin kyseisen materiaalin haurastumista jo pienemmilläkin lämmöntuontiarvoilla. Verrattaessa hitsattujen sauvojen vetokoetuloksia (taulukko 25) verrokkisauvojen tuloksiin (taulukko 20) voidaan nähdä, että pienellä ja keskisuurella lämmöntuonnilla hitsatuilla sauvoilla myötö- ja murtolujuudet ovat nousseet noin 30MPa. Suurella lämmöntuonnilla puolestaan myötö- ja murtolujuudet ovat nousseet noin 40MPa verran. Pienellä ja keskisuurella lämmöntuonnilla venymäarvot ovat kuitenkin suhteellisen normaalit, jos verrataan niitä verrokkisauvoihin ja Outokummun ilmoittamiin mekaanisiin ominaisuuksiin (taulukko 21). Suurella lämmöntuonnilla tasavenymän arvo taas putosi rajusti ja niin kuin vetokäyrästä voidaan nähdä, sauvat katkesivat heti myötöalueen alettua. Vetokäyrät näkyvät liitteessä 4/2. Vetokokeiden perusteella voidaankin todeta, että vaikka mikroskooppitarkastelut tukivat teoriaa, niin kuitenkin vasta suuri lämmöntuonin arvo nostaa rakeenkasvun ja martensiitin muodostuksen sille tasolle, että se aiheuttaa haurastumisen muutosvyöhykkeeltä. Kuitenkin täytyy ottaa huomioon myös se, että teräksen lujittuminen kaikilla lämmöntuontiarvoilla tukee martensiitin muodostumista mikrorakenteeseen myös pienemmillä lämmöntuontiarvoilla.

7.1.3. EN 1.4509

Tutkittavista materiaaleista 4509 oli ainoa stabiloitu laatu. Kyseinen laatu on stabiloitu seostamalla siihen titaania ja niobia. Teorian mukaan tämä laatu on tutkituista ferriittisistä laaduista parhaiten hitsattava, koska stabiloinnilla saadaan estettyä martensiitin syntyminen sekä vähennettyä tai jopa estettyä raekoon kasvu muutosvyöhykkeellä.

Mikroskooppitutkimus tuki tämänkin materiaalin kohdalla teoriaa. Martensiittia ei muodostunut mikrorakenteeseen millään lämmöntuontiarvolla. Raekoko kasvoi kaikilla lämmöntuonneilla hieman, mutta kasvu oli kuitenkin selvästi lievempää kuin esimerkiksi stabiloimattomalla 4016-materiaalilla.

Vetokokeissa stabiloitu materiaali katkesi jokaisen näytteen kohdalla perusaineesta. Myös vetokokeen tulokset (taulukko 25, liite 4/3) tukevat teoriaa siltä osin, että 4509 on tutkittavista ferriittisistä materiaaleista paras hitsattava. Sekä murto- että myötölujuus pysyivät suhteellisen normaalina verrattuna valmistavan ilmoittamiin mekaanisiin ominaisuuksiin sekä verrokkisauvojen vetokoetuloksiin (taulukko 20). Pientä lujuuden nousua on nähtävissä verrattuna verrokkisauvoihin lähinnä murtolujuuden osalta. Venymä sen sijaan pienenee molempien, murto- ja tasavenymän osalta lämmöntuontia kasvatettaessa. Keskisuurella lämmöntuonnilla murtovenymä on vielä valmistajan ilmoittaman minimivenymän rajoilla, mutta suurella lämmöntuonnilla se on jo selvästi alempi. Raekoon kasvu siis vaikuttaa tälläkin materiaalilla venymäarvoihin.

7.2. Austeniittinen referenssilaatu

Referenssilaatu EN 1.4301 on käytetyimpiä ruostumattomien terästen laatuja. Suurin ongelma teorian mukaan on lähinnä hitsauksessa syntyvät jännitykset ja siitä syntyvät halkeiluilmiot sekä vetelyt.

Mikrorakennetarkasteluissa austeniittisen laadun kohdalla ei havaittu merkittävää raekoon kasvua eikä faasimuutoksia. Rakenne pysyi austeniittisena kaikilla lämmöntuontiarvoilla.

Vetokokeissa (taulukko 25, liite 4/4) austeniittisillä näytteillä kimmokertoimen arvo E jäi huomattavan matalaksi, toisaalta se on sitä myös verrokkisauvojen tuloksissa (taulukko 20). Austeniittisten laadun kohdalla kaikki sauvat katkesivat hitsisaumasta lukuun ottamatta yhtä keskisuurella lämmöntuonnilla hitsattua sauvaa. Katkeamiskohta ei kuitenkaan vaikuttanut oleellisesti tuloksiin kyseisen sauvan kohdalla.

Lujuusominaisuuksien kohdalla ei eri lämmöntuontiarvojen välille ole syntynyt suuria eroja, mutta hitsaamattomiin sauvoihin verrattuna myötölujuus on hieman noussut ja murtolujuus puolestaan hieman laskenut. Sekä murto- että tasavenymässä hitsattujen sauvojen kohdalla venymä on pienentynyt noin 10 %, mutta eri lämmöntuontiarvojen välillä ei kuitenkaan ole huomattavaa eroa.

8. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli määrittää eri lämmöntuontiarvojen vaikutus teräksen mekaanisiin ominaisuuksiin hitsin muutosvyöhykkeellä sekä selvittää tutkituista ferriittisistä teräslaaduista parhaiten hitsaukseen soveltuva laatu. Mittauksissa saatiinkin hyvin selviä eroavaisuuksia eri materiaalien ja lämmöntuontiarvojen välillä. Kuitenkin hieman yllättäen vasta suuri lämmöntuonnin arvo vaikutti selkeästi mekaanisiin ominaisuuksiin.

Mikrorakennetarkastelujen osalta voidaan todeta, että teoria piti paikkansa jokaisen tutkitun materiaalin kohdalla. Edes EN 1.4509-teräksen stabilointiaineet eivät pystyneet täysin estämään rakeenkasvua hitsattaessa ja näin ollen rakeenkasvua siis esiintyi kaikilla ferriittisillä laaduilla. Lämmöntuontiarvolla voidaan vaikuttaa kuitenkin hitsin mikrorakenteeseen siten, että lämmöntuontia pienentämällä hitsin raekoko saadaan pidettyä pienempänä, samoin myös muodostuvan martensiitin määrä vähenee lämmöntuontia rajoittamalla. Tutkituista laaduista ainoastaan austeniittiseen EN 1.4301-teräkseen ei syntynyt eri lämmöntuontiarvojen välillä juurikaan mikrorakenteellisia eroavaisuuksia. Mikrorakennetarkastelujen perusteella TIG-hitsauksella saatettaisiin saavuttaa paremmat ominaisuudet, mutta myös TIG-hitsausmenetelmällä lämmöntuontia on syytä rajoittaa mahdollisimman alas mikrorakennekuvissa näkyvän rakeenkasvun perusteella.

Vetokoetulokset eivät tukeneet ihan täysin teoriaa, koska hauraasti murtuivat hitsatuista teräslaaduista ainoastaan suurella lämmöntuonnilla hitsatut EN 1.4016-sauvat. Oletuksena oli, että haurastuminen näkyy selvästi jo pienemmilläkin lämmöntuontiarvoilla. Kaikki muut ferriittiset sauvat katkesivat kuitenkin perusaineesta, mikä tarkoittaisi sitä, että hitsiliitos on perusainetta lujempi. Mitatuista mekaanisista ominaisuuksista eniten kärsi lämmöntuonnin kasvaessa venymä, joka EN 1.4003- ja EN 1.4016-teräksillä tipahti olemattomiin suurella lämmöntuonnilla. EN 1.4509-materiaalin kohdalla ei yhtä rajua muutosta tapahtunut, mutta venymän aleneminen oli kuitenkin selvästi havaittavissa. Austeniittiset sauvat murtuivat hitsisaumasta, joka taas kertoo siitä, että itse perusaine on hitsattunakin lujempaa kuin hitsiaine. Hitsatuilla austeniittisilla sauvoilla venymä pieneni hitsattaessa, mutta eri lämmöntuontiarvojen välillä ei ollut merkittävää eroa.

Yhteenvetona voitaneen sanoa, että suoritettujen kokeiden perusteella ferriittisistä selvästi paras teräs hitsauksen kannalta on EN 1.4509, koska se säilyttää mekaaniset ominaisuutensa suhteellisen hyvin vielä suurellakin lämmöntuontiarvolla. Kuitenkin ominaisuuksien säilymisen varmistamiseksi on suositeltavaa käyttää mahdollisimman pientä lämmöntuontia, koska tälläkin materiaalilla pientä raekoon kasvua esiintyi kaikilla lämmöntuontiarvoilla hitsattaessa. Selvästi huonoin teräs hitsauksen kannalta taas oli odotetusti 1.4016, jolla lujuus kasvoi selvästi heti pienimmällä lämmöntuontiarvolla. Rakenteessa näkyi myöskin martensiitin muodostusta sekä raekoon kasvua, lisäksi teräs menetti suurimmalla lämmöntuontiarvolla muovattavuusominaisuutensa täysin.

9. LÄHDELUETTELO

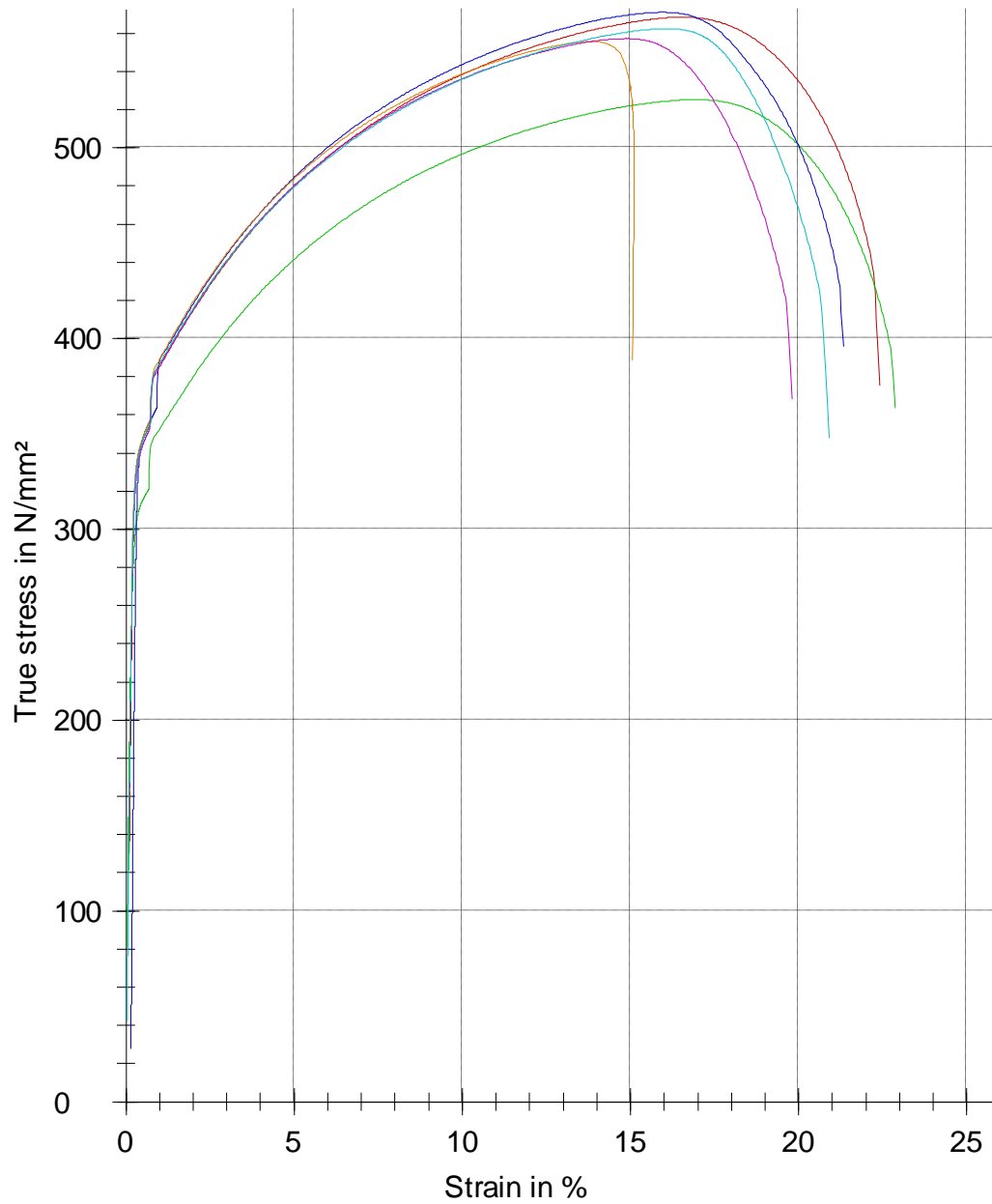
- /1/ Anttila Tuomas, Kalliosalo Heidi, hitsausnäytteiden parametrit, [Excel-taulukko], 9.6.2010
- /2/ Austenitic Stainless Steel 4301, [www-dokumentti], <<http://www.outokumpu.com/43395.epibrw>>, 1.4.2010
- /3/ Ferritic Stainless Steel 4016, [www-dokumentti], <<http://www.outokumpu.com/42342.epibrw>>, 1.4.2010
- /4/ Ferritic Stainless Steel 4509, [www-dokumentti], <http://www.outokumpu.com/applications/upload/pubs_610145011.4509_S43940_Outokumpu%20Tornio%20Works_2009.pdf>, 1.4.2010
- /5/ Ferritic Stainless Steel 4003, [www-dokumentti], <<http://www.outokumpu.com/42341.epibrw>>, 1.4.2010
- /6/ Eagar T.W, Hunter G.B, Ductility of stabilized ferritic stainless steel welds, Metallurgical and material transactions A, 11. painos, 1980.
- /7/ Hitsien laatu ja hitsausvirheet, [www-dokumentti], <http://www.esab.fi/fi/fi/support/upload/Hitsien_laatu_ja_hitsausvirheet.pdf>, 28.3.2010
- /8/ JaloteräsStudio, [www-dokumentti], <<http://www.tokem.fi/?DeptID=15122>>, 23.4.2010
- /9/ Jussila Jouko, Hitsaustekniikka luentomateriaali, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, 2008
- /10/ Kantanen, Mari-Selina, Opinnäytetyön aihekuvaus, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, 2009
- /11/ Karjalainen, Pentti, Kauppi, Timo, Orava, Ulla, Uudet ruostumattomat teräkset hitsattavana rakennemateriaalina, Tekes projekti Nro 4009/89 loppuraportti osa II, 1991
- /12/ Kauppi, Timo, Kyröläinen, Antero, Taulavuori, Tero, Jalosauma, projektisuunnitelma, 2009
- /13/ Kauppi, Timo, Materiaalioppi 1 luennot, [powerpoint-dokumentti], Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, 2008

- /14/ Kauppi, Timo, Materiaalioppi 2 luennot, [powerpoint-dokumentti], Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, 2007
- /15/ Kivirinta, Susanna, Ferriittisen 17% Cr sisältävän ruostumattoman teräksen herkistymisasteen määrittäminen, diplomityö, 2007
- /16/ Kyröläinen, Antero, Lukkari, Juha, Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus, Metalliteollisuuden kustannus Oy, 1999
- /17/ Lepola, Pertti, Makkonen, Matti, Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet, WSOY, 2008
- /18/ Lincoln MIG/TIG lisäainelangat, [pdf-dokumentti],
<<http://www.lincolnelectricnordic.fi/Lisaineet/MIGTIGlangat.pdf>>, 2008.
- /19/ Lukkari, Juha, Mitä kuuluu ruostumaton, lehtiartikkeli, hitsaustekniikka 2/2005, s. 11 - 22
- /20/ Lukkari, Juha, Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus, kunnossapito-lehti erikoisliite 5/1999
- /21/ Maronen, Juha, Metallografia, [Word-dokumentti], 2008
- /22/ Materiaalien käytettävyyden tutkimus, [www-dokumentti],
<<http://www.tokem.fi/?DeptID=14280>>, 28.2.2010
- /23/ MIG/MAG-hitsaus, [www-dokumentti],
<<http://www.esab.com/fi/fi/education/processes-mig-gmaw.cfm>>, 2.3.2010
- /24/ Miilumäki, Terhi, laborantin haastattelu, Kemi-Tornion AMK, Kemi, 6.5.2010
- /25/ Oikarinen, Tapio, Lujitetun austeniittisen ruostumattoman teräksen tandem MIG/MAG hitsien ominaisuuksia, Diplomityö, Oulun yliopisto/Konetekniikan osasto, 2008
- /26/ Pekkarinen, Joonas, Laserhitsausparametrien vaikutus ruostumattomien terästen hitsin mikrorakenteeseen, Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2009
- /27/ Ruostumattomat teräkset, [www-dokumentti],
<http://www.outokumpu.com/applications/upload/pubs_1220142259.pdf>, 27.3.2010
- /28/ Valujen seosaineanalyysit, Outokumpu Stainless
- /29/ Stainless steel grades, [www-dokumentti],
<http://www.outokumpu.com/pages/SubAreaPage_42345.aspx>, 5.3.2010
- /30/ Steelpolis, [www-dokumentti], <<http://www.steelpolis.com/>>, 23.4.2010

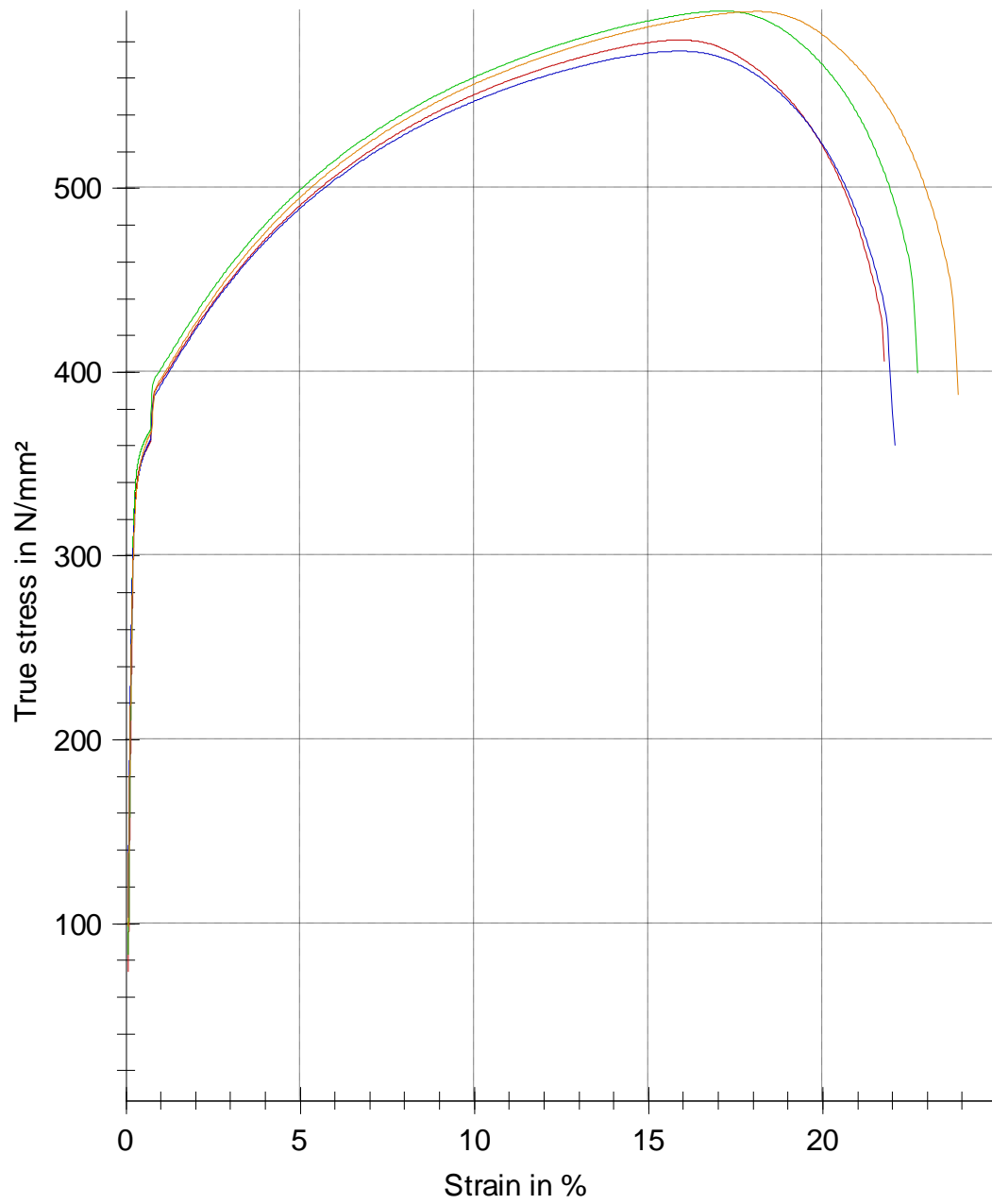
- /31/ Teräsopas, [www-dokumentti],
<<http://www.elisanet.fi/harri.nevalainen/tietoisk/staattisetlsot.htm>>, 6.4.2010
- /32/ TIG-hitsaus, [www-dokumentti], <<http://www.esab.com/fi/fi/education/processes-gtaw-tig.cfm>>, 2.3.2010
- /33/ Vety hitsauslisäaineissa ja hitsiaineissa sekä lisäaineiden kostumistaipumus, [www-dokumentti], <http://www.shy-hitsaus.net/HT1_2005_JK&RK.pdf>, 27.3.2010
- /34/ Vetokoe, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu T&K, [PDF-dokumentti], 2009

10. LIITELUETTELO

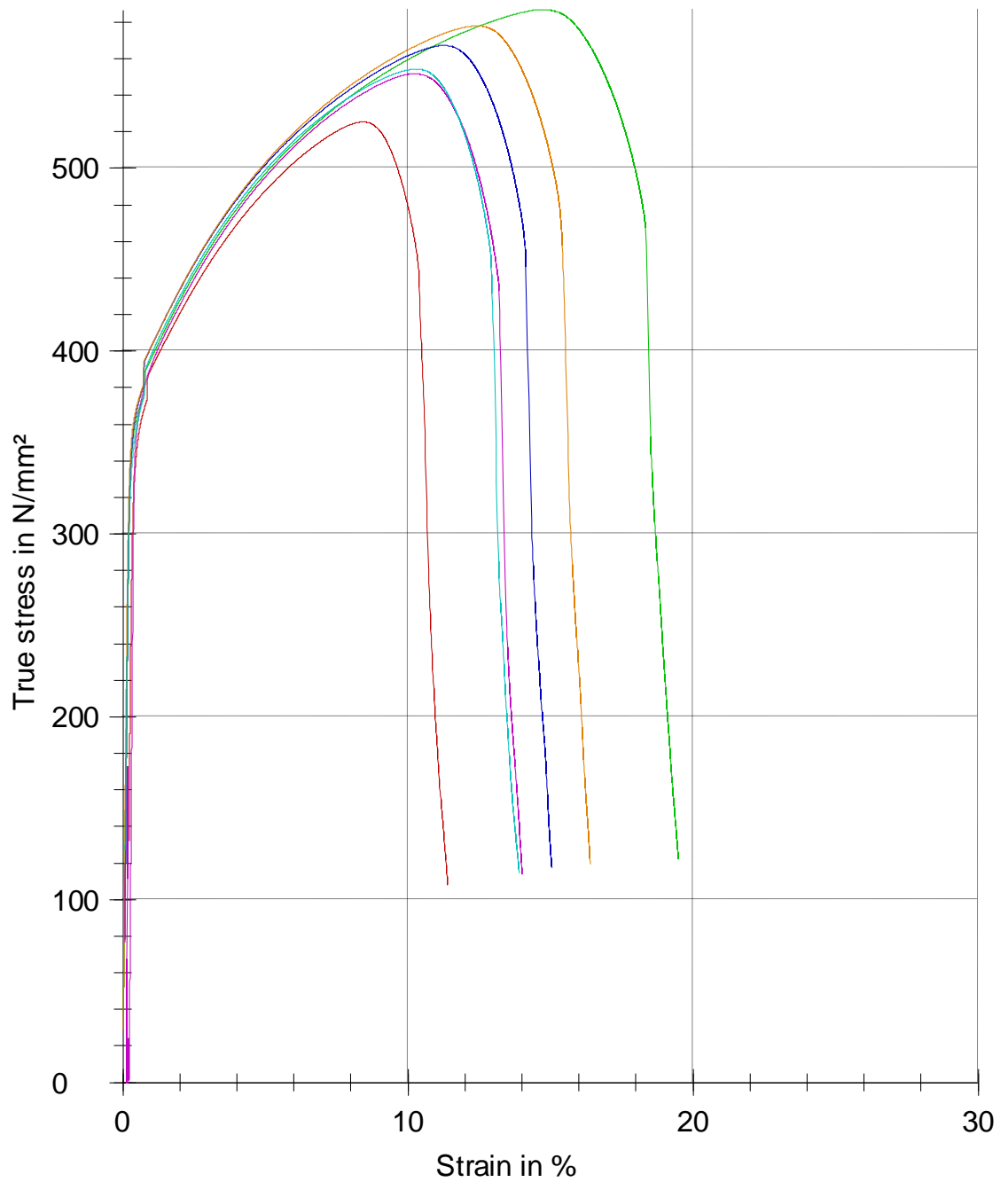
LIITE 1	Esitestit koesarja 1, vetokäyrät.
LIITE 2	Esitestit koesarja 2, vetokäyrät.
LIITE 3	Verrokkisauvojen vetokäyrät
LIITE 4	Hitsattujen sauvojen vetokäyrät. Näytteet 1A-12A
LIITE 5	Makrokuvat, pMAG. Näytteet 1A – 12A.
LIITE 6	Makrokuvat, TIG. Näytteet 13A – 20A.
LIITE 8	Mikrorakennekuvat, pMAG. Näytteet 1A-12A
LIITE 9	Mikrorakennekuvat, TIG. Näytteet 13A-20A



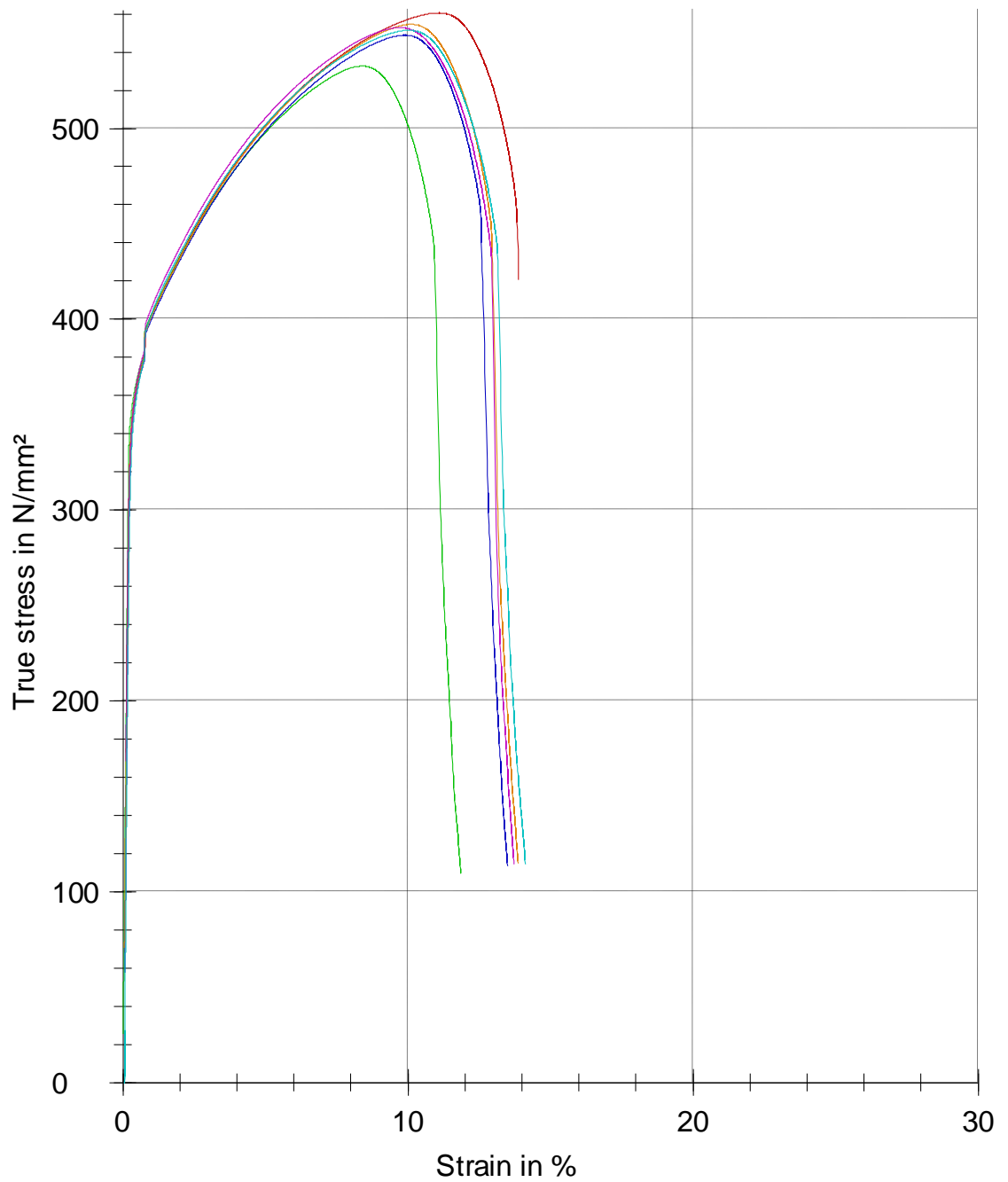
Vetosauvan tunnistus:	Vetokäyrän väri:
testi1	Punainen
testi2	Vihreä
testi3	Sininen
testi1_ku	Oranssi
testi2_ku	Violetti
testi3_ku	Turkoosi



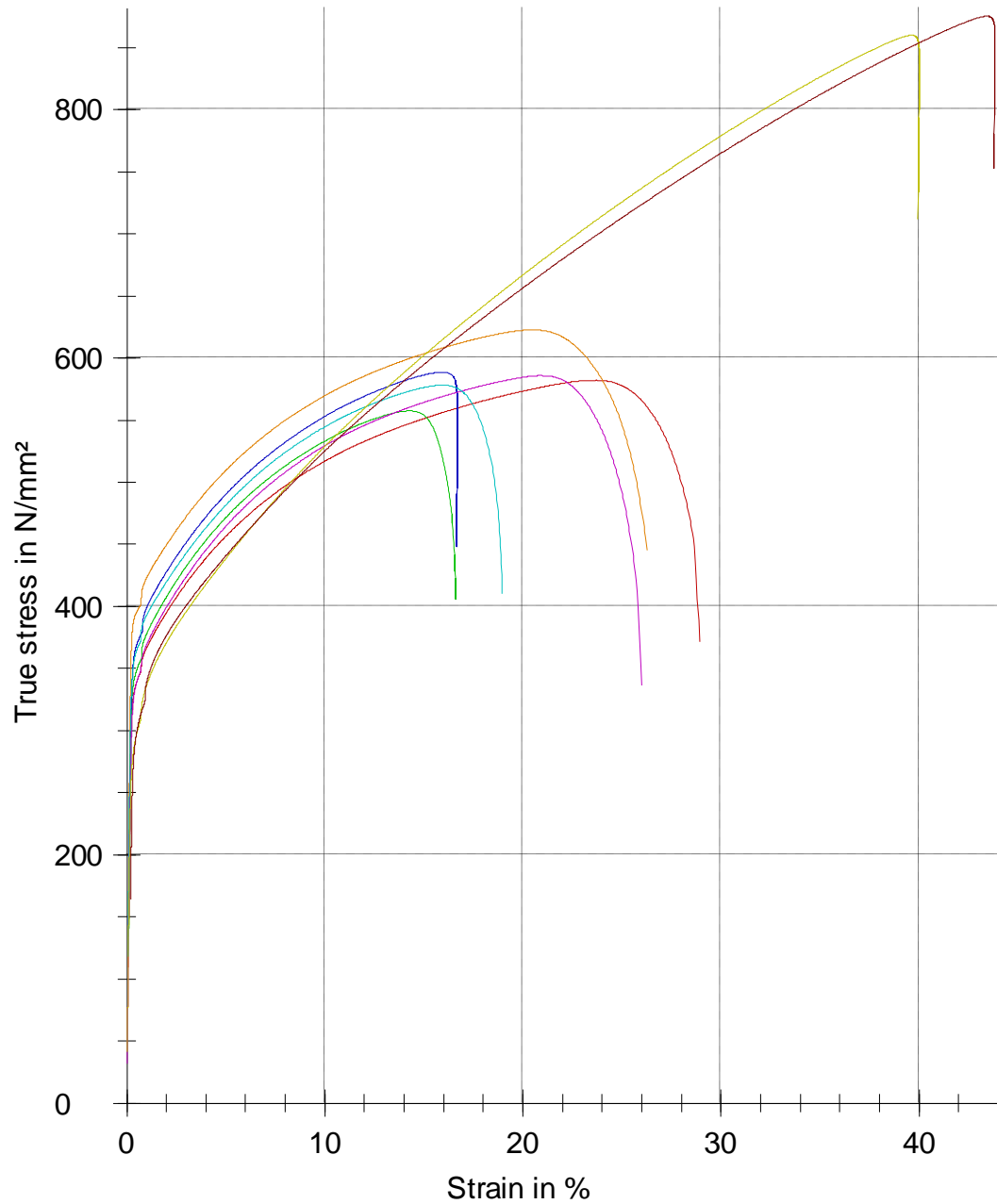
Vetosauvan tunniste:	Vetokäyrän väri:
testi1_0,10	Punainen
testi2_0,20	Vihreä
testi1_0,10ku	Sininen
testi2_0,20ku	Oranssi



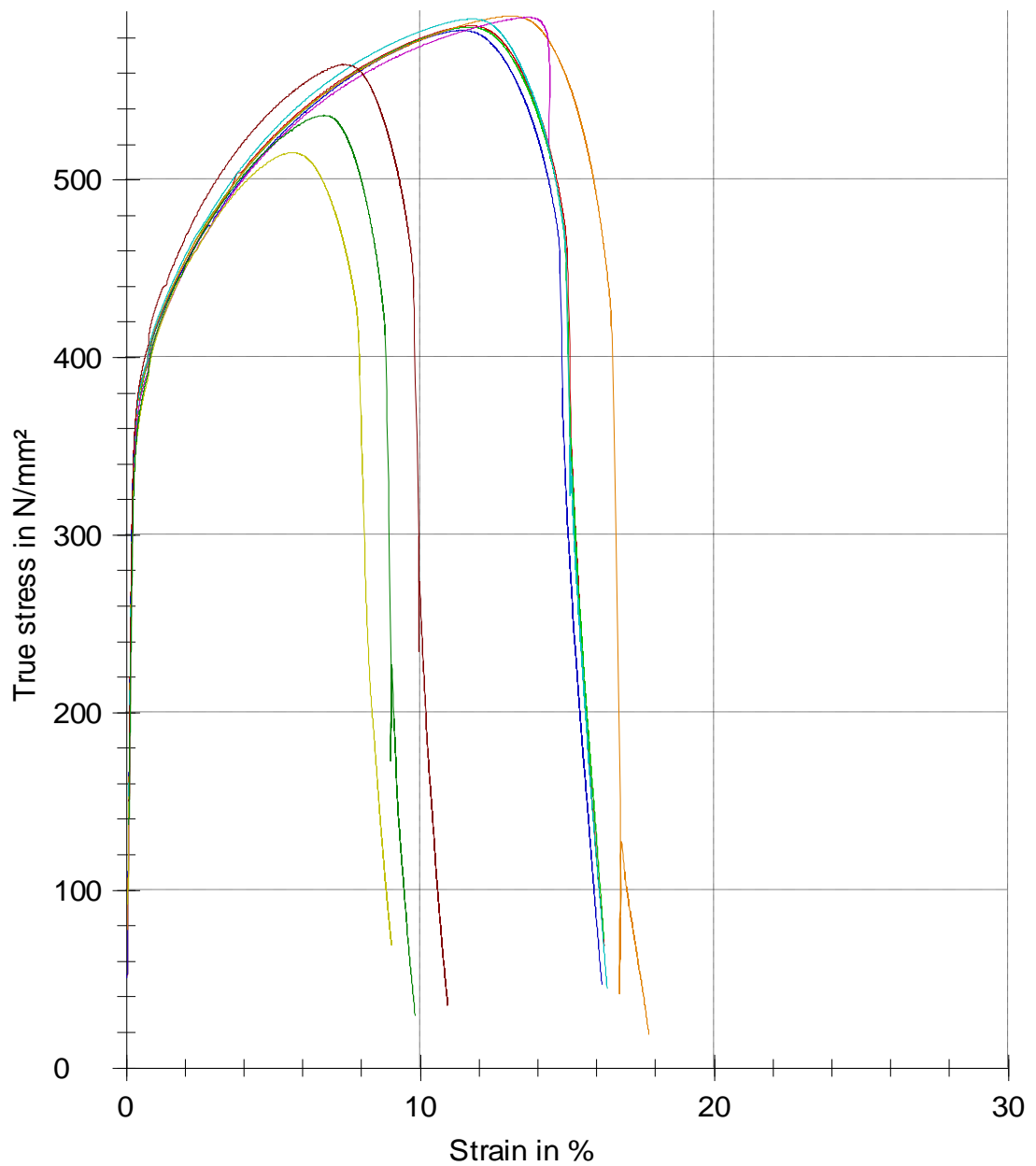
Vetosauvan tunniste:	Vetokäyrän väri:
0,55_1	Punainen
0,55_2	Vihreä
0,60_1	Sininen
0,60_2	Oranssi
0,65_1	Violetti
0,65_2	Turkoosi



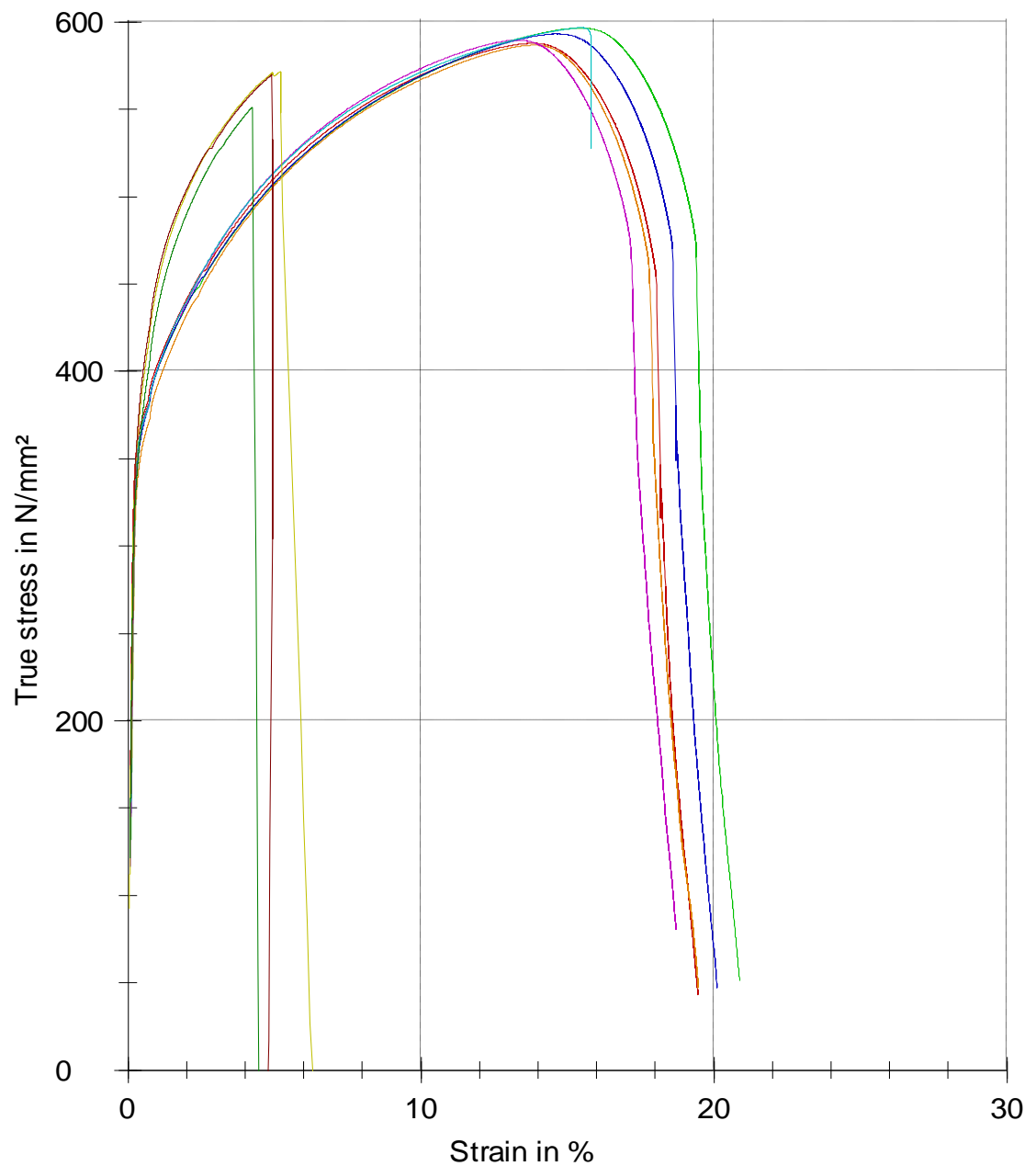
Vetosauvan tunniste:	Vetokäyrän väri:
0,70_1	Punainen
0,70_2	Vihreä
0,75_1	Sininen
0,75_2	Oranssi
0,80_1	Violetti
0,80_2	Turkoosi



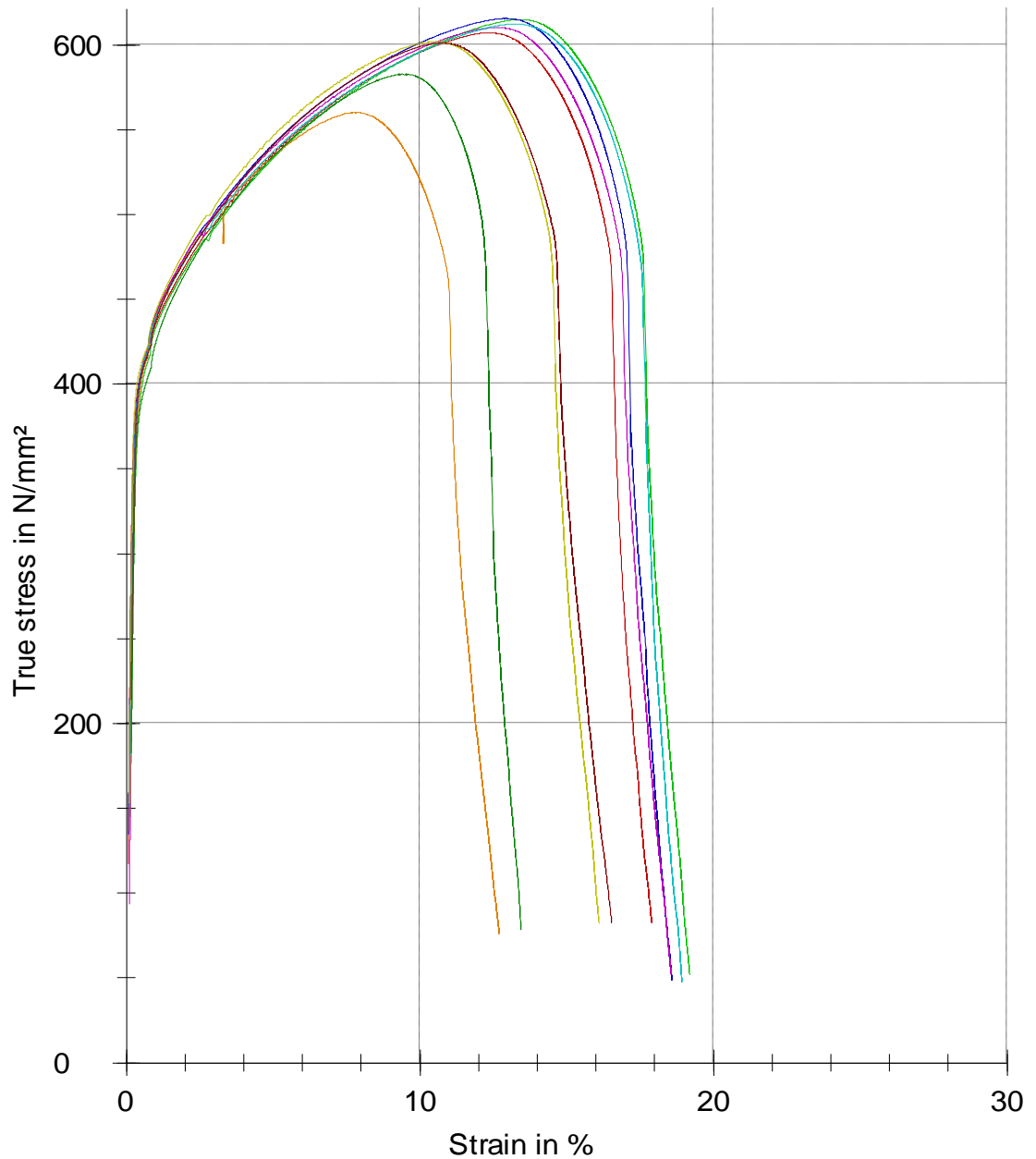
Vetosauvan tunniste:	Vetokäyrän väri:
4016_2mm_pitk.	Punainen
4016_2mm_poik.	Vihreä
4059_2mm_pitk.	Sininen
4059_2mm_poik.	Oranssi
4003_2mm_pitk.	Violetti
4003_2mm_poik.	Turkoosi
4301_2mm_pitk.	Keltainen
4301_2mm_poik.	Ruskea



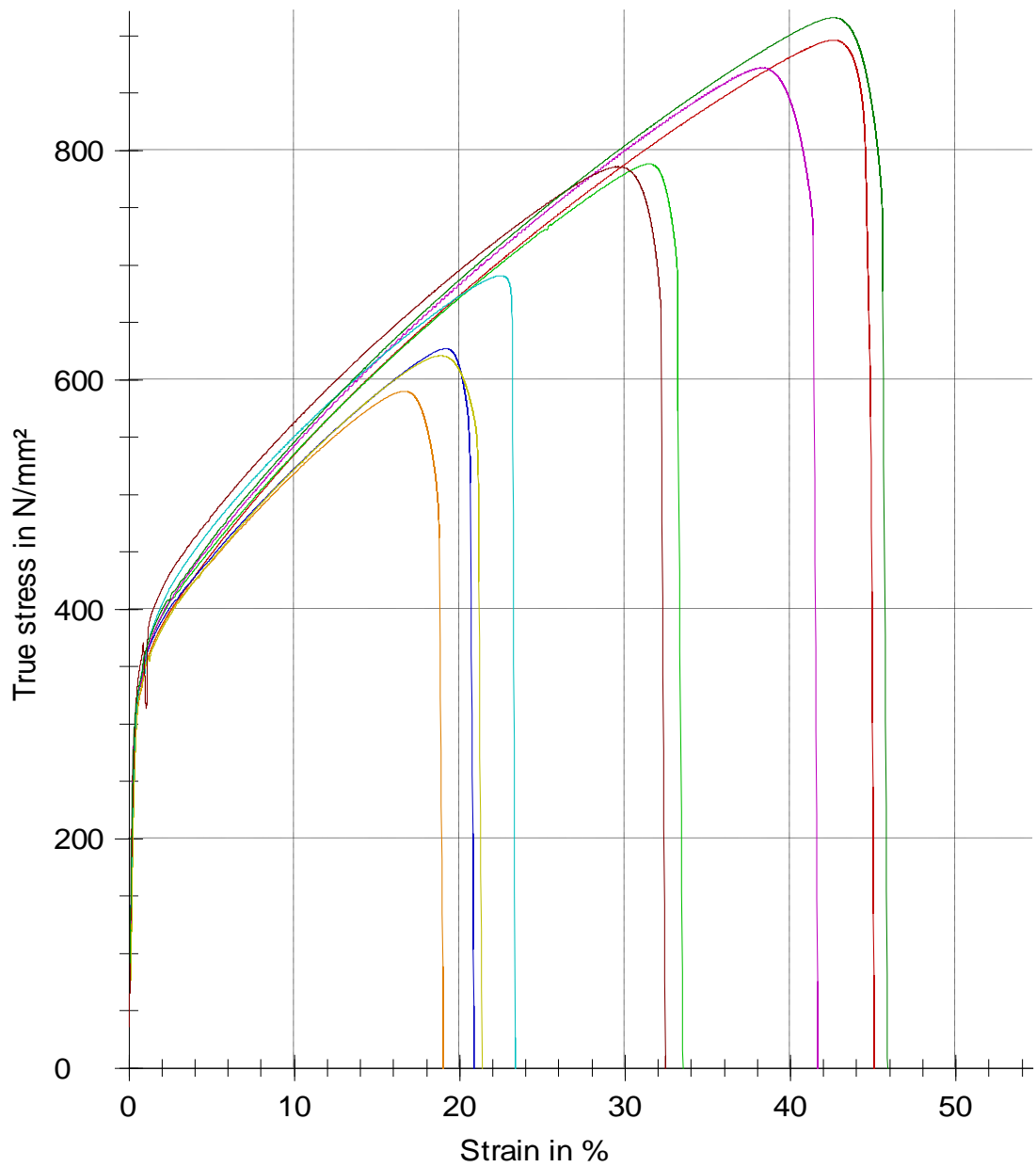
Vetosauvan tunniste:	Vetokäyrän väri:
1A_1 (4003, pieni lämmöntuonti)	Punainen
1A_2 (4003, pieni lämmöntuonti)	Vihreä
1A_3 (4003, pieni lämmöntuonti)	Sininen
2A_1 (4003, keskisuuri lämmöntuonti)	Oranssi
2A_2 (4003, keskisuuri lämmöntuonti)	Violetti
2A_3 (4003, keskisuuri lämmöntuonti)	Turkoosi
3A_1 (4003, suuri lämmöntuonti)	Keltainen
3A_2 (4003, suuri lämmöntuonti)	Ruskea
3A_3 (4003, suuri lämmöntuonti)	Tumman punainen



Vetosauvan tunniste:	Vetokäyrän väri:
4A_1 (4016, pieni lämmöntuonti)	Punainen
4A_2 (4016, pieni lämmöntuonti)	Vihreä
4A_3 (4016, pieni lämmöntuonti)	Sininen
5A_1 (4016, keski-suuri lämmöntuonti)	Oranssi
5A_2 (4016, keski-suuri lämmöntuonti)	Violetti
5A_3 (4016, keski-suuri lämmöntuonti)	Turkoosi
6A_1 (4016, suuri lämmöntuonti)	Keltainen
6A_2 (4016, suuri lämmöntuonti)	Ruskea
6A_3 (4016, suuri lämmöntuonti)	Tumman punainen

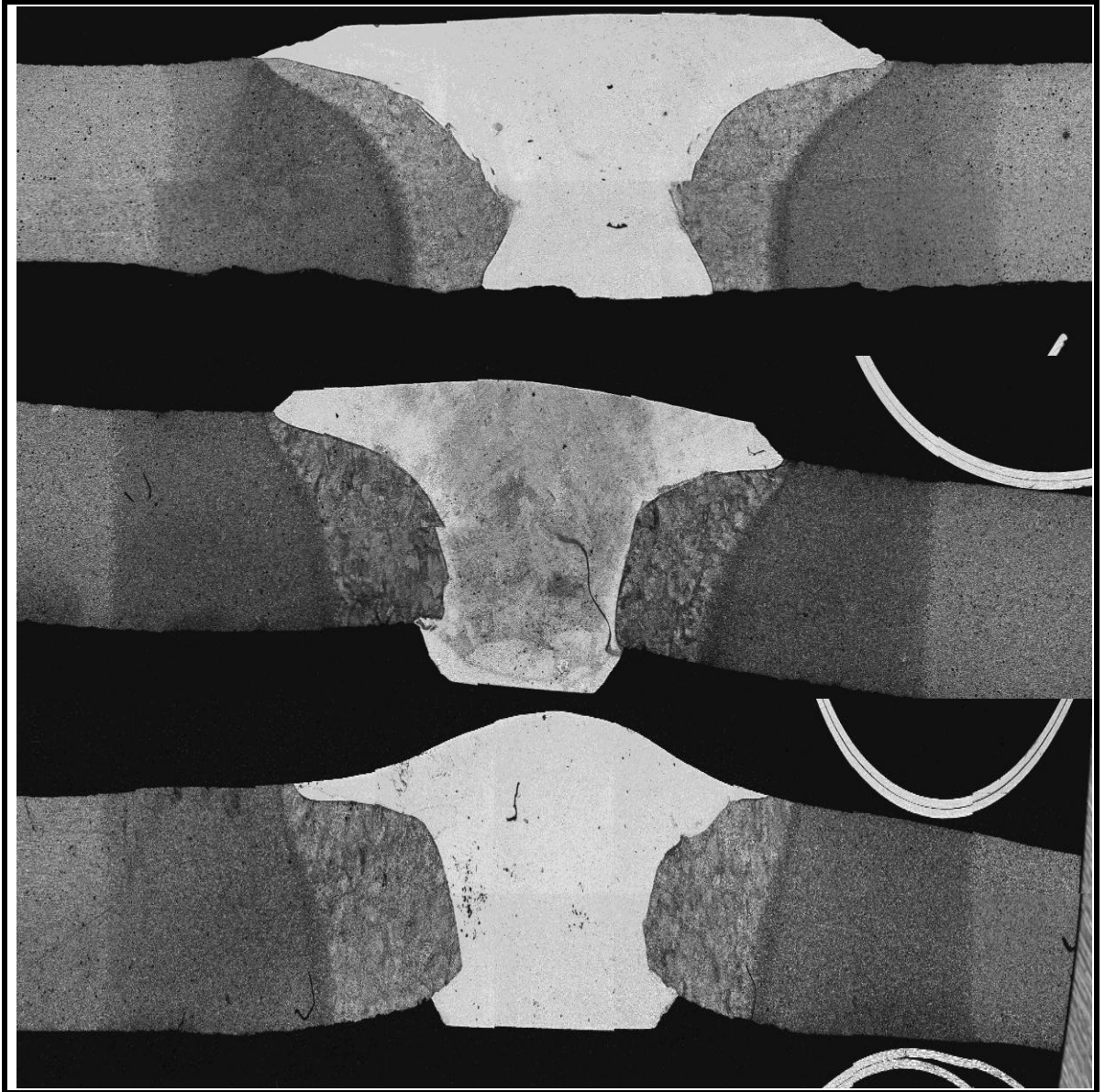


Vetosauvan tunniste:	Vetokäyrän väri:
7A_1 (4509, pieni lämmöntuonti)	Punainen
7A_2 (4509, pieni lämmöntuonti)	Vihreä
7A_3 (4509, pieni lämmöntuonti)	Sininen
8A_1 (4509, keski-suuri lämmöntuonti)	Oranssi
8A_2 (4509, keski-suuri lämmöntuonti)	Violetti
8A_3 (4509, keski-suuri lämmöntuonti)	Turkoosi
9A_1 (4509, suuri lämmöntuonti)	Keltainen
9A_2 (4509, suuri lämmöntuonti)	Ruskea
9A_3 (4509, suuri lämmöntuonti)	Tumman punainen

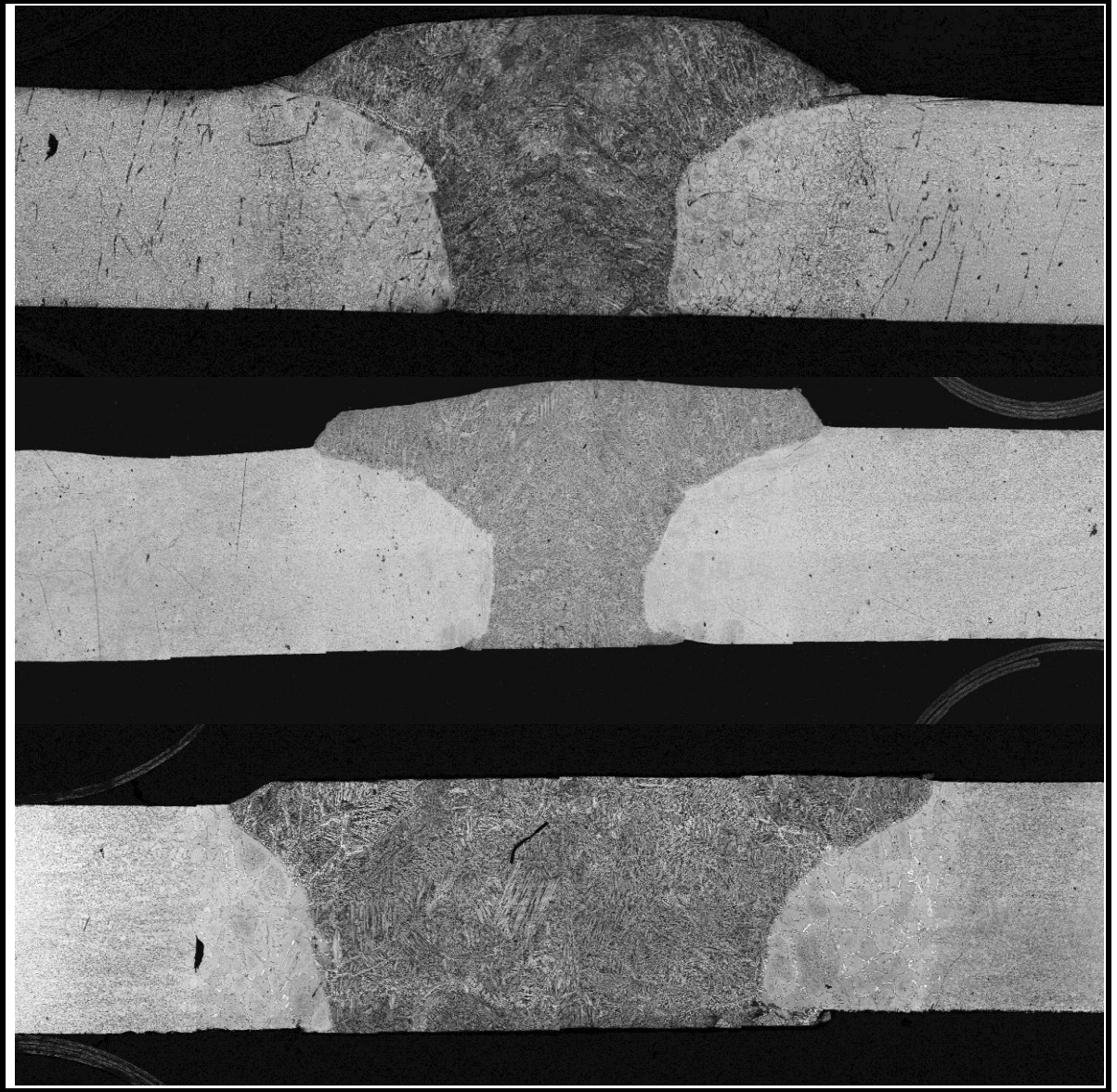


Vetosauvan tunniste:	Vetokäyrän väri:
10A_1 (4301, pieni lämmöntuonti)	Punainen
10A_2 (4301, pieni lämmöntuonti)	Vihreä
10A_3 (4301, pieni lämmöntuonti)	Sininen
11A_1 (4301, keski-suuri lämmöntuonti)	Oranssi
11A_2 (4301, keski-suuri lämmöntuonti)	Violetti
11A_3 (4301, keski-suuri lämmöntuonti)	Turkoosi
12A_1 (4301, suuri lämmöntuonti)	Keltainen
12A_2 (4301, suuri lämmöntuonti)	Ruskea
12A_3 (4301, suuri lämmöntuonti)	Tumman punainen

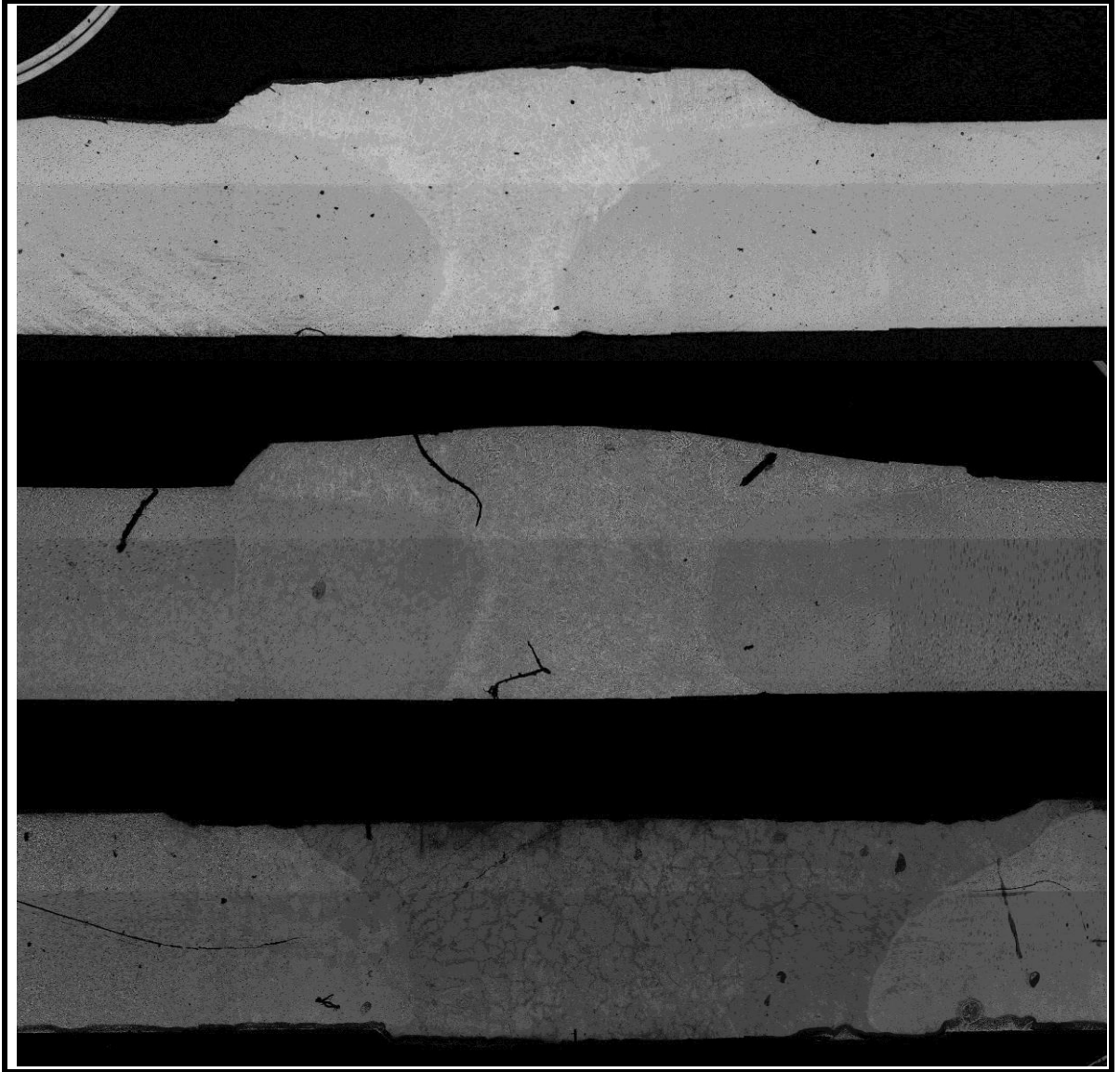
Kuva 1. EN 1.4003, pMAG, 2mm, a) 1A pieni lämmöntuonti 0,149kJ/mm, b) 2A keskisuuri lämmöntuonti 0,224kJ/mm c) 3A suuri lämmöntuonti 0,346kJ/mm. Suurennos 50x.



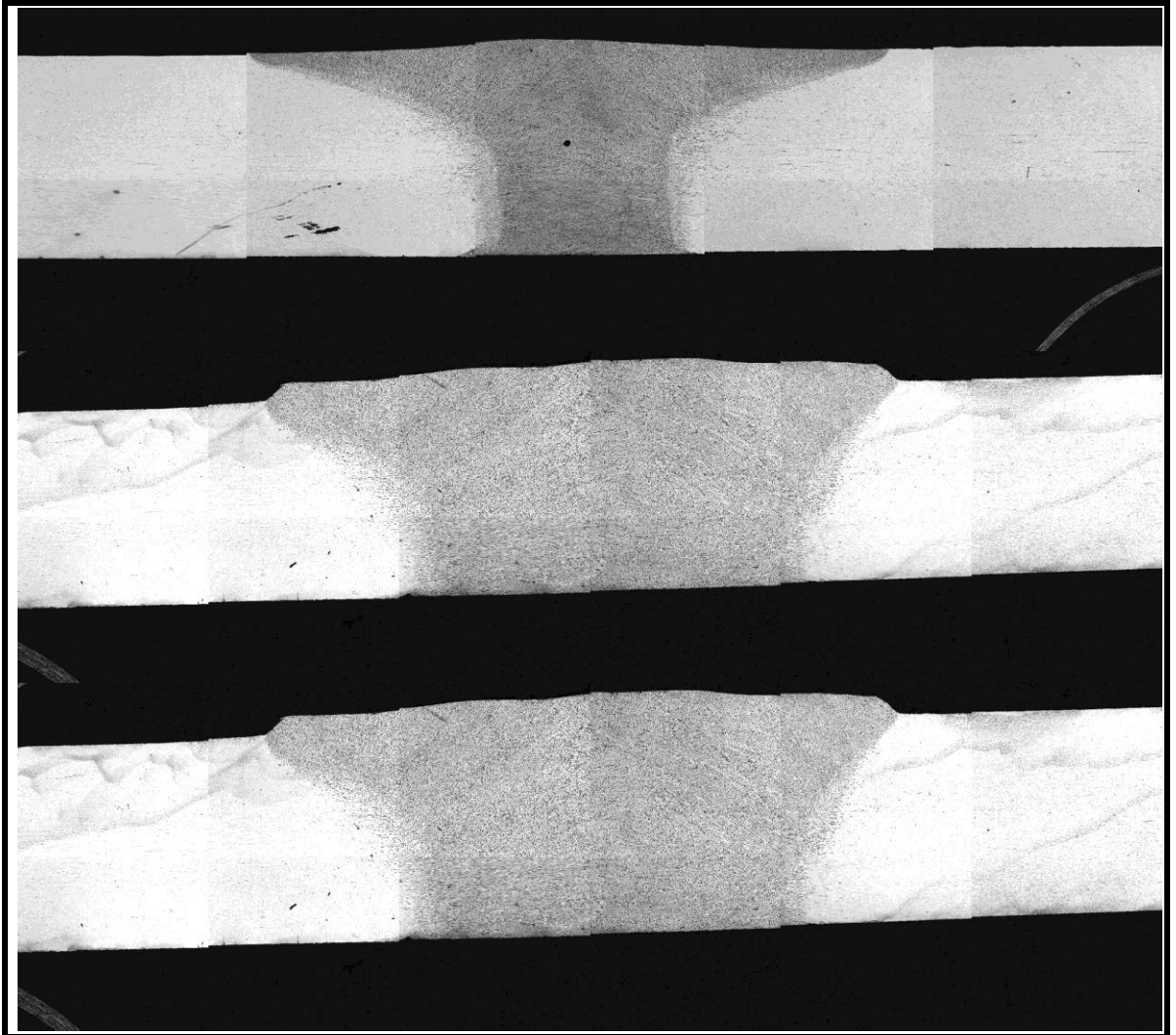
Kuva 2. EN 1.4016, pMAG, 2mm, a) 4A pieni lämmöntuonti 0,151kJ/mm, b) 5A keski-suuri lämmöntuonti 0,231kJ/mm, c) suuri lämmöntuonti 0,355kJ/mm. Suurennos 50x.



Kuva 3. EN 1.4509, pMAG, 2mm. a) 7A pieni lämmöntuonti 0,151kJ/mm, b) 8A keski-suuri lämmöntuonti 0,230kJ/mm, c) 9A suuri lämmöntuonti 0,354kJ/mm. Suurennos 50x.



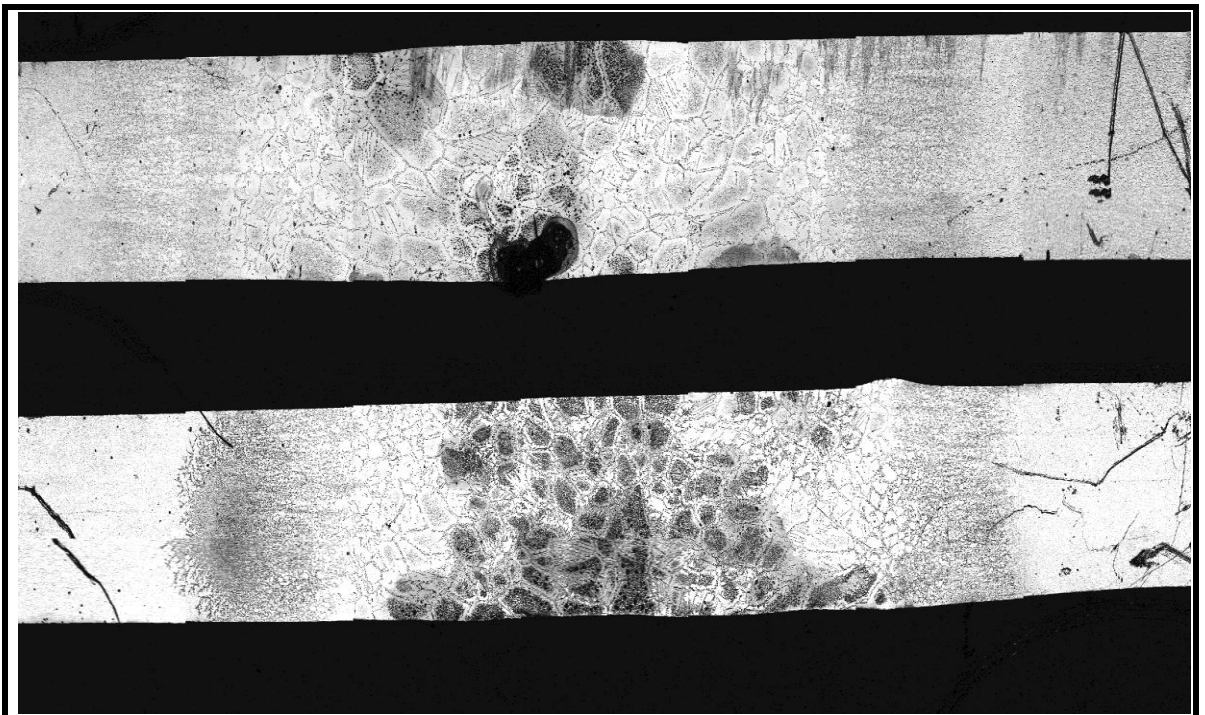
Kuva 4. EN 1.4301, pMAG, 2mm. a) 10A pieni lämmöntuonti 0,149kJ/mm. b) 11A keski-suuri lämmöntuonti 0,230kJ/mm. c) 12A suuri lämmöntuonti 0,270kJ/mm. Suurennos 50x.



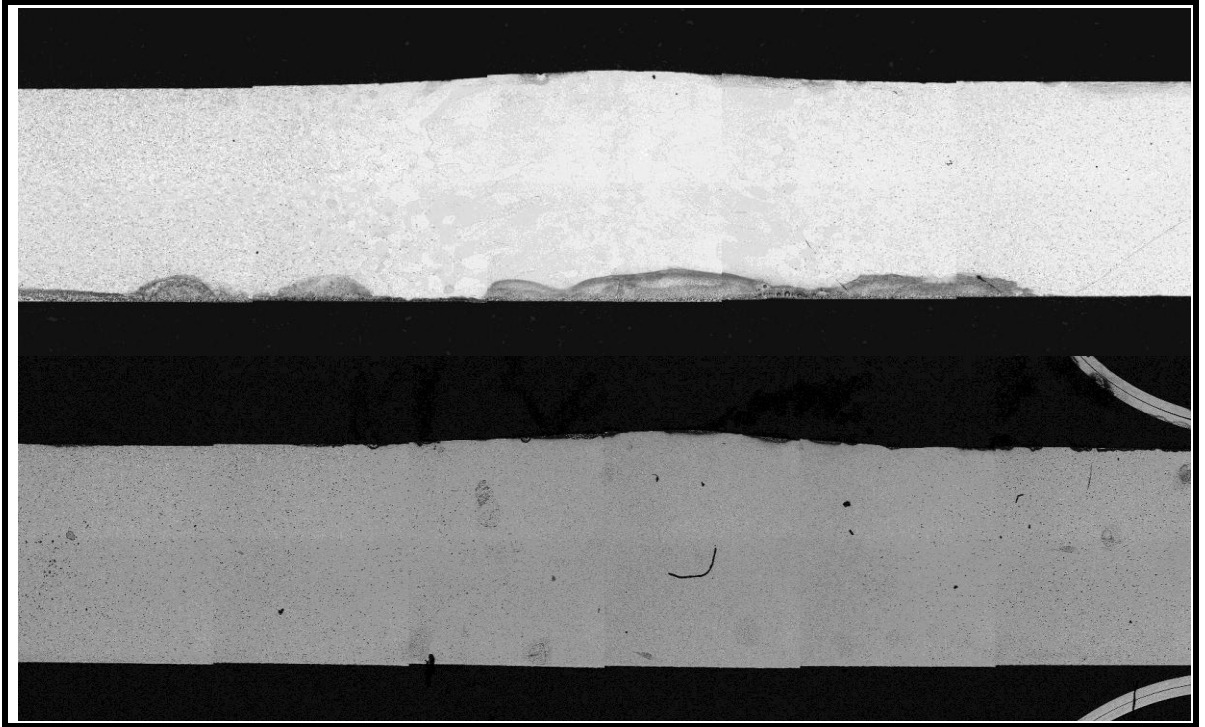
Kuva 1. EN 1.4003, TIG, 2mm. a) 13A pieni lämmöntuonti 0,170kJ/mm. b) 14A suuri lämmöntuonti 0,192kJ/mm. Suurennos 50x.



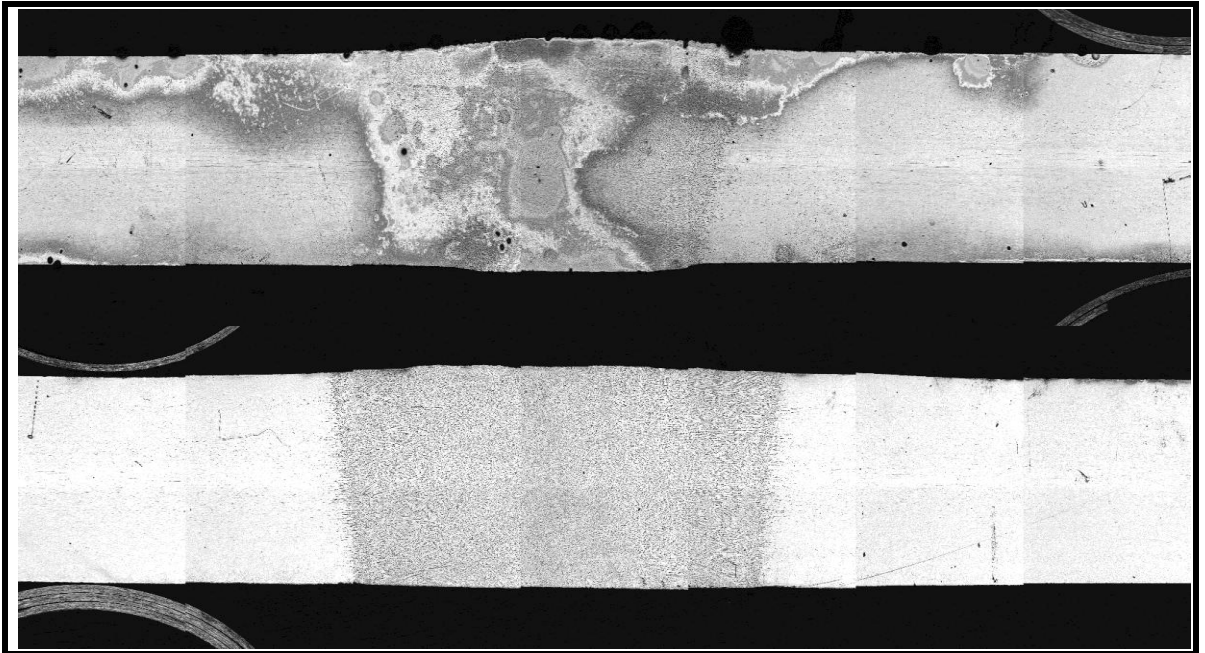
Kuva 2 EN 1.4016, TIG, 2mm. a) 15A pieni lämmöntuonti 0,170kJ/mm. b) 16A suuri lämmöntuonti 0,223kJ/mm. Suurennos 50x.



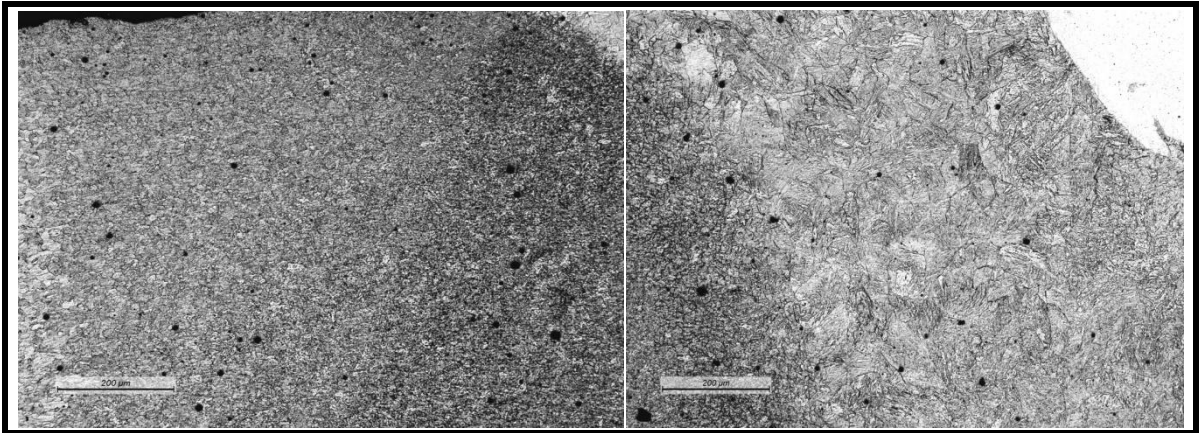
Kuva 3. EN 1.4509, TIG, 2mm. a) 17A pieni lämmöntuonti 0,127kJ/mm. b) 18A suuri lämmöntuonti 0,141kJ/mm. Suurennos 50x.



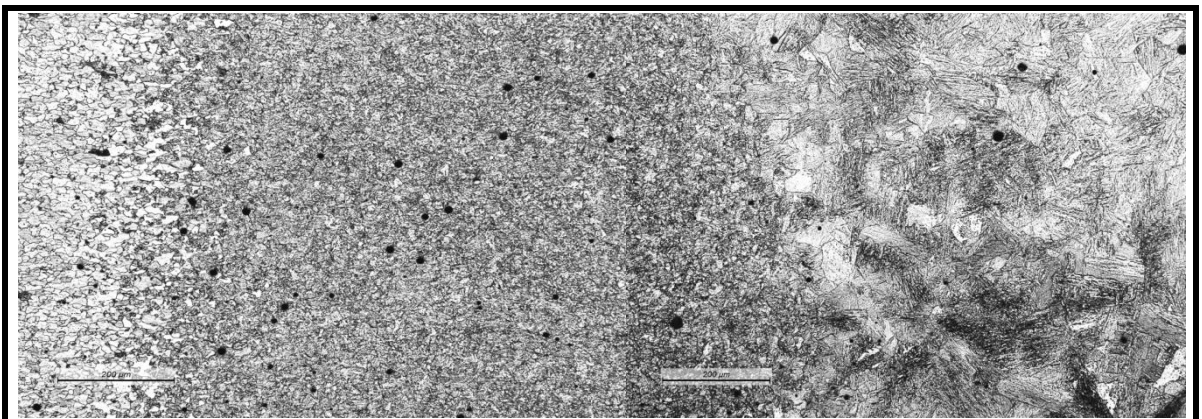
Kuva 4. EN 1.4301, TIG, 2mm. a) 19A pieni lämmöntuonti 0,152kJ/mm b) 20A suuri lämmöntuonti 0,173kJ/mm. Suurennos 50x.



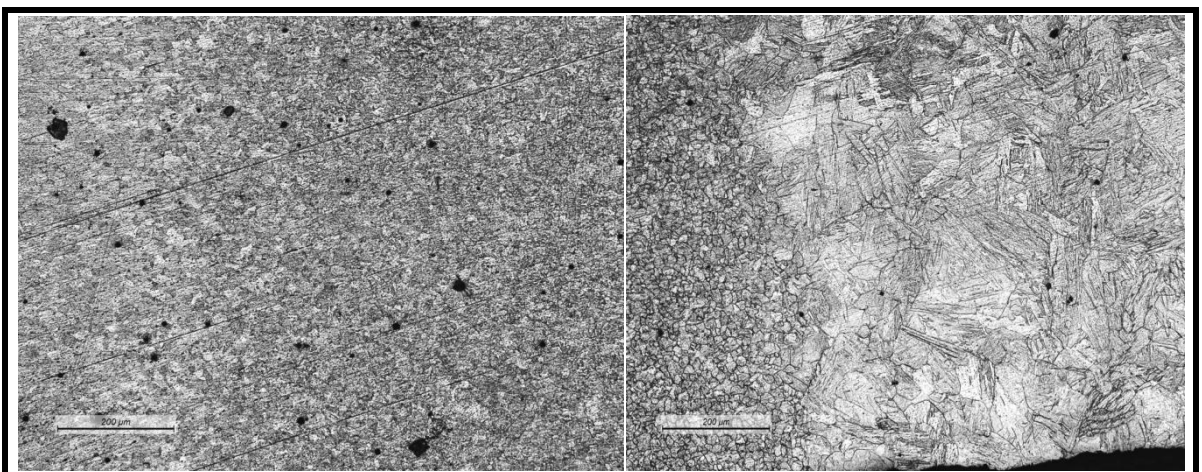
Kuva 1. Näyte 1A Muutosvyöhykkeet. EN 1.4003, pMAG, pieni lämmöntuonti 0,149kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



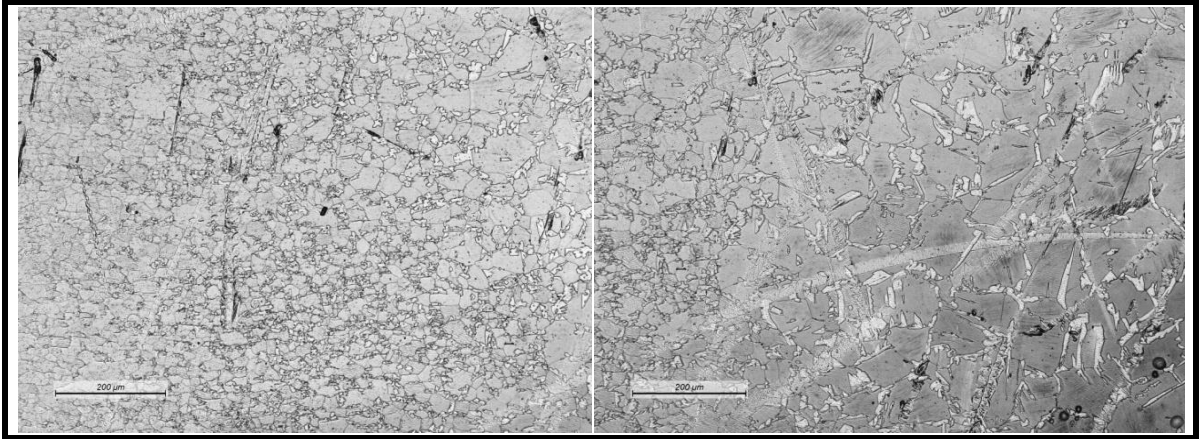
Kuva 2. Näyte 2A Muutosvyöhykkeet. EN 1.4003, pMAG, keski-suuri lämmöntuonti 0,224kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



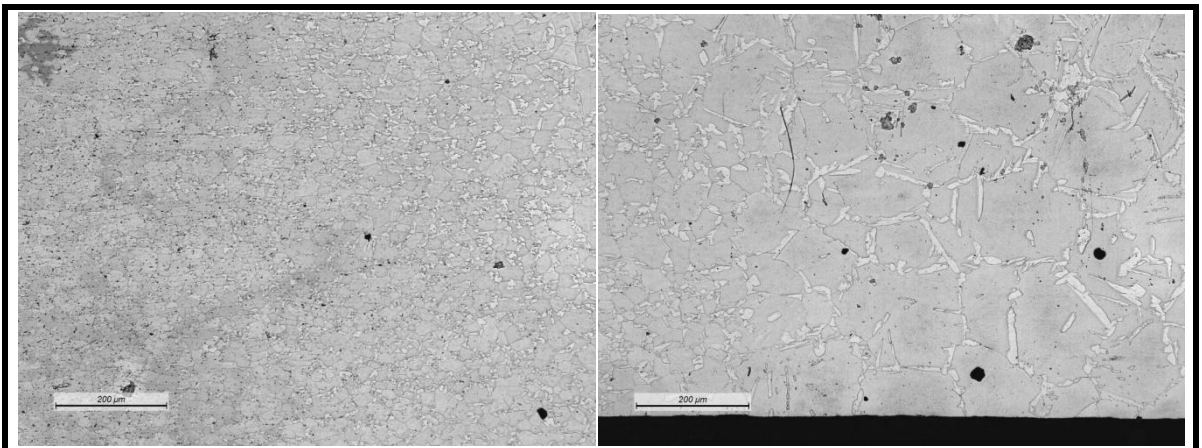
Kuva 3. Näyte 3A Muutosvyöhykkeet. EN 1.4003, pMAG, suuri lämmöntuonti 0,346kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



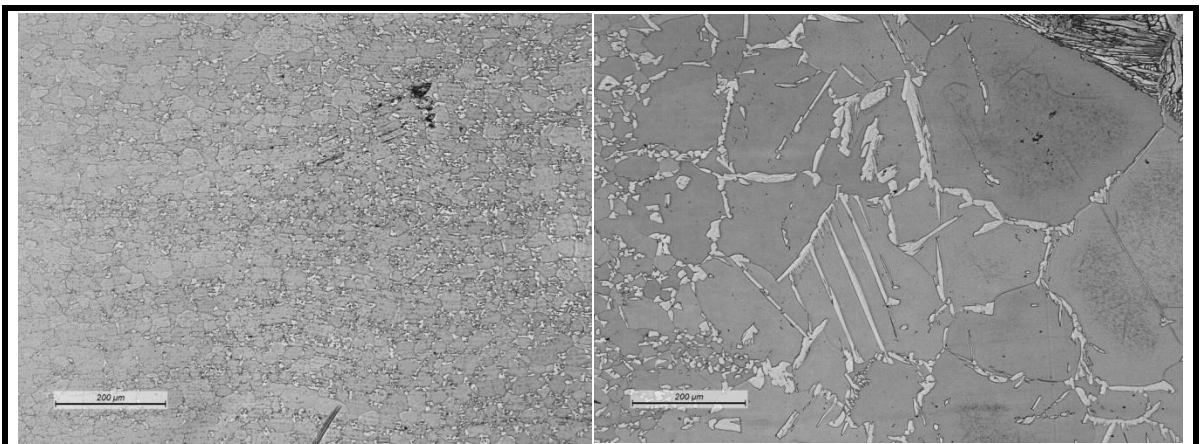
Kuva 4. Näyte 4A Muutosvyöhykkeet. EN 1.4016, pMAG, pieni lämmöntuonti 0,151kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



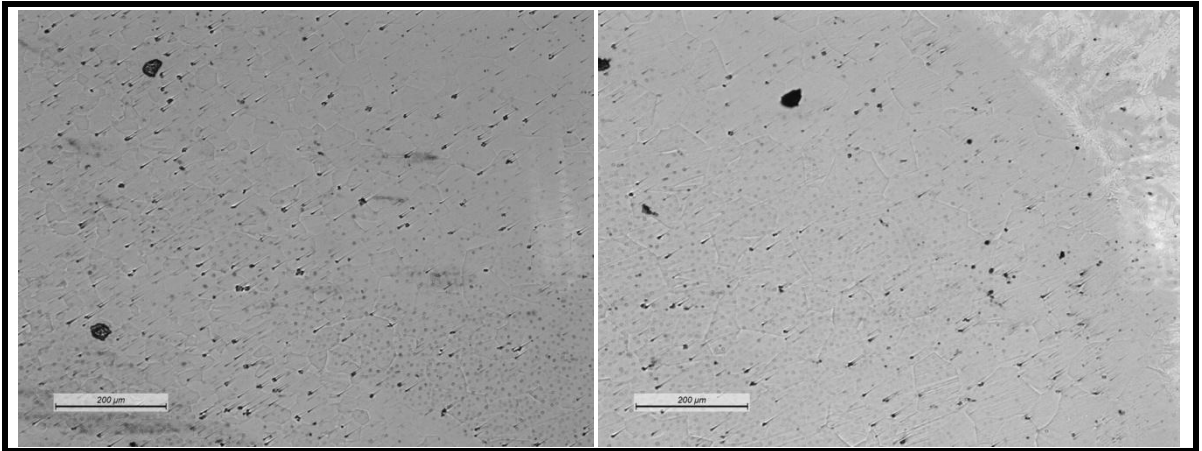
Kuva 5. Näyte 5A Muutosvyöhykkeet. EN 1.4016, pMAG, keskiuuri lämmöntuonti 0,231kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



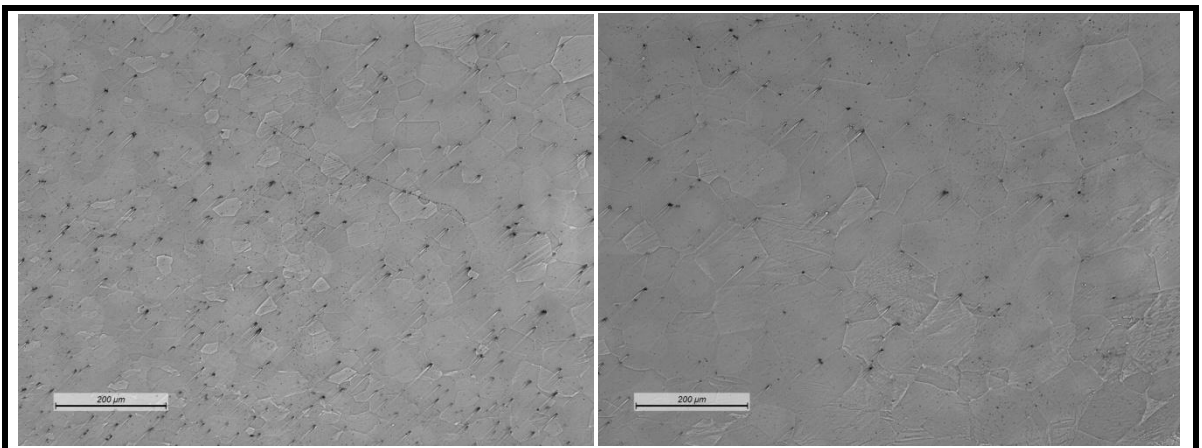
Kuva 6. Näyte 6A Muutosvyöhykkeet. EN 1.4016, pMAG, suuri lämmöntuonti 0,355kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



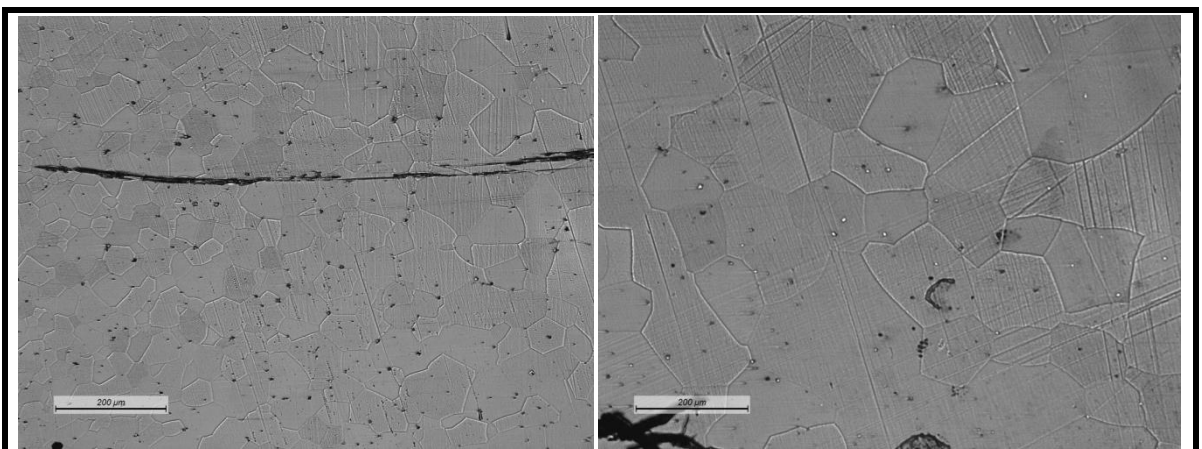
Kuva 7. Näyte 7A Muutosvyöhykkeet. EN 1.4509, pMAG, pieni lämmöntuonti 0,151kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



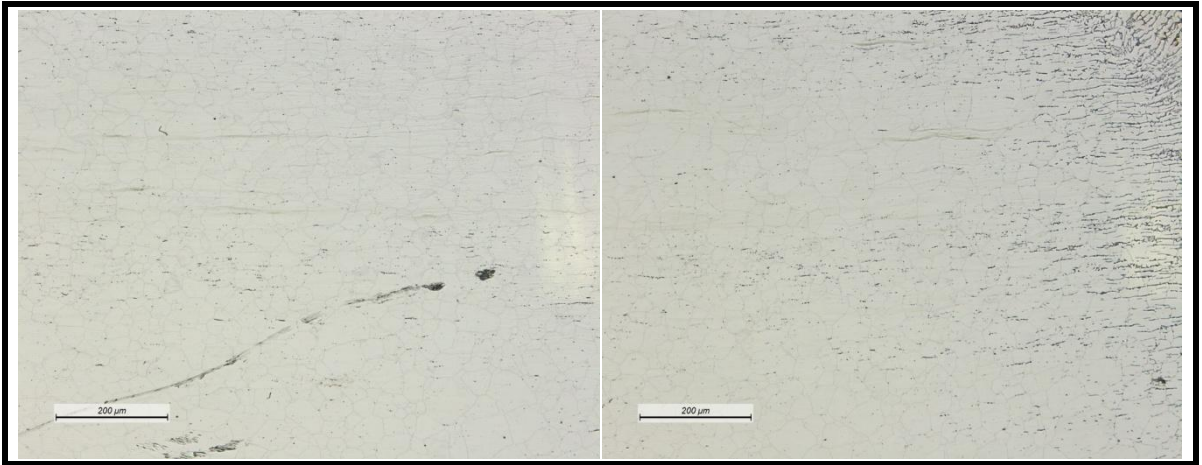
Kuva 8. Näyte 8A Muutosvyöhykkeet. EN 1.4509, pMAG, keskiuuri lämmöntuonti 0,230kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



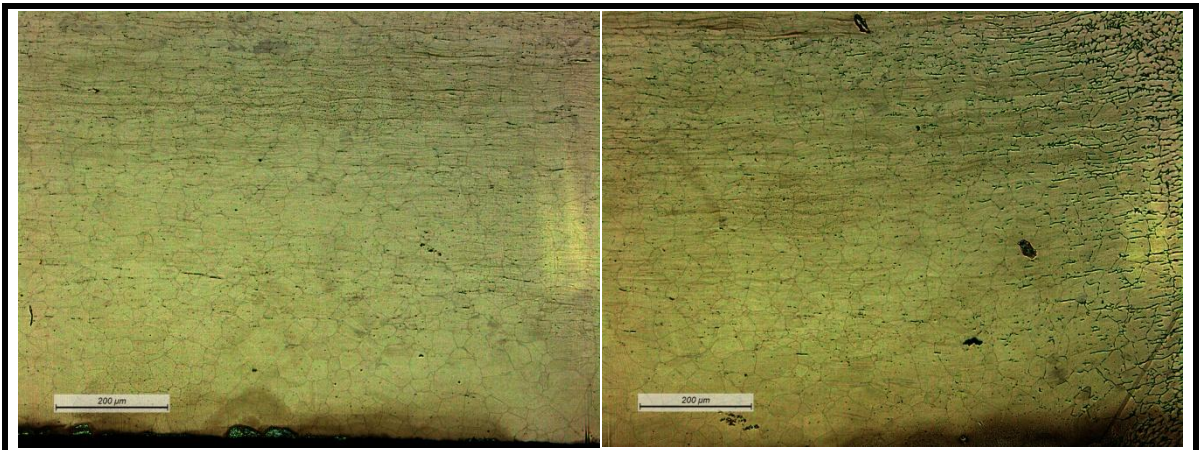
Kuva 9. Näyte 9A Muutosvyöhykkeet. EN 1.4509, pMAG, suuri lämmöntuonti 0,354kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



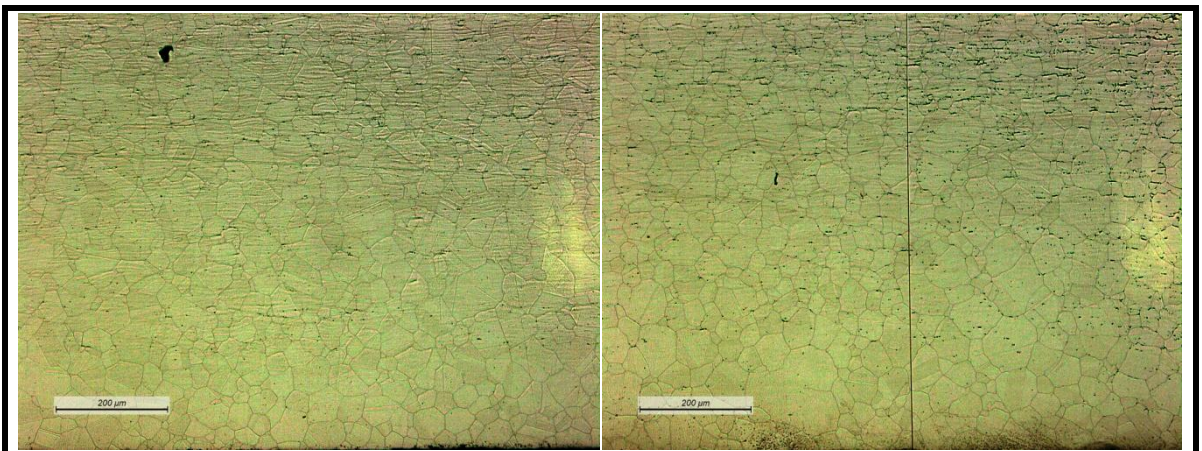
Kuva 10. Näyte 10A Muutosvyöhykkeet. EN 1.4301, pMAG, pieni lämmöntuonti 0,149kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



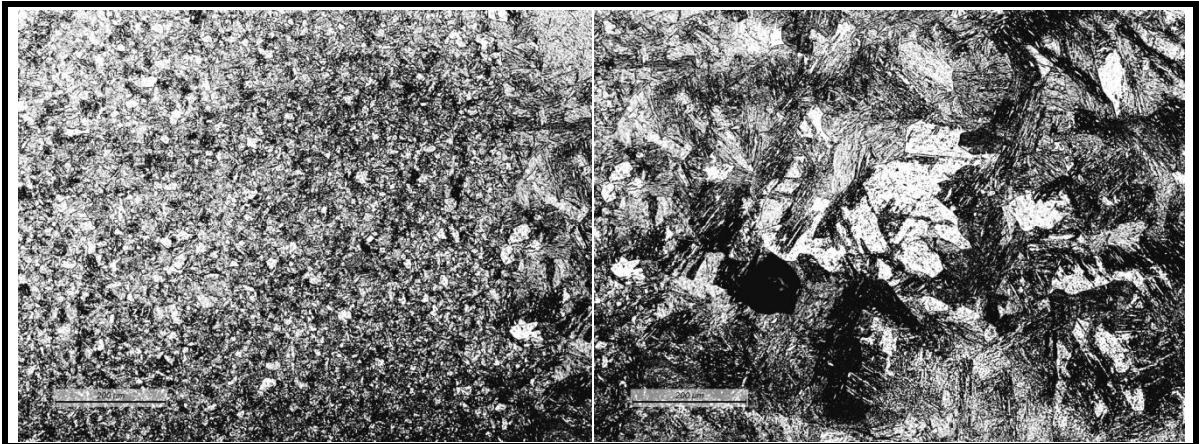
Kuva 11. Näyte 11A Muutosvyöhykkeet. EN 1.4301, pMAG, keskiuuri lämmöntuonti 0,230kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



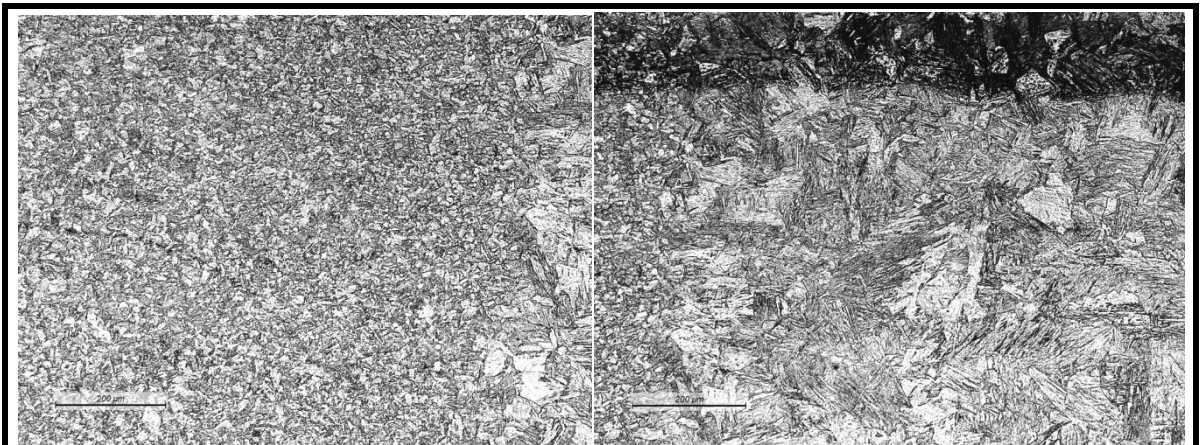
Kuva 12. Näyte 12A Muutosvyöhykkeet. EN 1.4301, pMAG, suuri lämmöntuonti 0,270kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



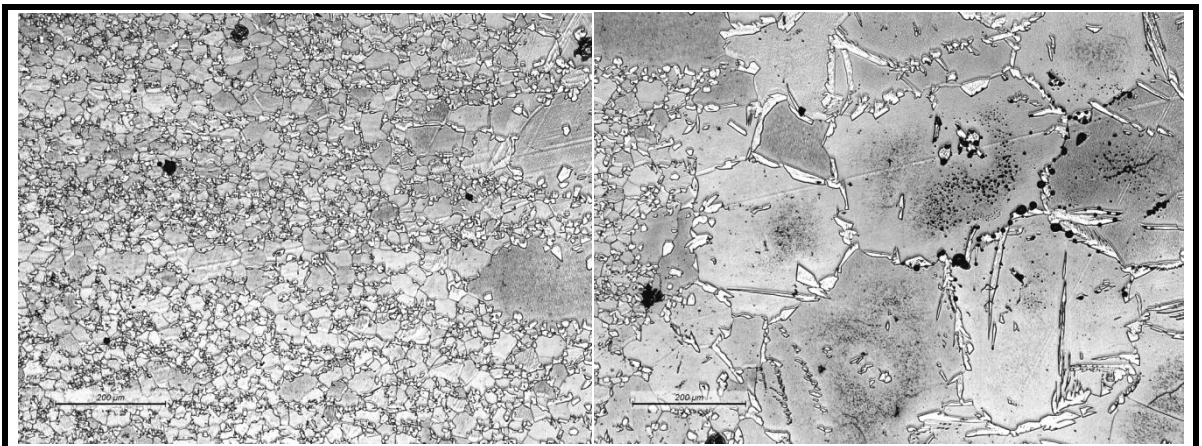
Kuva 1. Näyte 13A Muutosvyöhykkeet. EN 1.4003, TIG, pieni lämmöntuonti 0,170kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



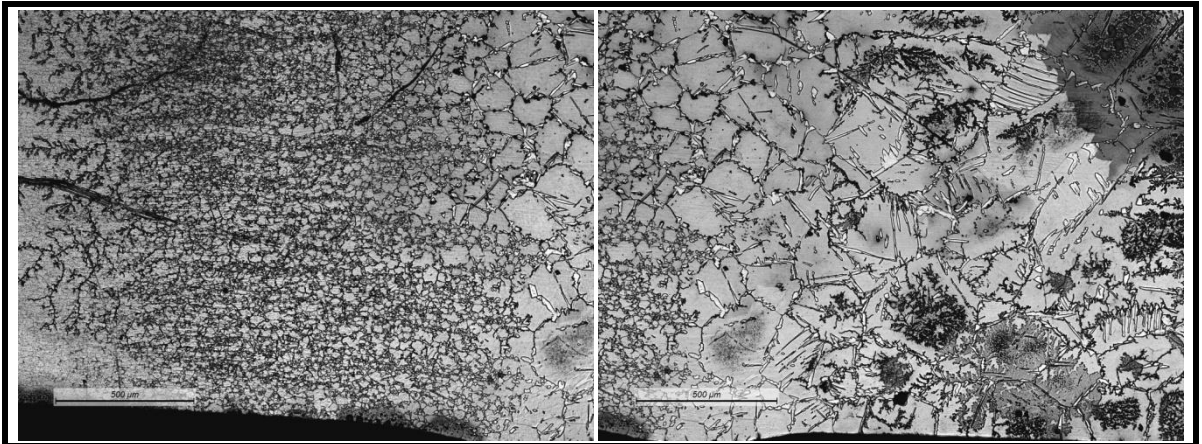
Kuva 2. Näyte 14A Muutosvyöhykkeet. EN 1.4003, TIG, suuri lämmöntuonti 0,192kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



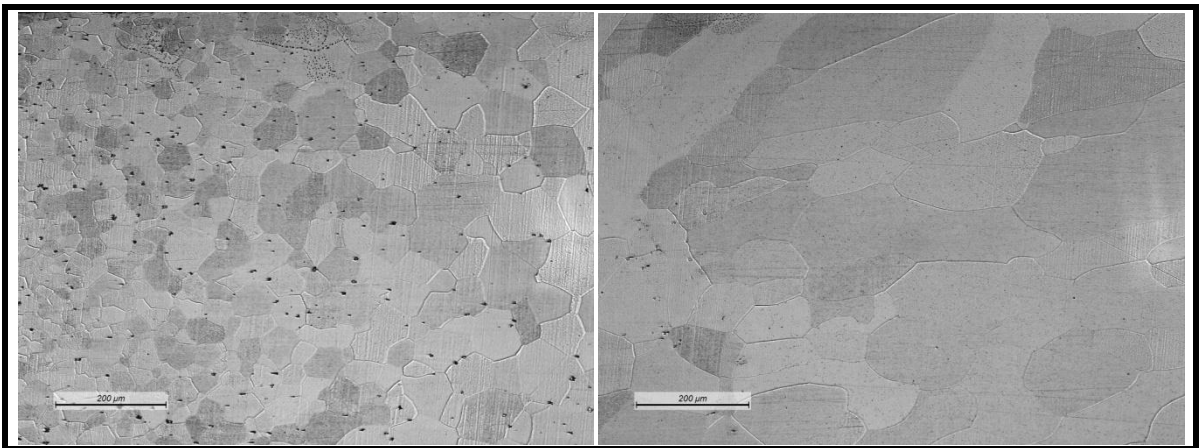
Kuva 3. Näyte 15A muutosvyöhykkeet. EN 1.4016, TIG, pieni lämmöntuonti 0,170kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



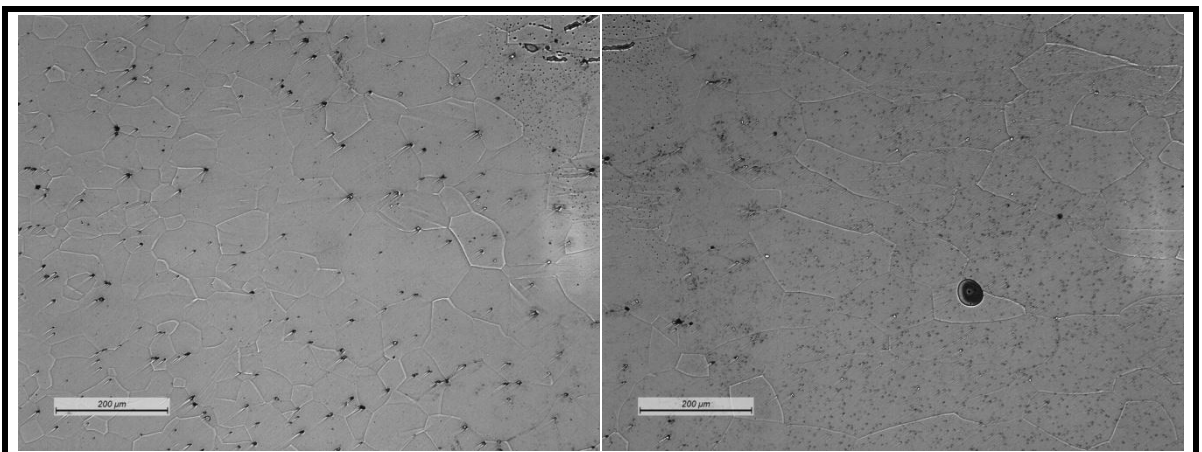
Kuva 4. Näyte 16A muutosvyöhykkeet. EN 1.4016, TIG, suuri lämmöntuonti 0,223kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkea muutosvyöhyke.



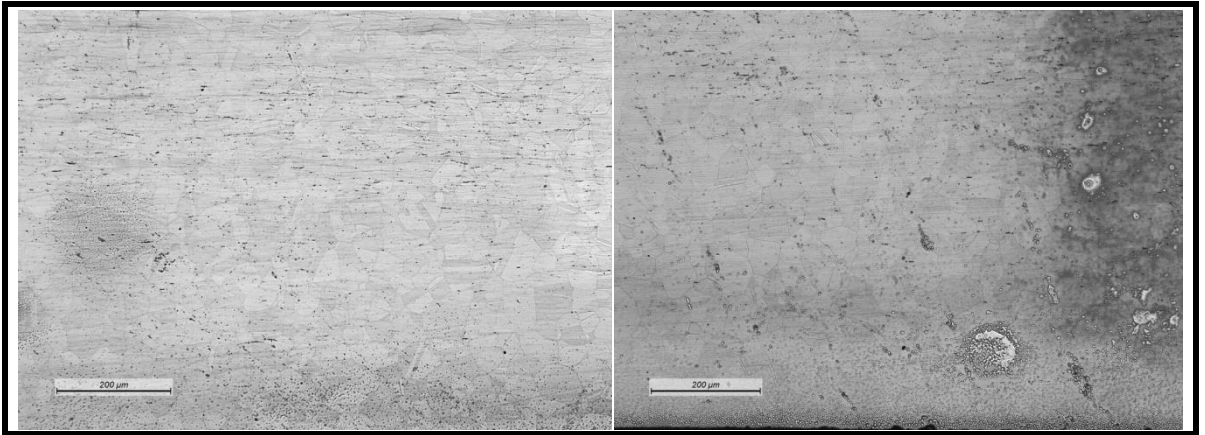
Kuva 5. Näyte 17A muutosvyöhykkeet. EN 1.4509, TIG, pieni lämmöntuonti 0,127kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkea muutosvyöhyke.



Kuva 6. Näyte 18A muutosvyöhykkeet. EN 1.4509, TIG, suuri lämmöntuonti 0,141kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkea muutosvyöhyke.



Kuva 7. Näyte 19A muutosvyöhykkeet. EN 1.4301, TIG, pieni lämmöntuonti 0,152kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.



Kuva 8. Näyte 20A muutosvyöhykkeet. EN 1.4301, TIG, suuri lämmöntuonti 0,173kJ/mm. Vasemmalla hieno- ja oikealla karkearakeinen muutosvyöhyke.

