

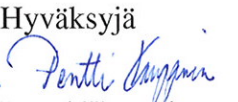


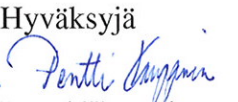


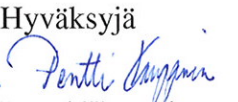




Paikallisen alilujuuden (mis-match) vaikutus muokkaamalla lujitettujen austeniittisten ruostumattomien terästen hitsausliitosten ominaisuuksiin

Kirjoittajat: Pekka Nevasmaa, Mika Sirén, Anssi Laukkanen, Jouni Alhainen, Tom Andersson, Lauri Elers, Tatu Muukkonen, Mahesh C. Somani ja L.Pentti Karjalainen

Luottamuksellisuus: Julkinen

| | | | | |
|--|--|---|--|---|
| Raportin nimi Paikallisen alilujuuden (mis-match) vaikutus muokkaamalla lujitettujen austeniittisten ruostumattomien terästen hitsausliitosten ominaisuuksiin. | | | | |
| Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot TEKES / NewPro -tutkimusohjelma, Outokumpu Stainless Oy (Tornio Works), Obas Oy, Andritz Oy, Laserplus Oy | Asiakkaan viite DiarioNro 2455/31/06 PäätösNro 40031/07 | | | |
| Projektin nimi Paikallisen alilujuuden vaikutus muokkaamalla lujitettujen terästen hitsausliitoksiin (MIS-MATCH) | Projektin numero/lyhytnimi No 13449 / MIS-MATCH | | | |
| Raportin laatija(t) Pekka Nevasmaa, Mika Sirén, Anssi Laukkanen, Jouni Alhainen, Tom Andersson, Lauri Elers, Tatu Muukkonen, Mahesh C. Somani, L.Pentti Karjalainen | Sivujen/liitesivujen lukumäärä 50/ | | | |
| Avainsanat austeniittiset teräkset, muokkamalla lujitetut teräkset, alilujuus, mis-match, hitsaus, rakenteellinen eheys, FAD | Raportin numero VTT-R-06034-09 | | | |
| Tiivistelmä <p>Projektissa tutkittiin termisesti simuloiden, ainettarikkovin piensauvakokein ja laskennallisesti hitsauksen lämpösyklin vaikutusta teräksen mikrorakennemuutoksiin, sekä näiden seurauksena syntyvien, paikallisesti alilujien hitsin vyöhykkeiden merkitystä ulkoisesti kuormitetun hitsatun rakenteen lujuuteen, kuormankantokykyyn ja vauriokäyttäytymiseen. Materiaaleina olivat muokkaamalla lujitetut austeniittiset ruostumattomat teräslajit lujuusluokissa 2B, C850 ja C1000. Hitsausliitoksen alilujien vyöhykkeiden todellisten lujuus- ja sitkeysominaisuuksien kytkeminen po. alilujuuden rakenteellisiin seurauksiin kuormituksen alaisena mahdollistaa rakennesuunnittelun ja -mitoituksen, materiaalin ominaisuuksien, hitsaavan valmistuksen ja käyttöolosuhteiden vuorovaikutteisen, numeeris pohjaisen optimoinnin tapauskohtaisesti. Materiaalien mekaanisten ominaisuuksien muutoksia huippulämpötilan funktiona, ja tästä aiheutuvan mis-match -ilmiön rakennevaikutuksia em. liitostyyppitapauksissa arviointiin Oulun Yliopiston tekemien termisten simulointikokeiden ja uunihehkutuskokeiden tuloksia käyttäen. Rakenteelliseen eheyteen vaikuttavia tekijöitä tarkasteltiin VTT:ssä käyttäen ”FITNET - Fitness-for-Service” -proseduuriin nojautuvia, ns. FAD (Failure Assessment Diagram) -pohjaisia menetelmiä. Parametrisen tutkimuksen avulla osoitetaan kriittisten tekijöiden, kuten murtumismitkeyden, suunnittelu- ja jäännösjännitysten tason, vikakoon ja rakennegeometrian vaikutus rakenteen/rakenneosan rakenteelliseen eheyteen. Eri mis-match -tapauksille konstruoidut FADit muodostavat numeerinen suunnittelu- ja laskentatyökalun perustan, jota käyttäen voidaan määrittää hitsatun rakenneosan potentiaaliset vauriomekanismit ja rakennelujuus paikallisesti alilujille hitsausliitoksille. Kehitettyä mallinnustyökalua sovellettiin yritys lähtöiseen case-esimerkitapaukseen. Projektin tulosten ja niiden pohjalta kehitettyjen mallinnusmenetelmien avulla voidaan edelleen saada uusia keinoja nykyisten rakennonormien ja -ohjeiden mielekkyyden kriittiseen tarkasteluun, sekä materiaalien, liitosmuotojen, hitsausparametrien ja -lisäaineiden käyttöturvalliseen valintaan.</p> | | | | |
| Luottamuksellisuus | Julkinen | | | |
| Espoo 21.12.2009 <table border="0"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> Laatija  Pekka Nevasmaa Erikoistutkija </td> <td style="vertical-align: top; text-align: center;"> Tarkastaja  Päivi Karjalainen-Roikonen Asiakaspäällikkö </td> <td style="vertical-align: top; text-align: right;"> Hyväksyjä  Pentti Kauppinen Teknologiapäällikkö </td> </tr> </table> | | Laatija  Pekka Nevasmaa Erikoistutkija | Tarkastaja  Päivi Karjalainen-Roikonen Asiakaspäällikkö | Hyväksyjä  Pentti Kauppinen Teknologiapäällikkö |
| Laatija  Pekka Nevasmaa Erikoistutkija | Tarkastaja  Päivi Karjalainen-Roikonen Asiakaspäällikkö | Hyväksyjä  Pentti Kauppinen Teknologiapäällikkö | | |
| VTT:n yhteystiedot | | | | |
| Jakelu (asiakkaat ja VTT) | | | | |
| <i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i> | | | | |

Alkusanat

Projekti toteutettiin julkisena tutkimusprojektina osana TEKES:in tutkimusohjelmaa ”NewPro – Uusiutuva metalliteknologia – uudet tuotteet” vuosina 2007–2009.

Tutkimusosapuolina projektissa olivat VTT (Materiaalien käytettävyys ja elinikä) ja Oulun Yliopisto (Konetekniikan osasto, Materiaalitekniikan laboratorio). Yritysosapuolina olivat Outokumpu Stainless Oy (Tornio Works), Obas Oy, Andritz Oy ja Laserplus Oy.

Projektin johtoryhmään kuuluivat Seppo Lantto (aiemmin Minna Sellman), Outokumpu Stainless Oy (puheenjohtaja); Jouko Lassila (Metallinjalostajat ry, NewPro -ohjelman koordinaattori), Pertti Heinonen (TEKES), Janne Märsylä (Obas Oy), Petri Tarjavuori (Andritz Oy), Veli-Pekka Immonen (Laserplus Oy), Pentti Karjalainen (Oulun Yliopisto) ja Pentti Kauppinen (aiemmin Liisa Heikinheimo), VTT.

Tämä raportti on projektin yhteenveto- ja loppuraportti, sekä VTT:n tulosten tekninen loppuraportti. Oulun Yliopiston tulokset on lisäksi erikseen raportoitu yksityiskohtaisesti lähteessä [14].

Tekijät esittävät kiitoksensa johtoryhmälle ja projektin rahoittajille.

Espoo 21.12.2009

Tekijät

Sisällysluettelo

| | |
|--|----|
| Alkusanat..... | 2 |
| 1 Johdanto..... | 4 |
| 2 Tavoitteet..... | 8 |
| 3 Materiaalit..... | 8 |
| 4 Koeohjelma ja koemenetelmät | 9 |
| 4.1 Hitsauskokeet | 9 |
| 4.2 Hitsausliitosten rikkovan testauksen kokeet..... | 11 |
| 4.2.1 Poikittaiset vetokokeet | 11 |
| 4.2.2 Kovuusmittaukset..... | 12 |
| 4.2.3 Minisauvakokeet – Aramis-monitorointi | 12 |
| 4.3 Hitsien jäähtymisaikamittaukset | 14 |
| 4.3.1 Laserhitsit..... | 14 |
| 4.3.2 MAG -kaarihitsit | 15 |
| 4.4 Uunihehkutuskokeet ja termiset (Gleeble) simulointikokeet | 15 |
| 4.5 Hehkutettujen ja simuloitujen näytteiden rikkovat kokeet ja mikrorakennetarkastelut..... | 16 |
| 4.6 Yritysesimerkki: Obas-case..... | 16 |
| 4.7 Mis-match -liitosten numeerinen mallinnus | 17 |
| 5 Tulokset..... | 19 |
| 5.1 Hitsausliitosten rikkovat kokeet..... | 19 |
| 5.1.1 Poikittaiset vetokokeet | 19 |
| 5.1.2 Kovuuskokeet | 21 |
| 5.1.3 Aramis-mittaus- ja monitorointikokeet | 25 |
| 5.1.4 Hitsin jäähtymisaikamittaukset | 28 |
| 5.2 Termiset simulointikokeet | 35 |
| 5.3 Mis-match -ilmiön numeerinen mallinnus | 35 |
| 5.3.1 Yritysesimerkki: säiliöpäädyn ja -rungon liitoshitsi | 35 |
| 5.3.2 Mis-match -lähtöiset FAD (Failure Assessment Diagram) -käyrät..... | 38 |
| 6 Tulosten tarkastelu | 42 |
| 7 Yhteenveto ja johtopäätökset | 49 |
| 8 Tulevaisuuden tutkimustarpeita | 51 |
| Lähdeviitteet | 53 |
| Lähdeviitteet | 53 |

1 Johdanto

Austeniittiset ruostumattomat teräkset soveltuvat hyvän hitsattavuutensa ja korroosionkestonsa ansiosta mainiosti vaativiin käyttökohteisiin. Lujuus hehketetussa tilassa on kuitenkin vaatimaton, mikä on heikkous ajatellen käytettävyyttä rakennemateriaalina. Muokkaamalla lujitetut austeniittiset teräkset tarjoavat täten ihanteellisen materiaaliominaisuusprofiilin kuormaa kantaviin rakenteisiin: korkean lujuuden ja hyvän sitkeyden yhdistyneenä erinomaiseen muodonmuutoskykyyn.

Hitsattujen konstruktioiden rakenteellistä eheyttä arvioivat numeeriset menetelmät nojautuvat tavallisesti oletukseen, että hitsausliitos on materiaaliominaisuuksiltaan yhtäläinen ja likipitään 'tasaluja' perusaineen kanssa. Tällöin hitsausliitoksen olemassaolo merkitsee ensisijassa (i) mahdollisten *hitsausvirheiden*, (ii) *hitsausjäännösjännitysten*, sekä rakennegeometriasta aiheutuvien (iii) *jännityskonsentraatioiden* läsnäoloa, joiden vaikutus tulee laskennallisesti arvioida mahdollisimman realistisesti rakenteellista eheyttä tarkasteltaessa.

Edellä esitetty tilanne monimutkaistuu, mikäli hitsausliitos ei todellisuudessa ole 'tasaluja', vaan sisältää lujuudeltaan perusaineesta poikkeavia, paikallisia yli- ja/tai alilujia vyöhykkeitä. Muokkaamalla lujitetun austeniittisen ruostumattoman teräksen hitsausliitoksissa paikallinen alilujuus liittyy yleensä kylmämuokkaamalla lujitetun mikrorakenteen pehmenemiseen hitsauslämmön vaikutuksesta, ts. lujuuden alenemiseen (muokkauksen vaikutusten relaxoituessa) kohti pehmeäsihehketetun tilan lujuutta. Jotta muokkaamalla lujitetun austeniittisen teräksen erinomaiset lujuus- ja sitkeysominaisuudet voidaan täysipainoisesti hyödyntää sekä rakennesuunnittelussa että hitsaavassa valmistuksessa, tulee hitsauksen materiaalissa aiheuttamat mikrorakennemuutokset ja niistä syntyvien paikallisesti pehmenneiden, alilujien vyöhykkeiden vaikutukset rakenteelliseen lujuuskäyttäytymiseen tuntea.

Paikallisia yli- ja/tai alilujia vyöhykkeitä sisältävien hitsausliitosten rakennelujuus- takasteluissa tulee arvioida, missä määrin ulkoinen kuormitus aiheuttaa *jännitysten* (linearis-elastinen kuormitus) ja *paikallisten muodonmuutosten* (elastis-plastinen kuormitustilanne) epäsymmetrisen, epälineaarisen jakautumisen hitsausliitoksessa. *Epäsymmetriset jännityskentät* ja *epäsymmetriset paikalliset deformaatiot* voivat suuresti vaikuttaa murtuman ydintymis- ja etenemisolosuhteisiin, ja näin myös hitsatun liitoksen ja rakenneosan lopullisen vaurion luonteeseen. Tällaisissa olosuhteissa ei varsinaisen murtuman ydintyminen välttämättä tapahdukaan alkusärön kohdalla, vaan toisaalla läheisessä mikrorakenteessa, jollakin kriittisellä etäisyydellä alkuvaiheesta. Samaten murtuman kasvumeکانismi ja -suunta voivat vaihdella yllättävästikin, riippuen mm. mis-match -asteesta, vyöhykkeiden keskinäisestä sijainnista, vyöhykkeiden dimensioista ja niiden paikallisista lujuus- ja sitkeysominaisuuksista.

Hitsausliitoksessa vallitseva lujuuden mis-match -tila voidaan kvantitatiivisesti kuvata mis-match -indeksillä M , joka määrittää seuraavasti [1,3]:

$$M = (\sigma_{(local)} / \sigma_{(BM)}) \quad (1)$$

missä $\sigma_{(local)}$ on paikallisen vyöhykeen myötölujuus ja $\sigma_{(BM)}$ on perusaineen myötölujuus. Nähdään, että 'tasalujan' liitoksen tapauksessa $M = 1$; mikäli kyseessä on aliluja vyöhyke $M < 1$ ja ylilujan vyöhykeen tapauksessa taas $M > 1$. On syytä korostaa että määriteltäessä mis-match -astetta M laskennallisesti tai kokeellisesti on kyse nimenomaisesti eri vyöhykkeiden, hitsiaineen tai HAZ:n, *todellisten lujuusominaisuuksien* vertailusta kyseisessä hitsausliitoksessa, suhteessa perusaineen todelliseen lujuuteen – ei siis perusaineen nimellislujuuteen tai lisäaineen lujuusluokkaan.

Mis-match -tutkimusta ajavana voimana on ollut oivallus [1-3] materiaalin *murtumissitkeyden* ja *lujuusominaisuuksien* välisestä vuorovaikutuksesta lopullisen vaurion kehittämisessä ulkoisesti kuoritetussa systeemissä, jossa hitsattu liitos sisältää yli- tai alilujia paikallisia vyöhykkeitä. Tämä merkitsee sitä, ettei pelkkä paikallisten sitkeysominaisuuksien määrittäminen enää ole riittävä kuvaamaan materiaalin vauriokäyttäytymistä tällaisessa epähomogeenisessa systeemissä, ellei samanaikaisesti ole käytettävissä tietoa materiaalin epähomogeenisten vyöhykkeiden – sekä tarkasteltavan että sitä ympäröivien vyöhykkeiden – lujuusominaisuuksista. Sekä kokeellisesti että laskennallisesti on voitu osoittaa, että epähomogeenisessa materiaalisysteemissä voi tietyn hitsatun liitoksen hitsiaineen tai HAZ:n mikrorakenteen näennäinen murtumissitkeys-käyttäytyminen (apparent fracture toughness) dramaattisesti muuttua vain siksi, että viereisen mikrorakenteen lujuusominaisuudet muuttuvat [2,3].

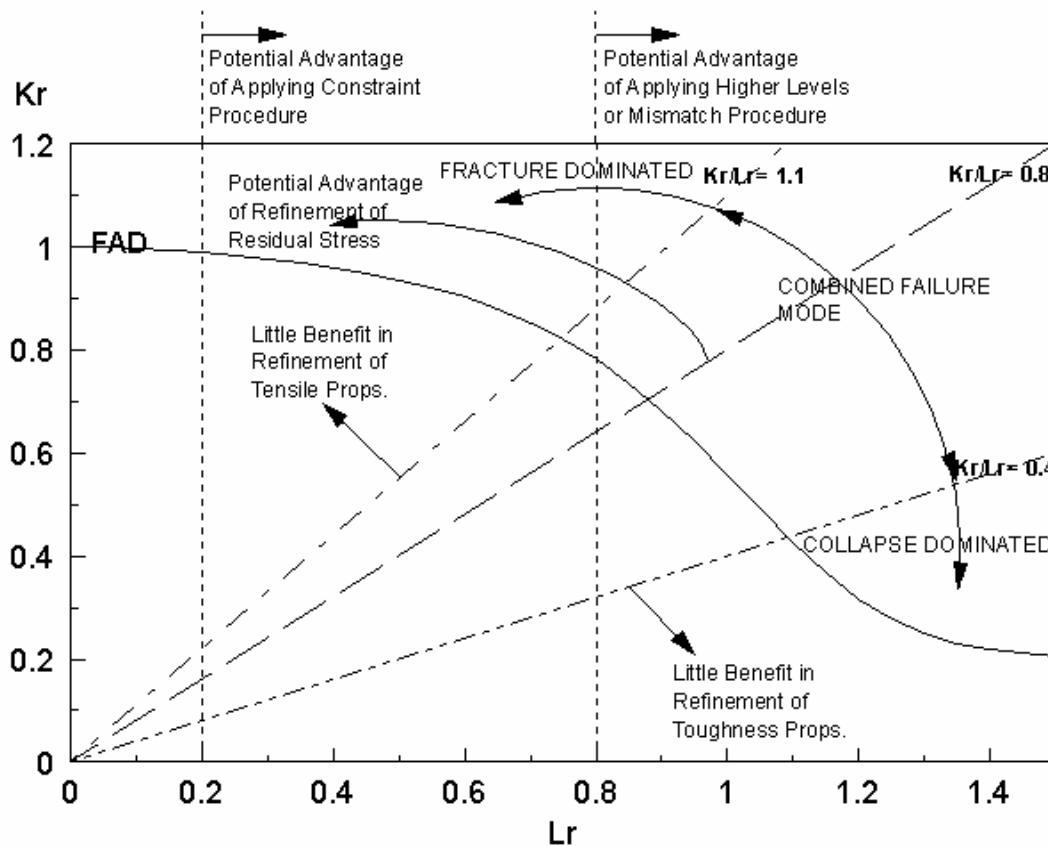
Staattisesti kuormitetun rakenteen tapauksissa keskeinen paikallisesti alilujan vyöhykeen vaikutusta lujuuden alenemiseen karakterisoiva parametri on perinteisesti ollut ko. *vyöhykkeen leveys* suhteessa rakenneosan *aineenpaksuuteen* (levynpaksuuteen tai seinämänpaksuuteen), eli nk. H_0/t -suhde [4]. Valtaosa koeaineistosta ja kirjallisuudesta [4-6] pohjautuu CMn-rakenneteräksillä ja lujilla rakenneteräksillä tehtyihin kuormituskokeisiin, mutta on syytä oletta että periaatteessa sama H_0/t -parametri kuvaisi ilmiötä myös ruostumattomissa teräksissä – toki kriittiset raja-arvot olisivat erilaiset johtuen erilaisesta muokkaus-lujittumiskäyttäytymisestä.

Mis-match -tilan ja sen vaikutusten analysointi on ohuen austeniittisen ruostumattoman teräksen kohdalla edellä esitettyä yksinkertaisempaa, lähinnä kahdesta syystä:

- (i) Austeniittisen ruostumattoman teräksen mikrorakenne ei koe kiinteän tilan faasitransformaatiota eikä näin ollen karkene hitsin jäätyessä. Täten hitsausliitokseen ei muodostu ylilujia, halkeamaherkkiä vyöhykkeitä, ja mis-match -tila pelkistyy alilujuustapauksiin.
- (ii) Lohkomurtumamekanismilla tapahtuva haurasmurtuma ei austeniittisessä (p.k.k.-hila) mikrorakenteessa ole mahdollinen. Ohut aineenpaksuus ei myöskään mahdollista merkittävässä määrin sitkeää särönkasvua. Tällöin murtumissitkeysikäytymisen merkitys mis-match -analyysin näkökulmasta vähenee suhteessa lujuuskäyttäytymiseen, minkä johdosta ohuen levyn *sitkeän murtuman tapauksiin* voidaan pääsääntöisesti soveltaa rajakuormatarkasteluja (limit load analysis) [1-3,7].

Eräät kehittyneet rakenteellisen eheyden arviointimenetelmistä tarjoavat erillisen mis-match -option, jota voidaan käyttää esimerkiksi silloin kun lujuuden mis-match -aste on siinä määrin suuri, että sen on aiheutta odottaa vaikuttavan rakenteelliseen käyttäytymiseen. Eräitä tällaisia 'state-of-the-art'-insinöörimenetelmiä ovat yhteiseurooppalaiset 'SINTAP' [1] ja 'FITNET' -proseduurit [8]; niissä mis-match -option käyttö tulee mielekkääksi ja siten suositeltavaksi, kun myötölujuuden mis-match on suurempi kuin 10 % - ts. $M > 1,10$ tai $M < 0,90$ [1,8]. Kuormitustietoina tarvitaan eri materiaalien/vyöhykkeiden myötö- ja murtolujuudet sekä plastisen luhistumisen rajakuorma (yield limit load, yield load solutions). Materiaalitietoina tarvitaan eri materiaalien/vyöhykkeiden muokkauslujittumiseksponentit joko estimoituina myötö-murtolujuussuhteesta tai määritettynä vetokokeesta (so. todellinen jännitys-venymäkäyrä), murtumissitkeys K_{mat} kaikille eri vyöhykkeille, sekä mieluummin myös mitatut todelliset jännitys-venymäkäyrät jolloin mis-match -tarkastelu voidaan perustaa todellisiin lujuus- ja muokkauslujittumisominaisuuksiin [1,8].

SINTAPin [1] mukaista mis-match -modifioitua kuormitettavuusrajakäyrädiagrammia (Failure Assessment Diagram, FAD) havainnollistetaan Kuvassa 1.



Kuva 1 – SINTAP-proseduurin [1] mukainen 'kuormitettavuusrajakäyrädiagrammi' eli "Failure Assessment Diagram, FAD" – lähtötietojen tarkkuuden, hitsausjäännösjännitysten ja mis-match -asteen vaikutukset rakenteen kuormankantokykyyn, sekä hauraan murtuman (K_r) ja plastisen luhistumisen (L_r) esiintymisen todennäköisyyteen.

SINTAP ja FITNET –proseduurien [1,8] mukaisissa FAD –tarkasteluissa: L_r = käytetty jännitys / plastisen myötämisen aiheuttava jännitys, K_r = käytetty lineaaris-elastinen jännitysintensiiviteettitekijä / materiaalin murtumissitkeys K_{mat} . Tarkasteltaessa kuormitustilannetta FAD-käyrästä voidaan sanoa että kuormitustapaukset joissa K_r on suuri, L_r pieni ja $K_r / L_r \geq 1.1$ ovat (hauras)murtumakontroloituja, kun taas kuormitustapaukset joissa K_r on pieni, L_r suuri ja $K_r / L_r \leq 0.4$ ovat plastisen luhistumisen kontrolloimia. Välialueella $0.4 < K_r / L_r < 1.1$ voi vaurioitumismekanismi olla edellisten yhdistelmä, esimerkiksi huomattava sitkeä särönkasvu jota seuraa haurasmurtuma, tai paikallinen hauras pop-in -murtuma jonka jälkeen jatkuu sitkeä särönkasvu [1].

Kuvassa 1 on mis-match -tapauksille modifioitu FAD-käyrän ’loppuosaa’ (oikea kulma jossa L_r on suuri ja K_r matala) – ts. osaa jossa plastinen venymä ja sitkeä käyttäytyminen dominoivat – siten, että käyrä ulottuu yli avon $L_r = 1$ (plastic collapse) sisältäen useita käyriä, joilla on oma muokkauslujittumiseksponentti, ts. käytetään hyväksi muokkauslujittumisen vaikutus analyysissä. Jos tarkasteltava tapaus sijaitsee FAD-käyrän sisällä, ei luhistumista pitäisi tapahtua, jos taas ulkopuolella, rakenne tulee luhistumaan. Kuormitustapauksille joilla $L_r > 0.8$, on rakenteellisen eheyden analyysin tarkkuuden kannalta hyödyllistä käyttää mis-match -optiota, ts. ottaa mis-match -ilmiö huomioon rakennetarkastelussa [1].

Edellä esitetyn perusteella on ilmeistä, että paikallisia alilujia vyöhykkeitä sisältävien mis-match -hitsausliitosten rakenteellisen eheyden arviointi edellyttää erityisesti jännitystila- ja kuormitusratkaisujen, sekä tarvittavien materiaaliparametrien osalta selvästi enemmän lähtötietoja, kuin ’tasalujien’ hitsien tarkastelut. Erityisesti on tiedettävä, mitä kuormitusratkaisuja ja materiaaliparametreja kulloinkin tarvitaan, miltä hitsatun liitoksen vyöhykkeiltä lujuudeltaan ja sitkeydeltään perusaineesta eniten poikkeavat lähtöarvot ovat saatavissa, ja mitkä ovat em. vyöhykkeiden todelliset dimensiot (ensisijassa leveys) tarkasteltavassa liitoksessa.

Mis-match -ilmiön merkityksen korostumiseen ja vaikutusten ymmärtämiseen ovat vaikuttaneet yhtäällä intensiivinen teräskehitystyö erityisesti lujitettujen teräslaatujen ja teräksen valmistusprosessien optimoinnissa, rakenteellista eheyttä tarkastelevien arviointimenetelmien ja numeeristen mallinnus- ja laskentamenetelmien kehittyminen yhä vaativampia tarkasteluja ja laskentasovelluksia mahdollistaviksi, sekä yleistyvää suuntaus rakenteiden kuormankantokyvyn optimoimiseksi ja hyötykuormien kasvattamiseksi yhä lähemmäs rakenteen kuormankantokyvyn luonnollisia rajoja. Nämä kehitystrendit ovat sekä luoneet mahdollisuudet ja työkalut mis-match -ilmiön tutkimukselle, että tehneet siitä yhä tärkeämmän arvioitaessa ilmiön vaikutusta vaativissa olosuhteissa operoivien, kuormaa kantavien hitsattujen rakenteiden rakenteelliseen eheyteen. Rakennesuunnittelusta ja hitsaavasta valmistuksesta vastaavien tahojen tulee kyetä kvantitatiivisesti arvioimaan hitsausliitoksen alilujien vyöhykkeiden vaikutus rakenteelliseen lujuuteen, jotta suunnittelu on vallitseviin ulkoisiin kuormituksiin ja käyttöolosuhteisiin nähden kestäväällä pohjalla.

2 Tavoitteet

Projektin tavoitteena oli mallintaa eräiden kylmävalssaamalla lujitettujen austeniittisen ruostumattomien teräslaatuojen sekä yhden kuumavalssatun duplex-teräksen hitsausliitoksen lujuus ja vauriokäyttäytyminen staattisen kuormituksen alaisena. Tätä tarkoitusta varten asetettiin osatavoitteiksi: (i) kehittää kokeellisia rikkovan testauksen menetelmiä hitsatun liitoksen eri vyöhykkeiden materiaalikäyttäytymiseen, sekä (ii) kehittää numeerisia menetelmiä ja työkaluja alilujia vyöhykkeitä sisältävän hitsausliitoksen ja edelleen hitsatun rakenneosan vauriokäyttäytymisen arviointiin. Termisesti simuloiden, hitsauskokein, ainetta rikkovin piensauvakokein ja numeerisen simuloinnin ja rakennemallinnuksen keinoin tutkittiin lämpösyklin vaikutusta teräksen mikrorakennemuutoksiin ja tämän seurauksena syntyvien, paikallisesti alilujien vyöhykkeiden merkitystä hitsatun rakenneosan lujuuteen, kuormankantokykyyn ja vikaantumiseen ulkoisen kuormituksen alaisena.

Kokeellinen materiaalikarakterisointi ja numeerinen mallinnus yhdistäen tehdään arvioita hitsatun liitoksen vauriotumiskäyttäytymistä. Saatujen tulosten pohjalta pyritään luomaan numeerisia mallinnustyökaluja, joita käyttäen voidaan määrittää realistiset mitoituskäytännöt lujitetuista teräksistä valmistettaville hitsatuille rakenteille siten, ettei paikallisen alilujan vyöhykkeen läsnäolo vaaranna mitoituksen pohjaksi otettua, tavoiteltua rakenteellista lujuutta ja kuormankantokykyä.

3 Materiaalit

Tutkittavina materiaaleina oli valikoima kylmävalssaamalla lujitettuja austeniittisiä ruostumattomia teräslajeja otimitustiloissa 2B (pehmeäksi hehkutettu ja viimeistelyvalssattu), C850 (kylmämuokattu yli 850 MPa murtolujuuteen) ja C1000 (kylmämuokattu yli 1000 MPa murtolujuuteen), sekä toimitustilassaan austeniittisiä laatuja lujempi ruostumaton duplex-teräs.

Projektin päämateriaali oli EN 1.4318 (AISI 301LN), jolle tehtiin kattavin hitsaus- ja testauskoeohjelma. Muut materiaalit olivat EN 1.4301 (AISI 304), EN 1.4404 (AISI 316L) ja EN 1.4162 (LDX 2101). Materiaalien erilaisia lujuustasoja otettiin mukaan kolme: pehmeä 2B sekä lujitusvalssatut n. C850 ja C1000. Kaikki em. lujuustasot olivat käytössä 1.4318:lla; sitä vastoin 1.4301:lla mukana on vain 2B ja C850 ja ja 1.4404:llä vain C850. Kaikkia materiaaleja pyrittiin ensisijassa saamaan 5 mm paksuisina. Tästä jouduttiin kuitenkin joustamaan 1.4404 C850-materiaalin osalta, sillä riittävän lujuuden saavuttamiseksi jouduttiin tekemään ylimääräinen kylmävalssauspisto, jonka seurauksena paksuudeksi jäi vain 4,5 mm. Em. poikkeamasta seuraavan sauvakokeefektin aiheuttamat muutokset koetuloksissa voidaan kuitenkin tarvittaessa korjata laskennallisesti analysointivaiheessa. Saatavuusongelmien vuoksi duplex-terästä 1.4162 käytettiin muista poiketen kuumavalssatussa 1D-tilassa.

Projektissa käytettyjen koemateriaalien tyypilliset koostumukset on esitetty Taulukossa 1 ja mekaaniset ominaisuudet eri toimitustiloissa Taulukossa 2.

Taulukko 1 – Koemateriaalien tyypilliset koostumukset valmistajan ilmoittamina.

[Outokumpu. Steel Grades, Properties and Global Standards. 2009. URL:

<http://www.outokumpu.com/applications/documents/start.asp>. Viitattu 23.10.2009]

| Teräslaji | | Tyypillinen koostumus (p-%) | | | | | |
|-----------|----------|-----------------------------|------|------|------|-----|------|
| EN | ASTM/UNS | C | N | Cr | Ni | Mo | muut |
| 1.4318 | 301LN | 0,02 | 0,14 | 17,7 | 6,5 | – | – |
| 1.4301 | 304 | 0,04 | – | 18,1 | 8,1 | – | – |
| 1.4404 | 316L | 0,02 | – | 17,2 | 10,1 | 2,1 | – |
| 1.4162 | S32101 | 0,03 | 0,22 | 21,5 | 1,5 | 0,3 | 5 Mn |
| 1.4462 | S32205 | 0,02 | 0,17 | 22 | 5,7 | 3,1 | – |

Taulukko 2 – Yhteenveto projektin koemateriaalien toimitustiloista ja lujuudesta (TR = temper rolled, Cxxx = teräksen minimimurtolujuus).

| Teräslaji | Toimitustila | Paksuus (mm) | Myötölujuus (MPa) | Murtolujuus (MPa) |
|-----------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|
| 1.4301 | 2B | 5 | 317 | 636 |
| 1.4301 | TR C850 | 5 | 676 | 867 |
| 1.4318 | 2B | 5 | 383 | 743 |
| 1.4318 | TR C850 | 5 | 687 | 987 |
| 1.4318 | TR C1000 | 5 | 708 | 1046 |
| 1.4404 | TR C850 | 4,5 | 801 | 939 |
| 1.4162 | 1D | 5 | 574 | 751 |

4 Koeohjelma ja koemenetelmät

Projektissa tutkittiin termisesti simuloiden, ainettarikkovin piensauvakokein ja laskennallisesti hitsauksen lämpösyklin vaikutusta teräksen mikrorakenne-muutoksiin, sekä näiden seurauksena syntyvien, paikallisesti alilujien hitsin vyöhykkeiden merkitystä ulkoisesti kuormitetun hitsatun rakenteen lujuuteen, kuormankantokykyyn ja vauriokäyttäytymiseen.

4.1 Hitsauskokeet

Koemateriaaleille hitsattiin MAG-prosessilla päittäisliitoksia erityyppisillä lisäaineilla: pehmeää perusainetta (2B) vastaava aliluja austeniittinen, luja duplex ja luja supermartensiittinen. Lisäksi hitsattiin yksi perusaineen toimitustila C850 kolmella eri lämmöntuonnilla: (i) mahdollisimman alhainen, (ii) keskimääräinen, tuotannon soveltuva, ja (iii) aineenpaksuuteen nähden huomattavan korkea. Vertailun vuoksi pyrittiin laserhitsauksessa korkealaatuisten ja toisatettavien liitosten valmistamiseen, mikä saatiin – menetelmälle tyypillisesti – aikaan kaarihitsausta huomattavasti pienemmällä lämmöntuonnilla.

Hitsauskokeissa käytetyt lisäaineet koostumuksineen ja nimellislujuuksineen on esitetty Taulukossa 3.

Liitoksista irrotettiin koesauvat rikkovan testauksen kokeisiin. Koeliitokset suunniteltiin hitsattavaksi valssaussuuntaan, jolloin hitsien poikittaiset vetokokeet ovat myös poikittain valssaussuuntaan nähden, mikä huomioitiin myös hitsattavien koekappaleiden leikkauksessa. Koekappaleet irrotettiin levyaihiosta laserleikkaamalla. Oulun yliopistolle toimitetut vetokoesauvat leikattiin valmiiksi Gleeble –simulointilaitteiston edellyttämien mittojen mukaisiksi.

Hitsauslisäaineina pyrittiin käyttämään pääasiassa ruostumattomalle teräkselle normaalisti tuotannossa käytettäviä laatuja: 1.4301:lle, 1.4318:lle ja 1.4404:lle 308LSi-tyyppistä, ja 1.4162:lle sekä LDX- että 2205-lisäainetta. On huomattava, että 308LSi ei ole 1.4404-tyyppiselle perusaineelle sovelias valinta korroosioominaisuuksien puutteiden vuoksi, mutta tässä koeohjelmassa keskityttiin vain mekaanisiin ominaisuuksiin eikä korroosioikäytymiseen kiinnitetty huomiota. Lisäksi C850-lujuusluokan 1.4318:lle käytettiin martensiittista ruostumatonta OK 15.55 ja 2205 -tyypin duplex -lisäainetta. Käytetyt lisäaineet olivat Ø 1,0 tai Ø 1,2 mm umpilankoja, lukuun ottamatta OK 15.55:ä, jota oli saatavana vain Ø 1,2 mm täytelankana. Lämmöntuonnin minimoimiseksi laserhitsaukset tehtiin ilman lisäainetta, myös 1.4162:lle, vaikka se ei metallurgiselta kannalta mielekäästä olekaan (lähinnä hyvin ferriittisvaltaisen hitsiaineen huonon korroosionkestävyyden vuoksi).

Taulukko 3 – Hitsauskokeissa käytetyt lisäaineet, niiden koostumukset ja lujuusarvot valmistajien ilmoittamina.

| Tunnus | Tyyppi EN | Koostumus (p-%) | | | | | | | Lujuus | |
|------------------------|--------------|-----------------|-----|-----|------|------|-------|-------|-------------------|----------------|
| | | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | N | R _{p0.2} | R _m |
| OK 308LSi | G 19 9 LSi | <0,03 | 0,8 | 1,8 | 20,3 | 10,0 | < 0,3 | - | 370 | 620 |
| Avesta LDX 2101 | - | 0,02 | 0,4 | 0,5 | 23,0 | 7,0 | > 0,5 | 0,14 | 520 | 710 |
| Avesta 2205 | T 22 9 3 N | 0,02 | 0,5 | 1,6 | 23,0 | 8,5 | 3,1 | 0,17 | 550 | 770 |
| OK 15.55 | - | <0,01 | 0,4 | 1,8 | 12,5 | 6,7 | 2,5 | <0,01 | 700-850 | 950-1050 |

Koeohjelma aloitettiin hitsaamalla ja testaamalla esikokein duplex-teräksiä 1.4162 (LDX 2101) ja 1.4462 (2205). Tavoitteena oli selvittää nopealla koesarjalla materiaalien pehmenemistäipumusta hitsattaessa. Kokeissa käytettiin lopullista koeohjelmaa ohuempia, 3 mm paksuja levyjä ja koehitsit tehtiin yhdeltä puolen I-railoon. Lisäaineina käytettiin sekä molempien ”omaa” (so. lujuudeltaan matching), että 1.4162:lle myös ’yliseostettua’ 2205 -tyypin lisäainetta. On huomattava, että vaikka LDX 2101 -lisäaineen kaupan nimi antaa olettaa sen olevan perusaineen 1.4162 kaltainen, tämä pätee vain hitsiaineen lujuuteen. Koostumukseltaan tämä lisäaine on huomattavasti lähempänä ”perinteistä” duplexia 1.4462 ja sen lisäainetta 2205. Vetokokeiden lisäksi liitosten yli mitattiin kovuusprofiilit.

Varsinaiset koeohjelman mukaiset MAG- ja laser-hitsauskokeet teräksille EN 1.4318 (AISI 301LN), EN 1.4301 (AISI 304), EN 1.4404 (AISI 316L) ja EN 1.4162 (lean duplex LDX 2101) tehtiin sitä mukaa, kun kokeisiin saatiin materiaalia. Projektin alussa laadittua koematriisia jouduttiin muuttamaan eritoten perusaineiden osalta niiden saatavuustilanteen mukaan. Kaarihitsauskokeet tehtiin osa-

viistettyyn X-railoon (ilmarako 1 mm, railokulma 90°) kahdelta puolen ja laserhitauskokeet yhdeltä puolen sulku-I -railoon (ts. ilman ilmarakoa). Taulukossa 4 on esitetty lopullinen, projektissa toteutettu hitsauskoeohjelma.

Taulukko 4 – Projektin hitsauskokeiden koeohjelma.

| Perusaine | Tila | Lisäaine | | Lämmöntuonti (kJ/cm) | Laserteho (kW) | Hitsausnopeus (m/min) |
|-----------|-------|----------|-----|-------------------------|-------------------|--------------------------|
| | | tyyppi | ø | | | |
| 1.4318 | 2B | 308LSi | 1,0 | 3,3 | - | 0,65 |
| | 2B | - | - | - | 3 | 0,80 |
| | C850 | 308LSi | 1,0 | 2,4 | - | 0,77 |
| | C850 | 308LSi | 1,0 | 3,3 | - | 0,65 |
| | C850 | 308LSi | 1,2 | 4,8 | - | 0,75 |
| | C850 | 2205 | 1,0 | 3,3 | - | 0,65 |
| | C850 | OK 15.55 | 1,2 | 4,0 | - | 0,65 |
| | C850 | - | - | - | 3 | - |
| | C1000 | 308LSi | 1,0 | 3,3 | - | 0,65 |
| | C1000 | - | - | - | 3 | 0,65 – 0,7 |
| 1.4301 | 2B | 308LSi | 1,0 | 3,3 | - | 0,65 |
| | C850 | 308LSi | 1,0 | 3,3 | - | 0,65 |
| | C850 | - | - | - | 3 | 0,60 |
| 1.4404 | C850 | 308LSi | 1,0 | 3,3 | - | 0,65 |
| | C850 | - | - | - | 3 | 0,70 |
| 1.4162 | 1D | LDX 2101 | 1,0 | 4,2 | - | 0,65 |
| | 1D | 2205 | 1,0 | 4,2 | - | 0,65 |
| | 1D | - | - | - | 3 | - |

MAG -kaarihitsatuille liitoksille tehtiin laaja kirjo erilaisia rikkovan testauksen aineenkoetuskokeita; laserhitausliitosten osalta rikkovia kokeita tehtiin edellistä suppeamassa määrin, kts. Luvu 4.2 ja 4.3.

4.2 Hitsausliitosten rikkovan testauksen kokeet

Hitsausliitoksille tehtiin (i) standardin mukaiset hitsin poikittaiset vetokokeet, (ii) kovuusmittaukset, sekä (iii) minilattasauvoin toteutettuja hitsin eri vyöhykkeiden lujuusominaisuuksia mittaavia vetokokeita.

4.2.1 Poikittaiset vetokokeet

Hitsatuille levynäytteille tehtiin standardin SFS-EN 895 mukaiset poikittaiset vetokokeet Outokumpu Oy:n laboratoriossa Torniossa. Kaikki hitsatut liitokset testattiin hitsikuvut poiskoneistettuina ja kustakin näytteestä tehtiin kaksi toistokoeita. Vetokokeissa määritettiin sauvojen kimmomoduuli E , myötölujuudet $R_{p0,1}$, $R_{p0,2}$ ja $R_{p1,0}$, murtolujuus R_m , murtovenymät A_g ja $A50$, sekä silmämääräisesti murtuman paikka. Perusaineen ominaisuuksia ei testattu, vaan niiden osalta käytettiin ainestodistuksia ja tarvittaessa niiden pohjana käytettyjen aineenkoetuskokeiden tuloksia.

Hitsauslisäaineina pyrittiin käyttämään pääasiassa normaalisti hitsaavassa tuotannossa käytettäviä laatuja: 1.4301:lle, 1.4318:lle ja 1.4404:lle 308LSi -tyyppistä ja 1.4162:lle LDX -tyyppistä lisäainetta. Lisäksi lujalle C850-luokan 1.4318-teräkselle käytettiin martensiittista ruostumatonta OK 15.55- ja duplex-tyyppistä

2205-lisäaineita. Käytetyt lisäaineet olivat halkaisijaltaan 1,0 tai 1,2 mm paksuja umpilankoja, lukuun ottamatta lisäainetta OK 15.55, jota oli saatavissa ainoastaan Ø 1,2 mm täytelankana. Laserhitsaukset tehtiin ilman lisäainetta – myös 1.4162-teräkselle, vaikka se ei metallurgiselta kannalta olekaan mielekäästä.

4.2.2 Kovuusmittaukset

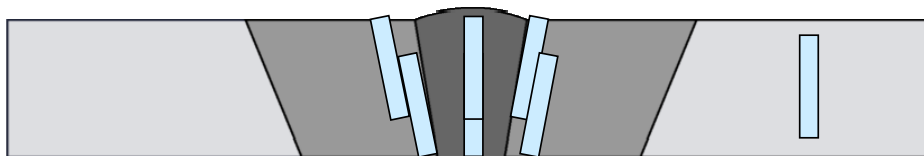
Hitsatuista näytteistä valmistettiin makrohieet, jotka valokuvattiin ja joita käytettiin kovuusmittauksissa. Kovuudet määritettiin sekä makrokovuusmittauksina (HV1) että instrumentoituina nano- ja mikrokovuusmittauksina (HV0,3). Jälkimmäisten tarkoituksena oli tutkia menetelmien soveltuvuutta paitsi pienten yksityiskohtien kovuusmittauksiin, myös mikrorakenteiden mekaanisten ominaisuuksien (lujuus ja kimmomoduuli) määrittämiseen.

Hitsin eri vyöhykkeiden mekaanisten ominaisuuksien määrittäminen kovuusmittauksin on erityisen hyödyllistä ajatellen monifaasisen materiaalin (kuten duplex - teräs) eri faasien ominaisuuksia, sekä erittäin kapeiden sädehitsien liitosten ominaisuuksia karakterisoitaessa. Parhaassa tapauksessa mikro- tai nanokovuusmittausten voitaisiin ajatella täydentävän, tai jopa osittain korvaavan, rikkovia aineen-koetuskokeita.

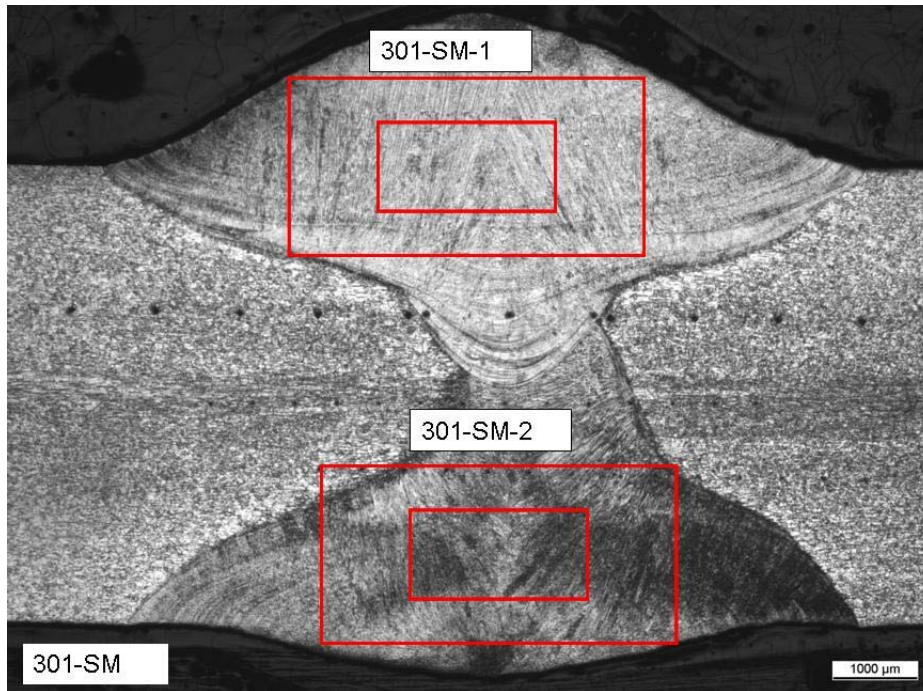
4.2.3 Minisauvakoheet – Aramis-monitorointi

Projektin keskeisiä tavoitteita oli kehittää pienten (miniatyyri) koesauvojen rikkovan testauksen tekniikoita hitsausliitoksen eri vyöhykkeiden todellisten lujuusominaisuuksien määrittämiseksi. Näitä hitsin eri vyöhykkeiltä mitattuja lujuusominaisuuksia voidaan edelleen käyttää jatkuvien ominaisuusfunttioiden muodossa numeerisen mis-match -mallinnuksen lähtötietoina.

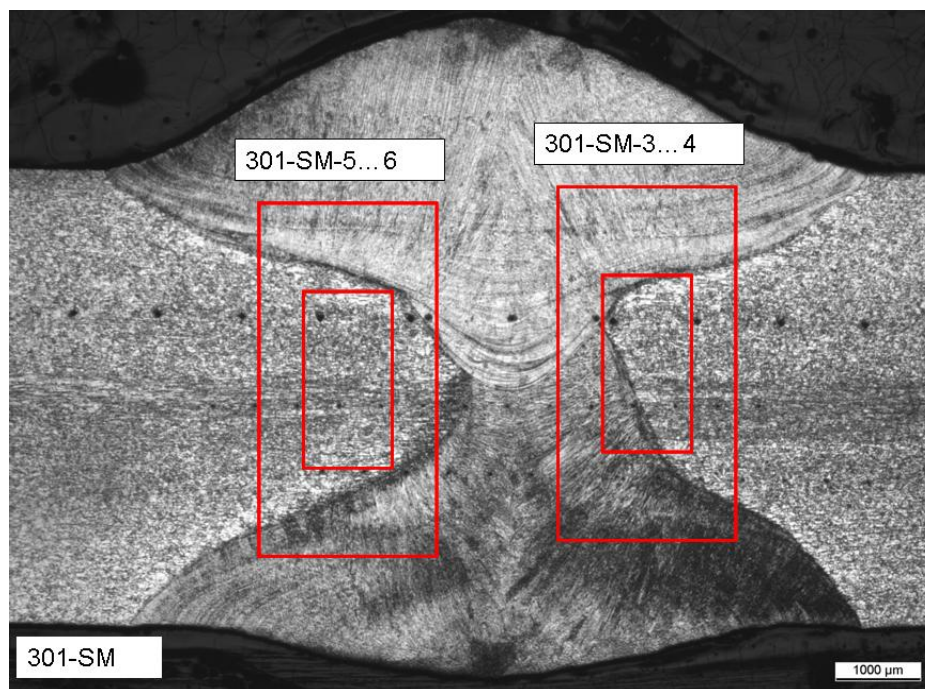
Optisen Aramis-mittaus- ja monitorointijärjestelmää käyttäen vetokokeissa monitoroitiin muodonmuutoksen lokalisoitumista (kuroutumista) vetokoe-sauvassa ja mitattiin paikallinen muodonmuutos. Kokeissa rekisteröitiin hitsatun liitoksen eri vyöhykkeiden todelliset jännitys-venymä -käyrät. Tavanomaisen lujuusinformaation (myötö- ja murtolujuus, murtovenymä, murtokurouma) lisäksi mittaustuloksista voitiin potenssisovituksin määrittää ko. materiaalin/vyöhykkeen elastis-plastista käyttäytymistä kuvaavat muokkauslujittumiseksponentit. Kuvassa 1 on skemaattisesti esitetty minilattavetosauvojen irrotuksen periaate.



Kuva 1 – Periaatekuva: minilattavetosauvojen irrotus hitsausliitoksesta.



Kuva 2a - Mittakaavakuva hitsiaineen minilattavetosauvojen irrotuksesta koeliitoksesta.



Kuva 2b – Mittakaavakuva sularajan ja HAZ:n minilattavetosauvojen irrotuksesta koeliitoksesta.

Vetokokeet tehtiin MAG -hitsatuista päittäisliitoksista irrotetuilla, $1 \times 2 \times 8 \text{ mm}^3$ minilatta-vetosauvoilla. Vetosauvat irrotettiin hitsausliitoksesta hitsin suuntaisesti liitoksen eri vyöhykkeiltä: hitsiaineesta, sularajalta ja muutosvyöhykkeestä (HAZ). Sauva-aihiot irrotettiin TKK:ssa käyttäen lankasahausta (so. kipinätyöstö).

Tavoitteena oli irrottaa koesauvat siten, että voimakkaimmat mikrorakenne-muutokset kokeneet hitsin vyöhykkeet: hitsiaine, sularaja ja sularajan viereinen HAZ:n rakeenkasvuvyöhyke tulisivat mahdollisimman kattavasti edustetuiksi.

Kuvissa 2a ja 2b on esitetty mittakaavaan piirretty esimerkki poikkipinnaltaan $1 \times 2 \text{ mm}^2$ olevan koesauvan irrottamisesta hitsiaineesta, sekä sularajalta ja HAZ:sta (sisempi suorakaide vastaa sauvan mittakaulaa ja ulompi suorakaide sauvan veto-päitä).

Hitsiaineesta irrotetut koesauvat irrotettiin sekä ensimmäiseksi hitsatulalta että jälkimmäisenä hitsatulalta railotilavuuden puolelta, täysin hitsiaineen 'sisältä' sen keskilinjalta, ks. Kuva 2a. Sularajalta irrotetuissa koesauvoissa pyrittiin maksimoimaan sularajan ja sen viereisen HAZ:n rakeenkasvuvyöhykkeen määrä sauvan mittakaulassa – silläkin seurauksella, että myös hitsiainetta poimiuutui mukaan sauvan mittakaulaan, ks. Kuva 2b oikea puoli. Muutosvyöhykkeeltä (HAZ) irrotetut sauvat pyrittiin taasen ottamaan selkeästi perusaineesta siten, ettei hitsiainetta poimiuutuisi sauvan mittakaulaan lainkaan, ks. Kuva 2b vasen puoli.

4.3 Hitsien jäähtymisaikamittaukset

Hitsin suoria jäähtymisaikamittauksia tehtiin termoelementtimittauksin sekä MAG-kaarihitseille että lasersädehitseille. Tarkoituksena on mitata hitsauksen aikainen lämpösykli hitsin lämpöhistorian karakterisoimiseksi yksiselitteisesti.

On huomattava, että vaikei hitsin $t_{8/5}$ -jäähtymisaika (jäähtymisaika 800 °C :sta 500 °C :een) sinällään olekaan merkityksellinen suure austeniittisen ruostumattoman teräksen hitsauksessa, lämpösyklimitaukset antavat käytännön työkalun eri hitsausprosessien lämpövaikutusten vertailuun mis-match -ilmiön (mm. pehmenneen vyöhykkeen leveyden) kannalta. Erityisesti laserhitsauksessa ei hitsausenergian ja lämmöntonin välistä yhteyttä pystytä laskennallisesti määrittämään kovin tarkasti, jolloin mittaus on ainoa mahdollisuus tallentaa lämpöhistoria luotettavasti.

4.3.1 Laserhitsit

Laserhitsauksessa hitsausenergian ja lämmöntonin välistä yhteyttä (so. termistä hyötysuhdetta) ei pystytä laskennallisella keinoin määrittämään kovin tarkasti, sillä kaarihitsausmenetelmistä poiketen laserhitsauksessa terminen hyötysuhde ei ole yksinomaan hitsausmenetelmäkohtainen vakio, vaan riippuu mm. laiteteknisistä seikoista, hitsausparametreista (ml. lisäaine ja suojakaasu), sekä hitsattavasta materiaalista ja sen pinnanlaadusta (esim. heijastuvuusominaisuudet).

Lämpösyklin mittaamiseksi termoelementein suoraan sulasta saatiin teknisesti onnistuneita mittaustuloksia yksinkertaisella tekniikalla, jossa mittaus tehtiin juuren puolelta I-railoon asetetuilla termoelementeillä yhdistettynä 'poikkeutettuun' hitsaukseen etäisyydellä n. 0,5–1,5 mm railon linjasta. Termoelementit hitsattiin kondensaattoripurkaushitsauksella railoon kiinni ja hitsattavat levyt puristettiin yhteen ja kiinni hitsauspöytään käyttäen erillistä puristinta. Tämän jälkeen varmistettiin levypuoliskojen kiinnipysyvyys toisissaan erillisin kiinnityshitsein.

Hitsauksessa lasertehto oli vakio 3 kW (fokus 0, hitsausnopeus 800 mm/min); koehitsit tehtiin joko ilman suojakaasua, tai käyttäen suojakaasua Mison He 30 (virtaus 20 l/min). Mittauksia tehtiin kaikkiaan 3 materiaalille: 1.4318 (301LN), 1.4162 (LDX 2101) ja 1.4301 (304). Mittauksissa rekisteröitiin jäähtymisajat: $t_{12/9}$, $t_{8/5}$ ja $t_{12/5}$. Mittausten teknisen onnistumisen kriteerina oli, että lämpösykli mittauskohdassa ylitti 1200 °C (so., elementti riittävän lähellä sularajaa) ja jäähtymiskäyrän muoto oli juohea, jatkuvana laskeva negatiivinen eksponenttifunktio.

4.3.2 MAG -kaarihitsit

MAG -kaarihitsien jäähtymisaikamittaukset tehtiin käyttäen K -tyypin (Chromel-Alumel) termoelementtiä, joita kiinnitettiin eri etäisyyksille (10, 20 ja 30 mm) hitsauslinjasta. Kokeet tehtiin sekä 'vapaille' liitoksille, että hitsauspöytään lesteillä kiinnitetyille liitoksille. Kokeissa käytetyt hitsausparametrit on esitetty Taulukossa 5.

Taulukko 5 – Lämpötila- ja jäähtymisaikamittaukset.

| Lisäaine | 16.12 | 16.12 | 16.12 | 15.55 | 2205 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| Ilmarako (mm) | 0,3 | 0,3 | 0 | 0,6 | 0,3 |
| Langan ø (mm) | 1,0 | 1,0 | 1,2 | 1,2 | 1,0 |
| Langan syöttö (m/min) | 9,5 | 9,5 | 9,0 | 7,0 | 9,5 |
| Jännite (V) | 20 | 20 | 26 | 24 | 24 |
| Virta (A) | 195 | 195 | 290 | 225 | 190 |
| Kuljetusnopeus (cm/min) | 77 | 58 | 75 | 65 | 64 |
| Q (kJ/mm) | 0,24 | 0,33 | 0,48 | 0,34 | 0,34 |

Hitsauksessa hitsausvirta oli 188–192 A, kaarijännite 20,5 V ja polttimen kuljetusnopeus 55 cm/min. Lisäaineina käytettiin umpilankoja 308LSi ja 2205 sekä supermartensiittista täytelankaa 15.55, ja suojakaasuna seoskaasu Argon + 2 % CO₂ (kaasun virtausnopeus 15 l/min).

4.4 Uunihehkutuskokeet ja termiset (Gleeble) simulointikokeet

Koemateriaaleille tehtiin Oulun Yliopistossa stationäärisiä uunihehkutuskokeita, sekä termisiä Gleeble-simulointikokeita vastaten sekä hehkutusolosuhteita että hitsauksen nopean kuumennuksen ja jatkuvan jäähtymisen olosuhteita.

Uunihehkutuskokeet tehtiin koekappaleille suolakylpyuunissa stationäärisissä olosuhteissa eri huippulämpötiloissa välillä 600–950 °C pitoaikojen vaihdella välillä 10–100 s. Lisäksi osalle näytteistä tehtiin hehkutuskokeita laboratoriosähköuunissa edellistä korkeammassa 950–1200 °C lämpötiloissa hehkutusaikojen ollessa 1500–3600 s.

Termit Gleeble-hehkutuskokeet tehtiin koekappaleille kuumentamalla niitä eri huippulämpötiloihin välillä 550–1350 °C. Kokeissa käytetty kuumennusnopeus oli 400 °C/sek, pitoaika huippulämpötilassa 1 sek ja nimellisjäähtymisnopeus (asetusarvo) 200 °C/s. Lisäksi tehtiin halkaisjaltaan 5 mm oleville vetosauvakoekappaleille termisiä simulointikokeita hitsausliitoksen HAZ:n eri vyöhykkeitä vastaaviin huippulämpötiloihin 800–1350 °C käyttäen kuumennusnopeutta 400 °C/s, 1 sek pitoaikaa huippulämpötilassa, ja jäähtymisnopeutta

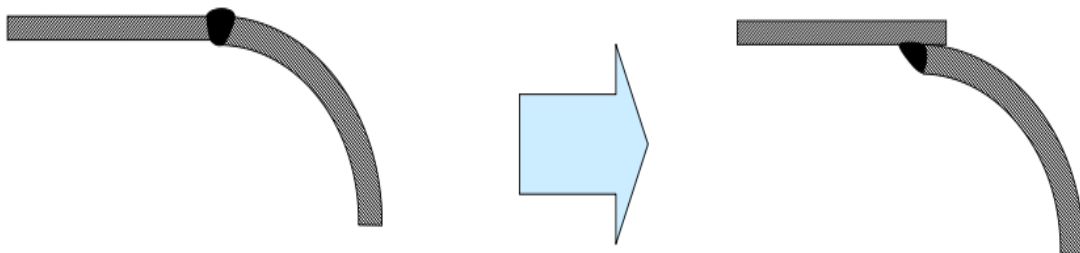
vastaten hitsin $t_{8/5}$ jäähtymisaikaa n. 18 s. Tällä haettiin vastaavuutta MAG-kaarihitsien termiseen historiaan; näissä kokeissa maksimilämmöntonulla 0,5 kJ/mm hitsatun liitoksen jäähtymisaika $t_{8/5}$ oli luokkaa 18 s, ks. Taulukko 4. Koejärjestelyt on yksityiskohtaisesti raportoitu Oulun Yliopiston erillisessä loppuraportissa [14].

4.5 Hehkutettujen ja simuloitujen näytteiden rikkovat kokeet ja mikrorakennetarkastelut

Uuunihehketuille ja Gleeble-simuloituille koekappaleille tehtiin erilaisia rikkovan testauksen kokeita, kuten Vickers -kovuusmittaukset ja vetokokeet, sekä mikrorakennetarkastelut. Näiden tuloksina määritettiin materiaalikohtaiset kovuus-lujuus ($R_{p0.2}$, R_m) -korrelaatiot, kovuus-venymä (A_5 , A_g , A_{tot}) -korrelaatiot ja kovuusprofiilit hehkutus-/huippulämpötilan funktiona (so., pehmenemiskäyttäytyminen), sekä eri faasien osuudet eri huippulämpötiloihin hehketuissa/simuloituissa mikro-rakenteissa. Pyrkimyksenä oli käyttää em. korrelaatioita edelleen mis-match -mallinnuksessa. Koejärjestelyt on yksityiskohtaisesti raportoitu Oulun Yliopiston erillisessä loppuraportissa [14].

4.6 Yritysesimerkki: Obas-case

Obas Oy:n identifioiman case -tapauksen tutkimuksessa selvitettiin rekan kuljettussäiliön muokkaamalla valmistetun päädyn ja vaipan toisiinsa liittävän kehähitsin vaihtoehtoisten liitosmuotojen vaikutusta säiliön rakennelujuuteen. Nykyisin käytetty liitosmuoto on päittäisliitos, jonka korvaaminen pienahitsatulla päällekkäisliitoksella (so., limiliitoksella) nähtiin perustelluksi mm. sovitustyön helpottamiseksi, railonvalmistuksen välttämiseksi ja täten hitsaustyön ja tuotteen läpimenoaikojen jouduttamiseksi. Kuvassa 3 on esitetty kaaviokuva nykyisessä käytössä olevasta päittäisliitoksesta sekä pienahitsattavaksi suunnitellusta päällekkäisliitoksesta.



Kuva 3 – Nykyinen päittäisliitosratkaisu (vasen) ja suunniteltu päällekkäisliitosratkaisu (oikea).

Säiliön materiaali on EN 1.4404 (AISI 316L) -terästä, joka päädyssä on pehmeästä 1D-tilasta muovauksen yhteydessä vaihtelevasti muokatussa ja vaipassa kylmämuokatussa 2H-tilassa. Säiliön mitoitus tehdään pehmeän tilan ominaisuuksien mukaan. Päittäisliitoksen railomuoto on osaviistetty V-railo (railokulma 60°), joka hitsataan yhdeltä puolen. Päällekkäisliitos suunniteltiin pienahitsattavaksi sisäpuolelta 4 mm a-mitalla.

Säiliöpäädystä säteittäin irrotetuista näytteistä mitattiin kovuudet; tarkoituksena oli identifioida kohdat joissa muokkauksen aiheuttama lujittuminen on voimakkainta. Säiliöpäädyn lujuutta arvioitiin laskennallisesti vastaavien kovuustulosten perusteella, mm. käyttäen Oulun Yliopiston Gleeble- ja uunikokeista saatuja (materiaalikohtaisia) kovuus-lujuus -korrelaatioita.

Laskentamallissa muuttujina olivat liitosmuotojen ohella säiliön sisäpuolinen paine ja pienaliitosvaihtoehdon osalta sovitusraon dimensio (limittäisyyden aste), kts. Kuva 3. Säiliön halkaisija oli 2000 mm, vaipan paksuus 3,2 mm ja pituus 4250 mm. Pädyn muoto oli DIN 28013 -standardin mukainen syväpääty (korbbogen). Säiliön sisäinen käyttöpaine vaihtelee +2 ja -0,21 barin välillä, ja koe-/suunnittelupaineena käytetään 4 baria. Säiliön tulee suurimmalla kuormallaan kulkusuunnassaan kestää $2 \times$ kokonaismassa (so., 2G), kohtisuorassa kulkusuuntaa nähden kokonaismassa (G), pystysuorassa ylöspäin kokonaismassa (G) ja pystysuorassa $2 \times$ kokonaismassa (2G). Laskelmissa käytettiin autosäiliöille arvoa $G = 200$ kN ja perävaunusäiliöille $G = 500$ kN. Säiliö kiinnitettiin kuljettavan rakenteen runkoon 300 mm päästä vaipan reunasta. Kiinnitysvanne kiersi säiliön ympäri.

Mallinnuksessa pyrittiin karakterisoimaan sekä eri liitosvaihtoehtojen rakennelujuus nykyisissä käyttöolosuhteissa, että riskirajat (pääjännitykset, von Mises -jännitykset) postuloduissa, nykyistä anakarammissa käyttöolosuhteissa (so., herkkyyksianalyysi).

4.7 Mis-match -liitosten numeerinen mallinnus

Hitsatun liitoksen/rakenneosan rakenteelliseen eheyteen ja kuormankantokykyyn vaikuttavia tekijöitä tarkasteltiin tutkituilla materiaaleilla käyttäen ”FITNET - Fitness-for-Service” -proseduuriin [8] nojautuvia, ns. FAD (Failure Assessment Diagram) -pohjaisia menetelmiä.

Rakenneosan kattavaa, numeerista FEM-mallinnusta varten olennaisia lähtötietoja ja reunaehtoja ovat:

- (i) perusaineesta eniten poikkeavien hitsin vyöhykkeiden lujuuspohjaiset materiaaliparametrit (nk. ominaisuusfunktiot)
- (ii) tutkittava liitostyyppi ja alkusäröjen sijainti, koko ja orientaatio
- (iii) rakenneosan geometria ja dimensiot (vrt. Obasin case-tapaus)
- (iv) rakenteen kannalta relevantit jäännösjännitysratkaisut
- (v) vaikuttavien (ulkoisten) kuormitusten ja rakenteessa vaikuttavien jännitysten analysointi (ml. jännityskonsentraatioparametrit)
- (vi) rakenteen potentiaalisten vauriomekanismien määrittäminen em. tekijöiden funktiona (mm. FAD)

(vii) vaikuttavien parametrien herkkyysanalyysit.

Tässä projektissa tehtävän mallinnuksen lähtökohtana oli laskea kaikille eri materiaalitapauksille tapauskohtaiset FAD:it ja vastaavien hitsausliitosten vyöhykekohtaiset rajakuormaratkaisut. Säröolettamat tehtiin tapauksille (i) särö hitsiaineessa, ja (ii) särö sularajalla/alilujassa HAZ:ssa. Tavoitteena oli identifioida murtumakäyttämisen suhteen pahimmat materiaalitapaukset (esimerkiksi 'ääritapaus': särö ylilujan hitsiaineen ja alilujan HAZ:n rajaviivalla) ja tehdä näille tapauksille herkkyysanalyysit (mm. varioiden pehmenneen HAZ:n leveyttä).

Parametrinen tutkimuksen avulla voidaan osoittaa kriittisten tekijöiden, kuten murtumissitkeyden, suunnittelu- ja jäännösjännitysten tason, vikakoon ja rakennegeometrian vaikutus rakenteen/rakenneosan rakenteelliseen eheyteen. Eri mis-match-tapauksille konstruoidut FADit muodostavat tässä työssä konstruoidun numeerinen suunnittelu- ja laskentatyökalun perustan, jota käyttäen voidaan määrittää hitsatun rakenneosan potentiaaliset vauriomekanismit ja rakennelujuus paikallisesti alilujille hitsausliitoksille.

5 Tulokset

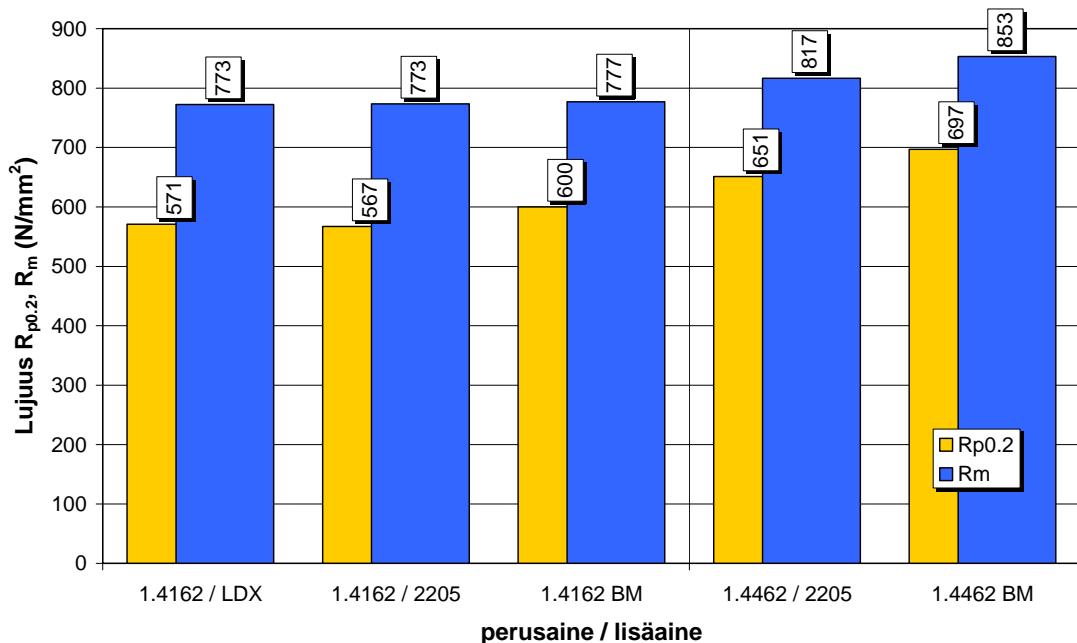
Tässä luvussa esitetään VTT:n tekemissä kokeissa ja analyyseissä saadut keskeiset tulokset. Raakatulosaineisto on esitetty liiteaineistona. Oulun yliopiston tekemien kokeiden ja analyysien tulokset on yksityiskohtaisesti raportoitu erillisessä loppuraportissa [14].

5.1 Hitsausliitosten rikkovat kokeet

Koeliitosten hitsaamiseen käytetyt hitsausmenetelmät on esitetty aiemmin kappaaleessa 4.1 ja Taulukossa 4. Seuraavassa esitetään standardin mukaisten hitsin poikittaisten vetokokeiden, makro- ja mikrokovuusmittausten sekä hitsin eri vyöhykkeiden lujuusominaisuuksia mittaavien minilattasauvoin tehtyjen vetokokeiden tulokset.

5.1.1 Poikittaiset vetokokeet

Esikokeiden tavoitteena oli selvittää duplex-terästen 1.4162 (LDX 2101) ja 1.4462 (2205) pehmenemistaipumusta hitsattaessa ja sitä kautta määrittää, kuinka vakava ja syvä paneutumista edellyttävä ongelma hitsausliitoksen mis-match-ilmiö ylipäättään on tämäntyyppisellä teräksellä. Kokeissa käytetty levynpaksuus oli 3 mm. Lisäaineina käytettiin sekä molempien ”omia”, lujuudeltaan perusainetta vastaavia lisäaineita, että 1.4162 -materiaalille myös ”yliseostettua” 2205 -tyypin duplex-lisäainetta. Hitsausliitosten SFS-EN 895 mukaisten poikittaisten vetokokeiden tulokset on esitetty Kuvassa 4.



Kuva 4 – Esikokeina tehtyjen duplex-terästen hitsausliitosten poikittaisten vetokokeiden tulokset eri perusaine-lisäaine -yhdistelmille.

Nähdään, että EN 1.4162 -materiaalin tapauksessa ei eri lisäaineilla (LDX, 2205) hitsattujen liitosten lujuuskäyttäytymisessä ole olennaisia eroavuuksia: lujuusarvot

ovat käytännössä yhtäläiset ja perusaineen tasolla; hitsauksen aiheuttamaa pehmenemisvaikutusta ei ole havaittavissa. Materiaalin 1.4462 tapauksessa nähdään hitsatun liitoksen (lisäaine 2205) olevan hyvin lievästi aliluja suhteessa perusaineeseen: alilujuuden aste on kuitenkin vain luokkaa 4–7 %, mitä voidaan pitää käytännössä merkityksettömänä.

Varsinaisessa koeohjelmassa tehtyjen hitsausliitosten SFS-EN 895 mukaisten poikittaisten vetokokeiden tulokset teräksille EN 1.4318 (AISI 301LN), EN 1.4301 (AISI 304), EN 1.4404 (AISI 316) ja EN 1.4162 (lean duplex 2101) on esitetty Taulukossa 6.

Taulukko 6 – Koeohjelmassa tehtyjen hitsausliitosten poikittaisten vetokokeiden tulokset eri perusaineille ja perusaine-lisäaine-yhdistelmille.

| Materiaali | Toimitus-tila | Lisäaine | Q / P _{LBW} (kJ/cm) / (kW) | R _{p0,2} (N/mm ²) | R _m (N/mm ²) | A50 (%) | Murtuma |
|------------|---------------|-----------|---|---|--|------------|------------|
| 1.4318 | 2B | perusaine | - | 383 | 743 | - | - |
| 1.4318 | 2B | laser | 3,0 | 357 | 739 | 56 | BM/HAZ |
| 1.4318 | 2B | 308LSi | 3,3 | 366 | 677 | 34 | hitsi |
| 1.4318 | C850 | perusaine | - | 687 | 987 | - | - |
| 1.4318 | C850 | laser | 3,0 | 492 | 844 | 42 | hitsi |
| 1.4318 | C850 | 308LSi | 2,4 | 501 | 745 | 22 | hitsi |
| 1.4318 | C850 | 308LSi | 3,3 | 488 | 720 | 21 | hitsi |
| 1.4318 | C850 | 308LSi | 4,8 | 454 | 680 | 26 | hitsi |
| 1.4318 | C850 | 2205 | 3,4 | 511 | 772 | 24 | hitsi |
| 1.4318 | C850 | 15.55 | 4,0 | 500 | 887 | 37 | hitsi, HAZ |
| 1.4318 | C1000 | perusaine | - | 708 | 1046 | - | - |
| 1.4318 | C1000 | laser | 3,0 | 561 | 902 | 22 | hitsi |
| 1.4318 | C1000 | 308LSi | 3,3 | 519 | 736 | 6 | hitsi |
| 1.4301 | 2B | perusaine | - | 317 | 636 | - | - |
| 1.4301 | 2B | 308LSi | 3,3 | 308 | 617 | 54 | BM, hitsi |
| 1.4301 | C850 | perusaine | - | 676 | 867 | - | - |
| 1.4301 | C850 | laser | 3,0 | 485 | 732 | 6 | hitsi |
| 1.4301 | C850 | 308LSi | 3,3 | 470 | 695 | 7 | hitsi |
| 1.4404 | C850 | perusaine | - | 801 | 939 | - | - |
| 1.4404 | C850 | laser | 3,0 | 511 | 724 | 4 | hitsi |
| 1.4162 | 1D | perusaine | - | 574 | 751 | - | - |
| 1.4162 | 1D | laser | 3,0 | 533 | 751 | 30 | hitsi, HAZ |
| 1.4162 | 1D | LDX2101 | 4,2 | 541 | 751 | 28 | hitsi, BM |
| 1.4162 | 1D | 2205 | 4,2 | 533 | 749 | 36 | BM |

Nähdään, että hitsauksen lämmöntonulla on selvä vaikutus austeniittisen ruostumattoman teräksen hitsausliitoksen lujuuteen. Materiaalin EN 1.4318 perusaineen kaltaisella lisäaineella hitsattujen liitosten lämmöntonin kasvaessa 2,4 → 3,3 → 4,8 kJ/cm laskivat sekä liitoksen myötö- että murtolujuus: myötölujuus aleni enimmillään n. 50 MPa ja murtolujuus n. 65 MPa. Kakki nämä em. tapaukset murtoivat vetokokeessa hitsiaineesta; tosin on huomautettava että perusaineen EN 1.4318 todellinen lujuus toimitustilassa C850 oli huomattavasti C850 -lujuustasoa korkeampi.

Kaikki perusaineen kaltaisella lisäaineella hitsatut liitokset olivat murtolujuuden osalta alilujia toimitustiloissa C850 ja C1000. Lujimmat hitsausliitokset saatiin käyttäessä supermartensiittista lisäainetta (OK 15.55) – eritoten murtolujuuden osalta, joka täytti toimitustilan C850 lujuustason. Myös lisäaineeton laserhitsausliitos ylsi lähes perusaineen murtolujuustasoon toimitustilassa C850. Duplex-tyyppisellä lisäaineella (so., LDX 2101 ja 2205) hitsattujen liitosten myötölujuudet olivat supermartensiittisella lisäaineella hitsattujen liitosten tasolla, tai jopa hieman lujempia, mutta murtolujuus jäi yli 100 MPa supermartensiittista lisäainetapausta alhaisemmaksi.

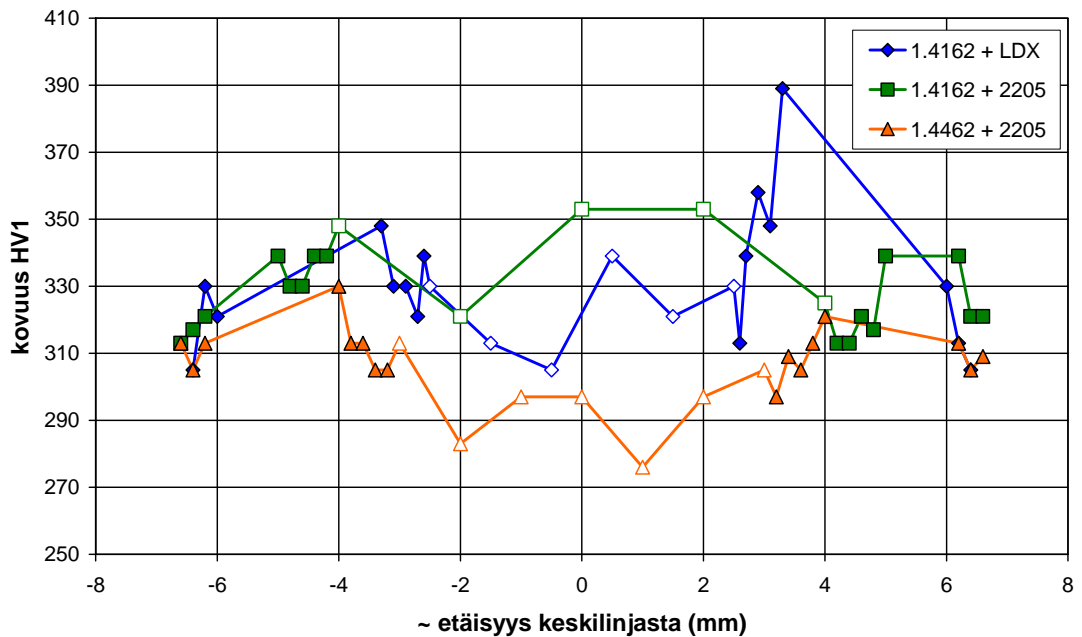
Teräksen EN 1.4318 osalta nähdään hitsattujen liitosten vetokokeessa mitattujen murtovenymien (A50) olevan varsin korkeita toimitustiloissa 2B ja C850, mutta alenevan voimakkaasti tullessa toimitustilaan C1000 – lukuunottamatta laserhitsattua tapausta. Teräslaaduilla EN 1.4301 ja EN 1.4404 sitä vastoin murtovenymä jäi hyvin vaatimattomaksi jo toimitustilassa C850 – sekä laser- että kaarihitsatuissa liitoksissa.

Kaikki vetokoetulokset on esitetty yksityiskohtaisesti graafisessa muodossa Liitteessä 1.

5.1.2 Kovuuskokeet

Makrokovuuskokeet (HV1)

Hitsattujen liitosten kovuusjakauma mitattiin makrohieistä käyttäen Vickers- kovuuskoetta 1 kg:n painolla (HV1). Koekappaleiden makrohiekuvat, joista osassa näkyvät myös kovuusmittauspisteet, on koottu Liitteeseen 2.

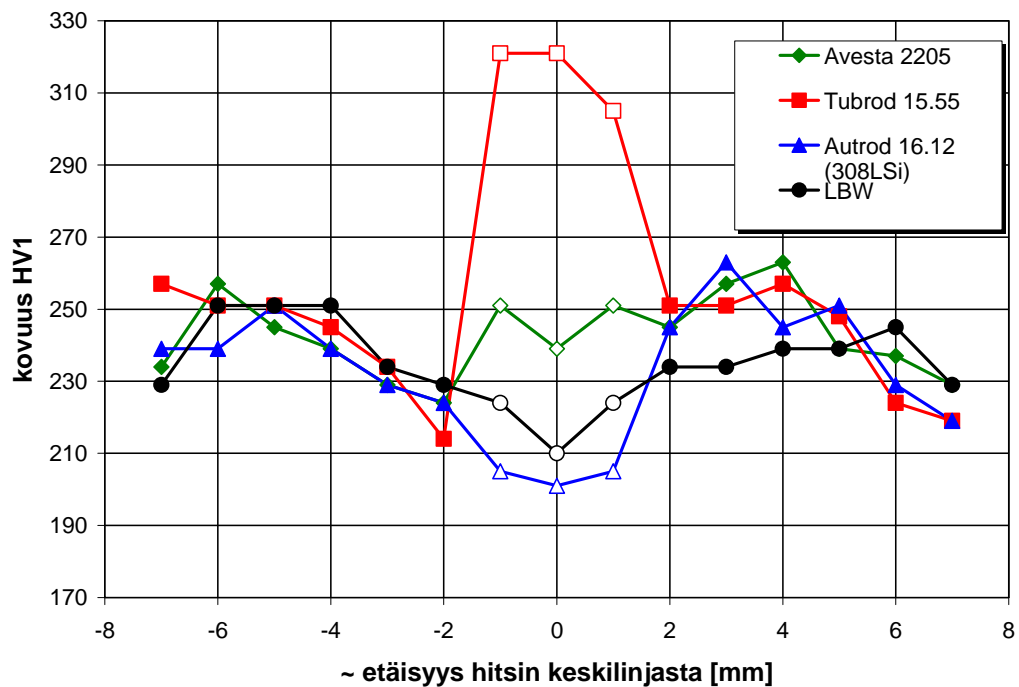


Kuva 5 – Hitsattujen duplex-terästen 1.4161- ja 1.4462 päittäisliitosten kovuusjakaumat (HV1). Symboleissa on ilmoitettu ensin perusaine, sitten käytetty lisäaine. Avoimet symbolit ovat hitsiaineen tuloksia.

Kovuusmittausten tarkoituksen oli ensisijaisesti karakterisoida liitosten pehmenemiskäyttäytymistä, jonka perusteella valittiin miniatyyrisauvojen irrotuskohdat liitoksista.

Myös duplex -teräksille hitsatuista esikokeista tehtiin kovuusmittaukset. Niiden perusteella kummallakaan tutkituista duplex -teräslaaduista ei esiintynyt merkittävää pehmenemistä hitsausliitoksen alueella, ks. Kuva 5. Tämä havainto on sopusuhteissa hitsin poikittaisten vetokoetulosten kanssa, ks. Kuva 4.

Makrokovuusmittaukset tehtiin kaikille varsinaisille koeliitostyypeille; tulokset on kokonaisuudessaan koottu Liitteeseen 3. Seuraavassa on esimerkinomaisesti esitetty koemateriaalin EN 1.4318 toimitustilan C850 – jolle tehtiin kattavimmat hitsauskokeet – kovuusprofiili eri lisäaineilla hitsattuna, ks. Kuva 6.



Kuva 6 – Eri lisäaineilla hitsatun EN 1.4318 C850 -teräksen päittäisliitoksen kovuusjakauma. Kaarihitsauksen lämmöntuonti 3,3 – 4,0 kJ/cm, laserhitsaus ilman lisäainetta 3,0 kW laserteholla. Avoimet symbolit ovat tuloksia hitsiaineesta.

Kuvassa 6 on vertailun vuoksi esitetty myös ilman lisäainetta laserhitsattu liitos. Kaarihitsauksen hieman vaihtelevat lämmöntuontiarvot johtuvat siitä, että supermartensiittinen 15.55-lisäaine oli saatavana ainoastaan Ø 1,2 mm täytelankana, kun muut langat olivat Ø 1,0 mm umpilankoja.

Tuloksista nähdään, että duplex -tyyppisen lisäaineen (Avesta 2205) – ja eritoten supermartensiittisen lisäaineen (OK Tubrod 15.55) – käyttö johtavat selvästi perusaineen kaltaista austeniittista lisäainetta (OK Autrod 16.12; 308LSi) suurempiin hitsiaineen kovuuksiin. Tämä havainto on myös sopusuhteissa hitsin poikittaisista vetokokeista mitattujen murtolujuusarvojen kanssa, ks. Taulukko 6.

Mikrokovuuskokeet

Makrokovuusmittausten lisäksi hitsattujen liitosten poikkileikkaushiestä tehtiin myös mikrokovuuskokeet instrumentoidulla kovuusmittarilla. Tälle oli kaksi perustetta: pienempi paino, tässä tapauksessa 300 g (HV0,3), aiheuttaa pienemmän painimen jäljen, jolloin yksittäisten kovuusmittauspisteiden väliä voidaan myös pienentää tulosten luotettavuuden silti kärsimättä. Näin kovuusprofiilin ”erotuskyky” paranee, ts. pystytään mittamaan yhä kapeampien vyöhykkeiden kovuusjakauma, jolloin myös laskennassa käytettävien mallien tarkkuutta voidaan parantaa vastaavasti. Toisaalta kokeen instrumentointi tarjoaa mahdollisuuden määrittää näytteestä kovuusarvon lisäksi muita materiaaliominaisuuksia, esimerkiksi kimmomoduulin ja lujuuden. Mikäli näin saavutettujen tulosten ja vetokokeessa määritettyjen ominaisuuksien välille pystytään luomaan riittävän luotettava korrelaatio, kovuusmittausten avulla voidaan mahdollisesti vähentää varsinaista aineenkoetusta, mikä puolestaan tarkoittaa säästöjä kokeellisen toiminnan kustannuksissa ja siihen kuluvaan ajassa.

Käytännön mikrokovuusmittauksissa kokeille asetetut tavoitteet pystyttiin täyttämään vain osittain. Mittausten erotuskykyä, so. mittapisteen välistä etäisyyttä, pystyttiin pienentämään huomattavasti makrokovuusmittausten 1 – 2 mm:stä 0,5 mm:iin. Paininjäljen diagonaalimitat olivat tyypillisesti < 50 µm, joten 0,2 – 0,3 mm mittaväli on täysin mahdollinen. Käytetyllä laitteella on ainakin periaatteessa mahdollista käyttää pienempiä painoja aina 100 g asti, jolloin mittaväliä voidaan periaatteessa pienentää edelleen. Koejärjestelyissä ilmenneiden ongelmien – näytteen ja/tai näytteenpitimen joustoista aiheutuneet epävarmuudet – ja lopulta laiterikon vuoksi mikrokovuusmittausten mahdollisuuksia ei pystytty tässä projektissa hyödyntämään täysipainoisesti.

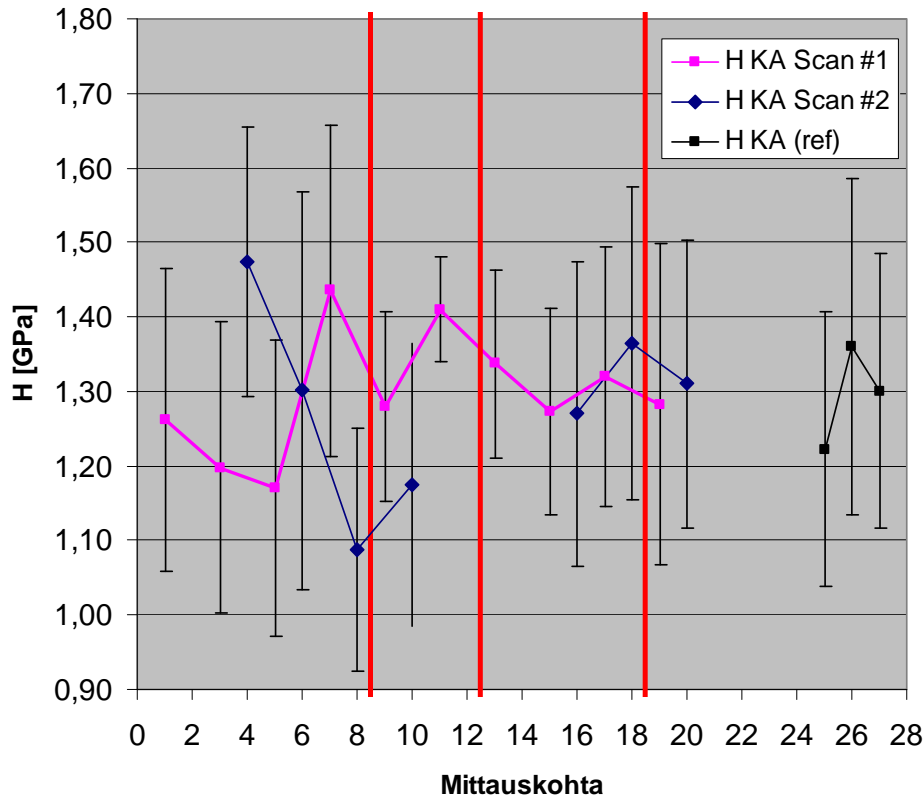
Kokeiden perusteella voidaan kuitenkin sanoa, että mikrokovuusmittaukset vaikuttavat käyttökelpoiselta menetelmältä hitsausliitosten yksityiskohtien tutkimiseen tavanomaisia makrokovuusmittauksia tarkemmin. Tulosten käyttökelpoisuuden varmistamiseksi mikro- ja mikrokovuustulosten välistä korrelaatiota tulisi kuitenkin tutkia systemaattisesti paitsi austeniittisilla, myös muun tyyppisillä ruostumattomilla teräksillä, sekä rakenneteräksillä.

Koehitsien eri vyöhykkeiden lujuuksien ja kimmomoduulien määrittäminen kärsi samoista jousto-ongelmista ja laiterikosta kuin varsinaiset kovuusmittauksetkin. Onnistuneissa mittauksissa kimmomoduuli pystyttiin määrittämään muutaman, parhaimmillaan jopa 1–2 % tarkkuudella, mutta täysin epäonnistuneet mittaukset, joissa tuloksena oli 100–150 GPa kimmomoduulin arvoja, vähensivät mittaustulosten luotettavuutta. Samoin kuin kovuusmittauksissa, muidenkin mekaanisten ominaisuuksien hyödyntäminen edellyttää systemaattista mittausten menetelyjen sekä mittauksissa saatavien ja makrokovuustulosten välisten korrelaatioiden selvittämistä. Tässä projektissa siihen ei ollut resursseja.

Nanokovuusmittaukset

Kuten mikrokovuus-, myös nanokovuusmittausten tavoite oli hyödyntää pienten kuormien mahdollistamaa mittausten hyvää erotuskykyä, sekä instrumentoinnilla määritettäviä materiaalin mekaanisia ominaisuuksia. Koekappaleena käytettiin 3 mm paksuun 1.4318 2H -levyyn ilman lisäainetta tehtyä TIG -hitsiä. Kiillotettu

näyte syövytettiin kevyesti, jotta hitsin eri vyöhykkeet saataisiin näkyviin. Koeksissa käytettiin mittakärkenä timanttipalloa, jonka $r = 50 \mu\text{m}$. Mittakärkeä painettiin yhteen mittapisteeseen lisäämällä voimaa vaiheittain seuraavassa järjestyksessä: 100–200–300–400 mN. Kuorma- ja painaumatiedoista analysoitiin edustavien mittausten kovuus ja kimmokerroin. Mittapisteen neljästä mittauksesta laskettiin keskiarvo (KA) ja poikkeama. Näytteestä määritetty nanokovuusprofiili on esitetty Kuvassa 7.



Kuva 7 – Austeniittisen EN 1.4318 2H -teräksen lisääineettomasta TIG-päällehitsistä määritetty nanokovuusprofiili.

Perusaineen referenssimittaukset tehtiin näytteen reunalla ja nämä mittaukset on merkitty mustalla. Referenssikovuus vaihteli 1,3 GPa:n molemmin puolin. Kuvassa 7 punaisten pystyviivojen kohdalla näkyivät lämpövyöhykkeiden rajat. Tulosten perusteella kovuusmittauksien hajonta oli suurta, mikä johtui luultavasti syövytetyn näytteen pinnan epätasaisuuksista: mittakärki osui tasaisen sijasta viistoon pintaan, mikä näkyi paininjäljen muotovirheenä ja sitä kautta epävarmuutena tuloksen määrittämisessä. Kovuusprofiilin huippu oli ensimmäisen lämpövyöhykkeen läheisyydessä.

Samoin kuin kovuusmittauksissa, perusaineen referenssikimmokerroin määritettiin näytteen reunalta ja se vaihteli 200 GPa:n molemmin puolin. Kimmokerroinmittauksien hajonta oli niin ikään suuri, mikä johtui myös todennäköisesti syövytetyn näytteen pinnan epätasaisuuksista. Näin mittausepävarmuus oli liian suuri materiaaliominaisuuksien luotettavaan määrittämiseen. Kun lisäksi nanokovuusmittaukset vievät aikaa huomattavasti enemmän kuin mikrokovuusmittauk-

set, voidaan todeta että käytetyllä puoliautomaattisella mikrokovuusmittalaitteella saavutetaan todennäköisesti paras kompromissi mittaustarkkuuden ja mittaussajan – eli kustannusten – välillä.

5.1.3 Aramis-mittaus- ja monitorointikokeet

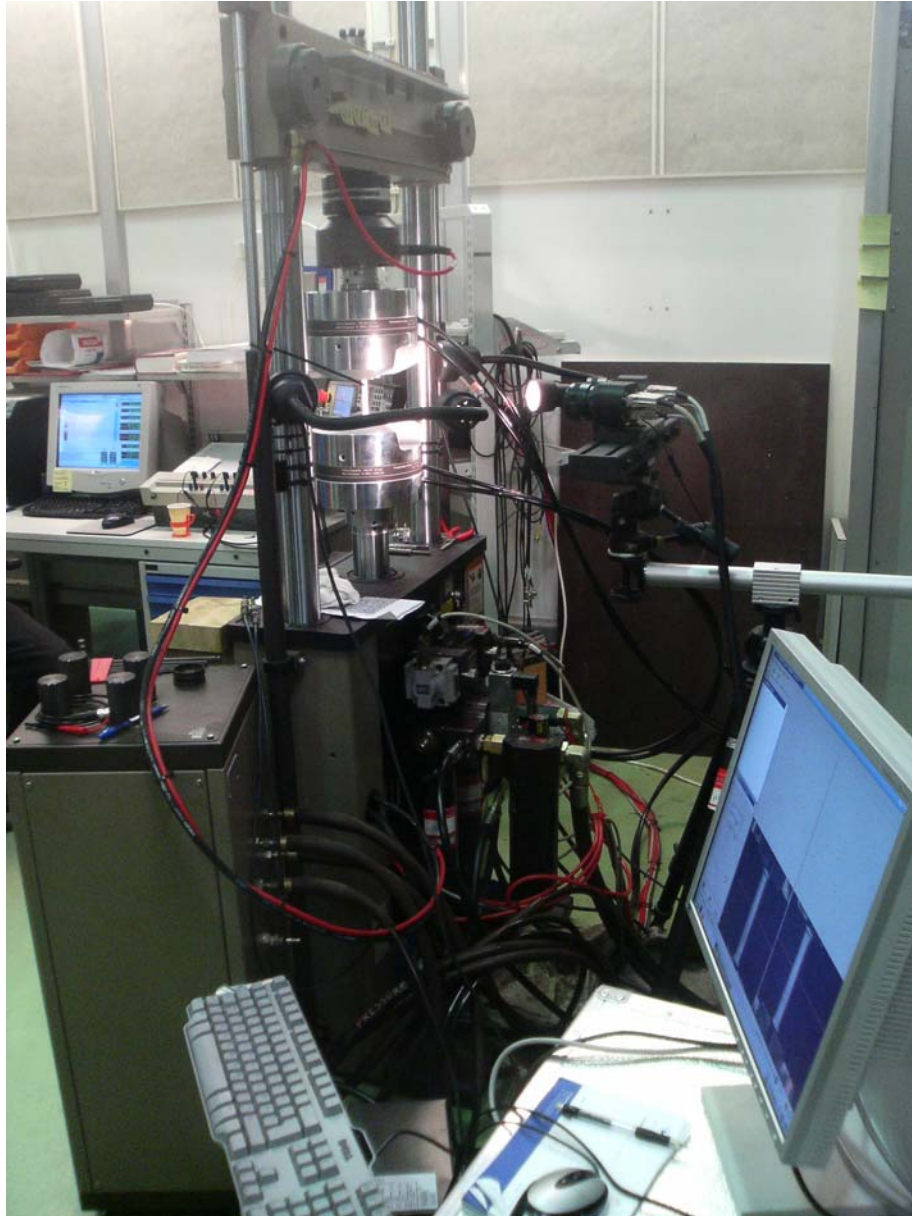
Optista 3D-muodonmuutosanalyysia varten kehitettyä Aramis-mittaus- ja monitorointijärjestelmää käytettiin todellisten jännitys-venymä -käyrien mittaamiseen koeliitoksista irrotetuista minilattavetokoesauvoista. Järjestelmään kuuluvalla kahdella kameralla kuvattiin vetokoesauvan pintaa reaaliaikaisesti kahdesta eri suunnasta tietyin aikaväleihin (jotka käyttäjä pystyi itse määrittämään). Järjestelmä muodostaa jokaisen em. kuvan päälle 'gridin' eli ruudukon, joka käytetyn $1 \times 2 \text{ mm}^2$ poikkipintaisen minilattasauvan tapauksessa tarkoittaa n. 6–10 ruutua poikkitasossa. Kussakin ruudussa on tietty määrä pikseleitä, esim. 3×4 , joita Aramis-järjestelmä seuraa kokeen edetessä. Koe edellyttää sauvageometriakohtaista kalibrointia, jolla määritetään mittatilavuus; tämän perusteella määrytyvät edelleen sekä kameroiden välinen, että kameroiden ja koesauvan välinen etäisyys. Todellinen mittatilavuus voitiin laskea kalibroinnin jälkeen.

Vetokokeen edetessä em. ruudut liikkuvat pikseleiden mukana sauvan muodonmuutosten mukaisesti, jolloin Aramis-järjestelmä laskee jokaisesta kuvasta muodostetusta 'gridistä' siirtymiä sen perusteella, miten pikselit ja ruudukot olivat liikkuneet. Tällä tavoin järjestelmä 'gridin' perusteella paikallisti, missä kohden sauvaan kurouma lokalisoitui. Jokaisessa ruudussa tapahtuneet siirtymät Aramis-järjestelmä kirjoitti omaan 'stageen' eli tiedostoon. Näistä siirtymädatoista järjestelmä itse laskee vastaavat venymät differenssimenetelmällä. Vetokolaitteistosta taas saatiin Aramis-järjestelmään tarvittavat voimadat.

Aramis-järjestelmää käyttäen kuvattiin vetokokeen aikana sauvan pinnasta x-, y- ja z- suuntaisia muodonmuutoksia kameroiden kuvatessa eri kulmista sauvaan ja järjestelmän havainnoissa kameroiden yhteisesti kuvaaman alueen. Toisin kuin standardin mukaisen vetokokeen venymäanturi, kykenee optinen Aramis-järjestelmä mittaamaan hyvin paikallisia, voimakkaasti kasvavia venymiä ja niiden muutoksia. Tulokset analysoitiin järjestelmän omalla ohjelmistolla, ja niistä tehtiin jokaisen tallennetun kuvaushetken ja sitä vastaavan muodonmuutoksen rekisteröivä videotallenne. Videon avulla voitiin jälkikäsitteilyvaiheessa karsia tuloksista sen kaltaiset virhedatat, jotka olivat aiheutuneet ulkoisista tekijöistä, kuten heijastuksista kameroihin tai taustan liikkeistä. Virhedatoja syntyi tyypillisesti sauvan reunojen kohdalta järjestelmän mitatessa pientä pinta-alaa suurella tarkkuudella. Kuvauksen helpottamiseksi kokeissa käytettiin vetokoestandardissa määritettyä pienempää vetonopeutta.

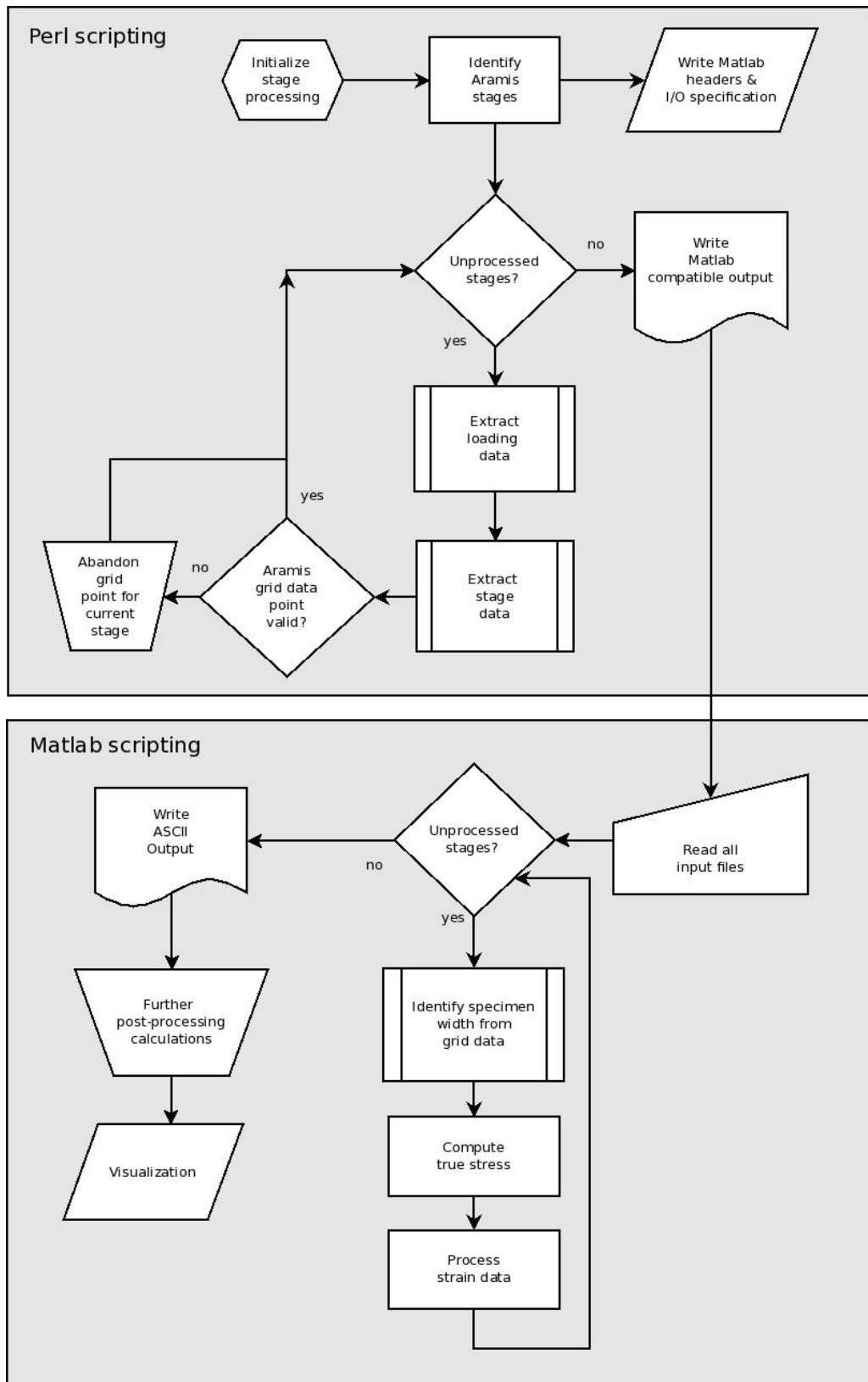
Em. koe- ja mittausjärjestelyin määritettiin Aramis-järjestelmää käyttäen kunkin koesauvan todelliset venymät ja voimat. Tämän jälkeen suoritettiin mittausdatoille jälkikäsitteily kahdessa eri vaiheessa. Ensin tunnistettiin Perl-koodin avulla Aramis-mittausdatat, jotka oli jokaisen kuvaustapahtuman perusteella jaettu siirtymä-, venymä- ja voimamittausdataa sisältäviin 'stageihin' ja suodatettiin tulosjoukosta pois ne 'staget', joiden selvästi havaittiin mittauksessa teknisesti epäonnistuneen. Jäljelle jääneet datat muokattiin tämän jälkeen Matlab-ohjelmaan soveltuvaan muotoon. Tulokset avattiin Matlab -ohjelmassa, jolloin voitiin identifioida kuvastusta sauvaan kohta, jossa kuroutuminen lokalisoitui. Ko. kuroutumiskohdan jännitykset laskettiin 'grideistä' määritetyn todellisen

poikkipinta-alan perusteella, ja vastaavat venymät poimittiin Aramis-mittausdatoista. Tulokset pakattiin output-tiedostoon, jonka jälkeen niille voidaan tarvittaessa tehdä lisäanalyyssejä. Kuvassa 8 on esitetty vetokoelaitteistoon yhdistetty Aramis-järjestelmä.



Kuva 8 – Vetokoelaitteisto ja siihen kytketty Aramis-järjestelmä.

Kuvassa 9 on esitetty kaaviona kaikki datan käsittelyvaiheet Aramis-mittaus- ja monitorointitapahtumasta todelliseksi jännitys – venymä -käyräksi. Aramis-monitoroidusta, hitsin suuntaisin minilattasauvoihin hitsausliitoksen eri vyöhykkeiltä testattujen vetokoesauvojen mittaustuloksista laskettiin nk. insinööri-jännitys-venymä -käyrä, josta edelleen määritettiin 0,2 -raja ja sitä vastaava myötölujuus $R_{p0.2}$; vastaavasti korkein käyrältä mitattu lujuusarvo edusti murtolujuutta R_m . Tulokset on esitetty Taulukossa 7.



Kuva 9 – Aramis-datan käsittelyvaiheet todelliseksi jännitys-venymäkäyräksi.

Taulukko 7 – Hitsattujen liitosten eri vyöhykkeiden myötö- ($R_{p0.2}$) ja murto-
lujuudet (R_m) määritettyinä Aramis-monitoroiduista minilattasauvoin tehdyistä
vetokokeista. Kaikkien sauvojen perusaine on 1.4318 toimitustilassa C850.

| lisäaine | Sauva | | Myötölujuus $R_{p0.2}$ (MPa) | Murtolujuus R_m (MPa) |
|----------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|-------------------------------|
| | lämmöntuonti (kJ/mm) | sauvan sijainti | | |
| 308LSi | 3,3 | hitsiaine | 315 | 571 |
| 308LSi | 3,3 | hitsiaine | 300 | 571 |
| 308LSi | 3,3 | HAZ sisempi | 468 | 922 |
| 308LSi | 3,3 | HAZ ulompi | 444 | 913 |
| 308LSi | 3,3 | HAZ ulompi | 468 | 922 |
| 308LSi | 2,4 | hitsiaine | 305 | 571 |
| 308LSi | 2,4 | hitsiaine | 312 | 561 |
| 308LSi | 2,4 | HAZ sisempi | 450 | 869 |
| 308LSi | 2,4 | HAZ sisempi | 420 | 820 |
| 308LSi | 2,4 | HAZ ulompi | 444 | 844 |
| 308LSi | 2,4 | HAZ ulompi | 502 | 961 |
| 308LSi | 4,8 | perusaine | 470 | 927 |
| 308LSi | 4,8 | perusaine | 455 | 920 |
| 308LSi | 4,8 | hitsiaine | 305 | 571 |
| 308LSi | 4,8 | hitsiaine | 300 | 566 |
| 308LSi | 4,8 | HAZ sisempi | 440 | 927 |
| 308LSi | 4,8 | HAZ sisempi | 439 | 869 |
| 308LSi | 4,8 | HAZ ulompi | 449 | 922 |
| 308LSi | 4,8 | HAZ ulompi | 420 | 890 |
| 2205 | 3,3 | hitsi | 495 | 712 |
| 2205 | 3,3 | hitsi | 525 | 747 |
| 2205 | 3,3 | hitsi | 540 | 722 |
| 2205 | 3,3 | hitsi | 561 | 756 |
| OK 15.55 | 4,0 | hitsi | 346 | 1025 |
| OK 15.55 | 4,0 | hitsi | 350 | 971 |
| OK 15.55 | 4,0 | hitsi | 360 | 1020 |
| OK 15.55 | 4,0 | hitsi | 356 | 961 |

Kaikki tutkittavana olleille hitsausliitoksille minilattasauvoin tehtyjen Aramis-
mittaus- ja monitorointikokeiden tulokset on esitetty todellisina jännitys – venymä-
käyriä Liitteessä 4.

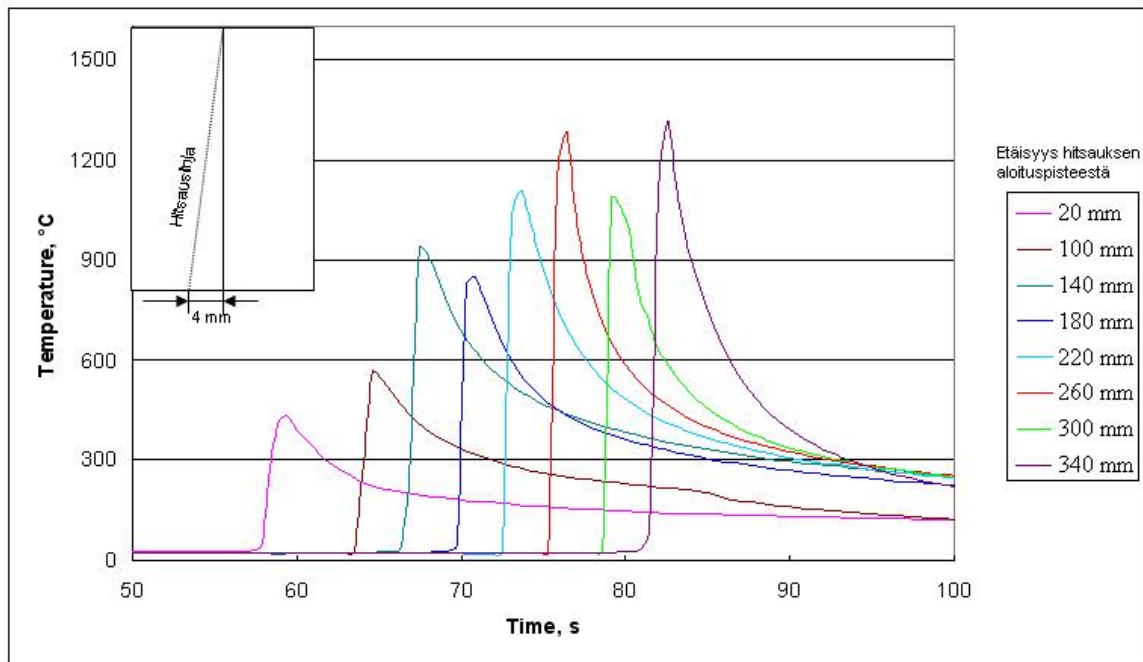
5.1.4 Hitsin jäähtymisaikamittaukset

Sekä austeniittinen että lean duplex hitsattiin ilman lisäainetta, vaikka
jälkimmäisen osalta ratkaisu ei olekaan käytännössä relevantti ferriittisvaltaisen
(oletus: n. 80–90 %) hitsiaineen huonon korroosionkestävyyden vuoksi. Pidettiin
kuitenkin tärkeänä saada kaarihitsaukseen verrattuna selkeä ero lämmöntuontiin,
mikä on mahdollista laserhitsauksen pienen lämmöntuonnin ansiosta.

Laserhitsaus

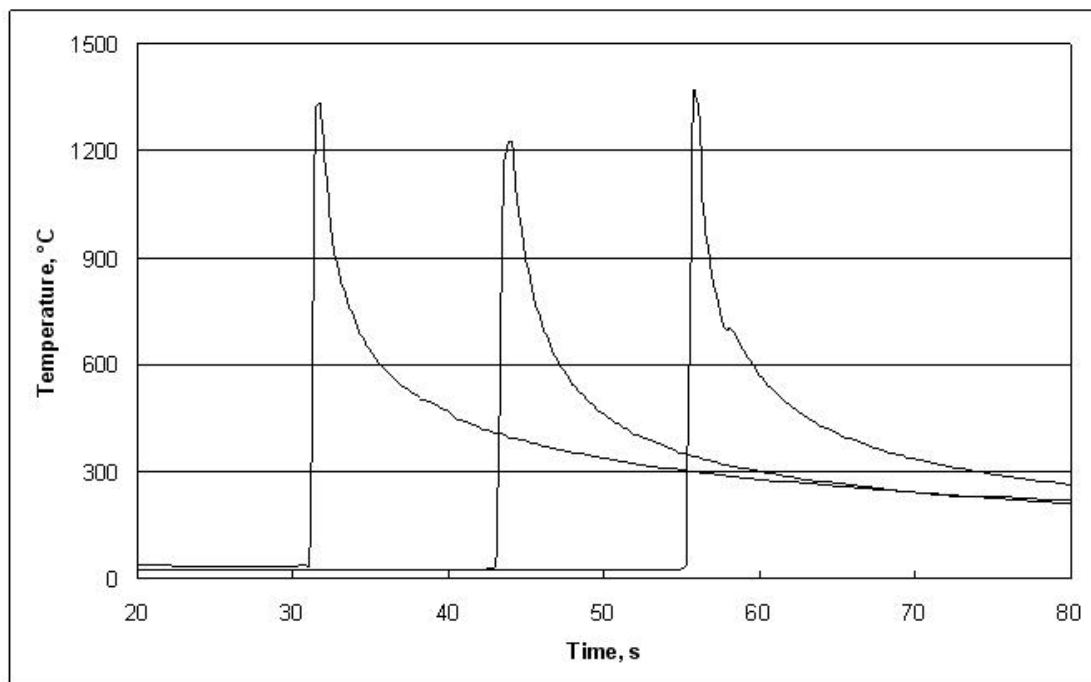
Ensimmäisessä vaiheessa pyrittiin selvittämään, millä etäisyydellä laser-säteestä
saavutetaan haluttuja K-tyypin termoelementillä mitattavissa olevia huippulämpö-

tiloja. Hitsaus aloitettiin 4 mm:n etäisyydeltä railosta ja etäisyys railoon pieneni Kuvassa 9 olevan skemaattisen esityksen mukaisesti.



Kuva 9 – Saavutettavat lämpötilat eri etäisyyksillä hitsauksen aloituslinjasta.

Etäisyydellä 220–340 mm hitsauksen aloituspisteestä saavutettiin suuruusluokaltaan toivottavia mitattavissa olevia arvoja eli n. 0,5–2,0 mm etäisyydellä hitsauslinjasta.

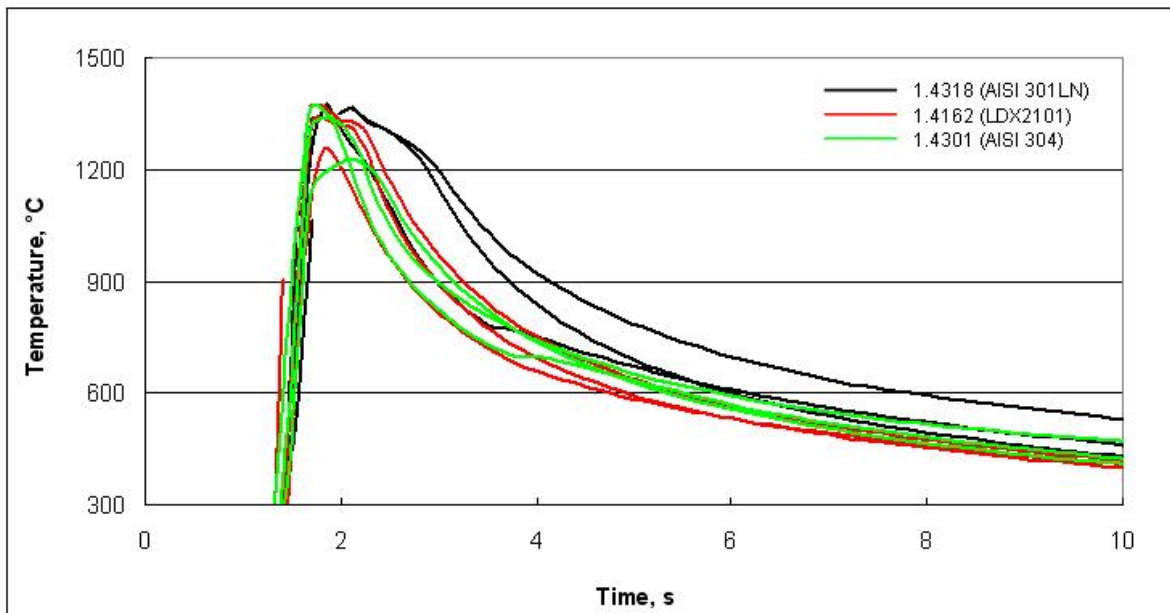


Kuva 10 – Jäähymiskäyrät 40, 200 ja 360 mm etäisyydellä hitsauksen aloituspisteestä.

Materiaalilla 1.4318 (301LN) tehtiin koe, jossa hitsattiin 1,5 mm:n etäisyydellä railosta, johon kiinnitettiin kolme termoelementtiä 40, 200 ja 360 mm:n etäisyydelle hitsauksen aloituspisteestä. Kuvassa 10 on esitetty ko. pisteissä mitatut lämpötilat.

Mittausten teknisen onnistumisen kriteerioksi otettiin, että lämpösyklin tuli mittauskohdassa ylittää 1200 °C, mikä kertoi elementin olleen riittävän lähellä sularajaa. Lisäksi edellytettiin jäähtymiskäyrän muodon olevan juohea, jatkuvana laskeva negatiivinen eksponenttifunktio. Kuvan 10 (ja Kuvien 11–13) perusteella havaitaan, että kuvatulla koejärjestelyllä saavutettiin lämpötilat, joiden avulla kyetään määrittämään halutut jäähtymisaikaparametrit: $t_{12/9}$, $t_{8/5}$ ja $t_{12/5}$.

Vastaavalla koejärjestelyllä tehtiin mittaukset kahdelle vertailumateriaalille; 1.4162 (LDX2101) ja 1.4301 (AISI 304). Kuvassa 11 on esitetty jäähtymiskäyrät ja Taulukossa 8 mitattuja jäähtymisaikoja.



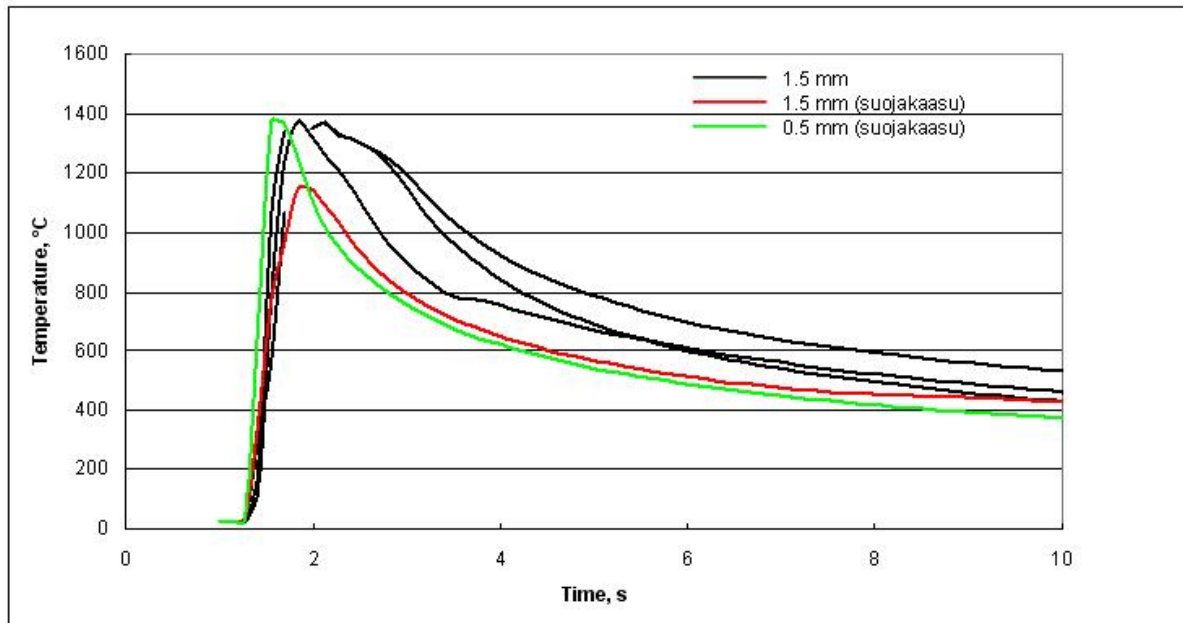
Kuva 11 – Kolmen materiaalin jäähtymiskäyrät 40, 200 ja 360 mm etäisyydellä laser-hitsauksen aloituspisteestä.

Taulukko 8 – Laserhitseistä mitatut jäähtymisnopeudet.

| | | 1.4318 (AISI 301LN) (40 / 200 / 360 mm) | 1.4162 (LDX2101) (40 / 200 / 360 mm) | 1.4301 (AISI304) (40 / 200 / 360 mm) |
|------------|-----|--|---|---|
| $t_{12/9}$ | (s) | 0,7 / 0,9 / 0,6 | 0,8 / 0,7 / 0,7 | 1,1 / 0,8 / 0,7 |
| $t_{8/5}$ | (s) | 5,1 / 3,5 / 4,3 | 3,6 / 3,3 / 3,7 | 6,5 / 3,6 / 5,3 |
| $t_{12/5}$ | (s) | 6,4 / 4,8 / 5,4 | 4,9 / 4,4 / 4,8 | 8,4 / 5,0 / 6,4 |

Mittausten perusteella duplex -teräksellä näytti olevan keskimääräisesti suurin jäähtymisnopeus, mikä tosin on havaittavissa vasta alemmissä lämpötiloissa kuten $t_{8/5}$ -tekijässä.

Materiaalilla 1.4301 (AISI 304) testattiin suojakaasun vaikutusta jäähtymisaikoihin. Kokeissa hitsattiin 0,5 ja 1,5 mm:n etäisyydellä railosta. Kuvassa 12 on esitetty jäähtymiskäyrät ja Taulukossa 9 mitatut jäähtymisajat.



Kuva 12 – Suojakaasun vaikutus laser-hitsin jäähtymiskäyriin materiaalilla 1.4301 (AISI 304).

Taulukko 9 – Jäähtymisajat kokeissa, joissa käytettiin suojakaasua.

| | | 1,5 mm | 1,5 mm (suojakaasu) | 0,5 mm (suojakaasu) |
|------------|-----|-----------------|------------------------|------------------------|
| $t_{12/9}$ | (s) | 1,1 / 0,8 / 0,7 | - | 0,8 |
| $t_{8/5}$ | (s) | 6,5 / 3,6 / 5,3 | 3,3 | 2,9 |
| $t_{12/5}$ | (s) | 8,4 / 5,0 / 6,4 | 4,5 | 3,8 |

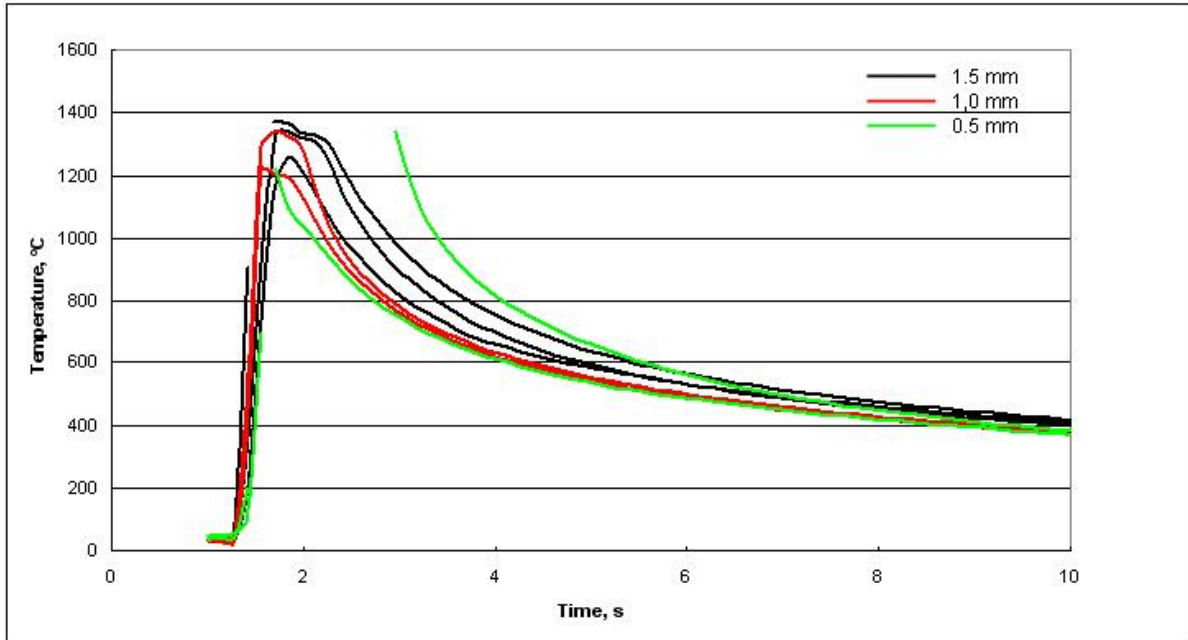
Nähdään, että 1.5 mm etäisyydellä railosta termoelementeillä saavutettavat maksimilämpötilat jäivät alle 1200 °C:n käytettäessä suojakaasua. Suojakaasulla on havaittavissa oleva hitsiä jäähdyttävä vaikutus.

Materiaalilla 1.4162 (LDX2101) vertailtiin hitsauslinjan ja railon välisen etäisyyden (1,5 / 1,0 / 0,5 mm) vaikutusta jäähtymiskäyrään. Kuvassa 13 on esitetty jäähtymiskäyrät ja Taulukossa 10 mitatut jäähtymisajat.

Taulukko 10 – Laser-hitsien jäähtymisajat eri hitsauslinjan ja railon välisillä etäisyyksillä.

| | | 1,5 mm | 1,0 mm | 0,5 mm |
|------------|-----|-----------------|-----------------|-----------------|
| $t_{12/9}$ | (s) | 0,8 / 0,7 / 0,7 | - / 0,7 / 0,5 | 0,6 / - / 0,7 |
| $t_{8/5}$ | (s) | 3,6 / 3,3 / 3,7 | 3,0 / 3,0 / 3,1 | 2,8 / 2,9 / 2,9 |
| $t_{12/5}$ | (s) | 4,9 / 4,4 / 4,8 | - / 4,1 / 3,9 | 3,8 / - / 4 |

Railon ja hitsauslinjan välisen etäisyyden pienenemisellä voidaan todeta olevan melko pieni, mutta kuitenkin havaittavissa oleva vaikutus hitsin jäähtymisnopeuksiin.



Kuva 13 – Hitsauslinjan ja railon välisen etäisyyden vaikutus laser-hitsin jäähtymiskäyriin materiaalilla 1.4162 (LDX2101).

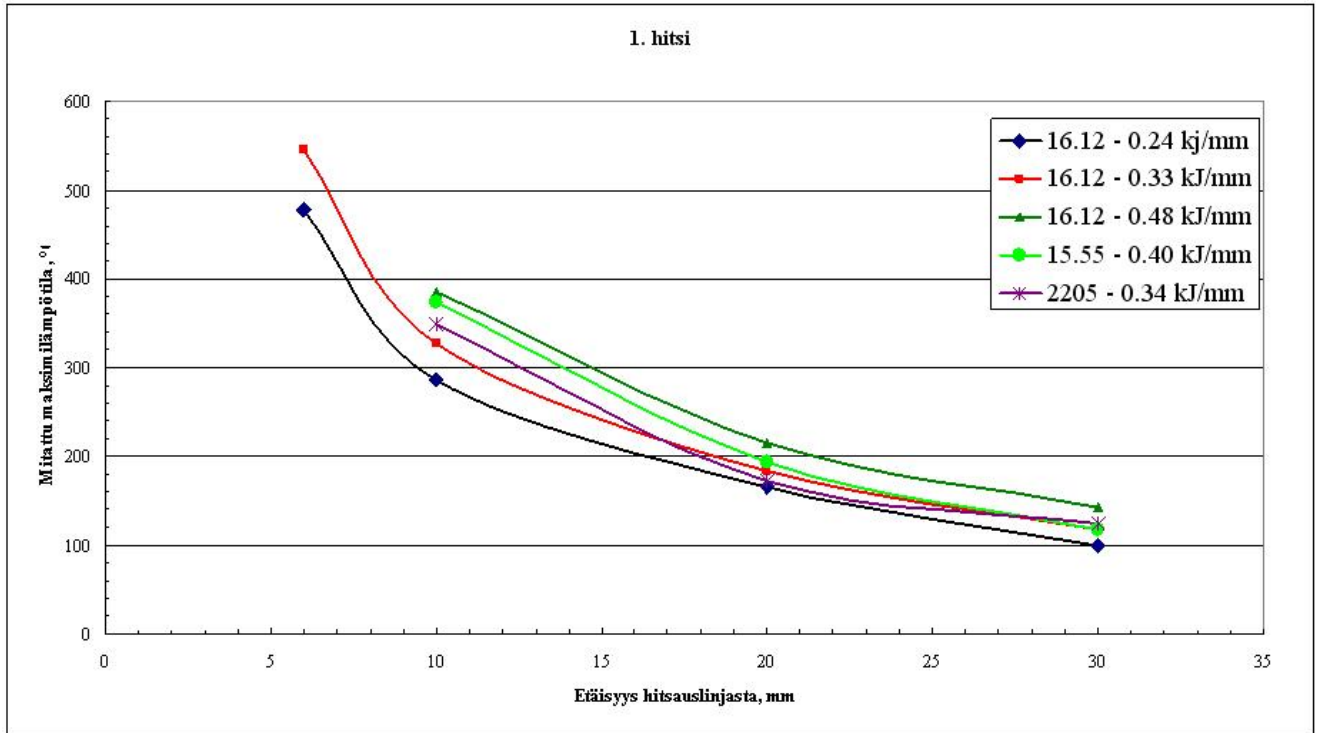
MAG-hitsaus

K-tyyppin termoelementtejä oli kondensaattoripurkaushitasauksella kiinnitetty 6, 10, 20 ja 30 mm:n etäisyydelle hitsauslinjasta. Käytetyt hitsausparametrit on raportoitu kappaleessa 4.3.2 (ks. Taulukko 5).

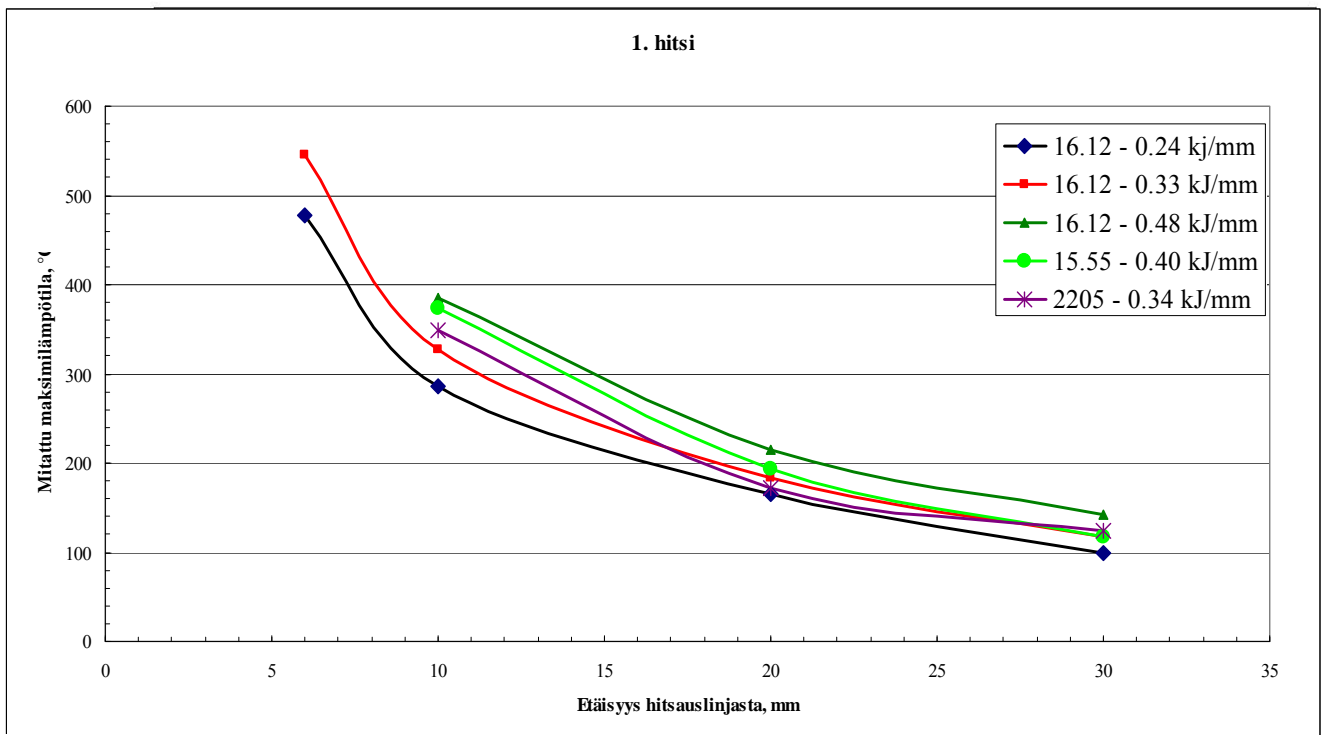
Kuvassa 14a on esitetty pohjapalon mitatut maksimilämpötilat. Osassa kokeita 6 mm:n etäisyydellä ollut elementti on vaurioitunut hitsauksen aikana. Kuvasta voidaan havaita, että saavutettavat maksimilämpötilat ovat jokseenkin lämmöntuonnin mukaisessa järjestyksessä.

Kuvassa 14b on esitetty vastaavat käyrät hitsattaessa täyttöpalkoa. Suuria eroja ei ole havaittavissa pohja- ja täyttöpallon välisissä lämpötiloissa.

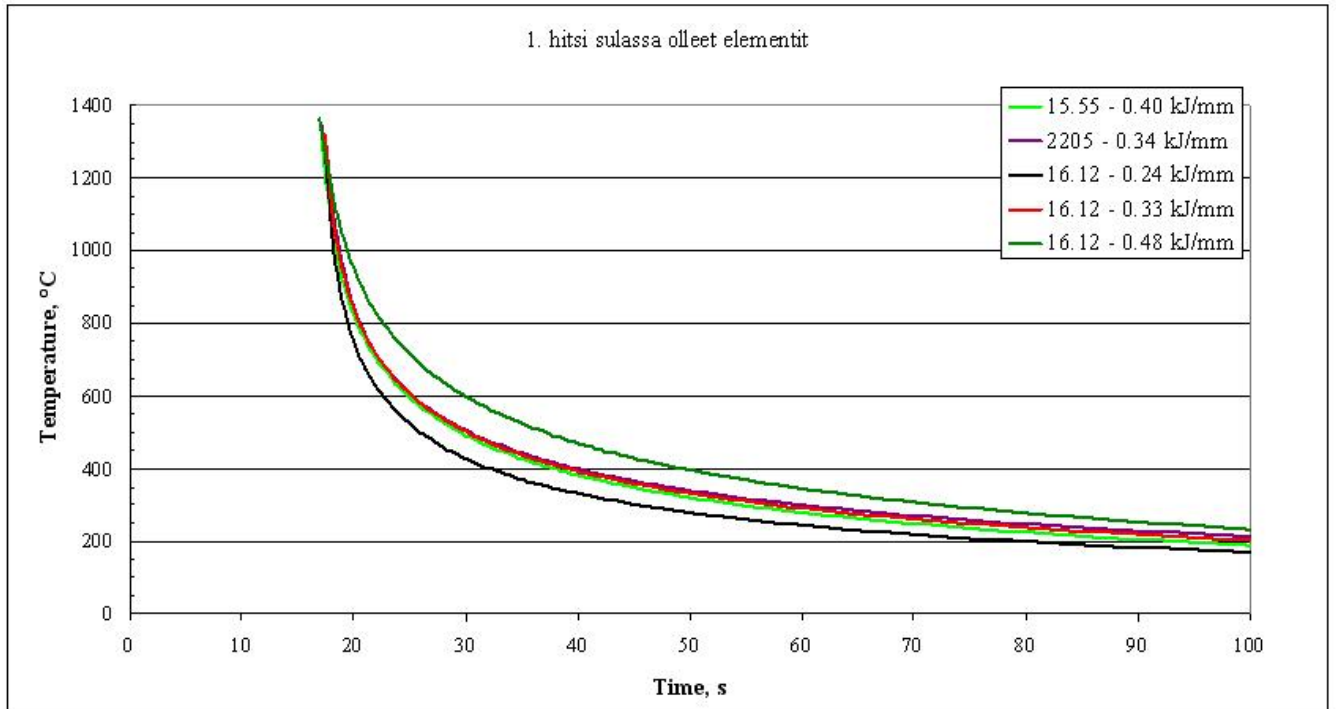
MAG -hitsauskokeissa mitattiin jäähtymisnopeus sulasta työntämällä K-tyyppin termoelementti hitsauksen aikana jyrkässä kulmassa valokaaren taakse hitsisulaan. Kuvassa 15a on esitetty sulasta pohjapalkoa hitsattaessa mitatut jäähtymisajat, jotka ovat varsin loogisesti lämmöntuonnin mukaisessa järjestyksessä austeniittisilla lisäaineilla. Kuvassa 15b on esitetty vastaavat sulasta mitatut jäähtymiskäyrät hitsattaessa täyttöpalkoa. Edelleenkin jäähtymisajat ovat austeniittisilla lisäaineilla lämmöntuonnin mukaisessa järjestyksessä.



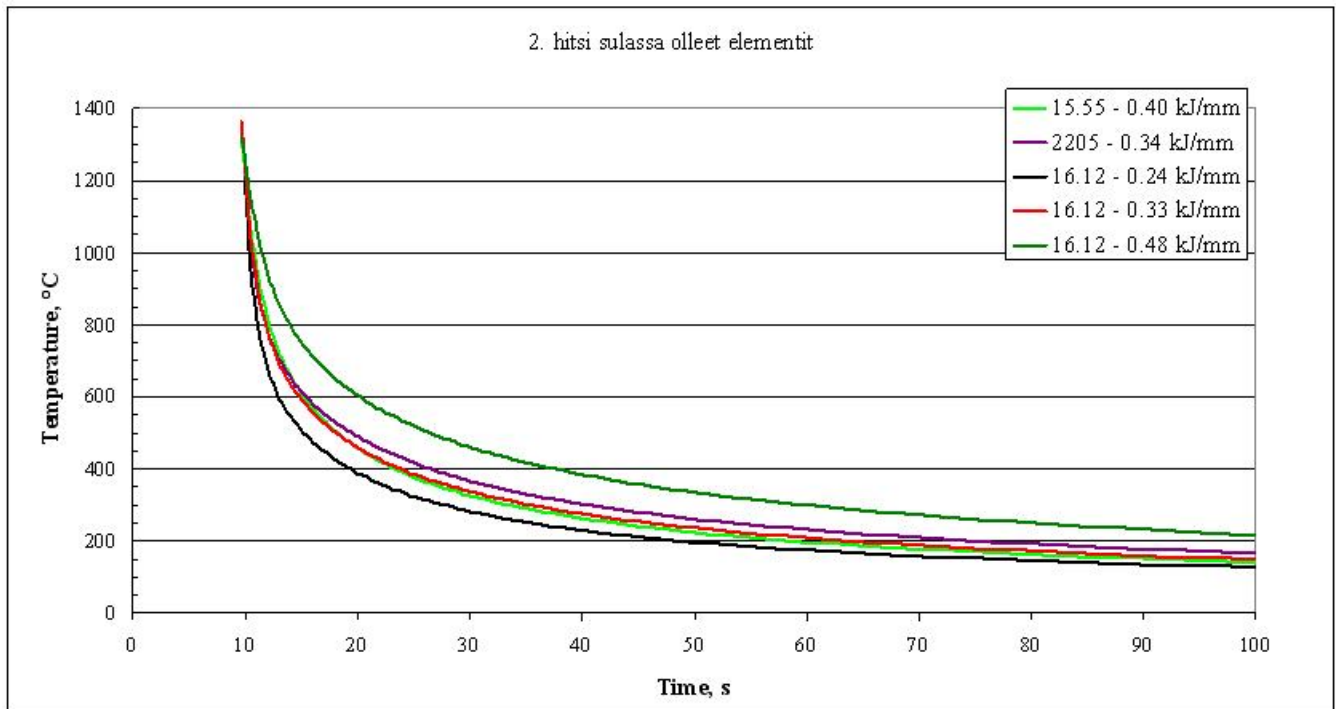
Kuva 14a – Mitatut maksimilämpötilat 6, 10, 20 ja 30 mm:n etäisyydellä hitsauslinjasta MAG-hitsatun pohjapalon tapauksessa.



Kuva 14b – Mitatut maksimilämpötilat 6, 10, 20 ja 30 mm:n etäisyydellä hitsauslinjasta MAG-hitsatun täyttöpallon tapauksessa.



Kuva 15a – MAG -hitsin pohjapalkkoa hitsattaessa sulasta mitatut jäähtymiskäyrät.



Kuva 15b – MAG -hitsin täyttöpalkkoa hitsattaessa sulasta mitatut jäähtymiskäyrät.

Taulukko 11 – MAG -hitisulasta mitatut $t_{8/5}$ -jäähdytysajat.

| Lisäaine | Lämmöntuonti Q (kJ/mm) | Pohjapalko $t_{8/5}$ (s) | Täyttöpalko $t_{8/5}$ (s) |
|----------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 16.12 | 0,24 | 6,4 | 4,1 |
| 16.12 | 0,33 | 9,5 | 6,3 |
| 16.12 | 0,48 | 14,7 | 12,4 |
| 15.55 | 0,40 | 9,1 | 6,0 |
| 2205 | 0,34 | 9,7 | 7,7 |

Taulukossa 11 on esitetty sulasta mitatut $t_{8/5}$ -jäähdytysajat. Täyttöpalkkoa hitsattaessa jäähdytysajat ovat selkeästi lyhempiä kuin pohjapalkkoa hitsattaessa. Tämä johtunee siitä, että lämmönjohtuvuus on täyttöpalkkoa hitsattaessa parempi pohjapalon vaikutuksesta.

5.2 Termiset simulointikokeet

Koemateriaaleille tehtiin Oulun yliopistossa stationäärisiä uunihehkutus-kokeita, sekä termisiä Gleeble-simulointikokeita vastaten sekä hehkutusolosuhteita että hitsauksen nopean kuumennuksen ja jatkuvan jäähdytymisen olosuhteita. Uunihehkutetuille ja termisesti simuloiduille koekappaleille tehtiin Vickers -kovuusmittaukset ja vetokokeet, sekä mikrorakennetarkastelut.

Koejärjestelyt, sekä niiden tuloksina määritetyt materiaalikohtaiset kovuus-lujuus-korrelaatiot, kovuus-venymä -korrelaatiot ja kovuusprofiilit hehkutus-/huippulämpötilan funktiona, sekä mikrorakennetarkastelujen tulokset (so., eri faasien osuudet eri huippulämpötiloihin hehkutetuissa/simuloiduissa mikrorakenteissa) on yksityiskohtaisesti raportoitu Oulun Yliopiston erillisessä loppuraportissa [14].

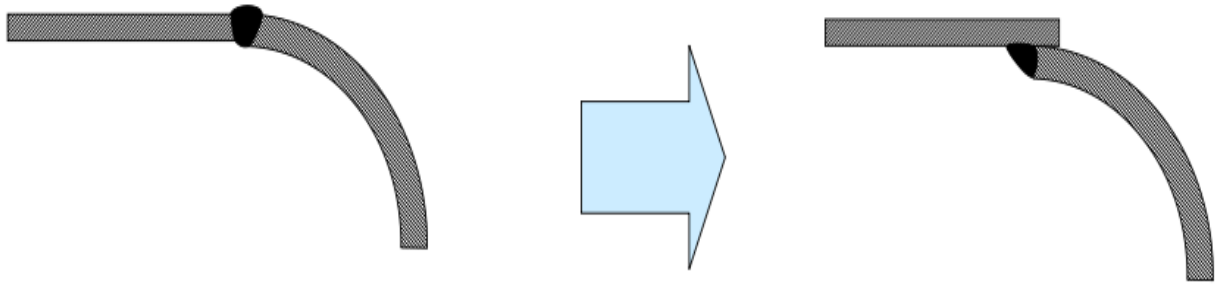
5.3 Mis-match –ilmiön numeerinen mallinnus

Seuraavassa käsitellään mallinnustulokset (i) yritys-esimerkitapauksesta: säiliöpäädyn ja -rungon liitoshitsin liitoratkaisujen vaikutuksista käytettävyyteen, sekä (ii) mis-match -ilmiön vaikutuksista materiaalilähtöisten Failure Assessment Diagram (FAD) -käyrästäisiin ja niiden perusteella arvioitaviin vikaantumismekanismeihin.

5.3.1 Yritys-esimerkki: säiliöpäädyn ja -rungon liitoshitsi

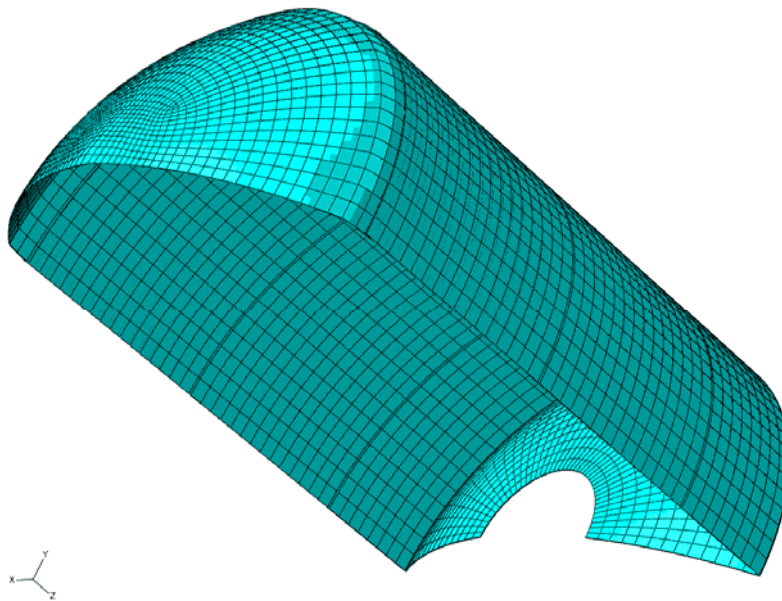
Obas-casessa selvitettiin rekan kuljetussäiliön päätyosan ja vaipan välisen liitoshitsin muuttamista päittäishitsatusta liitoksesta pienahitsatuksi päällekkäisliitokseksi (so., limiliitokseksi).

Kuvassa 16 on esitetty nykyisessä käytössä oleva, vaipan ja päädyn yhteen kehähitsillä liittävä päittäisliitos, sekä uusi sisäpuolelta pienahitsattavaksi suunniteltu päällekkäisliitos.



Kuva 16 – Nykyinen päättäisliitosratkaisu (vasemmalla) ja suunniteltu päällekkäisliitosratkaisu (oikealla).

Päättäisliitoksen railomuoto on osaviistetty V-railo (railokulma 60°); liitos hitsataan yhdeltä puolelta (so., ulkopuolelta). Päällekkäisliitos suunniteltiin pienahitattavaksi sisäpuolelta käyttäen 4 mm a-mittaa.



Kuva 17 – Mallin verkko. Kuvassa päällekkäisliitos 30 mm limittäisyydellä.

Mallinnuksessa käytetty säiliönhalkaisija (ds) oli 2000 mm, vaipan paksuus 3,2 mm ja pituus 4250 mm. Päädyn muoto oli DIN 28013 -standardin mukainen syväpääty (korbbogen). Säiliön materiaali oli EN 1.4404 (AISI 316L) -terästä, joka päädyssä on pehmeästä 1D-tilasta muovauksen yhteydessä vaihtelevasti muokatussa tilassa, ja vaipassa kylmämuokatussa 2H-tilassa. Säiliön mitoitus tehdään pehmeän tilan ominaisuuksien mukaan. Säiliön sisäinen käyttöpaine vaihtelee +2 ja -0,21 barin välillä, ja koe-/suunnittelupaineena käytettiin 4 baria. Säiliön tulee suurimmalla kuormallaan kulkusuunnassaan kestää $2 \times$ kokonaismassa (so., 2G), kohtisuorassa kulkusuuntaa nähden kokonaismassa (G), pystysuorassa ylöspäin kokonaismassa (G) ja pystysuorassa $2 \times$ kokonaismassa (2G). Laskelmissa käytettiin autosäiliöille arvoa $G = 200$ kN ja perävaunusäiliöille $G = 500$ kN. Säiliö

kiinnitettiin kuljettavan rakenteen runkoon 300 mm päästä vaipan reunasta. Kiinnitysvanne kiersi säiliön ympäri.

Kuvan 17 säiliö on mallinnettu ABAQUS-FEM ohjelmalla neljäsosana (ts. halkaistuna pituus- ja leveysuunnassa) symmetriaa hyväksi käyttäen. Säiliön ulkotuet on mallinnettu kahtena analytyttisen jäykkänä alueena. Jäykät tuet estävät myös mallin liikkeen pituus suunnassa. Malli on rakennettu 3000–8000 neliöllisestä kuutioelementistä (c3d20).

Jokaisella mallilla laskettiin 5 kuormitustapausta:

- 4 bar sisäinen paine
- 4 bar sisäinen paine ja 1000 kN voima pituussuuntaan
- 4 bar sisäinen paine ja 1000 kN voima poikittaissuuntaan (alas)
- 4 bar sisäinen paine ja 500 kN voima poikittaissuuntaan (ylös)
- 4 bar sisäinen voima ja 500 kN voima poikittaissuuntaan (sivulle)

Painovoimaa ei erikseen otettu huomioon mallissa, joten ylös- ja sivusuuntaiset kuormitustapaukset vastaavat toisiaan. Jännitykset hitsissä laskettiin käyttämällä kuuden hitsiä lähimpänä olevan solmupisteen jännitys; näin saatiin eliminoitua mallin epätarkkuuksista kulmiin aiheutuvat jännityspiikit.

Mallinnuksessa verrattiin nykyisin käytössä olevaa päittäishitsausliitosta korvauksiksi liitosmuodoksi suunniteltuun päällekkäisliitokseen. Päällekkäisliitoksen tapauksessa mallinnettu rakennedetalji on geometrialtaan todellista tilannetta ankarampi, jolloin mallinnuksen tulokset ovat konservatiivisia, ja näin turvallisella puolen. Mm. ohuesta aineenpaksuudesta johtuen vaipan ja päädyn yhteen liittävä pienahitsi sulattaa liitoskohdan juoheaksi, jolloin liitosalueelle ei todellisuudessa jää Kuvassa 16 esitetyn kaltaista terävää rakoa, jonka kulmat aiheuttavat tässä käytettyyn numeeriseen malliin paikallisen jännityspiikin. Mallinnuksen tulokset on kokonaisuudessaan esitetty Liitteessä 5.

Tuloksista nähdään, että kriittisin kuormitustilanne syntyy pienahitsatussa päällekkäisliitoksessa eteenpäin pituus suunnassa tarkasteltavaan tapaukseen. Limittäisyyden kasvattaminen pienahitsatussa liitoksessa pienentää jossain määrin jännitystilaa hitsissä, mutta ei suurillakaan limittäisyyden arvoilla (40 mm) niin paljoa, etteikö käytetyn teräksen myötölujuus päädyn toimitustilassa 1D ylittyisi. Lisäksi limittäisyyden ylenmääräinen kasvattaminen vaikeuttaa hitsauksen käytännön toteutusta.

Päittäisliitos mallinnettiin siten, että säiliön sisäistä painetta kasvatettiin portaittain nykyisestä käyttöpaineesta 4 bar. Tulokset osoittivat, että n. 10 bar sisäinen paine aiheutti hitsiin jännityksen, jolla käytetyn teräksen myötölujuus ylittyi. Täten varmuusmarginaali nykyiseen käyttöpaineeseen nähden on turvallisen suuri, n. 2,5 -kertainen.

Edellä esitetyn perusteella päittäisliitosratkaisu näyttää täten olevan lujuusteknisesti selvästi suunniteltua pienahitsattua päällekkäisliitosta perustellumpi. Mallin-

nustarkastelun perusteella ei pienahitsatun päällekkäisliitoksen käyttöönottoa voida varauksettomasti suositella ilman lisätarkasteluja.

5.3.2 Mis-match -lähtöiset FAD (Failure Assessment Diagram) -käyrät

Luvussa 5.1 esitettyjen mekaanisten aineenkoetuskokeiden tulosten perusteella valittiin laskennallisiin rakennetarkasteluihin mekaanisten ominaisuuksien ääripää mis-match -astetta kuvaavan M -parametrin (Kaava (1)) suhteen. On huomattava, että koska M -parametri kuvaa pääosin kahden vyöhykkeen keskinäistä muodonmuutoskäyttäytymistä, tulosten kannalta merkityksellinen M -arvo on vierekkäisten materiaalivyöhykkeiden välinen. Tällöin esimerkiksi suuri paikallinen HAZ:n (tai vaikka hitsiaineen) ylilujuus ei ole välttämättä rakenteen käyttäytymistä parantava ominaisuus, mikäli sen seurauksena paikalliset pehmeät vyöhykkeet joutuvat murtumismekaanisen ajavan voiman (tai rajakuorman) suhteen epäedulliseen asemaan.

Tulokset esitetään keskittyen ensisijaisesti mis-match -tekijän vaikutukseen sekä säröä ajavaa voimaan että rajakuormaan. Rakennekohtaisia yksityiskohtia huomioidaan periaatetasolla, jolloin saadaan osoitettua kuinka rakennegeometria yleisesti ottaen vaikuttaa FAD -pohjaiseen tarkasteluun, ks. Luku 1 ja Kuva 1.

Ne FAD:it, joita työssä sovelletaan, ovat 'FITNET' -menetelmän [8] tason 2 mismatch- tarkasteluun soveltuvia FAD:ja, jotka määritetään käyttäen:

$$f(L_r) = (1 + 0.5L_r^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (0.3 + 0.7 \cdot \exp(-\mu L_r^6)),$$

ja

$$f(L_r) = f(1) \cdot L_r^{\frac{n-1}{2n}},$$

joissa L_r kuvaa kuormitustilan suhdetta rajakuormitustilanteeseen ja n on muokkauslujittumisekspONENTTI. Plastinen luhistuminen kuvataan mis-match -riippuvasti ns. L_r^{\max} termin avulla:

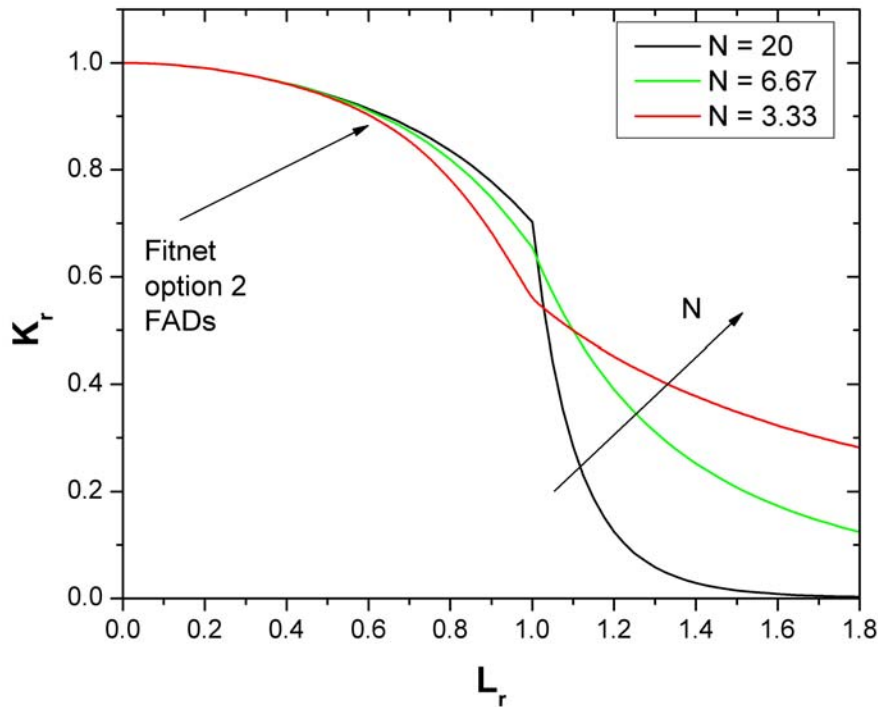
$$L_r^{\max} = \left(\frac{F_e^M}{F_e^B} \right) \cdot R_F^M,$$

jossa R_F^M on ns. flow stress ja F_e^M on mis-match -tilanteen rajakuorma, F_e^B on vastaavasti geometrian perusainetta vastaava rajakuorma.

Jäännösjännitykset vaikuttavat voimakkaasti erityisesti haurasmurtuman ilmenemiseen. Niiden merkitys vähenee plastisen deformaation funktiona, jonka perusteella tarkempien tapauskohtaisten tietojen puuttuessa alla olevissa tarkasteluissa ei huomioida jäännösjännitysten vaikutusta. Haluttaessa ne voidaan superponoida epälineaarisesti nykyisiin tuloksiin.

'FITNET' -menetelmän [8] mukaiset FAD -käyrät (tarkastelutaso: Option 2) on esitetty Kuvassa 18 kolmella eri muokkauslujittumistason (N) arvolla: 3.33, 6.67 ja 20 (so., muokkauslujittuminen voimistuu N -arvon pienetessä). Muokkauslujittumisen vaikutus, eritoten sen säröä ajavaa voimaa vähentävä vaikutus, on selke-

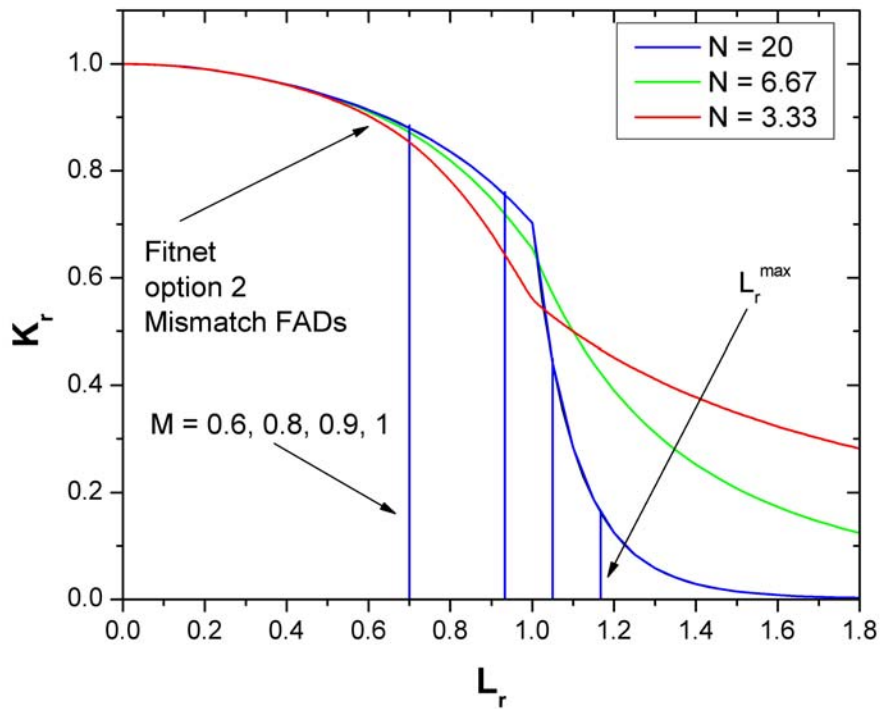
ästi havaittavissa suurilla L_r -arvoilla, jotka tyypillisesti johtavat sitkeään ydintymiseen tai plastiseen luhistumiseen.



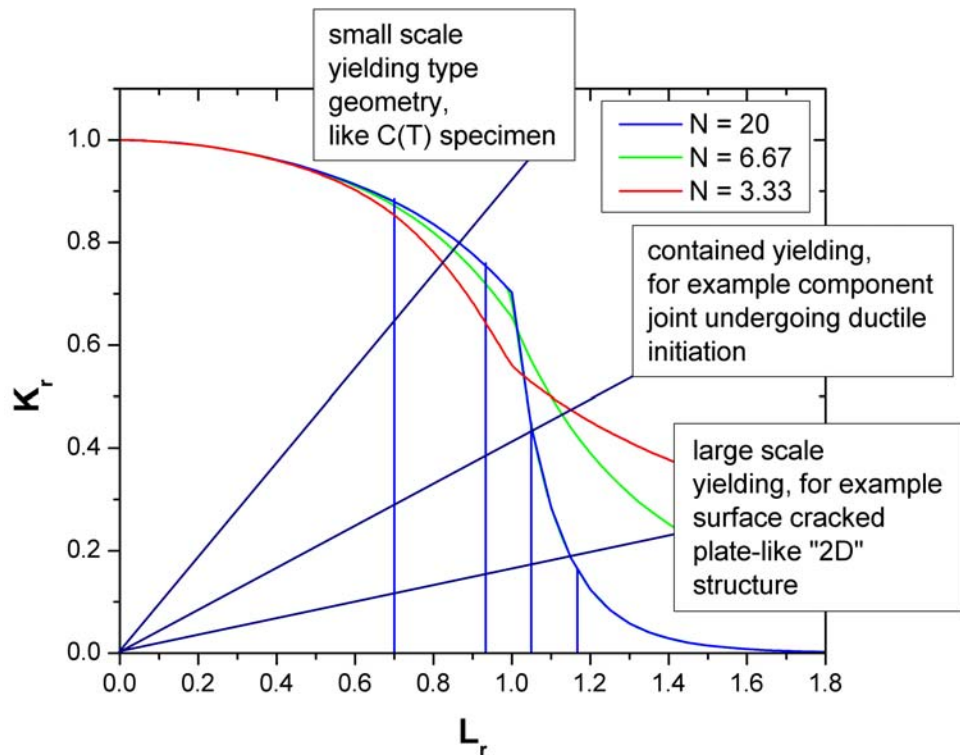
Kuva 18 – 'Fitnet' -menetelmän [8] mukaiset FAD -käyrät kolmelle eri muokkauslujittumistasolle (N). Muokkauslujittuminen voimistuu nuolen suunnassa (ts. oikealle ylös).

Kuten edellä on todettu, mis-match -ilmiö huomioidaan siten että se rajoittaa tapauskohtaisesti FAD -käyrän maksimiarvoa (oletettaessa että itse FAD -käyrä on määritetty mis-match -tapaukseen soveltuvasti). Tämä voidaan tulkita siten, että plastisen luhistumisen tapauksessa säröä ajava voima lähestyy +ääretöntä tämän rajoituksen seurauksena. Rajoitus on funktio mis-match -tasosta, ja eri mis-match-tasoille (M) tämä on kvantifioitu, ks. Kuva 19 (siniset pystyviivat).

Materiaaliominaisuuksien poikkeaminen tasaisesta ominaisuuksien jakaumasta – so. voimistuva mis-match -ilmiö – on rakenteellisen eheyden kannalta merkityksellisempi, kuin esimerkiksi muokkauslujittumisen vaikutus. Voimakkaat ominaisuuspoikkeamat, esimerkiksi suuri paikallinen alilujuus eli M -tasot 0.6 ja 0.8, muuttavat rakenteellista käyttäytymistä periaatteellisella tavalla ja vaikeuttavat sitkeän murtuman ominaisuuksien hyväksikäyttöä mitoituksessa, vrt. Kuva 19. Tällöin kontrolloiva suunnittelukriteeri on säröllisen kappaleen rajakuorma, joka suurehkon mis-matchin seurauksena alentaa käytettävissä olevaa suunnittelujännitustasoa, edelleen heikentäen suuresti mahdollisuuksia käyttää kyseistä hitsausliitostyyppiä.



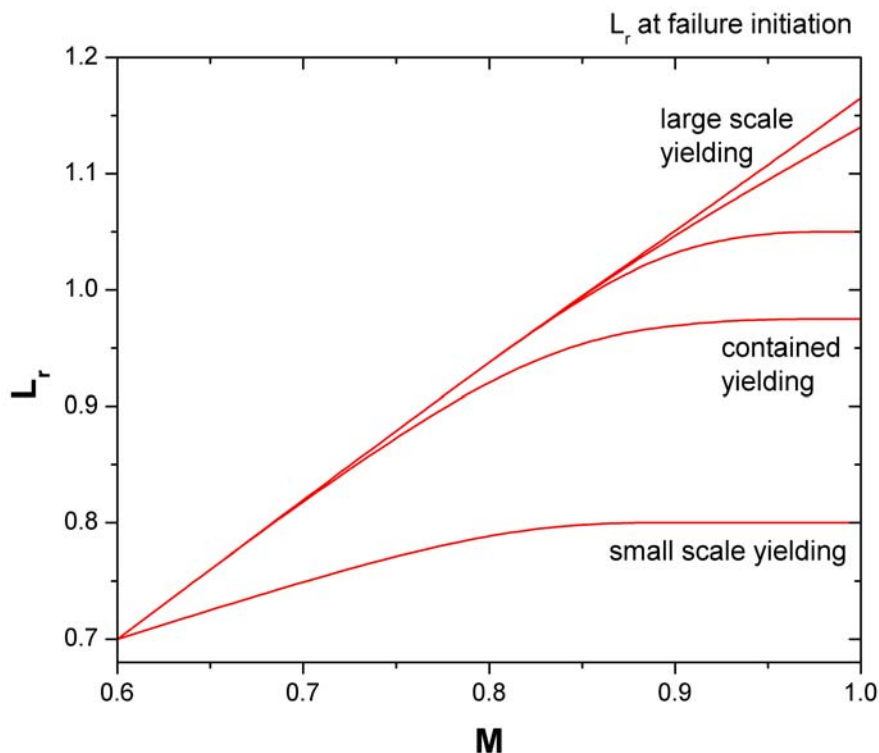
Kuva 19 – 'Fitnet' –menetelmän [8] mukaiset FAD -käyrät ja mis-match -vaikutuksen huomioon ottava luhistumiskriteeri (so. siniset pystyviivat eri mis-match -tasoilla (M): paikallinen alilujuus voimistuu M -arvon aletessa eli liikuttaessa kuvassa oikealta vasemmalle).



Kuva 20 – FAD -esitys ja murtumaa ajavan voiman kehitys periaatteellisenä.

Tietylle materiaali – liitosgeometria -tapaukselle murtumismekaanisen ajavan voiman kehitys on määräävää ajatellen kehittyvää vaurioitumiskäyttäytymistä. FAD -esityksessä voidaan osoittaa tiettyjä löyhiä lainalaisuuksia, joita on esitetty Kuvassa 20. Eri tyyppitapaukset voidaan jaotella plastisen deformaation ilmene-
misen perusteella. Levymäiset tasojännitystila-tapaukset vaurioituvat yleensä plastisen luhistumisen seurauksena sen sijaan, että murtumismekaaninen ajava voima nousisi dominoivan suureksi. Tämä voidaan todeta esimerkiksi tyypillisen murtumismekaanisen koesauvageometrian, kuten C(T) -koesauvan tapauksessa, jossa plastinen deformaatio rajoittuu korkeillakin ajavan voiman arvoilla yhä vielä särön kärjen lähialueille. FAD -esityksessä havaitaan, että levymäisen geometrian tapauksessa kaikki rajakuorman vaikuttavat tekijät ovat erityisen merkittävässä asemassa, kun taas esimerkiksi C(T) -sauvan tapauksessa särön ydintymiseen ja kasvuun vaikuttavat tekijät ovat keskeisesti merkityksellisiä.

Edellä esitetyn perusteella voidaan tarkastella hyödynnettävän suunnittelujännitystason riippuvuutta hitsatun liitoksen mis-match -tekijästä eri rakennegeometri-
oilla; tämä on tehty esittämällä geometriavaikutus rakenteen ”tyypillisen” plasti-
sen deformaation suhteen. Tämän tarkastelun tulokset on esitetty Kuvassa 21.



Kuva 21 – Vaurioitumisen ydintymisen riippuvuus hitsausliitoksen mis-match –
tasosta M .

Kuvassa 21 esitetyistä herkkyyksanalyysin tuloksista havaitaan kuinka mis-match vaikuttaa vaurion ydintymisen jännitystasoon. Murtumismekaanisen ajavan voiman ollessa suhteellisesti suurempi, on mis-match'in vaikutus vastaavasti pienempi, eikä mis-match (so., paikallinen alilujuus) täten vaikuta rakenteellisen eheyden kannalta kriittiseen tilanteeseen välttämättä paljoakaan. Tällöin plastisen luhistumisen sijaan merkityksellisempää on materiaalin käyttäytyminen sitkeän särönkasvun suhteen sekä luonnollisesti haurasmurtuman mahdollinen ilmeneminen, ks. Kuva 21 (small-scale yielding). Mikäli rakenteen vaurioituminen sen si-

jaan tapahtuu plastisen luhistumisen kautta, mis-matchin vaikutukset tulevat rakenteellisen eheyden kannalta määrääviksi. Tällöin hitsatun liitoksen paikallisen alilujuuden rajakuormaa laskeva vaikutus dominoi vaurion ydintymistä. Mitä suurempi on mis-match -tila, sitä suurempi on rajakuormassa havaittu lasku, ks. Kuva 21 (large-scale yielding).

6 Tulosten tarkastelu

Koska austeniittisen ruostumattoman teräksen mikrorakenne ei hitsauksessa koe kiinteän tilan faasitransformaatiota eikä näin ollen karkene hitsin jäähtyessä, ei liitokseen muodostu ylilujia, halkeamaherkkiä vyöhykeitä. Täten mis-match -tila pelkistyy hitsiaineen ja/tai lämpövyöhykkeen (HAZ) alilujuustapauksiin. Niin ikään lohkomurtumamekanismilla tapahtuvaa haurasmurtumaa ei austeniittisessä mikrorakenteessa esiinny, eikä tyypillisesti ohut aineenpaksuus myöskään mahdollista merkittävässä määrin sitkeää särönkasvua. Tällöin murtumissitkeys-käyttäytymisen merkitys mis-match -analyysin näkökulmasta vähenee suhteessa lujuuskäyttäytymiseen, minkä johdosta ohuen levyn sitkeän murtuman tapauksiin voidaan pääsääntöisesti soveltaa rajakuormatarkasteluja (limit load analysis).

Hitsauskokeet ja liitosten mekaaniset ominaisuudet

Austeniittisten ruostumattomien teräslaatuojen osalta havaittiin kaikkien perusaineen kaltaisella lisäaineella MAG-kaarihitsattujen liitosten olevan murto- ja myötölujuudeltaan alilujia toimitustiloissa C850 ja C1000. Kuten odotettua, alilujuus korostui selvästi hitsauksen lämmöntonin kasvaessa, joten hitsaus mahdollisimman pienin lämmöntonin (so. 'kylmästi') on muokkaamalla lujitetuilla austeniittisillä laaduilla lujuuden näkökulmasta edullista. Materiaali EN 1.4318 osoittautui hitsattavuudeltaan selvästi materiaaleja EN 1.4301 ja EN 1.4404 paremmaksi, mitä tulee liitosten lujuuden ja muodonmuutoskyvyn yhdistelmään muokkamalla lujitetuissa tiloissa, ks. Taulukot 6 ja 7.

Lisäaineettomat laserhitsit (ks. Taulukko 6) olivat poikkeuksetta perusaineen kaltaisella lisäaineella MAG-kaarihitsattuja liitoksia hieman lujempia, minkä selittänee pienen lämmöntonin ja kapean hitsatun alueen (hitsi + HAZ) yhteisvaikutus. Tästä huolimatta laser-hitsattujen liitosten murtovenymät olivat teräksen EN 1.4318 tapauksessa varsin korkeita jopa toimitustiloissa C850 ja jopa C1000, ilmentäen näin erinomaista lujuuden ja muodonmuutoskyvyn yhdistelmää. Pienen lämmöntonin ja siitä johtuvan nopean jäähtymisen seurauksena syntyvällä hienolla raekoolla tiedetään olevan suotuisa vaikutus liitoksen ominaisuuksiin. Lujuudeltaan lisäaineeton laser-hitsausliitos ylsi likipitään austeniittisen perusaineen murtolujuustason vielä toimitustilassa C850. Muokkaamalla lujitetuilla materiaaleilla EN 1.4301 ja EN 1.4404 laser-hitsattujen liitosten murtovenymät jäivät kaarihitsattujen liitosten tapaan hyvin alhaisiksi (lukuunottamatta pehmeää tilaa 2B). Tälle ilmiölle ei löydetty selvää selitystä projektin melko karkealla tasolla tehdyssä karakterisointityössä.

Staattisen vetokuormituksen näkökulmasta lujimmat hitsausliitokset muokkaamalla lujitettuun austeniittiseen teräkseen saatiin käytettäessä supermartensiittista lisäainetta (OK 15.55); tällöin hitsausliitos murtolujuuden osalta täytti toimitustilan C850 lujuustason, muttei yltänyt toimitustilan C1000 tasolle, ks. Taulukko 6. Tosin minisauvakokeet hitsiaineen pituussuuntaan indikoivat Taulukon 7 mukaan

supermartensiittisen hitsiaineen murtolujuuden olevan lähes 1000 MPa, ks. Taulukko 7. Em. suuruista, korkeaa murtolujuutta indikoi selvästi myös martensiittisestä hitsiaineesta mitattu n. 320 HV:n kovuus, ks. Kuva 6. Niin ikään lisäaineeton laser-hitsausliitos ylsi likipitään austeniittisen perusaineen murtolujuustasoon vielä toimitustilassa C850 (ks. Taulukko 6); syynä tähän ovat mitä ilmeisimmin edellä mainittu hienon raekoon ja kapean hitsatun alueen yhteisvaikutus. Duplex-tyyppisiin lisäainein (LDX ja 2205) hitsatut liitokset olivat myötölujuudeltaan supermartensiittisellä lisäaineella hitsattujen liitosten tasolla, tai jopa lujempia, mutta murtolujuudeltaan supermartensiittisiä liitoksia alhaisempia, mitä hitsin vastaavasti alhaisempi n. 250 HV kovuuskin indikoi, ks. Taulukot 6 ja 7 sekä Kuva 6. Duplex -tyyppisiin lisäainein hitsatut liitokset eivät murtolujuudeltaan yltäneet toimitustilan C850 tasolle, ks. Taulukot 6 ja 7. Tulosten perusteella supermartensiittisten ja duplex -tyyppisten hitsiaineiden murtolujuus voidaan kohtalaisen hyvin arvioida hitsin Vickers -kovuuden perusteella käyttäen laskentakaavaa: $R_m \approx 3 \cdot HV$.

Hitsatun liitoksen poikittaisissa vetokokeissa ei martensiittinen hitsiaine osoittautunut aivan yhtä lujaksi kuin sen kovuuden perusteella olisi voinut odottaa (vrt. Taulukko 6 ja Kuva 6), kun taas pitkittäisin minilattasauvoin mitatut murtolujuudet olivat hyvin sopusoinnussa kovuustulosten kanssa, vrt. Taulukko 7 ja Kuva 6. Vastaavasti austeniittiset hitsausliitokset taasen osoittautuivat poikittaisissa vetokokeissa murtolujuudeltaan selvästi lujemmiksi, kuin hitsiaineen kovuudesta olisi voinut päätellä, vrt. Taulukko 6 ja Kuva 6. Niin ikään pitkittäisin minilattasauvoin mitatut murtolujuudet austeniittisille hitsiaineille jäivät selvästi alhaisemmiksi kuin poikittaisten vetokokeiden vastaavat arvot, vrt. Taulukot 6 ja 7. Tämä viittaisi siihen, että kapea aliluja hitsi ei poikittaisessa vetokokeessa romahduta koko liitoksen lujuutta hitsiaineen lujuuden tasolle, vaan koko liitoksen lujuus – erityisesti laserhitsatussa, hyvin kapean hitsin liitoksessa – on merkittävästi tätä korkeampi. Vastaavasti ovat pitkittäisin minilattasauvoin mitatut murtolujuudet austeniittisille hitsiaineille varsin hyvin sopusoinnussa niiden kovuuden kanssa, vrt. Taulukko 7 ja Kuva 6. Vetokokeiden tuloksia tulkittaessa on myös otettava huomioon sekä austeniittisten perus- että lisäaineiden muokkauslujittumistaipumus. Sen vaikutus ei luonnollisestikaan näy myötölujuustuloksissa, mutta murtolujuuksissa vaikutus saattaa olla merkittäväkin.

Duplex-teräksen EN 1.4162 tapauksessa ei hitsausliitoksissa ilmennyt pehmenemistä, tai alilujuutta. Sen enempää vetokokeet, kuin kovuusmittauksetkaan eivät indikoineet mis-match -ilmiötä tutkituissa liitoksissa. Sekä lujuudeltaan perusainetta vastaava LDX-tyypin lisäaine, että 2205-tyyppinen lisäaine johtivat likimain tasalujiin hitsausliitoksiin, ks. Kuva 4. Valitettavasti projektissa ei saatu käyttöön alun perin suunniteltua muokkauslujitettua 1.4162-materiaalia. Sen mis-match -käyttäytymisen erojen vertaaminen kuumavalssatun materiaalin ominaisuuksiin olisi ollut huomattavan mielenkiintoista. Duplex-teräksiä arvioitaessa on myös huomattava faasisuhteiden muutosten (so., mikrorakenteellisen mis-match ilmiön) mahdollinen vaikutus liitoksen ja rakenteen korroosiokäyttäytymiseen, joka saattaa olla huomattavasti suurempi kuin rakenteellisen käyttäytymisen muutokset.

Aramis-kokeet

Kokeellinen materiaalikarakterisointi hitsausliitosten lujuuspohjaisten parametrien määrittämiseksi keskittyi tosiaikaisen, optisen Aramis-mittaus- ja monitorointi-

järjestelmän kehittämiseen, ks. Kuvat 8 ja 9. Ko. mentelmää käyttäen onnistuttiin monitoroimaan deformaation lokalisoituminen koesauvassa, sekä määrittämään hitsausliitoksen paikallisten vyöhykkeiden (so., hitsiaine, sularajan viereinen pehmennyt lämpövyöhyke l. HAZ) todelliset jännitys–venymä -käyrät ja muokkauslujittumiseksponentit luotettavasti niinkin pienestä kuin $1 \times 2 \text{ mm}^2$ poikkipintaisesta minilattavetosauvasta. Vertaamalla standardinmukaisin poikkittaisin lattavetokoesauvoin ja pitkittäisin minilattavetosauvoin saatuja tuloksia nähdään, että niissä on jossain määrin myös ristiriitaisuuksia, joita ei täysin kyetty selittämään, vrt. Taulukot 6 ja 7. Minivetosauvojen optisesti monitoroitu Aramis-mittaustekniikka osana vetokokeen suoritusta tarjoaa kuitenkin uuden työkalun hitsatun liitoksen kapeiden eri vyöhykkeiden todellisten (so. vyöhykekohtaisten) lujuuspohjaisten materiaaliominaisuuksien määrittämiseen osana niitä materiaaliparametreja, joita numeerinen rakennemallinnus tarvitsee hitsatun rakenteen vauriomekanismianalyysiin.

Uunihehkutus- ja termiset simulointikokeet (Gleeble)

Oulun Yliopiston tekemiä [14] termisiä Gleeble-simulointi- ja uunihehkutus-kokeita käyttäen karakterisoitiin tutkittavana olleiden koemateriaalien mikrorakenteelliset ja mekaanisten ominaisuuksien muutokset huippulämpötilan funktiona. Kokeiden tuloksista havaittiin, että voimakkaimmat muutokset kovuus- ja lujuusominaisuuksissa, suhteessa toimitustilaan, tapahtuivat muokkaamalla lujitetuilla austeniittisilla materiaaleilla säännönmukaisesti huippulämpötilan n. $900 \text{ }^\circ\text{C}$ yläpuolella, voimistuen huippulämpötilan edelleen kohotessa. Tämä merkitsee sitä, että nämä mikrorakenne- ja ominaisuusmuutokset tapahtuvat hitsatussa liitoksessa korostuneimmin hyvin lähellä hitsin sularajaa, jossa kovuus ja lujuus alenevat voimakkaasti, venymän puolestaan kohentuessa [14], ts. muokkamalla lujitetun austeniittisen teräksen hitsausliitoksen luonteenomainen mis-match -tila on perusaineeseen nähden alilujan vyöhykkeen muodostuminen hitsin sularajan viereiseen lämpövyöhykkeeseen ($T_p \approx 900\text{--}1500 \text{ }^\circ\text{C}$). Tämä vahvistaa käsitystä, että mis-match -ilmiöt näissä materiaaleissa ovat olennaisesti diffuusion kontrolloimia, ts. aika-lämpötila -riippuvaisia. Tätä ilmentää kuvaavasti mm. vetokokeissa havaittu hitsauksen lämmöntuonnin lisääntymisen lujuutta alentava vaikutus: lämmöntuonnin kasvaessa $0,24 \rightarrow 0,32 \rightarrow 0,48 \text{ kJ/mm}$ alenivat teräksen EN 1.4318 hitsattujen liitosten myötölujuus enimmillään n. 50 MPa ja murtolujuus n. 65 MPa, ks. Taulukko 6. Paikallisesti alilujien vyöhykkeiden muodostuminen hitsiin riippuu terästyypin ohella keskeisesti käytetystä hitsausprosessista, valituista hitsausparametreista, liitosmuodoista ja lisäainevalinnoista. Käyttämällä hitsatuista liitoksista vetokokein mitattua lujuusinformaatiota voitiin määrittää numeerisen mallinnuksen lähtötietoina tarvittavat materiaalin (jatkuvat) ominaisuusfuntiot hitsatun liitoksen eri vyöhykkeillä.

Hitsien jäähtymisaikamittaukset

Laser-hitseille tehdyt jäähtymisaikamittaukset osoittivat, että kiinnittämällä K-tyypin termoelementit peruslevyyn sopivalle etäisyydelle hitsauslinjasta on mahdollista saada onnistuneita jäähtymisaikamittauksia myös sädehitseille. Ilman suojakaasua hitsattaessa em. etäisyys oli n. 0,5–2,0 mm hitsauslinjasta. Suojakaasun käyttö laser-hitsauksessa aiheuttaa jäähdyttävän vaikutuksen; tämän seurauksena vastaava optimaalinen etäisyys kutistui, ollen n. 0,5–1,0 mm hitsauslinjasta. Em. etäisyyksin huippulämpötila mittauskohdassa ylitti $1200 \text{ }^\circ\text{C}$,

jolloin jäähtymisaikakäyrien havaittiin kuvaavan realistisesti (so. käyrän muoto oli laskeva eksponenttifunktio) jäähtymiseen lämpötilavälillä 1200–300 °C kuluvaa aikaa. Mittaustulosten perusteella tyypillinen hitsin $t_{8/5}$ -jäähtymisaika 3,0 kW teholla ilman suojakaasua hitsatuissa laserliitoksissa oli n. 4–6 s. ja suojakaasua käytettäessä vastaavasti n. 3 s. Vertaamalla tuloksia MAG-kaarihitseille lämmöntuontialueella 0,24–0,48 kJ/mm mitattuihin $t_{8/5}$ -jäähtymisaikoihin ($t_{8/5} \approx 4$ –15 s.), voidaan nopeasti jäähtyvän, kapean laser-hitsin mitattu $t_{8/5}$ -jäähtymisaikoja ($t_{8/5} \approx 3$ –6 s.) pitää realistisina.

Yritysesimerkki: säiliön päädyn ja vaipan välinen liitos

Säiliönpäädyn ja -rungon liitoshitsin liitoratkaisujen vaikutuksia käytettävyyteen tarkastelevan Obas Oy:n yritysesimerkin tulokset osoittivat, ettei päittäisliitoksen valmistusystävällisemmäksi vaihtoehdoksi suunniteltua päällekkäisliitosta (so., limiliitos) voida pitää lujuusteknisesti onnistuneena ratkaisuna. Sitä vastoin päittäisliitoksen tapauksessa varmuusmarginaali nykyiseen käyttöpaineeseen nähden on turvallisen suuri, n. 2,5 -kertainen. Vaikka limittäisyyden lisääminen lievensi jännityskeskittymää hitsin juuressa, ei suurillakaan limittäisyyden arvoilla (40 mm) saavutettu jännitystasoa, joka ei olisi ylittänyt käytetyn materiaalin EN 1.4404 myötölujuutta päädyn toimitustilassa 1D. Lisäksi limittäisyyden ylenmääräinen kasvattaminen vaikeuttaa hitsauksen käytännön toteutusta 'syöden' näin osan siitä valmistusteknisestä edusta, jota päällekkäisliitosratkaisulla alun perin haettiin.

Mikäli päittäisliitos halutaan korvata päällekkäisliitosratkaisulla, keinoiksi jäävät täten (i) päädyn lujuuden kohottaminen (toimitustilasta 1D) tai (ii) hitsauksen suorituksen optimoiminen. Koska toimitustilassa 1D olevan päädyn lujuus on rakenteellisesti rajoittava, voidaan ajatella tilannetta helpotettavan valitsemalla nykyistä lujemmassa toimitustilassa oleva päätyateriaali, mikäli tämä muovauksen suoritusta ajatellen on realistista. Ensinmainittu vaihtoehto (i) voi törmätä siihen, ettei toimitustilaa 1D lujemman materiaalitilan käyttö ole mielekästä päädyn muovausta ajatellen. Lisäksi hitsaus todennäköisesti johtaa hitsin alueen pehmenemiseen juuri rakenteellisesti kriittisessä kohdassa liitoksen läheisyydessä. Jälkimmäisessä tapauksessa (ii) voidaan mm. esituotannollisin kokein ja/tai menetelmäkokein arvioida limittäisyydestä jäävän alkusärön todellisia dimensioita, sekä optimoida hitsausparametreja hitsin juoheuttamiseksi. Hitsin juoheutta voidaan myös parantaa hitsaamalla kosmeettinen, liitosaluetta sulattava lisäpalko ulkopuolelle. Pienahitsatulle päällekkäisliitosratkaisulle tulisi myös tehdä väsymislujuus-tarkasteluja, koska säiliörakennetta käytetään väsyttävän kuormituksen olosuhteissa, joissa Kuvan 10 kaltaisen terävän alkusärön voidaan odottaa muodostuvan käytettävyyttä ajatellen erittäin kriittiseksi.

Mis-match -liitosten numeerinen mallinnus

Numeerisen rakennemallinnuksen keinoin oli tarkoitus identifioida todellisen hitsatun rakenteen vikaantumis- ja vauriokäyttäytymiseen kriittisimmät vaikuttavat alilujuustapaukset. Tätä varten konstruointiin eri mis-match- ja särötapausten joukko materiaalispesifejä ”kuormitettavuus-diagrammeja” (Failure Assessment Diagram, FAD), jotka osaltaan palvelevat numeerisen suunnittelu- ja laskentatyökalun kehitystä rakenneseosan potentiaalisten vauriomekanismien ja rakennelujuuden määrittämiseksi paikallisesti alilujille hitsausliitoksille. Hitsausliitoksen alilujien vyöhykkeiden todellisten lujuus- ja

sitkeysominaisuuksien kytkeminen alilujuuden rakenteellisiin seurauksiin kuormituksen alaisena mahdollistaa rakennesuunnittelun ja -mitoituksen, materiaalin ominaisuuksien, hitsaavan valmistuksen ja käyttöolosuhteiden vuorovaikutteisen, numeerispohjaisen optimoinnin tapauskohtaisesti. Tämä antaa edelleen uusia keinoja nykyisten rakennusnormien ja -ohjeiden mielekkyyden kriittiseen tarkasteluun, sekä materiaalien, liitosmuotojen, hitsausparametrien ja -lisäaineiden käyttöturvalliseen valintaan.

'Fitnet' -menetelmää [8] käyttäen tehtyjen FAD -pohjaisia rakennetarkastelujen avulla voitiin identifioida rakenteellisen eheyden kannalta olennaisimmat tekijät hitsatussa liitoksessa. Tulosten perusteella plastinen luhistuminen (rajakuormatilassa) on muokkaamalla lujitetun austeniittisen materiaalin tapauksessa olennaisin tekijä rakenteellisen eheyden kannalta. On todennäköistä, että todellisissa hitsatuissa rakenteissa tulee varautua myös sitkeän ydintymisen ja särönkasvun mahdollisuuteen, mutta mitoituksellisesti suurin huomio tulee kohdistaa histatun alueen paikallisen pehmenemisen (mis-match) rakenteen rajakuormaa alentavaan vaikutukseen. Koska murtumismekaanisessa mitoituksessa joudutaan ottamaan huomioon paikallisen alilujan vyöhykkeen rajakuormaa vähentävä vaikutus, 'rankaisee' suuri alilujuus, tai paikallinen materiaaliominaisuuksien poikkeama, voimakkaasti hitsattua liitosta rakenteellisen eheyden tarkasteluissa. Tehtyjen tarkastelujen perusteella on havaittavissa, että mikäli paikallinen alilujuus hitsatun liitoksen alueella on suurempi kuin luokkaa 20 % (so., mis-match -aste: $R_{p0.2(UM)} / R_{p0.2(BM)}: M \leq 0,80$), po. alilujuuden vaikutus särön käyttäytymiseen on niin suuri, että se jo alkaa vaikuttaa käytettävissä olevaan suunnittelujännitystasoon epäedullisesti ja liitoksesta tulee kuormankantokyvyltään heikohko.

Tulukkojen 6 ja 7 vetokoetulosten perusteella havaitaan, että hitsattujen liitosten alilujuus on toimitustiloissa C850 ja C1000 lähes poikkeuksetta em. 20 % suurempi – ts. niiden rakennetarkastelu pelkistyy hitsatun alueen paikallisen alilujuuden rajakuormaa alentavaan vaikutukseen. Vähäisintä paikallinen alilujuus muokkaamalla lujitettujen materiaalien hitsausliitoksissa oli käytettäessä hitsauslisäaineina duplex- ja supermartensiittis-tyyppisiä lisäaineita (hitsiaine), laser-hitsauksessa (hitsiaine ja lämpövyöhyke), sekä mahdollisimman pienin lämmöntuonnein ($Q \leq 0,24$ kJ/mm) tehdyissä MAG-hitseissä (lämpövyöhyke).

On huomionarvoista, että austeniittisten terästen tarkastelu rajakuorman suhteen (samoin kuin ferriittisten terästen) on epäedullista austeniittisille materiaaleille. Sekä jännitys-venymä -käyttäytymisen perusteella, että yleisesti ajatellen austeniittisten materiaalien murtumismekaanista käyttäytymistä on odotettavaa, että mikäli tarkasteltava materiaali kykenee kuormituksen alaisena muokkauslujittumaan riittävästi, saattaa pelkästään M -tekijään pohjautuva mitoitukselähestymistapa tuottaa jossain määrin ylikonservatiivisia tuloksia. Nykyinen lähestymistapa 'Fitnet' -pohjaisissa rakennetarkasteluissa lähtee siitä, että mikäli käytettävissä ei ole suurin kokein karakterisoituja murtumismekaanisia materiaaliominaisuuksia, ei voida osoittaa että materiaali on rakenteellisen eheyden kannalta kykenevä kestäämään aiempaa korkeampia kuormitustasoja. Mikäli suorilla murtumissitkeystuloksia hitsatun liitoksen kaikkein alilujimmille vyöhykkeille olisi käytettävissä, voitaisiin suorittaa mis-match -vaikutusta realistisesti huomioon ottavia tarkkoja rajakuorma-analyysyjä ja täten saada entistä optimoidumpia, aiempaa korkeammilla suunnittelujännitystasoilla operoivia rakenteita. Nykyiset suunnittelulähestymistavat, jopa kaikkein

pisimmälle kehitetyt ja tarkimmat murtumismekaaniset menetelmät, eivät oletusarvoisesti tarkastele liitosta muutoin, kuin myötö- ja flow-stress-ominaisuuksien suhteen. Vaikutukset eivät ole merkityksettömiä; on nähtävissä mahdollisuuksia nostaa suunnittelujännitystasoa useita kymmeniä prosentteja pelkästään mitoituslähtöisesti tarkentamalla käytettävää analyysimenetelmää. Edelleen, mikäli voitaisiin ottaa huomioon murtumissitkeyden ns. constraint-efekti (so., särön kärjen jännitysten kolmiaksisuus), päästäisiin samansuuntaisiin tuloksiin sitkeän murtuman osalta. Rakenneanalyysi sitkeän murtuman suhteen kannattaisi muutoinkin tehdä murtumisvastuskäyriin (J- Δa eli J-R -käyrä) pohjautuen, jolloin eritoten muokkaamalla lujitetuille austeniittisille teräksille tyypillisillä ohuilla aineenpaksuuksilla päästäisiin nykyistä realistisempaan mitoitukseen särön ydintymisen ja sitkeän särönkasvun suhteen.

Edellisen perusteella voidaan todeta, että muokkaamalla lujitetun austeniittisen teräksen hitsausliitoksen paikallisesta pehmenemisestä aiheutuva verrattain voimakas paikallinen alilujuus johtaa konservatiiviseen (so. turvalliseen) ratkaisuun pyrkivän 'Fitnet' -proseduurin [8] mukaan arvioitaessa plastisen luhistumisen eli rajakuormatarkaisun merkityksen korostumiseen, mikä alilujuuden voimistuessa rajoittaa voimakkaasti pehmenneen hitsausliitoksen kuormitettavuutta. Osin tämä johtuu siitä, ettei 'Fitnet' -menetelmä 'sisäänrakennettuine' rajoitteineen kykene täysin 'käyttämään hyväksi' austeniittiselle materiaalille tyypillistä voimakkaan muokkauslujittumisen tuomaa kuormitettavuushyötyä, silloin kun paikallisesti alilujan vyöhykkeen käyttäytyminen (so. alentuneen rajakuorman provosoima plastinen luhistuminen) kontrolloi lopullista vauriomekanismia. Tämä korostaa tärkeyttä määrittää krittisimmän, so. *pehmenneimmän ja näin voimakkaimmin alilujan vyöhykkeen lujuuspohjaisten materiaaliparametrien* (todellinen jännitys-venymä-käyrä, muokkauslujittumsiekspONENTTI) ohella *ko. vyöhykkeen murtumissitkeys pohjaiset parametrit*, so. murtumisvastuskäyrä (J-R -käyrä). Vasta kun näiden molempien kokeiden informaatio samasta vyöhykkeestä on käytettävissä rakenneanalyysiin, on mahdollista arvioida, missä määrin rajakuormatarkastelu itse asiassa on ylikonservatiivinen, jolloin tarkastelu tulisikin perustaa sen sijaan alilujan vyöhykkeen stabiiliin sitkeän särönkasvun kontrolloiman vikaantumisen arvioimiseen.

Tässä kohdin ei projektin koeohjelma täysin onnistunut, sillä kokeisiin hitsattujen liitosten sularaja-alueen kaareva, voimakkaasti polveileva muoto (ks. Kuvat 2a, 2b) ei mahdollistanut päteviin tuloksiin johtavien murtumissitkeys kokeiden tekoa em. hitseistä otetuista koesauvoista. Paikallisen vyöhykkeen todellisen sitkeys käyttäytymisen (intrinsic toughness) mittaamiseksi tulee ko. vyöhykkeen määrä koesauvan loven linjalla ja esiväsytytyn särön rintamassa olla riittävän suuri, eikä tämä onnistu sularajaltaan polveilevissa hitseissä. Onkin ilmeistä, että po. murtumissitkeys pohjaiset materiaaliparametrit on mielekästä ja tarkoituksenmukaista määrittää vastaavista termisesti simuloituista HAZ -mikro rakenteista, jolloin huippulämpötila voidaan valita tarkasti ja mikrorakenne on homogeenisempi kuin todellisessa hitsausliitoksessa.

Edellä kuvatun kaltainen hitsatun liitoksen lujuuskäyttäytymisen ja rakenteellisen eheyden FAD -perustainen mallintaminen edistää lujitettujen austeniittisten materiaalien käyttöä kuormaa kantavissa hitsatuissa konstruktioissa. Millään muulla tavoin, kuten esimerkiksi vain tarkastelemalla mekaanisten aineenkoetuskokeiden antamaa erillistä informaatiota, ei voida aukottomasti

päätellä, mikä vikaantumismekanismi juuri kyseisessä rakennetapauksessa lopulta dominoi vauriokäyttäytymistä, ja kuinka voimakas on kulloisenkin paikallisesti alilujan vyöhykkeen aiheuttama 'lisärasitus' juuri kyseisessä vikaantumismekanismissa. Koko lopputuotteen valmistusketju: teräsvalmistaja, rakennesuunnittelu ja hitsaava valmistus, hyötyvät siitä, että voidaan esimerkiksi arvioida missä määrin eräillä sovellusaloilla nykyisin olemassa olevat normit, jotka eivät salli muokkaamalla kohotetun lujuuden hyödyntämistä hitsatussa rakenteessa, itse asiassa tarpeettomasti rajoittavat uusien muokkaamalla lujitettujen teräslaatuojen käyttöä kuormaa kantavissa rakenteissa. Edelleen hyötyjä tuovat lisääntyvä tietämys luoda aiempaa realistisempia mitoituskäytäntöjä muokkaamalla lujitetuista teräksistä valmistettaville hitsatuille rakenteille sellaisillakin sovellusaloilla, joilla mitään normeja ei tällä hetkellä ole käytettävissä siten, ettei paikallisen alilujan vyöhykkeen läsnäolo vaaranna mitoituksen pohjaksi otettua, tavoiteltua rakenteellista lujuutta ja kuormankantokykyä.

7 Yhteenveto ja johtopäätökset

Projektin kokeellisten ja laskennallisten tulosten perusteella voidaan muokkaamalla lujitettujen austeniittisten ruostumattomien terästen hitsausliitosten mis-match -ilmiöstä tehdä seuraavat keskeiset johtopäätökset:

- (1) Muokkaamalla lujitetuissa austeniittisissa ruostumattomissa materiaaleissa hitsatun liitoksen 'mis-match' -tila pelkistyy hitsiaineen ja/tai lämpövyöhykkeen (HAZ) alilujuustapauksiin.
- (2) Tutkittujen teräslaatuojen osalta kaikki perusaineen kaltaisella lisäaineella MAG -kaarihitsatut liitokset olivat murto- ja myötölujuudeltaan alilujia toimitustiloissa C850 ja C1000.
- (3) Hitsatun liitoksen alilujuus korostui selvästi lämmöntonin kasvaessa. Täten hitsaus mahdollisimman pienin lämmöntonin (so. 'kylmästi') on muokkaamalla lujitetuilla austeniittisilla laaduilla lujuuden näkökulmasta edullista.
- (4) Materiaali EN 1.4318 osoittautui hitsattavuudeltaan materiaaleja EN 1.4301 ja EN 1.4404 paremmaksi, mitä tulee liitosten lujuuden ja muodonmuutoskyvyn yhdistelmään muokkamalla lujitetuissa tiloissa.
- (5) Lisäaineettomat laser-hitsit olivat poikkeuksetta perusaineen kaltaisella lisäaineella MAG-hitsattuja liitoksia hieman lujempia. Laser-hitsattujen liitosten murtovenymät olivat teräksen EN 1.4318 tapauksessa varsin korkeita jopa toimitustilassa C1000, ilmentäen näin erinomaista lujuuden ja muodonmuutoskyvyn yhdistelmää.
- (6) Lujimmat hitsausliitokset muokkaamalla lujitettuun austeniittiseen teräkseen saatiin käytettäessä supermartensiittista lisäainetta (OK 15.55): hitsausliitos täytti murtolujuuden osalta toimitustilan C850 lujuustason, yltäen lähes toimitustilan C1000 tasolle. Korkeaa murtolujuutta indikoi myös martensiittisestä hitsiaineesta mitattu n. 320 HV:n kovuus. Duplex-tyypin lisäainein (LDX ja 2205) hitsatut liitokset olivat myötölujuudeltaan vähintäänkin supermartensiittisten hitsien tasolla, mutta eivät murtolujuudeltaan yltäneet toimitustilan C850 tasolle.
- (7) Duplex -referenssiteräksen EN 1.4162 hitsausliitoksissa ei havaittu mis-match -ilmiötä, ts. pehmenemistä, tai alilujuutta.
- (8) Hitsausliitoksen poikittaisten, standardin mukaisten vetokokeiden ja hitsin suuntaan minilattasauvoilla tehtyjen vetokokeiden antamassa informaatioissa havaittiin paikoitellen keskinäisiä ristiriitaisuuksia, joita ei täysin kyetty selittämään.
- (9) Tosiaikaista, optista Aramis-mittaus- ja monitorointijärjestelmää kehittäen ja käyttäen onnistuttiin monitoroimaan deformaation lokali-soituminen vetokoesauvassa, sekä määrittämään hitsausliitoksen paikallisten vyöhykkeiden todelliset jännitys-venymä -käyrät ja muokkauslujit-

tumisekspONENTIT luotettavasti pienestä, $1 \times 2 \text{ mm}^2$ poikkipintaisesta minilattavetosauvasta. Menetelmä tarjoaa uuden työkalun hitsatun liitoksen kapeiden eri vyöhykkeiden sellaisten todellisten vyöhykkekohtaisten lujuusominaisuuksien määrittämiseen, joita numeerinen rakennemallinnus tarvitsee hitsatun rakenteen vauriomekanismianalyysiin.

- (10) Termiset Gleeble-simulointi- ja uunihehkutuskokeiden tulokset osoittivat voimakkaimpien kovuus- ja lujuusmuutosten tapahtuivat muokkaamalla lujitetuilla austeniittisillä materiaaleilla säännönmukaisesti huippulämpötilan n. $900 \text{ }^\circ\text{C}$ yläpuolella, voimistuen lämpötilan edelleen kohotessa. Täten ko. materiaaleille luonteenomainen hitsatun liitoksen 'mis-match' tila on perusaineeseen nähden alilujan vyöhykkeen muodostuminen hitsin sularajan viereiseen lämpövyöhykkeeseen ($T_p \approx 900\text{--}1500 \text{ }^\circ\text{C}$). Tämä vahvistaa käsitystä, että 'mis-match' -ilmiöt näissä materiaaleissa ovat olennaisesti diffuusion kontrolloimia, ts. aika-lämpötila -riippuvaisia.
- (11) Laser-hitseille tehdyt jäähtymisaikamittaukset osoittivat, että kiinnittämällä K-tyypin termoelementit peruslevyyn sopivalle etäisyydelle hitsauslinjasta on mahdollista saada onnistuneita jäähtymisaikamittauksia myös sädehitseille. Tyypillinen $t_{8/5}$ -jäähtymisaika $3,0 \text{ kW}$ teholla ilman suojakaasua hitsatuissa laserhitsiliitoksissa oli n. $4\text{--}6 \text{ s}$. ja suojakaasua käytettäessä n. 3 s .
- (12) 'Fitnet' -menetelmää käyttäen tehtyjen FAD -pohjaisten rakenne-tarkastelujen avulla identifioitiin rakenteellisen eheyden kannalta olennaisimmat tekijät hitsatussa liitoksessa. Tulokset osoittivat, että plastinen luhistuminen (rajakuormatilassa) on muokkaamalla lujitetun austeniittisen materiaalin tapauksessa kriittisin vikaantumismekanismi. Mitoituksellisesti suurin huomio tulee kohdistaa hitsatun alueen paikallisen pehmenemisen (mis-match) rakenteen rajakuormaa alentavaan vaikutukseen. Täten murtumis-mekaanisessa mitoituksessa 'rankaisee' suuri alilujuus, tai paikallinen materiaaliominaisuuksien poikkeama, voimakkaasti hitsattua liitosta rakenteellisen eheyden tarkasteluissa.
- (13) FAD -tarkastelujen perusteella hitsatun liitoksen alueen paikallisen alilujuuden ollessa suurempi kuin n. 20% (so., mis-match -aste: $R_{p0.2(UM)} / R_{p0.2(BM)}$: $M \leq 0,80$), alilujuuden vaikutus särön käyttäytymiseen on jo niin suuri, että se vaikuttaa käytettävissä olevaan suunnittelujännitystasoon epäedullisesti, jolloin liitoksesta tulee kuormankantokyvyltään heikohko. Vetokoetulosten perusteella tutkittujen liitosten alilujuus on toimitustiloissa C850 ja C1000 lähes poikkeuksetta suurempi kuin 20% - ts. niiden rakennetarkastelu pelkistyy hitsatun alueen paikallisen alilujuuden rajakuormaa alentavaan vaikutukseen.
- (14) Muokkaamalla lujitetun austeniittisen teräksen hitsausliitoksen paikallisesta pehmenemisestä aiheutuva korostunut paikallinen alilujuus johtaa konservatiiviseen (so. turvalliseen) ratkaisuun pyrkivän 'Fitnet' -proseduurin mukaan arvioitaessa plastisen luhistumisen eli rajakuormaratkaisun merkityksen korostumiseen, mikä alilujuuden voimistuessa rajoittaa voimakkaasti pehmenneen hitsausliitoksen kuormitettavuutta. Osin tämä johtuu siitä, ettei 'Fitnet' -menetelmä 'sisäänrakennettuine' rajoitteineen kykene täysin 'käyttämään hyväksi' austeniittiselle

materiaalille tyypillistä voimakkaan muokkauslujittumisen tuomaa kuormitettavuushyötyä, silloin kun paikallisesti alilujan vyöhykkeen käyttäytyminen (so. alentuneen rajakuorman provosoima plastinen luhistuminen) kontrolloi lopullista vauriomekanismia.

- (15) Vähäisintä paikallinen alilujuus muokaamalla lujitettujen materiaalien hitsausliitoksissa oli käytettäessä lisäaineina duplex- ja supermartensiittisyyppisiä lisäaineita, laser-hitsauksessa (hitsiaine ja lämpövyöhyke), sekä mahdollisimman pienin lämmöntuonnein ($Q \leq 0,24$ kJ/mm) tehdyissä MAG-hitseissä (lämpövyöhyke).

8 Tulevaisuuden tutkimustarpeita

'Fitnet' -menetelmää käyttäen tehtyjen FAD -pohjaisia rakennetarkastelujen avulla voitiin tässä projektissa identifoida rakenteellisen eheyden kannalta olennaisimmat tekijät. Jatkossa on tarpeen lisäksi käsitellä esimerkiksi tiettyjen liitos – ja materiaalivaihtoehtojen suunnittelutapauskohtaista käyttäytymistä. Tämä mahdollistaisi edelleen rakennedetaljikohtaisen, ts. todellista hitsattua tuotetta palvelevan rakennetarkastelun.

Nykyinen lähestymistapa 'Fitnet' –pohjaisissa rakennetarkasteluissa lähtee siitä, että mikäli käytettävissä ei ole suoria kokeita karakterisoituja murtumismekaanisia materiaaliominaisuuksia, ei voida osoittaa että materiaali on rakenteellisen eheyden kannalta kykenevä kestäämään aiempaa korkeampia kuormitustasoja. Mikäli suoria murtumissitkeystuloksia hitsatun liitoksen kaikkein alilujimmille vyöhykkeille olisi käytettävissä, voitaisiin suorittaa mis-match –vaikutusta realistisesti huomioon ottavia tarkkoja rajakuorma-analyysyjä ja näin saadaan entistä optimoidumpia, aiempaa korkeammilla suunnittelujännitustasoilla operoivia rakenteita. Edelleen, mikäli voitaisiin ottaa huomioon murtumissitkeyden ns. constraint-efekti (so., särön kärjen jännitysten kolmiaksisuus), päästäisiin samansuuntaisiin tuloksiin sitkeän murtuman osalta. Rakenneanalyysi sitkeän murtuman suhteen olisi mielekästä tehdä murtumisvastuskäyriin (J- Δa eli J-R -käyrä) pohjautuen; tällöin eritoten muokkaamalla lujitetuille austeniittisille teräksille tyypillisillä ohuilla aineenpaksuuksilla päästäisiin nykyistä realistisempaan mitoitukseen särön ydintymisen ja sitkeän särönkasvun suhteen

Aiempien tutkimusten [1-3,9] perusteella tiedetään, että minkä tahansa paikallisen (so., epäjatkuvan) vyöhykkeen todellisen sitkeysikäytymisen (intrinsic toughness) mittaamiseksi tulee ko. vyöhykkeen määrä koesauvan loven linjalla ja esiväsytetyn särön rintamassa olla riittävän suuri. Tässä projektissa havaittiin, ettei tämä vaatimus toteudu sularajaltaan polveilevissa hitseissä, jotka ovat tyypillisiä ohuita aineenpaksuuksia hitsattaessa. Onkin ilmeistä, että po. murtumissitkeuspohjaiset materiaaliparametrit on mielekästä ja tarkoituksenmukaista määrittää vastaavista termisesti (Gleeble) simuloituista HAZ -mikrorakenteista, jolloin huippulämpötila voidaan valita tarkasti ja mikrorakenne on homogeenisempi kuin todellisessa hitsausliitoksessa. Tämä on eräs tulevaisuuden tärkeistä tutkimustarpeista.

Projektin tulokset osoittavat, että on ratkaisevan tärkeää määrittää kriittisimmän, so. *pehmenneimmän ja näin voimakkaimmin alilujan vyöhykkeen lujuuspohjaisten materiaaliparametrien* (so., todellinen jännitys-venymä-käyrä, muokkaus-

lujittumsiekspONENTTI) ohella *ko. vyöhykeen murtumissitkeys pohjaiset parametrit*, so. murtumisvastuskäyrä (J-R –käyrä). Vasta kun näiden molempien kokeiden informaatio samasta vyöhykkeestä on käytettävissä rakenneanalyysiin, on mahdollista arvioida, missä määrin rajakuormatarkastelu itse asiassa on ylikonservatiivinen, jolloin tarkastelu tulisikin perustaa sen sijaan alilujan vyöhykkeen stabiilin sitkeän särönkasvun kontrolloiman vikaantumisen arvioimiseen.

Viime kädessä rakennemallinnuksen numeeristen menetelmien kehittyminen ”mis-match” -ilmiöt realistisesti huomioonottaviksi ei jatkossa rajoita saatavissa olevia hyötyjä yksinomaan austeniittisiin muokkaamalla lujitettuihin teräslaatuihin; käytettävyys voidaan ulottaa mm. erikois- ja ultralujien rakenneterästen materiaaliryhmään, edellyttäen että niiden materiaalikohtaiset parametrit on määritetty.

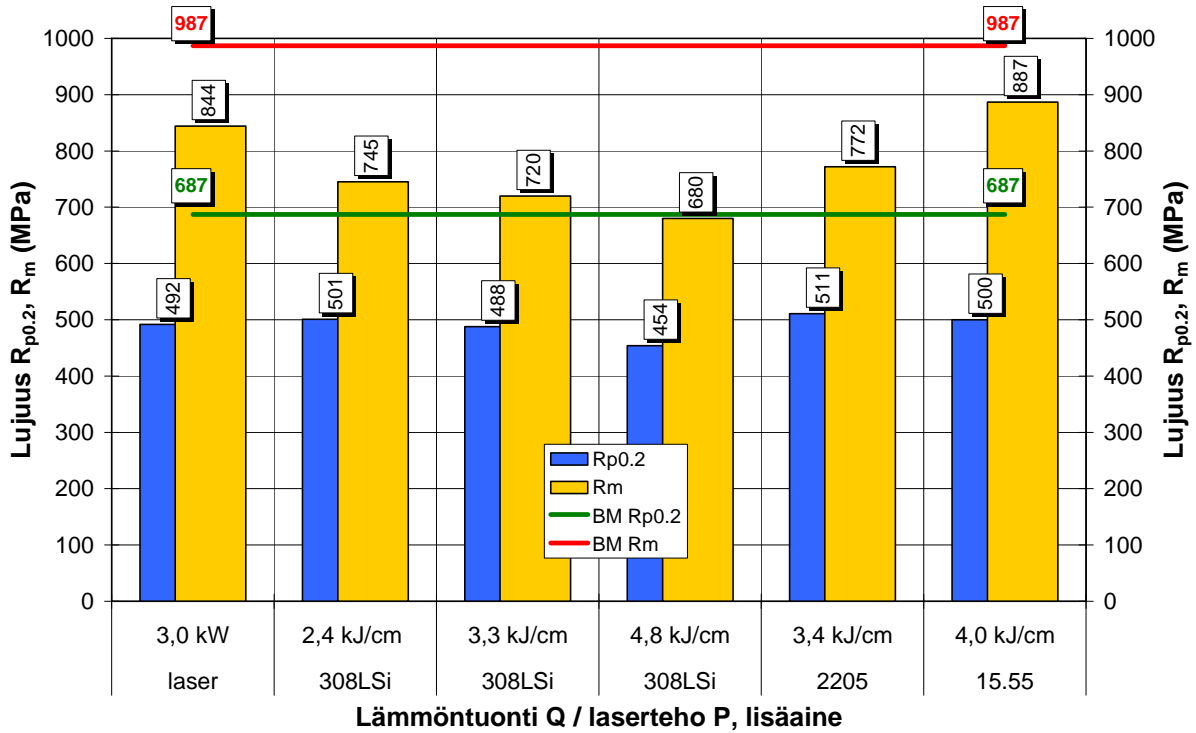
Lähdeviitteet

- [1] 'SINTAP' – Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry, Final Procedure, November 1999. British Steel plc., Rotherham, United Kingdom 1999.
- [2] 'Welding-90': Proc. Conf. "Welding-90 – Technology, Material, Fracture", Geesthacht, 22-24 October 1990. Eds. M. Kocak & A. Niku-Lari. Germany: Institute for Industrial Technology Transfer (IITT-International), Gournay-Sur-Marne, France, 1990. 431 p.
- [3] Special Issue on Strength of Mismatched Welded Joints. Eds. R.H. Dodds, K.-H. Schwalbe, M. Kocak and C. Thaulow. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. **64** (1999) 4: November. United Kingdom: Pergamon, 1999. 147 p.
- [4] P. Nevasmaa, M. Toyoda, M. Vilpas ja R. Karppi, R, 1987: 'Uudet termomekaanisesti valssatut teräkset - edut ja rajoitukset'. *VTT Tiedotteita 760*. Espoo 1987. 76 s. + liitt.
- [5] P. Nevasmaa, 1997: 'Lujien terästen hitsaus - hitsattavuus, muutosvyöhykkeen sitkeys ja halkeiluilmiöt'. Ammattienedistämislaitos/INSKO: "Lujat ja erikoislujat teräkset", Tampere, 8-9.10.1997. AEL/INSKO H040001/97-14. Helsinki: Ammattienedistämislaitos (AEL), 1997. 38 s.
- [6] P. Nevasmaa, 1999: 'Hitsausliitoksen mekaaniset ominaisuudet - metallurgiset seikat'. Ammattienedistämislaitos / INSKO: "Terästen hitsattavuus ja hitsausmetallurgia", Helsinki, 17-18.2.1999. AEL/INSKO H0422/99-2. Helsinki: Ammattienedistämislaitos (AEL), 1999. 34 s.
- [7] A. Laukkanen, P. Karjalainen-Roikonen, P. Nevasmaa, T. Andersson and L. Elers, 2009: 'Fracture Mechanical Fitness-for-Purpose Assessment of Undermatching High Strength Steel Welds'. *VTT Research Report No VTT-R-01115-09*. VTT, Espoo 2009. 45 p.
- [8] 'FITNET' Fitness-for-Service (FFS) Procedure. Vol. 1. Eds. M. Kocak, S. Webster, J.J. Janosch, R.A. Ainsworth, R. Koers. European Fitness-for-service Network. CEN 2006.
- [9] P. Nevasmaa & A. Laukkanen, 2005: 'Hitsausliitoksen yli- ja alilujien vyöhykkeiden (nk. lujuuden mis-match) vaikutukset rakenteelliseen eheyteen ja kuormankantokykyyn - SHI:n Materiaalifoorumin esiselvitys'. *Tutkimusraportti No. BTUO72-051350*. VTT Tuotteet ja tuotanto, Espoo 2005. 38 s + liitt.
- [10] L.P. Karjalainen, T. Taulavuori, M. Sellman, and A. Kyröläinen, 2008: 'Some Strengthening Methods for Austenitic Stainless Steels'. *Steels Research International* 79 (2008) 6. pp. 404-412.
- [11] P. Nevasmaa, A. Laukkanen and M. Sirén, 2008: 'Inclusion of the Weld Strength Mis-Match Effect into Material Characterisation Scheme for Structural Integrity Analysis'. *IIW-Doc. IX-2281-08 (IX-L-1024-08)*. "The 61st Annual Assembly of the International Institute of Welding", July 6-11, 2008, Graz, Austria: The International Institute of Welding (IIW), 2008. 35 p.
- [12] P. Kauppinen, P. Nevasmaa ja L.P. Karjalainen, 2009: 'Paikallisen alilujuuden vaikutus muokkaamalla lujitettujen terästen hitsausliitosten ominaisuuksiin (MIS-MATCH)'.

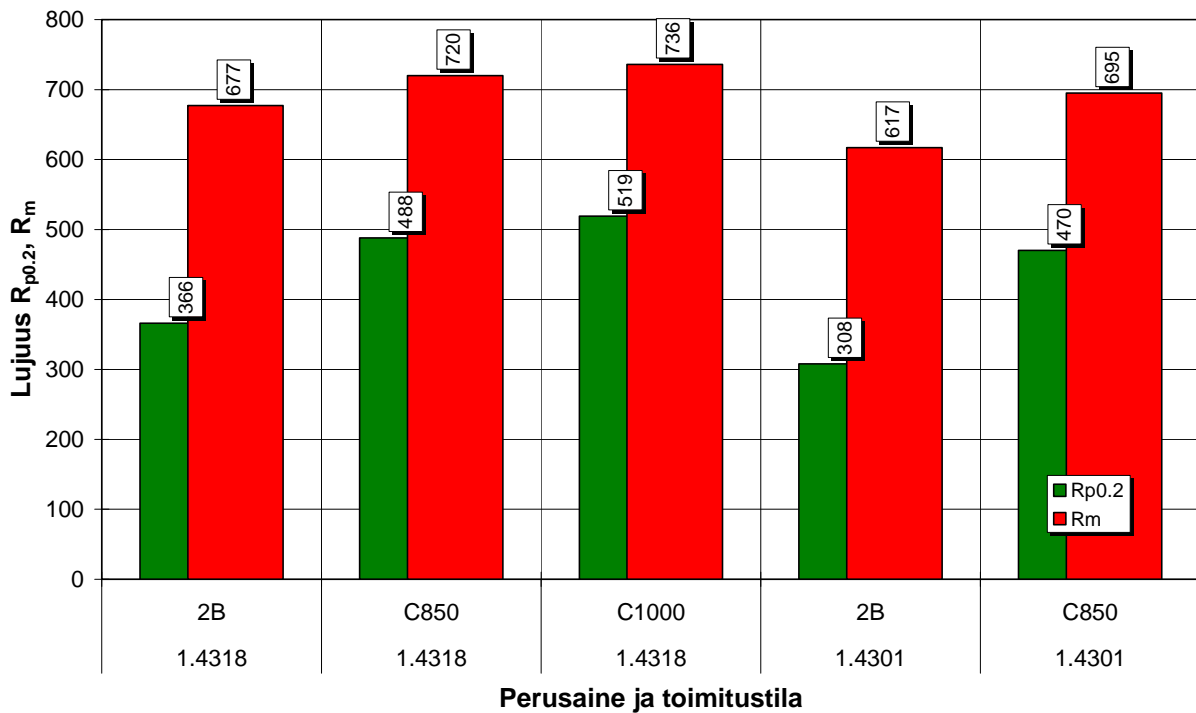
Julkaisussa: ”*NewPro – Uusiutuva metalliteknologia – uudet tuotteet 2004–2009*”. *Tekesin ohjelmaraportti 2/2009*. Helsinki: Teknologian ja innovaatioiden kehittämissentrumus. Helsinki 2009. pp. 66-70.

- [13] L.P. Karjalainen, T. Oikarinen, M.C. Somani and A. Kyröläinen, 2009: 'Softening of Temper-Rolled Austenitic Stainless Steels in Welding'. “*The 15th International Conference & Exhibition on the Joining of Materials (JOM-15) & 6th International Conference on Education in Welding (ICEW-6)*”, May 3-6, 2009, Helsingør (Elsinore), Denmark.

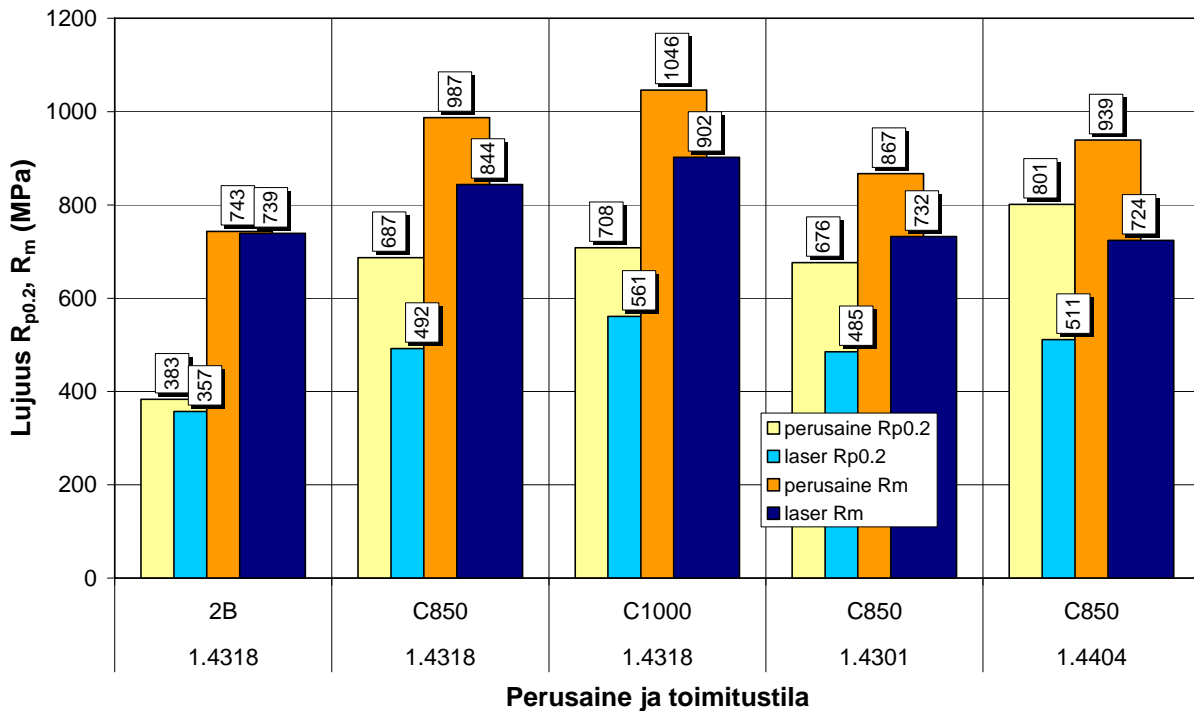
- [14] M.C. Somani & L.P. Karjalainen, 2009: 'Influence of Simulated Weld Thermal Cycles on Microstructural Changes and Softening Behaviour of Stainless Steels: An Introspection on Structure – Property Correlations'. *Final Report*. University of Oulu, Department of Mechanical Engineering, Materials Engineering Laboratory. Oulu: September 2009. 46 p.



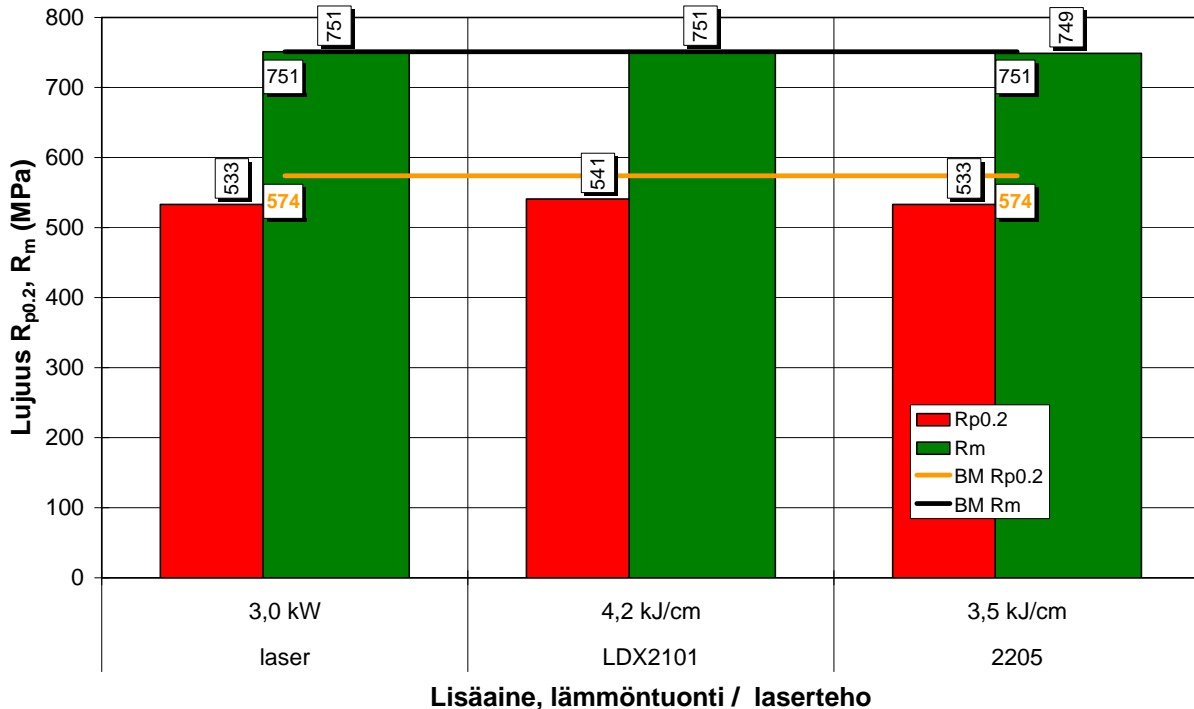
Kuva 1. SFS-EN 895 mukaisen hitsin poikittaisen vetokokeen (kuvut hiottuna) vetokokeen tulokset perusaineelle 1.4318 C850: lämmöntuonnin ja lisäaineen vaikutus.



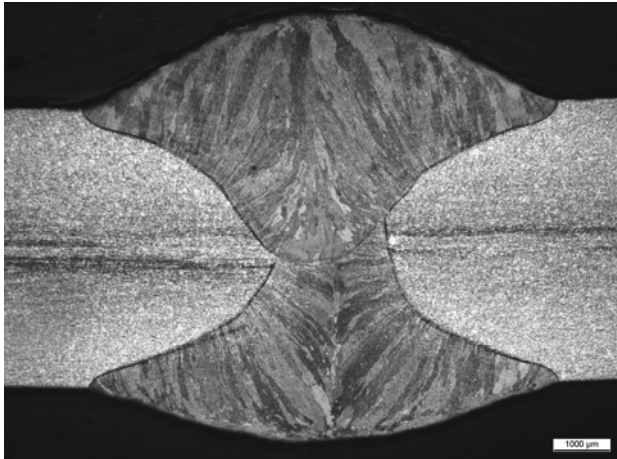
Kuva 2. SFS-EN 895 mukaisen hitsin poikittaisen vetokokeen (kuvut hiottuna) tulokset austeniittisille perusaineille 1.4318 ja 1.4301 eri toimitustiloissa. Lisäaine ϕ 1 mm 308LSi, lämmöntuonti 3,3 kJ/cm.



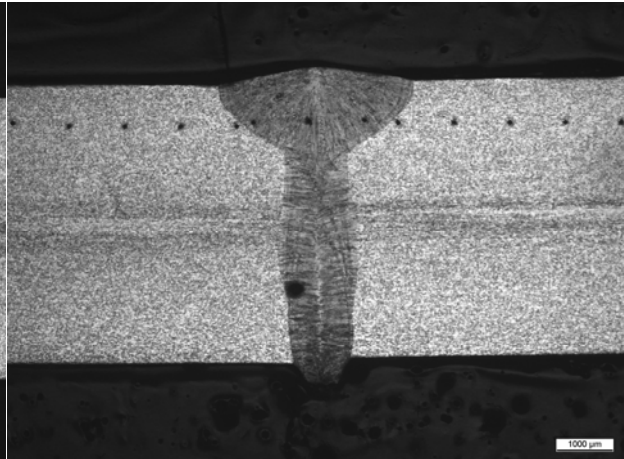
Kuva 3. SFS-EN 895 mukaisen hitsin poikittaisen vetokokeen (kuvat hiottuna) vetookeen tulokset austeniittisille perusaineille 1.4318, 1.4301 ja 1.4404 eri toimitustiloissa. Laserhitsauksen vaikutus, laserteho 3 kW



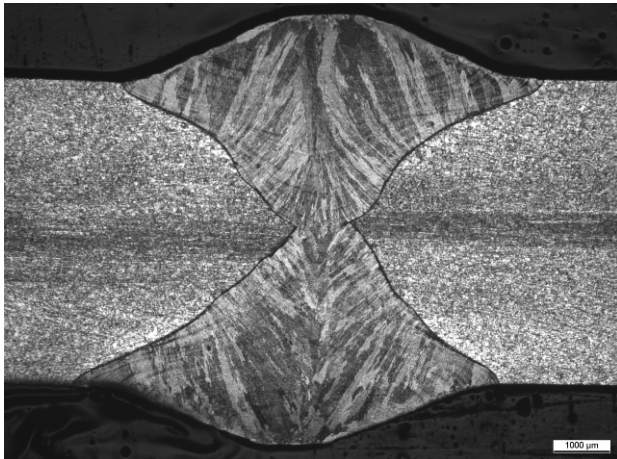
Kuva 4. SFS-EN 895 mukaisen hitsin poikittaisen vetokokeen (kuvat hiottuna) tulokset duplex-perusaineelle 1.4162 kuumavalssatussa 1D-toimitustilassa. Hitsausmenetelmän ja lisäineen vaikutus.



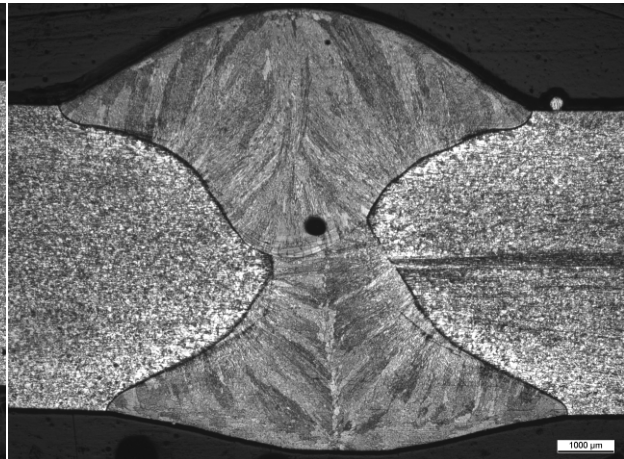
301-2B-4.0
 Perusaine: 1.4318 2B
 Lisäaine: \varnothing 1,0 mm 308LSi
 Arvot: 3,3 kJ/cm, 0,65 m/min



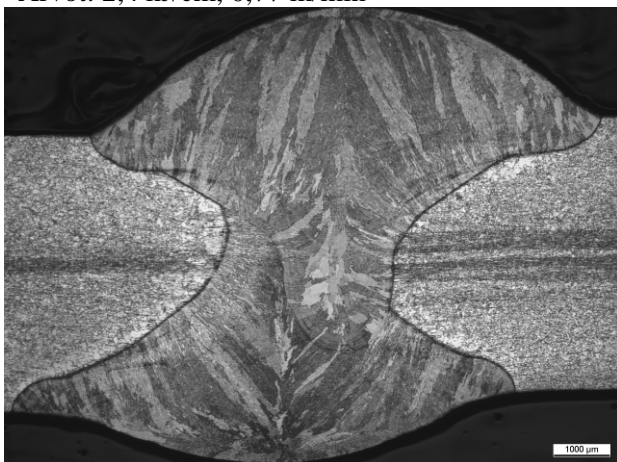
301-2B-LB
 Perusaine: 1.4318 2B
 Lisäaineeton laserhitsi
 Arvot: 3 kW, 0,80 m/min



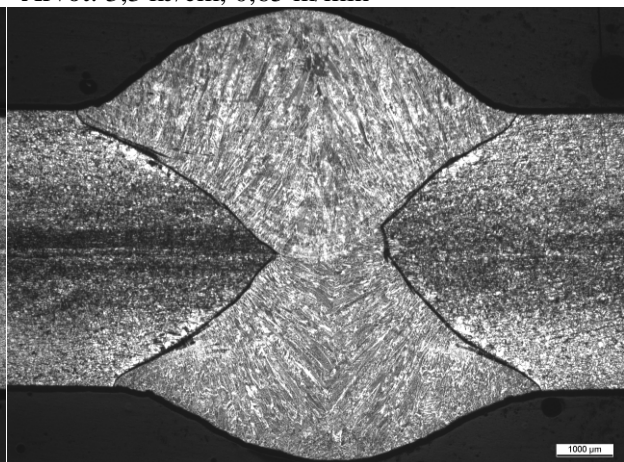
301-M-3.0
 Perusaine: 1.4318 C850
 Lisäaine: \varnothing 1,0 mm 308LSi
 Arvot: 2,4 kJ/cm, 0,77 m/min



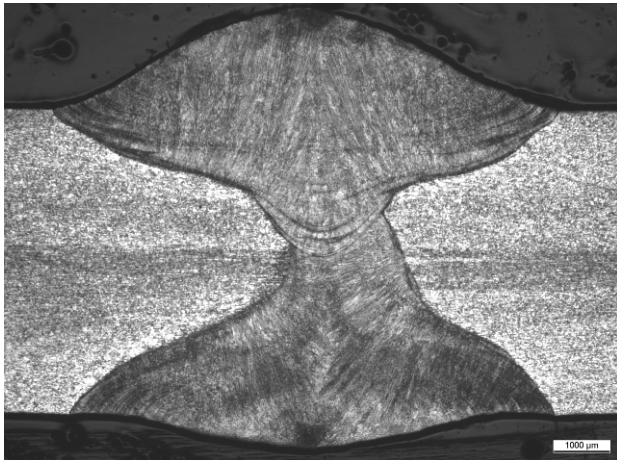
301-M-4.0
 Perusaine: 1.4318 C850
 Lisäaine: \varnothing 1,0 mm 308LSi
 Arvot: 3,3 kJ/cm, 0,65 m/min



301-M-6.0
 Perusaine: 1.4318 C850
 Lisäaine: \varnothing 1,2 mm 308LSi
 Arvot: 4,8 kJ/cm, 0,7 m/min



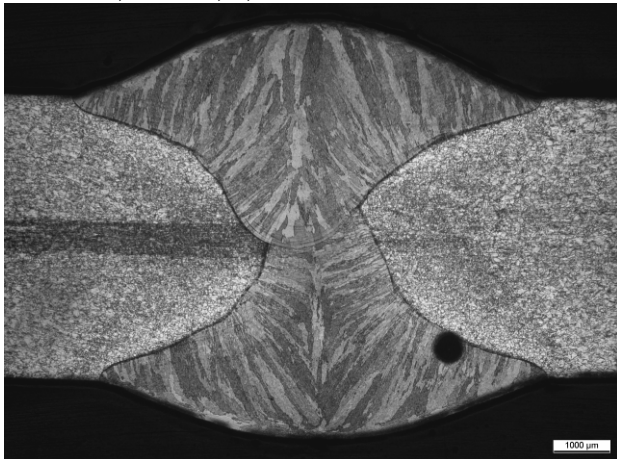
301-DX
 Perusaine: 1.4318 C850
 Lisäaine: \varnothing 1,0 mm 2205
 Arvot: 3,3 kJ/cm, 0,65 m/min



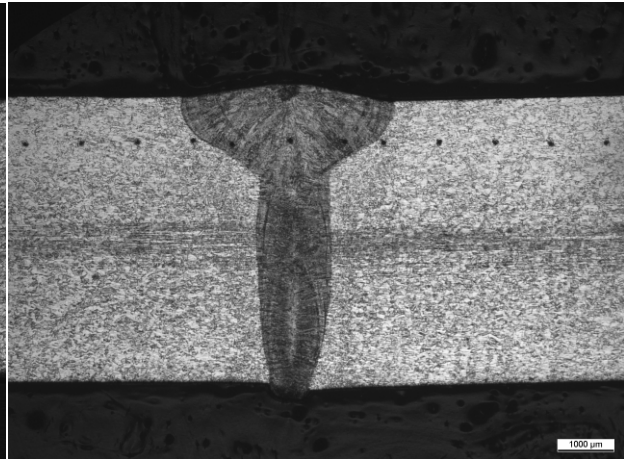
301-SM
 Perusaine: 1.4318 C850
 Lisäaine: \varnothing 1,2 mm 15.55 (täytelanka)
 Arvot: 4,0 kJ/cm, 0,65 m/min



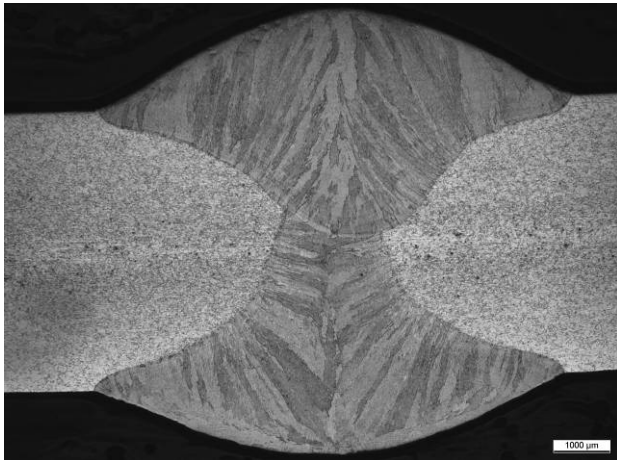
301-LB
 Perusaine: 1.4318 C850
 Lisäaineeton laserhitsi
 Arvot: 3 kW



301-TRH-M-4.0
 Perusaine: 1.4318 C1000
 Lisäaine: \varnothing 1,0 mm 308LSi
 Arvot: 3,3 kJ/cm, 0,65 m/min



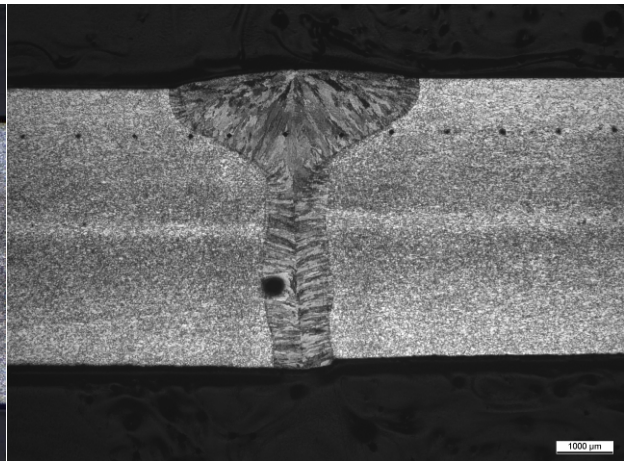
301-TRH-LB
 Perusaine: 1.4318 C1000
 Lisäaineeton laserhitsi
 Arvot: 3 kW, 0,65 – 0,7 m/min



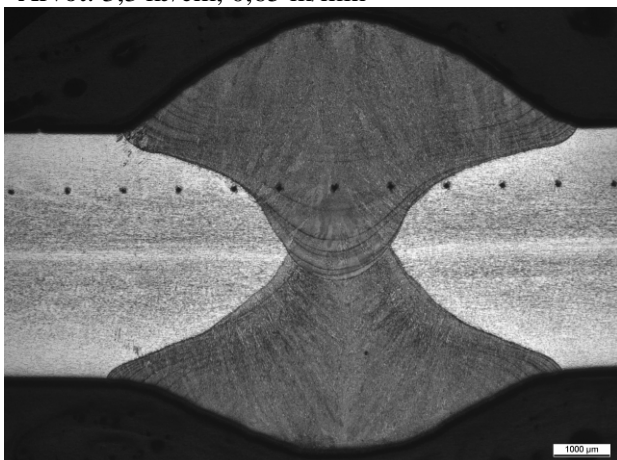
304-2B-M-4.0
 Perusaine: 1.4301 2B
 Lisäaine: \varnothing 1,0 mm 308LSi
 Arvot: 3,3 kJ/cm, 0,65 m/min



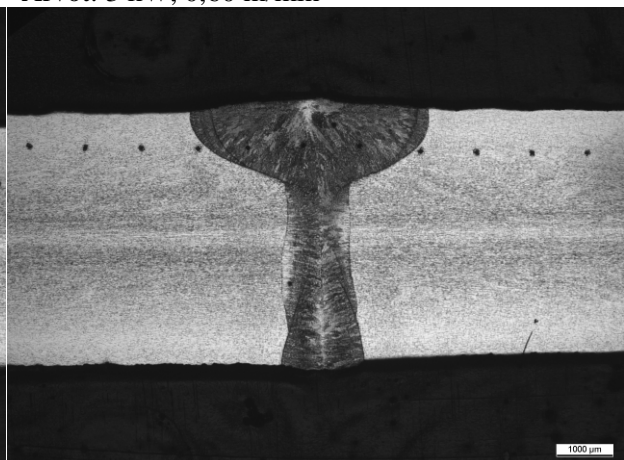
304-TR-M-4.0
 Perusaine: 1.4301 C850
 Lisäaine: \varnothing 1,0 mm 308LSi
 Arvot: 3,3 kJ/cm, 0,65 m/min



304-TR-LB
 Perusaine: 1.4301 C850
 Lisäaineeton laserhitsi
 Arvot: 3 kW, 0,60 m/min



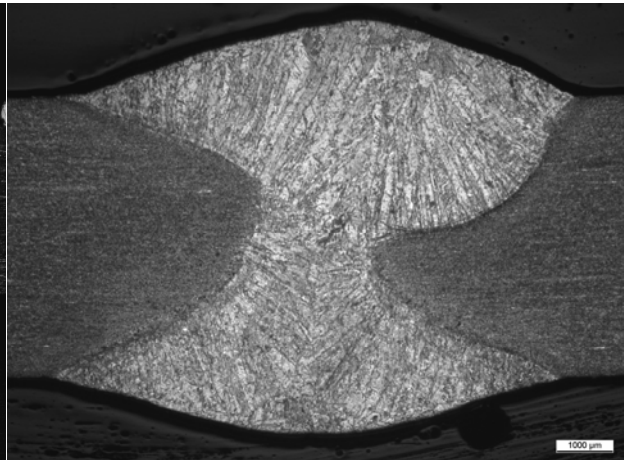
316-TR-M-4.0
 Perusaine: 1.4404 C850
 Lisäaine: \varnothing 1,0 mm 308LSi
 Arvot: 3,3 kJ/cm, 0,65 m/min



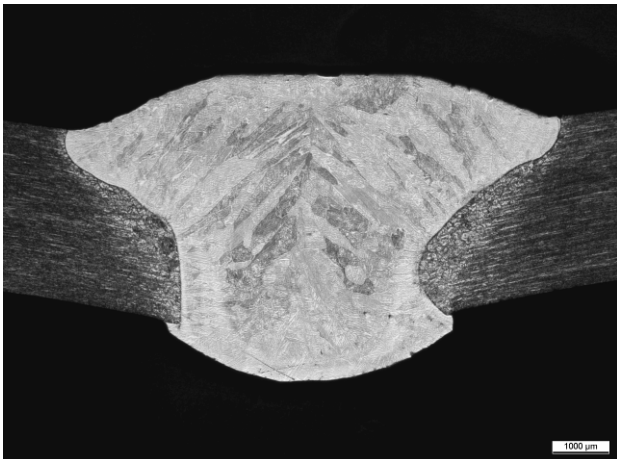
316-TR-LB
 Perusaine: 1.4404 C850
 Lisäaineeton laserhitsi
 Arvot: 3 kW, 0,70 m/min



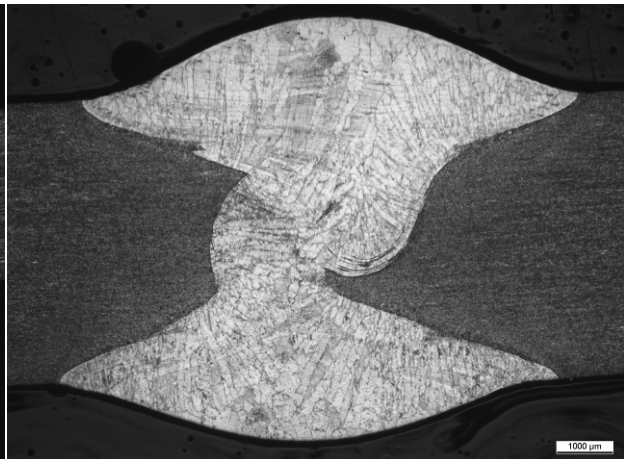
Esikoe 1.4162 + LDX 2101
Perusaine: 3 mm 1.4162
Lisäaine: 1,0 mm LDX 2101



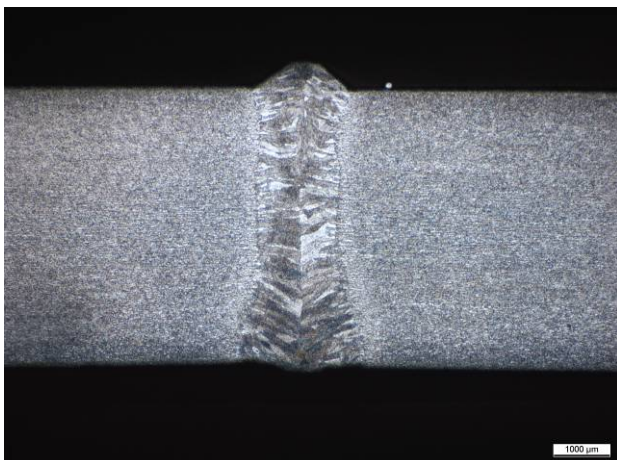
LDX-M
Perusaine: 5 mm 1.4162 1D
Lisäaine: \varnothing 1,0 mm LDX 2101
Arvot: 4,2 kJ/cm, 0,65 m/min



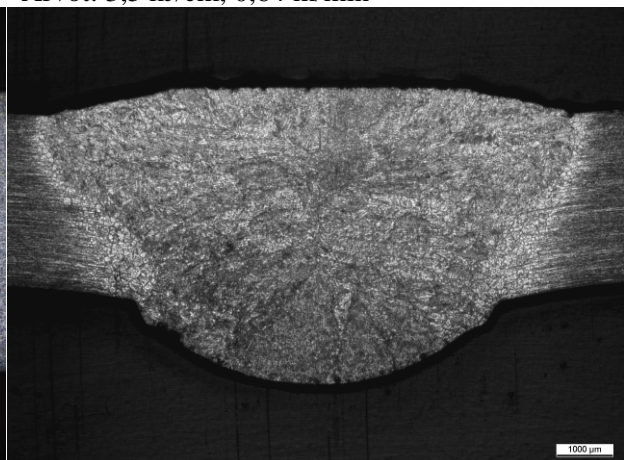
Esikoe 1.4162 + 2205
Perusaine: 3 mm 1.4162
Lisäaine: 1,0 mm 2205



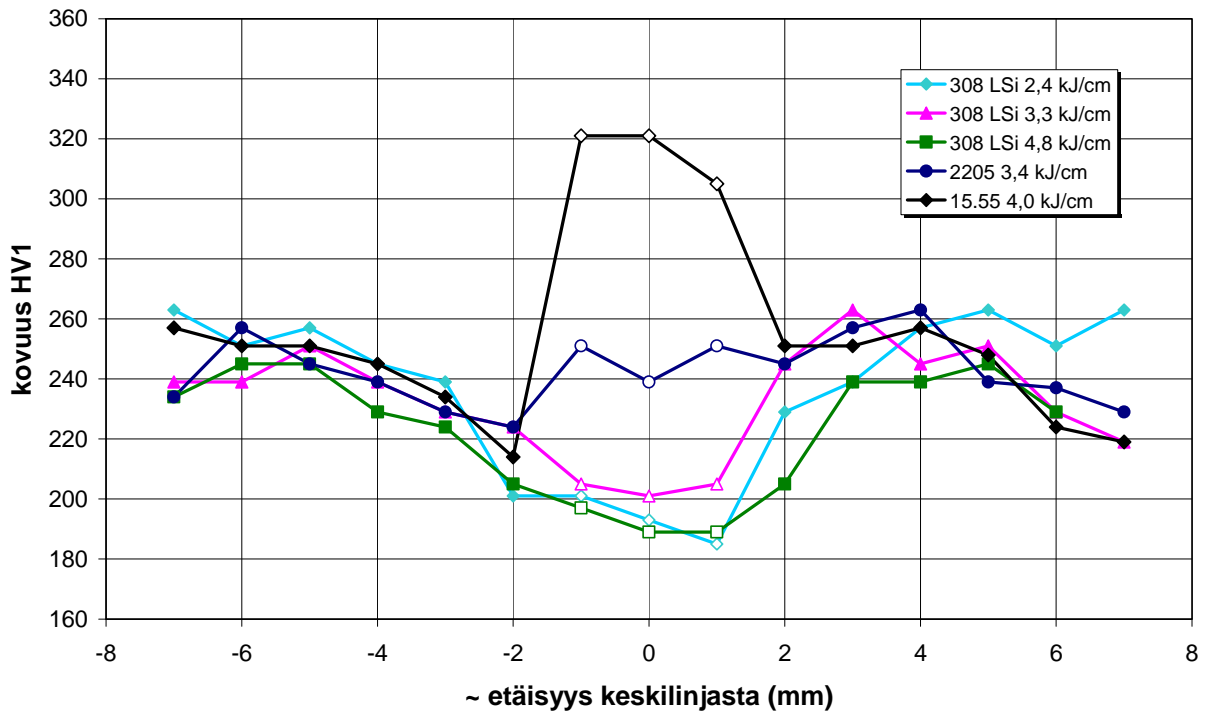
LDX-DX
Perusaine: 5 mm 1.4162 1D
Lisäaine: \varnothing 1,0 mm 2205
Arvot: 3,5 kJ/cm, 0,64 m/min



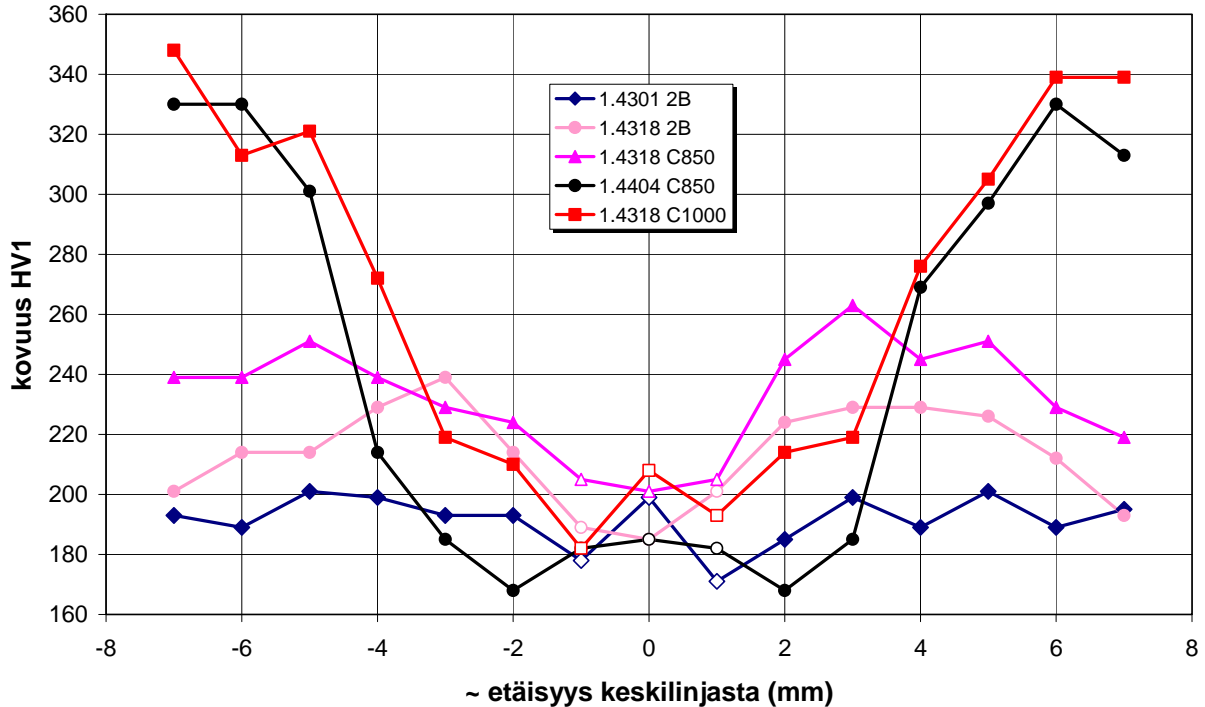
LDX-LB
Perusaine: 5 mm 1.4162 1D
Lisäaineeton laserhitsi
Arvot: 3 kW



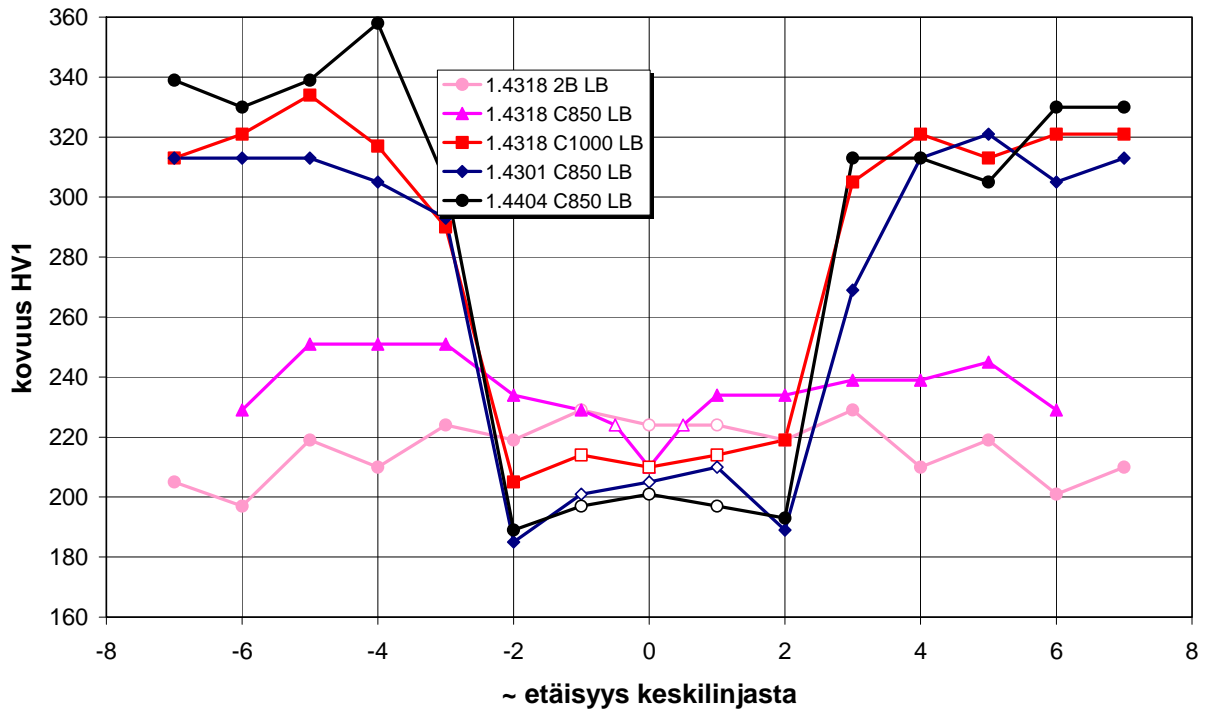
Esikoe 1.4462 + 2205
Perusaine: 3 mm 1.4462
Lisäaine: 1,0 mm 2205



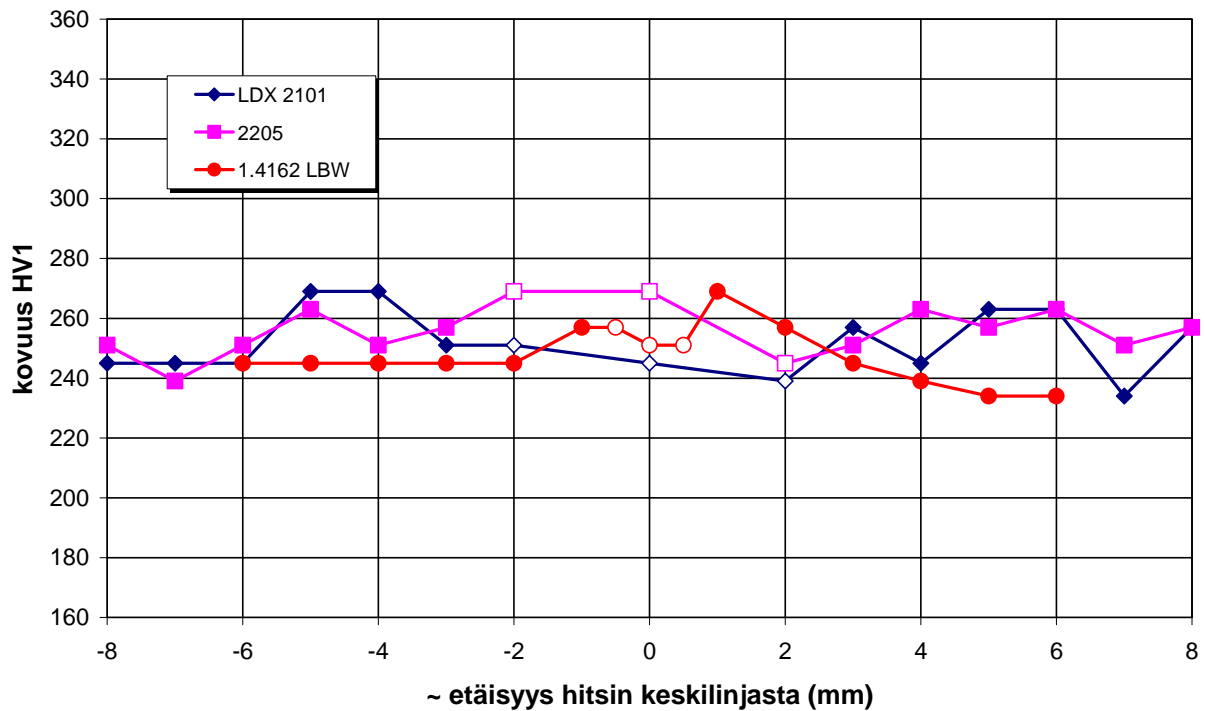
Kuva 1. Hitsien poikittaiset kovuusprofiilit austeniittiselle perusaineelle 1.4318 C850 eri toimitustiloissa. Lisäaineen ja lämmöntonin vaikutus.



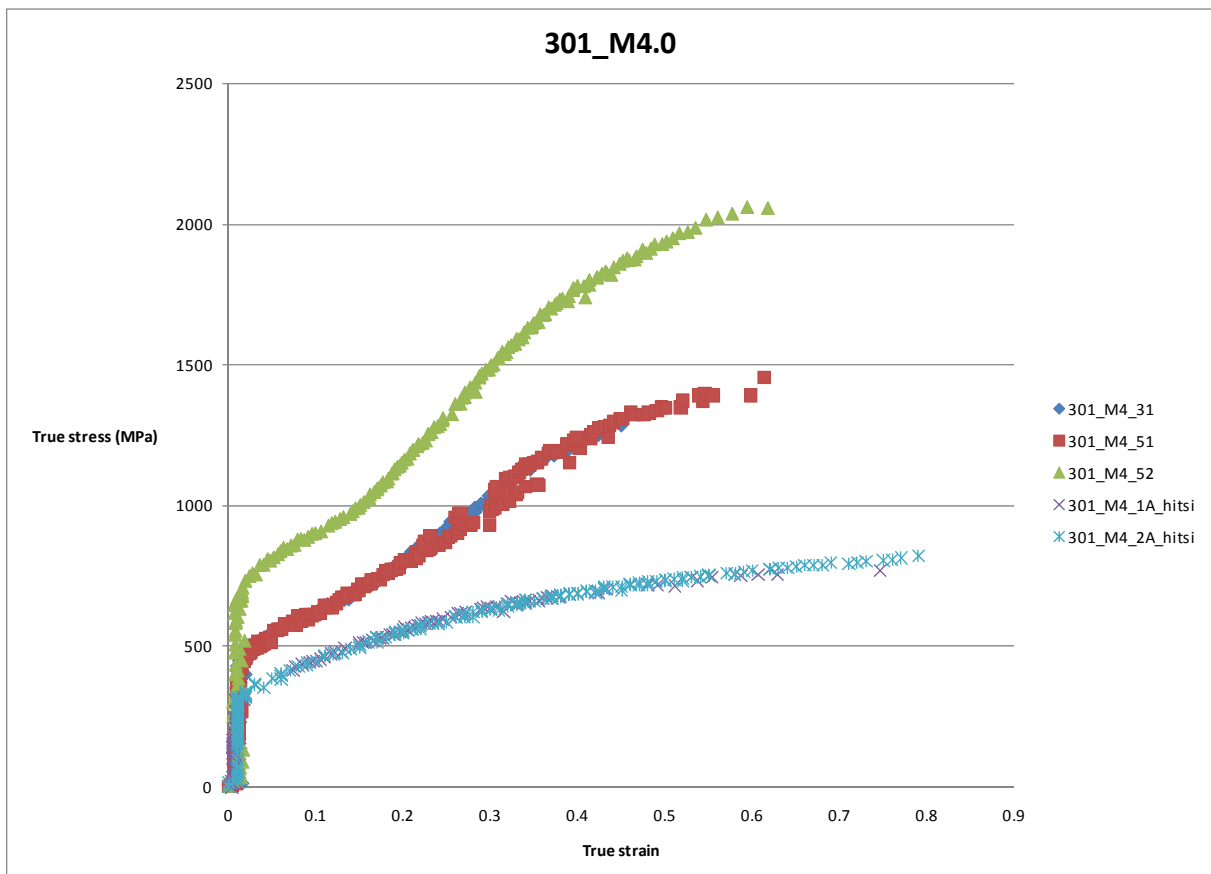
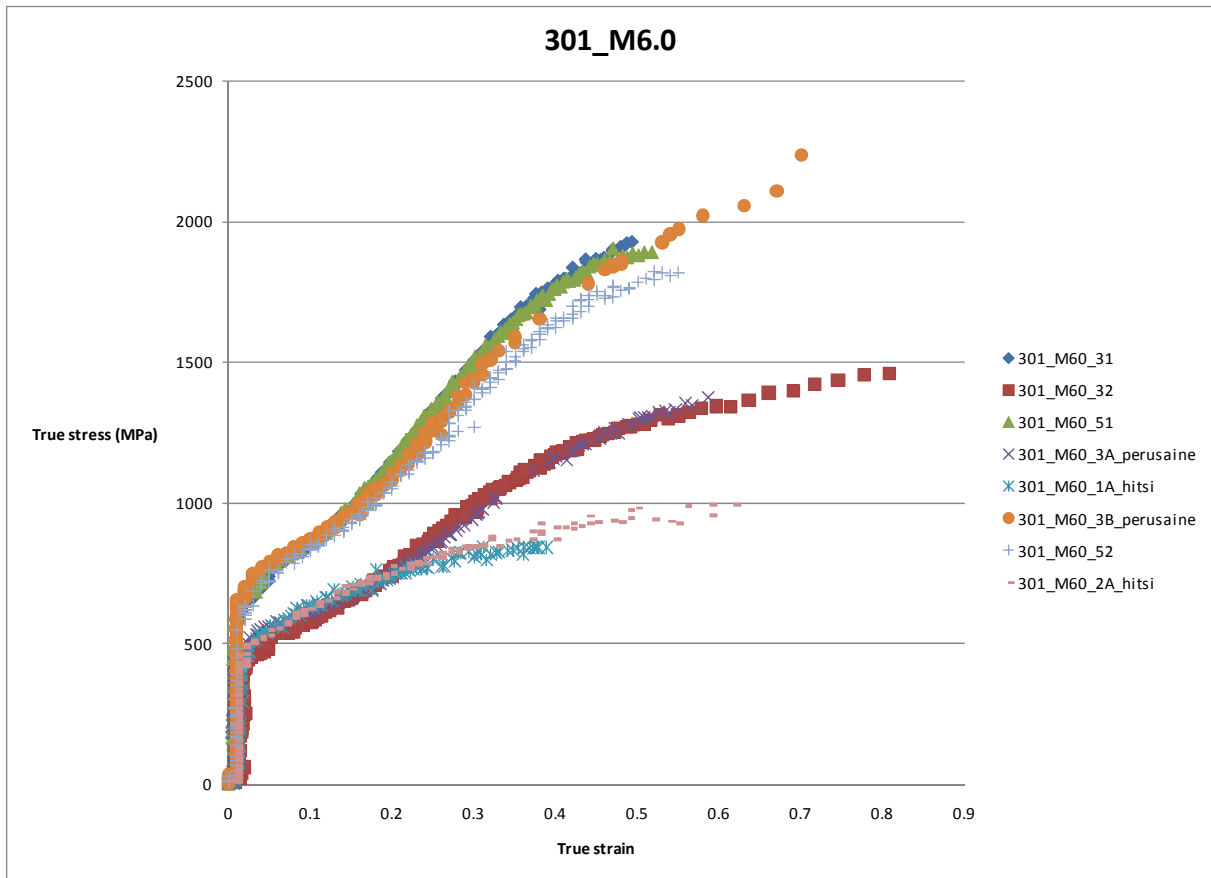
Kuva 2. Hitsien poikittaiset kovuusprofiilit austeniittisille perusaineille 1.4318, 1.4301 ja 1.4404 eri toimitustiloissa. Lisäaine ϕ 1 mm 308LSi, lämmöntuonti 3,3 kJ/cm.

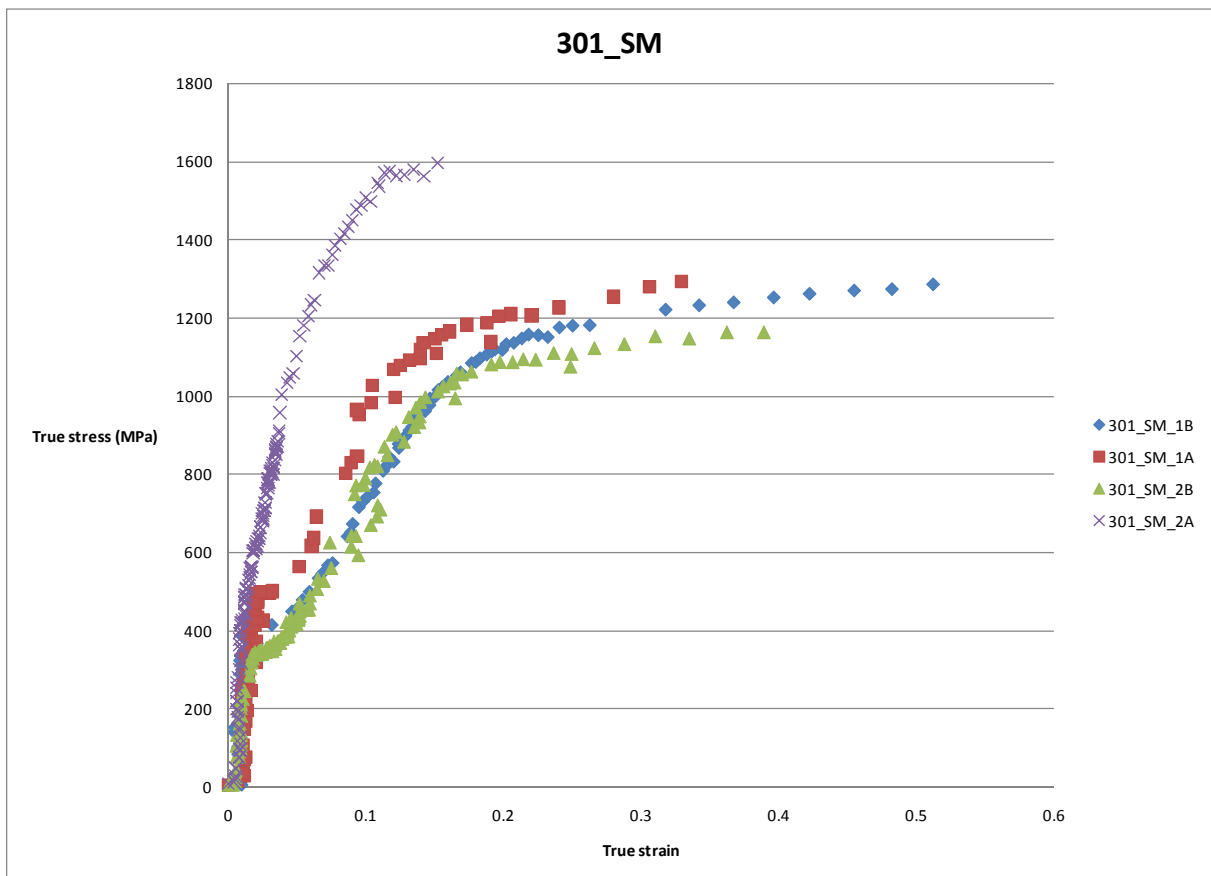
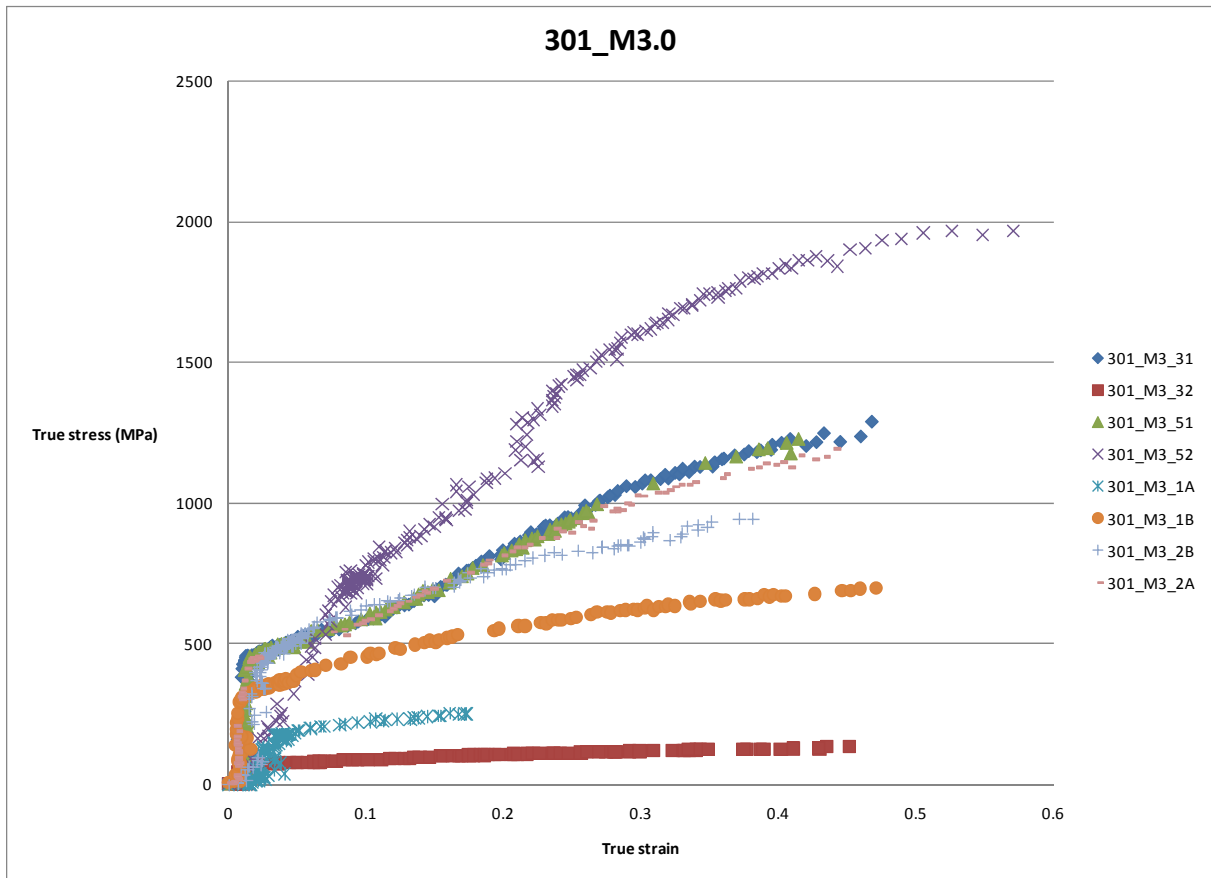


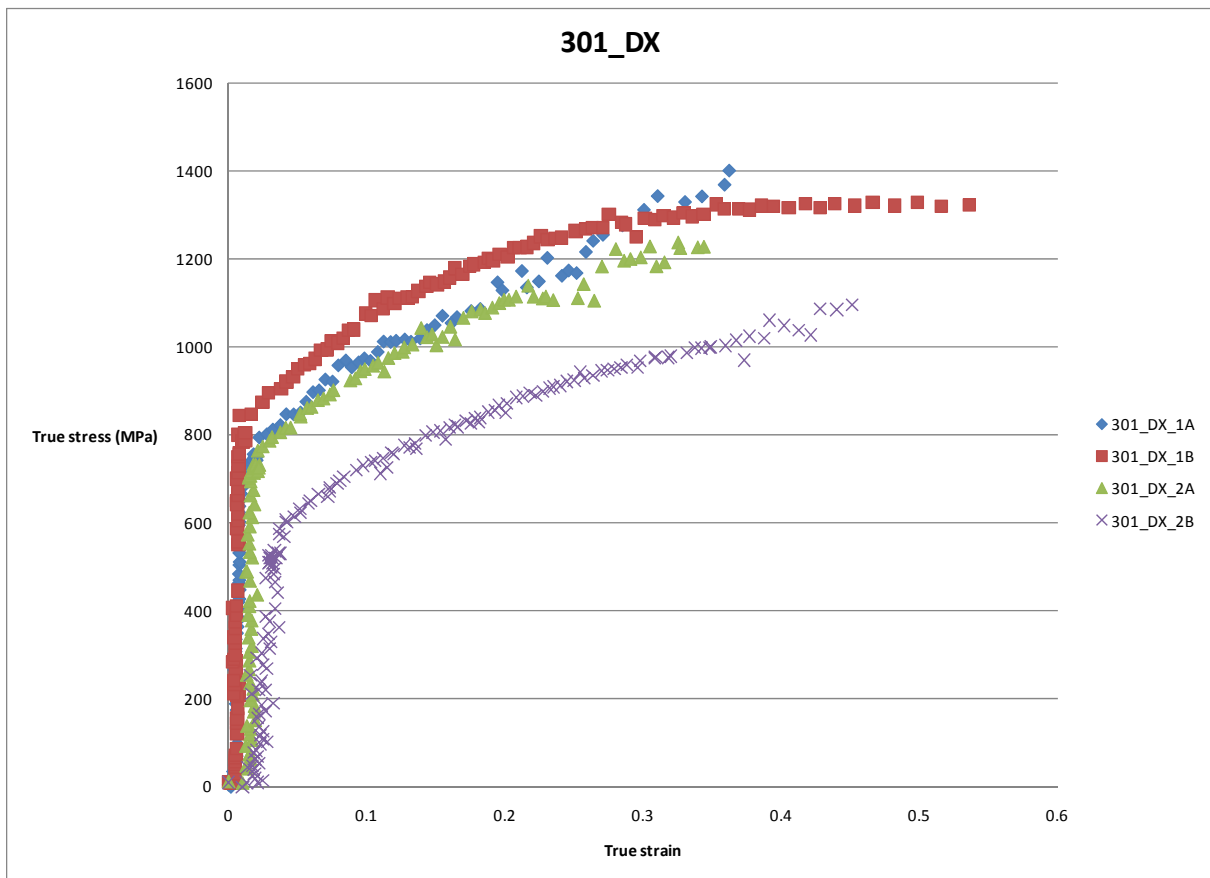
Kuva 3. Hitsien poikittaiset kovuusprofiilit austeniittisille perusaineille 1.4318, 1.4301 ja 1.4404 eri toimitustiloissa. Laserhitsauksen vaikutus, laserteho 3 kW. Huom. Suojakaasun käytöstä johtuva levyn yläpinnan läheisyydessä leviävä palon maljamainen muoto antaa vaihtelun todellista leveämmästä hitsistä. Todellisuudessa hitsin leveys on noin 1–1,5 mm valtaosalla hitsattavaa aineenpaksuutta, vrt. liitteen 2 makrohiekuvat.



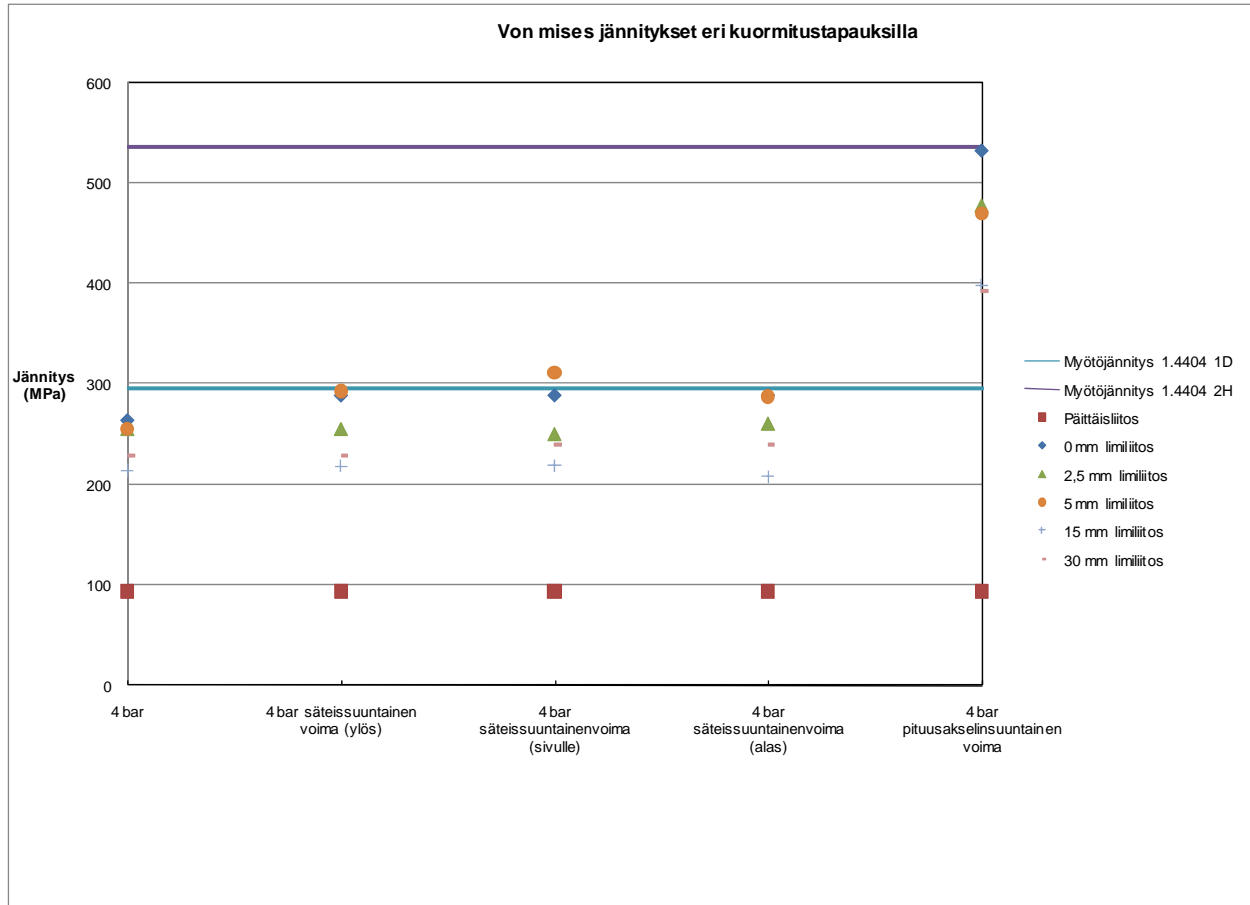
Kuva 4. Hitsien poikittaiset kovuusprofiilit duplex-perusaineille 1.4162 kuumavalssatussa 1D-toimitustilassa. Hitsausmenetelmän ja lisäaineen vaikutus.



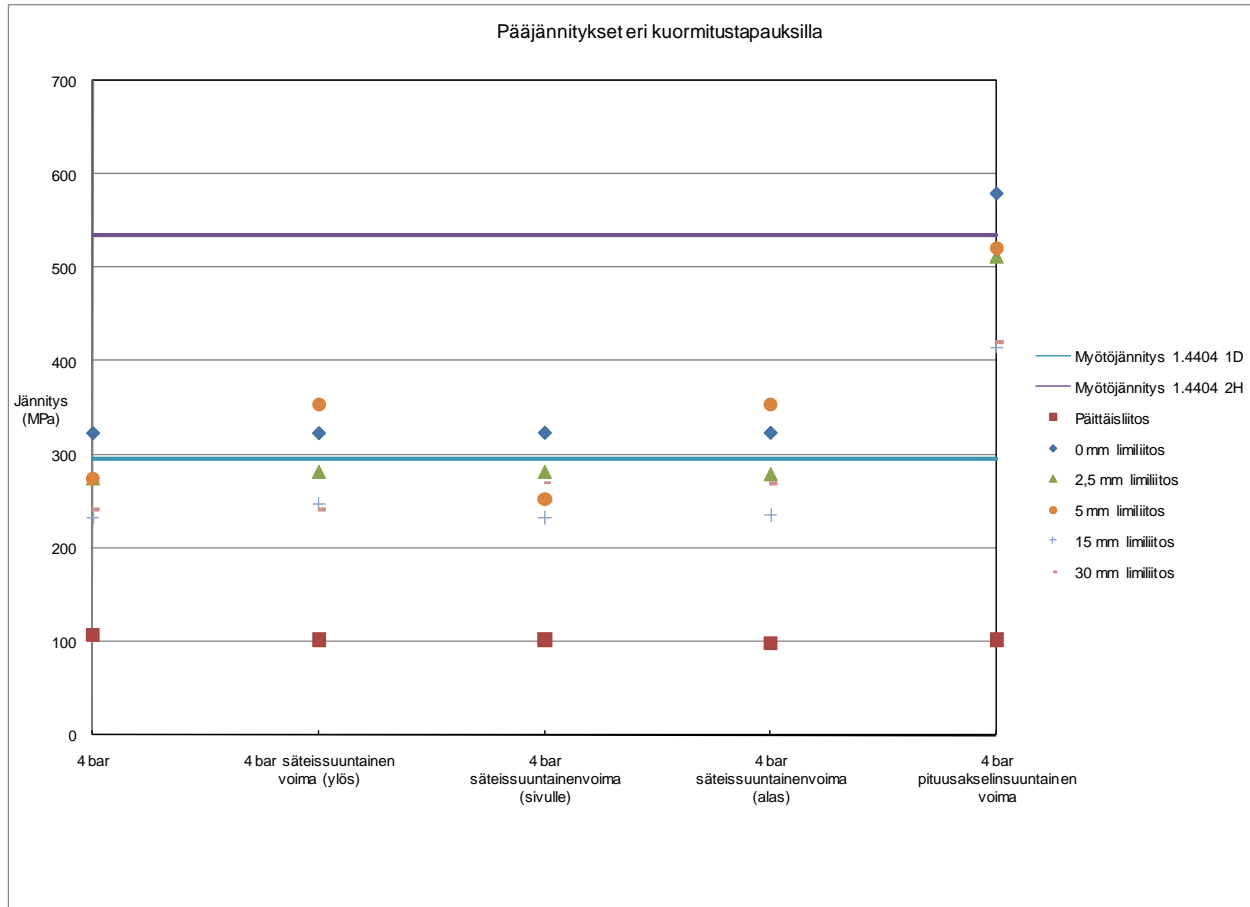




Kuvissa 1 ja 2 näkyvät jännitykset eri kuormitustapauksilla.

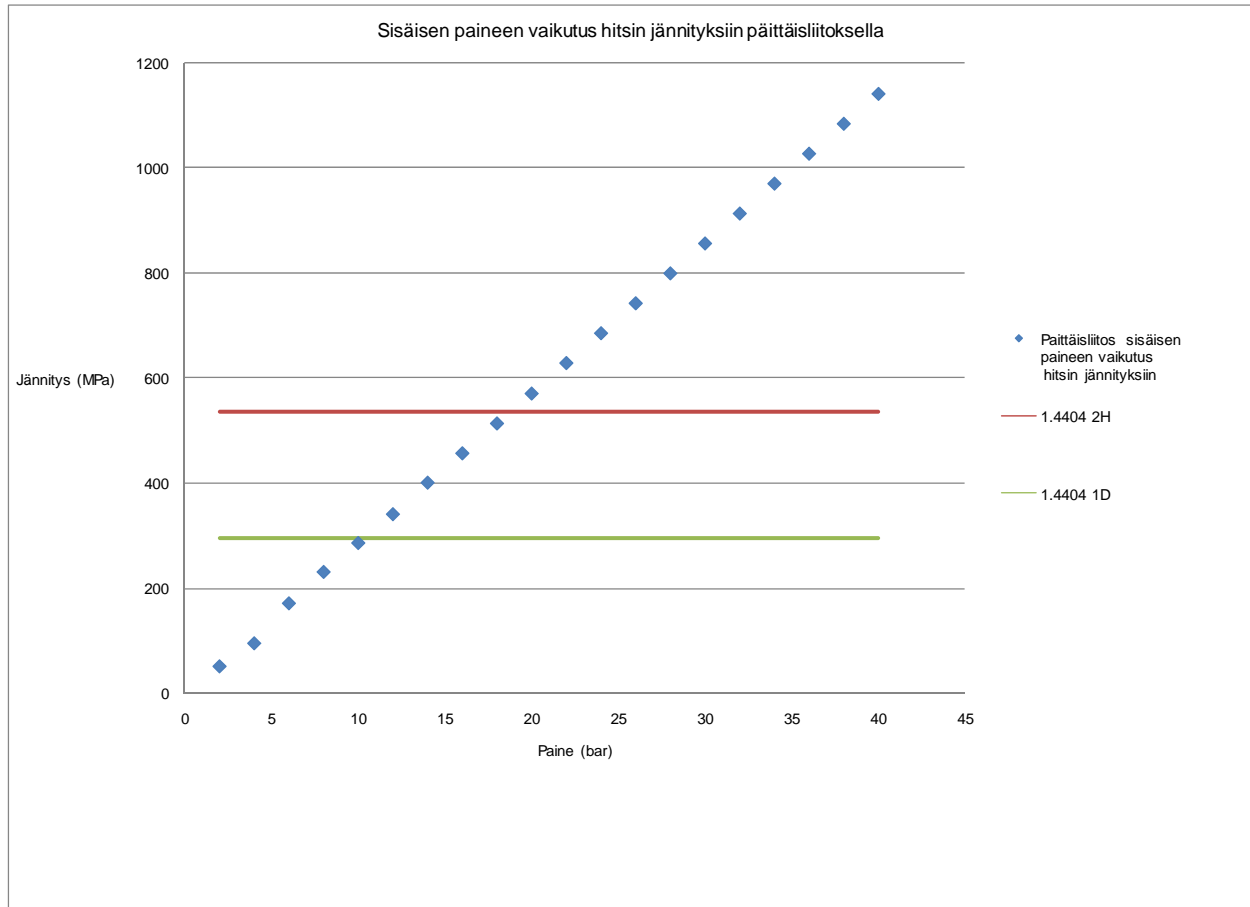


Kuva 1. Von Mises -jännitykset eri kuormitustapauksilla.



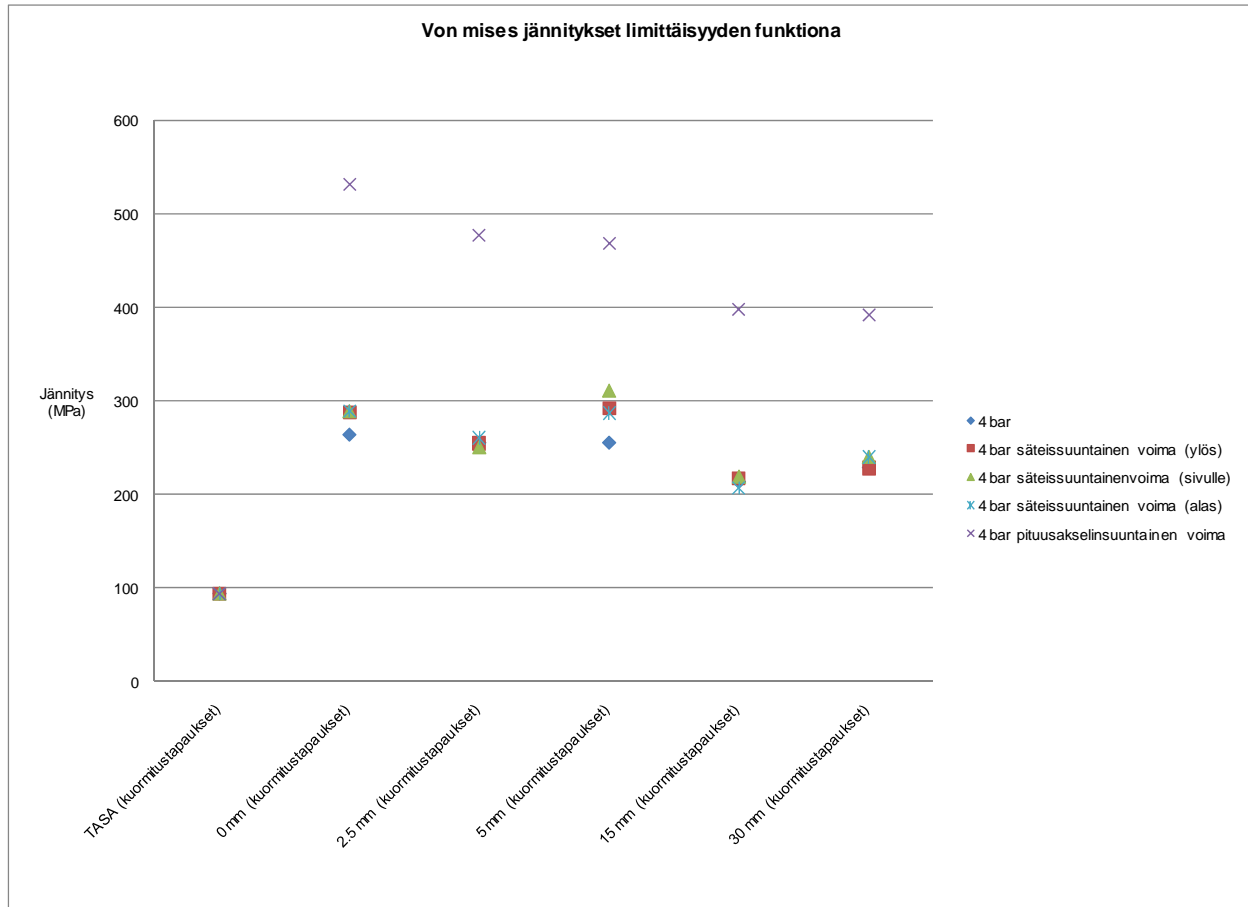
Kuva 2. Pääjännitykset eri kuormitustapauksilla.

Kuvassa 3 on esitetty sisäisen paineen vaikutusta hitsin jännityksiin päittäisliitoksella.

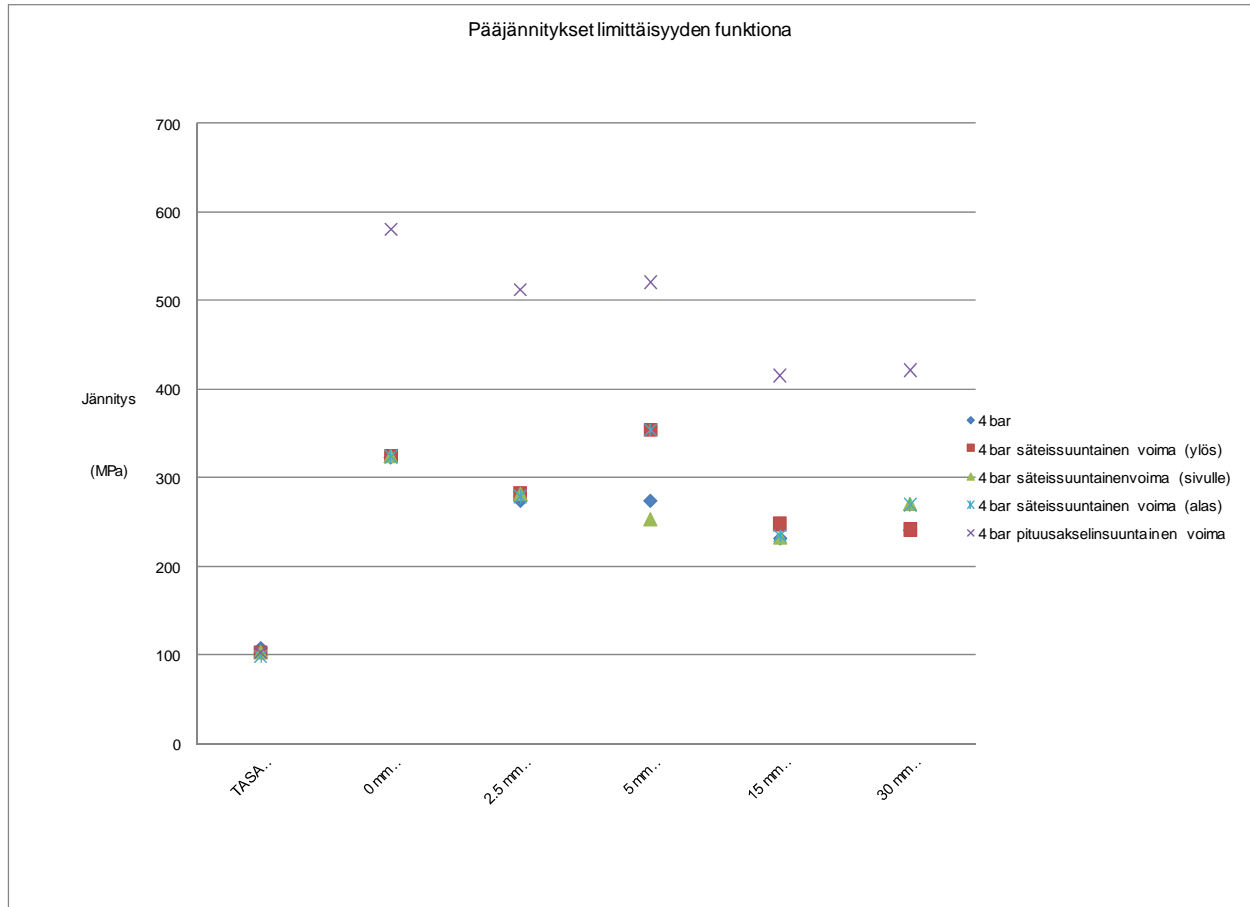


Kuva 3. Sisäisen paineen vaikutus hitsin jännityksiin päittäisliitoksella.

Kuvissa 4 ja 5 näkyvät Von Mises- ja pääjännitykset limittäisyyden funktiona.

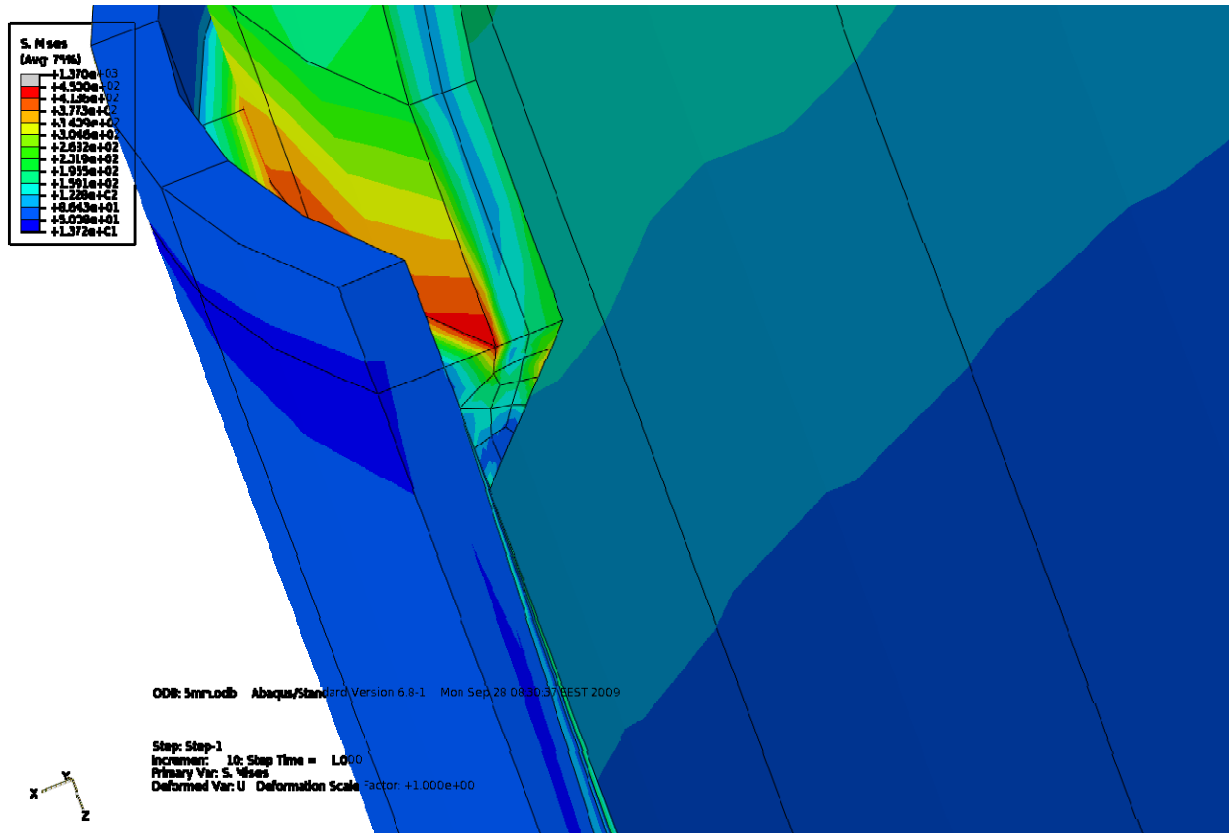


Kuva 4. Von Mises -jännitykset limittäisyyden funktiona.



Kuva 5. Pääjännitykset limittäisyyden funktiona.

Kuvassa 6 on esitetty kuinka jännitys jakaantuu hitsin alueelle limittäisliitoksella.



Kuva 6. Jännityksen jakautuminen limittäisliitoksen (5 mm) hitsissä vaipan ja päädyn rajalla. Kuormitustapaus: 4 bar ja säteisuuntainen voima (alas).