

Perttu Kauppi

ULTRALUJIEN TERÄSTEN HITSAUS

Teknisten tieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Lokakuu 2019

TIIVISTELMÄ

Perttu Kauppi: Ultralujien terästen hitsaus
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Materiaalitekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Lokakuu 2019

Terästen lujuuden kasvun myötä erilaisista rakenteista voidaan tehdä kevyempiä ohuempien ainepaksuuksien vuoksi. Tässä kandidaatintyössä tutkitaan ultralujien terästen soveltuvuutta hitsattaviksi, ja mitä etuja ja rajoituksia niiden hitsauksessa esiintyy. Työn alkuosassa käsitellään lujien terästen mekaanisia ominaisuuksia, valmistusprosesseja ja käyttökohteita sekä selvitetään, millaisia hyötyjä ultralujien terästen käytöllä saadaan aikaan. Työssä perehdytään tämän jälkeen yleisimpiin hitsausmenetelmiin ja niiden mahdollisuuksiin sekä etuihin lujempia teräksiä hitsattaessa. Hitsauksen vaikuttavista tekijöistä tärkeimpinä havaittiin lämmöntuonti, jäähtymisaika, seosaineet ja hiiliekvivalentti. Työssä tarkastellaan hitsausliitoksen vyöhykkeitä ja hitsausmetallurgisia ongelmia, jotka vaikuttavat merkittävästi hitsin ja perusaineen laatuun. Työn lopussa keskitytään Ruukin Optim-teräksen ja SSAB:n Strenx-teräksen hitsattavuuden arviointiin.

Työssä tarkasteltavien terästen myötölujuuden olivat 960 – 1300 MPa. Hitsiliitoksen laadulla on erittäin suuri merkitys siihen, että rakenteet kestävät. Pienellä lämmöntuonnilla ja sitä kautta lyhyellä jäähtymisajalla, saadaan hitsin laatu pysymään korkeampana. Seosaineet vaikuttavat teräksen mekaanisiin ominaisuuksiin sekä myös hitsin laatuun ja hitsattavuuteen. Hiiliekvivalentti - arvolla pystytään arvioimaan teräksen hitsattavuutta, johon vaikuttavat hiili- ja seosainepitoisuus. Hitsauksessa tuodulla lämmöllä voidaan vaikuttaa muun muassa halkeilutaipumukseen. Hitsausongelmia kuten kylmä- ja kuumahalkeilua voidaan estää myös hitsausmenetelmän valinnalla. Yleisesti laserhitsaus soveltuu erinomaisesti ultralujien terästen hitsaukseen, mutta myös MIG/MAG-, TIG- sekä plasma-hitsausmenetelmät soveltuvat kohtuullisen hyvin niiden hitsaukseen. Työssä tarkastellut Optim- ja Strenx-teräkset soveltuvat hyvin ultralujien terästen hitsaukseen, kunhan suositusten mukaisia hitsausarvoja noudatetaan.

Avainsanat: UHSS, ultraluja teräs, hitsaus.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämän kandidaatintyön aihe sai alkunsa syksyllä 2018. Projekti on ollut mielenkiintoinen ja pal-
kitseva, mutta samalla se on myös ollut haastava.

Haluan kiittää työn ohjaajaa Johanna Ruorasta hyvistä ideoista ja avusta. Kiitos kuuluu myös
perheelleni ja ystäville työn loppuun asti saattamisessa.

Lammilla 10.10.2019

Perttu Kauppi

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	i
ALKUSANAT	ii
SISÄLLYSLUETTELO	iii
KUVALUETTELO	iv
LYHENTEET JA MERKINNÄT	v
1. JOHDANTO	1
1.1 Tausta	1
1.2 Tavoitteet ja rajaus	1
2. ULTRALUJAT TERÄKSET	3
2.1 Valmistustavat ja mikrorakenne	3
2.1.1 Karkaisu ja päästö	3
2.1.2 Termomekaaninen valssaus	4
2.1.3 Suorakarkaisu	5
2.2 Käyttökohteet	6
3. ULTRALUJIEN TERÄSTEN HITSATTAVUUS	7
3.1 Hitsausmenetelmät	7
3.1.1 Kaasuhitsaus	7
3.1.2 Kaarihitsaus	8
3.1.3 Korkeaenerginen sädehitsaus	11
3.1.4 Muut hitsausmenetelmät	11
3.2 Hiiliekvivalentti	12
3.3 Seosaineiden vaikutukset	13
3.4 Hitsausliitoksen vyöhykkeet	15
3.5 Lämmöntuonti ja jäähtymisaika $t_{8/5}$	18
3.6 Hitsausmetallurgiset ongelmat	20
3.7 Korkean myötölujuusluokan terästen hitsattavuus	22
4. YHTEENVETO	27
LÄHTEET	28

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Termomekaaninen valssauslinja.</i>	<i>4</i>
Kuva 2.	<i>Perinteisen karkaisun ja suorakarkaisun erot.</i>	<i>5</i>
Kuva 3.	<i>Ultralujien terästen käyttökohteita.</i>	<i>6</i>
Kuva 4.	<i>MIG/MAG -hitsauksen periaate.</i>	<i>8</i>
Kuva 5.	<i>Kaariplasman muodostuminen plasmahitsauksessa.</i>	<i>10</i>
Kuva 6.	<i>Syvätkunkeuma-laserhitsauksessa avaimenreiän muodostuminen.</i>	<i>11</i>
Kuva 7.	<i>Austeniittirakeiden alkamislämpötilat suhteutettuna seosaineiden Al, Zr ja Ti määrään.</i>	<i>13</i>
Kuva 8.	<i>Hitsausliitokseen syntyvät vyöhykkeet 0,15 % hiillipitoisuudella.</i>	<i>16</i>
Kuva 9.	<i>MIG-hitsin ja muutosvyöhykkeen mikrorakenteen mikroskooppikuvat.</i>	<i>17</i>
Kuva 10.	<i>Laserhitsin ja muutosvyöhykkeen mikrorakenteen mikroskooppikuvat.</i>	<i>17</i>
Kuva 11.	<i>Jäähtymisajan $t_{8/5}$ vaikutus muutosvyöhykkeen kovuuteen ja iskusitkeyden transitiolämpötilaan.</i>	<i>18</i>
Kuva 12.	<i>Hitsin karkearakeisen vyöhykkeen raekoot eri jäähtymisnopeuksilla.</i>	<i>19</i>
Kuva 13.	<i>Kylmähalkeamien esiintymien muutosvyöhykkeessä ja hitsiaineessa.</i>	<i>20</i>
Kuva 14.	<i>Kuumahalkeilun esiintyminen hitsissä.</i>	<i>21</i>
Kuva 15.	<i>Lamellirepeilyn esiintymispaikat ja repeilymekanismit.</i>	<i>22</i>
Kuva 16.	<i>Strenx-terästen suurimmat lämmöntonnin rajat levyn paksuuden funk- tiona.</i>	<i>24</i>
Kuva 17.	<i>Strenx-terästen hitsauksen suositeltuja esilämmitys lämpötiloja.</i>	<i>25</i>
Kuva 18.	<i>Strenx-terästen suositellut jäähtymisajat.</i>	<i>25</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AHSS	Advanced High Strength Steel, erikoislujateräs
A_s	Murtovenymä eli prosentuaalinen venymä
CEV	Hiiliäkvivalentti
DQ	Direct Quenching, suorakarkaisu
HAZ	Muutosvyöhyke
MAG	Metal active gas -hitsausmenetelmä
MIG	Metal inert gas -hitsausmenetelmä
QT	Quenching and Tempering, karkaisu ja päästö eli nuorutus
R_m	Murtolujuus
$R_{0.2}$	0.2-myötöraja
$t_{8/5}$	Jäähymisaika (800 °C → 500 °C)
TIG	Tungsten Inert Gas Arc Welding -hitsausmenetelmä
TMCP	Thermo Mechanical Controlled Process, termomekaaninen valssaus

1. JOHDANTO

Ultralujien terästen käyttö on lisääntynyt viime vuosina, ja markkinoilla on tarjolla entistä enemmän lujia teräslaatuja. Niitä käytetään muun muassa teräsrakenteissa, koneenrakennuksessa, kaivosteollisuudessa ja erilaisissa ajoneuvoissa. Korkeimpien lujuusominaisuuksien vuoksi voidaan ainepaksuutta ohentaa ja täten rakenteita keventämään. Tämä johtaa säästöihin energiankulutuksessa esimerkiksi kuorma-autoissa. Lujan teräksen myötölujuudeksi on määritelty 550– 900 MPa. Ultralujiksi kutsutaan vastaavasti teräksiä, joiden myötölujuus on yli 900 MPa. Teräksen suurempi lujuus saadaan aikaan seosaineilla ja/tai termomekaanisilla lämpökäsittelyillä. Tämän vuoksi suurlujuusteräkset eroavat perinteisistä matalan lujuusluokan teräksistä mikrorakenteiltaan ja ovat yleensä herkempiä hitsauksessa tuodulle lämmölle. [1, s. 15] [2, s. 2]

1.1 Tausta

Teräsrakenteissa tulee huomioida hitsin laatu. Hitsien laatu vaikuttaa oleellisesti kokonaisten rakenteiden kestävyys- ja elinikään. Laadun kannalta tärkeimmät tekijät ovat lämmöntonin hallinta sekä lämmön tasaisuus.

Eri hitsausmenetelmiä ja niiden mahdollisuuksista ultralujien terästen hitsauksessa on tutkittu paljon. Monet hitsausmenetelmät soveltuvat lujien terästen hitsaukseen, kuten laserhitsaus, MIG-täytelankahitsaus ja plasmahitsaus. Kyseisissä menetelmissä lämmöntonin on riittävän alhaista, jotta mekaaniset ominaisuudet ja hitsin laatu säilyisivät. Erityisesti laserhitsaus soveltuu hyvin lujien terästen hitsaukseen esimerkiksi pienen lämmöntonin, tasaisen hitsauslaadun sekä suuren hitsausnopeuden ansiosta. [1, s. 14] [3, s. 30– 31]

1.2 Tavoitteet ja rajaus

Tavoitteena tutkimuksessa on tarkastella erikoislujuisten terästen hitsattavuutta. Työtä rajataan siten, että tarkasteltavien terästen myötölujuudet ovat 960– 1 300 MPa. Tutkimuskysymyksiä olivat seuraavat:

- Miten hyvin ultralujat teräkset soveltuvat hitsattavaksi?
- Mitä etuja ja rajoituksia ultralujien terästen hitsauksessa on?

Tutkimusongelmaan pyritään löytämään vastauksia käymällä aluksi läpi ultralujien terästen mekaanisia ominaisuuksia, valmistustapoja, mikrorakennetta sekä hieman niiden käyttökohteita. Näiden jälkeen keskitytään ultralujien terästen hitsattavuuteen. Ensin kerrotaan hieman erilaisista hitsausmenetelmistä, ja miten hitsausparametrit vaikuttavat ultralujien terästen hitsaukseen. Lisäksi syvennytään lyhyesti tiettyjen markkinoilla olevien ultralujien terästen hitsattavuuteen. Työn lopussa tehdään yhteenveto hitsauksen nykyisestä tilanteesta, ja siitä, kuinka ultralujat teräkset soveltuvat hitsaukseen.

2. ULTRALUJAT TERÄKSET

Ultralujien terästen kehittämisen tarkoituksena on parantaa terästen mekaanisia ominaisuuksia. Pienentämällä ferriitin raekokoa teräksen mikrorakenteessa saadaan aikaan paremmat lujuus- ja sitkeysominaisuudet. Ultralujilla teräksillä tarkoitetaan pääasiassa teräslaatuja, joiden murtolujuus on yli 700 MPa ja myötölujuus yli 550 MPa. Tavallisimpiin rakenneteräksiin verrattuna niiden lujuusominaisuudet voivat olla jopa 3-kertaa suurempia. Tämän vuoksi ultralujia teräksiä käyttämällä saadaan rakenteita kevennettyä ja pienemmät materiaali- ja kuljetuskustannukset. Suuri hyöty saadaan aikaan ultralujien terästen paremmasta iskusitkeydestä myös alhaisissa lämpötiloissa, jossa tavallisimpien terästen sitkeys on heikko. Ferriittisten ultralujien terästen sitkeys voi olla hyvä jopa alle -150 °C :ssa, kun tavallisimpien terästen sitkeysominaisuudet voidaan yleensä taata hyviksi alhaisimmillaan -60 °C :ssa. [4, s. 1–3] [5]

Markkinoilla on monipuolinen valikoima ultralujia teräsluokkia, ja niitä kehitetään jatkuvasti. SSAB valmistaa useita eri teräsluokkia, joita ovat esimerkiksi Optim960 QC, Strenx960 CR, Strenx1100 MC, Strenx1300 ja Docol1300 M. Näiden terästen myötölujuudet ovat 960–1300 MPa. [6, s. 14] [7, s. 11]

2.1 Valmistustavat ja mikrorakenne

Ultralujat teräkset valmistetaan yleensä kolmella lämpökäsittelymenetelmällä. Niitä ovat karkaisu ja päästö (QT), termomekaaninen valssaus (TMCP) ja suorakarkaisu (DQ). [1, s. 15] [8, s.16–17]

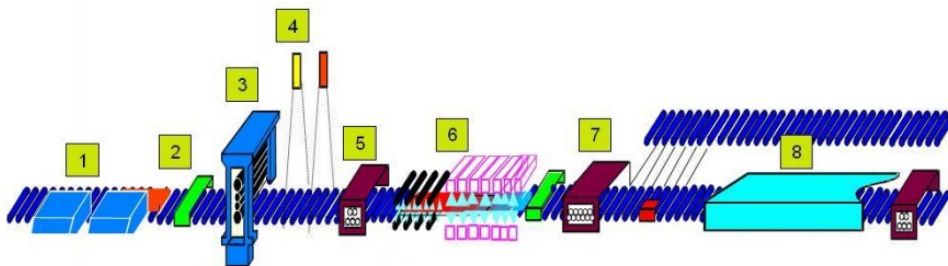
2.1.1 Karkaisu ja päästö

Nuorutus eli QT (Quenching and Tempering) tarkoittaa, että teräs valmistetaan ensin karkaisemalla lämpötilassa $500\text{--}800\text{ °C}$, minkä jälkeen tehdään päästö yli 450 °C :n lämpötilassa. Lämpökäsittelymenetelmänä suoritettu karkaisu ja päästö eli nuorutus on vanhin valmistusmenetelmä ultralujille teräksille. Päästölämpötilan ollessa alle 450 °C :n saadaan lujempaa terästä mutta toisaalta teräksestä tulee myös hauraampi. Erikoislujien terästen valmistuksessa teräs päästetään lämpötilassa $580\text{--}680\text{ °C}$. Menetelmällä saadaan aikaan hyvä sitkeys ja kylmänkestävyys. Nuoruttamalla saadaan aikaan lujuuden

kasvu, mikä johtuu mikrorakenteen muuttumisen hienojakoiseksi ja rakenteeseen tulevasta pienistä karbidierkautumista. Mikrorakenne on tyypiltään bainiittis-martensiittinen. Hiilipitoisuus on 0,13–0,16 %, mangaania on yleensä yli 1,2 % ja piin pitoisuus on 0,24–0,4 %. Lisäksi esimerkiksi kromia on vaihtelevasti 0,02–0,2 %. [1, s. 15, 63] [8, s. 16] [9, s. 5]

2.1.2 Termomekaaninen valssaus

Termomekaaninen valssaus eli TMCP (Thermomechanically Controlled Process) on valmistusmenetelmä, jossa sopivan muokkauksen ja lämpötilan kontronnoillilla saadaan teräkseen halutut mekaaniset ominaisuudet. Menetelmällä saadaan aikaan hyvin hitsattavia, korkealujuuksisia ja sitkeitä teräksiä. Termomekaanisten terästen peruslujuus tulee seostuksesta, kun taas lisälujuus saadaan valssauksesta ja jäähdytyksestä. Menetelmässä käytetään kuitenkin vähemmän seosaineita, joista tärkeimpiä ovat mangaani (yli 1,5 %), pii (yli 0,15 %) sekä niobiumi (yli 0,04 %). Termomekaanisessa valssauksessa seosaineina ei käytetä lainkaan kromia, nikkeliä, booria tai kuparia. Hiilipitoisuus on 0,03 – 0,15 %, ja verrattuna muihin menetelmiin on hiiliekvivalenttiarvo yleensä pienempi. Mikrorakenne on pienijakoinen ja tyypiltään ferriittis-bainiittinen. Raekoko pienenee, kun teräksen valssauksen lämpötilaa ja muokkausta kontrolloidaan. Teräs jäähdytetään valssauksen jälkeen nopeasti, jolloin saadaan pienempi raekoko. Kuvassa 1 nähdään termomekaanisen valssauksen toimintaperiaate. [1, s. 15, 63] [8, s. 17] [10]

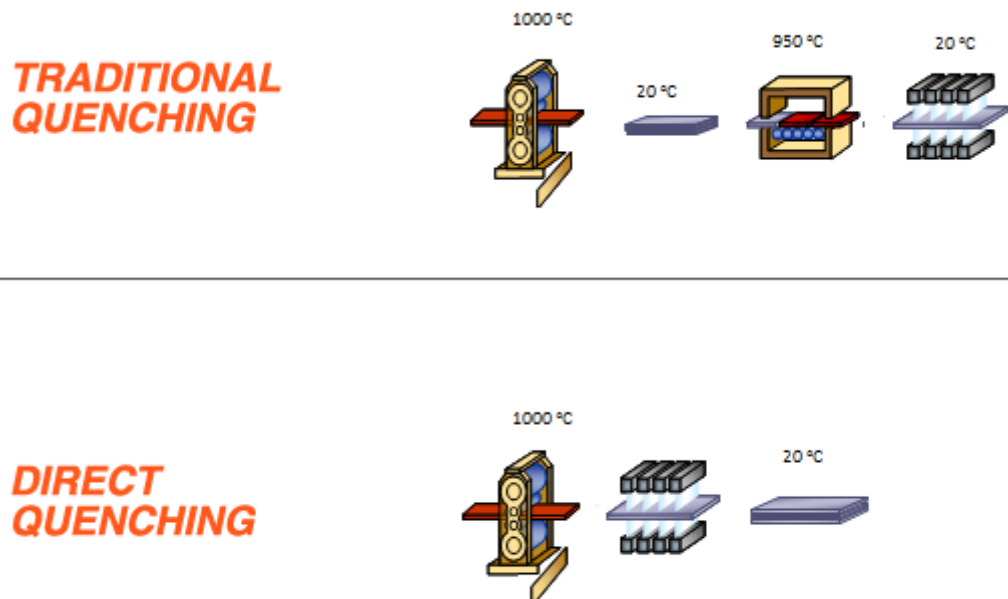


- | | |
|---|-----------------------|
| 1) Lämpiyöntöuuni | 5) Esioikaisukone |
| 2) Uunihilsepesuri | 6) Jäähdytys |
| 3) Levyvalssain | 7) Kuumaoikaisu |
| 4) Lämpötilaprofiili-, paksuus-,
muoto- ja tasomaisuusmittarit | 8) Lämpökäsittelyuuni |

Kuva 1. Termomekaaninen valssauslinja [11, s. 10].

2.1.3 Suorakarkaisu

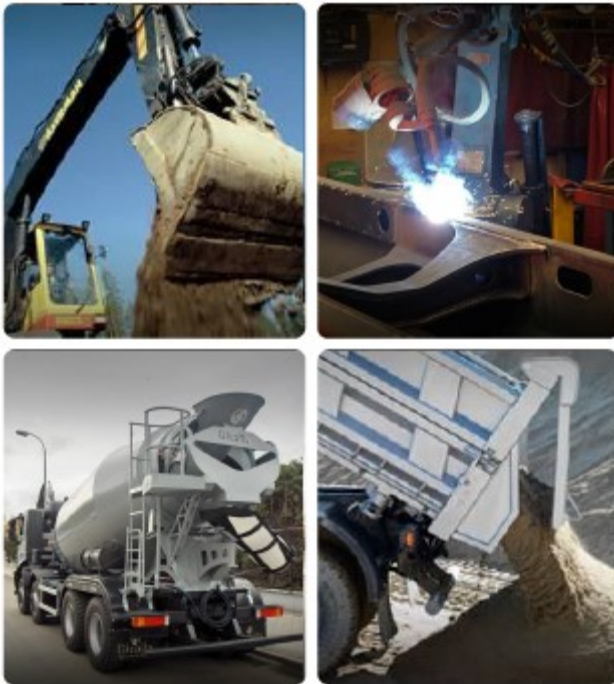
Suorasammutus eli DQ (Direct Quenching) on uusin ultralujien terästen valmistusmenetelmä ja on energiatehokkuuden ansiosta korvannut perinteisiä menetelmiä. Suorasammutuksessa valssaus ja karkaisu on yhdistetty samaan työvaiheeseen, minkä vuoksi prosessin viemä aika lyhenee tehostaen tuotantoa. Kuten nuorrutetuilla teräksillä on myös suorakarkaisussa saatava mikrorakenne bainiittis-martensiittinen. Lisäksi sillä säästettävä myötöraja voi olla 300– 500 MPa suurempi kuin perinteisellä karkaisulla. Ongelmia se tuottaa hitsauksen kanssa, sillä ne vaativat pienempää ja hallitumpaa lämmöntuontia. SSAB:n Raex500-teräksellä, jonka myötölujuus on 1250 MPa, hiiltä on 0,30 %, piitä 0,80 % ja mangaania 1,70 %. Lisäksi kromia on 1,50 %, molybdeeniä 0,50 % ja nikkeliä 1,00 %. Tässä tapauksessa suorakarkaisussa on käytetty enemmän seosaineita kuin nuorrutuksessa, jotka vaikuttavat niiden hitsattavuuteen. Kuvassa 2 nähdään perinteisen karkaisun ja suorakarkaisun erot. [8, s. 16] [12, s. 9] [13] [14, s. 40]



Kuva 2. Perinteisen karkaisun ja suorakarkaisun erot [15].

2.2 Käyttökohteet

Ultralujille teräksille löytyy runsaasti eri käyttökohteita. Ultralujia teräksiä käytetään kohteissa, joissa halutaan keventää kestävästä rakennetusta ainepaksuutta ohentamalla. Tällaisia rakenteita ovat muun muassa nostureiden puomit ja runkorakenteet, kuorma-autojen sekä niiden lavojen rungot, kontit ja laidat, teräsrakenteet rakennuksissa ja erilaiset nostolaitteistot. Ultralujia teräksiä voidaan käyttää myös esimerkiksi kauhoissa, maatalous- ja puunhalkomakoneissa, kuorma-autojen kulutusosissa ja erilaisten murskaimien terissä. Esimerkiksi kyntöauroissa on paljon osia, joissa käytetään ultralujia teräksiä. Autoteollisuudessa on käytössä AHSS-teräksiä (Advanced High Strength Steel), joiden vetolujuudet voivat nousta jopa 2000 MPa. Polttoainetehokkuus, hiilidioksidipäästöjen vähentäminen ja matkustajien turvallisuus ovat tärkeimpiä tekijöitä autojen suunnittelussa. Materiaaleja pitää saada keveämmiksi ja samalla lujuus pitää pysyä ennallaan. AHSS-teräkset sisältävät erilaisia ferriitin, bainiitin, martensiitin ja säilytettyjen austeniitti-faasien pitoisuuksia. Autojen korit valmistetaan nykyisin lähes pelkästään AHSS-teräkistä ja niiden hyvällä hitsattavuudella on iso merkitys autoteollisuuden tulevaisuuden kannalta. [16, s. 1–8]



Kuva 3. Ultralujien terästen käyttökohteita [14, s. 50].

3. ULTRALUJIEN TERÄSTEN HITSAUS

Hitsattavuudella on suuri merkitys nykyaikaisten markkinoilla olevien ultralujien terästen liittämässä. Ultralujien terästen hitsattavuus on myös parantunut viime vuosien aikana muun muassa kehittyneiden hitsausmenetelmien ansiosta. Tavoitellessa tasalujia hitsiliitoksia, on lämmöntonin oltava tasaista ja lämmöntuontivaatimusten tiukkoja. Riippuen teräslaadusta lämmöntonin pitäisi olla 0,2–1,0 kJ/mm. Ultralujien terästen hitsauksessa on useita tekijöitä ja ongelmia, jotka pitää ottaa huomioon, jotta hitsin laatu saadaan säilytettyä. Näitä ovat muun muassa lämmöntuonti, jäähtymisajat, lisäaine sekä valmistus- ja käyttöolosuhteet. Oikealla lämmöntonilla saadaan aikaan hienojakoinen mikrorakenne ja siten parhaimmat mekaaniset ominaisuudet. Lisäksi lämmöntonilla voidaan vaikuttaa muutosvyöhykkeen mikrorakenteeseen ja kokoon. [3] [5] [17, s. 30]

3.1 Hitsausmenetelmät

Sopivan hitsausmenetelmän valinta käyttötarkoitukseen riippuu hyvin paljon siitä, millaisia vaatimuksia rakenteisiin ja komponentteihin kohdistuu sekä millainen käyttöympäristö on kyseessä. Ultralujien terästen hitsauksessa pitää ottaa huomioon muun muassa lämmöntuonti ja jäähtymisaikavaatimukset. Hitsausmenetelmät voidaan jakaa kolmeen eri päätyyppiin: kaasuhitsaukseen, kaarihitsaukseen ja korkeaenergiseen sädehitsaukseen. Kaarihitsauksessa yleisimmät menetelmät ovat puikkohitsaus, MIG/MAG-hitsaus, täytelankahitsaus, jauhekaarihitsaus, TIG-hitsaus sekä plasmahitsaus. Myös vähemmän käytetty sähkösinkitys kuuluu kaarihitsausmenetelmiin. Sädehitsausmenetelmiin kuuluvat laserhitsaus ja elektronisuihkuhitsaus. Lisäksi on kehitelty uusia menetelmiä, kuten laserhybridihitsaus ja kitkahitsaus, jotka antavat uusia käyttömahdollisuuksia. Ultralujia teräksiä hitsattaessa käytetään MIG/MAG-hitsausta, puikkohitsausta, TIG-hitsausta tai täytelankahitsausta. Nykyään erikoislujille teräksille suositellaan muun muassa laserhitsausta tai laserhybridihitsausta. [3, s. 3] [17, s. 30]

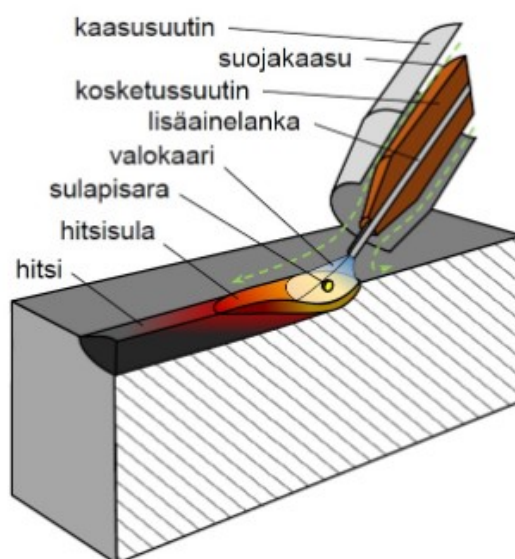
3.1.3 Kaasuhitsaus

Kaasuhitsaus perustuu asetyleeni -kaasun ja hapen väliseen reaktioon, jolloin saadaan liekki aikaiseksi. Liekkityyppinä esiintyy kolmea erilaista: neutraali, pelkistävä ja hapettava. Neutraalissa liekissä asetyleeniä ja happea sekoitetaan yhtä suurina määrinä. Pel-

kistävässä liekissä käytetään vähemmän asetyleeniä, jolloin palaminen on epätäydellistä. Pelkistävää liekkiä käytetään erityisesti alumiiniseosten ja korkeahiilisten terästen hitsaamisessa. Hapettavassa liekissä käytetään ylimääräistä happea ja sitä käytetään muun muassa messingin hitsauksessa. Menetelmän laitteisto on yksinkertainen, edullinen ja kannettava, joten esimerkiksi huoltotyöt pystytään tekemään helposti. Rajallisen tehotehdydenvuoksi hitsausnopeus on hyvin alhainen ja lämmön kokonaispanos hitin pituusyksikköä kohden on melko korkea. Kaasuhitsauksessa saadaan aikaan suuri lämpöleviäminen, jolloin myös hitsin jäähtymisaika on suurempi, ja hitsin laatu on huonompaa. Kaasuhitsaus ei täten sovellu kovin hyvin ultralujien terästen hitsaukseen. [3, s. 24–28]

3.1.2 Kaarihitsaus

Kaasukaarihitsauksessa eli MIG/MAG-hitsauksessa syötetään lisäainelankaa, jonka ympärillä on aktiivista tai passiivista suojakaasua. Lanka muuttuu sulaksi valokaaren avulla ja sula metalli siirtyy hitsisulaan pieninä pisaroina. MIG-hitsauksessa suojakaasu on passiivista, mikä tarkoittaa, että suojakaasu ei reagoi syntyvän sulan kanssa. MAG-hitsauksessa suojakaasu on aktiivista, joten se reagoi sulan kanssa. Mahdollisuus paksumpien kappaleiden hitsaukseen suuremmilla hitsausnopeuksilla. Lisäksi MIG/MAG-hitsauksella on suhteellisen pieni lämmöntuonti, jonka myötä liitoksella on pieni jäähtymisaika. Täten MIG/MAG-hitsaus on edelleen käytetyimmistä hitsausmenetelmistä ultralujille teräksille. [3, s. 36–39] [18, s. 118–120]

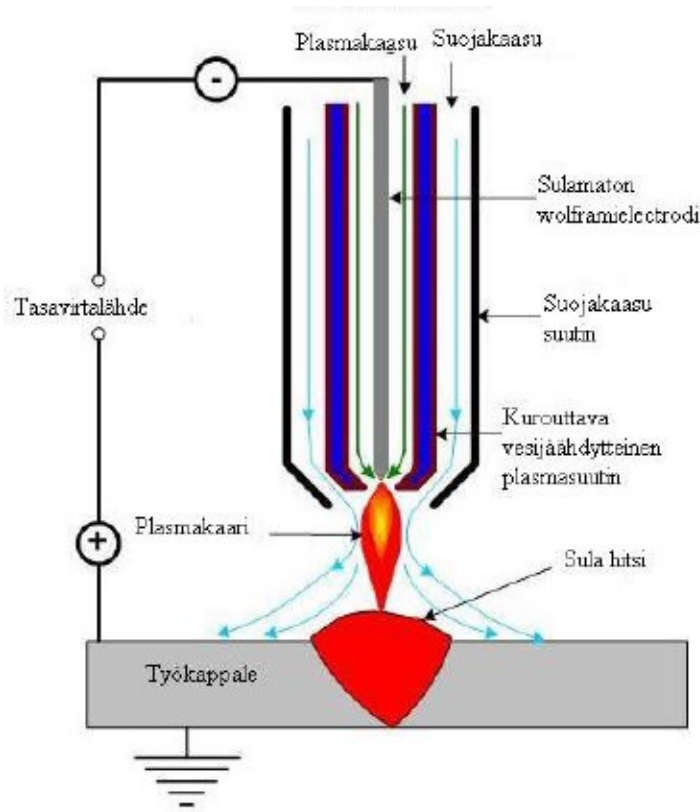


Kuva 4. MIG/MAG-hitsauksen periaate [19].

Täytelankahitsaus eli MAG-täytelankahitsaus on melko samanlainen hitsausprosessi kuin MIG/MAG-hitsaus. MAG-täytelankahitsauksessa käytetään kuitenkin umpilangan sijasta täytelankaa, mikä sisältää pääosin täytejauhetta. Täytejauheen koostumusta voidaan vaihdella haluttujen ominaisuuksien mukaan. MAG-hitsauksen tapaan suojaakaasu on aktiivista, mikä on yleensä hiilidioksidia tai argonin ja hiilidioksidin muodostamaa seoskaasua. Täytelankahitsauksella saadaan hyvin tiivis rakenne ja se soveltuu monien ultralujien terästen hitsaukseen muun muassa pienen lämmöntonnin ansiosta. [3]

Jauhekaarhitsaus on metallikaarhitsausprosessi, jota käytetään yleensä mekanisoidussa tai automatisoidussa hitsauksessa. Siinä käytetään materiaalina hitsausjauhetta. Menetelmässä valokaari palaa hitsauslangan ja työkappaleen välissä. Hitsausjauhe syötetään valokaaren ympärille ja se suojaa hitsaustapahtumaa ilmalta. Osa jauheesta muodostuu kuonaksi hitsin päälle. Jauhekaarhitsauksessa käytetään yhtä tai useampaa lisäainelankaa samanaikaisesti, ja voidaan käyttää myös nauhaa. Jauhekaarhitsauksen etuina ovat suuri hitsiaineen tuottavuus ja suuri tunkeuma. Haittoina on melko suuri lämmöntonni ja siten myös suuri jäähtymisaika. Täten jauhekaarhitsaus ei sovellu hyvin ultralujien terästen hitsaukseen. [3, s. 29–31]

Plasmahitsauksessa pääasiallisena lämmönlähteenä käytetään valokaaren muodostamaa plasmaa, mikä saadaan aikaan sähköpurkauksella. Kaasuatmosfäärin läpi kulkee valokaari, joka palaa volframielektrodin ja työstökappaleen välissä. Valokaaresta aikaansaama lämpö siirtyy tehokkaasti plasmakaasuun, joka muodostaa plasman purkautuessaan suuttimen läpi kaariplasman. Plasmahitsaus on ainoa hitsausprosessi, jolla valokaarella pystytään lävistämään, jolloin saadaan aikaan hyvin paksuja hitsipalkoja. Lämmöntonni on pientä verrattuna muihin kaasukaarhitsausprosesseihin, joten se soveltuu hyvin ultralujien terästen hitsaukseen. Pienen lämmöntonnin ansiosta hitsissä tapahtuu pieniä muodonmuutoksia, jolloin hitsin laatu säilyy hyvänä. [3, s. 23–26]



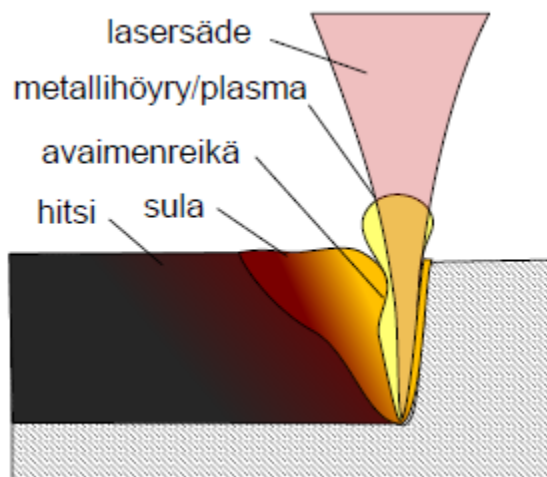
Kuva 5. Kaariplasman muodostuminen plasmahitsauksessa [20, s .3].

Puikkohitsaus on vanhin hitsausprosessi. Puikko koostuu metallisesta sydänlangasta ja sitä peittävästä lisäainekerroksesta. Valokaaren syttyessä puikon ja työkappaleen välille, lisäaine muodostaa suojakaasua ja kuonaa jähmettyvän hitsisulan päälle. Kuona poistetaan jälkeinpäin hitsin päältä. Lisäaine vaihtelee riippuen siitä, mitä metallia hitsataan. Puikkojen pituudet vaihtelevat 350 – 400 mm:n välillä. Puikkohitsausta käytetään edelleen paljon sen monipuolisuuden ja joustavuuden vuoksi. Hyvä hitsin laatu, yksinkertaiset laitteet ja laaja lisäainevalikoima takaavat sen käytön jatkossakin. Muiden menetelmien hitsausparametrit ovat ultralujien terästen hitsauksessa parempia, jolloin puikkohitsauksen käyttö on pienentynyt. [3, s. 18–19]

TIG-hitsaus perustuu valokaaren palamiseen sulamattoman wolframelektrodin ja työkappaleen välissä suojakaasun ympäröimänä. Suojakaasuna käytetään aina inerttiä kaasua, joka on yleensä argonia. Argon estää elektrodia hapettumasta. TIG-hitsausta voidaan tehdä joko lisäaineen kanssa tai ilman lisäainetta. TIG-hitsausta on nykyisin hyvin yleinen hitsausprosessi. Hyvä sulan ja tunkeuman hallinta sekä hitsin puhtaus ja hyvämuotoisuus saavat aikaan hienon hitsin rakenteessa. Lisäksi lämmöntuonti on helposti hallittavissa, mitä edellytetään ultralujien terästen hitsauksessa. [3, s. 20–23] [18, s. 123–125]

3.1.3 Korkeaenerginen sädehitsaus

Laserhitsauksessa laservalo kohdistetaan työstökappaleen pinnalle materiaalin sulattamiseksi tai höyrystämiseksi. Laserhitsaus voidaan jakaa sulattavaan- ja syvätunkeuma-laserhitsaukseen. Sulattavassa laserhitsauksessa materiaaliin kohdistettu lasersäde sulattaa halutun sauman. Tarvittava lämpö johtuu ja sekoittuu kappaleeseen. Syvätunkeuma-laserhitsauksessa eli avaimenreikähitsauksessa lasersäde fokusoidaan hitsattavan aineen pinnalle tai pinnan alapuolelle. Lasersäde höyrystää aineen pinnalle avoimen reiän. Laserhitsauksen etuna nähdään muodostuvan hitsin erinomainen laatu, suuri hitsausnopeus ja pieni lämmöntuonti, joita edellytetään ultralujien terästen hitsauksessa. Pienen lämmöntuonnin vuoksi hitsin nopea jäähtyminen on tyypillistä laserhitsatulle liitokselle. Usein matalalla lämmöntuonnilla pystytään rajoittamaan myös hitsille haitallisia metallurgisia muutoksia, kuten rakeenkasvua ja lämpövyöhykkeen leveyttä. Täten laserhitsaus soveltuu erinomaisesti ultralujien terästen hitsaukseen. [3, s. 36–40]



Kuva 6. Syvätunkeuma-laserhitsauksessa avaimenreiän muodostuminen [22, s. 19].

Elektronisuihkuhitsaus perustuu elektronisuihkuun, joka fokusoimalla ja ohjaamalla liitettävään kohtaan sulattaa erittäin suurella energiatiheydellään materiaalia hyvin suurella tunkeumalla. Elektronisuihkulla tehty hitsi on vielä laserhitsiä huomattavasti kapeampi ja tunkeuma on suurempi. [3, s. 34–36]

3.1.4 Muut hitsausmenetelmät

Laser-hybridihitsauksessa on yhdistelmä MIG/MAG-hitsausta ja laserhitsausta. Laser-hybridihitsaus on suhteellisen uusi hitsaustekniikka. Laser-hybridihitsauksessa

MIG/MAG-hitsauspään valokaari ja lasersäde on kalibroitu toimimaan samassa sulassa. Hitsauspää tuottaa leveämmän hitsin kappaleen pinnalle ja lasersäde tunkeutuu syvemmälle luoden Y-muotoisen hitsin kappaleeseen. Hitsin lopullista muotoa pystytään muokkaamaan säätämällä laser- ja MIG/MAG-hitsauksen tehosuhdetta. Laser-hybridihitsaus soveltuu hyvin ultralujien terästen hitsaukseen pienen lämmöntonin ja vähäisten lämpöjännitysten vuoksi. [23] [24]

Kitkahitsaus on perinteinen hitsausmenetelmä, jossa tarvittava lämpö saadaan aikaan puristuksissa olevien liitospintojen ja niiden pyörittelyn ansiosta. Kun liitospinnat ovat pehmenneet, liitospinnat hitsautuvat yhteen. Kitkahitsauksessa ei käytetä lainkaan suo- jakaasua tai lisäaineita. Lisäksi sekä hitsin laatu että liitosten ominaisuudet saadaan erinomaisiksi. Laserhitsauksen tavoin kitkahitsausta käytetään usein ultralujien terästen hitsaukseen pienen lämmöntonin ja lyhyiden jäähtymisaikojen ansiosta. [23] [24]

3.2 Hiiliekvivalentti

Teräksen hiilipitoisuus vaikuttaa hitsattavuuteen; mitä suurempi hiilipitoisuus teräksellä on, sitä huonompi on sen hitsattavuus. Se aiheuttaa karkenemista sekä karbidiin muodostumista hitsisaumaan ja muutosvyöhykkeeseen. Terästen hitsattavuutta kuvataan yleensä hiiliekvivalenttiarvolla (CEV). CEV-arvo perustuu teräksen koostumukseen ja sen avulla pystytään arvioimaan karkenevuutta ja pyrkimystä kylmähalkeiluun. [25, s. 8] Hiiliekvivalentti pystytään laskea seuraavasta kaavasta 1:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} (\%) \quad (1)$$

CEV-raja-arvot ovat seuraavat:

CEV < 0,40 teräksellä on hyvä hitsattavuus ja esikuumennusta ei yleensä tarvita. Esikuumennusta tarvitaan, jos ainepaksuus ja jäykkyys ovat suuria sekä vetypitoisuus on korkea.

0,40 < CEV < 0,50 teräksellä on kohtalainen hitsattavuus. Ohuet seinämäpaksuudet voidaan hitsata ilman esikuumennusta. Suuremmat ainepaksuudet vaativat esikuumennusta ja niukkavetyisiä lisäaineita.

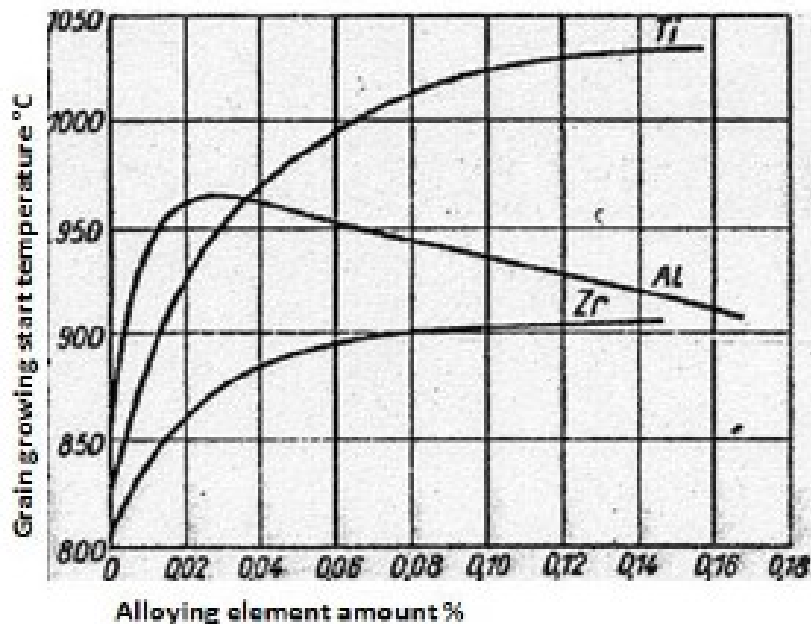
CEV > 0,50 teräksellä on yleensä huono hitsattavuus. Tarvitaan lähes aina esikuumennusta ja niukkavetyisiä lisäaineita. [8, s. 21– 22] [26, s. 3]

Raja-arvoja tarvitsee tarkastella hyvin huolella, sillä yli 0,45 CEV:n arvoilla teräksillä on vielä hyvä hitsattavuus, jolloin arvoja voidaan pitää suuntaa antavina. CEV-arvo ei kerro

pelkästään hitsattavuudesta, vaan se riippuu myös esimerkiksi perusaineen paksuudesta. Jos arvo menee yli 0,5, tarvitaan yleensä esilämmitystä. [26, s. 3] [27, s. 27]

3.3 Seosaineiden vaikutukset

Ultralujissa teräksissä mikrorakenteen parantamiseksi käytetään usein seosaineita. Käytetyimpiä seosaineita ovat kromi, nikkeli, mangaani, titaani, vanadiini, niobium, molybdeeni, alumiini, boori, fosfori, rikki, tantaali sekä zirkonium. Seosaineet vaikuttavat monin tavoin mikrorakenteeseen, ja lisäksi monet vaikuttavat myös hiiliekvivalenttiin. Ne muodostavat sulkeumien ja yhdisteiden myötä teräksessä muun muassa nitridejä, karbideja ja karbonitridejä. Lisäksi seosaineet estävät rakeiden kasvua, jolloin valmistaessa pienirakeisia ultralujia teräksiä, seosaineilla on suuri merkitys. Lujilla teräksillä saattaa kuitenkin ilmaantua näillä seosaineilla myös haittavaikutuksia kovuuteen eli teräksen karkevuuteen. Muun muassa karbidien huono liukoisuus austeniittiin ennen sammutusta aiheuttaa ongelmia. Kuvassa 7 näkyy, kuinka kabridi ja nitridi sulkeutuvat nopeasti, jolloin jäähditys ei ole riittävän hidasta, jotta saataisiin martensiittia edukkaampi mikrorakenne aikaan. [1, s. 19–20] [8, s. 30] [26, s. 3–6]



Kuva 7. Austeniittirakeiden alkamislämpötilat suhteutettuna seosaineiden Al, Zr ja Ti määrään [1, s. 20].

Titaani on tärkeä seosaine hitsauksen kannalta, sillä jo pienellä määrällä titaania pystytään rajoittamaan austeniitin rakeenkasvua, kun muutosvyöhykkeellä olevat titaaninitridit estävät sen muodostumisen. Titaanilla erkauslujittuminen ja sulfidien muotojen hallinta ovat hyvin yleisiä piirteitä. Se sitoo myös kaikkia epäpuhtauksia kuten erilaisia kaasuja. Happi, rikki ja vety ovat titaanin käytettävyyden kannalta tärkeitä kaasuja. Titaani nostaa rekristallisaatiolämpötilaa, poistaa ylimääräistä typpeä sekä hienontaa mikrorakennetta titaaninitridien muodostamisella jo 0,01 – 0,02 % seostuksella. Hiilen ja typen kanssa syntyvä yhdisteet lujittavat mikrorakennetta. Titaani ehkäisee tehokkaasti typen ja vedyn aiheuttamat ongelmat, koska se sitoo ne omiksi yhdisteikseen eikä jätä niitä vapaaksi aiheuttamaan sauman vanhenemista tai vetyhaurautta. Typpinitridi-yhdisteet lisäävät lujuutta ja sitkeyttä sekä myös rajoittavat karkenevuutta, kun ne estävät austeniitin rakeenkasvua muutosvyöhykkeellä. Esimerkiksi karbidien huono liukoisuus austeniittiin ennen sammutusvaihetta tuottaa ongelmia. [1, s. 25–26] [26, s. 5] [28, s. 17]

Niobiumin vaikutukset ultralujissa hitsiliitoksissa riippuvat hyvin paljon lämmöntonnuonista. Matala lämmöntonnuonti kasvattaa iskusitkeyttä, toisin kuin korkea lämmöntonnuonti laskee iskusitkeyttä. Lisäksi korkea hiilipitoisuus laskee iskusitkeyttä. Samoin kuin titaani myös niobium nostaa rekristallisaatiolämpötilaa, mutta se tapahtuu 0,02 – 0,05 % seostuksella. Niobium- yhdisteet rajoittavat sekä austeniitin rakeenkasvua hitsin muutosvyöhykkeellä että karkenevuutta. [1, s. 23–24] [26, s. 5] [29, s. 53]

Alumiini sitoo teräksessä olevaa typpeä ja happea täten yleensä parantaen sen vanhemiskestävyyttä ja iskusitkeyttä, mutta joissakin tapauksissa liian suurina määrinä se voi laskea iskusitkeyttä. Alumiinia käytetään myös pelkistäjänä ja rajoittamaan austeniitin rakeenkasvua kuumennuksen aikana, vaikkakin titaani ja niobium ovat tehokkaampia seosaineita rakeenkasvun hallintaan. Alumiini parantaa teräksen korroosionkesto ominaisuuksia. [1, s. 22–23] [28, s. 17] [30, s. 45–46]

Mangaani parantaa teräksen lujuutta vaikuttamatta kuitenkaan teräksen sitkeyteen. Mangaani muodostaa hapen ja rikin kanssa yhdisteitä, ja poistaa näin teräksen epäpuhtauksien tuottavia haittavaikutuksia. Korkeammilla pitoisuuksilla muodostuu haurasta martensiittia. Alemmilla pitoisuuksilla muodostuu pehmeämpää, mutta sitkeämpää ja helpommin lämpökäsiteltävää bainiittia. Yleensä mangaanipitoisuus on rajoitettava alle 1,5 %, sillä muuten hauraus kasvaa liian suureksi. Liian suurella käytöllä karkenevuus paranee, mutta hitsattavuus huononee. Mangaani parantaa syväkarkenevuutta, jolloin myös hitaammin jäähtynyt hitsisauma voi muodostua martensiitiksi, mikä on hitsauksen kannalta huono asia. Nikkeliä käytetään yleensä mangaanin kanssa sitkeyden kasvatta-

miseksi, ja sitä käytetään myös haurauden estämiseksi. Pienikin määrä nikkeliä saa aikaan austeniittisen rakenteen. Hitsauksessa se kasvattaa muodonmuutoksia, jolloin hitsi ei pysy muodossaan, ja hitsin laatu kärsii. [28, s. 17] [31, s. 908] [32] [33]

Lujilla teräksillä vanadiini kasvattaa austeniitin rekristallisaatiolämpötilaa. Se muodostaa yhdisteitä ferriitissä hiilen, titaanin ja typen kanssa. Vanadiini muodostaa kovia karbideja, ja tehostaa karkenevuutta. Hitsauksen kannalta nämä ominaisuudet ovat huonoja. Toisaalta vanadium ehkäisee rakeenkasvua jo pieninä pitoisuuksina, ja lisäksi vanadiumkarbonitritidit kasvattavat lujuutta. Siitä huolimatta liika seostus saa aikaan huonon hitsattavuuden. [1, s. 24–25] [32]

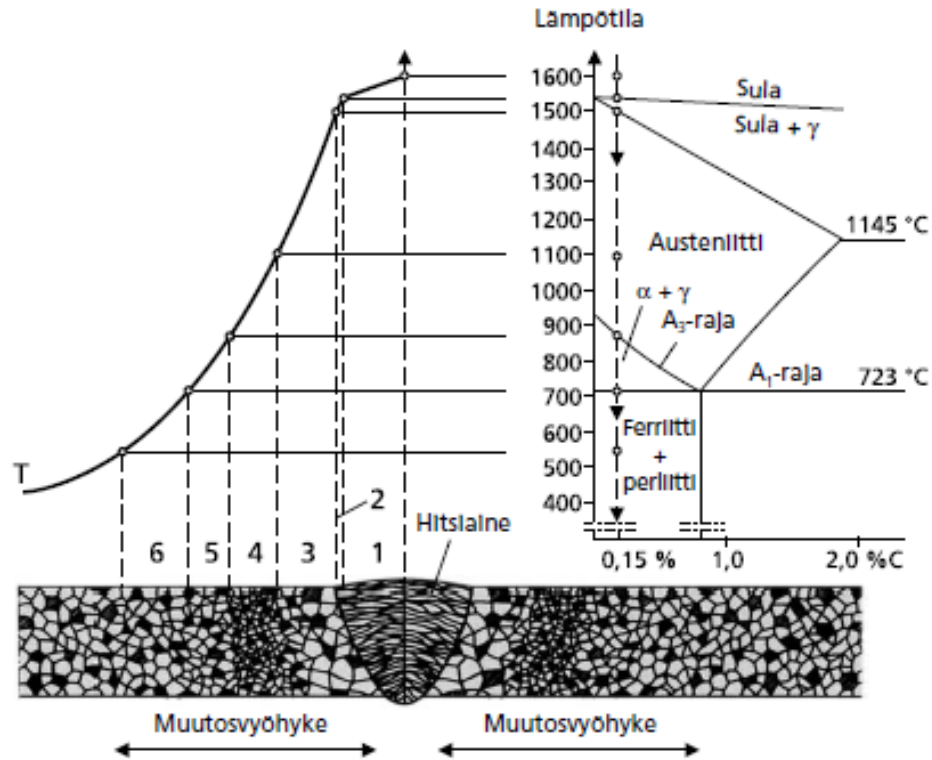
Kromi (Cr) on teräksen tärkein korroosionkesto-ominaisuuksia tuova seosaine ja se myös joissakin määrin parantaa sen mekaanisia ominaisuuksia. Kromi on kuitenkin hitsauksen kannalta haitallinen seosaine. Se muun muassa aiheuttaa syväkarkenevuutta ja edistää rakeenkasvua. Lisäksi kromilla on haurautta edistävä vaikutus. [31, s.45-46] [32, s.14] Molybdeenin vaikutuksesta saadaan ehkäistyä kromin aiheuttamia haurausongelmia. Erilaisten karbidien muodostumisen ansiosta voidaan parantaa teräksen kuuma-
lujuutta sekä karkenevuutta, jolloin teräksen hitsattavuus huononee. [26, s. 4] [31, s. 908] [34, s. 46]

Pii on hitsattavuuden kannalta myös hyödyllinen seosaine. Se muodostaa muun muassa epäpuhtauksien kanssa kuonaa hitsin pinnalle sekä tekee sulasta juoksevamman, jolloin hitsattavuus paranee. Lisäksi pii parantaa teräksen muun muassa korroosionkestoa. [26, s. 3] [35, s. 45–46]

3.4 Hitsausliitoksen vyöhykkeet

Hitsauksessa kappaleeseen kohdistuu suuria lämpöenergioita. Tämän seurauksena syntyy muutoksia teräksen ominaisuuksiin sekä perusaineen rakenteeseen. Lämmön vaikutuksesta hitsaus aiheuttaa osittaista perusaineen sulamista, kun taas tietty osa kuumenee korkeisiin lämpötiloihin. Hitsauksen jälkeen muodostuu selkeitä vyöhykkeitä. Perusaineeseen syntyvää vyöhykettä hitsausliitoksen läheisyydessä kutsutaan muutosvyöhykkeeksi eli HAZ-vyöhykkeeksi. Lämmön vaikutuksesta siihen on syntynyt mikrorakennemuutoksia, mutta perusaine ei ole sulanut. Hitsattavan kappaleen lujuudella voi olla suuriakin vaihteluja muutosvyöhykkeellä. Tämän seurauksena hitsin sauman koh-

dalla on suuri taipumus myötymiselle. Lisäksi muutosvyöhykkeellä on riski liialliselle karkeutumiselle ja halkeilulle. Riskejä pystytään rajoittamaan vähentämällä lämmöntuontia sekä esilämmittämällä hitsattavia kappaleita. [25, s. 4] [27, s. 23]



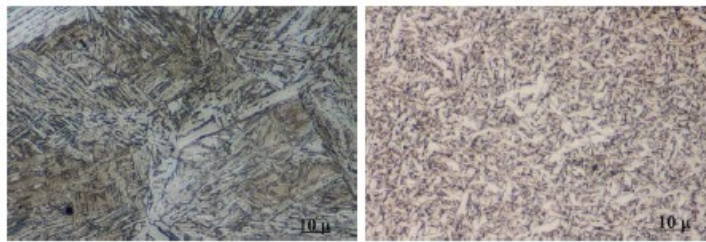
Kuva 8. Hitsausliitokseen syntyvät vyöhykkeet 0,15 % hiilipitoisuudella [25, s. 4].

Kuvasta 8 näkyy hyvin hitsausliitoksen eri vyöhykkeet. Kuusi eri vyöhykettä on jaoteltu lämpötilan, mikrorakenteen sekä hiilipitoisuuden mukaan. Hitsiaine (1) muodostuu perusaineen ja hitsausliitoksen seoksesta sekä myös hitsauslisäaineista. Sularaja (2) muodostuu osaksi sulaneesta perusaineesta, mikä sijaistaa hitsiaineen ja muutosvyöhykkeen (3–6) välillä. Karkearakeisessa eli ylikuumentuneessa vyöhykkeessä (3) austeniitin raekoko on kasvanut korkean lämpötilan takia. Hienorakeisessa vyöhykkeessä (4) lämpötila on jäänyt austenoitumisalueen alaosaan ja austenoituminen on tapahtunut, mutta raekoko ei ole kasvanut. Liitoksen jäähtyessä muodostuu ferriittinen tai ferriittisperliittinen hienorakeinen mikrorakenne. Toiseksi viimeinen (5) vyöhyke on osittain austenoitunut A₃- ja A₁-lämpötilojen välissä. Yleensä osittain austenoituneet vyöhykkeet eivät ole kriittisiä, mutta nopea jäähtyminen voi korkeahiilillä alueilla muodostaa hauraita martensiittisiä rakeita. Viimeinen vyöhyke on karbidiin palloutumisvyöhyke (6), jonka ominaisuudet eivät olennaisesti poikkea perusaineen alkuperäisistä ominaisuuksista. Kaksi

viimeisintä vyöhykettä vaikuttavat siten vähiten rakenteen ominaisuuksiin. Lisäksi muutosvyöhykkeen ja kuumenemattoman perusaineen välissä olevalla alueella voi tapahtua myötövanhenemistä tai päästymistä karkaistuissa teräksissä. [25, s. 4] [28, s. 17] [36, s. 166] [37, s. 24–25] [38, s. 301–303]

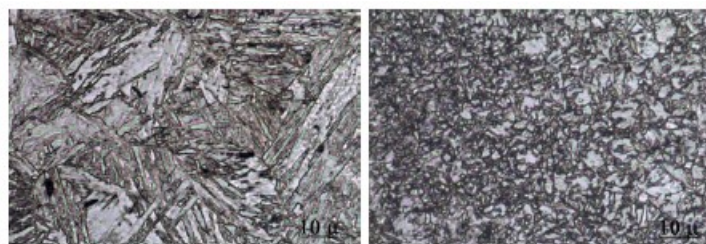
Muutosvyöhyke syntyy hitsauksen lämpökäsittelyvaikutuksista, jotka vaihtelevat hitsausliitoksen eri kohdissa. Täten syntyy vyöhykkeitä, jotka ovat mikrorakenteeltaan erilaisia ja siten myös eroavat ominaisuuksiltaan. Hitsauksen jälkeen raekoko ja mikrorakenne riippuvat sekoittumisasteesta, perusaineen materiaalista sekä mitä lisäainetta on käytetty hitsauksessa. Lisäksi ne riippuvat erityisesti siitä, kuinka suurta ja kohdistettua lämmöntuonti on ollut ja kuinka paljon jäähtymiseen on käytetty aikaa. [1, s. 95–102] [2, s. 5] [37, s. 24] [38, s. 301–304]

Kuvissa 9 ja 10 on mikroskooppikuvat ultralujan teräksen Docol1200 hitsin mikrorakenteesta ja muutosvyöhykkeestä. Kuvassa 9 on käytetty MAG-hitsausta, ja kuvassa 10 on käytetty laserhitsausta. Kuvista näkyy hyvin, kuinka hitsi on jähmettynyt ja muuttunut karkearakoiseksi, kun taas muutosvyöhyke on pysynyt hienojakoisena.



Kuva 9. MIG-hitsin ja muutosvyöhykkeen mikrorakenteen mikroskooppikuvat [39, s. 70].

MIG-hitsauksessa hitsin mikrorakenteesta syntyy bainiittinen, kun laserhitsauksessa hitsin mikrorakenteesta syntyy martensiittinen. MIG-hitsauksessa ja laserhitsauksessa syntyy hitsin muutosvyöhykkeen mikrorakenteeksi ferriittis-martensiittinen. Lasehitsauksessa saadaan lähes kaksinkertainen kovuus hitsiin ja muutosvyöhykkeeseen kuin MIG-hitsauksessa.

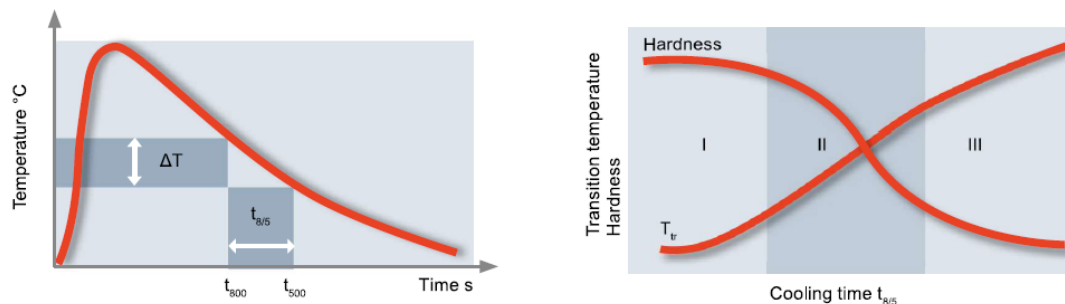


Kuva 10. Laserhitsin ja muutosvyöhykkeen mikrorakenteen mikroskooppikuvat [39, s. 70].

3.5 Lämmöntuonti ja jäähtymisaika $t_{8/5}$

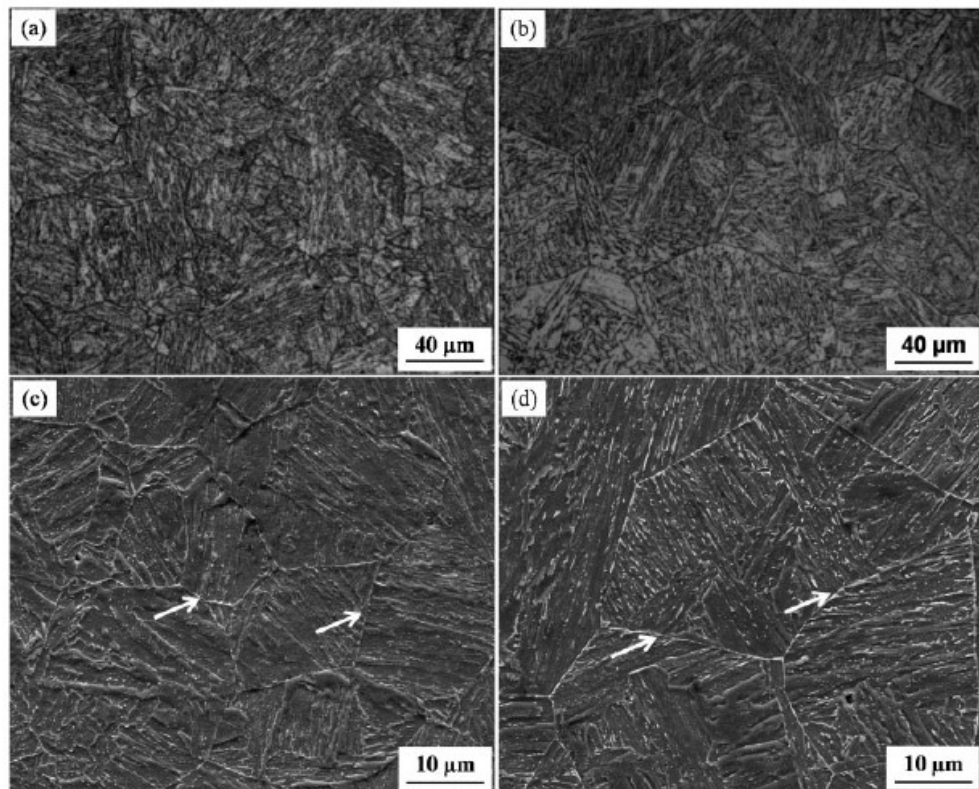
Hitsattaessa ultralujia teräksiä lämmöntuonnin pitäisi olla mahdollisimman alhaista, jotta saataisiin hienojakoinen mikrorakenne ja siten parhaimmat mekaaniset ominaisuudet. Oikean lämmöntuonnilla voidaan vaikuttaa muutosvyöhykkeen mikrorakenteeseen ja kokoon. Esimerkiksi laserhitsauksessa lämmöntuonti on yleensä 0,11–0,95 kJ/mm. MIG/MAG-hitsauksessa lämmöntuonti vaihtelee 0,5–3 kJ/mm ja TIG-hitsauksessa 0,5–2,5 kJ/mm. Jauhekaarihitsauksella lämmöntuonti on tyypillisesti 2–6 kJ/mm. Pienen lämmöntuonnin rajaksi on asetettu 0,5 kJ/mm, mutta niukkaseosteisilla teräksillä rajaksi on asetettu 2,5 kJ/mm. Pienemmällä lämmöntuonnilla saadaan muutosvyöhykkeestä kaapeampi, ja saadaan parannettua hitsin iskutheyttä ja lujuutta sekä saadaan vähennettyä muodonmuutoksia ja jäännösjännityksiä. Korkeammalla lämmöntuonnilla muodostuu suurirakeinen mikrorakenne karkearakeisella vyöhykkeellä, jolloin rakenteen kestävyys heikkenee. Lisäksi korkea lämmöntuonti pidentää jäähtymisaikaa, mikä heikentää muun muassa hitsin iskutheyttä. Täten hitsausmenetelmässä pitäisi olla alhainen lämmöntuonti hitsatessa ultralujia teräksiä. Erityisesti laserhitsaus soveltuu ultralujien terästen hitsaukseen juuri pienen lämmöntuonnin ansiosta. [1, s. 31, 42, 153–155] [3, s. 37–40] [8, s. 23] [27, s. 24] [40, s. 1439] [41, s. 5]

Hitsausliitoksen jäähtymisaika $t_{8/5}$ tarkoittaa hitsausliitoksen jäähtymisaikaa 800 °C:sta 500 °C:een, jolloin mikrorakenteeseen muodostuu eniten muutoksia. Jäähtymisaikaan vaikuttavat muun muassa liitosmuoto, levyn paksuus, työlämpötila ja lämmöntuonti. Suuremmilla ainepaksuuksilla jäähtymisnopeus on suurempi, kun lämpöä johtuu myös enemmän. Liitosmuodoissa pitää huomioida, kuinka hyvin lämpö pääsee johtumaan eri suuntiin. Mitä korkeampi työlämpötila eli hitsattavan kappaleen lämpötila hitsauksen aikana on, sitä hitaampaa on sen jäähtyminen, jolloin jäähtymisaika kasvaa merkittävästi. Kuvassa 11 esitetään jäähtymisajan vaikutusta muutosvyöhykkeeseen. [2, s. 6–7] [8, s. 23–24] [27, s. 24–26] [28, s. 23] [42, s. 356–358]



Kuva 11. Jäähtymisajan $t_{8/5}$ vaikutus muutosvyöhykkeen kovuuteen ja iskutheyden transiitolämpötilaan [2, s. 7].

Kuvassa 11 jäähtymisaika $t_{8/5}$ etenee lämpötilan ja ajan suhteen alkuvaiheessa lähes lineaarisesti. Jäähtymisajan vuoksi kovuuden lasku kiihtyy transitiolämpötilan toisessa vaiheessa, mutta tasaantuu lähes transitiolämpötilan ensimmäisen vaiheen kaltaiseksi. Kun jäähtymisaika kasvaa, iskutkeys yleensä heikkenee, mikä ilmenee muutosvyöhykkeen iskuenergian laskuna ja transitiolämpötilan nousuna. Tämä johtuu siitä, että heti sularajan vieressä lämpötila nousee hyvin korkeaksi, ja austeniitin raekoko pääsee kasvamaan suureksi. Tämä puolestaan johtaa austeniitin hajaantuessa karkeaan mikrorakenteeseen, joka heikentää iskutkeyttä.



Kuva 12. Hitsin karkearakeisen vyöhykkeen raekoot eri jäähtymisnopeuksilla [42, s. 357].

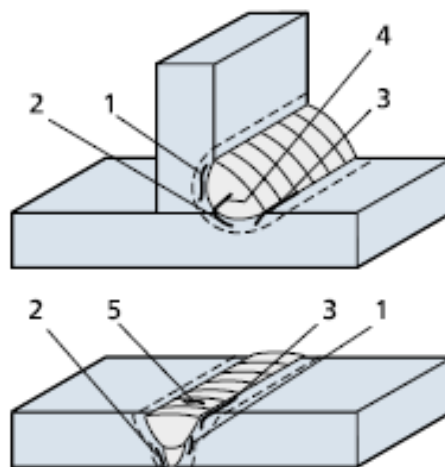
Kuvan 12 kohdissa a ja c on käytetty nopeampaa jäähdytystä, jolloin raekooksi muodostui $25\ \mu\text{m}$ ja hitsi mikrorakenteeksi bainiittia. Kohdissa b ja d on käytetty hitaampaa jäähdytystä, jolloin raekooksi muodostui $40\ \mu\text{m}$ ja hitsin mikrorakenteeksi austeniittinen sekä myös osittain bainiittinen. Pienemmän raekoon ansiosta muun muassa hitsin sitkeys on korkeampi. Nopeampi jäähdytys voi saada aikaan jopa kaksinkertaisen sitkeyden kuin hitaampi jäähdytys. Kuvan 12 hitsit on tehty laserhitsaamalla. [42, s. 357]

Laserhitsaus soveltuu myös lyhyemmän jäähdytysajan vuoksi ultralujien terästen hitsaukseen. Esimerkiksi kaarihitsausmenetelmiin verrattuna jäähdytysaika on selvästi lyhyempi. Täten hitsistä saadaan kovempi ja muutosvyöhykkeelle syntyy hienompi rakenne. [43, s. 61]

3.6 Hitsausmetallurgiset ongelmat

Ultralujien terästen hitsauksessa tai tuotteen käytön aikana voi esiintyä erilaisia ongelmia, jotka huonontavat merkittävästi hitsiliitoksen laatua. Merkittävimmät hitsausmetallurgiset ongelmat ovat kylmähalkeilu, kuumahalkeilu, lamellirepeily sekä iskusitkeyden huonontuminen. [25, s. 10]

Kylmähalkeilua esiintyy erityisesti lujien terästen hitsauksessa, jolloin muutosvyöhykkeen mikrorakenne muuttuu martensiitiksi, joka on yleensä haurasta. Martensiitti saadaan aikaan teräksen karkaisulla, joka edellyttää nopeaa jäähtymisnopeutta sekä riittävää seostusta. Lisäksi liiallinen vetypitoisuus hitsissä sekä hitsissä esiintyvät jännitykset vaikuttavat kylmähalkeamien muodostumiseen. Lujilla teräksillä kylmähalkeamia voi syntyä myös hitsiaineessa. Myös vedyn liukeneminen hitsiin voi aiheuttaa kylmähalkeilua, ja sitä voi joutua hitsiin esimerkiksi hitsauslisäaineesta. Vety saa mikroraon suurenemaan, mikä johtaa kylmähalkeiluun. Kylmähalkeilua voidaan estää tehokkaasti muun muassa käyttämällä niukkavetyisiä lisäaineita sekä esikuumennuksella. Kuvassa 13 nähdään erilaisten kylmähalkeamatyyppien esiintyminen muutosvyöhykkeessä ja hitsiaineessa. [25, s. 10–11]

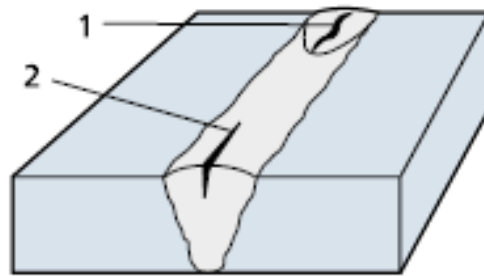


Kuva 13. Kylmähalkeamien esiintyminen muutosvyöhykkeessä ja hitsiaineessa.

[25, s. 10]

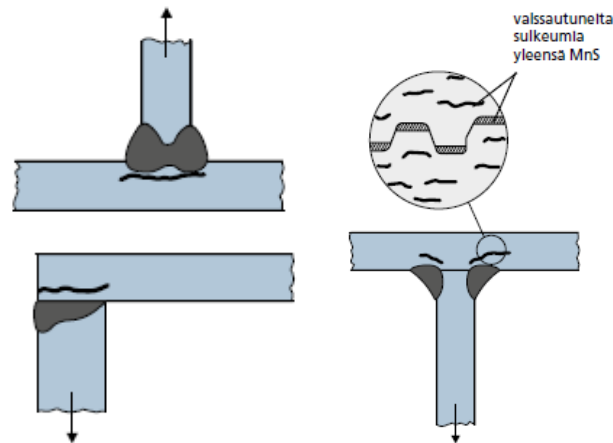
Kuvassa 13 havainnollistetaan viisi eri kylmähalkeamatyyppiä. Muutosvyöhykkeeseen liittyvät halkeamat ovat palonalainen halkeama (1), juurihalkeama (2) ja reunahalkeama (3). Hitsiaineeseen liittyvät halkeamat ovat juurihalkeama (4) ja poikittaishalkeama (5).

Kuumahalkeilua eli jähmettymishalkeilua syntyy korkeissa lämpötiloissa (yli 1200 °C) joko hitsin jähmettymisen yhteydessä tai välittömästi sen jälkeen. Kuumahalkeamia syntyy hitsiaineen kutistumisen seurauksena jähmettyessä ja hitsin jäähtyessä. Lisäksi seosaineista syntyvien epäpuhtauksien muodostuminen hitsin keskilinjalle, saa aikaan matalan sulamispisteen omaavia yhdisteitä, jolloin muodostuu kuumahalkeamia. Varsinkin syvät ja kapeat hitsipalkot edistävät kuumahalkeilua. Sitä esiintyy etenkin MIG/MAG-hitsauksella ja jauhekaarhitsauksella suuren tunkeuman vuoksi. Kuumahalkeilua voidaan estää muun muassa hitsin syvyyttä pienentämällä sekä käyttämällä pientä hitsausenergiaa, jolloin pienen tunkeuman ansiosta tapahtuu vähemmän saostumista. Kuvassa 14 havainnollistetaan kaksi eri kuumahalkeamatyyppiä, joita ovat kraaterihalkeama (1) ja hitsin pitkittäishalkeama (2). [25, s. 10–12]



Kuva 14. Kuumahalkeilun esiintyminen hitsissä [25, s. 11].

Lamellirepeilyä syntyy yleensä silloin, kun hitsausliitos on muodoltaan sellainen, että paksuussuuntaan muodostuu vetojännitystä. Teräksen sitkeys paksuussuunnassa riippuu sulkeumien määrästä ja muodosta. Pitkät sulkeumat heikentävät teräksen sitkeyttä paksuussuunnassa. Lamellirepeilyä voidaan pienentää hitsattaessa suurilla tehoilla, jolloin tunkeuma saadaan koko levyn mittaiseksi. Kuvassa 15 on esitetty yleisimmät lamellirepeilyn esiintymispaikat ja repeilymekanismit. [25, s. 10–12]



Kuva 15. Lamellirepeilyn esiintymispaikat ja repeilymekanismit [25, s. 12].

3.7 Korkean myötölujuusluokan terästen hitsattavuus

Ultralujien terästen kehityksen myötä mekaaniset ominaisuudet ovat parantuneet merkittävästi useissa eri teknisissä sovelluksissa, joista esimerkiksi myötölujuuden nousuminen on merkittävää. Tässä kappaleessa käsitellään muutamia korkeita myötölujuusluokan teräksiä ja niiden hitsattavuutta.

Optim960 QC-teräs on karkaistu (Q) ja kylmämuovattava (C) teräs, joka on myös niukahiilinen. Hyvä hitsattavuus on korkean lujuuden lisäksi sille ominaista. Optim960 QC-teräs valmistetaan kuumavalssauksella nauhavalssauslinjalla, jonka jälkeen se jäähdytetään vesijäähdytyksen avulla, eli tapahtuu suorasammutus. Suorasammutuksen myötä seosainepitoisuus ja hiiliekvivalentti saadaan pysymään suhteellisen pienenä, jolloin teräksen hitsattavuus paranee. Taulukoista 1 ja 2 nähdään Optimi QC-terästen kemiallinen koostumus, CEV-arvo sekä mekaaniset ominaisuudet. [43, s. 2–3] [44, s. 2–3]

Taulukko 1. Optim QC-terästen kemiallinen koostumus (%). [44, s. 3]

Optim grade	C max	Si max	Mn max	P max	S max	CEV typical	CEV max
900 QC	0.10	0.25	1.15	0.020	0.010	0.46	0.51
960 QC	0.11	0.25	1.20	0.020	0.010	0.47	0.52

Taulukko 2. Optim QC-terästen 0,2 -myötöraja, murtolujuus, murtovenymä sekä iskutkeysarvo. [44, s. 3]

Optim grade	R _{p0.2} min, MPa	R _m min, MPa	A ₅ min, %	Impact toughness at -40°C KV min, J ¹⁾
900 QC	900	950	8	50
960QC	960	1000	7	50

Melko pieni hiilipitoisuus ja seostus parantavat yleisesti terästen hitsattavuutta, koska liiallista karkenemista ei tapahdu liitosalueella. Täten kylmähalkeiluriski pienenee ja hitsausliitoksen muutosvyöhykkeen iskutkeys säilyy hyvänä. Toisaalta Optim960 QC-teräksen bainiittis-martensiittisestä mikrorakenteesta johtuen, se on herkempi myöhemmille lämpökäsittelyille. Hitsauksessa tuotu lämpö aiheuttaa muutosvyöhykkeen pehmenemistä, mistä seuraa alilujan vyöhykkeen muodostuminen verrattuna perusaineeseen. Kyseisen vyöhykkeen laajuus riippuu lämmöntonin suuruudesta. Kun pyritään saamaan tasalujan liitokseen, on alilujan vyöhykkeen leveyden oltava mahdollisimman kapea verrattuna hitsatun levyn tai putken paksuuteen. Täten lämmöntuontia tulisi rajoittaa siten, että jäähtymisaika $t_{8/5}$ olisi suurimmillaan 4 sekuntia. Lisäksi CEV-arvon ollessa yli 0,45 % hitsauksessa tarvitaan esikuumennusta. [44, s. 3–6] [45]

SSAB:n Strenx-teräkset parantavat tuotteiden lujuutta, turvallisuutta ja keveyttä. Strenx1100 MC-teräs on kylmämuovaukseen soveltuva kuumavalssattu rakenneteräs, ja suurin osa Strenx-teräksistä on valmistettu kuumavalssauksella kuten myös Strenx1300-teräs. Yleisesti Strenx-teräksille luvataan hyvää hitsattavuutta. [48]

Taulukko 3. Strenx -teräksien kemiallinen koostumus (%). [46, s. 2] [47, s. 2]

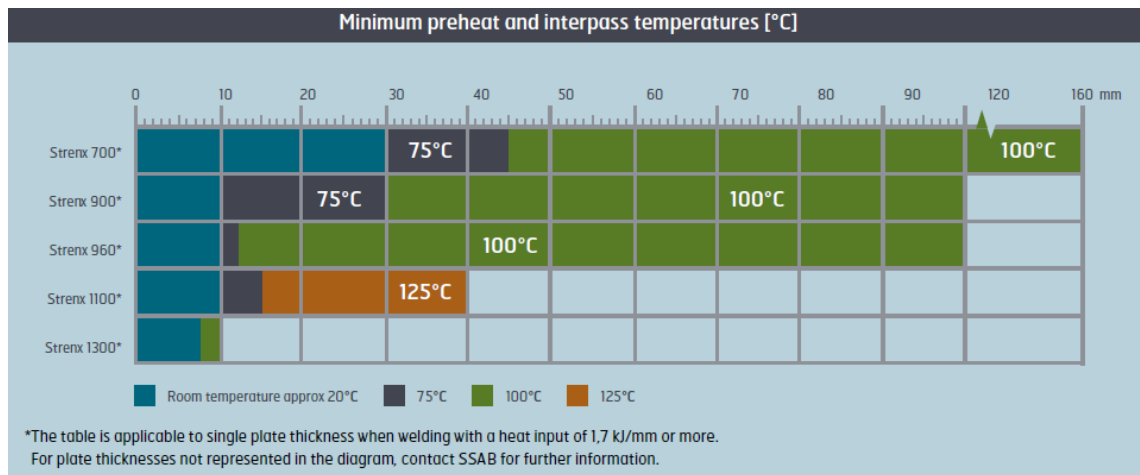
C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Al (min %)
0.15	0.5	1.8	0.020	0.005	0.015

C ¹⁾ (max %)	Si ¹⁾ (max %)	Mn ¹⁾ (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr ¹⁾ (max %)	Cu (max %)	Ni ¹⁾ (max %)	Mo ¹⁾ (max %)	B ¹⁾ (max %)
0.25	0.50	1.40	0.020	0.005	0.80	0.30	3.0	0.70	0.005

Taulukko 4. Strenx-teräksien ominaisuuksia: 0,2 -myötöraja, murtolujuus, murtovenymä, Charpy V-iskutiteytsarvo sekä CEV-arvo. [48, s. 9]

Nimi	Paksuusalue [mm]	Myötölujuus $R_{p0.2}$ min [MPa]	Murtolujuus R_m min [MPa]	Venyminen A_5 min %	Särmöttävyys Yleinen vähimmäisvähyys R/T poikittain, $B \leq 1 + 15$ mm	CEV/CEV tyyppinen Paksuus $t = 10$ mm	Iskusiteyts [J] lämpötilassa -40°C
Strenx 700	4-53	700	780-930	14	1.5	0.29/0.43	60
	(53)-100	650	780-930	14			
	(100)-160	650	710-900	14			
Strenx 900	4-53	900	940-1100	12	2.5	0.36/0.55	27
	(53)-100	830	880-1100	12			
Strenx 960	4-53	960	980-1150	12	2.5	0.36/0.55	40
	(53)-100	850	900-1100	10			
Strenx 1100	4-(5)	1100	1250-1550	8	3.0	0.36/0.55	27
	5-40	1100	1250-1550	10			
Strenx 1300	4-10	1300	1400-1700	8	4.0	0.42/0.65	27

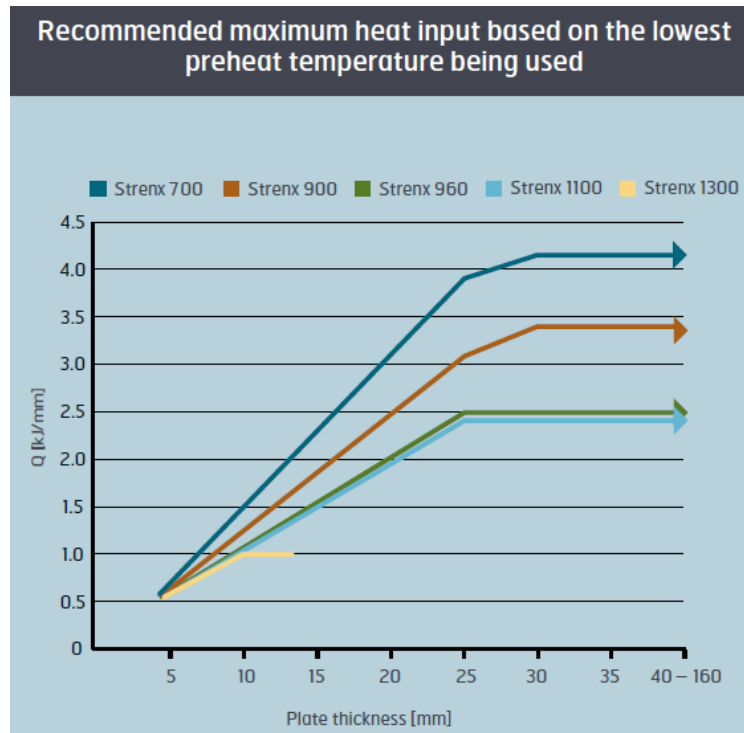
Myös Strenx1100 MC- ja Strenx1300-teräksissä CEV-arvo on yli 0,45 %, jolloin tarvitaan myös esikuumennusta. Pieni hiilipitoisuus ja seostus myös parantavat hitsattavuutta kuten Optim960 QC-teräksessä. Lämmöntuonti tulisi rajoittaa siten, että jäähtymisaika $t_{8/5}$ olisi jokaiselle Strenx-teräkselle suosituksen mukainen. Kuvasta 16 nähdään, että teräksen lujuuden kasvaessa lämmöntuonnin määrä vähenee. [49]



Kuva 16. Strenx-terästen hitsauksen suositeltuja esilämmityslämpötiloja [48, s. 8].

Mitä suurempi lujuus, sitä herkemmin liiallinen lämmöntuonti aiheuttaa lujuuden ja kovuuden alentumista sekä iskutiteyden ominaisuuksien huononemista. Hitsauksen lämmöntuonnin enimmäisarvo määräytyy liitoksen karkearakeisen vyöhykkeen iskutiteyden transitiolämpötilan ja liitoksen lujuuden perusteella. Liitoksen karkearakeisen vyöhykkeen iskutiteyttä heikentää lämmöntuonnin kasvaessa tapahtuva austeniitin rakeenkasvu, ja sen seurauksena austeniitti/ferritiitti-faasimuutoksessa hitsistä muodostuu

haurasta. Kuvasta 17 nähdään suurimmat mahdolliset lämmöntuonin rajat levyn paksuuden mukaan. Lisäksi kuvassa 18 on esitetty suotuisat jäähtymisaikavälit yleisimmille Strenx-teräksille. Hitsiltä vaaditut iskutkeysvaatimukset määrittävät rajat jäähtymisajalle. [8]



Kuva 17. Strenx-terästen suurimman lämmöntuonin rajat levyn paksuuden mukaan. [48, s. 11]

$t_{8/5}$ values, min 27J at -40°C	
Strenx 960-1300	5-15 s
Strenx 1100 MC	1-10 s
Strenx 900 MC, Strenx 900 Plus, Strenx 900 Section, Strenx 900 Tube MH, Strenx 960 MC, Strenx Tube 960 MH Strenx 960 Plus	1-15 s
Strenx 900	5-20 s
Strenx 700, Strenx Tube 700 QLH	5-25 s
Strenx 700 MC, Strenx 700 MC Plus, Strenx 700 Section, Strenx Tube 700 MH, Strenx Tube 700 MLH, Strenx Tube 700 QLH, Strenx 100 XF, Strenx 110 XF, Strenx 650 MC, Strenx 650 Section, Strenx 600 MC	1-20 s

Kuva 18. Strenx-terästen suositellut jäähtymisaajat [48, s. 13].

Myös Strenx-teräkset soveltuvat hitsattaviksi, mutta niiden lämmöntuonti -ja jäähtymisaikarajoituksia on noudatettava, mikä aiheuttaa rajoituksia myös hitsausmenetelmälle.

Liitoksen nopean jäähtymisen seurauksena syntyvä martensiittinen mikrorakenne on altis vetyhalkeamille. Erittäin nopean jäähtymisen seurauksena myös martensiittisen mikrorakenteen sitkeys heikkenee. [8]

5. YHTEENVETO

Ultralujat teräkset ovat hyvin hitsattavia, mutta niiden hitsauksessa täytyy noudattaa tarkasti annettuja hitsausohjeita, sekä mahdollisesti tehdä ylimääräisiä menetelmäkokeita, jotta oikeat hitsausparametrit saadaan määritettyä. Lujien terästen hitsaus voi kuitenkin olla hyvin vaativaa tiukkojen ja huomattavasti tarkempien lämmöntuontivaatimusten takia. Useiden teräslaatuojen lämmöntuontirajoitukset voivat olla jopa alle 1,0 kJ/mm, joten kaikki hitsausmenetelmät eivät sovellu ultralujien terästen hitsaukseen. Muita haasteita ultralujien terästen hitsauksessa voivat olla: hitsauksessa muodostuvat korkeammat jäännösjännitystasot, pienempi jäykkyys sekä kriittinen vikakoko hitsissä.

Monet menetelmät soveltuvat ultralujien teräksen hitsaukseen. Tärkeimmät ultralujien terästen hitsauksen tekijät, mitkä vaikuttavat hitsin laatuun ovat lämmöntuonti, jäähtymisaika sekä hitsin koostumus. Laserhitsauksen etuna ultralujia teräksiä hitsattaessa on hitsin erinomainen laatu, suuri hitsausnopeus ja pieni lämmöntuonti, joita edellytetään ultralujien teräsrakenteiden hitsauksessa. Muista menetelmistä ultralujien terästen hitsaukseen parhaiten soveltuvat TIG-, MIG/MAG- ja plasmahitsaus. Pienen lämmöntuontin ansiosta rakeenkasvua ja muutosvyöhykettä saadaan pienennettyä. Lisäksi muodonmuutoksia saadaan rajoitettua entistä paremmin ja jälkityöstön tarve on vähäinen. Kuitenkin ultralujien terästen hitsauksessa voi esiintyä ongelmia, jotka vaikuttavat hitsin laatuun. Kylmähalkeilua, kuumahalkeilua ja lamellirepeilyä voidaan myös estää tietyillä toimenpiteillä ja hitsausmenetelmän valinnalla, kuten käyttämällä pientä hitsausenergiaa ja esikuumennusta.

LÄHTEET

- [1] M. Pirinen, The effects of welding heat input on the usability of high strength steels in welded structures, väitöskirja, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT konetekniikka, Acta Universitatis Lappeenrantaensis 514, Yliopistopaino, 2013, 174 p.
- [2] Ruukki, Welding General, Hot-rolled steel sheets, plates and coils, 2013, 14 s.
Saatavissa (viitattu 20.11.2018):
https://www.oxycoupage.com/FichiersPDF/Ruukki_Pdf/English/Ruukki-Hot-rolled-steels-Processing-of-material-Welding.pdf
- [3] S. Kou, Welding Metallurgy, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, University of Wisconsin, 2003, 478 p.
- [4] J. Leinonen, Processing steel for higher strength, Advanced materials & processes, University of Oulu, 2001, 4 s. Saatavissa (viitattu 12.1.2019): <https://www.asminternational.org/documents/10192/1755557/amp15911p031.pdf/8dd1941a-b489-481d-990e-5bbb0bd135ee>
- [5] P. Haslberger, S. Holly, W. Ernst & R. Schnitzer, Microstructure and mechanical properties of high strength steel welding consumables with a minimum yield strength of 1100 MPa, Journal of Materials Science, Volume 53, Issue 9, 2018, pp 6968–6979.
- [6] SSAB, Welding of Strenx, 2018, s. 20. Saatavissa (viitattu 16.1.2019): <https://www.ssab.fi/tuotteet/brandit/strenx/tuotteet/strenx-1300?accordion=downloads>
- [7] Ruukki, Kuumavalssatut teräkset Raahen tehtaalta, Tuoteohjelma 2011, s.29. Saatavissa (viitattu 20.1.2019): <https://docplayer.fi/124014-Tuoteohjelma-2011-kuumavalssatut-terakset-raahen-tehtaalta.html>
- [8] R. Latypova & T. Kauppi, Ultralujien kuumavalssattujen rakenneterästen hitsattavuus -kirjallisuustutkimus, Lapin ammattikorkeakoulu, Sarja B. Tutkimusraportit ja kokoomateokset 16/2018, 60 s.
- [9] H. Kiuru, Ultralujien terästen ominaisuuksien hyödyntäminen kone- ja terärakenteissa, CASR-Steelpolis-verkostohanke (EAKR), Oulun yliopisto, Oulun Eteläisen piirin instituutti, 2012, 31 s.

- [10] J. Lämsä & H. Kiuru, Ultralujat rakenne- ja kulutusteräokset – tärkeimmät ominaisuudet suunnittelulle, CASR-Steelpolis-verkostohanke (EAKR), Raahen Seudun Teknologiakeskus Oy, Oulun yliopisto, 2012, 47 s.
- [11] S. Tihinen, Lujat termomekaanisesti valssatut teräokset, Ruukki Metals OY, Raahen terästehdas, 2013, 35 s.
- [12] D. Porter, Developments in Hot-Rolled High-Strength Structural Steels. Raahen: Rautaruukki Oyj, 2006, 9 s.
- [13] SSAB, RAEX 500 Data Sheet, 2017, 3 s.
- [14] O. Vähäkainu, Ruukin kuumavalssatut erikoisteräokset, 2012, 56 s.
- [15] Wear resistant steel, 2017. Saatavissa (viitattu 25.1.2019): <http://www.wearresistantsteel.in/raex.html>
- [16] M. Shome, M. Tumuluru, Welding and joining of advanced high strength steels (AHSS), ScienceDirect, Woodhead Publishing, 2015, 204 p.
- [17] M. Peltonen, A. Kukkonen, S. Nummela & H. Hänninen, Ultralujien rakenneteräosten hitsattavuus ja hitsausliitosten ominaisuudet, Hitsaustekniikka, 5/2015, s. 30-35.
- [18] SSAB, Precision steel tube handbook – complication of training material for bending, welding and coating, Second edition SSAB 2017, Otava Book Printing Ltd, Keuruu, 2017, 188 s.
- [19] Ionix teknologiat, 2019. Saatavissa (viitattu 28.1.2019): <http://www.ionix.fi/fi/teknologiat/kaarihitsaus/migmag-hitsaus/>
- [20] H. Metsäperä, T. Kultala, Plasma- ja laserhitsauksen vertailu ultralujan rakenneteräoksen hitsauksessa. Saatavissa (viitattu 28.1.2019): <http://stolen.wata.fi/koulu/hitsaustekniikka/Plasma-%20ja%20laserhitsaus.ppt>
- [21] Ionix teknologiat, 2019. Saatavissa (viitattu 29.1.2019): <http://www.ionix.fi/fi/teknologiat/lasertyosto/laserhitsaus/>

- [22] I. Lappalainen, Laser- ja hybridihitsauksen käyttökohteet, Savonia-ammattikorkeakoulu, 2015, 65 s. Saatavissa (viitattu 1.2.2019): https://www.pohjois-savo.fi/media/seminaarit-ja-tapahtumat/2015/takeoff2_21052015/laser-ja-hybridihitsauksen-kaytto-cc-88kohteet.pdf
- [23] Esab osaamiskeskus, 2019. Saatavissa (viitattu 3.2.2019): <https://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/index.cfm>
- [24] Ionix teknologiat, 2017. Saatavissa (viitattu 3.2.2019): <http://www.ionix.fi/fi/teknologiat/lasertyosto/hybridihitsaus/>
- [25] Ovakon terästen hitsaus, 2014, 64 s. Saatavissa (viitattu 5.2.2019): http://www.ovako.com/PageFiles/49/Ovakon_terasten_hitsaus_15724.pdf
- [26] S. Vartiainen, Seosaineiden vaikutukset terästen hitsattavuuteen, Savonian ammattikorkeakoulu, 2005, 8 s.
- [27] T. Rissanen, Ultralujien terästen käyttö ja konepajaprosessit. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun julkaisu 6/2011, 36 s.
- [28] O. Vähäkainu. Hitsaajan opas 2003: Rautaruukin teräkset. Keuruu, Otava, 2003, 112 s.
- [29] X. Chen, B. Liao, G. Qiao, Y. Gu, X. Wang & F. Xiao, Effect of Nb on Mechanical Properties of HAZ for High-Nb X80 Pipeline Steels. *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 20, Iss. 12, 2013, p. 53–60.
- [30] L. Zhang, D. Wu & Z. Li, Influence of Alloying Elements on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Cold Rolled C-Mn-Si TRIP Steels, *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 19, Iss. 12, 2012 p. 42–47.
- [31] S. Kim, Y. Im, S. Lee, H. Lee, Y. Oh & J. Hong, Effects of Alloying Elements on Mechanical and Fracture Properties of Base Metals and Simulated Heat-Affected Zones of SA 508 Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 32A, Iss. 4, 2001, p. 903–911.
- [32] K. Sampath, An understanding of HSLA-65 plate steels. *New York: Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 15 (1), 2006 s. 32–40.

- [33] E. Keehan, Effect of Microstructure on Mechanical Properties of High Strength Steel Weld Metals, Göteborg: Chalmers University of technology and Göteborg University, 2004, 72 s.
- [34] L. Zhang, D. Wu & Z. Li, Influence of Alloying Elements on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Cold Rolled C-Mn-Si TRIP Steels. Journal of Iron and Steel Research, International, Vol. 19, Iss. 12, 2012, s. 42–47.
- [35] H. Hänninen, A. Bredeholm, T. Sarikka, R. Mougnot, P. Holmström, T. Saukkonen, A. Toivonen, P. Karjalainen-Roikonen, P. Nevasmaa, H. Keinänen, E. Leskelä, M. Ahonen, U. Ehrntén & P. Aaltonen. Structural integrity of Ni-base alloy welds. Espoo: VTT. 2014, 257 s
- [36] F. Kong & R. Kovasevic, Development of a Comprehensive Process Model for Hybrid Laser-Arc Welding, 2012, s.165-190. Saatavissa (viitattu 15.2.2019): <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/40988.pdf>
- [37] P. Lepola & M. Makkonen, Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet, Helsinki: WSOY, 2005, 429 s.
- [38] M. Pirinen, Y. Martikainen, S. Ivanov & V. Karkhin, Comparative analysis of the microstructure of the heat-affected zone metal in welding of high-strength steels, Welding International, Vol. 29, Iss. 4, 2015, s. 301–305.
- [39] M. Mišek, T. Mužik & S. Němeček, Differences between laser and arc welding of HSS Steels, 2012, s.67-74. Saatavissa (viitattu 24.2.2019): http://ac.els-cdn.com/S1875389212025424/1-s2.0-S1875389212025424-main.pdf?_tid=c6d8ebfa-2d43-11e4-84c9-00000aabb0f01&acdnat=1409073165_0942d0f50da33cab7270b3539cf2aa7b
- [40] W. Xu, S. Lin, C. Fan & C. Yang, Evaluation on microstructure and mechanical properties of high-strength low-alloy steel joints with oscillating arc narrow gap GMA welding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 75, Iss. 9, 2014, s. 1439–1446.
- [41] J. Siltanen, S. Tihinen & J. Kömi, Laser and laser gas-metal-arc hybrid welding of 960 MPa direct-quenched structural steelin a butt joint configuration, Journal of Laser Applications, J. Laser Appl, Vol. 27, No. S2, 2015, 9 s.

- [42] H. Yan, K. Wu, H. Wang, L. Li, Y. Yin & N. Wu, Effect of fast cooling on microstructure and toughness of heat affected zone in high strength offshore steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 19, Iss. 4, 2014, s. 355–360.
- [43] F. Kalkhorani, *Autogenous High Power Fiber Laser Welding of Optim 960 QC Ultra High Strength Steel*, Lappeenranta: LUT Yliopistopaino, 2014, 103 s.
- [44] M. Hemmilä, R. Laitinen, T. Liimatainen & D. Porter, *Mechanical and technological properties of ultra high strength Optim steels*, Ruukki Metals, Helsinki, 2005, 9 s.
- [45] J. Kumpulainen, S. Tihinen & R. Laitinen, *Ultralujien terästen hitsaus uusilla MAG-menetelmillä*, *Hitsaustekniikka*, 2/2011.
- [46] SSAB, *Strenx1100 MC Data Sheet*, 2017, 3 s.
- [47] SSAB, *Strenx1300 Data Sheet*, 2017, 3 s.
- [48] SSAB *Welding of Strenx*, 2018. *Welding of Strenx brochure 2018*, 20 s.
- [49] A. Kurc-Lisiecka, J. Piwnik & A. Lisiecki, *Laser welding of new grade of advanced high strength steel strenx 1100 MC*, *Arch. Metall. Mater.* 62, 2017, pp 1651-1657