Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

ULTRALUJIEN TERÄSTEN KÄYTETTÄVYYS HITSATUISSA RAKENTEISSA

USABILITY OF ULTRA HIGH STRENGTH STEELS IN WELDED STRUCTURES

Lappeenrannassa 14.5.2011

Olli Kanninen

Sisällysluettelo

1. JOHDANTO 2

1.1 Työn taustaa 2

1.2 Työn tavoite ja rajaus 2

2. ULTRALUJAT TERÄKSET 3

2.1 Ominaisuudet 3

2.2 Valmistus ja jälkikäsittelyt 4

3. HITSAAMINEN JA SIINÄ SYNTYVÄT MUUTOKSET 8

3.1 Hitsattavuus 9

3.2 Hitsauksen vaikutukset mikrorakenteeseen 9

3.3 Hitsauksen aikana tapahtuvien muutosten lieventäminen 11

3.3.1 Lämmöntuonti 12

3.2.2 Jäähtymisnopeus 13

3.3.3 Käytettävä lisäaine 13

3.3.4 Monipalkohitsaus 15

4. HITSAUKSEN LAADUNVALVONTA 16

4.1 Hitsausvirheet 17

4.1.1 Kylmähalkeilu 18

4.1.2 Kuumahalkeilu 20

5. SOPIVUUS HITSATTUIHIN RAKENTEISIIN 22

5.1 Leikkaaminen 22

5.2 Railonvalmistus 22

5.3 Muovattavuus 23

6. Käytännön esimerkkejä ultralujien terästen hitsaamisesta 24

6.1 Case: Maailman lujin hitsi – 1492 MPa 24

7. YHTEENVETO 25

LÄHTEET 27

Käytetyt lyhenteet

A_3	Austeniitin muodostumislämpötila
B	Boori
C	Hiili, kylmämuovattavaksi sopiva
CCT	Continuous cooling transformation
CEV, CE(IIW)	Hiiliekvivalentti
Cr	Kromi
HAZ	Heat affected zone, muutosvyöhyke
Mn	Mangaani
Mo	Molybdeeni
N	Normalisoitu teräs
Ni	Nikkeli
P	Fosfori
Q	Lämmöntuonti, karkaistu
S	Rikki
Si	Pii
T	Päästetty teräs
Ti	Titaani
TMCP	Termomekaaninen valmistusprosessi
$t_{8/5}$	Jäähtymis aika 800 ^{o}C:sta 500 ^{o}C:een
UHSS	Ultra high strength steel

1. JOHDANTO

Johdannossa esitellään työn taustaa sekä mihin työllä tavoitellaan. Myöskin työn pääpiirteinen rajaus tulee esille tässä kappaleessa.

1.1 Työn taustaa

Terästen kehittyminen tuo paljon lisähaastetta teräsrakenteiden suunnittelu- ja valmistupuolelle. Erittäin lujien terästen, myötölujuus yli 900 MPa käyttö mahdollistaa muun muassa ainepaksuuden pienentämistä radikaalisti verrattuna perusrakenneteräksiin (S235 ja S355). Edellä mainitun ja monen muun kehityksen mukana tuoman ominaisuus-muutoksen takia kyseisten terästen kysyntä on noussut viime vuosina suuresti ja sitä kautta myös käyttökohteet lisääntyneet. Ultralujien terästen käyttäminen erilaisissa rakenteissa vaatii kuitenkin vielä paljon tutkintaa. Tämän työn aihe pohjautuukin tiedon tarpeeseen koskien kyseisten terästen käyttöön rakenteissa, joissa osat hitsataan toisiinsa.

1.2 Työn tavoite ja rajaus

Nykyajan konstruktioissa keskitytään moniin muihinkin asioihin, kuin pelkästään tuotteen lopulliseen hintaan. Suurimmassa osassa tapauksista tuotteen lopullisella painolla on erittäin suuri merkitys. Teräsrakenteista puhuttaessa ultralujien terästen kehittyminen on mahdollistanut ainepaksuuden pienentämistä selvästi, jota kautta tuotteiden lopullista painoa saadaan alemmas. Tämän työn tavoitteena onkin syventyä ultralujien terästen käytettävyyteen hitsatuissa rakenteissa ja selvittää hitsauksen mukana tuomia mahdollisia vaikeuksia sekä kyseisten vaikeuksien minimoinnin mahdollisuuksia.

Kandidaatintyö keskittyy ultralujien terästen hitsauksessa mikrorakenteeseen ja ominaisuuksiin tuleviin muutoksiin, jotka vaikuttavat kyseisten terästen käyttöön suunnitelluissa rakenteissa sekä mahdollisten tulevien muutosten minimoimiseen. Perustan työlle antaa selvitys ultralujien terästen yleisistä ominaisuuksista, valmistustavoista sekä yleisistä käyttökohteista.

2. ULTRALUJAT TERÄKSET

Vastauksena kiristyneille päästövaatimuksille, energian hinnan jatkuvalle nousulle sekä taloudellisen kilpailukyvyn parantamiselle ovat syntyneet erittäin suuren lujuuden omaavat ultralujat teräkset. UHSS (ultra high strength steel) tarkoittaa teräksiä, joiden myötölujuus on yli 900 MPa. Tällaisten terästen tulo markkinoille on muuttanut todella paljon muun muassa kuljetusvälineiden sekä nosto- ja siirtolaitteiden rakentamista sekä kokonaisuudessaan teräsrakenteiden rakentamista kaikenlaisiin kuormitustilanteisiin. Syynä ei ole pelkästään materiaalin suuri lujuus, vaan myös muut materiaaliominaisuudet, joita ultralujat teräkset omaavat.

Nämä teräkset tuovat lisää ulottuvuutta suunnitteluun, sillä materiaalivahvuuksia voidaan selvästi pienentää. Kuitenkin täytyy ottaa huomioon murtovenymärajan selvä laskeminen rakenneteräksiin S235 tai S355 verrattuna. Ultralujan teräksen käytöstä aiheutuvien säästöjen takana tulee siis olla tarkka tuotesuunnittelu, jotta rakenteet saadaan toimimaan oikealla tavalla. Esimerkkinä oikeanlaisesta ultralujan teräksen käyttämisestä voidaan mainita tukkiauton pankorakenteet, joissa kyseisellä materiaalilla ollaan saavutettu jopa 20 % painosäästö entiseen käytettyyn materiaaliin nähden. (Hitsaustekniikka 1/2004, 31-32).

2.1 Ominaisuudet

Pääpaino ultralujien terästen ominaisuuksissa on tietenkin lujuudella, joka on suuresti määräävä tekijä materiaalivalinnassa rakenteeseen, johon kohdistuu suuria kuormituksia. Ultralujilla teräksillä myötöraja on vähintään edellämainitun 900 MPa, kun taas ylärajaa on vaikea määrittää jatkuvan kehityksen takia. Suurimmat myötölujuudet teräksillä liikkuvat tällä hetkellä reilusti yli 1500 MPa eli ultralujat teräkset terminä käsittävät erittäin laajan skaalan eri lujuuksisia teräksiä. Murtovenymät kyseisillä teräksillä on maksimissaan n. 10 % luokkaa. Taulukosta 1 selviää kahden eri valmistajan tarjoamien ultralujien terästen mekaanisia ominaisuuksia.

Taulukko 1. Ultralujien terästen Optim 900 QC, Armox 370T ja Ramor 400 mekaanisia ominaisuuksia.

Teräslaji	Myötölujuus (MPa) vähintään	Murtolujuus (MPa) vähintään	Murtovenymä (%) vähintään	Iskusitkeys pitkittäin	
				t °C	Charpy V J/cm^2 väh.
Optim 900 QC	900	950	8	-40	34
Armox 370T	1000 (1 900 (2	1150 1050	10 11	-40 -40	20 25
Ramor 400	1100	1300	8	-40	20

(1 = 3 – 20 mm paksuusalueelle ja (2 = 20 – 40 mm paksuusalueelle.

Lujuus ei kuitenkaan ole ainut hyvä ominaisuus näillä teräksillä, vaan ne käsittävät myös korkean kovuuden, hyvän hitsattavuuden, iskusitkeyden, pinnanlaadun sekä uusimmissa vaihtoehdoissa myös erittäin hyvän säänkestävyyden. Esimerkiksi Ruukin Optim QC-terästen keskimääräinen kovuus on yli 300 HBW, joka tarkoittaa selvästi suurempaa kovuutta, kuin esimerkiksi Ruukin S355 rakenneteräksellä. Yhdistämällä nämä kaksi tärkeää ominaisuutta, kovuus ja lujuus, saadaan materiaalille taattua erittäin hyvä kulumiskestävyys. Hyvä pinnanlaatu taas saadaan aikaan peittauksella eli materiaalin suolahappokäsittelyllä valssihilseiden poistamiseksi. Materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttaa erittäin paljon muun muassa seostaminen, valssaaminen sekä muut sille tehtävät lämpökäsittelyt. Jotta materiaalille saadaan halutunlainen mikrorakenne sekä materiaaliominaisuudet, vaatii se lämpökäsittelyprosessin tarkkaa tuntemista ja suunnittelua sekä tietoa materiaalin käyttäytymisestä korkeissa lämpötiloissa. Kuten talukosta 1 näkyy, ultralujilla teräksillä on suhteellisen hyvä iskusitkeys -40^{o}C:ssa eli ne sopii hyvin käytettäväksi myös matalissakin lämpötiloissa.

(Hitsaustekniikka 1/2004, 31-32; Ruukki, kuumavalssatut teräslevyt ja -kelat, esikäsittelyt; Ruukki, Optim QC; SSAB Oxelösund, Armox 370T; Ruukki 2010, Ramor karkaistu teräs suojaukseen; Liu et al. 2009).

2.2 Valmistus ja jälkikäsittelyt

Ultralujien terästen valmistusprosessi itsessään ei eroa muiden terästen valmistuksesta. Suurimman eron erilaisten terästen valmistukseen tekee eri seosaineiden käyttäminen erilaisissa määrissä sekä jäähdyttämisprosessin yksityiskohdat kuumavalssauksen ja

lämpökäsittelyiden jälkeen. Eniten vaikutusta näistä tekijöistä on seostuksella, sillä eri seosaineet vaikuttavat syntyvän rakenteen mekaanisiin ominaisuuksiin eri tavalla, toiset heikentäen tiettyjä ominaisuuksia ja taas vahvistaen tiettyjä. (Metallioppi uudistettu Miekk-ojan Lindroos et al s.414). Taulukosta 2 ilmenee Optim 900 QC, Armox 370T ja Ramor 400 terästen seosaineiden määrät.

Taulukko 2. Optim 900 QC, Armox 370T ja Ramor 400 terästen seosaineiden määrät (%).

Teräslaji	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Ni	Mo	B
Optim 900 QC	max. 0,10	max. 0,25	max. 1,15	max. 0,020	max. 0,010		max. 0,07			
Armox 370T	max. 0,32	0,1-0,4	max. 1,2	max. 0,015	max. 0,010	max. 1,0		max. 1,8	max. 0,7	max. 0,005
Ramor 400	max. 0,24	max. 0,70	max. 1,50	max. 0,020	max. 0,015	max. 1,00		max. 1,00	max. 0,70	max. 0,005

Hiilen vaikutus rakenteessa liittyy suurimmin kovuuteen ja sitä kautta myös hitsattavuuteen. Pienillä hiilipitoisuuksilla, kuten Optim QC:ssä (0,1%) ei martensiitin syntymisestäkään ole niin paljon haittaa, koska tällöin martensiitin hiilipitoisuus jää pieneksi eikä rakenne selvästi haurastu. Armox- ja Ramor-teräksiä hitsattaessa martensiitin muodostuminen on ongelmallisempaa niiden selvästi suuremman hiilipitoisuuden takia, jolloin rakenteesta tulee myös selvästi hauraampi

jos martensiittia pääsee syntymään paljon. Kromilla seosaineena on vaikutusta austeniitin hajaantumisnopeuden hidastamiseen, joka taas johtaa perliitin suurempaan muodostumiseen lopullisessa rakenteessa. Tämän avulla saadaan materiaalin lujuutta nostettua selvästi. Kromi on myös parantavaa vaikutusta teräksen korroosionkestoon. Pienellä boorin lisäyksellä sekä molybdeenin seostuksella saadaan mikrorakenteeseen syntymään bainiittia myös ilmassa tapahtuvan jäähtymisen aikana. Näin rakenteesta tulee entistä lujempi ja sitkeämpi. (Metallioppi Rahi 23, Mat 3. Miekk-oja s. 416-418).

Ultralujat teräkset kuumavalssataan valun jälkeen, jotta kyseinen teräs saadaan jäämään perustilaansa ilman, että muokkauslujittumista tapahtuu. Valssauslämpötilan tarkalla säätämisellä pystytään myös saavuttamaan halutut mekaaniset ominaisuudet. Kyseisiltä teräksiltä vaaditaan kuitenkin äärimmäisiä mekaanisia ominaisuuksia lujuuden ja sitkeyden suhteen, minkä lisäksi teräksen pitää vielä olla hyvin hitsattavissa. Tämä saadaan aikaan kuumavalssauksen jälkeisillä termomekaanisilla käsittelyillä sekä oikeanlaisilla

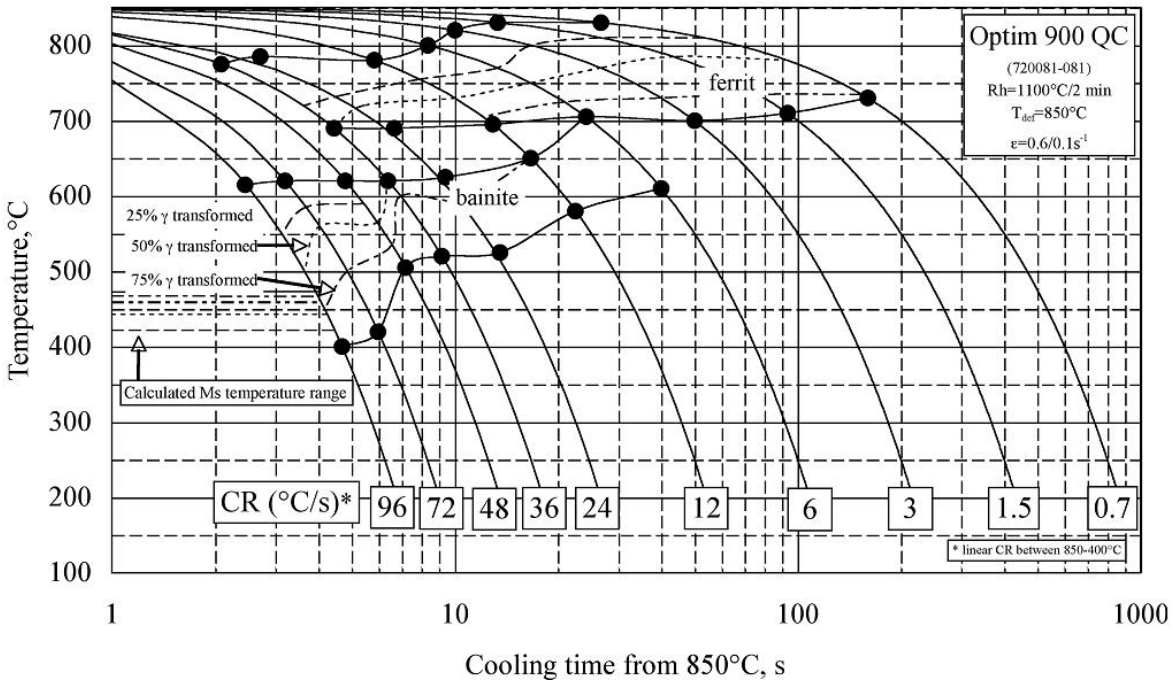
jäähdytyksillä näiden käsittelyiden jälkeen. (Metallioppi Läm 1 – 4). Materiaalille suoritetut käsittelyt ilmenevät yleensä niiden nimikkeen yhteydessä olevista kirjainlyhenteistä. Hyvänä esimerkkinä jo edellä mainitun Optim 900 QC teräksen perässä olevien kirjainten merkitykset, Q tarkoittaa karkaistua ja C kylmämuovattavaksi sopivaa terästä. Muita monesti esiintyneitä lyhenteitä ovat TMCP eli termomekaaninen valmistusprosessi, T eli päästetty teräs sekä N, joka tarkoittaa normalisoitua tai normalisointivalssattua terästä. Nuorrutettua terästä tarkoittava kirjain yhdistelmä on Q+T. (Ruukki, kuumavalssattujen terästen toimistustilat ja lyhenteet; Metallioppi Läm - 4).

Yleisesti ottaen karkaistuille kappaleille saadaan aikaan suuri lujuus, sitkeys ja kovuus. Normaalisti monille teräksille suoritetaan karkaisun jälkeen päästö, jotta niiden rakenne saadaan vielä sitkeämmäksi eikä haurasmurtuman esiintyminen ole niin todennäköistä. Ultralujissa teräksissä käytettyjen seosaineiden takia on bainiitin muodostuminen mikrorakenteeseen martensiitin ohella kuitenkin mahdollista ilmassa tehtävän jäähdytyksen aikana. Bainiitilla taas on hyvät lujuus- ja sitkeysominaisuudet varsinkin mangaanin ja kromin seostuksen takia, koska tällöin sen muodostumislämpötila on normaalia alhaisempi. (Miekk-oja s.418). Kuvassa 1 on esitetty Optim 900 QC:n CCT – käyrä, joka kuvaa austeniitin hajaantumista jatkuvan jäähtymisen aikana.

Termomekaanisen valmistusprosessin tavoitteena on teräksen lujittaminen sekä sen sitkeyden, muovattavuuden ja hitsattavuuden parantaminen, ilman että materiaalissa tarvitsee olla paljon erilaisia seosaineita. Tässä käsittelyssä teräs kuumavalssataan aluksi 1150 ^{o}C lämpötilassa, jonka jälkeen se jäähdytetään lähelle A_3 –lämpötilaa ja ennen kyseisen lämpötilan saavuttamista sille suoritetaan kontrolloitu valssaus, ja sen jälkeen se jäähdytetään veteen. Prosessin onnistuminen perustuu tarkkaan muokkausasteen, lämpötilan sekä jäähtymisen säätämiseen. Materiaalin saama korkea lujuus ja hyvä sitkeys on hienon mikrorakenteen ansiota. TMCP:llä saadaan aikaan mikrorakenne, joka sisältää ferriittiä, perliittiä sekä ferriitti+bainiittia. (Konetekniikan materiaalioppi s.116-117; Ruukki, kuumavalssatut teräslevyt ja –kelat; Voestalpine, lujat ja erikoislujat termomekaanisesti valssatut hienoraeteräkset).

Karkaisemalla valmistetut teräkset omaavat joko täysin martensiittisen tai bainiittis-martensiittisen mikrorakenteen. Nuorrutetuilla teräksillä bainiitin määrä bainiittis-

martensiittisessa mikrorakenteessa on suurempi, kuin karkaisemalla valmistetuissa. (Ruukki, Optim QC; SSAB Oxelösund, Armox welding recommendations).



Kuva 1. Optim 900QC CCT -käyrä (Ylikangas 2009, 3).

Valmistusprosessin lopuksi ultralujille teräksille suoritetaan vielä oikaisuvalssaus, jonka ansiosta levystä saadaan poistettua valmistuksesta aiheutuneet jäännösjännitykset, sekä pinnan epätasaisuudet. (Kuumavalssatut teräslevyt ja -kelat. Rakenneteräkset).

2.3 Yleiset käyttökohteet ja niihin liittyvät tekijät

Ultralujat teräkset ovat parhaassa elementissään rakenteissa, jossa painolla ja poikkileikkauksen koolla on suurta merkitystä. Eniten näitä teräksiä on tällä hetkellä rantautunut ajoneuvoteollisuuteen, henkilöauton osista isojen maansiirtokoneiden runko-rakenteisiin ja sotilasajoneuvoihin. Kyseisissä laitteissa tärkeimmät huomioon otettavat asiat liittyvät turvallisuuteen, kestävyyteen, kokoon ja massaan. Nykyaikaisen kilpailun mukaisesti ajoneuvon massan pienentäminen on erittäin tärkeää. Tässä kohtaa ultralujat teräkset tulevat selvästi esille. Suoranaisesti suojaukseen tarkoitetut ultralujat teräkset, kuten Ruukin Ramor ja SSAB:n Armox ovat erittäin käytettyjä paikoissa, joissa ballistisilla

ominaisuuksilla on myös suurta merkitystä. Näitä ovat muun muassa sotilas- ja arvokuljetusajoneuvot, pankki holvit ja suojatut kontit. (Ruukki, Optim QC; Ruukki, Ramor; SSAB, Armox).

Jos hypätään pois ajoneuvojen parista ja mietitään tämän materiaalin käyttöä laajemmin erilaisissa rakenteissa, niin ensimmäiseksi tulee ajateltua sen käytöstä aiheutuvaa hintaa. Perus rakenneteräksiin verrattuna kalliimpaa ultralujaa terästä ei kannata siis aivan joka paikassa käyttää, jos sille ei ole selvää syytä. Tälläisiä paikkoja voisivat olla esimerkiksi paikallaan olevat ja vain pieniä kuormia kantavat rakenteet, joihin esimerkiksi S235 terästä voidaan käyttää ihan yhtä hyvin.

3. HITSAAMINEN JA SIINÄ SYNTYVÄT MUUTOKSET

Liitostapana hitsaaminen on erittäin hyvä ja yleisimmin käytetty liitostapa metalleilla. Hitsaaminen sopii erinomaisen hyvin konstruktioihin, joihin kohdistuu suuria kuormituksia (Konetekniikan materiaalioppi s.5.) Hitsaamalla liitoksesta saadaan erittäin luja ja siistin näköinen eikä itse prosessikaan vie aikaa kovinkaan paljon verrattuna samojen liitoksien tekemiseen esimerkiksi ruuveja käyttämällä. Prosessi ei yleensä vaadi kovinkaan paljon alkuvalmisteluja, kuten esimerkiksi reikien poraaminen pulttiliitoksia tehdessä. Railon valmistaminen sekä sen puhdistaminen ja kappaleiden oikeanlainen asettaminen ovat pääsääntöiset työt, jotka kappaleelle on ennen hitsaamisen aloittamista tehtävä. Joskus kappaleen esikuumennuksen tarve voi viedä hieman aikaa lisää, muttei sekään kovinkaan radikaalisti. Kääntöpuolena ovat hitsauksesta aiheutuvat lisätyö esimerkiksi hitsausvirheistä johtuen. Nämä kuitenkin voidaan välttää oikean prosessin, lisäaineen sekä hitsausasetusten valinnalla.

TM-käsittelyllä valmistetun teräksen hitsaamisessa on käytettävä erityistä huolellisuutta, jotta karkeneminen saadaan pysymään alhaisena ja täten perusaine mahdollisimman ennallaan. Nuorrutettua terästä ei saa esikuumentaa yli 200^{o}C asteeseen ja karkaistuille teräksille ei suositella hitsauksen jälkeisiä lämpökäsittelyjä. (Ruukki, Optim QC; SSAB Oxelösund, Armox; Voestalpine, lujat ja erikoislujat termomekaanisesti valssatut hienoraeteräkset).

3.1 Hitsattavuus

Materiaalin hitsattavuudesta puhuttaessa viitataan hitsausliitoksen valmistamiseen siten, ettei sen takia tarvitse tehdä erityisiä lisätoimenpiteitä sekä sen pitää täyttää sille asetetut vaatimukset. Sitä parempi on materiaalin hitsattavuus, mitä vähemmän materiaalin ominaisuudet heikentyvät hitsauksen johdosta. Teräksille tärkeimpiä ominaisuuksia hitsattavuuden kannalta ovat muun muassa lujuus, iskusitkeys, karkenevuus, kylmähalkeiluherkkyys, kuumahalkeiluherkkyys sekä lamellirepeilyherkkyys. (Ruukki. Niukkaseosteiset teräkset ja niiden käyttäytyminen hitsattaessa s. 2).

Perusaineen hitsattavuutta arvioitaessa täytyy ottaa huomioon, mikä menetelmä sopii juuri kyseiselle materiaalille sekä sen käyttökohteelle. Yleisesti ottaen erilaisilla koostumus- ja laskentakaavoilla kuten hiiliekvivalentit (CE(IIW), CET), voidaan suhteellisen hyvin määrittää teräksen hitsattavuus. Toisinaan arviointi voi olla vaikeaa, koska tietyt arviointi-menetelmät sopivat vain tietynlaisille teräksille. Laskentakaavoja käytettäessä tärkein asia, joka pitää muistaa on koostumustietojen hankkiminen ainestodistuksesta, eikä mistään mainoslehdestä tai esitteestä. Muita paljon käytettyjä hitsattavuuden arviointimenetelmiä laskentakaavojen lisäksi ovat muun muassa teräksen tila, tasapainopiirrokset, kovuus, mikrorakenne, S-käyrät sekä hitsattavuus- ja menetelmäkokeet. (Martikainen 2010,11-13).

Ultralujat teräkset ovat hyvin hitsattavia kaikilla tavanomaisilla menetelmillä, kunhan prosessin aikana noudatetaan yleisiä hitsausohjeita sekä tietylle terästyypille annettuja erityissuosituksia. Hiiliekvivalentti arvojen ollessa kohtuullisia sekä levypaksuuksien ollessa pieniä ei normaalioloissa tarvitse tehdä kappaleelle esikuumennusta. Yleisimmin käytetty hitsausmenetelmä näille teräksille on kaasukaarihitsaus sekä umpilankaa että täytelankaa käyttämällä. Muut eniten suositellut menetelmät ovat pulssi-MAG ja laser-MAG –yhdistelmähitsaus sekä laserhitsaus. (Rautaruukki, Optim QC).

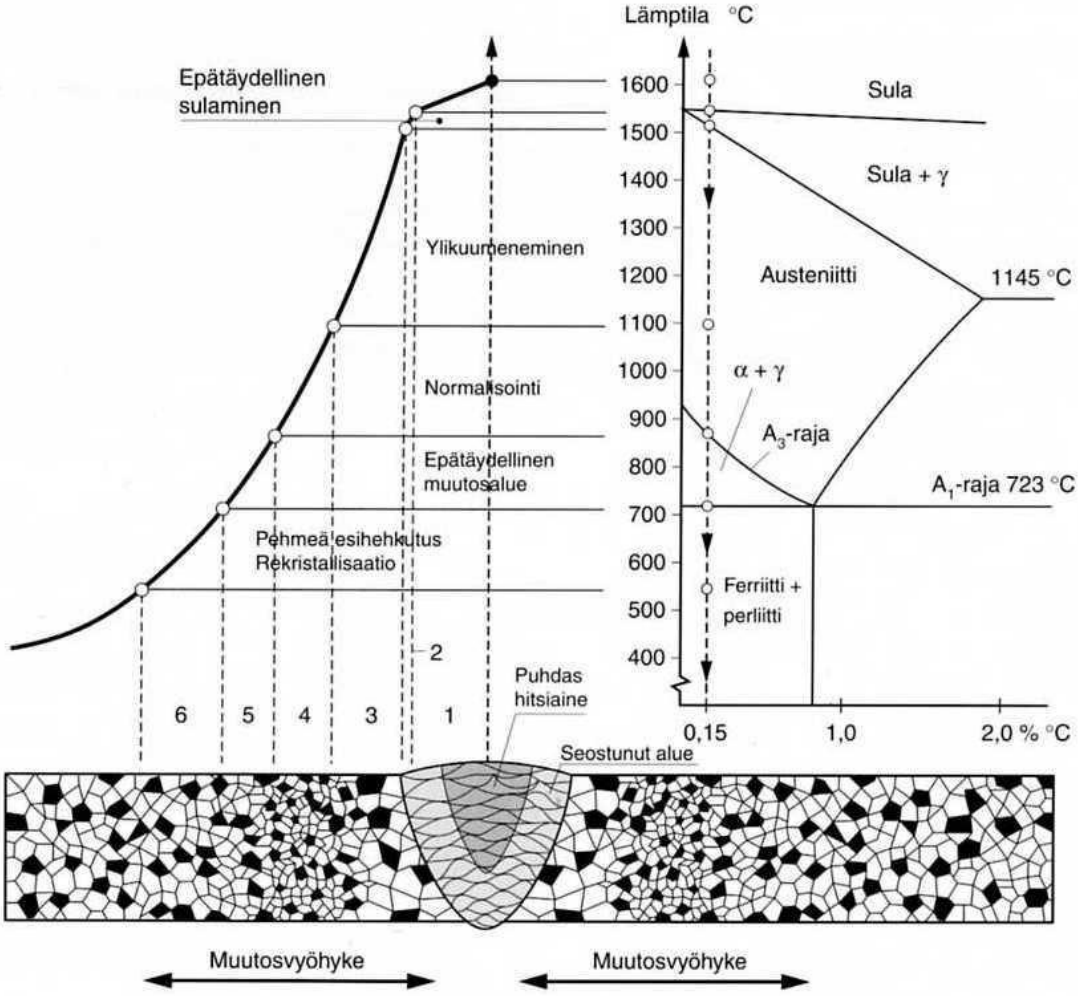
3.2 Hitsauksen vaikutukset mikrorakenteeseen

Hitsauksen aikana hitsiliitoksen alueella lämpötila nousee perusaineen ja lisäaineen sulamislämpötilaa korkeampaa arvoon, jolloin kiderakenteessa alkaa tapahtua muutoksia.

Kuvassa 2 olevasta tasapainopiirroksesta ilmenee hiilipitoisuuden ja lämpötilan merkitys perusaineen mikrorakenteeseen, kun perusaineen jäähtyminen on kuumavalssauksen jälkeen ollut hidas. Täytyy kuitenkin muistaa, että eri valmistusmenetelmien (TMCP, nuorrutettu tai suorasammutettu) johdosta mikrorakenteet muodostuvat aivan erilaisiksi, eli kyseinen kuva 2 pätee vain ferriitti+perliitti rakenteen omaaville teräksille.

Eri hitsausliitoksen vyöhykkeillä lämpötilavaikutukset muodostavat erilaisia kiderakenteita hitsauksen aikana. Lopulliseen hitsaustapahtuman jälkeiseen mikrorakenteeseen ja sen raekokoon vaikuttavat muun muassa käytettävä perusaine, hitsauslisäaine, lämmöntuonti, sekoittumisaste ja jäähtyminen. (Lepola et al. 2005, 24).

Vyöhykkeet voidaan jakaa kuvan 2 numeroinnin mukaisesti: 1) Hitsiaine, jossa osaksi puhdasta lisäainetta sekä osaksi lisäaineen ja perusaineen muodostamaa seosta. 2) Sulatunkeumaraja, jonka alueella perusaine on vain osittain sulanut. 3) Karkearakeinen vyöhyke, jossa korkea lämpötila (yli 1100 ^{o}C) on aiheuttanut austeniitin raekoon kasvamisen, joka taas hajaantuessaan muodostaa teräkseen haurasta ja kovaa yläbainiittia sekä mahdollisesti martensiittia. 4) Hienorakeinen vyöhyke, jonka alueella lämpötila on kohonnut vain astenoitumisalueen alaosaan eikä täten raekoko tällä alueella kasva. Normaalisti kyseisellä vyöhykkeelle syntyy jäähtymisen tuloksena ferriittiä ja mahdollisesti perliittiä, jotka ovat sitkeysominaisuuksiltaan hyviä. Lujilla termomekaanisesti valssatuilla teräksillä syntyy tälle alueelle pehmentynyt vyöhyke. 5) Osittain austenoitunut vyöhyke, jossa matalamman lämpötilan takia austenoituminen on tapahtunut vain niillä alueilla, jossa sen ydintyminen on ollut helppoa. Tälle vyöhykkeelle syntyy martensiittirakeita, mutta vähähiilisillä teräksillä kuten ultralujat teräkset, tällä ei kummemmin ole vaikutusta materaalin haurastumiseen. 6) Karbidien palloutumisvyöhyke, jossa lämpötila on jäänyt 550 – 720^{o}C:een. Kyseisen alueen ominaisuuksissa ei ole suurta poikkeamaa verrattuna perusaineeseen. (Lepola et al. 2005, 24 – 25).



Kuva 2. Hitsausliitoksen vyöhykkeet (Lepola et al. 2005, 24).

3.3 Hitsauksen aikana tapahtuvien muutosten lieventäminen

Hitsaustapahtumassa olevien monien muuttuvien tekijöiden vuoksi mikrorakenteeseen syntyvien muutoksien lieventämiseen on monia erilaisia keinoja. Oikeanlainen hitsausprosessi, railomuoto, lämmöntuonti, lisäaine sekä jäähtyminen vaikuttavat eniten syntyvien haitallisten muutosten lieventämiseen.

Ultralujilla teräksillä on varsin tärkeä saada pidettyä mikrorakenne mahdollisimman ennallaan, koska pienetkin mikrorakenteen muutokseen huonompaan suuntaan voivat laskea lujuuden kestoa ja silloin koko teräksen käytön idea lopahtaa.

3.3.1 Lämmöntuonti

Hitsauksen lämmöntuonnilla tarkoitetaan kaarihitsauksessa hitsiin siirtynyttä lämpömäärää hitsin pituuden suhteen (kJ/mm, kJ/cm). Lämmöntuonti määräytyy kaavan 1 mukaisesti, jossa on otettu huomioon hitsausenergian häviöt prosessin aikana. (Ruukki 2005, Niukkaseosteiset teräkset ja niiden hitsattavuus).

$$Q = k \times E, \tag{1}$$

jossa k on hitsausliitoksen suhteellinen terminen hyötysuhde ja E on hitsausenergia.

Lämmöntuonnin määrällä on erittäin suuri vaikutus liitoksen muutosvyöhykkeen mekaanisiin ominaisuuksiin. Liian suurella lämmöntuonnilla hitsin muutosvyöhykkeelle syntyy pehmennyt vyöhyke, joka on itse perusainetta pehmeämpi vyöhyke. Kyseistä vyöhykettä on eritoten havaittavissa termomekaanisella valssauksella valmistetuissa materiaaleissa. Pehmennyt vyöhyke kapeanakin on erittäin paha asia ja siksi se on otettava tarkasti huomioon, kun suunnitellaan rakennetta ja sen hitsaamista. (Hitsaustekniikka 1/2009). Liian alhaisen lämmöntuonnin vaikutuksena taas syntyy helposti hitsausvirheitä, varsinkin runsaasti seostetuilla ja paksuilla martensiittisen rakenteen omaavilla teräksillä. (Hitsaustekniikka 2/09).

Ohuilla ultralujilla teräksillä ei kuitenkaan käytännössä ole asetettu minimiarvoa hitsauksen lämmöntuonnille niiden suhteellisen alhaisen seostuksen ja karkenevuuden ansiosta. Ruukin suosituksen mukaiset lämmöntuonnit Optim-sarjan teräksille ovat; alle 4 mm levypaksuuden omaavat teräkset 0,4 kJ/mm ja yli 4 mm levypaksuuden omaavat teräkset 0,5 kJ/mm. Armox-sarjan teräksille suositellaan alle 6 mm levypaksuudelle lämmöntuonniks 0,2 kJ/mm. TM-käsitelyllä valmistetulle Voestalpinen alform plate 960 M x-treme teräkselle suositus lämmöntuonnille on alle 6 mm paksuuksisille levyille 0,4 kJ/mm. (Ruukki, Optim QC; Lukkari 2005, 6-7.;Voestalpine, Lujat ja erikoislujat termomekaanisesti valssatut hienoraeteräkset).

3.2.2 Jäähtymisnopeus

Hitsauksen jälkeistä jäähtymistä kuvataan yleensä termillä $t_{8/5}$, joka tarkoittaa kulunutta aikaa, jossa hitsausliitoksen lämpötila on laskenut 800 ^{o}C:sta 500 ^{o}C:een. Tämä lämpötila-alue on siksi tärkeä, että näiden lämpötilojen välillä syntyy suurimmat muutokset mikrorakenteessa.

Hitsausliitoksen jäähtymisnopeuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa työlämpötila, railomuoto, ainepaksuus, hitsausenergia sekä hitsausjärjestys.

Ultralujilla teräksillä $t_{8/5}$ aika pyritään pitää alle neljässä sekunnissa, jolloin hitsiin ja sen muutosvyöhykkeelle ei pääse muodostumaan epätoivottuja mikrorakenteita, jotka puolestaan heikentäisivät selvästi valmistuksessa aikaansaatuja hyviä mekaanisia ominaisuuksia. (Hitsaustekniikka 1/09).

3.3.3 Käytettävä lisäaine

Lähtökohtaisesti hitsauslisäaine valitaan rakenteen vaatimusten, liitosmuodon sekä hitsausasennon mukaan. Yleisimmin lisäaineena käytetään joko tasalujia hitsausaineita tai perusainetta pehmeämpiä eli alilujia hitsausaineita. Liitokset, joissa on käytetty alilujaa lisäainetta on tietenkin lujuudeltaan alempi kuin perusaine, mutta jos alilujan lisäaineen käyttö on mahdollista suunnittelun mukaisesti niin kannattaa sitä käyttää mielummin kuin tasalujaa lisäainetta. Myös tasalujia hitsiaineita on saatavilla monelta eri valmistajalta. (Hitsaustekniikka 1/09).

Pehmeämpien lisäaineiden avulla hitsiin syntyvät jännitykset ja muodonmuutokset pystytään ottamaan turvallisemmin vastaan lisäaineen hyvän muodonmuutoskyvyn takia. Täten hitsausliitoksen jäännösjännitystila jää myös pienmmäksi. Muita saavutettavia etuja ovat pienempi alttius karkenemiselle ja vetyhalkeaminen syntymiselle, laajempi valikoima halvempine hintoineen sekä parempi riittoisuus tietyillä hitsausprosesseilla, muun muassa jauhekaarihitsauksessa. (Martikainen 2010, s. 101).

Lisäaineen valinnassa täytyy muistaa ottaa huomioon myös sen sekoittuminen perusaineeseen. Sekoittumisasteeseen vaikuttaa käytettävä hitsausmenetelmä, railomuoto, käytettävät hitsausparametrit sekä hitsauspalkojen lukumäärä. Mikäli hitsataan käyttämällä suurta hitsaustehoa saadaan sekoittuminen suuremmaksi, koska tällöin sulatunkeumaraja siirtyy entistä syvemmälle perusaineeseen. Täytyy kuitenkin muistaa, että jos lisäaineen avulla halutaan ottaa hitsiin syntyviä jännityksiä vastaan, ei tällöin voida käyttää kapeaa hitsausrailoa, koska siinä tilanteessa perusaineen osuus on erittäin suuri hitsialueella. (Lepola et al. 2005, 24).

Ultralujien terästen hitsaamisessa käyttävien lisäaineiden on oltava matalan vetypitoisuuden tuottavia, sillä hitsin vetypitoisuus ei saa nousta yli 5 ml/100g. Jos hitsausliitoksen lujuusominaisuudet halutaan lähelle perusaineen lujuutta, silloin suositellaan käytettäväksi niin sanottuja tasalujia hitsauslisäsaaineita, jotka ovat myötölujuusluokaltaan 89 (vähintään 890 N/mm^2) ja kun taas halutaan käyttää alilujaa hitsausainetta, niin valitaan esimerkiksi myötölujuusluokan 42 (vähintään 420 N/mm^2) hitsauslisäaine. Ruukki suosittelee Optim-sarjan 900 QC ja 960 QC teräksille tasalujiksi lisäaineiksi puikkohitsaukseen EN 757: E 89 6 Z B 42 H5. (Hitsaustekniikka 1/09). Kyseinen koodi tarkoittaa puikkoa, jonka myötölujuus, murtolujuus ja murtovenymä ovat luokan 89 mukaiset (890 N/mm^2, 980 - 1180 N/mm^2 ja 15 %). Vähimmäisiskuenergian kesto on minimissään 47 J, -60 ^oC lämpötilassa. Z kertoo lisäaineen poikkeavasta koostumuksesta verrattuna standardin mukaisiin koostumustunnuksiin, B tarkoittaa emäspäällysteistä puikkoa ja 4 taas kertoo puikon riittoisuuden olevan 105 - 125 % tasavirralla hitsattaessa. 2 ilmaisee kaikkien muiden asentojen sallittua käyttöä, paitsi pystyasentoa alaspäin ja H5 rajaa puhtaan hitsiaineen vetypitoisuuden maksimissaan 5 ml/100g. (SFS-EN 757).

Lisäaine valikoima on erittäin suuri ja eri lujuuden omaavia lisäaineita on saatavilla todella paljon ja monelta eri valmistajalta. Tasalujia lisäaineita, joita esimerkiksi Ruukki suosittelee käytettäväksi Optim QC terästen hitsauksessa ovat muun muassa ESABin OK 75.78, joka on emäspäällysteinen hitsauspuikko ja kyseisen lisäaineen myötöraja on 920 MPa. Toinen saman valmistajan tarjoama ja Ruukin suosittelema lähelle tasaluja lisäaine kaasukaarihitsaukseen on OK Autrod 13.31, jonka myötöraja on vähintään 850 MPa. ESABin lisäksi ainakin Böhlerin valikoimasta löytyy X 90-IG lisäainelankaa,

joka on tarkoitettu vähintään 890 MPa myötörajan omaaville teräksille. Kyseinen lanka on tarkan mikroseostuksen ansiosta erittäin sitkeää ja omaa hyvän iskusitkeyden aina -60^{o}C lämpötilaan saakka.

Alilujaa lisäainetta käytettäessä on saatavilla esimerkiksi ESABin OK Autrod 12.51, joka on MAG-hitsaukseen soveltuva lisäaine, kun myötörajavaatimus on enintään 420 MPa. (ESAB. Hitsauslisäaineet, OK 75.78; ESAB. Hitsauslisäaineet, OK Autrod 12.51; ESAB. Hitsauslisäaineet, OK Autrod 13.31.) Kaasukaarihitsaukseen Ruukki suosittelee SFS-EN ISO 16834: GMn4Ni2CrMo (argon + CO2-seoskaasu) mukaisia hitsausaineita. (Hitsaustekniikka 1/09). Kyseinen koodi kertoo prosessin olevan metallikaasukaarihitsaus ja hitsausaineen koostumus on standardin SFS-EN ISO 16834 koostumus taulukon tunnuksen Mn4Ni2CrMo mukainen. (SFS-EN ISO 16834).

Alform 960 M x-treme teräkselle suositellaan käytettäväksi esimerkiksi Nöhlerin NiCrMo 2,5-IG tai X90-IG lisäainelankaa. Armoxia hitsatessa kehotetaan käyttämään mahdollisimman alhaisen myötölujuuden omaavaa lisäainetta, kuitenkin siten että se täyttää hitsausliitoksen lujuudelle asetetut vaatimukset. (Voestalpine, lujat ja erikoislujat termomekaanisesti valssatut hienoraeteräkset; SSAB Oxelösund, Armox welding recommendations).

3.3.4 Monipalkohitsaus

Käytettäessä monipalkohitsausta hitsataan ensiksi pohjapalko, sen jälkeen täyttöpalot ja viimeiseksi pintapalko. Pohjapalon hitsaamisen jälkeen on erittäin tärkeä muistaa puhdistaa palon pinta hitsaushuuruista ja oksideista sekä hioa mahdollinen reunahaava ja liian jyrkkä liittymäkohta.

Monipalkohitsauksessa etuna on muun muassa pienempi lämmöntuonti ja samalla edellisen hitsipalon mikrorakenteen lämpökäsittely. Täytyy kuitenkin muistaa ettei lämmöntuonti saa olla liian pieni, jolloin kylmähalkeaman riski kasvaa. Mikäli hitsataan liian suurta palkoa, jolloin monesti joudutaan käyttämään suurta lämmöntuontia, on tällöin hitsausvirheiden syntymisen riski suuri. Suuri etu yksipalkohitsaukseen nähden on myös

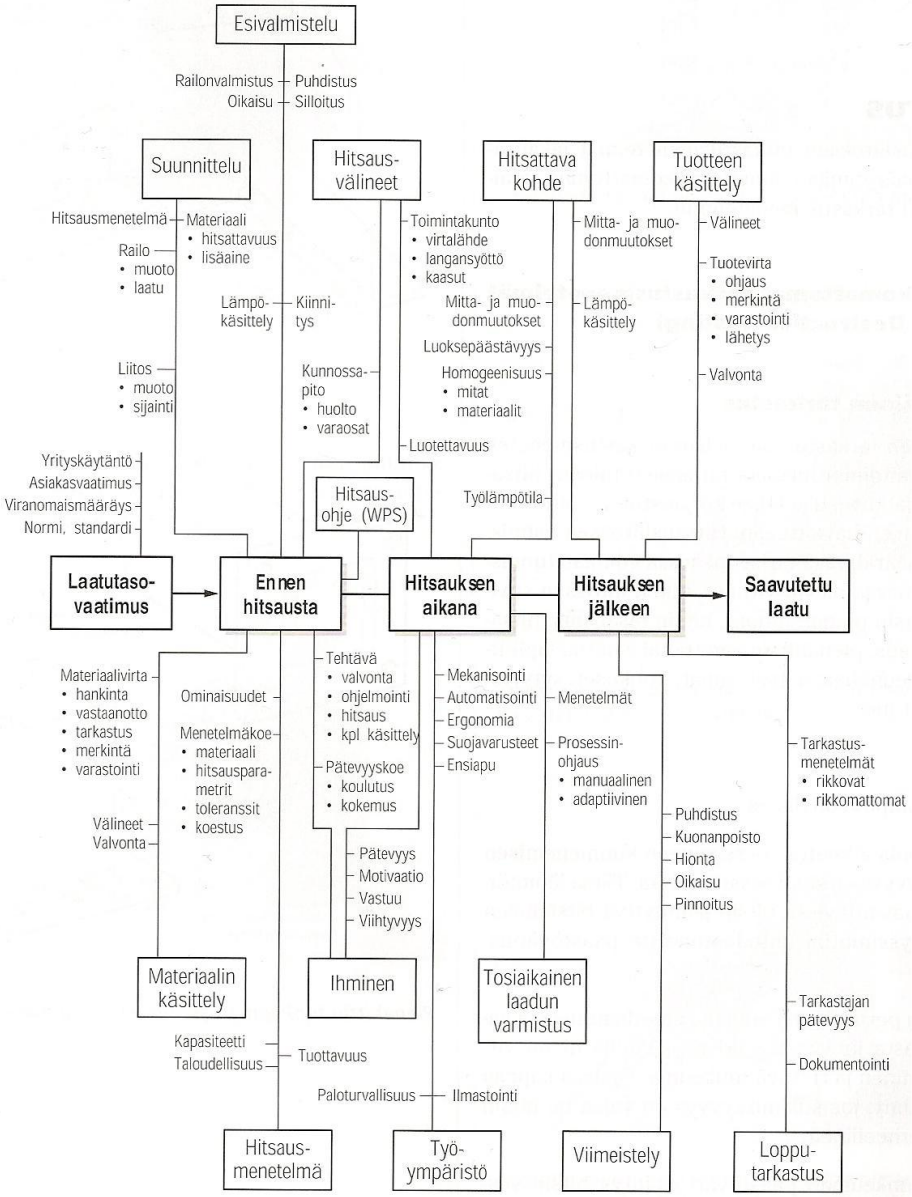
syntyvien jännitysten suuruus. Yhdellä palolla hitsattaessa joudutaan käyttäämään niin suurta lämmöntuontia, että jäähtymisen aikana syntyy helposti kulmavetäymää, joka taas ei ole hyvä, jos hitsattavien levyjen pitäisi olla täysin samassa suunnassa. (Lepola et al, 2005. 129).

4. HITSAUKSEN LAADUNVALVONTA

Tärkeä asia laadunvalvonnassa on sen aloittaminen tarpeeksi aikaisessa vaiheessa. Laadunvalvonta alkaa suunnitteluvaiheessa määrittämällä vaadittu laatutaso, käytettävät materiaalit, materiaalien hitsattavuudet, käytettävät prosessit sekä hitsaajien osaaminen. Jotta pystytään takaamaan hyvä laadunvarmistus täytyy suorittaa menetelmäkokeita, laatia ja hyväksyä tarkat hitsausohjeet sekä kouluttaa hitsaajat tuotannon vaatimalle tasolle. Hitsauksen hyvän laadun tuottavat tekijät on esitetty alla olevassa kuvassa 3. (Lepola et al. 2005, 55 – 56).

Laadunvalvontaa suoritetaan sekä hitsaustapahtumaa ennen ja sen aikana, jotta voitaisiin estää ja korjata hitsausvirheet jo aikaisessa vaiheessa. Tarkoituksena on varmistaa oikeiden materiaalien sekä lisäaineiden käyttö, hyväksyttyjen hitsausohjeiden käyttö sekä oikeanlainen hitsausjärjestys. Laadunvalvontaan osallistuu hitsaajien lisäksi myös työnjohtajat.

Hitsausliitoksen laatu täytyy vielä lopuksi tarkastaa ja se voidaan suorittaa joko ainetta rikkomattomalla tai ainetta rikkovalla menetelmällä. Ainetta rikottamattomia tarkastusmenetelmiä ovat muun muassa silmämääräinen tarkastus, a-mitan mittaus, radiografinen tarkastus, ultraäänitarkastus, tunkeumanestetarkastus, magneettijauhetarkastus sekä vuotokoe (tiiviyskoe). Kyseisillä menetelmiä pystytään selvittämään esimerkiksi mahdolliset halkeamat, huokoset sekä kuonasulkeumat. Ainetta rikkovia tarkastusmenetelmiä ovat esimerkiksi vetokoe, iskusitkeyskoe, taivutuskoe, murtokoe sekä kovuuskoe ja makrohietutkimukset. Näillä kokeilla tarkastellaan muun muassa kuinka hyvin hitsattavaa perusaine on, lisäaineiden sopivuutta tietyille materiaaleille, hitsausliitoksen alueella tapahtuvia kiderakennemuutoksia sekä testataan kuinka hyvin rakenne kestää eri suuruisia kuormituksia. (Lepola et al. 2005, 56 – 62).



Kuva 3. Laaduntuotontekijät. (Lepola et al., 2005. 55).

4.1 Hitsausvirheet

Hitsaustapahtuma täytyy suunnitella erittäin tarkkaa, jotta hitsausvirheiltä säästytään. Tämän aiheuttaa prosessin monet erilaiset muuttuvat tekijät, joista yhden tarvitsee olla hieman väärällään ja siitä aiheutuu halkeama tai muu virhe itse hitsiin.

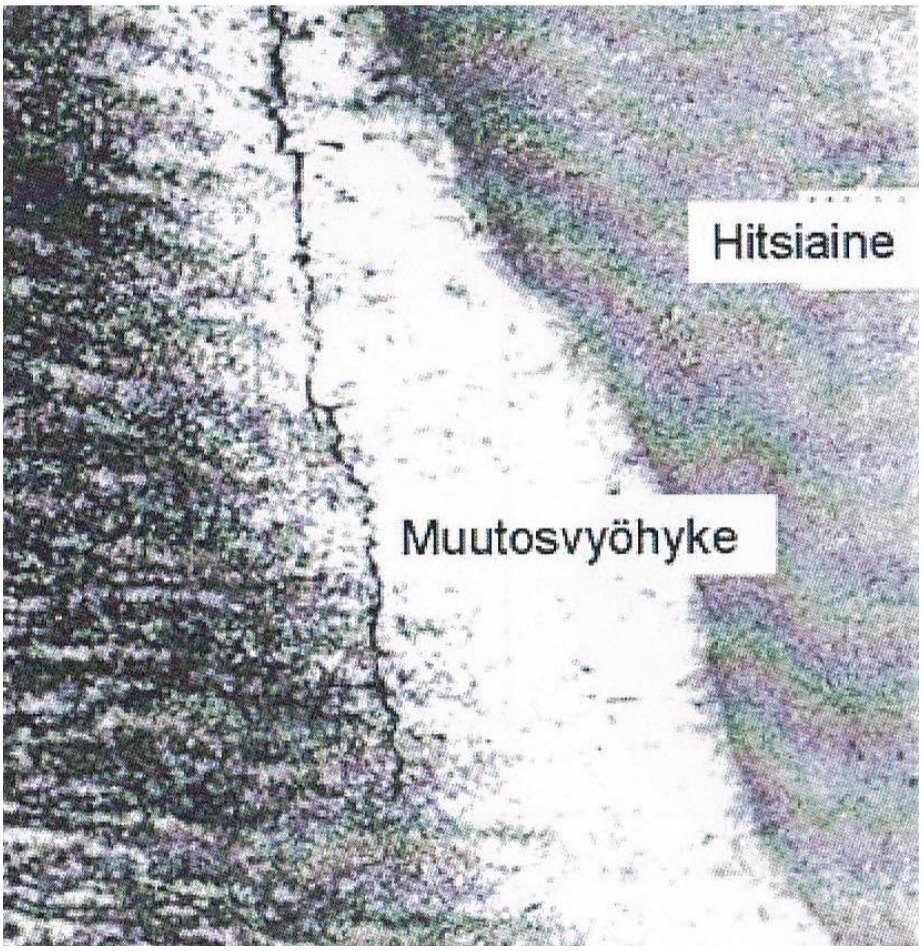
Erilaisia hitsausvirheitä on monia: roiskeet, huokoset, kuonasulkeumat, reunahaavat, juurivirheet, liitosvirheet, kuuma- ja kylmähalkeamat sekä lamellirepeämät. Näille jokaiselle on omat syntymiseen vaikuttavat tekijät, kuten roiskeiden aiheutuminen liian korkean virran tai liian pitkän valokaaren käytöstä. On siis erittäin tärkeää miettiä tarkkaan hitsausarvot ja -tapahtuma ennen varsinaista suorittamista, jotta näiltä virheiltä säästytään.

Ultralujille teräksille helposti syntyviä virheitä ovat muun muassa kylmähalkeamat, jotka muodostuvat yleensä jäykkien rakenteiden hitsaamisessa ja nopean jäähtymisen vaikutuksesta. Liitosvirheen syntyminen on mahdollista, kun käytetään pientä lämmöntuontia. (Lepola et al., 2005, 70-71).

4.1.1 Kylmähalkeilu

Kylmähalkeilu syntyy tyyppillisesti HAZ-alueelle, hitsin juuren puolelle tai sularajan kohdalle. HAZ:iin syntyessä kyseiset halkeamat ovat yleensä pitkittäisiä, kun taas hitsiaineeseen syntyvät kylmähalkeamat ovat yleensä poikittaisia. Kuvassa 4 on esimerkki kylmähalkeaman sijainnista. Monesti kylmähalkeaman tunnistaminen on vaikeaa, koska se voi tapahtua hitsin tai perusaineen sisällä, eikä sitä tällöin pystytä päälle päin huomaamaan. Toinen, kyseisen halkeamatyypin huomaamiseen vaikuttava tekijä on sen syntymiseen kuluva aika. Monesti hitsaustapahtuman jälkeen voi kulua paljonkin aikaa ennen kuin halkeama syntyy. Pahimmillaan kylmähalkeaman syntyminen voi tapahtua jopa kaksi vuorokautta hitsaustapahtuman jälkeen. (Martikainen 2010, 49).

Syynä kylmähalkeamien muodostumiseen ovat yleensä kolme tekijää yhtäaikaisesti. Nämä tekijät ovat vetypitoisuus, hauras mikrorakenne (runsashiilinen martensiitti) sekä hitsiin ja sen ympäristöön vaikuttavat jännitykset. Yleisimmit nämä tekijät esiintyvät yhdessä jäykissä rakenteissa, hitsattaessa suuria ainepaksuuksia pienillä paloilla kosteissa ja likaisissa olosuhteissa. Tähän kategoriaan parhaiten osuvat lujat karkenevat teräkset, joiden myötöraja on 500 N/mm^2 suurempi.



Kuva 4. Kylmähalkeama hitsin muutosvyöhykkeellä. (Vähäkainu 2005, 9).

Kylmähalkeamien syntyä voidaan hyvin ennakoida muun muassa hiiliekvivalentin sekä säröparametrin kaavojen avulla. Myös tarkka hitsaustapahtuman suunnitteleminen hitsausparametrien, esikuumennustarpeen sekä ainepaksuuden suhteen alentavat kylmähalkeaman muodostumisriskiä. Näiden tekijöiden lisäksi vähävetyisen hitsausmenetelmän valinta, puhtaat ja kuivat railopinnat, jälkilämpökäsittelyt ja oikeanlainen materiaalivalinta ehkäisevät kylmähalkeamien muodostumista selvästi. (Martikainen 2010, 49).

Hiiliekvivalentin ollessa suurempi kuin 0,45 on kylmähalkeaman syntymisen vaara suuri. Ultralujilla teräksillä kyseinen arvo yleensä ylittyy, esimerkkinä Ruukki 900 QC teräksen tyypillinen hiiliekvivalentti arvo on 0,51 (Ruukki 2010, Optim QC). Kyseisen teräksen hitsaamisessa on siis kiinnitettävä erittäin paljon huomiota oikeanlaisen (vähävetyisen)

lisäaineen käyttöön, hitsattavan materiaalin ainepaksuuteen sekä mahdollisiin esikuumennus- ja jälkilämpökäsittelytarpeisiin. Kylmähalkeilu on ultralujien terästen yleisin halkeilumuoto, koska sen syntymisen edellytykset täyttyvät usein (jäykkä rakenne+nopea jäähtyminen). (Ruukki 2005, niukkaseosteiset teräkset ja niiden käyttäytyminen hitsauksessa).

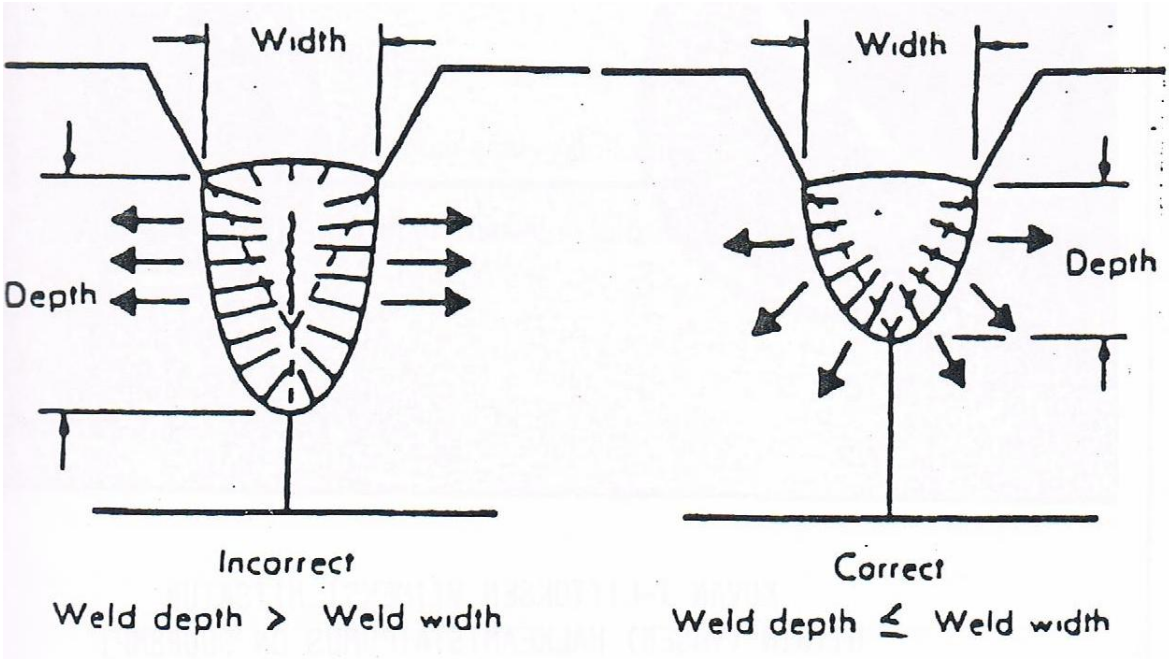
4.1.2 Kuumahalkeilu

Kyseinen halkeilutyyppi eroaa edellä mainitusta kylmähalkeilusta siten, että se muodostuu niin hitsiaineen kuin perusaineenkin puolella kappaleen pintaan ja se syntyy jo jähmettymisen yhteydessä tai välittömästi jähmettymisen jälkeen. Yleisimmin kuumahalkeama syntyy keskelle hitsin pintaa pituussuuntaisena ja halenneet pinnat ovat usein tummia hapettumisen johdosta. (Vähäkainu, 2005). Kuumahalkeamia voi myös esiintyä hitsin perusaineen puolella osittain sulaneella vyöhykkeellä heti sularajan vieressä. Tällöin halkeamat ovat pieniä ja katkonaisia. (Martikainen 2010, 56, 63).

Yleisin kuumahalkeaman aiheuttaja on hitsiin suotautuneet epäpuhtaudet, kuten rikki ja fosfori. Näiden alkuaineiden vaikutuksesta teräksen sulamispiste alenee ja hitsin keskustaan voi muodostua kapea vyöhyke, jonka epäpuhtauksien pitoisuus on erittäin suuri ja täten kyseisen alueen sulamispiste voi olla jopa satoja asteita perusaineen sulamispistetä matalempi. Kyseisten seosaineiden määrä on ultralujilla teräksillä sen verran pieni, ettei niistä johtuvia kuumahalkeamia usein esiinny. Muita kuumahalkeilua aiheuttavia aineita ovat muun muassa happi, niobi, hiili ja typpi. (Vähäkainu 2005, 37).

Hitsaustapahtumassa on paljon eri asioita, joiden tarkalla suunnittelulla pystytään ehkäisemään kuumahalkeamien syntyä. Pääpaino tietenkin on epäpuhtauksien määrällä perusaineessa, joka suoranaisesti vaikuttaa epäpuhtauksien lopullisiin ainepitoisuuksiin hitsin keskellä. Mikäli joudutaan käyttämään sellaista perusainetta, jossa epäpuhtauksien määrät ovat suuria (P+S lähellä 0,06%), tällöin pitää valita sellainen hitsausprosessi, jossa perusaineen sekoittuminen hitsisulaan olisi mahdollisimman pieni. (Vähäkainu 2005, s. 38; Martikainen 2010, 56).

Hitsin mittasuhteilla on erittäin paljon merkitystä syntyvien jännityksien suuntiin ja täten kuumahalkeilun aiheutumiseen. Jos hitsin korkeuden ja leveyden suhde menee reilusti yli 1:1, tällöin jähmettymisen loppuvaiheilla hitsiin kohdistuvat jännitykset repivät hitsiä auki vastakkaisiin suuntiiin, jolloin hitsin keskiosaan kohdistuu erittäin suuria voimia. Korkeus-leveys suhde on siis hyvä pitää 1:1, jolloin hitsisulan jäähtyminen tapahtuu perusaineeseen hitsin joka puolelta tasaisesti, eikä tällöin hitsin keskustaan vaikuta niin suuria voimia. Hitsin muodon vaikutus jähmettymisessä syntyviin voimiin on esitetty kuvassa 5. (Martikainen 2010, 56, 61). Muita vaikuttavia tekijöitä ovat oikeanlainen lämmöntuonti sekä sopiva ilmarako hitsattavien kappaleiden välissä (Vähäkainu 2005, s. 38).



Kuva 5. Hitsin muodon vaikutus jähmettymisessä syntyviin jännityksiin ja kuumahalkeilun syntymiseen hitsin keskustassa (Martikainen, 2010. 61).

4.2 Laaduntuoton erityispiirteet

Hyvän laaduntuoton edellytyksenä on kaikkien vaikuttavien asioiden huomioon ottaminen suunnitteluvaiheen alusta lähtien aina hitsaustapahtuman loppuun asti. Myös laadun reaaliaikainen tarkastelu on erittäin tärkeätä. Tällöin voidaan reagoida mahdollisimman nopeasti, jos laatutaso on päässyt heikkenemään tuotannon aikana.

Oikeanlaista laatua haluttaessa täytyy siis olla tarkat tiedot halutusta laatutasosta, materiaalien hitsattavuudesta ja hitsausprosesseista. Työvoiman oikean tasoinen osaaminen on myös erittäin tärkeä, jotta hyvää laatua voidaan odottaa jatkuvalla tahdilla. Menetelmäkokeiden käyttö kokeiluhitseissä ennen varsinaisen tuotannon aloittamista kasvattaa myös laatutasoa.

5. SOPIVUUS HITSATTUIHIN RAKENTEISIIN

Ultralujat teräkset soveltuvat aivan yhtä hyvin hitsattavaksi kuin muutkin rakenneteräkset. Niiden kanssa on vain suunniteltava erittäin tarkkaan hitsaustapahtuma, jotta hitsistä tulee onnistunut ja täten teräksen korkeaa lujuutta voidaan käyttää hyödyksi rakenteissa. Monipalkohitsauksen käyttäminen on suositeltavaa, jotta kylmähalkeilun vaaraa voidaan pienentää pienentämällä hitsiin syntyviä jännityksiä matalamman lämmöntuonnin ansiosta.

5.1 Leikkaaminen

Ultralujien terästet leikkaaminen onnistuu niin termisesti, kuin mekaanisestikin. Termiset leikkausmenetelmät (poltto-, plasma-, ja laserleikkaus) saavat aikaan sileän leikkauspinnan, joka taas mahdollistaa teräkselle hyvän väsymiskestävyyden. Huonona puolena termisissä leikkausmenetelmissä on kuumenemisen seurauksesta syntynyt pehmennyt vyöhyke. Tämä kuitenkin saadaan jätettyä melko kapeaksi, kun käytetään oikeita leikkausarvoja.

Mekaanista leikkausta käytettäessä näin suuren lujuuden omaaviin teräksiin on erittäin tärkeää, että leikkauskalusto kappalekiinnityksineen on hyvässä kunnossa. Mikäli käytetään liian huonoja teriä tai huonoa työkappaleen tukemista, voi leikkausprosessi pilata koko levyn. Toinen tärkeä asia on leikattavan materiaalin lämpötila. Mikäli terästä on säilytetty kylmävarastossa, sen täytyy antaa lämmitä huoneenlämpöön ennen kuin leikkausprosessi voidaan aloittaa. (Ruukki, 2010, Optim QC käsittelyohjeet).

5.2 Railonvalmistus

Edellä mainitun mukaisesti railonvalmistukseen voidaan myös käyttää termisiä tai mekaanisia menetelmiä. Termisten menetelmien huonona puolena on pehmentyneen vyöhykkeen muodostuminen, joka siis sijoittuisi hitsin viereen molemmin puolille ja laskisi täten hitsin lujuutta. Toisaalta jos railonvalmistus saadaan suoritettua termisesti siten, että pehmennyt vyöhyke jää kapeaksi, saattaa se muuttua hitsaustapahtuman aikana perusaineen ja lisäaineen sekoittumisen johdosta. Nuorrutetuilla teräksillä voi termisen leikkausprosessin vaikutuksesta syntyä epätoivottua karkenemista.

Ruukki kuitenkin suosittelee pääasiallisesti koneistamista ultralujien terästen railoin valmistukseen, jolloin ei tarvitse miettiä esimerkiksi pehmentyneen vyöhykkeen mahdollista syntymistä. Suosituksena päittäisliitoksille on I-railo, kun hitsataan maksimissaan 3 mm levypaksuutta. Tästä suuremmille levypaksuuksille suositellaan joko V-railon tai viistetyn V-railon käyttöä, jolloin viistekulman tulisi olla 40-70^{o}. Jos käytössä on pienaliitos, määräytyy railomuoto rakenteelta vaadittavan tunkeuman sekä hitsausliitoksen paksuuden mukaisesti. (Ruukki, 2010, Optim QC käsittelyohjeet).

5.3 Muovattavuus

Ultralujilla teräksillä kylmämuovattuus on niiden korkeaan lujuuteensa nähden hyvä. Täytyy kuitenkin muistaa, että jos ultralujien terästen särmäyskykyä lähdetään vertailemaan S355 luokan rakenneteräksiin, niin sallitut minimi taivutussäteet ovat moninkertaisesti suurempia samalla levypaksuudella mitattuna. Ultralujia teräksiä ei siis ole tarkoitettu pienen taivutussäteen omaaviin särmäyksiin, vaikka käytössä olisikin ohut levypaksuus. Ultralujien terästen taivuttamisessa suurin ongelma on takaisinjouston vaihtelut eri valmistajien teräksillä.

Taivutussärmän sijoittamisen tarve levyn valssaussuuntaan nähden on erilainen teräksistä riippuen. Ruukin Optim QC-sarjan teräksillä sillä ei ole merkitystä, kun taas Ruukin Ramor-sarjan teräksillä sillä on merkitystä. Taivutuksessa täytyy ottaa huomioon, että tarvittava taivutusvoima, levyn takaisinjousto ja minimitaivutussäde ovat korkean lujuuden

vuoksi suurempia kuin esimerkiksi pehmeämmillä rakenneteräksillä. Taivutusvoiman ja paremman särmättävyyden saamiseksi levyä voidaan esimerkiksi esilämmittää särmäysalueelta +100 - +200 asteiseksi. Edellä mainittujen tuotesarjojen minimitaivutussäteet on esitetty taulukossa 3. (Ruukki, 2010, Optim QC käsittelyohjeet; Ruukki 2010. Kuumavalssatut teräslevyt ja -kelat, särmäys).

Taulukko 3. Optim QC 900 ja Ramor 400 terästen pienimmät taivutussäteet nauhalevyille paksuuksittain. (Ruukki, 2010. Kuumavalssatut teräslevyt ja -kelat, särmäys).

Paksuus mm					
Tuote	**3**	**(3)-4**	**(4)-5**	**(5)-6**	**(6)-8**
Optim 900 QC	9.0	12.0	15.0	19.0	24.0
Ramor 400	9.0	12.0	15.0	18.0	25.0

6. KÄYTÄNNÖN ESIMERKKEJÄ ULTRALUJIEN TERÄSTEN HITSAAMISESTA

Seuraavassa on esitelty erääseen projektiin liittyvä ultralujien terästen hitsaamista käsittävä testaustapahtuma, jossa eri lujuuksisia ultralujia teräksiä hitsattiin laser-hybridi hitsauksella käyttäen eri lujuuksisia lisäaineita.

6.1 Case: Maailman lujin hitsi – 1492 MPa

Vuosien 2001-2004 välillä suoritetun tutkimusprojektin ”Optimerad tillverking av grova höghållfasta stålkonstruktioner Vamp 27” lomassa SSAB ja ESAB teettivät laser-hybridihitsauskokeita Saksassa Trumpf nimisellä lasertoimittajalla. Kokeissa hitsatut teräkset olivat SSAB:n valmistamia eri paksuisia nuorrutettuja ultralujia teräksiä, jotka on esitetty seuraavana:

- WELDOX 900 ($R_{p0,2} \geq 900$ MPa)
- WELDOX 960 ($R_{p0,2} \geq 960$ MPa)
- WELDOX 1100 ($R_{p0,2} \geq 1100$ MPa)
- ARMOX 500 ($R_{p0,2} \geq 1250$ MPa).

WELDOX terästen hitsattavuus on hyvä, kuten yleensäkin ultralujilla teräksillä, kun taas ARMOX-teräksen hitsattavuutta rajoittaa sen runsashiilisyys ja suurempi seostusaste verrattuna WELDOX-teräksiin. Hitsauskokeet onnistuivat kuitenkin hyvin, kun käytössä oli laser-hybridihitsaus, joka tuottaa hyvin kapean hitsin pienellä lämmöntuonnilla. Tällä tavoin päästiin hyvin hitsaamattoman perusaineen lujuuksiin.

Eräs erikoinen havainto, jonka tutkimusryhmä teki oli, että itse lisäaineen lujuudella ei ole kovinkaan suurta merkitystä hitsin lujuuteen. Tätä kuvastaa se, ettei murtuma sijainnut yhdessäkään kokeessa hitsiaineessa, vaan yleensä murtuma tapahtui muutosvyöhykkeellä. Iskusitkeyttä, joka perusaineelle oli taattu -40^{o}C:ssa ei kuitenkaan saavutettu yhdessäkään hitsissä. Taulukossa 4 on esitetty hitsausliitosten poikittaisten vetokokeiden tulokset osalle materiaaleille, joita projektissa käytettiin. (Lukkari 2005, 6-7).

Taulukko 4. Projektissa käytettyjen terästen ominaisuudet ja saadut tulokset. (Lukkari 2005, 6-7.)

Teräs	**Levynpaksuus (mm)**	**Lisäaine OK Autrod**	**Lämmöntuonti (kJ/mm)**	**$R_{po,2}$ (MPa)**	**R_m (MPa)**	**Murtuman paikka**
WELDOX 900	6	13.31	0,3	995	1035	HAZ
WELDOX 960	12	12.51	0,8	1000	1050	Perusaine
WELDOX 1100	4	13.26	0,2	1188	1253	HAZ
ARMOX 500	7	13.26	0,2	1467	1492	HAZ

Saaduista tuloksista nähdään, että ultralujiin teräksiin saadaan tehtyä todella kestäviä hitsejä, kun vain on oikeanlaiset laitteet ja hitsausarvot käytössä. Toinen huomioitava kohta on murtuman paikka, joka ei missään kokeessa sijainnut itse hitsissä, vaikka pehmein lisäaine, jota käytettiin (OK Autrod 12.51) on myötölujuudeltaan vain 470 MPa ja murtolujuudeltaan vain 560 MPa. (Lukkari 2005, 6-7).

7. YHTEENVETO

Ultralujat teräkset tuovat aivan uuden ulottuvuuden teräsrakenteiden suunnitteluun. Maallikon silmin voi näyttää, että suunnittelijan työ helpottuu paljon, kun käytetään esimerkiksi entisen S355 teräksen sijaan ultralujaa terästä, jonka myötölujuus on yli 900 MPa. Kyseisen teräksen käyttö tuo todellisuudessa myös paljon lisämietittävää suunnittelijalle, jonka täytyy miettiä uudelleen rakenteiden valmistettavuutta ja uudesta materiaalista aiheutuvia rajoituksia.

Kyseisiä teräksiä pystytään koneistamaan ja taivuttamaan suhteellisen hyvin tiettyjen rajoitteiden puitteissa, kuten suhteellisen suuren minimitaivutussäteen. Niiden käyttäminen hitsattavissa rakenteissa vaatii paljon huomiota itse hitsaustapahtuman, kuin muidenkin tarvittavien työstöjen suhteen. Eri tavalla valmistetuille ultralujille teräksille on erilaisia rajoituksia hitsauksen ja työstämisen suhteen, jotka on hallittava jotta terästen ominaisuudet saadaan loppurakenteeseen pysymään mahdollisimman hyvinä.

Yksi erittäin suuri huomion kohta suunnittelijalle on ultralujien terästen huomattavasti alhaisempi murtovenymä, verrattuna perinteisiin rakenneteräksiin. Erityisesti sen huomioiminen rakenteen suunnittelussa täytyy ottaa vakavasti, varsinkin jos rakenteen kuormitus on dynaaminen. Toinen erittäin tärkeä asia on, miten teräs on valmistettu ja mitä ominaisuuksia mikäkin valmistusprosessi korostaa.

LÄHTEET

Bao, W., Lei, C., Liu, H. Liu, Song, B. J. Xing, Z. Song, B. (2009). Numerical and Experimental Investigation into Hot Forming of Ultra High Strength Steel Sheet. [verkkodokumentti] Päivitetty 2010. Saatavissa [Lut-verkko] https://portti.lut.fi/f5-w-687474703a2f2f7777772e737072696e6765726c696e6b2e636f6d$$/content/xu04m9403wk1nx3m/fulltext.pdf

ESAB. Hitsauslisäaineet. OK Autrod 12.51. [verkkodokumentti] Päivitetty 2009. Saatavissa http://products.esab.com/Templates/T041.asp?id=9497

ESAB. Hitsauslisäaineet. OK Autrod 13.31. [verkkodokumentti] Päivitetty 2009. [Viitattu 28.3.2011]. Saatavissa http://products.esab.com/Templates/T041.asp?id=2882

ESAB. Hitsauslisäaineet. OK 75.78. [verkkodokumentti] Päivitetty 2009. Saatavissa http://products.esab.com/Templates/T041.asp?id=2877

Indren, H., Laitinen, R., Tarkka, J., Vähäkainu, O. (2004). Ultralujat teräkset tarjoavat uusia mahdollisuuksia. Hitsaustekniikka-lehti. Lehti n:o 1. s. 31-36. ISSN 0437-6056.

Karhula, J., (2009). Metalliopin perusteita. Toinen, uudistettu painos. [Luentomoniste]. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Digipaino. 320 s.

Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Pentti, T., Tiainen, T., Tuomikoski, J. (1999). Konetekniikan materiaalioppi. Helsinki: Edita Oy. 336 s. ISBN 951-37-2912-5.

Kumpulainen, J. (2009). Ultralujien terästen MAG-hitsaus. Hitsaustekniikka-lehti. Lehti n:o 1. ISSN 0437-6056.

Lindroos, K., Sulonen, M., Veistinen, M. (1986). Uudistettu Miekk-ojan Metallioppi. Keuruu. Kustannusosakeyhtiö Otava. 841 s. ISBN 951-666-216-1.

Lukkari, J. (2005). Maailman lujin hitsi – 1492 MPa!. Hitsausuutiset-lehti. Lehti n:o 3. s. 6-7.[verkkolehti] Päivitetty 2005. [Viitattu 12.4.2011]. Saatavissa http://www.esab.fi/fi/fi/news/upload/HU_3_05.pdf

Rautaruukki Oyj. (2009). Ruukin kuumavalssattujen Optim QC- rakenneterästen hitsaus. Hitsaustekniikka-lehti. Lehti n:o 2. ISSN 0437-6056.

Rautaruukki. Kuumavalssattujen terästen toimitustilat ja lyhenteet. [verkkodokumentti] Päivitetty 2010. [Viitattu 7.2.2011]. Saatavissa <http://fi.ruukki.com/Tuotteet-ja-ratkaisut/Steel-products/Layer-pages/Kuumavalssattujen-terasten-toimitustilat-ja-lyhenteet>

Rautaruukki. Kuumavalssatut teräslevyt ja –kelat. Esikäsittelyt. Peitatut nauhatuotteet. [verkkodokumentti] Päivitetty 04/2006 [Viitattu 2.1.2011]. Saatavissa < http://www.ruukki.com/~/media/Finland/Files/Terastuotteet/Ruukki-Kuumavalssatut-ter%C3%A4kset-Peitatut%20nauhatuotteet.ashx>

Rautaruukki. Kuumavalssatut teräslevyt ja –kelat. Esite. [verkkodokumentti] Päivitetty 2008. [Viitattu 7.2.2011]. Saatavissa <http://www.ruukki.com/~/media/Finland/Files/Terastuotteet/Ruukki-Kuumavalssatut-ter%C3%A4kset-esite.pdf>

Rautaruukki. Kuumavalssatut teräslevyt ja -kelat. Rakenneteräkset. [verkkodokumentti] Päivitetty 2010. [Viitattu 28.2.2011]. Saatavissa http://www3.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/F0DB17FD0B50A3CDC2257735003F7319/$File/Optim%20QC_HR%202%201%2023%2006%202010_FI.pdf?openElement

Rautaruukki. Kuumavalssatut teräslevyt ja -kelat. Särmäys. [verkkodokumentti] Päivitetty 2010. [Viitattu 10.4.2011]. Saatavissa http://www.ruukki.fi/~/media/Finland/Files/Terastuotteet/Ruukki-Kuumavalssatut-ter%C3%A4kset-S%C3%A4rm%C3%A4ysohje.ashx

Rautaruukki. Optim QC. [yrityksen www-sivut] Päivitetty 2010. [Viitattu 2.1.2011]. Saatavissa *<http://www.ruukki.com/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Kuumavalssatut-terakset/Rakenneterakset/Optim-QC>*

Rautaruukki. Ramor karkaistu teräs suojaukseen. [verkkodokumentti] Päivitetty 2010. [Viitattu 14.2.2011]. Saatavissa http://www.ruukki.com/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Kuumavalssatut-terakset/Ramor-karkaistu-teras-suojaukseen#tab3

SFS-EN ISO 16834. Hitsausaineet. Hitsauslangat, hitsaussauvat ja hitsiaineet lujien terästen kaasukaarihitsaukseen. Luokittelu. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 757. Hitsausaineet. Hitsauspuikot lujien terästen puikkohitsaukseen. Luokittelu. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SSAB Oxelösund. Armox. [verkkodokumentti] Päivitetty 2010. [Viitattu 11.2.2010]. Saatavissa http://www.ssab.com/Products-and-solutions/Armox/

SSAB Oxelösund. ARMOX Welding recommendations. [verkkodokumentti] Päivitetty 2001.

Saatavissa http://www.mtlgrp.com/Data/Sites/1/userfiles/pdf/Armox-Welding.pdf

SSAB Oxelösund. ARMOX 370T. Data sheet. [verkkodokumentti] Päivitetty 6.6.2000 [2.1.2011]. Saatavissa < http://www.winfa.sk/pdf/ARMOX_370T.pdf>

Voestalpine. Lujat ja erikoislujat termomekaanisesti valssatut hienoraeteräkset. [verkkodokumentti] Päivitetty 2010. Saatavissa http://www.uddeholm.fi/finnish/files/alform_plate_lujat_teraslevyt.pdf

Vähäkainu, O. (2005). Rautaruukki. Niukkaseosteiset teräkset ja niiden hitsattavuus. [Luentomoniste].

Ylikangas, R. (2009). Kokoonpanossa hitsattavien siltahitsien vaikutus rakenteen lopullisiin ominaisuuksiin ultralujalla Optim 960QC –teräksellä. [kandidaatintyö.] Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Lut Metalli. 51 s.