

Pavel Zaharov

Erikoislujien terästen käyttö ja hitsattavuus laivanrakennuksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinööriytyö

10.5.2017

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Pavel Zaharov Erikoislujien terästen käyttö ja hitsattavuus laivanrakennuksessa 37 sivua + 2 liitettä 10.5.2017
Tutkinto	Insinööri
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotesuunnittelu
Ohjaaja	Lehtori Juha Kotamies
<p>Insinööriyössä tutkittiin erikoislujien terästen soveltuvuutta laivanrakennusteollisuuden syntyneiden niiden hitsattavuuteen. Tutkimus tehtiin syventymällä alan kirjallisuuteen ja julkaisuihin. Tuloksena saatiin selvitys erikoislujien terästen käytön rajoituksiin ja niiden tuomiin hyötyihin laivanrakennusteollisuudessa.</p> <p>Insinööriyössä perehdyttiin aluksi yleisimpiin laivanrakennuksessa käytettyihin teräslaatuihin ja hitsaustekniikoihin. Tämän jälkeen perehdyttäessä erikoisluihin teräksiin ja niiden hitsattavuuteen pystyttiin tekemään vertailua perinteisten ja mahdollisten modernien hitsaustekniikoiden ja materiaalien välillä.</p> <p>Luokituslaitosten Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd ja Russian Maritime Register of Shipping sääntöihin tutustumisen myötä havaittiin, että erikoislujien terästen käyttö on vielä hyvin rajoitettua laivanrakennusteollisuudessa. Erikoislujien terästen tutkimustyö laivanrakennusteollisuudessa on kuitenkin lisääntynyt, mikä on lisännyt luokituslaitosten myönteisyyttä niiden käytölle.</p> <p>Insinööriyön tuloksena saatiin hyvä kuva erikoislujien terästen käyttömahdollisuuksista laivasteollisuudessa ja hitsattavuudesta. Erikoislujat teräkset parantavat laivojen tehokkuutta ja pienentävät tuotannon kustannuksia, mutta siirtyminen niihin vaatii investointien lisäksi paljon muutoksia tuotantoon ja suunnitteluun.</p>	
Avainsanat	Erikoislujat teräkset, laivanrakennus, hitsaus

Author Title	Pavel Zaharov Use and Weldability of High-Strength Steels in Shipbuilding
Number of Pages Date	37 pages + 2 appendices 10 May 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Product Design
Instructor	Juha Kotamies, Senior Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to examine the usability and weldability of extra high strength steels in the shipbuilding industry. In addition, the aim was to clarify the limitations and benefits of extra high strength steels in shipbuilding. The thesis was carried out by studying topic-related literature in this field.</p> <p>Firstly, this Bachelor's thesis examines the most common steel grades, their properties and the welding techniques used in the shipbuilding industry. After orientation to extra high strength steels and their weldability, comparisons between the traditional and possible modern welding techniques and materials were made as well.</p> <p>When familiarizing with the rules of classification societies Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd and Russian Maritime Register of Shipping, it was noticed that in the shipbuilding industry the use of extra high strength steels was still very limited. The research on extra high strength steels has, however, increased, which has also increased the positive interest of classification societies in the utilization of extra high strength steels.</p> <p>As a result of this Bachelor's thesis, the reader obtains a clear idea of the usability and weldability of extra high strength steels in the shipbuilding industry. It was discovered that extra high strength steels improve the efficiency of ships and reduce manufacturing costs, but the transition to them requires considerable changes in production and design processes as well as financial investments.</p>	
Keywords	High-strength steel, shipbuilding, welding

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Teräkset laivanrakennusteollisuudessa	1
2.1	Laivaterästen luokittelu	1
2.2	Normaalilujat ja lujat laivateräkset	2
2.3	Erikoislujat teräkset	2
3	Hitsaus laivanrakennuksessa	5
3.1	MIG- ja MAG-hitsaus	5
3.2	Täytelankahitsaus	5
3.3	Kaasukaarimuottihitsaus	6
3.4	Jauhekaarihitsaus	7
3.5	Kuonahitsaus	7
3.6	Puikkohitsaus	8
3.7	Laserhitsaus	9
3.7.1	Sulattava laserhitsaus	9
3.7.2	Syvätunkeuma-laserhitsaus	10
3.8	Laser-hybridihitsaus	11
3.9	Yleiset hitsausmuodonmuutokset ja virheet	12
3.10	Automatisoitu hitsaus	14
4	Erikoislujien terästen hitsaus	15
5	Luokituslaitoksen säännökset erikoislujille teräksille	20
5.1	Luokituslaitokset	20
5.2	Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd	21
5.2.1	Erikoislujat teräkset	21
5.2.2	Erikoislujien terästen hitsausvaatimukset	24
5.3	Russian Maritime Register of Shipping	27
5.3.1	Erikoislujat teräkset	27
5.3.2	Erikoislujien terästen hitsausvaatimukset	29
6	Erikoislujien terästen vaikutus laivanrakennukseen	31
6.1	Erikoislujan teräksen edut	31
6.2	Erikoislujan teräksen haasteet	32

7	Tutkimus ja kehitystyö	33
7.1	SANDFECH-hanke	33
7.2	FIMECC BSA-tutkimus	34
8	Yhteenveto	36
	Lähteet	38
	Liitteet	
	Liite 1. Erikoislujien terästen kemialliset koostumukset	
	Liite 2. Mekaaniset ominaisuudet erikoislujille teräksille (paksuus alle 70 mm)	

1 Johdanto

Laivateollisuuden kehittyessä ja meriteollisuustuotteiden tehokkuuden kasvaessa on alettu käyttää yhä lujempia ja ohuempia materiaaleja laivojen painon vähentämiseksi. Tämän insinööriyön tarkoituksena on tutkia erikoislujien terästen soveltuvuutta laivateollisuuteen syventyen terästen hitsattavuuteen ja hitsaustekniikoihin. Insinööriyössä verrataan tämänhetkistä laivateräksen hitsausta ja erikoislujan teräksen tuomaa muutosta hitsaustapoihin. Tavoitteena on selvittää erikoislujan teräksen käytöstä ja hitsauksesta aiheutuvat hyödyt sekä sen tuomat haasteet.

2 Teräkset laivanrakennusteollisuudessa

2.1 Laivaterästen luokittelu

Laivojen rakennuksessa käytetään suurimmalta osin laivaterästä. Se eroaa normaalista rakenneteräksestä tiukempien toleranssivaatimuksien osalta. Laivaterästen muokattavuus ja työstöominaisuudet eivät poikkea normaalista saman lujuusluokan rakenneteräksestä. Laivateräkset jaetaan normaalilujiin, lujiin ja erikoislujiin teräksiin myötölujuuden perusteella. Luokituslaitokset jakavat laivateräkset lujuusluokkiin myötölujuuden perusteella. Lujuusluokan valinnan voi tehdä vapaasti. Luokat löytyvät taulukoituna luokituslaitosten säännöistä. Kaikkien laivaterästen tulee olla sertifioitu luokituslaitoksella. Laivateräkset jaetaan viiteen laatuluokkaan; A, B, D, E, F. Laatuluokkien avulla voidaan ilmoittaa teräksen transitiolämpötila. Se on lämpötila, jossa teräs muuttuu sitkeästä hauraaksi. Taulukossa 1 on esitetty transitiolämpötilat eri laatuluokille.

Taulukko 1. Transitiolämpötilat (Räisänen 2000: 29)

Laatuluokka	Transitiolämpötila
A	Ei vaatimuksia
B	+20 °C
D	-20 °C
E	-40 °C
F	-60 °C

Laatuluokkien valintaa säätelevät luokituslaitoksien säännöt. Laivan eri rakenteisiin on valittava luokituslaitoksen säätelemän ohjeen mukaiset materiaalit. Materiaalit on jaettu materiaaliluokkiin joiden avulla materiaalivalinta tehdään. Luokituslaitosten säännöistä löytyvät taulukot, joista laatuluokat voi valita. (Räisänen 2000: 29)

2.2 Normaalilujat ja lujat laivateräkset

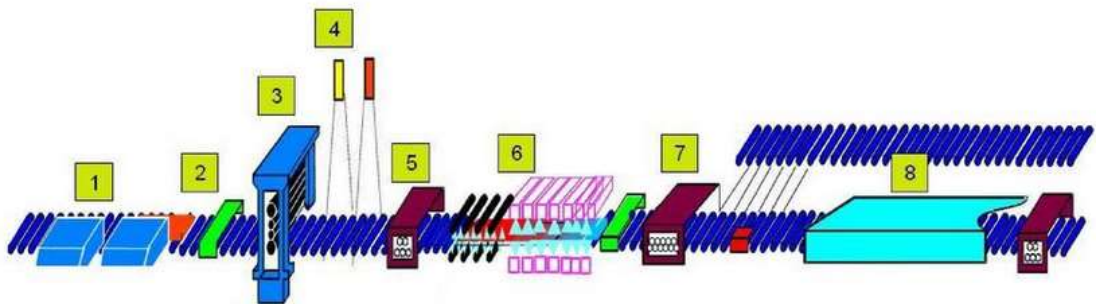
Normaalilujien laivaterästen myötölujuus on vähintään 235 MPa. Normaalilujan laivateräksen murtolujuus vaihtelee 400 - 520 MPa. Iskusitkeysvaatimukset kasvavat paksuuden mukaan. Normaalilujissa laivateräksissä iskusitkeyden on oltava minimissään 27 J. (DNVGL-Pt.2 Ch.2 2017: 33 - 34) Normaalilujia laivateräksiä käytetään tavallisten laivojen runkorakenteisiin (Allanah 2016).

Lujien laivaterästen myötölujuus on 265 - 390 MPa. Murtolujuus taas vaihtelee lujissa laivateräksissä 400 – 660 MPa välillä. Iskusitkeys lujissa laivateräksissä on vähintään 27 J. (DNVGL-Pt.2 Ch.2 2017: 37) Lujin laivateräksiin lisätään lujuusluokkaan yleensä merkintä "H" luokituslaitoksen säännöissä (DNVGL-Pt.2 Ch.2 2017: 33 - 34). Lujia laivateräksiä käytetään laivojen runkorakenteissa, erityisesti jäänmurtajissa ja erikoisaluksissa. Lujia laivateräksiä valmistetaan tyypillisesti termomekaanisesti valssaamalla. (Allanah 2016)

2.3 Erikoislujat teräkset

Erikoislujien teräksien myötölujuus on vähintään 420 MPa. Erikoislujia teräksiä on luokiteltu aina 960 MPa:iin asti Det Norske Veritasin säännöissä. Iskusitkeys erikoislujissa teräksissä vaihtelee 28 - 46 J (DNVGL-Pt.2 Ch.2 2017: 43 - 44). Tällä hetkellä markkinoilla olevien erikoislujien terästen murtolujuus vaihtelee 520 - 1150MPa. Laivanrakennukseen erikoislujia teräksiä on saatavilla esimerkiksi laatuluokissa; S420, S460 ja S500. (Allanah 2016) Erikoislujia teräksiä on käytetty vähemmän laivanrakennuksessa luokituslaitosten minimiaineenpaksuuden määrittävistä säännöistä johtuen (Niemelä 2017: 12).

Erikoislujia teräksiä valmistetaan termomekaanisesti valssaamalla (kuva 1), karkaisemalla ja nuorruttamalla tai suorasammutuksella. Termomekaaninen valssaus eli TMCP (Thermomechanically Controlled Process) on standardien EN 10025-4 ja EN 10149-2 mukainen teräksen valmistusmenetelmä. Termomekaanisesti valssaamalla saadaan aikaan hyvin hitsattavia, korkealujuuksisia ja sitkeitä teräksiä. TCMP-teräksissä hiilipitoisuuden arvo vaihtelee 0,03 - 0,15 %. Suuri murtolujuus saavutetaan, kun TCMP-teräksen raekoko pienenee. Raekoko pienenee, kun teräksen valssauksen lämpötilaa ja muokkausta kontrolloidaan. Teräs jäähdytetään valssauksen jälkeen nopeasti, jolloin saadaan pienempi raekoko. Termomekaanisesti valssatut teräkset voidaan luokitella seostamattomiin hienoraeteräksiin. Muissa seostamattomissa hienorakenneteräksissä pieni rae koko on saatu seostamalla mikroseosaineilla kuten esimerkiksi niobilla, titaanilla ja vanadiinilla. (Lämsä & Kiuru 2012)



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

Kuva 1. Esimerkki termomekaanisesta valssauslinjasta (Tihinen 2013).

Nuorutus eli QT (Quenching and Tempering) tarkoittaa, että teräs valmistetaan ensin karkaisemalla, minkä jälkeen tehdään päästö yli 450 °C:n lämpötilassa. Nuoruttamalla saadaan korkea myötö-, murto- ja väsymislujuus. Päästölämpötilan ollessa pienempi saadaan lujempaa terästä, mutta toisaalta teräksestä tulee myös hauraampi. Erikoislujien terästen valmistuksessa teräs päästetään lämpötilassa 580 – 680 °C. (Kiuru 2012: 5)

Suorasammutus eli DQ (Direct Quenching) (kuva 2) on suhteellisen uusi teknologia erikois- sekä ultralujien terästen valmistuksessa. Suorasammutuksella säästetään tuotannossa teräksen läpimenoaikaa sekä energiaa. Suorasammutuksessa valssaus ja karkaisu on yhdistetty samaan työvaiheeseen, minkä vuoksi prosessin viemä aika lyhenee tehostaen tuotantoa. Suorasammutus tarjoaa myös enemmän mahdollisuuksia mikrorakenteen kontrollointiin kuin nuoruttaminen. Suorasammutuksella saavutetaan suurempi lujuus ja parempi hitsattavuus samalla kemiallisella koostumuksella kuin nuoruttamalla. Hienoimpien mikrorakenteiden ja paremman iskutiheyden saavuttaminen on mahdollista lisäämällä prosessiin termomekaaninen valssaus. (Porter 2006: 9; Ruukissa kehitetty suorasammutusteknologia palkittiin Suomalaisella Insinööriyöpalkinnolla 2012)



Kuva 2. Suorasammutuksen periaate (Wear reinstant steel 2017).

3 Hitsaus laivanrakennuksessa

3.1 MIG- ja MAG-hitsaus

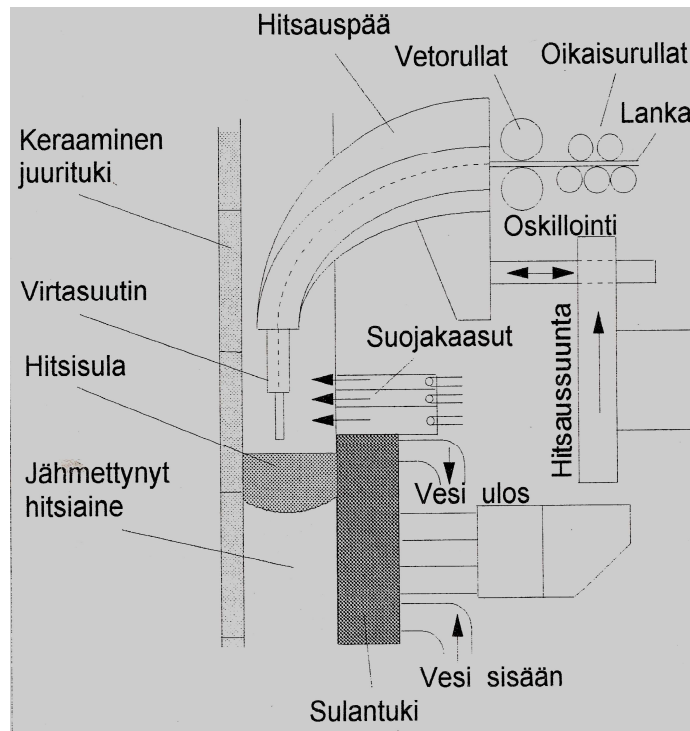
Kaasukaarihitsauksessa eli MIG/MAG-hitsauksessa syötetään lisäainelankaa, jonka ympärillä on menetelmästä riippuen aktiivista tai passiivista suojakaasua. Lanka muuttuu sulaksi valokaaren avulla. MIG-hitsauksessa suojakaasu on passiivinen. Tämä tarkoittaa, että suojakaasu ei reagoi syntyvän sulan kanssa. MAG-hitsauksessa suojakaasu on taas aktiivista, joten se reagoi sulan kanssa. Kaasukaarihitsauksen laitteistoon kuuluu hitsauskone, johon on kytkettynä virtalähde sekä kaasulähteet. Itse hitsaus tapahtuu hitsauspistoolilla, johon syötetään lankaa langansyöttölaitteistosta. Langansyöttölaitteistot on yleensä integroitu hitsauskoneeseen. (Räisänen 2000: 37)

3.2 Täytelankahitsaus

Täytelankahitsauksesta käytetään nimitystä MAG-täytelankahitsaus. Hitsausprosessi on hyvin samanlainen kuin MIG/MAG-hitsauksessa. Suurin ero MIG/MAG-hitsaukseen on, että MAG-täytelankahitsauksessa käytetään umpilangan sijasta täytelankaa. Suojakaasuna käytetään aktiivista suojakaasua. Suojakaasuna käytetään argonin ja hiilidioksidin muodostamaa seoskaasua tai pelkästään hiilidioksidia. Täytelanka sisältää täytejauhetta. Täytejauheen koostumuksen perusteella hitsausmenetelmä voidaan jakaa eri luokkiin riippuen siitä, mitä ominaisuuksia hitsiltä haetaan. Koostumusta muuttamalla voidaan saada hitsi ilman kuonaa ja kuonan kanssa. Myös asentohitsausta voidaan koostumuksen avulla parantaa. MAG-täytelankahitsaus on tärkein ja yleisin kaasukaarihitsausmenetelmä laivanrakennusteollisuudessa. Sen etuja laivanrakennuksessa ovat asentohitsiominaisuudet, tuottavuus, tiiveys sekä hyvä soveltuvuus kaikille hitsattaville teräksille. (Räisänen 2000: 37)

3.3 Kaasukaarimuottihitsaus

Kaasukaarimuottihitsaus on eräänlainen muunnos MIG/MAG-hitsauksesta. Hitsausmenetelmää kutsutaan myös nimellä EGW, Electro Gas Welding. Hitsausmenetelmää käytetään pystysuuntaisiin hitseihin. Telakoilla kaasukaarimuottihitsausta käytetään esimerkiksi laipioihin ja laidoituksiin. Hitsauslaite nousee ylöspäin kiskon tai nostolaitteen avulla ja muodostaa tasaista hitsiä. (Kuva 3)



Kuva 3. Kaasukaarimuottihitsauksen toimintaperiaate (Räisänen 2000: 37).

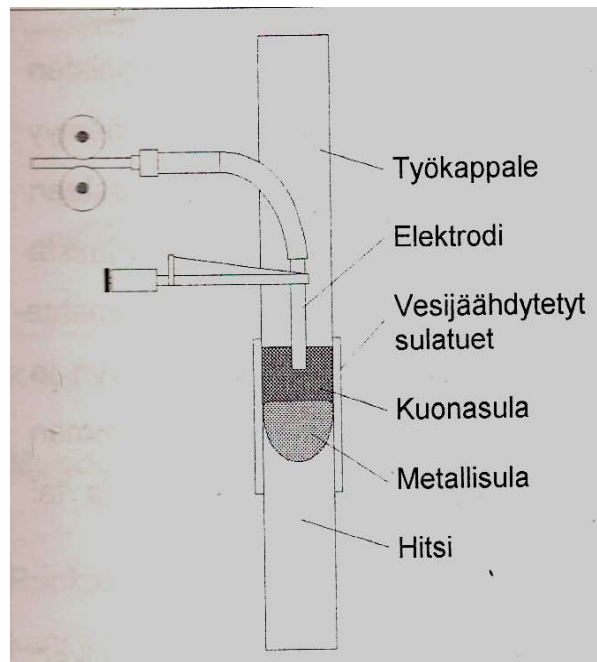
Hitsausmenetelmän tuottavuus on suuri, jopa 20 kg tunnissa. Muodonmuutokset ovat vähäisiä ja hitsausvirheet saadaan minimoitua railonmuodosta johtuen. (Räisänen 2000: 37)

3.4 Jauhekaarihitsaus

Jauhekaarihitsauksessa käytetään hitsausjauhetta. Hitsausjauhe syötetään valokaaren ympärille ja se suojaa hitsaustapahtumaa ilmalta. Hitsauksessa muodostuu kuonaa osan hitsausjauheen sulaessa. Jauhekaarihitsaus on mekanisoitua. Hitsauspää liikkuu esimerkiksi raiteen avulla railon suuntaisesti. Jauhekaarihitsauksessa on etuina suuri hitsiaineen tuottavuus ja suuri tunkeuma, jotka ovat tärkeitä ominaisuuksia laivateollisuudessa. Hitsausmenetelmästä on myös työympäristölle hyötyä, koska hitsauksesta ei synny juurikaan hitsaussavuja ja valokaari on piilossa hitsausjauheen alla. Jauhekaarihitsausta käytetään levyjen päittäisliitosten valmistamiseen laivateollisuudessa. Menetelmän osuus telakoilla on lisäainekustannuksilla mitattuna noin 30 %. Jauhekaarihitsausta on tehostettu kehittämällä erilaisia muunnelmia kuten tandem-hitsaus, kaksoislankahitsaus, metallijauheen syöttö ja kapearailohitsaus. Muunnelmat lisäävät entisestään menetelmän tuottavuutta. (Esab osaamiskeskus 2017)

3.5 Kuonahitsaus

Kuonahitsausta käytetään lähinnä pystyhitsauksessa, kuten kaasukaarimuottihitsausta. Hitsaus aloitetaan siten, että valokaari sytytetään hitsattavan aineen ja hitsauslangan välille. Kuonaa tuodaan prosessiin jauheena, jolloin syntyy kuonakerros. Kuonahitsauksessa hitsaukseen tarvittava lämpö tuotetaan syöttämällä virta sulan kuonakerroksen läpi. Railon ympärillä on jäädytetyt kupariset tai alumiiniset sulatuet, joiden väliin hitsisauma muodostuu. (Kuva 4) Kuonahitsauksella pystytään hitsaamaan 20 - 300mm:n paksuisia levyjä. Paksuimpien levyjen hitsaukseen tarvitaan useampia hitsauslankoja, jolloin hitsin tuotto saadaan suureksi. Kuonahitsausta käytetään lähinnä tankkerilaisissa yläkannen alle tulevissa I-profiilitukien liitoksissa. (Räisänen 2000: 37)



Kuva 4. Kuonahitsauksen periaate (Räisänen 2000: 37).

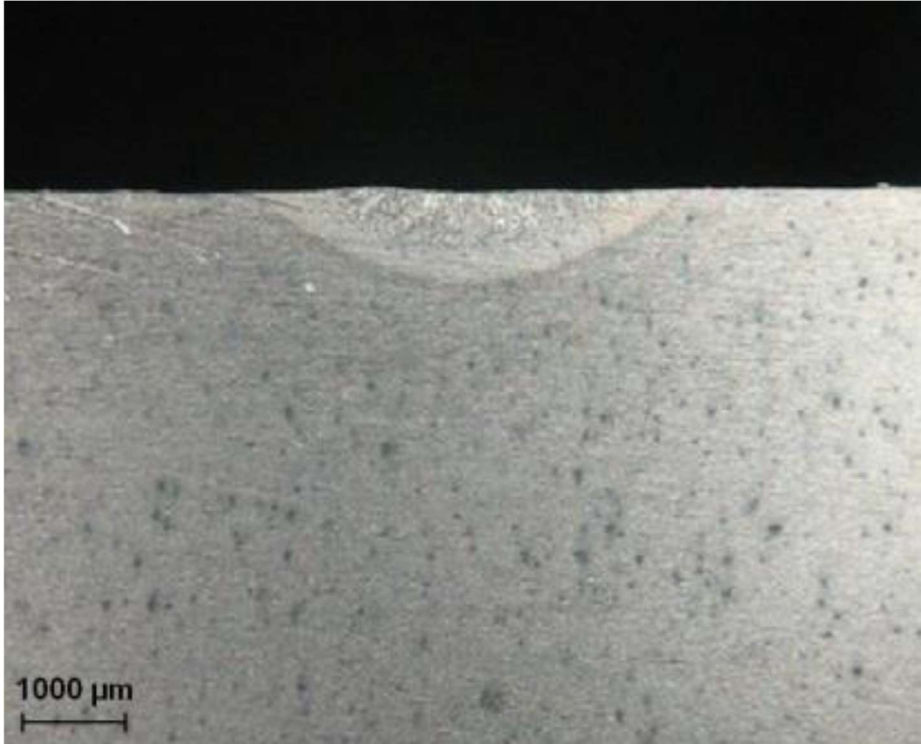
3.6 Puikkohitsaus

Puikkohitsauksessa käytetään yleensä 350 – 450 mm:n pituista puikkoa. 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. Puikkohitsausta käytetään vielä paljon laivateollisuudessa, koska puikkohitsausvälineet on helppo saada vaikeisiin paikkoihin, hitsin laatu on hyvä, hitsaus onnistuu kaikissa olosuhteissa ja välineet ovat yksinkertaisia. (Esab osaamiskeskus 2017)

3.7 Laserhitsaus

3.7.1 Sulattava laserhitsaus

Sulattavassa laserhitsauksessa (kuva 5) materiaaliin kohdistettu lasersäde sulattaa halutun sauman. Tarvittava lämpö johtuu ja sekoittuu kappaleeseen. Hitsin leveys on yleensä tunkeumaa suurempi. Sulattava laserhitsaus soveltuu hyvin ohuille materiaaleille, kuten erikoislujille teräksille. Lasereina käytetään Nd:YAG- ja diodi-lasereita. (Ionix 2017)

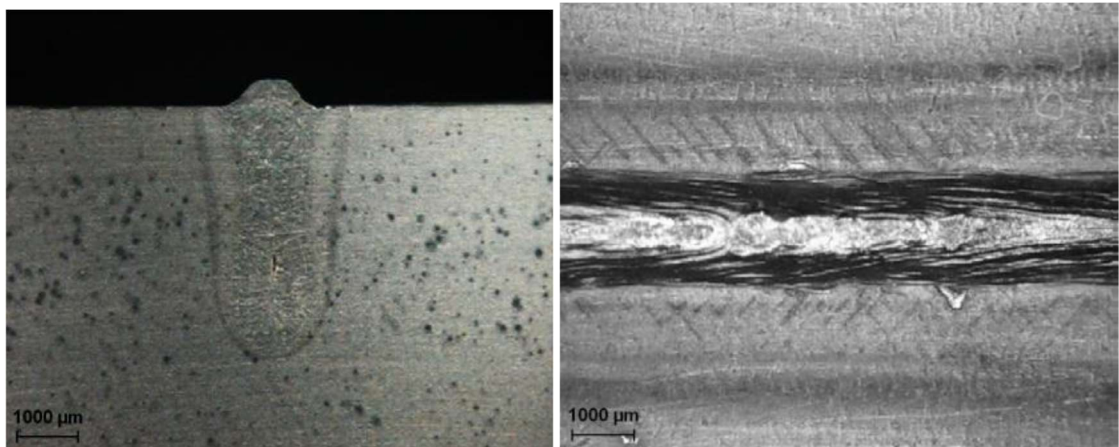


Kuva 5. Sulattavan laser-hitsauksen muodostama hitsi (Lappalainen 2015).

Laserhitsauksessa on tarkat toleranssit railon leveydelle. Ilman lisäainetta hitsatessa railon on oltava kapea, jotta kappaleiden sula jähmettyisi halutulla tavalla. Toleranssit ovat 0,1 - 0,2 mm:n välillä. Railon leveyttä on mahdollista jonkin verran suurentaa, kun käytetään useampaa ja/tai leveämpää lasersädettä. Myös lasersäteen vaaputuksella ja pyörityksellä voidaan lisätä leveyttä hitsiin. (Ionix 2017)

3.7.2 Syvätunkeuma-laserhitsaus

Syvätunkeuma-laserhitsauksessa eli avaimenreikähitsauksessa lasersäde fokusoidaan hitsattavan aineen pinnalle tai 25 % pinnan alapuolelle. Lasersäde höyrystää aineen pinnalle avoimen reiän. Reiän syvyys voidaan määrittää todella tarkasti säätämällä laserin parametreja. Lasersädettä liikutetaan railon suuntaisesti, jolloin muodostuneen reiän ympärillä oleva sula siirtyy lasersäteen taakse. Lasersäteen liikkuesssa sula jäähtyy muodostaen hitsisauman. Hitsausnopeus ja laserin teho on säädettävä oikein, että sula ei pääse putoamaan painovoiman vaikutuksesta tai hitsin tunkeuma jäisi vajaaksi. (Kujanpää ym. 2005: 158 - 159) (Kuva 6.)

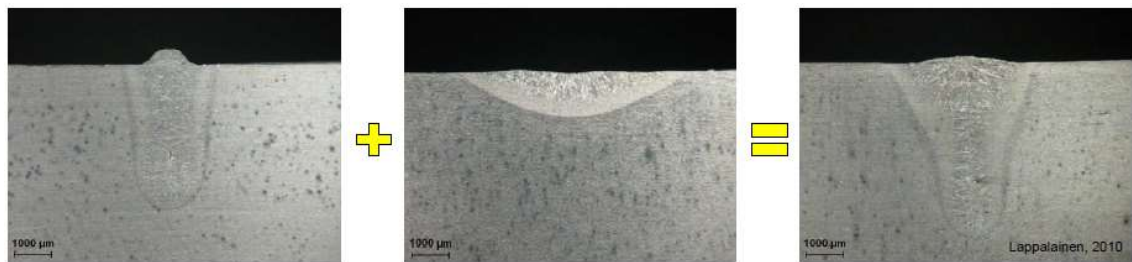


Kuva 6. Syvätunkeuma-laserhitsauksen synnyttämä hitsi (Lappalainen 2015).

Sääntönä oikean hitsaustehon ja nopeuden säätämiseksi voidaan pitää, että jos hitsataan hitsausnopeudella metri minuutissa, niin jokaista 1,5 mm:n tunkeumaa kohden on käytettävä 1 kW tehoa laserille. Syvätunkeuma-laserhitsauksessa käytetään hiilidioksidilaseria tai Nd: YAG -laseria. (Ionix 2017)

3.8 Laser-hybridihitsaus

Laser-hybridihitsauksessa yhdistellään MIG/MAG-hitsausta ja laserhitsausta. Laser-hybridihitsaus on suhteellisen uusi hitsaustekniikka laiveteollisuudessa. 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 voidaan muokata säätämällä laser- ja MIG/MAG-hitsauksen tehosuhdetta. (Kuva 7.) Laser-kaari-tandemhitsauseksi sanotaan hitsausta, jossa lasersäteen ja kaaren väli on niin suuri, että ne muodostavat omat hitsisulansa. (Ionix 2017)



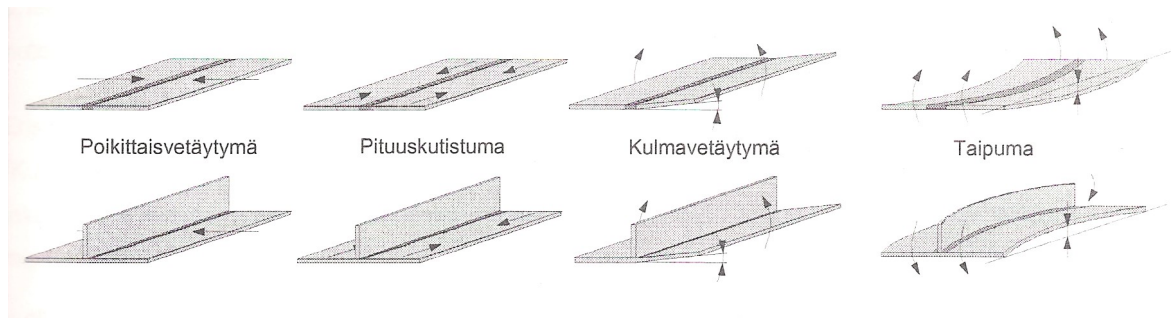
Kuva 7. Hybridihitsauksen synnyttämä hitsin muoto (Lappalainen 2015).

Laser-hybridihitsauksessa yhdistellään molempien hitsaustekniikoiden hyviä puolia. Toleranssirajat ovat suuremmat kuin pelkällä laserhitsauksella. Railon reunojen etäisyydet voivat vaihdella 1 mm toisistaan. Laserin vuoksi hitsausprosessiin tuodaan myöskin vähemmän lämpöä, minkä seurauksena muodonmuutokset vähenevät. Hitsausnopeutta pystytään myös kasvattamaan laserin takia.

Laser-hybridihitsaus soveltuu erinomaisesti ohuiden erikois- ja ultralujien terästen hitsaukseen pienen lämmön tuonnin, vähäisten lämpöjännitysten ja kapean muutosvyöhykkeen (HAZ) vuoksi. (Ionix 2017)

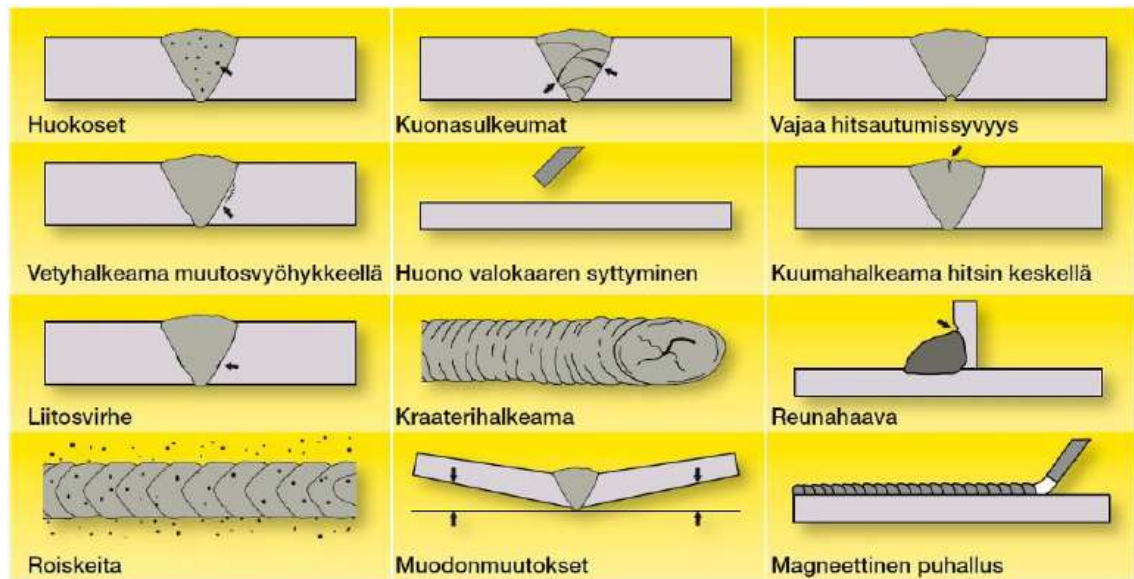
3.9 Yleiset hitsausmuodonmuutokset ja virheet

Hitsauksen synnyttämän lämmön seurauksena hitsattavaan kappaleeseen syntyy muodonmuutoksia. Muodonmuutos voi olla esimerkiksi venymä, taipuma tai kutistuma (kuva 8). Eri telakoilla ja luokituslaitoksilla on erilaisia ohjeita ja standardeja muodonmuutosten sallittavuudelle. Muodonmuutoksia korjataan telakoilla yleensä lämmittämällä rajattua aluetta happi-asetyleeniliekillä, jolloin kylmänä oleva ympäristö estää lämmennyttä aluetta laajenemasta ja oikaisee halutun kohdan. Liekin lämpötila vaihtelee materiaalista, aineen paksuudesta ja jäykkyydestä riippuen. (Räisänen 2000: 37)



Kuva 8. Muodonmuutostyyppejä (Räisänen 2000: 37).

Hitsausvirheet standardi SFS-EN ISO 6520 jakaa kuuteen ryhmään; muotovirheet, ontelot, halkeamat, sulkeumat, liitosvirheet ja muut virheet. Hitsausvirheitä valvotaan telakoilla laadunvalvonnassa ja ennaltaehkäistään tekemällä hitsaajille hyvät hitsausohjeet ennen tuotannon aloittamista. Laivanrakennuksessa hitsattavalla alueella on merkitystä sille, mitä hitsausvirheitä sallitaan. Hitsausohjeissa määritetään hitsauksen laatu alueittain luokituslaitoksen, tilaajan ja telakan välillä. Pintapuolisia virheitä kuten roiskeita syntyy päivittäin. Tällaiset virheet hoidetaan tarvittaessa heti hiomalla. Harvinaisempia virheitä telakoilla ovat liitosvirheet, kraaterihalkeamat ja kuonasulkeumat, jotka hoidetaan poistamalla hitsi ja hitsaamalla uudestaan. (Räisänen 2000: 37) (Kuva 9.)



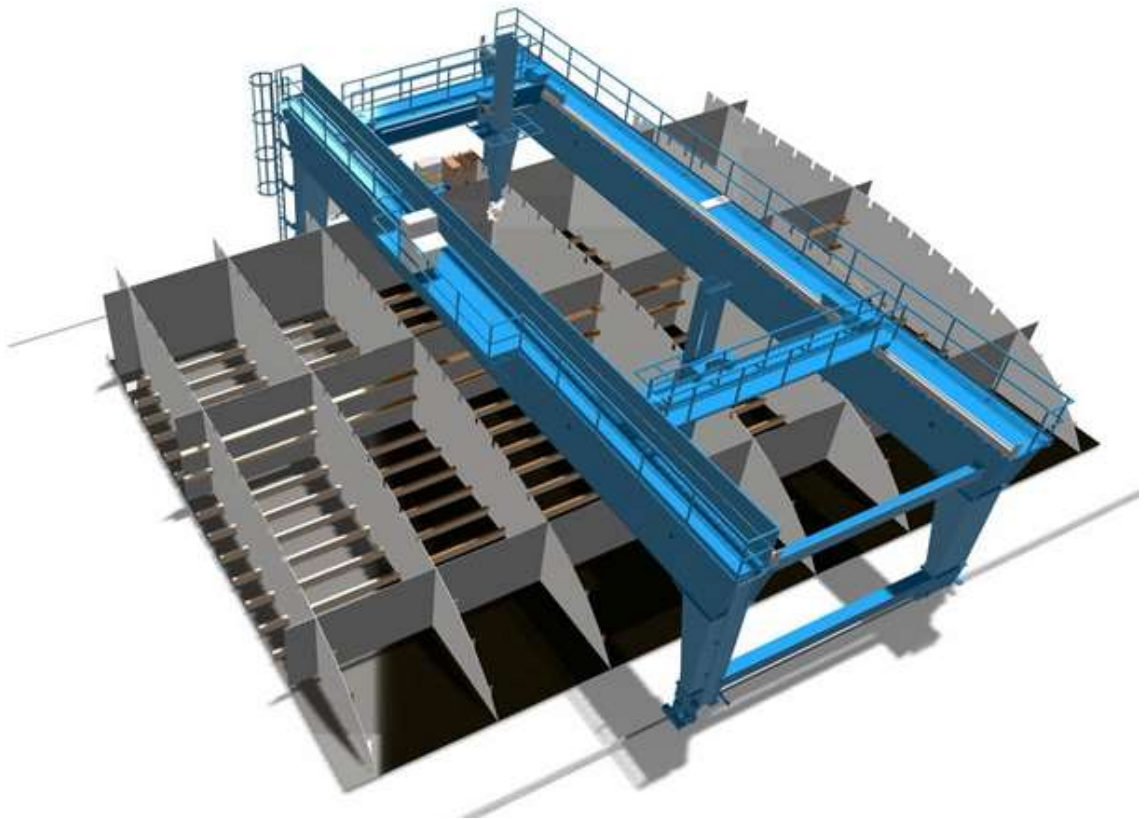
Kuva 9. Yleisempiä hitsausvirheitä (Esab osaamiskeskus 2017).

Haluttuun hitsauksen laatuun päästään hyvin suunnitellulla laadunvalvonnalla. Hitsaushenkilöstön jäljellä ja visuaalisella tarkastuksella on tärkeä rooli. Hitsaajien tulee olla myös päteviä tehtävään standardin SFS-EN 287-2 mukaisesti. Jälkeenpäin rikkomattoman aineenkoetuksen (NDT) menetelmillä tehdyt tarkastukset tuovat ilmi hitsin sisäisiä virheitä. Telakoilla käytettyjä menetelmiä ovat tunkeumanestetarkastus (SFS 3287), magneettijauhetarkastus (SFS 3286), radiografiatarkastus (SFS 3207 ja 5067), ultraäänitarkastus (SFS 3290 ja 5108) ja pyörrevirtatarkastus. (Räisänen 2000: 37)

3.10 Automatisoitu hitsaus

Laivanrakennuksessa hitsaus on automatisoitua lähinnä laivan lohkojen ja osien valmistuksessa. Alkuvaiheen terästuotanto voidaan automatisoida lähes kokonaan. Eri telakoilla on olemassa erilaisia ratkaisuja automatisoituun hitsaukseen. Hitsausrobotit ovat myös yleistyneet alkupään tuotannossa. Automatisoiduilla valmistuslinjoilla voidaan hitsata erilaisia paneeleja ja valmistaa laipioita. Linjastoihin kuuluu yleensä myös monia muita työvaiheita kuten leikkausta ja taivutusta. Hitsausrobotteja käytetään yleisesti lohkojen pienahitsauksissa. (Räisänen 2000: 37)

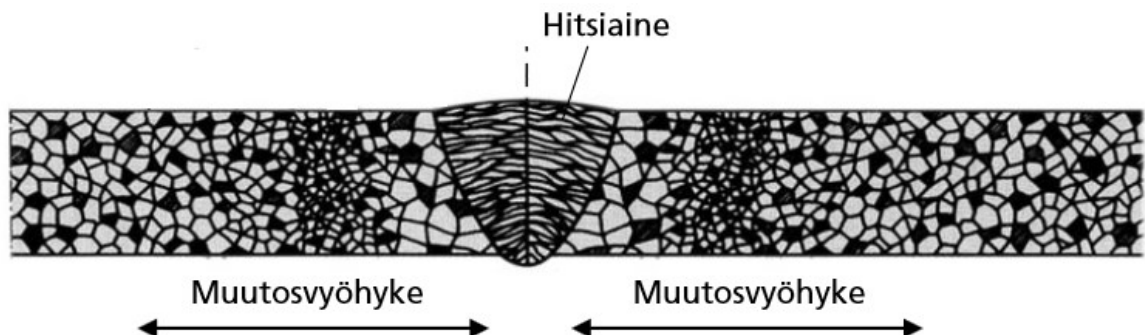
Kuvan 10 nosturiin on mahdollista asentaa yksi tai useampi MIG/MAG-hitsausrobotti, jotka kykenevät hitsaamaan 24 x 16 x 3 m:n kokoista laivan kaksoispohjalohkoa. Robotit toimivat CAD-mallin mukaan ja itseohjelmoituvat uudestaan joka lohkon mukaisesti. Pienimmät hitsausrobotit kykenevät hitsaamaan 700 x 700 mm:n kokoisella alueella. (Kranendonk 2017)



Kuva 10. Esimerkki Kranendonk-automatisoidusta hitsauksesta (Kranendonk 2017).

4 Erikoislujien terästen hitsaus

Erikoislujia teräksiä hitsattaessa käytetään MAG-hitsausta, puikkohitsausta, TIG-hitsausta tai täytelankahitsausta (SSAB Welding of Strenx 2017). Nykyään erikoislujille teräksille suositellaan uusia hitsaustekniikoita kuten laserhitsausta tai laserhybridihitsausta. Hitsattaessa kappaleeseen kohdistuu suuria lämpöenergioita riippuen hitsausmenetelmästä, minkä seurauksena syntyy rakennemuutoksia ja teräksen ominaisuudet muuttuvat. Syntyvässä hitsaussaumassa on eri vyöhykkeitä. *Seostumisvyöhyke* on alue, jossa hitsattavan kappaleen ja tuodun lisäaineen sekoittumissuhde on 15 – 60 % välillä riippuen hitsausmenetelmästä. *Muutosvyöhyke* eli *HAZ-vyöhyke* on hitsattavassa kappaleessa (kuva 11). Siihen on lämmön vaikutuksesta syntynyt mikrorakennemuutoksia, mutta aine ei ole sulanut. Hitsattavan kappaleen lujuus voi vaihdella paljonkin muutosvyöhykkeellä. Muutosvyöhykkeellä sauman kohdalla riski myötäämiselle kasvaa tämän seurauksena. Muutosvyöhykkeellä on myös riski halkeilla ja karkaistua liikaa. Riskejä on mahdollista vähentää asianmukaisella esilämmityksellä ja hitsauksesta syntyvän lämpöenergian rajoittamisella. (Rissanen 2011)



Kuva 11. Muutos- eli HAZ-vyöhykkeen sijainti (Ovako 2012: 4).

Hitsattavan kappaleen esilämmitystarvetta ja hitsattavuutta voidaan karkeasti laskea käyttämällä hiiliekvivalenttia eli CEV-arvoa. Hiiliekvivalentin eli CEV-arvon laskenta on esitetty kaavassa 1. (SSAB Welding of Strenx 2017)

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

C on hiilen määrä

Mn on mangaanin määrä

Mo on molybdeenin määrä

Cr on kromin määrä

V on vanadiinin määrä

Ni on nikkelin määrä

Cu on kuparin määrä

Hiilikvivalentin ollessa välillä 0,40 - 0,50, terästä voi hyvin hitsata. Ohuilla aineenpaksuuksilla esilämmitystä ei näillä arvoilla tarvita, jos käytetään niukkavetyistä hitsausli-säainetta. Jos arvo menee yli 0,5, esilämmitystä tarvitaan yleensä aina. (Rissanen 2011)

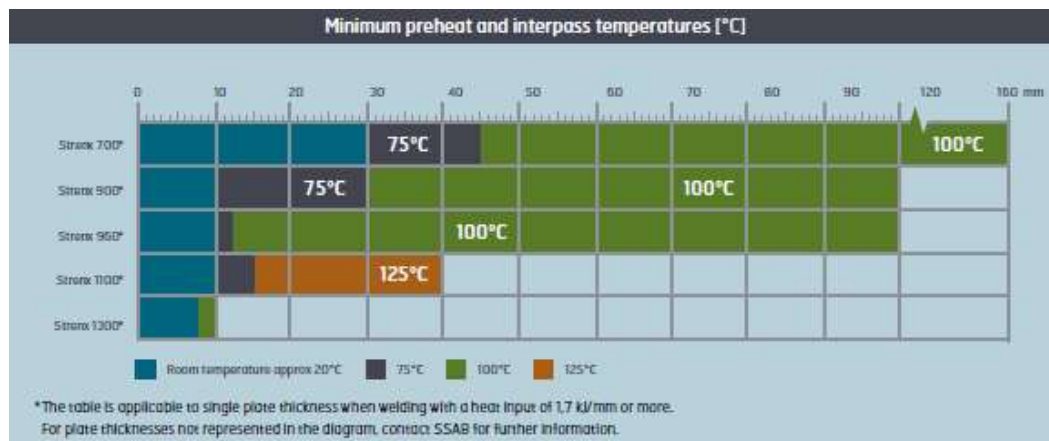
Erikoislujien terästen lujuuden ja iskutheyden kasvaessa tulee huomioida hitsaustapaa valittaessa teräksen lämmöntuontirajoitukset. Jos teräkseen tuodaan lämpöä liian vähän, hitsi jäähtyy liian nopeasti. Liian nopeasti jäähtyneen hitsin HAZ-vyöhyke karkenee ja muuttuu entistä alttiimmaksi kylmähalkeilulle. Kylmähalkeama eli vetyhalkeama tarkoittaa halkeamaa, joka syntyy jos vetyä on liuennut riittävästi hitsiin, hitsiin kohdistuu liian suuria jännityksiä tai on syntynyt hauras mikrorakenne. (Lukkari 2000) Liian suurella lämmöntonilla liitos jäähtyy hitaasti, jolloin teräksen lujuus, kovuus ja iskutheysominaisuudet heikkenevät. Oikealla lämmöntonilla ja sopivalla työlämpötilalla saadaan syntymään mikrorakenne, joka ei ole halkeilulle altis. Työlämpötilan määrittäminen riippuu levyn paksuudesta ja CEV-arvosta. (Taulukko 2.)

Taulukko 2. Strenx-erikoislujan 700MPa-teräksen CEV-arvo (SSAB Welding of Strenx 2017).

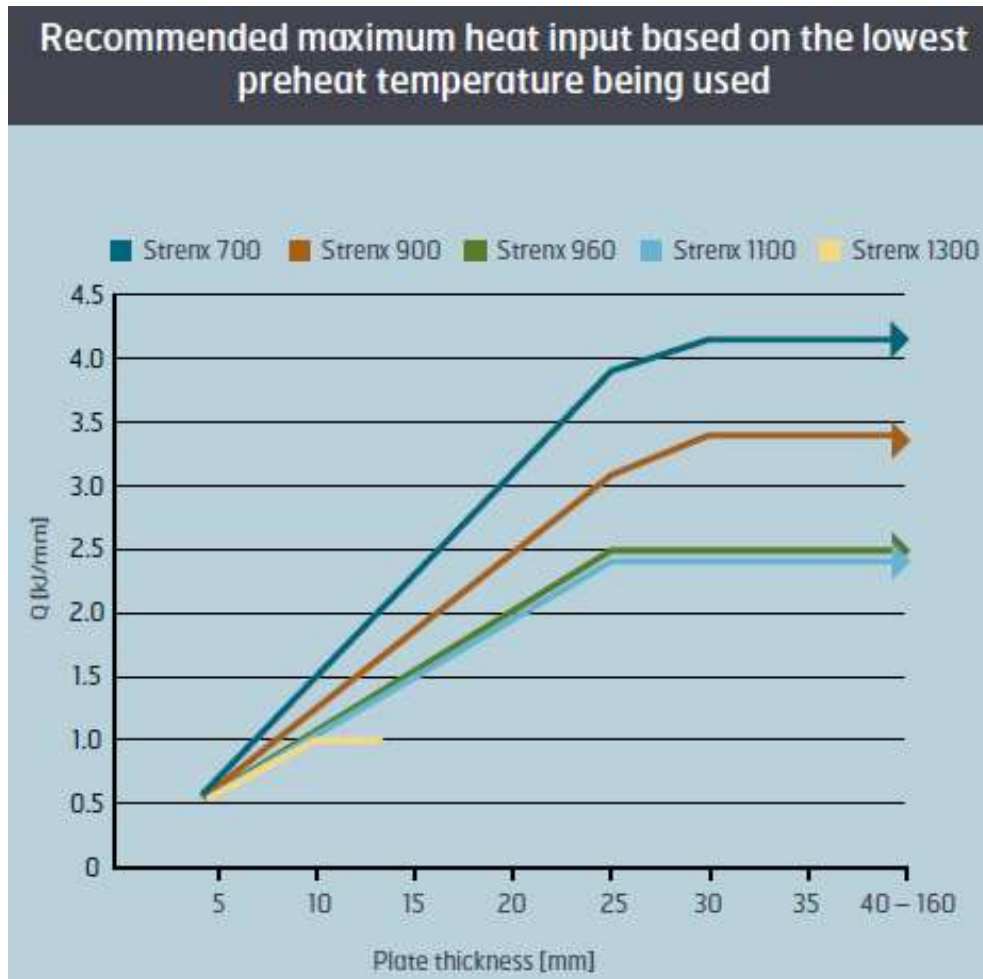
Nimi	Paksuusalue (mm)	Myötölujuus $R_{p0,2}$ min [MPa]	Murtolujuus R_m min [MPa]	Venymä A_5 min %	Särmättövyys Yläpalmien vähimmäissäde R/t, poikittain, $0 \leq t < 15$ mm	CEV/CEV tyyppillinen Paksuus t = 10 mm
Strenx 700	4-53	700	780-930	14	1,5	0,29/0,43
	(53)-100	650	780-930	14		
	(100)-160	650	710-900	14		

Taulukosta 3 näemme, että ohuilla levyillä esilämmitystä ei tarvita. Strenx-teräslevyissä on myös alhainen hiilipitoisuus mikä osaltaan myös vaikuttaa siihen, että esilämmitystä ei tarvita.

Taulukko 3. Strenx erikoislujanteräksen hitsauksen suositeltuja esilämmityslämpötiloja. (SSAB Welding of Strenx 2017)



Kuvasta 12 näemme, että teräslevyjen lujuuden kasvaessa lämmöntuonnin määrä vähenee. Mitä suurempi lujuus, sitä herkemmin liiallinen lämmöntuonti aiheuttaa ei-toivottua lujuuden ja kovuuden alentumista ja iskutkeyden ominaisuuksien vähenemistä. Hitsin jäähtymisajalla $t_{8/5}$ arvioidaan lämpövaikutuksia liitoksessa. Jäähtymisaika lasketaan hitsin jäähtyessä lämpötilasta 800 °C:sta 500 °C:seen. Iskutkeysvaatimukset määrittävät rajat jäähtymisajalle. Taulukosta 4 näemme Strenx-teräksen suositellut jäähtymisaajat.

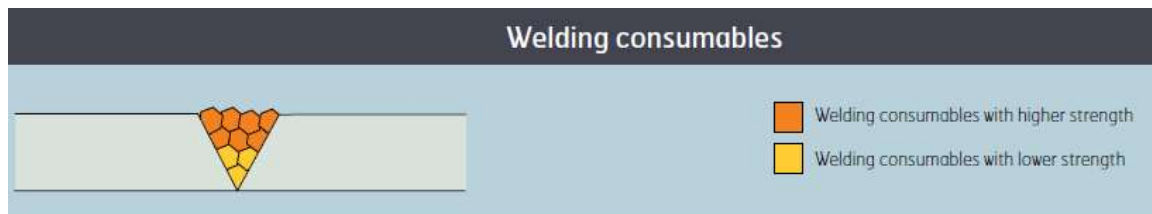


Kuva 12. Strenx-teräksen suurimman lämmöntuonnin rajat levyn paksuuden funktiona (SSAB Welding of Strenx 2017).

Taulukko 4. Strenx- erikoislujan teräksen jäähtymislämpötilat. (SSAB Welding of Strenx 2017)

$t_{8/5}$ 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

Hitsauslisäaineet ovat erikoislujissa teräksissä ferriittisiä ja niukkavetyisiä ($HD \leq 5 \text{ ml/100 g}$). Hitsauslisäaineen valinta tehdään saumaan kohdistuvan rasituksen ja kulutuksen perusteella, myös liitosmuodolla ja hitsausasennolla on merkitystä. Suurta lujuutta vaativissa liitoksissa ja kulutuksen kohdistuessa liitokseen, valitaan tasaluja lisäaine. Sen myötölujuus on sama kuin hitsattavalla materiaalilla, joten rakenteen lujuus ei vähene sauman kohdalla. Liitokseen kohdistuvan kuormituksen ollessa vähäisempi valitaan aliluja lisäaine. Sen etuina ovat hitsin matalampi jännitystila, matalampi työlämpötila, parempi muodonmuutoskyky ja paremmat iskutkeysominaisuudet. Molempien hitsausaineiden käyttö on myös mahdollista, jos halutaan yhdistää molempien lisäaineiden edut. (kuva 13) Näin tehdessä on hitsattava 2 - 3 pintapalkkerrosta tasalujalla lisäaineella ja pohjapalot alilujalla lisäaineella. (Rissanen 2011)



Kuva 13. Esimerkki tasalujan ja alilujan lisäaineen yhteiskäytöstä (SSAB Welding of Strenx 2017).

5 Luokituslaitoksen säännökset erikoislujille teräksille

5.1 Luokituslaitokset

Luokituslaitokset ovat yrityksiä, jotka toimivat merenkulun alalla. Ne antavat aluksille luokitustodistukset ja määräävät alukset omiin luokkiin. Luokituslaitokset hyväksyvät materiaalit joita käytetään laivanrakennuksessa, esimerkiksi erikoislujat teräkset. Luokituslaitoksia on monia ympäri maailmaa. Suurimmat ovat jäseninä liitossa nimeltä IACS (International Association of Classification Societies). IACS pyrkii toiminnallaan parantamaan vesistöjen puhtautta ja lisäämään laivojen turvallisuutta. Nykyään yli 90 % maailman rahdista kulkee IACS:n hyväksymillä aluksilla, joissa on käytetty yhdessä kehitettyjä suunnitteluohjeita ja standardeja. Taulukossa 5 on esitetty IACS:n jäseninä olevat luokituslaitokset. (IACS 2017)

Taulukko 5. IACS jäsenet vuonna 2017 (IACS 2017).

Eurooppa	Aasia	Venäjä	Amerikka
Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd (DNV-GL)	China Classification Society (CCS)	Maritime Register of Shipping (MRS)	American Bureau of Shipping (ABS)
Bureau Veritas (BV)	Indian Register of Shipping (IRS)		
Croatian Register of Shipping (CRS)	Korean Register of Shipping (KRS)		
Lloyd's Register (LR)	Nippon Kaiji Kuokai (NK)		
Polski Rejestr Statkow (PRS)			
Registro Italiano Navale (RINA)			

5.2 Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd

Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd (DNV-GL) on vuonna 2013 perustettu luokituslaitos. Det Norske Veritas on alun perin vuonna 1864 perustettu norjalainen luokituslaitos, joka yhdistyi vuonna 1867 perustetun Germanischer Lloydin kanssa. DNV-GL muodostaa tällä hetkellä maailma suurimman laiva- ja off-shore-teollisuuden luokituslaitoksen. Se toimii meri-, uusiutuva energia, öljy ja kaasu, ruoka ja hyödyke sekä terveysteollisuuden parissa. DNV-GL työllistää tällä hetkellä 15,000 henkilöä yli 100 maassa. Meriteollisuuteen DNV-GL tarjoaa luokitus-, riskianalyysi- ja teknisiä neuvontapalveluita. Meriteollisuutta varten DNV-GL on kehittänyt monia standardeja, joiden tavoitteena on turvata turvalliset rakenteet ihmisille sekä luonnolle. (DNV-GL About us 2017)

5.2.1 Erikoislujat teräkset

DNV-GL jaottelee teräset kolmeen ryhmään: normaalilujat teräkset (*Normal strength steel*), lujat teräkset (*High strength steel*) ja erikoislujat teräkset (*Extra high strength steel*). Erikoislujia teräksiä DNV-GL jaottelee kahdeksaan eri ryhmään. Jaottelu perustuu teräksen myötörajoihin. Ryhmät ovat; 420, 460, 500, 550, 620, 690, 890 ja 960 MPa. Iskusitkeydestä riippuen jokainen ryhmä jakaantuu vielä laatuluokkiin A, D, E ja F. Ryhmissä 890 ja 960 MPa laatuluokkaa F ei kuitenkaan ole. (DNVGL-Pt.2 Ch.2 2017: 38)

Erikoislujan teräksen käyttö laivanrakennuksessa on erittäin rajoitettua, mihin on tällä hetkellä syynä sen väsyminen laivojen rakenteissa (Hachmöller 2017).

Erikoislujien terästen kemiallisen koostumuksen rajoitukset löytyvät liitteestä 1. Liitteen 1 yläpalkissa näkyvä terästen toimitustila tarkoittaa, miten teräs on valmistettu. Ryhmät ovat normalisointivalssattu (NR), termomekaanisesti valssattu (TM), normalisoitu (N) tai karkaistu ja nuorrutettu (QT). Kemialliset koostumukset on ilmoitettu maksimipitoisuuksina (%) teräksen painoon suhteutettuna. Erikoislujien terästen hiiliekvivalentin arvot on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Suurimmat sallitut hiilekvivalentin arvot (DNVGL-Pt.2 Ch.2 2017: 41).

Carbon Equivalent (%)								
Steel grade & delivery condition	Ceq						CET	Pcm
	Plates			Sections	Bars	Tubulars	all	all
	t ≤ 50 (mm)	50 < t ≤ 100 (mm)	100 < t ≤ 250 (mm)	t ≤ 50 (mm)	t ≤ 250 or d ≤ 250 (mm)	t ≤ 65 (mm)	all	all
VL 420N/NR	0.46	0.48	0.52	0.47	0.53	0.47	-	-
VL 420TM	0.43	0.45	0.47	0.44	-	-	-	-
VL 420QT	0.45	0.47	0.49	-	-	0.46	-	-
VL 460N/NR	0.50	0.52	0.54	0.51	0.55	0.51	0.25	-
VL 460TM	0.45	0.47	0.48	0.46	-	-	0.30	0.23
VL 460QT	0.47	0.48	0.50	-	-	0.48	0.32	0.24
VL 47	0,46	0,49	0,49	-	-	-	0,32	0,22
VL 500TM	0.46	0.48	0.50	-	-	-	0.32	0.24
VL 500QT	0.48	0.50	0.54	-	-	0.50	0.34	0.25
VL 550TM	0.48	0.50	0.54	-	-	-	0.34	0.25
VL 550QT	0.56	0.60	0.54	-	-	0.56	0.36	0.28
VL 620TM	0.50	0.52	-	-	-	-	0.34	0.26
VL 620QT	0.56	0.60	0.64	-	-	0.58	0.38	0.30
VL 690TM	0.56	-	-	-	-	-	0.36	0.30
VL 690QT	0.64	0.66	0.70	-	-	0.68	0.40	0.33
VL 890TM	0.60	-	-	-	-	-	0.38	0.28
VL 890QT	0.68	0.75	-	-	-	-	0.40	-
VL 960QT	0.75	-	-	-	-	-	0.40	-

CEq- arvo on hiilekvivalentin arvo, joka on laskettu kaavalla 2. (TWI-Global 2017)

$$CEq = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn+Cu}{16} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} \quad (2)$$

C on hiilen määrä

Si on piin määrä

Mn on mangaanin määrä

Cu on kuparin määrä

Ni on nikkelin määrä

Cr on kromin määrä

Mo on molybdeenin määrä

V on vanadiinin määrä

Taulukosta 6 löytyvät myös CET-arvot eli hiiliekvivalentit SEW 088:n mukaan. CET -arvo lasketaan kaavan 3 mukaisesti.

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (3)$$

C on hiilen määrä

Mn on mangaanin määrä

Mo on molybdeenin määrä

Cr on kromin määrä

Cu on kuparin määrä

Ni on nikkelin määrä

Taulukosta 6 löytyvä P_{cm} -arvo on laskettu kaavalla 4. P_{cm} -arvo on suunniteltu niukka hiili- sekä seosainepitoisille teräksille. P_{cm} -arvon on määrittänyt Japanin hitsausyhdistys. (TWI-Global 2017)

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (4)$$

C on hiilen määrä

Si on piin määrä

Mn on mangaanin määrä

Cu on kuparin määrä

Cr on kromin määrä

Ni on nikkelin määrä

Mo on molybdeenin määrä

V on vanadiinin määrä

B on boorin määrä

Erikoislujille teräksille DNV-GL on määrittänyt raja-arvot suurimmalle aineenpaksuudelle riippuen teräksen toimitustilasta [normalisointivalssattu (NR), termomekaanisesti valsattu (TM), normalisoitu (N) tai karkaistu ja nuorrutettu (QT)] ja teräksen muodosta (levy, lohko, palkki ja putki). Taulukosta 7 selviävät suurimmat sallitut aineen paksuudet erikoislujille teräksille. Normalisointivalssattujen (NR) lohkojen, palkkien ja putkien aineenpaksuudet ovat pienempiä kuin normalisoitujen (N), joten näiden käyttöä luokituslaitos harkitsee tilanteen mukaan. Yli 250 mm paksujen normalisoitujen (N) teräslevyjen ja yli 150 mm paksujen karkaistujen ja nuorrutettujen (QT) teräslevyjen käytöstä on haettava lupaa luokituslaitokselta. (DNVGL-Pt.2 Ch.2 2017: 42)

Taulukko 7. Erikoislujien terästen suurimmat sallitut aineenvahvuudet (DNVGL-Pt.2 Ch.2 2017: 42).

Delivery condition	Maximum thickness (mm)			
	Plates	Sections	Bars	Tubulars
N	250 ²⁾	50	250	65
NR	150		1)	
TM	150	50	-	-
QT	150 ²⁾	50	-	50

1) The maximum thickness limits of sections, bars and tubulars produced by NR process route are less than those manufactured by N route, and shall be at the discretion of classification society.
2) Approval for N steels with thickness larger than 250 mm and QT steels with thickness larger than 150mm is subject to the special consideration of the Classification Society.

5.2.2 Erikoislujien terästen hitsausvaatimukset

Erikoislujien terästen hitsaukseen pätee DNV-GL säännöistä; *Part 2 Materials and welding Chapter 4 Fabrication and testing*. Kappaleesta löytyvät yleiset ohjeet kaikkien DNV-GL:n luokiteltujen terästen hitsaamiselle ja poikkeavat vaatimukset erikoislujille teräksille. Konttialuksille löytyvät omat säännöt erikoislujiin teräksiin liittyen osasta; *Part 5 Ship types, Chapter 2 Container ships, Section 10*. Säännöistä löytyvät vaatimukset (DNVGL-Pt.2 Ch.4 2017: 10)

- hitsaajien pätevyydelle
- hitsauslisäaineille
- hitsausmenetelmille
- valmistukselle ja toleransseille
- hitsausten NDT-tarkastuksille
- rakenteiden ja tiiveyden testeille.

Hitsaajilla, jotka hitsaavat käsin tai osittain mekanisoiduilla laitteilla, on oltava pätevyys standardin ISO 9606 mukaan. Pätevistä hitsaajista on pidettävä kirjaa sekä heidän pätevyytensä on uusittava 6 kuukauden välein. Pystysuorissa pienahitseissa, rakenteissa jossa on suurimmaksi osaksi pienahitsiä ja rakenteissa, joissa pienahitsi on kriittisessä paikassa rakennetta, on haettava hitsaajalle lisäosaa pätevyuteen. (DNV-GL, pt.2, CH.4, s.23) Täysin mekanisoituja tai automatisoituja hitsauskoneita käyttävän hitsaajan on oltava todistettavasti kykenevä tehtävään ja hänen on saatava säännönmukaista harjoitusta koneen asennuksesta, ohjelmoinnista ja käytöstä. Kaikista harjoituksista on pidettävä kirjaa. Koneen käytön opetukseen on sisällyttävä railon mittasuhteiden hallinta, sääolosuhteiden hallinta ja hitsauslisäaineiden hallinta. (DNVGL-Pt.2 Ch.4 2017: 22)

Hitsauslisäaineiden käyttö on jaettu lisäaineen lujuuden mukaisiin ryhmiin, jotka korreloivat hitsattavan teräksen lujuuteen. Ryhmät on jaettu myöhemmin myös iskusitkeyden testauslämpötilan ja kemiallisen koostumuksen mukaan alaryhmiin. Hitsauslisäainesuositukset löytyvät DNV-GL:n säännöistä *Part 2 Materials and welding Chapter 4 Fabrication and testing*, sivuilta 25 - 30. (DNVGL-Pt.2 Ch.4 2017: 25 - 30)

Seuraavassa on lueteltu DNV-GL:n hyväksymät hitsausmenetelmät. ISO-standardin 4063 mukaiset hitsausmenetelmänumerot on ilmoitettu hitsausmenetelmän edellä (DNVGL-Pt.2 Ch.4 2017: 33):

- 111 Puikkohitsaus (SMAW)
- 114 Täytelanka kaarihitsaus (FCAW-S)
- 121 Jauhekaarhitsaus (SAW) kiinteällä hitsauslangalla
- 122 Jauhekaarhitsaus (SAW) hitsausnauhalla
- 124 Jauhekaarhitsaus (SAW) metallijauheella
- 125 Jauhekaarhitsaus (SAW) täytelangalla
- 131 Kaasukaarihitsaus (passiivinen suojakaasu) (MIG, GMAW) hitsaus kiinteällä hitsauslangalla
- 132 Kaasukaarihitsaus (passiivinen suojakaasu) (MIG, FCAW-G) jauhetäytelangalla
- 135 Kaasukaarihitsaus (aktiivinen suojakaasu) (MAG, GMAW) kiinteällä hitsauslangalla
- 136 Kaasukaarihitsaus (aktiivinen suojakaasu) (MAG, FCAW-G) jauhetäytelangalla
- 138 Kaasukaarihitsaus (aktiivinen suojakaasu) (MAG) kiinteällä hitsauslangalla
- 141 Kaasukaarihitsaus (TIG, GTAW) kiinteällä täyteaineella (lanka, puikko)
- 15 Plasmahitsaus.

Poikkeaville hitsausmenetelmille ja suuremmille lämmöntuonneille (> 50 KJ/cm) on haettava erillistä hyväksyntää luokituslaitokselta (DNVGL-Pt.2 Ch.4 2017: 33).

Hitsausohjetta merkitään DNV-GL:n säännöissä lyhenteellä *WPS (Welding procedure specification)*. Hitsausohjeen hyväksymiseen liittyvät ohjeet löytyvät säännösten osasta *Part 2 Materials and welding: Chapter 4 Fabrication and testing*, sivuilta 34 – 77. Erikoislujien terästen kohdalla hitsausohjetta hyväksyessä on tehtävä menetelmäkoekappale. Menetelmäkoekappale hitsataan hitsaustuotantoa vastaavissa tuotantotiloissa. Koekappale hitsataan alustavan hitsausohjeen mukaan, joka on merkitty säännöstöön merkinällä *pWPS (preliminary Welding procedure specification)*. Menetelmäkoekappaleelle on asetettava alustavat laatuvaatimukset, jotta hitsausohje voidaan hyväksyä. Menetelmäkoekappaleen testeistä on laadittava hyväksymispöytäkirja *WPQR (Welding Procedure Qualification Record)*, josta on käytävä ilmi koekappaleen materiaali, käytetty lisäaine, hitsausparametrit, lämpökäsittelyt, rikkomattomat ja rikkovat aineenkoestusmenetelmät ja korroosionkestotestien menetelmät. (DNVGL-Pt.2 Ch.4 2017: 34 - 77)

Erikoislujien terästen hitsausohjeelle on määritelty muutama poikkeava ohje. Erikoislujien terästen päittäishitsin murtolujuus ei saisi alittaa 570 N/mm^2 ja testissä syntyvän murtuman asema on raportoitava luokituslaitokselle. Taivuttaessa taivutintelan halkaisijan tulee olla 5 kertaa aineenpaksuus ja taivutuskulman yli 180° . (DNVGL-Pt.2 Ch.4 2017: 63)

Charpy V-lovi-kokeen tulosten tulee olla minimissään vaadittu 64 J – 20°C :n lämpötilassa testattuna. Charpy V-lovi-iskukokeessa yli 50 mm:n paksuisille levyille on määrätty ylimääräisiä lovipaikkoja testattavaksi

1. Aineenpaksuuden puolivälissä ($t/2$): WM, FL, FL+2, FL+5
2. Hitsin juuresta, juuri ei saa olla aineen paksuuden puolivälissä: WM, FL, FL+2, FL+5

Merkintöjen tarkoitus: *WM* on *Weld metal centerline* eli hitsatun metallin keskiviiva, *FL* on *fusion line* eli sularaja, FL+2 on 2mm sularajalta ja FL+5 on 5mm sularajalta. (DNVGL-Pt.2 Ch.4 2017: 63)

Suurin sallittu kovuusraja on 380 HV10, joka tarkoittaa Vickersin kovuuskokeella (HV10) saatua tulosta 380 (DNVGL-Pt.2 Ch.4 2017: 63).

5.3 Russian Maritime Register of Shipping

Venäläinen vuonna 1912 perustettu luokituslaitos Russian Maritime Register of Shipping eli RMRS kehittää sääntöjä ja ohjeita laivojen sekä öljyn- ja kaasuntuotantoon liittyviin rakenteisiin. RMRS:n säännöt ja ohjeet ovat usein kansainvälisiin standardeihin mukautuvia. RMRS:n tavoitteet ovat

- ihmisten turvallisuuden takaaminen merellä
- turvallisen laivojen navigoinnin takaaminen
- turvallisen rahdin kuljetuksen takaaminen merellä sekä sisävesissä
- ympäristönsuojelun edistäminen.

RMRS on ollut IACS:n jäsen vuodesta 1969. RMRS hoitaa myöskin sertifiointeja. (Russian Maritime Register of Shipping 2017)

5.3.1 Erikoislujat teräkset

RMRS jakaa teräkset kolmeen luokkaan myötörajan perusteella: normaalilujat, lujat ja erikoislujat teräkset. Normaalilujien terästen myötöraja alkaa 235 MPa:sta. Lujien terästen luokka jakaantuu kolmeen lujuusluokkaan; 315, 355 ja 390 MPa. Erikoislujat teräkset ovat myötörajaltaan yli 420 MPa. Erikoislujiin terästen luokka jakaantuu kuuteen eri lujuusluokkaan; 420, 460, 500, 550, 620 ja 690 MPa. Säännöissä annetaan ohjeet 70 mm:n paksuisista erikoislujista teräksistä ohuempisiin. Yli 70mm paksuisten erikoislujiin teräksien käytöstä on neuvoteltava luokituslaitoksen kanssa. Erikoislujiin terästen tulee olla luokituslaitokselta annettujen valmistustapojen mukaan valmistettuja teräslevyjä. Muissa tapauksissa esimerkiksi putkien ja lohkojen valmistuksessa on pyydettävä luokituslaitoksen lupaa ohjeiden soveltamisesta. Erikoislujiin terästen tulee olla karkaistuja ja nuorrutettuja. Termomekaanisesti valssattuja teräslevyjä voi käyttää 50 mm paksuuteen asti van luokituslaitoksen tarkan harkinnan jälkeen. Iskusitkeyden testilämpötilan mukaan teräkset on jaettu vielä neljään ryhmään kirjainten avulla; A = 0 °C, D = -20 °C, E = -40 °C ja F = -60 °C. Luokituslaitos on rajoittanut tiettyjen seosaineiden pitoisuuksia erikoislujissa teräksissä, taulukko 8. (RMRS Part XIII Materials: 67)

Taulukko 8. Erikoislujien terästen tiettyjen seosaineiden maksimipitoisuudet (RMRS Part XIII Materials: 67).

Strength level of steel, in MPa	Steel grade	Content of elements, %, max					
		C	Si	Mn	P	S	N
420 — 690	A	0,21	0,55	1,70	0,035	0,035	0,020
	D, E	0,20	0,55	1,70	0,030	0,030	0,020
	F	0,18	0,55	1,60	0,025	0,025	0,020

Kylmähalkeiluriskin arvioimiseksi on arvioitava teräksen haurautta laskemalla P_{cm} -arvo. Sen laskentakaava on esitetty edellä kaavassa 4 (s.22) Suurimmasta sallitusta P_{cm} -arvosta on neuvoteltava luokituslaitoksen kanssa ja lisättävä se lukituslaitoksen hyväksymään materiaali erittelyyn. (RMRS Part XIII Materials: 67)

Erikoislujien terästen mekaaniset ominaisuudet ovat esitetty liitteessä 2. Sen ensimmäiseen taulukkoon on listattu kaikki erikoislujat teräkset myötörajan mukaan sekä jaettu vielä laatuluokkiin. Taulukosta nähdään vaaditut murtolujuudet (Tensile strength), venymät (Elongation) ja iskutkeyden testirajat jouleina (Impact energy, min J). Iskutkeyden vähimmäisarvot on jaettu kahteen osaan eli valssaus-suuntaan nähden poikittain ja pitkittäin testattuna. Kun vetokokeet tehdään 70 mm paksulla, 25 mm leveällä ja 200 mm pituisella kappaleella, minimi venymä tulee olla liitteen 2 taulukon 2 mukainen. Testinäytteen valmistusohjeet on määritetty luokituslaitoksen säännöissä. Laatuluokan A teräksille voidaan myöntää iskutkeysrajojen alennus testitulosten ja luokituslaitoksen hyväksynnän perusteella. (RMRS Part XIII Materials: 67 - 68)

5.3.2 Erikoislujien terästen hitsausvaatimukset

Erikoislujan teräksen hitsauksessa käytetyt menetelmät ja lisäaineet on hyväksyttävä luokituslaitoksella. Luokituslaitoksella on myös jokaiselle lujuusluokalle oma suositus hitsauslisäaineille. RMRS myös valvoo hitsien hyväksymiskriteereitä ja laadunvalvontamenetelmiä. Hitsattujen rakenteiden valmistajan on toimitettava luokituslaitokselle dokumentti hitsausprosessista. Dokumentista on löydettävä tiedot esilämmityslämpötilasta, energiankäytöstä hitsauksen aikana, jälkilämpökäsittelystä ja lämpötilasta hitsauspalkojen välissä. Valmistajan on käytettävä hitsauslaadun tarkkailulaitteistoa, joka tallentaa myös jokaisen palon lämpötilan. Tulokset on toimitettava luokituslaitokselle. Hitsaus on tehtävä monipalkohitsauksena. Luokituslaitoksen hyväksynnällä on myös mahdollista hitsata yhdellä palolla. Jokaisen palon tulee olla yhtenevä ja valokaaren pituuden vaihtelu tulisi olla mahdollisimman vähäistä. Hitsaus railon reunojen ulkopuolella on kielletty. Tilapäisten hitsausta helpottavien siltahitsien käyttö on sallittua vain luokituslaitoksen luvalla, jos hitsauslisäaine ja hitsauslämpötila ovat luokituslaitoksen suosituksien mukaisia. Silloitteiden poistaminen tapahtuu luokituslaitoksen ohjeiden mukaisesti. (RMRS Part XIV Welding: 13 - 14)

Hitsaajien tulee olla päteviä hitsaamaan luokituslaitoksen valvonnan alaisia rakenteita. Pätevyys varmistetaan järjestämällä teoria- ja käytännöntesti. Testi on standardin ISO 9606, ASME Sec. IX, ANSI/AWS D 1.1 mukainen. Testin tulosten perusteella luokituslaitos myöntää hitsaajalle pätevyyden. Mekaanista hitsausta käyttävä hitsari on testattava standardin ISO 14737 vaatimusten mukaisesti. Automaattista ja robottihitsausta operoivan hitsarin on toimittava standardin ISO 14732 mukaisesti, saadakseen sertifiinnin ja hyväksynnän työn tekemiseen. (RMRS Part XIV Welding: 93)

Hitsauksen laatua valvottaessa on laadittava suunnitelma laaduntarkastukselle. Suunnitelman hyväksyy luokituslaitos. Suunnitelmasta tulee löytyä laaduntarkastuksessa käytetyt menetelmät, hyväksymistoleranssit, hitsausliitosten tiedot ja sovelletut standardit. Jokaisesta laaduntarkistuksesta tulee laatia dokumentti, joka sisältää luokituslaitoksen vaatimat tiedot liitoksesta. Dokumentit on allekirjoitettava testaajan sekä laaduntarkastajan toimesta. Liitosten laaduntarkastuksessa voidaan käyttää kansainvälisiä standardeja, ne on hyväksyttävä kuitenkin luokituslaitoksella. Liitoksien tarkastus suoritetaan NDT-menetelmillä (Nondestructive testing) eli rikkomattoman aineenkoetuksen menetelmillä. NDT-tarkastajan tulee olla pätevä standardin ISO 9712 tason 2 mukaisesti. NDT-tarkastuspöytäkirjoja tulee säilyttää 5 vuotta yrityksen toimesta ja pyydettyessä ne on toimitettava luokituslaitokselle. Taulukossa 9 on esitetty hyväksytyt NDT-menetelmät ja ISO-standardit, joista löytyvät tarkemmat menetelmien ohjeet. (RMRS Part XIV Welding: 17 - 41)

Talulukko 9. NDT-menetelmät ja vastaavat ISO-standardit (RMRS Part XIV Welding: 17; ISO standards 2017).

NDT-menetelmä	Lyhenne	ISO-standardi
silmämääräinen tarkastus	VT	ISO 17637
tunkeumanestetarkastus	PT	ISO 3452
magneettijauhetaarkastus	MT	ISO 17638
radiografinen kuvaus	RT	ISO 17636
ultraäänitarkastus	UT	ISO 17636

Tarkat tarkastusohjeet sekä hyväksymisrajat löytyvät RMRS-sääntöjen osasta *Rules for the classification and construction of sea-going ships, 2017 Part XIV* sivuilta 17 – 41. Säännöistä löytyvät tarkat taulukot hitsien hyväksymisrajoille ja tarkastusalueille. Taulukoista poikkeavat erikoistapaukset on tutkittava ja määriteltävä luokituslaitoksen kanssa. Kaikissa rakenteissa, putkissa, paineastioissa ja lämmönvaihtimissa on lähtökohtana silmämääräinen tarkastus (VT), jonka jälkeiset tarkastusmenetelmät on määriteltävä taulukoissa. Laatuvaatimukset nojautuvat standardiin ISO 5817.

6 Erikoislujien terästen vaikutus laivanrakennukseen

Erikoislujia teräksiä on nykyään käytetty laivanrakennuksessa rakenteiden vahvistuksessa ja painon vähentämisessä. Käytettyjen erikoislujien terästen lujuusluokat ovat olleet 420, 460 ja 500 MPa. Erikoislujaa terästä on käytetty esimerkiksi isojen konttialusten runkorakenteissa, jäänmurtajien ulkolaidoituksissa ja laivojen kansirakenteissa. (Allanah 2016) Terästen aineenvahvuuden ollessa vielä luokituslaitoksen sallittujen rajojen yläpuolella hitsaus on hoidettu perinteisillä ja hyväksytyillä hitsausmenetelmillä. Rakenteiden ohentuessa ja lujuusluokan kasvaessa muodonmuutokset kasvavat ja hitsausmenetelmien modernisointi on väistämätöntä. Luokituslaitoksilla on myös nykyään säännöt ja ohjeet suuremman lujuusluokan terästen hitsaukselle aina 690 MPa:han asti. Luokituslaitokset ovat olleet kielteisiä hyvin ohuiden erikoislujien teräsrakenteiden käytölle, syynä tähän on heikko väsymislujuus. (Niemelä ym. 2017: 11 - 12)

6.1 Erikoislujan teräksen edut

Erikoislujien terästen hyödyt verrattuna normaalilujaan laivateräkseen:

- painon pieneminen
- suurempien jännityksien salliminen suunnittelussa
- ohuemmat aineenpaksuudet
- yksinkertaisemmat rakenteet
- hitsaus saumojen määrän väheneminen ja hitsauslisäaineen käytön väheneminen
- suuremman kuorman sallittavuus
- rakenteiden elinkaaren piteneminen.

Erikoislujien terästen käyttö mahdollistaisi tuotantokustannusten vähentämisen pienemmän hitsaustarpeen vuoksi. Hitsattaessa erikoislujaa terästä tarvitaan vähemmän hitsausaamaa ja vähemmän hitsauslisäaineita. Tämä pienentäisi suoraan materiaalikustannuksia sekä työtuntien määrää. Hitsauksen vähentyessä yrityksen energian tarve vähenee, mikä osaltaan luo säästöjä. Hitsauslaadun tarkastukseen kuluvat kustannukset myös laskevat hitsin määrän vähentyessä. Erikoislujien terästen käytöllä parannetaan valmiin laivan polttoaineenkulutusta ja ekologisuutta pienentyneellä painolla. Tutkimusten mukaan laivan painoa on mahdollista laskea 15 – 30 %. Painon pienentäminen mah-

dollistaa myös laivan koon suurentamisen, joka puolestaan lisää laivan käytön tehostamista. Esimerkiksi risteilijään voitaisiin rakentaa täysin uusi hyttikansi painon vähentämisen seurauksena, jolloin risteilijän kilpailukyky paranee. Erikoislujien terästen käyttö kansirakenteissa lisää myös esimerkiksi konttialusten kuormakapasiteettia. Kuormakapasiteetin ja kuorman käsittelyn kasvua tukee erikoislujien terästen korkea lujuus, hyvä kulutuksen kesto ja pintapaineen kestävyys. Yrityksen logistisia kustannuksia on myös mahdollista laskea kevyemmän teräksen toimittamisesta. (Niemelä ym. 2017: 11 - 14; Lämsä & Kiuru 2012)

6.2 Erikoislujan teräksen haasteet

Erikoislujien terästen käytölle haasteita asettavat seuraavat tekijät:

- haasteellinen hitsaus ohuissa rakenteissa
- tiukat vaatimukset luokituslaitoksilta
- väärin hitsausparametrien ja ei vähävetyisten lisäaineiden käytöstä johtuvat hitsausliitoksen haurastumiset
- hitsauksesta ja kylmämuokkauksesta aiheutuvat jäännösjännitykset lisäävät riskiä haurasmurtumiin, väsymiseen ja jännityskorroosioon
- kalliit investoinnit tuotannon muuttamiseen
- rakenteiden ohuus joka jossain määrin vähentää laivan vakautta.

Erikoislujien terästen käyttö laivateollisuudessa on hyvin rajoitettua ja vaatii tarkkaa suunnittelua. Hitsaamisesta aiheutuvat muodonmuutokset ja hitsausvirheiden aiheuttamat ongelmat kasvavat sen myötä, mitä lujempiin teräksiin mennään. Tuotannossa syntyvät riskit kasvavat, kun erikoislujia teräksiä on mahdollista hitsata lähes millä vain hitsaustekniikalla. Hitsausohjeiden on oltava tämän vuoksi tarkkoja ja laadunvalvonnan tehokasta. Ohuempien terästen hitsaukseen on tehtävä kalliita investointeja, kun perinteiset hitsausmenetelmät eivät enää tuota haluttua tulosta. (Meelker 2015; Lämsä & Kiuru 2012) Erikoislujien terästen väsymislujuus on tällä hetkellä tärkein käyttöä rajoittava tekijä luokituslaitoksen kannalta. Erikoislujien terästen väsymislajuuden parantamiseen tarvitaan hyvä hitsauslaatu ja valmistusmenetelmä. (Niemelä ym. 2017: 13)

7 Tutkimus ja kehitystyö

Erikoislujien terästen mukanaan tuomien potentiaalisten hyötyjen laivojen tehokkuuden ja ekologisuuden parantamiseksi. Tämän johdosta on erikoislujia teräksiä alettu tutkia ja kehittämään monelta eri taholta. Meyer Turku, SSAB Europe ja Aalto-yliopisto ovat tutkineet erikoislujia teräksiä keventääkseen laivojen rakenteita FIMECC BSA-tutkimuksessa. (Dimecc 2017) Aalto-yliopistossa on meneillään myös muita meriteollisuuden ja kevyisiin rakenteisiin liittyviä hankkeita kuten SANDFECH- ja FiDi-pro-hankkeet. FiDi-pro-hankkeessa keskitytään tehokkaiden lujuuslaskelmien kehittämiseen. (Niemelä ym. 2017: 11)

7.1 SANDFECH-hanke

SANDFECH-hankkeen tarkoituksena on kehittää hitsattuja kerroslevyrakenteita käyttämällä hyödyksi esimerkiksi kevyempiä materiaaleja. Hankkeessa kehitetään teoreettisia ja laskennallisia malleja kerroslevyrakenteille. SANDFECH-hankkeesta on kirjoitettu Aalto-yliopiston artikkelissa:

"Laivanrakennuksessa on perinteisesti käytetty jäykistettyjä laattarakenteita. Niiden korvaaminen kevyemmällä kerroslevyrakenteilla on taloudellisempaa ja energiatehokkaampaa. Säästöjä syntyy materiaali-, tila- ja polttoainekustannuksissa. Jotta esimerkiksi risteilyaluksen rakenteiden analysoinnin laskennallinen taakka ei kasvaisi liian suureksi, tarvitaan yksinkertaistettua mallintamista."

Projekti aloitetaan vuoden 2017 elokuussa (Romanoff 2017).

7.2 FIMECC BSA-tutkimus

FIMECC BSA-tutkimuksen päämääränä on ratkaista erikoislujan teräksen käytön ja tuotannon haasteet. Tutkimuksessa on kiinnitetty huomiota erityisesti erikoislujiin rakenteiden väsymislujuuteen ja rakenteiden valmistamiseen telakoiden tuotantotiloissa. Hankkeessa on kehitetty laser-hybridihitsausta ohuisiin kansirakenteisiin sekä erikoislujuja laipiorakenteita. Luokituslaitosten säännöt erikoislujuille teräksille ovat hyvin tiukat, joten kovaa ja systemaattista työtä vaaditaan teollisuuden ja yliopiston asiantuntijoiden voimin.

Kansirakenteiden ohentaminen ja sen mukaan painon säästäminen on yksi keino. Kansirakenteet hitsattaisiin erikoislujasta teräksestä, mutta hyvin ohuisiin levyihin tulee helposti muodonmuutoksia. Luokituslaitokset eivät myöskään hyväksy hyvin ohuita rakenteita. Ratkaisuksi on sovellettava oikeaa hitsausmenetelmää, jotta kansirakenne saataisiin hitsattua ilman suuria muodonmuutoksia. Tutkimuksessa on tutkittu laser-hybridihitsausta, jonka avulla ohuiden levyjen hitsaus onnistuu synnyttämättä suuria sisäisiä jännityksiä sekä muodonmuutoksia. Laser-hybridihitsausprosessin tulee olla tarkasti suunniteltu ja mitoitettu, jotta halutut pienet muodonmuutokset, hyvä hitsin geometria sekä hyvä väsymislujuus saavutetaan. Tutkimuksessa on valmistettu pieniä koekappaleita ja täysmittainen koerakenne kansirakenteesta, joka on hitsattu laser-hybridihitsaustekniikalla. Tulokset ovat olleet myönteisiä. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että korkea väsymislujuus on saavutettavissa, jos käytetään oikeaa hitsausmenetelmää oikeissa olosuhteissa. Seuraavana askeleena on kokonaisen prototyypin rakentaminen. Prototyypin haasteena ovat lohkorakenteen ja laivapalkkien tuomat väsymismitoituksen ongelmat. Valmistusprosessista ja ympäristön olosuhteista aiheutuvat ongelmat on myös täysin ymmärrettävä, jotta rakenne voidaan viedä tuotantoon. (Niemelä ym. 2017: 12 - 13; Dimecc 2017)

Erikoislujasta teräksestä valmistetun kevyemmän laipiorakenteen valmistus on myös yksi keino vähentää laivan rungon painoa. Tämän on tapahduttava muuttamatta teräksen ominaisuuksia ja pinnanlaatua. Laivanrakennusympäristössä hiotaan, polttoleikataan ja hitsataan, minkä seurauksena teräksen rakenne muuttuu. Ratkaisuna tähän on kehitettävä toimivat tuotantotekniikat ja parannettava tuotannon laatua. Hankkeessa kehitettiin uusia menetelmiä laipioiden valmistukseen ja mallintamiseen. Tuloksena havaittiin, että laadukkailla hitsauksilla voidaan parantaa huomattavasti laipion väsymislujuutta. Myös hitsin jälkikäsitteilyllä voidaan vaikuttaa väsymislujuuden parantamiseen. Väsymislujuuden mallinnus sekä hitsin geometrian laadun kuvantamisen on oltava nykyistä parempaa hyvien tulosten saavuttamiseksi. Lisäksi telakoiden on kehitettävä sopeva valmistusteknologia ja tehtävä täysmittakaavan kokeet. (Niemelä ym. 2017: 13 - 14; Dimecc 2017)

8 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli syventyä erikoislujien terästen käyttöön ja hitsattavuuteen laivanrakennusteollisuudessa. Tutkimus aloitettiin perehtymällä tähänhetkiin käytetyimpiin teräslaatuihin ja hitsaustekniikoihin laivanrakennusteollisuudessa. Erikoisluihin teräsiin perehdyttiin seuraavaksi ja selvitettiin kyseiseen teräslatuun käytettyjä hitsausmenetelmiä. Luokituslaitosten säännöt ovat suuri osa laivan suunnittelua ja rakennusta. Tässä tutkimuksessa tutustuttiin kahden luokituslaitoksen Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd ja Russian Maritime Register of Shipping sääntöihin perehtyen erikoislujien terästen käyttöön ja hitsattavuuteen tuotannossa. Erikoislujia teräsiä on alettu tutkimaan lisää monilta tahoilta, joten tutkimuksessa luotiin myöskin katsaus muihin meneillään oleviin erikoisluihin teräsiin liittyviin hankkeisiin. Tuloksena pohdittiin erikoislujan teräksen tuomia hyötyjä ja haasteita laivanrakennusteollisuuteen.

Tämän päivän laivanrakennuksessa käytetään hyvin paljon normaalilujan 235 MPa ja lujan lujuusluokan 390 MPa:n asti olevia laivanrakennusteräsiä. Erikoislujia teräsiä myötörajaan 500 MPa asti on myös käytetty laivanrakennuksessa. Tähän rajaan asti laivoissa käytettyjen aineenvahvuuksien hitsaaminen on onnistunut mainiosti perinteisillä hitsausmenetelmillä. Perinteisiä laivanrakennuksen hitsausmenetelmiä ovat olleet MIG/MAG-, täytelanka-, kaasukaarimuotti-, jauhekaari-, kuona- ja puikkohitsaus. Automaattiset lohkojen ja kansirakenteiden valmistukseen käytettävät hitsausrobotit ovat olleet myös pitkään laivanrakennuksessa mukana. Luokituslaitoksien säännöt pohjautuvat suurimmalta osin perinteisiin laivanrakennusteräsiin.

Erikoislujia teräsiä on käytetty jo jonkin aikaa laivanrakennuksessa. Suuren myötörajan ohuita erikoislujia teräsiä laivanrakennus ei ole vielä käyttänyt. Käyttöä estävät luokituslaitoksen säännöt, jotka pohjautuvat erikoislujan teräksen mahdolliseen väsymiseen. Tutkimuksissa on selvitetty kuinka erikoislujia teräsiä tulisi hitsata, jotta saadaan haluttu lopputulos. Modernit hitsaustekniikat kuten laser-hybridihitsaus olisivat tähän ratkaisu. Erikoislujia teräsiä hitsatessa on otettava huomioon monia asioita hyvän lopputuloksen saamiseksi. Hyvä lopputulos saadaan käyttämällä oikeaa hitsaustekniikkaa, säätämällä juuri oikeat hitsausparametrit, pitämällä tuotantotilat kunnossa ja käyttämällä tehokasta laadunvalvontaa.

Luokituslaitokset päivittävät jatkuvasti sääntöjään lisäämällä esimerkiksi uusia lujuusluokkia sääntöihinsä. Erikoislujien teräksien tutkimus ja suuren mittakaavan kokeet osoittavat myös luokituslaitoksille erikoislujien terästen nykyistä suurempaa käyttöä laivanrakennuksessa. Tutkimuksessa käytiin läpi kahden luokituslaitoksen tämän hetkisten sääntökirjojen ne kohdat, jotka liittyvät erikoislujiin teräksiin. Luokituslaitosten sääntöjen mukaan ne ovat vielä hyvin rajoitettuja laivanrakennuksessa.

Erikoislujien terästen käyttö laivateollisuudessa lisääisi rakennettavien laivojen tehokkuutta painon vähennyksestä johtuen. Telakkatuotantoon saataisiin nopeammat läpimenoajat hitsauksen tarpeen vähentyessä. Kustannuksia saataisiin vähennettyä nämä hyödyt huomioon ottaen. Erikoislujien terästen ottaminen tuotantoon vaatii kuitenkin vielä paljon lisätutkimusta ja suuren mittakaavan kokeita. Erikoislujien terästen toimivuuden todistamisen jälkeen vaaditaan vielä luokituslaitosten hyväksynnät ja sääntöjen muutokset täyden hyödyn saavuttamiseksi. Tuotantoon tarvitaan myös muutoksia hitsaustekniikoiden, laadunvalvonnan ja henkilöstön koulutuksen osalta. Uudet hitsaustekniikat ovat kalliita ja vaativat suuria investointeja. Myös muut tuotannon muutokset tuovat lisäkuluja, joten tarkat kustannuslaskelmat ovat tarpeen voittoja tavoiteltaessa.

Lähteet

Allanah, Eames. 2016. Tutkimusretki offshore-markkinoille. SSAB World 1/2016.

Dimecc. 2017. Verkkodokumentti. <<http://hightech.dimecc.com/results/high-strength-steels-enable-novel-lightweight-marine-structures>> Luettu 11.4.2017

DNV-GL. 2017. Rules for classification, Ships, Part 2 Materials and welding, Chapter 2 Metallic materials.

DNV-GL. 2017. Rules for classification, Ships, Part 2 Materials and welding, Chapter 4 Fabrication and testing.

DNV-GL About us. 2017. Verkkodokumentti. <<https://www.dnvgl.com/about/index.html>> Luettu 2.4.2017

Esab osaamiskeskus. 2017. Verkkodokumentti. <<http://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/index.cfm>> Luettu 23.3.2017.

Hachmöller, Ludger. 2017. Principal Welding Engineer, Maritime. Yksityinen sähköpostiviesti. DNV-GL Sweden. Vastaanottaja: Pavel Zaharov. Lähetetty 3.4.2017.

IACS. 2017. IACS explained. Verkkodokumentti. <<http://www.iacs.org.uk/explained/default.aspx>> Luettu 2.4.2017.

Ionix. 2017. Teknologiat. Verkkodokumentti. <<http://www.ionix.fi/fi/teknologiat/laser-tyosto/laserhitsaus>> Luettu 26.3.2017.

ISO standards. 2017. International Organization for Standardization. Verkkodokumentti. <<https://www.iso.org/standards.html>> Luettu 10.4.2017.

Kiuru, Henri. 2012. Ultralujien terästen ominaisuuksien hyödyntäminen kone- ja teräsrakenteissa. CASR-Steelpolis-verkostohanke (EAKR). Oulun yliopisto, Oulun Eteläisen piirin instituutti.

Kranendonk. 2017. Shipbuilding. Verkkodokumentti. < <http://www.kranendonk.com/shipbuilding>> Luettu 25.3.2017.

Kujanpää, V., Salminen, A. & Vihinen, J. 2005. Lasertyöstö. Teknologiateollisuus ry. PAINOPAikka: Teknologiainfo Teknova Oy.

Lappalainen, Ilkka. 2015. Laser- ja hybridihitsauksen käyttökohteet. TAKEOFF! -seminaari, Savonia-ammattikorkeakoulu, Kuopio.

Lukkari, Juha. 2000. Hitsien laatu ja hitsausvirheet osa 2. Hitsausuutiset 2/2000.

Lämsä, J. & Kiuru, H. 2012. Ultralujat rakenne- ja kulutusteräokset – tärkeimmät ominaisuudet suunnittelulle. CASR-Steelpolis-verkostohanke (EAKR). Raahen Seudun Teknologikeskus Oy. Oulun yliopisto.

Meelker Harm. 2015. High yield/strength steel. Verkkodokumentti. <www.sveis.no/f/D11204> Lincoln Smitweld BV, Netherlands. Luettu 5.4.2017

Niemelä, A. Itävuori, A. Remes, H. & Romanoff, J. 2017. Lujat ja ohuet materiaalit keventävät risteilylaivan rakenteita. Hitsaustekniikka 1/2017, s.11 - 14.

Ovako. 2012. Terästen hitsaus. Verkkodokumentti. < <http://docplayer.fi/65815-Ovakonterasten-hitsaus.html>>

Porter, David. 2006. Developments in Hot-Rolled High-Strength Structural Steels. Raahen: Rautaruukki Oyj.

Rissanen, Tiina. 2010. Ultralujien terästen käyttö ja konepajaprosessit. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun julkaisu 6/2011.

Romanoff, Jani. 2017. Meritekniikan tutkimukselle lähes miljoona euroa EU-rahoitusta. Aalto-yliopisto. Verkkodokumentti. <<http://www.aalto.fi/fi/current/news/2017-03-17-003/>> 17.3.2017. Luettu 11.4.2017.

Russian Maritime Register of Shipping. 2017. Verkkodokumentti. <<http://www.rs-class.org/en/register>> Luettu 4.4.2017.

Russian Maritime Register of Shipping, Rules for the classification and construction of sea-going ships, Part XIII Materials. 2017. Saint-Petersburg. Edition 2017.

Russian Maritime Register of Shipping, Rules for the classification and construction of sea-going ships, Part XIV Welding. 2017. Saint-Petersburg. Edition 2017.

Ruukissa kehitetty suorasammutusteknologia palkittiin Suomalaisella Insinööriyöpalkinnolla. 2012 Verkkodokumentti. <<http://www.kivirock.fi/uutiset.html?843>> 28.5.2012. Luettu 25.04.2017.

Räisänen, Pekka. 2000. Laivatekniikka: modernin laivanrakennuksen käsikirja. Kustantaja: Turun ammattikorkeakoulu.

SSAB Welding of Strenx. 2017. Welding of Strenx brochure 2017.

Standardi SFS-EN ISO 6520. 2017.

Standardi SFS-EN ISO 9606. 2017.

Standardi SFS-EN 287-2. 2017.

Tihinen, Sakari. 2013. Lujat termomekaanisesti valssatut teräkset. Verkkodokumentti. <<http://docplayer.fi/19515153-Lujat-termomekaanisesti-valssatut-terakset.html>> Luettu 1.4.2017.

TWI-Global. 2017. FAQs: What is the difference between the various Carbon Equivalent Formulae used in relation to hydrogen cracking? Verkkodokumentti. <<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/material-faqs/faq-what-is-the-difference-between-the-various-carbon-equivalent-formulae-used-in-relation-to-hydrogen-cracking>> Luettu 1.4.2017.

Wear resistant steel. 2017. Verkkodokumentti. <<http://www.wearresistantsteelin/raex.html>> Luettu 4.4.2017.

Erikoislujien terästen kemialliset koostumukset

(DNVGL-Pt.2 Ch.2 2017: 39-40)

<i>Delivery condition</i> ¹⁾	<i>N/NR</i>		<i>TM</i>		<i>QT</i>		<i>N, TM, QT</i>
Steel grade	VL A420 VL D420 VL A460 VL D460	VL E420 VL E460	VL A420 VL D420 VL A460 VL D460 VL A500 VL D500 VL A550 VL D550 VL A620 VL D620 VL A690 VL D690 VL A890	VL E420 VL F420 VL E460 VL F460 VL E500 VL F500 VL E550 VL F550 VL E620 VL F620 VL E690 VL F690 VL D890 VL E890	VL A420 VL D420 VL A460 VL D460 VL A500 VL D500 VL A550 VL D550 VL A620 VL D620 VL A690 VL D690 VL A890 VL A960	VL E420 F420 VL E460 F460 VL E500 F500 VL E550 F550 VL E620 F620 VL E690 F690 VL D890 E890 VL D960 E960	VL D/E47COD, BCA and BCACOD ⁸⁾
Chemical Composition, %²⁾							
C	0.20	0.18	0.16	0.14	0.18		0,12
<i>Delivery condition</i> ¹⁾	<i>N/NR</i>		<i>TM</i>		<i>QT</i>		<i>N, TM, QT</i>
Mn	1.0~1.70		1.0~1.70		1.70		1.80 ⁹⁾
Si	0,60		0,60		0,80		0,60
P ³⁾	0.030	0.025	0.025	0.020	0.025	0.020	0,020
S ³⁾	0.025	0.020	0.025	0.010	0.015	0.010	0,008
Al _{total} min ⁴⁾	0.02		0.02		0.018		0,02~0,6
Nb ⁵⁾	0.05		0.05		0.06		0,02~0,06 ¹⁰⁾
V ⁵⁾	0.20		0.12		0.12		0,05~0,08 ¹⁰⁾
Ti ⁵⁾	0.05		0.05		0.05		0,007~0,05 ⁴⁾
Ni ⁶⁾	0.80		2.00 ⁶⁾		2.0 ⁶⁾		1,0 ⁶⁾
Cu	0.55		0.55		0.50		0,50
Cr ⁵⁾	0.30		0.50		1.50		0,25
Mo ⁵⁾	0.10		0.50		0.70		0,25
N	0.025		0.025		0.015		0,010 ¹¹⁾
B ¹²⁾	-		-		-		0,0005
Oxygen ppm ⁷⁾	-		-	50	-	30	-

2) Given values is maximum content (by weight) unless shown as a range or as minimum. The chemical composition is to be determined by ladle analysis and shall meet the approved manufacturing specification at the time of approval.

3) For sections the P and S content can be 0.005 % higher than the value specified in the table.

4) The total aluminium to nitrogen ratio shall be a minimum of 2:1. When other nitrogen binding elements are used, the minimum Al value and Al/N ratio do not apply.

5) Total Nb+V+Ti ≤ 0.26 % and Mo+Cr ≤ 0.65%, not applicable for QT steels.

6) Higher Ni content may be approved subject to qualification during manufacturer approval testing.

7) The requirement on maximum Oxygen content is only applicable to DH890; EH890; DH960 and EH960.

8) When scrap material is being used in steel production, the amount of the following residual elements shall be determined and reported and the levels shall not exceed: 0.03% As, 0.01% Sb, 0.02% Sn, 0.01% Pb, 0.01% Bi and 0.005% Ca

9) Mn ≤ 2.0% for t ≥ 80 mm

10) (Nb+V) ≤ 0.09%

11) N ≤ 0.012% if Al is present.

12) B ≤ 0.005 may be added subject to qualification of maximum content during manufacturer approval testing

Mekaaniset ominaisuudet erikoislujille teräksille (paksuus alle 70 mm)

(RMRS Part XIII Materials: 68)

Taulukko 1.

Mechanical properties of rolled products with maximum thickness of 70 mm, %

Steel grade	Tensile test			Impact test		
	Yield stress R_{eH} or $R_{p0.2}$, min, MPa	Tensile strength R_m , MPa	Elongation A_5 , min, %	Test temperature, °C	Impact energy KV , min, J	
					longitudinal specimen	transverse specimen
A420 D420 E420 F420	420	530 — 680	18	0	42	28
-20						
-40						
-60						
A460 D460 E460 F460	460	570 — 720	17	0	46	31
-20						
-40						
-60						
A500 D500 E500 F500	500	610 — 770	16	0	50	33
-20						
-40						
-60						
A550 D550 E550 F550	550	670 — 830	16	0	55	37
-20						
-40						
-60						
A620 D620 E620 F620	620	720 — 890	15	0	62	41
-20						
-40						
-60						
A690 D690 E690 F690	690	770 — 940	14	0	69	46
-20						
-40						
-60						

Notes: 1. The Register may require for a specific value of tensile strength to be established.
 2. Where tensile tests are made on full-thickness specimens 25 mm broad and 200 mm long, the minimal elongation shall be in accordance with Table 3.13.3-2.
 3. Based on satisfactory control test results and on agreement with the Register, the scope of impact testing may be reduced for Grade A steel.

Taulukko 2.

Minimal elongation values for standard specimens of full thickness with design length of 200 mm, %

Strength level of steel	Thickness t , mm						
	≤ 10	> 10 ≤ 15	> 15 ≤ 20	> 20 ≤ 25	> 25 ≤ 40	> 40 ≤ 50	> 50 ≤ 70
420	11	13	14	15	16	17	18
460	11	12	13	14	15	16	17
500	10	11	12	13	14	15	16
550	10	11	12	13	14	15	16
620	9	11	12	12	13	14	15
690	9	10	11	11	12	13	14