LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

VALUTERÄKSIEN G24Mn6 JA G26CrMo4 VAIKUTUS HITSAUSLIITOKSEN LUJUUTEN TERÄSLEVYN S500MC KANSSA

STEEL CASTINGS G24Mn6 AND G26CrMo4 IMPACT ON THE STRENGTH OF THE WELDING JOINT WITH S500MC STEEL PLATE

Lappeenrannassa 02.07.2018

Antti Kontio
Tarkastaja: TkT Timo Björk
Ohjaajat: TkT Timo Björk & DI Matti Randelin

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Antti Kontio

Valuteräksien G24Mn6 ja G26CrMo4 vaikutus hitsausliitoksen lujuuteen teräslevyn S500MC kanssa

Kandidaatintyö

2018

48 sivua, 24 kuvaa, 11 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastaja: TkT Timo Björk

Ohjaajat: TkT Timo Björk & DI Matti Randelin

Hakusanat: G24Mn6, G26CrMo4, hitsausliitos, valuteräs, vetokoe, Vickers kovuuskoe

Valuteräksien avulla voidaan suunnitella monimutkaisia kappaleita. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan kirjallisuuden ja laboratoriokokeiden avulla kahden eri valuteräksen vaikutusta hitsausliitoksen lujuuteen. Hitsausliitos on valittu kuvaamaan rakenteen kriittistä osaa. Hitsausliitoksessa on teräslevy S500MC sekä tutkittavat valuteräkset ovat G24Mn6 QT2 ja G26CrMo4 QT2. Kirjallisuusosiossa on tutkittu valuteräksien kemiallisen koostumuksen vaikutusta materiaalin hitsattavuuteen. Sen lisäksi on tuotu esiin $T_{8/5}$-jäähtymisajan vaikutusta valuteräksien mikrorakenteen syntyyn hitsin muutosvyöhykkeellä sekä $T_{8/5}$-jäähtymisaikaan vaikuttavat tekijät.

Hitsausliitokselle tehtiin Vickers HV5-kovuuskoe ja vetokoe hyödyntäen Aramis-mittausta. Kovuuskokeista huomattiin valuteräksien erot karkenevuudessa hitsauksen seurauksena ja lämmöntuonnin vaikutus kovuuden arvoihin. G24Mn6 QT2 valuteräksen kovuuden arvot olivat alhaisemmat kuin G26CrMo4 QT2 valuteräksen. Vetokokeessa valuteräksellä ei ollut vaikutusta murtuman sijaintiin tai murtumatyyppiin. Kaikki vetokoesauvat murtuivat sitkeästi teräslevyn S500MC puolelta. Vetokoekappaleiden murtojännityksen arvot vastasivat S500MC murtojännityksen arvoja. Liitoksen muodonmuutoskyky oli hyvä. Tämän tutkimuksen perusteella G24Mn6 QT2 valuteräs voi korvata käytössä olevan G26CrMo4 QT2 valuteräksen tutkitussa hitsausliitoksessa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Antti Kontio

Steel castings G24Mn6 and G26CrMo4 impact on the strength of the welding joint with S500MC steel plate

Bachelor's thesis

2018

48 pages, 24 figures, 11 tables and 4 appendices

Examiner: D. Sc. (Tech.) Timo Björk

Supervisors: D. Sc. (Tech.) Timo Björk & M. Sc. (Tech.) Matti Randelin

Keywords: G24Mn6, G26CrMo4, steel casting, tensile testing, Vickers hardness test, welding joint

The steel castings can be used to design complex pieces. This thesis explored the effect of two different steel castings on the strength of the welding joint by literature and laboratory tests. The welding joint has been chosen to describe the critical part of the structure. The welding joint is made of steel plate S500MC and the studied steel castings are G24Mn6 QT2 and G26CrMo4 QT2. In the literature section has been studied, the influence of the chemical composition of the steel castings on the weldability of the material. In addition, the effect of $T_{8/5}$ cooling time on the formation of the microstructure of the steel castings heat affected zone (HAZ) area has been described and effecting factors of the $T_{8/5}$ cooling time.

The welding joint was made a Vickers HV5 hardness test and a tensile test utilizing Aramis measurement. From the hardness tests, the differences in the steel castings were observed in the degree of hardening and the effect of heat input to the hardness values. G24Mn6 QT2 steel cast hardness values were lower than G26CrMo4 QT2 steel cast. In the tensile test the type of steel casting didn't have a no effect on fracture location or fracture type. All the tensile specimens broke sharply on the steel plate S500MC side. The tensile stress values corresponded to the S500MC fracture values. The welding joint's deformation ability was good. Based on this study, the G24Mn6 QT2 steel casting can replace the existing G26CrMo4 QT2 steel casting in the studied welding joint.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT SYMBOLIT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO 7

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet sekä rajaukset 7

2 TEORIA 8

2.1 Tutkittavien valuteräksien seosaineet 9

2.2 G26CrMo4 QT2 11

2.3 G24Mn6 QT2 12

2.4 S500MC 13

2.5 Hitsin muutosvyöhykkeen eri alueet 14

2.6 Jäähtyminen ja sen kontrollointi hitsauksessa 16

2.6.1 Teräksen karkenevuus ja sen arviointi 20

2.7 Hitsattavuus ja hitsausvauriot 22

3 TUTKIMUSMETODIT 23

3.1 Hypoteesi 23

3.2 Laboratoriokokeet ja mittausjärjestelyt 23

3.2.1 Koekappaleiden esivalmistelu 23

3.2.2 Kovuuskoe HV5 ja makrokuvat 28

3.2.3 Vetokoe ja Aramis (DIC) 29

4 TULOKSET 33

4.1 Kovuuskoe HV5 33

4.2 Vetokoe ja aramis 37

5 TULOSTEN POHDINTAA 41

5.1 Mahdollisten virheiden tarkastelu 42

5.2 Jatkotutkimusaiheet 43

6 YHTEENVETO 45

LÄHTEET 46

LIITTEET

LIITE I: Koekappale 3 alkuaineanalyysin tulokset G24Mn6

LIITE II: Koekappale 4 alkuaineanalyysin tulokset G26CrMo4

LIITE III: Kovuuskokeen mittauspisteiden sijainnit painaumariveillä koekappaleissa 3 ja 4.

LIITE IV: Kovuuskoetulokset mittapisteissä koekappale 3 ja 4

LIITE V: Hitsauslisäaineen lujuusarvot hitsattuna M21 suojakaasulla

KÄYTETYT SYMBOLIT JA LYHENTEET

Symboliluettelo

A	Murtovenymä [%]
A_0	Poikkipinta-ala [mm^2]
d	Yhdistetty aineenpaksuus [mm]
E	Hitsausenergia [kJ/mm]
F_2	Liitosmuotokerroin 2-dimensionaalinen jäähtyminen
F_3	Liitosmuotokerroin 3-dimensionaalinen jäähtyminen
F_{max}	Vetokokeen maksimivoima [N]
I	Hitsausvirta [A]
k	Hitsausprosessin terminen hyötysuhde
L_u	Katkenneen koesauvan pituus [mm]
L_0	Koesauvan alkuperäinen pituus [mm]
MPa	Megapascal [1 N/mm^2]
Q	Lämmöntuonti [kJ/mm]
R_m	Vetomurtolujuus [MPa]
$R_{p0,2}$	Venymäraja [MPa]
T_0	Korotettu työlämpötila [ºC]
$T_{8/5}$	Jäähtymisnopeus 800 ºC:sta 500 ºC:een [s]
U	Jännite [V]
v	Kuljetusnopeus [mm/s]

Lyhenneluettelo

CCT	Continuous-Cooling-Transformation
CEV	Hiiliekvivalentti
DIC	Digital Image Correlation
HAZ	Heat-Affected Zone
HV5	Vickers kovuus 5 kg painolla mitattuna
MAG	Metal Active Gas
MC	Kuumavalsattu kylmämuokattava lujateräs
QT	Nuorrutettu

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö keskittyy kahden eri valuteräksen ja teräslevyn välisen hitsausliitoksen lujuuden tarkasteluun. Työ sisältää teoriaosuuden ja laboratoriokokeita. Näin saadaan riittävä näkemys hitsausliitoksen tutkimiseen ja erojen selvittämiseen. Tutkittava hitsausliitos on yksinkertaistettu tilanne käytössä olevasta hitsausliitoksesta. Hitsausliitos muodostuu teräslevystä ja valuteräksestä. Valuteräksiä on kahta erilaista: G24Mn6 QT2 ja G26CrMo4 QT2. Teräslevyn materiaali on S500MC. Opinnäytetyössä selvitetään edellä mainittujen valuteräksien vaikutusta hitsausliitoksen lujuuteen.

Vetokokeella on selvitetty hitsausliitoksen staattinen lujuus. Vetokokeen aikana on hyödynnetty myös Aramis-mittausta. Tämän lisäksi vertailtaville hitsausliitoksille on tehty Vickers-kovuuskoe (HV5) ja samalla on otettu makrokuvat hitsistä. Näin pystytään selvittämään hitsauksen aikana syntyneen lämpövyöhykkeen vaikutusta hitsausliitoksen lujuuteen ja sitkeyteen.

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet sekä rajaukset

Tämän opinnäytetyön aiheen on antanut Cargotec Finland Oy Multilift-vaihtolavalaitteiden tuotelinja. Yritys haluaa vaihtaa käytössä olevan valuteräksen edullisempaan ja tuotannon kannalta tuottavampaan vaihtoehtoon. Tässä opinnäytetyössä selvitetään valuteräksien vaikutusta hitsausliitoksen lujuuteen ja tuotetaan valuteräksen vaihtamisen päätöksen tueksi tarvittavaa tietoa.

Tämän työn ulkopuolelle on jätetty hitsausliitoksen väsymiskestävyyden tarkastelu ja kylmässä esimerkiksi -40 ºC:n lämpötilassa tehtävät vetokokeet. Taivutustestejä ei myöskään tehdä hitsausliitokselle. Rajaukset on tehty kandidaatintyön laajuuden takia. Edellä mainitut kokeet olisivat kasvattaneet kandidaatintyölle varattua työmäärää suuremmaksi. Nämä lisäkokeet olisi hyvä tehdä, koska käytettävässä hitsatussa rakenteessa kyseinen hitsausliitos joutuu väsyttävään kuormitukseen sekä laitteen käyttöympäristövaatimuksissa on maininta laitteen toimivuudesta -40 ºC:n lämpötilassa.

2 TEORIA

Valamisen ansiosta suunnittelijalla on suuri muotoiluvapaus teräsvalukappaletta suunnittaltaessa. Sen avulla voidaan optimoida raaka-aineen käyttöä ja kappaleen muotoja, koska seinämäpaksuudet voidaan mitoittaa rasitusten mukaisesti. Tämän lisäksi valaminen on energian käytön kannalta edullinen valmistustapa ja valamisen raaka-aineita on laaja valikoima tarjolla (MET 2. 2001, s.10).

Muovattujen terästen pituussuuntaiset lujuusarvot ovat korkeammat kuin poikittaissuuntaiset. Valuterästen lujuusominaisuudet eivät ole riippuvaisia suunnasta vaan ne pysyvät samoina kaikissa suunnissa. Valuterästen lujuusarvot asettuvat suunnilleen puoliväliin vastaavien muovattavien terästen pitkittäisten ja poikittaisten lujuusarvojen kanssa (Autere E., Ingman Y., Tennilä P. 1982, s.275).

Valuteräkset ja muokattavat teräkset voidaan jakaa hiilipitoisuuden perusteella seuraaviin ryhmiin:

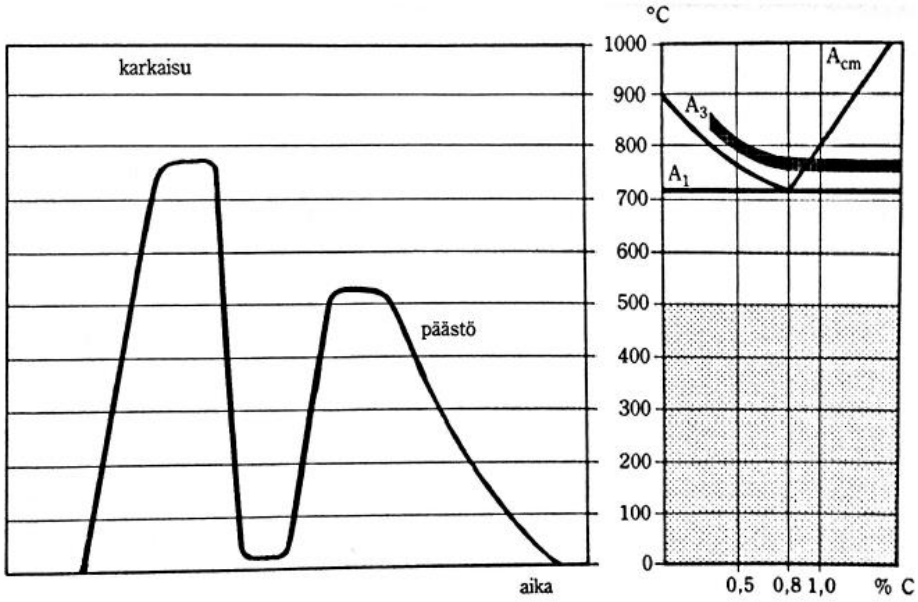
- niukkahiiliset teräkset 0,05-0,25 % C
- keskihiiliset teräkset 0,25-0,60 % C
- runsashiiliset teräkset 0,60-2,00 % C

Jokaisella ryhmällä on oma tärkeä ominaisuutensa. Niukkahiilisten teräksien tärkein ominaisuus on hitsattavuus. Keskihiilisillä teräksillä tärkeimmät ominaisuudet ovat hyvä lujuus ja sitkeys. Nuorrutusteräkset ovat yleensä keskihiilisiä valuteräksiä. Runsashiilisillä teräksillä tärkeimpänä ominaisuutena on kulutuskestävyys (MET 2. 2001, s. 157).

Tässä työssä tutkittavat valuteräkset ovat QT2-luokan nuorrutettuja teräksiä. Q merkintä tarkoittaa karkaisua (Quenching) ja T tarkoittaa päästöä (Tempering). QT-lämpökäsittelytilan perässä oleva numero merkitsee eri nuorrutustiloja, joiden lämpötilat on määritelty standardissa (MET 2 2001, s.171 ja s.176).

Kaikki valuteräskappaleet lämpökäsitellään. Teräksen raerakenne on valun hitaasta jähmettymisestä johtuen karkea. Nuorrutusteräksistä valetut kappaleet nuorrutetaan. Nuorrutuksessa teräs kuummenetaan austeniittialueelle ja sen jälkeen jäähdytetään nopeasti

eli sammutetaan veteen, öljyyn tai ilmaan. Sammutuksen jälkeen teräs on päästettävä eli kuummennettava uudelleen noin 500 – 700 ºC:een (Metallinjalostajat ry 2000, s.46-47 ja s.60). Nuorrutuksen periaate on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Havainnekuva nuorrutuksesta (Metallinjalostajat ry 2000, s.47).

Nuorrutuksen avulla teräkseen saadaan luja ja sitkeä päästömartensiittinen mikrorakenne. Nuorrutusteräkset sopivat hyvin käyttökohteisiin, joissa vaaditaan hyvää staattista lujuutta, väsymislujuutta ja sitkeyttä (MET 1 2001, s.112).

2.1 Tutkittavien valuteräksien seosaineet

Valuteräkset koostuvat eri seosaineista, jotka vaikuttavat materiaalin ominaisuuksiin ja käyttäytymiseen hitsattaessa. Taulukossa 1 on kuvattuna eri seosaineiden vaikutuksia teräksen ominaisuuksiin.

Taulukko 1. Yleisempien teräksissä käytettävien seosaineiden vaikutus teräksien ominaisuuksiin (Lepola, Ylikangas 2016, s.212).

Seosaine	Lujuus	Sitkeys	Kuumalujuus virumislujuus	Hitsattavuus
Hiili (C)	+	-	+	-

Taulukko 1. Yleisempien teräksissä käytettävien seosaineiden vaikutus teräksien ominaisuuksiin (Lepola, Ylikangas 2016, s.212).

Seosaine	Lujuus	Sitkeys	Kuumalujuus virumislujuus	Hitsattavuus
Kromi (Cr)	+	-	+	-
Mangaani (Mn)	+	+	+/-	+
Molybdeeni (Mo)	+	-	+	-
Pii (Si)	+	-	+	+
Rikki (S)	-	-	-	-
Nikkeli (Ni)	+	+	+	+

Hitsaus on yleisin tapa liittää teräksiä toisiinsa. Hitsausmenetelmiä on useita erilaisia. Sulahitsausmenetelmä on metallurginen tapahtuma, jossa terästä sulatetaan, seostetaan, jähmetetään ja lämpökäsitellään. Yleensä teräksen hitsaus vaikeutuu mitä lujempaa teräs on ja mitä suurempia hiilen ja muiden seosaineiden pitoisuudet ovat (Ovako 2012, s.3).

Hiili on tärkein teräksen aineosa. Hiilipitoisuuden kasvaessa teräksen lujuus ja kovuus nousee kaikissa lämpökäsittelytiloissa esimerkiksi nuortutettuna, mutta venymä ja kurouma pienenevät. Hiili vaikuttaa erityisesti martensiitin kovuuteen terästä karkaistaessa, mutta hiilen vaikutus karkenemissyvyyteen on pienehkö. Tämän vuoksi nuorrutettaviksi soveltuviin keskihiilisiin teräksiin lisätään seosaineita karkenemissyvyyden kasvattamiseksi ja samalla hiilipitoisuutta rajoitetaan. Terästen hitsattavuus määräytyy muun muassa hiilipitoisuudesta. Hiilipitoisuuden kasvaessa hitsaaminen vaikeutuu, koska esilämmityksen eli korotetun työlämpötilan käyttö tulee tarpeelliseksi (Autere E., Ingman Y., Tennilä P. 1982 s. 277).

Kaikki teräkset sisältävät mangaania. Sen pitoisuus määrittelee, onko se oheis-, vai seosaine. Sitä pidetään seosaineena, jos sen pitoisuus on yli 1,0 %. Muuten se on oheisaine. Raja-arvot oheis-, ja seosaineen välillä vaihtelevat eri standardeissa. Oheisaineena mangaanin tehtävänä on sitoa happea ja rikkiä teräksestä. Täysin tiivistettyä terästä ei saada aikaan pelkästään mangaanin avulla, vaan sen vaikutusta on parannettava piillä ja usein myös alumiinilla. Seosaineena mangaani lisää teräksen lujuutta pienentämättä mainittavasti sitkeyttä. Mangaania lisäämällä voidaan hiilen osuutta pitää pienempänä ja näin parantaa

teräksen hitsattavuutta. Mangaaniseosteisilla nuorrutusteräksillä on voimakas taipumus päästöhaurauteen. Päästöhauraus tarkoittaa teräksen sitkeyden huonontumista päästön jälkeen tapahtuvassa hitaassa jäähdytyksessä (Autere E., Ingman Y., Tennilä P. 1982, s.278).

Kromia pidetään teräksen seosaineena sen pitoisuuden ylittäessä 0,25 %. Lähes kaikki valuteräkset sisältävät pieniä määriä kromia epäpuhtautena. Kromi lisää voimakkaasti teräksen karkenevuutta ja tätä käytetään hyödyksi nuorrutusteräksissä. Niissä kromi on yleisin seosaine. Ainoastaan kromilla seostetut nuorrutusteräkset ovat taipuvaisia päästöhaurauteen samalla tavalla kuin mangaaniseosteisetkin. Tämän vuoksi 0,2 – 0,3 % molybdeeniä sisältävät kromimolybdeeniteräkset ovat käytössä yleisempiä (Autere E., Ingman Y., Tennilä P. 1982, s.279-280).

Molybdeeni on teräksen seosaine pitoisuuden ollessa yli 0,1 %. Se lisää teräksen karkenevuutta lähes yhtä voimakkaasti kuin mangaani. Tosin sitä käytetään harvoin vain tämän ominaisuuden vuoksi seosaineena, koska se on erittäin kallista. Molybdeenin suurin hyöty seosaineena on parantaa teräksen päästönkestävyyttä ja poistaa päästöhauraus nuorrutusteräksistä (Autere E., Ingman Y., Tennilä P. 1982, s.280).

Teräkset sisältävät aina muitakin oheisaineita hiilen lisäksi. Niitä ovat esimerkiksi mangaani, pii, alumiini, fosfori ja rikki. Mangaani ja pii ovat hyödyllisiä oheisaineita, joita lisätään vielä teräksen valmistuksen yhteydessä, samoin alumiiniakin. Sen sijaan fosfori ja rikki ovat teräksessä haitallisia oheisaineita, jotka pyritään poistamaan teräksistä tai sitomaan vaarattomaan muotoon. Valuterästen mangaani ja piipitoisuudet ovat jonkin verran suuremmat kuin vastaavien muovattavien terästen, koska silloin voidaan varmistua riittävän hapen sidonnasta (Autere E., Ingman Y., Tennilä P. 1982, s.275-276).

2.2 G26CrMo4 QT2

Tutkittavassa hitausliitoksessa nykyisin käytössä oleva valuteräs on G26CrMo4 QT2. Valuteräksen G26CrMo4 seosaineina ovat hiili, kromi ja molybdeeni. Hiilipitoisuuden mukaan jaoteltuna se asettuu niukka-, ja keskiihiilisten terästen välimaastoon. Tarkemmat seos-, ja oheisainepitoisuudet sekä materiaalin mekaaniset ominaisuudet tulevat ilmi taulukosta 2.

Taulukko 2. Kemiallinen koostumus G26CrMo4 (sulatusanalyysi) (paino-%) ja mekaaniset ominaisuudet G26CrMo4 QT2 (SFS-EN 10293 2015, s.12 ja s. 18).

Teräksen nimike	Numero-tunnus	C min.-max.	Si max.	Mn min.-max.	P max.	S max.	Cr min.-max.	Mo min.-max.
G26CrMo4	1.7221	0,22-0,29	0,60	0,50-0,80	0,025	0,020	0,8-1,2	0,15-0,30

Vetokoe huoneenlämpötilassa			Iskukoe	
$R_{p0,2}$ [MPa] min.	R_m [MPa]	A [%] min.	KV [J] min.	Lämpötila [°C]
550	700…850	10	18	Huoneenlämpötila

G26CrMo4 vaatii hitsattaessa korotetun työlämpötilan. Suositeltu korotettu työlämpötila on 150 – 300 ºC astetta. Suurin suositeltu välipalkon lämpötila standardin 10293 mukaan on 350 ºC. Jos G26CrMo4 valuteräkselle halutaan tehdä jälkilämpökäsittelyä hitsauksen jälkeen, on lämpötilan oltava vähintään 20 ºC mutta enintään 50 ºC päästölämpötilan alapuolella. G26CrMo4 päästölämpötila QT2 – luokassa on 550-600 ºC (SFS-EN 10293, s.18, s.28 ja s.30).

2.3 G24Mn6 QT2

Toinen tutkittava valuteräs on G24Mn6. Sen seosaineina ovat hiili sekä mangaani. Hiilipitoisuuden mukaan kyseinen valuteräs luokitellaan niukkahiiliseksi teräkseksi. Tarkemmat seos-, ja oheisainepitoisuudet sekä materiaalin mekaaniset ominaisuudet ovat esitetty taulukossa 3.

Tämä valuteräs ei vaadi korotetun työlämpötilan käyttöä hitsatessa. Korotettu työlämpötila voidaan suorittaa 150 ºC, mikäli hitsattavien kappaleiden suuri koko sitä vaatii. Välipalkon maksimi lämpötilaksi suositellaan 350 ºC. G24Mn6 päästölämpötila QT2-luokassa on 600-650 ºC. Mikäli halutaan tehdä jälkilämpökäsittelyä hitsauksen jälkeen, on lämpötilan oltava vähintään 20 ºC mutta enintään 50 ºC päästölämpötilan alapuolella (SFS-EN 10293, s.16, s.28 ja s.30).

Taulukko 3. Kemiallinen koostumus G24Mn6 (sulatusanalyysi) (paino-%) ja mekaaniset ominaisuudet G24Mn6 QT2 (SFS-EN 10293 2015, s.12 ja s. 16).

Teräksen nimike	Numero-tunnus	C min.-max.	Si max.	Mn min.-max.	P max.	S max.
G24Mn6	1.1118	0,20-0,25	0,60	1,50-1,80	0,020	0,015

Vetokoe huoneenlämpötilassa			Iskukoe	
$R_{p0,2}$ [MPa] min.	R_m [MPa]	A [%] min.	KV [J] min.	Lämpötila [°C]
500	650…850	15	27	-30

2.4 S500MC

Termomekaanisesti valssatuissa teräksissä on hyödynetty kontrolloitua valssausmenetelmää ja nopeutettua vesijäähdytystä. Termomekaaninen valssaus mahdollistaa lujien, sitkeiden ja entistä niukkaseosteisempien teräslevyjen valmistuksen. Niitä voidaan käyttää matalissakin lämpötiloissa hitsatuissa rakenteissa hyvän iskusitkeyden takia. Termomekaanisesti valssatut teräkset ovat hyvin hitsattavia alhaisen hiiliekvalentin ansiosta ja niitä voidaan hitsata kaikilla tavanomaisilla hitsausmenetelmilltä suuresta lujuudesta huolimatta. Korotettua työlämpötilaa ei yleensä tarvita. Termomekaanisesti valssattujen teräksien vetyhalkeilu- ja haurasmurtumariski sekä lamellirepeilyvaara ovat pienemmät kuin perinteisillä rakenneteräksillä Tämän lisäksi ne soveltuvat hyvin muovaukseen. (MET 1. 2001, s.75).

Tutkittavassa hitsausliitoksessa käytettävä teräslevy on S500MC. Kirjainlyhenteet tulevat standardin 10149-2 mukaan ja (M) tarkoittaa teräksen olevan kuumavalssattu ja (C) teräksen olevan kylmämuovattava. Tarkemmat tiedot materiaalin kemiallisesta koostumuksesta ja mekaanisista ominaisuuksista on kuvattu taulukossa 4.

Taulukko 4. S500MC termomekaanisesti valssatun teräksen kemiallinen koostumus, sulatusanalyysi ja teräksen mekaaniset ominaisuudet (SFS-EN 10149-2 2013, s.16 ja s. 18).

Teräslajin nimike	C % max.	Mn % max.	Si % max.	P % max	S % max.	Al kok. % min.	Nb % max.	V % max.	Ti % max.
S500MC Numerotunnus: 1.0984	0,12	1,70	0,50	0,025	0,015	0,015	0,09	0,20	0,15

Ylempi myötöraja R_{eh} vähintään [MPa], a)	Murtolujuus R_m [MPa], a)	Murtovenymä A vähintään [%] a), Nimellispaksuus ≥ 3mm
500	550-700	14

a) Vetokokeen vaatimusarvot ovat voimassa pitkittäisillä koesauvoilla.

Termomekaanisesti valssattujen teräksien valmistusmenetelmästä johtuen lämpökäsittelyssä pitäisi välttää yli 700 ºC lämpötilaa, ettei teräksen mekaaniset ominaisuudet huononisi. Väärin tehdystä lämpökäsittelystä johtuvaa lujuuden laskua ei voida korjata jälkikäteen esimerkiksi karkaisulla. Hitsauksen aikana lämpötila nousee yli 700 ºC hitsausliitoksen läheisyydessä (MET 1 2001, s.76 ja s.95).

Hitsaus synnyttää pehmeän vyöhykkeen HAZ-alueelle, missä materiaalin lujuus ja venymä kapasiteetti heikkenee. Mutta constraint-efekti vastustaa lujuuden pienentymisen ilmenemistä hitsausliitoksessa. Constraint-efektin suuruuteen vaikuttaa HAZ-alueen leveys. Mitä kapeampi HAZ-alue on, sitä vahvempi constraint-efekti on. Pehmeältä HAZ-aluetta ei voida välttyä kokonaan (Amraei, M., Skriko, T., Björk, T., Zhao, X. 2016, s.228 ja s.240). Hitsauksen lämmöntuonnilla ja jäähtymisnopeudella on vaikutusta pehmeän vyöhykkeen leveyteen. Kun pehmenneen vyöhykkeen leveys ja teräslevyn paksuuden suhde ylittää kriittisen rajan, HAZ-alueesta tulee liitoksen heikoin kohta lujuuden kannalta ja hitsausliitos murtuu HAZ-alueelta pehmenneen vyöhykkeen kohdalta (Björk, T., Toivonen, J., Nykänen, T. 2012, s.81).

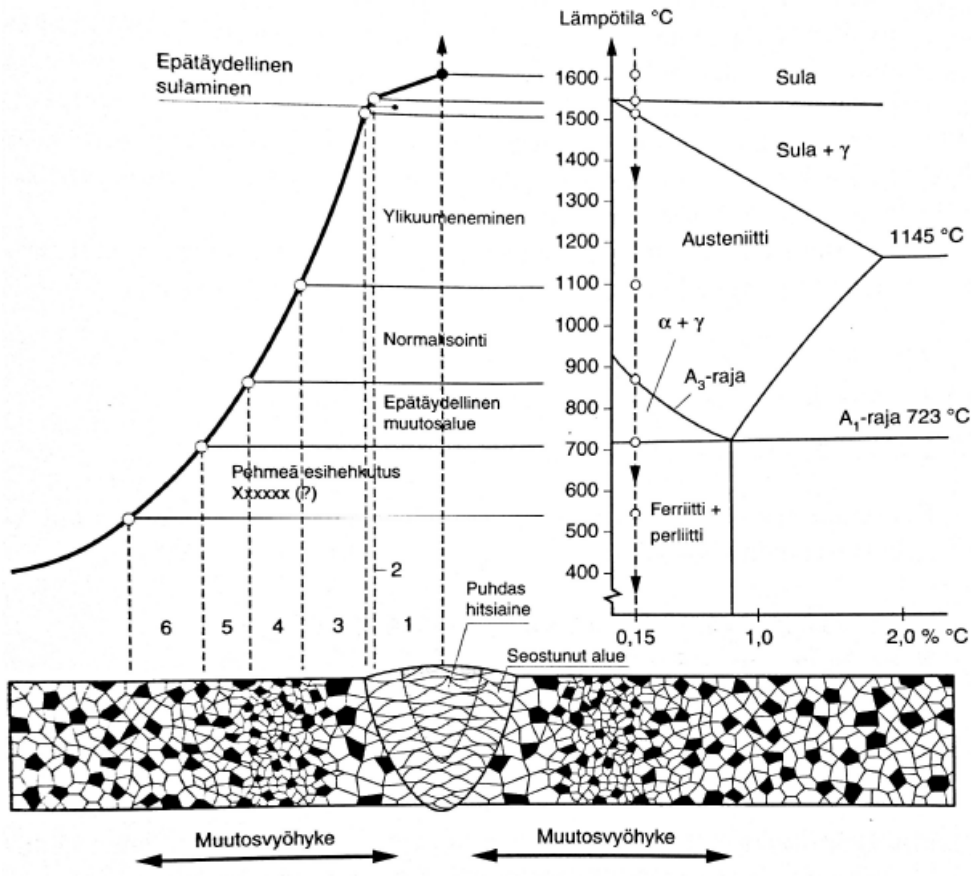
2.5 Hitsin muutosvyöhykkeen eri alueet

Hitsi syntyy hitsauksen seurauksena. Hitsauksen lämmöntuonnissa osa materiaalista sulaa ja osa kuumenee korkeisiin lämpötiloihin. Lisäaine ja sulanut perusaine yhdessä jäähtyessään

muodostavat hitsiaineen. Perusaineeseen syntyy hitsauksen seurauksena lämpövyöhyke ja muutosvyöhyke, jonka mikrorakenteet määräytyvät teräksen koostumuksesta ja jäähtymisnopeudesta. Muutosvyöhykkeestä käytetään myös englanninkiellistä lyhennettä (HAZ) heat-affected zone suomenkielisissä teksteissä. Lämpövyöhykkeeksi kutsutaan koko aluetta, jossa lämpötila on käynyt työlämpötilaa korkeammassa lämpötilassa (Ovako 2012, s.4-5).

Muutosvyöhykkeen eri alueita on kuvattu kuvassa 2 esimerkin avulla. Hitsauksen lämmöntuonti synnyttää kiderakenteeltaan erilaisia alueita muutosvyöhykkeelle:

1. Hitsiaine, joka on puhdasta lisäainetta sekä lisäaineen ja perusaineen seosta.
2. Sulatunkeumaraja, jossa perusaine on osittain sulanut.
3. Karkearakeinen vyöhyke. Tällä alueella austeniitin raekoko on kasvanut korkean lämpötilan takia. Teräksen jäähtyessä tälle alueelle syntyy suuren raekoon takia haurasta mikrorakenetta yläbainiittia. Jos jäähtymisnopeus on riittävän suuri, myös martensiittia muodostuu tälle alueelle.



Kuva 2. Hitsausliitoksen vyöhykkeet teräksessä, jonka hiilipitoisuus on 0,15 %. Raekoko on esitetty kuvassa huomattavasti suurempana (Lepola P., Makkonen M. 1998, s.33).

4. Hienorakeinen vyöhyke. Kyseisellä alueella lämpötila on austenoitumisalueen alaosassa. Tämän seurauksena austenoituminen on tapahtunut ilman raekoon kasvua. Tämän alueen mikrorakenne on hienorakeinen ja pehmeä ferriittinen tai ferriitis-perliittinen. Iskusitkeysominaisuudet ovat paremmat kuin alkuperäisen perusaineen. Termomekaanisesti valssatuille teräksille syntyy tälle vyöhykkeelle perusainetta pehmeämpi vyöhyke.
5. Osittain austenoitunut vyöhyke. Austenoituminen tapahtuu lähinnä perliittisillä alueilla, joissa hiilipitoisuus on korkea. Tämä vyöhyke ei ole kriittinen, mutta nopea jäähtyminen korkahiilisillä alueilla voi muodostaa martensiittisiä rakenteita.
6. Karbidien palloutumisvyöhyke. Tämän vyöhykkeen ominaisuudet eivät juurikaan poikkea perusaineen alkuperäisistä ominaisuuksista.
   (Lepola P., Makkonen M. 1998, s.32-34.)

Hitausliitoksen ominaisuuksien kannalta kaikkein kriittisimmät alueet ovat sularaja ja karkearakeinen vyöhyke sekä hitsiaine suurella hitsausenergialla hitsatessa (Lepola P., Makkonen M. 1998, s.34).

2.6 Jäähtyminen ja sen kontrollointi hitsauksessa

Jäähtymisnopeutta kuvataan $T_{8/5}$ ajalla. Tämä kertoo, kuinka kauan aikaa kuluu siihen, että teräs jäähtyy 800 °C asteesta 500 °C asteeseen. Tänä aikana teräksessä tapahtuu tärkeimmät mikrorakennemuutokset muutosvyöhykkeellä, kun austeniitti hajaantuu eri mikrorakenteiksi. $T_{8/5}$ jäähtymisnopeuteen vaikuttavat seuraavat asiat:

- aineenpaksuus ja liitosmuoto
- hitsausenergia ja lämmöntuonti
- työlämpötila

$T_{8/5}$ jäähtymisnopeuden lisäksi hitsauksen seurauksena syntyneeseen muutosvyöhykkeen ominaisuuksiin vaikuttavat myös:

- karkenevuus
- mikrorakennemuutokset

Mitä paksumpaa ainetta hitsataan, sitä enemmän valokaaren ympärillä on massaa, johon lämpöä johtuu ja sitä suurempi on jäähtymisnopeus eli sitä pienempi $T_{8/5}$ jäähtymisaika on.

Liitosmuoto vaikuttaa siihen, kuinka moneen suuntaan lämpö voi johtua (Ovako 2012, s.5-6).

$T_{8/5}$ jäähtymisaikaa voidaan arvioida kaavojen 1 ja 2 perusteella. Kaavat 1 ja 2 ottavat huomioon liitoksen lämmönjohtumisen suunnat, yhdistetyn aineenpaksuuden d [mm] sekä liitoksen muodon liitosmuotokertoimilla F_2 ja F_3. Liitosmuotokertoimia on esitetty taulukossa 5. Seostamattomille ja niukkaseosteisille teräksille $T_{8/5}$ jäähtymisaika 3-dimensionaalisessa lämmönjohtumis tilanteessa lasketaan kaavalla 1:

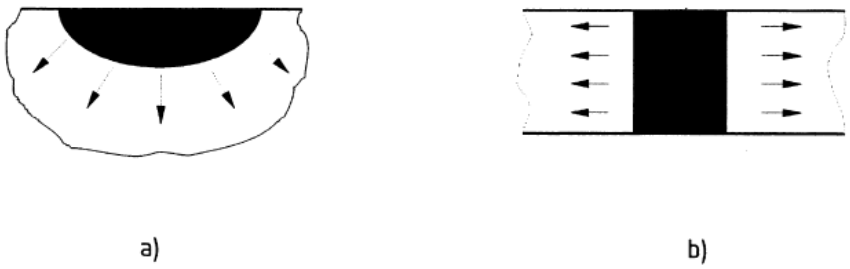
$$T_{8/5} = (6\,700 - 5 * T_0) * Q * \left(\frac{1}{(500-T0)} - \frac{1}{(800-T0)}\right) * F_3 \text{ [s]} \qquad (1)$$

2-dimensionaalisessa lämmönjohtumis tilanteessa $T_{8/5}$ jäähtymisaika lasketaan seuraavasti:

$$T_{8/5} = (4\,300 - 4{,}3 * T_0) * 10^5 * \frac{Q^2}{d^2} * \left[\left(\frac{1}{(500-T0)}\right)^2 - \left(\frac{1}{(800-T0)}\right)^2 \right] * F_2 \text{ [s]} \qquad (2)$$

Kaavoissa 1 ja 2 lämmöntuonti Q [kJ/mm] lasketaan kaavan 3 mukaisesti. T_0 on korotettu työlämpötila [ºC] (SFS-EN 1011-2 2001, s.78).

Kuva 3 havainnollistaa eri lämmönjohtumisen tilanteet. Kolmidimensionaalisessa jäähtymisessä aineenpaksuus ei vaikuta lämmönjohtumiseen. Kaksidimensionaalisessa lämmönjohtumisessa jäähtyminen on riippuvainen yhdistetystä aineenpaksuudesta ja se soveltuu suhteellisen ohuille levyn paksuuksille (SFS-EN 1011-2 2001, s.78-80).



Kuva 3. Havainnekuva lämmönjohtumisesta a) Kolmidimensionaalinen lämmönjohtuminen ja b) kaksidimensionaalinen lämmönjohtuminen (SFS-EN 1011-2 2001, s.84).

$T_{8/5}$ jäähtymisajan kaavoja voidaan käyttää kahdella eri tavalla. Yksinkertainen tapa on laskea kaavoilla 1 ja 2 $T_{8/5}$ jäähtymisajat molemmissa lämmönjohtumis tilanteissa ja valita se kaava käytettäväksi, mikä antaa suuremman $T_{8/5}$ jäähtymisajan. Laskukaavojen 1 ja 2 avulla voidaan määrittää tarkemmin yhdistetyn ainepaksuuden suuruuden, jolloin siirrytään käyttämään kolmidimensionaalista lämmönjohtumisen laskukaavaa kaksidimensionaalisen sijasta. Laskukaavat 1 ja 2 laitetaan yhtä suuriksi ja ratkaista syntyneestä yhtälöstä yhdistetty aineenpaksuus *d* (Vähäkainuu O. 2003, s.25).

Taulukko 5. Liitosmuotokertoimia eri hitsityypeille lämmönjohtumistilanteissa (SFS-EN 1011-2 2001, s.80) ja (Vähäkainuu O. 2003, s.27).

Hitsityyppi	Liitomuotokerroin F_2 2-dimensionaalinen lämmönjohtuminen	Liitomuotokerroin F_3 3-dimensionaalinen lämmönjohtuminen
Päällehitsi	1	1
Välipalot päittäishitsissä	0,9	0,9
V-hitsin juuripalko	noin 1,0	1,0-1,2

Hitsausenergia ja lämmöntuonti ovat eri asioita. Näitä ei saa sekoittaa keskenään. Lämmöntuonti lasketaan kertomalla hitsausenergia hitsausprosessin omalla termisellä hyötytysuhteella. Lämmöntuonti ottaa siis huomioon hitsausprosessissa tapahtuvat häviöt ja näin saadaan laskettua kappaleeseen vaikuttava todellinen lämmöntuonti (Hitsaustekniikka 2007, s.10). Standardin SFS-EN 1011-1 mukaan lämmötuonti lasketaan seuraavasti:

$$Q = k * \frac{U*I}{V} * 10^{-3} \text{ [kJ/mm]} \quad (3)$$

Tällöin hitsausenergia saadaan kaavasta jättämällä terminen hyötysuhde *k* huomioimatta:

$$E = \frac{U*I}{V} * 10^{-3} \text{ [kJ/mm]} \quad (4)$$

Eri hitsausprosesseille on olemassa eri termiset hyötysuhteet. Standardin mukaiset termiset hyötysuhteet ovat:

- Jauhekaarihitsaus 1,0

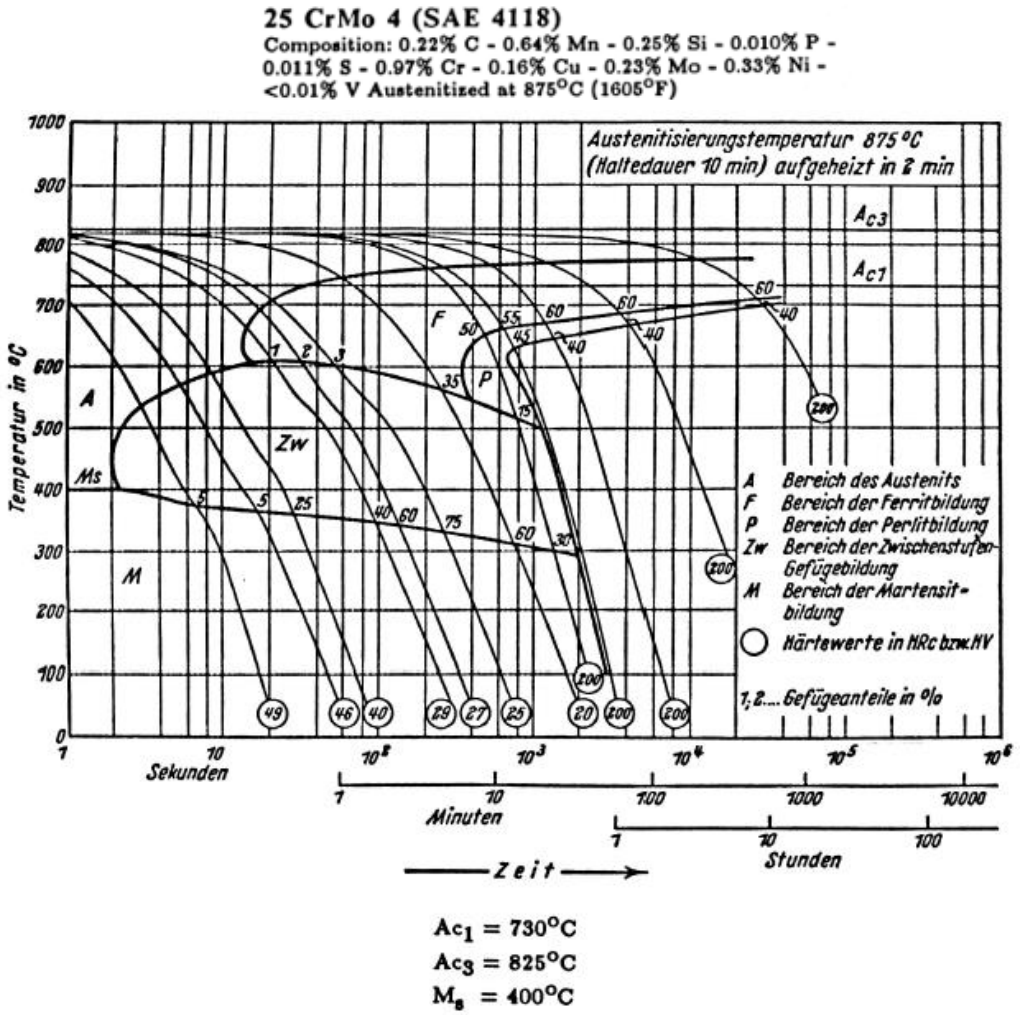
- Puikkohitsaus 0,8
- MIG/MAG-umpi-, ja täytelankahitsaus 0,8
- TIG-hitsaus 0,6

(SFS-EN 1011-1 2009, s.20).

Työlämpötilaa korotetaan välittömästi ennen hitsausta tai sen aikana tehtävällä kuumennuksella. Työlämpötilan korotuksen tarve lisääntyy, kun teräksen paksuus, hiiliekvivalentti tai kovuus kasvavat. Sopivan lämmöntuonnin ja korotetun työlämpötilan avulla saadaan hitsausliitos jäähtymään halutulla nopeudella ja saadaan haluttu mikrorakenne esimerkiksi kovuuden ja lujuuden suhteen. Monipalkohitsauksessa edellisen palkon hitsauksen lämmöntuonti saattaa riittää pitämään vaaditun työlämpötilan eikä ulkopuolista kuummennusta hitsauksen välissä tarvita. Monipalkohitsauksessa suositellaan palkojen väliseksi vähimmäislämpötilaksi korotettua työlämpötilaa (Hitsaustekniikka 2011, s.10-11).

Hitsauksen seurauksena syntyvää mikrorakennetta voidaan arvioida jatkuvan jäähtymisen S-käyristä. Näitä käyriä- kutsutaan CCT-käyriksi (Continuous-Cooling-Transformation). Ne kuvaavat, kuinka austeniitti hajaantuu muiksi faaseiksi ajan funktiona. Syntyneen mikrorakenteen arviointiin tarvitaan tietää kappaleen jäähtymisnopeus (MET 1 2001, s.144 ja s.147).

Kuvassa 4 on esitelty G25CrMo4 valuteräksen CCT-käyrästöä. Tämän valuteräksen kemiallinen koostumus eroaa hieman hiilen osalta G26CrMo4 valuteräksestä, mutta hiilipitoisuus mahtuu standardin SFS-EN 10293 sallittuun vaihtelu väliin, joten G26CrMo4 valuteräksen mikrorakenteen syntyä voidaan tarkastella G25CrMo4-valuteräksen CCT-käyrästöstä.



Kuva 4. G25CrMo4 valuteräksen CCT-käyrät (Vander Voort G. F. 1991, s.138).

CCT-käyrässä A on alue, jossa teräs on austeniittista. F-alueella austeniitti muuttuu ferriitiksi. P-alueella austeniitista tulee perliittiä, kun taas M-alueella austeniitti muuttuu martensiitiksi. Z_w-alueella vuorostaan tapahtuu bainiitin syntyä. Pyöreässä pallossa olevat arvot ovat kovuuden HV-arvoina eri jäähtymisajoilla.

2.6.1 Teräksen karkenevuus ja sen arviointi

Muutosvyöhykkeen mikrorakenteet ovat riippuvaisia teräksen karkenevuudesta ja jäähtymisolosuhteista. Teräksen karkenevuudella tarkoitetaan sen taipumusta muuttua martensiitiksi jäähtyessään. Teräksen karkenevuus määräytyy olennaisesti sen kemiallisesta koostumuksesta (Ovako 2012, s.5 ja s.8). Valuteräksille G26CrMo4 ja G24Mn6 sekä teräslevylle S500MC lasketaan hiiliekvivalentti (CEV), jonka avulla voidaan arvioida

materiaalin karkenevuutta hitsauksen seurauksena. Mitä pienempi kyseinen arvo on, sen paremmin materiaali soveltuu hitsaukseen.

Hiiliekvivalentti CEV ottaa huomioon seosaineiden vaikutuksen. Teräksen hitsattavuus katsotaan hyväksi, jos CEV on alle 0,41. Hiiliekvivalentti lasketaan seuraavasti (Lepola, Ylikangas 2016, s.210):

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

Seosaineiden määrä ilmoitetaan yhtälössä 5 massaprosentteina. CEV-arvot ovat suuntaa-antavia eivätkä ne kerro yksinään hitsattavuudesta, sillä hitsattavuus määräytyy myös perusaineen paksuudesta (Ovako 2012, s.8).

”Teräksen seosaineena oleva hiili lisää taipumusta karkenemiseen. Martensiitti on sitä hauraampaa, mitä suurempi on hiilipitoisuus. Myös muut seosaineet korottavat taipumusta karkenemiseen, koska ne pienentävät teräksen kriittistä jäähtymisnopeutta ja edistävät martensiitin muodostumista ”, (Lepola, Ylikangas 2016, s.210).

Valuteräksien G26CrMo4 ja G26CrMo4 seosaineiden prosentuaaliset määrät tulevat ilmi taulukoista 2 ja 3. Taulukoiden arvojen ja yhtälön 5 avulla pystymme laskemaan valuteräksille suurimman CEV arvon. Tämän lisäksi valuteräksistä on otettu alkuaineanalyysi ja sen avulla voidaan laskea todellinen CEV-arvo Liite 1 ja 2. Alkuaine näytteenoton arvoista on otettu huomioon standardin määritelmän aineiden koostumukset taulukoiden 2 ja 3 perusteella. S500MC teräksen CEV-arvot perustuvat terästoimittajan SSAB:n tuotetietoihin. Saadut CEV-arvot on esitelty taulukossa 6.

Taulukko 6. Suurin ja mitatatut CEV-arvot tutkittaville materiaaleille.

Materiaali	CEV-arvo	
	max.	yleinen
S500MC	0,44	0,30 tyypillinen
G26CrMo4	0,72	0,63 mitattu
G24Mn6	0,55	0,45 mitattu

Laskemalla CEV-arvon pystytään arvioimaan eri materiaalin karkenevuutta ja sitä kautta tutkittavien valuteräksien hitsattavuutta.

2.7 Hitsattavuus ja hitsausvauriot

Hyvälle hitsattavuudelle on useita määritelmiä. Yhden määritelmän mukaan: ”Hitsattavuus on sitä parempi, mitä vapaammin hitsausmenetelmä voidaan valita ja mitä vähemmän esivalmistelua ennen hitsausta joudutaan tekemään sekä jälkikäsittelyä hitsauksen jälkeen”, (Lepola P., Makkonen M. 1998, s.37). Tämän määritelmän perusteella G26CrMo4-valuteräs hitsattavuus on huonompi kuin G24Mn6-valuteräksen, koska lähtökohtaisesti G26CrMo4-valuteräs vaatisi korotetun työlämpötilan ja G24Mn6-valuteräs ei tarvitse korotettua työlämpötilaa.

”Kylmähalkeamiksi luetaan vety-, lovi-, karkenemis- ja sularajahalkeamat. Kylmähalkeamien osuus voi olla jopa yli 90 % kaikista lujien terästen hitsien vaurioista”, (MET 1. 2001, s.88). Tämän takia hitsausliitoksessa on hyvä tarkastella sen taipumusta kylmähalkeiluun. Lovitekijällä tarkoitetaan hitsin railomuotoja.

Kylmähalkeamien vaara on olemassa, kun vety on läsnä muutosvyöhykkeessä, liitoksessa on hauras martensiittinen mikrorakenne ja vetojännitystilan vaikuttaessa samanaikaisesti. Mikäli vetypitoisuus on hyvin pieni, voidaan hitsille hyväksyä enimmäiskovuudeksi 450 HV. Hitsausprosessilla on vaikutusta vetypitoisuuteen. Kaikkein parhaimman suojan vetyä vastaan antaa kaasukaarihitsausprosessit MIG-, ja MAG-hitsaus (MET 1. 2001, s.88-89). Syitä teräksen karkenemiseen ja vertailua tutkittavien materiaalien kesken on esitelty kappaleessa 2.6.1.

3 TUTKIMUSMETODIT

Tässä opinnäytetyössä on tutkittu hitsausliitosta kirjallisuuden ja laboratoriokokeiden avulla. Hitsausliitoksen lujuuteen vaikuttavia asioita on selvitetty kirjallisuuden avulla ja tämän jälkeen on tehty laboratoriokokeita, joilla saadaan todellisia arvoja hitsausliitoksen kovuudesta ja lujuudesta. Teorian perusteella tehdään hypoteesi ja tämän jälkeen katsotaan, ovatko laboratoriokokeet linjassa teorian kanssa ja pohditaan mahdollisia eroja tuloksien välillä. Näin saadaan selville valuteräksien vaikutus tutkittavan hitsausliitoksen lujuuteen.

3.1 Hypoteesi

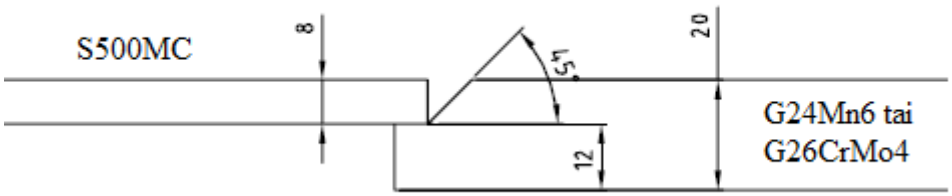
Taulukon 6 arvojen perusteella G26CrMo4 valuteräs karkenee herkemmin kuin G24Mn6 valuteräs vertailtaessa CEV-arvoja. Näin ollen G24Mn6 on soveltuvampi hitsaamisen kannalta kuin G26CrMo4. Tämän lisäksi G26CrMo4 vaatisi korotetun työlämpötilan. Vetokokeen murtuman sijanniksi voisi olettaa teräslevyn S500MC puoli, koska sen murtolujuusarvo on pienin tutkittavien materiaalien arvoista.

3.2 Laboratoriokokeet ja mittausjärjestelyt

Hitsausliitosta tutkitaan vetokokeen ja kovuusmittauksien avulla. Tämän lisäksi hitsausliitoksesta otetaan makrokuvia, jotta nähdään raerajat. Kovuusmittauksena käytetään Vickers HV5-menetelmää. Kovuusmittauksien avulla voidaan arvioida hitsausliitoksen sitkeyttä ja sen taipumusta kylmähalkeamiseen. Vetokokeen avulla selvitetään liitoksen staattinen lujuus ja muodonmuutoskyky. Vetokokeen aikana hyödynnetään Aramis-laitteistoa (DIC) -mittausta. DIC tulee englanninkielen sanoista Digital Image Correlation. Tämän avulla tutkitaan murtuman kehittymistä hitsausliitoksessa.

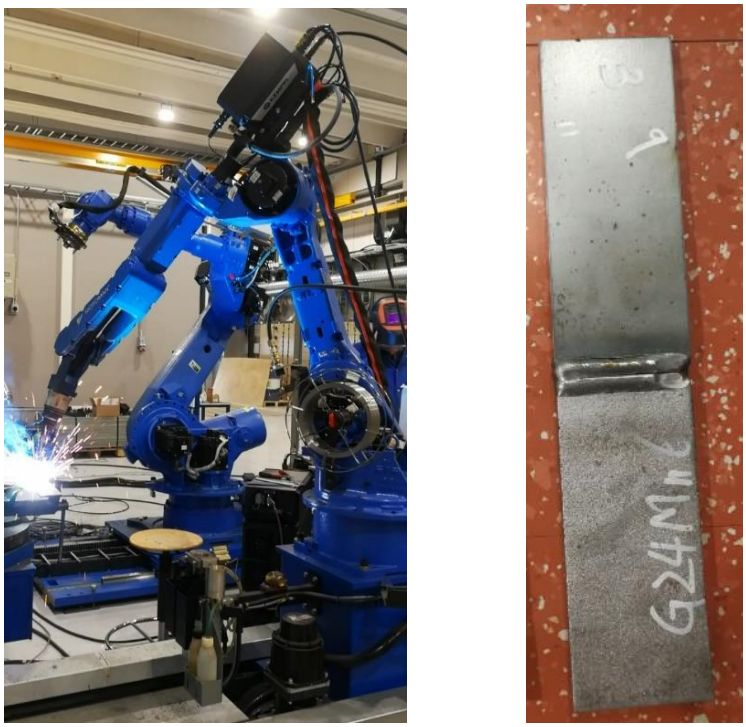
3.2.1 Koekappaleiden esivalmistelu

Koekappaleet on hitsattu kuvan 5 paikoituksen mukaan. Valuteräksessä on 45 º viiste ja juurituki, jonka päälle S500MC teräslevy asetetaan. Näin hitsattavasta railosta muodostuu puolittainen V-railo. Koekappaleita valmistetaan yhteensä kuusi kappaletta siten, että kolme kappaletta on valmistettu G24Mn6-valuteräksellä ja kolme kappaletta G26CrMo4-valuteräksellä.



Kuva 5. Paikoitus hitsauksessa

Koekappaleen hitsausrailon pituus on 80 mm. Kuvasta 6 voi nähdä, että hitsauksen aloituksessa ja lopetuksessa hitsi ei ole tasalaatuista. Riittävän pitkän railon avulla varmistetaan hitsauksen aloituksesta ja lopetuksesta syntyneiden epäkohtien poistaminen. Näin saadaan tutkittua tasalaatuista hitsausliitosta ilman hitsausvirheitä, kun tehdään kokeita.



Kuva 6. Koekappaleiden hitsausta robotilla ja hitsattu koekappale numero 3

Koekappaleiden esivalmistelussa on kiinnitetty huomiota niiden yhtenäisyyteen. Näin voidaan tehdä vertailua tutkittavien materiaalien kesken, koska koekappaleet ovat valmistettu samalla tavalla. Koekappaleet ovat hitsattu hitsausrobottilla, jolloin voidaan varmistua hitsauksen toistettavuus koekappaleiden välillä, kuva 6.

Robotin avulla voidaan varmistua hitsausnopeuden pysyvän vakiona. Kuljetusnopeus on yksi vaikuttava asia lämmöntuonnissa kaavan 3 mukaisesti. Käsinhitsauksessa on riski, että kuljetusnopeus vaihtelee hitsauksen aikana, jolloin myös lämmöntuonti muuttuisi hitsin eri kohdissa. Lämmöntuonti on yksi kolmesta tekijästä, jotka vaikuttavat jäähtymisnopeuteen. Jäähtymisnopeus on tärkein tekijä hitsausliitoksen lujuuden kannalta. Jäähtymisnopeutta on arvioitu käytettyjen hitsausparametrien perusteella taulukossa 7. Taulukossa 7 on myös esitetty todelliset $T_{8/5}$ jäähtymisajat, jotka ovat mitattu jokaisen hitsatun palon jälkeen lämpötila-anturilla.

Taulukko 7. Laskennalliset ja mitatut $T_{8/5}$ jäähtymisajat

	2-dimensionaalinen lämmönjohtuminen $T_{8/5}$ [s]	3-dimensionaalinen lämmönjohtuminen $T_{8/5}$ [s]	Mitattu $T_{8/5}$ [s]
1.palko	1,9	6,8	7,8
2.palko	1,1	4,5	5,9
3.palko	1,2	4,3	6,6

Taulukon 7 arvojen perusteella levynpaksuus ei vaikuta lämmönjohtumiseen ja kolmidimensionaalinen lämmönjohtumisen kaavalla saadaan laskettua $T_{8/5}$ jäähtymisajat.

Koekappaleiden hitsauksessa on käytetty taulukon 8 parametrejä. Taulukon arvot ovat keskiarvoja koekappaleiden hitsauksessa käytetyistä parametreistä. Lämpötilan on annettu laskea noin 65 ºC asteeseen ennen seuraavan palon hitsausta. Suojakaasuna on käytetty seoskaasua M21, jossa on Argonia (Ar) 80 % ja 20 % CO_2 virtauksen ollessa 15 l/min. Lisäaineena on käytetty 1,0 mm ESAB OK AristoRod 12.63 hitsauslankaa. Hitsauslangan mekaaniset ominaisuudet on esitelty liitteessä V. Lämmöntuonti on laskettu kaavalla 3 ja hitsausenergia kaavan 4 mukaisesti.

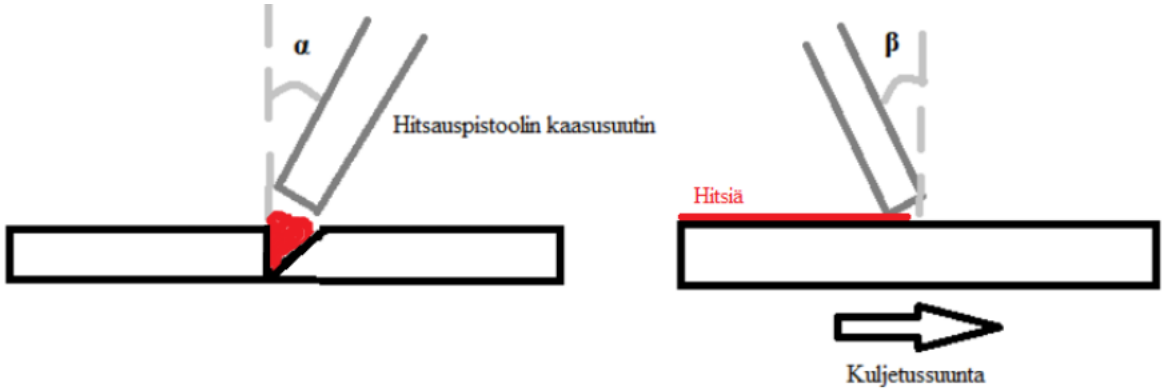
Taulukko 8. Hitsauksen parametrit

	1. palko	2. palko	3. palko
Jännite *U* [V]	28	28	28
Virta *I* [A]	262	220	218
Nopeus [mm/s]	5	6	7

Taulukko 8. Hitsauksen parametrit

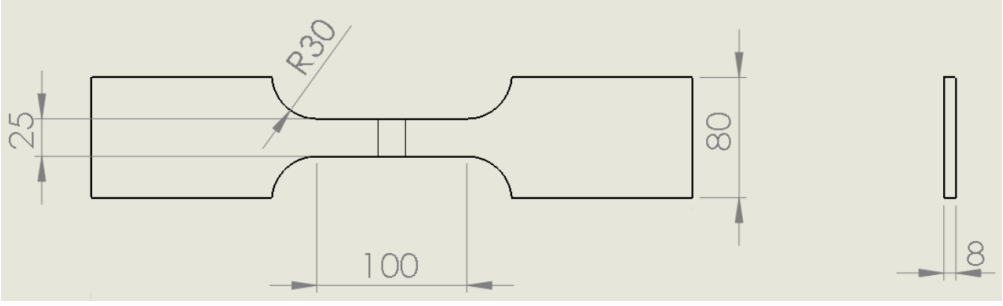
	1. palko	2. palko	3. palko
Lämmöntuonti *Q* [kJ/mm]	1,19	0,83	0,71
Hitsausenergia *E* [kJ/mm]	1,48	1,03	0,88
Langansyöttö nopeus [m/min]	12	11	11
Vapaalangan pituus [mm]	16	18	18

Kuvassa 7 on havainnollistettu hitsauspistoolin kuljetusasentoa. Hitsauspoltin on ollut ensimmäisessä palossa α = 26 º kallistettuna sivusuunnassa railokulmaan nähden. Ensimmäisessä palossa on työntävä kuljetus ja hitsauspistooli on kohtisuorassa kulma β = 0°. Toisessa ja kolmannessa palossa ei ole ollut sivusuunnassa kallistusta railokulmaan nähden α = 0º. Toisessa ja kolmannessa palossa on ollut työntävä kuljetus kallistettuna β = 10°.



Kuva 7. Hitsauspistoolin kuljestusasennot

Neljä koekappaletta on koneistettu vetokoesauvoiksi kuvan 8 mittoihin. Vetokoesauvoja pn tehty kaksi kappaletta G24Mn6 valuteräksellä ja kaksi kappaletta G26CrMo4 valuteräksellä tehtynä.



Kuva 8. Vetokoesauvan mitat

Vetokoesauvan mitat ovat standardin 4136 mukaiset. Vetokoesauvat on koneistettu samaan paksuuteen koko matkalta. Koesauvan kokonaispituus on noin 400 mm. Hitsi sijaitsee keskellä 100 mm koepituutta. Kuvassa 9 on valmiita vetokoesauvoja koneistuksen jälkeen.

Kuva 9. Valmiita vetokoesauvoja koneistuksen jälkeen

Taulukossa 9 on esitelty koesauvojen mitat koneistuksen jälkeen ja laskettu poikkipinta-ala A_0 koepituuden osalta.

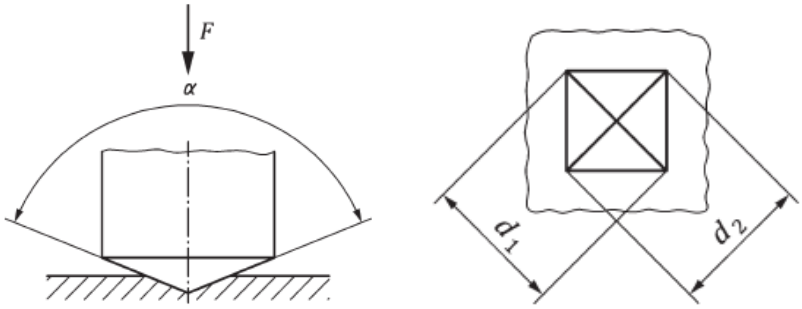
Taulukko 9. Koekappaleet ja koesauvojen mitat.

Koekappale	Käytetty valuteräs	Mitattu paksuus uuman keskeltä [mm]	Mitattu leveys uuman keskeltä [mm]	Poikkipinta-ala A_0 [mm^2]
3	G24Mn6	-	-	-
4	G26CrMo4	-	-	-
5	G24Mn6	7,8	25,0	195
6	G26CrMo4	7,9	25,0	197,5
7	G24Mn6	7,8	25,0	195
8	G26CrMo4	7,9	25,0	197,5

Kaksi tehtyä koekappaletta 3 ja 4 on käytetty kovuusmittauksiin.

3.2.2 Kovuuskoe HV5 ja makrokuvat

Kovuuskokeena on käytetty Vickersin HV5-kovuuskoemenetelmää. Vickers kovuuskokeessa kovuus määritetään painamalla neliöpohjaisella säännöllisellä timanttipyramidin muotoisella kärjellä voimalla F tutkittavaa materiaalia kuvan 10 mukaisesti.



Kuva 10. Periaatekuva Vickers kovuuskokeesta ja mittaustavasta (SFS-EN 6507-1. 2018, s.7).

Pyramidin sivujen välinen kulma α on 136 º. HV5 mittauksessa painauma tehdään 5 kg painolla. Kärjen annetaan olla painautuneen materiaaliin tietyn vakioajan. Tämän jälkeen laitteisto mittaa syntyneen painauman lävistäjät ja laskee Vickers-kovuuden painauman kohdalle (SFS-EN 6507-1. 2018, s.6-8). Kuvassa 11 näkyy käynnissä oleva kovuusmittaus ja mittauksissa käytetty laitteisto.

Kuva 11. Vickers HV5 kovuuskoe käynnissä.

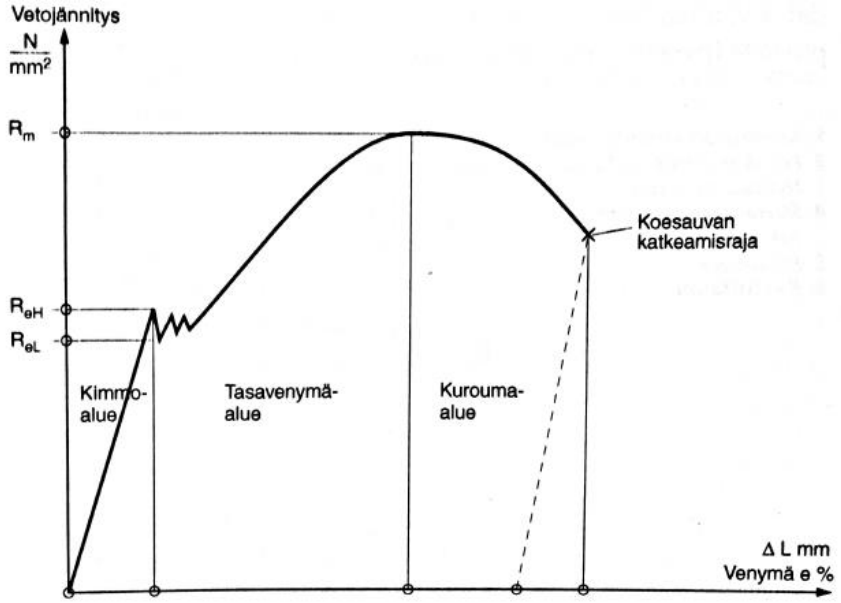
Kovuuskokeen koepalat hitsin alueelta on leikattu mekaanisesti mittauslaitteelle sopivan kokoisiksi ja koepalojen pinta on hiottu varovasti sileäksi. Näin on vältetty ylimääräistä lämmöntuontia kappaleeseen, mikä voisi vaikuttaa kovuuteen. Tämän jälkeen koepalat ovat puhdistettu huolellisesti, jotta saadaan raerajat näkyviin makrokuvissa.

”Testaus tulisi suorittaa niin, että sekä perusaineen että hitsiaineen suurin ja pienin kovuusarvo saadaan määritetyksi”, (SFS-EN 9015-1, 2011. s.10). Molemmille hitsausliitoksille suoritettiin neljä erillistä painaumariviä hitsin alueelle. Mitattavina alueina olivat hitsin pinta, juuri, keskiosa ja HAZ-alue valuteräksen puolella. Useammalla painaumarivillä saadaan määritettyä hitsausliitoksen kovuus eri kohdissa kattavasti. Koe suoritettiin huoneenlämmössä.

3.2.3 Vetokoe ja Aramis (DIC)

Vetokokeessa vetosauvaa vedetään tasaisesti kasvavalla voimalla ja samalla mitataan koesauvassa tapahtuvia mittamuutoksia eli venymistä. Koesauva kuormitetaan rikkoutumiseen asti. Näin saadaan koesauvalle tehtyä jännitys-venymä kuvaaja kuva 12.

Aluksi jännitys-venymä kuvaajassa ollaan kimmoalueella. Tällöin ei tapahdu pysyviä muodonmuutoksia vetosauvassa, jos kuormitus poistetaan vetosauva palautuu alkuperäiseen mittaansa. Kimmoalueen päättymisenrajaa kutsutaan ylemmäksi myötörajaksi R_{eH}. Vastaavasti alin kohta aaltokuviossa on alempi myötöraja R_{eL}. Myötörajalla *Re* oleva aaltokuvio johtuu vetokoesauvan osittaisten sisäisten jännitysten laukeamisesta. Kimmoisen alueen loputtua vetosauva alkaa myötää voiman kasvaessa ja vetokoesauva alkaa venyä. Tällöin tapahtuu plastista muodonmuutosta ja muodonmuutokset ovat pysyviä vetokoesauvassa (Lepola P., Makkonen M. 2007, s.45).



Kuva 12. Havainnekuva niukkaseosteisen teräksen jännitys-venymäpiirros (Lepola P., Makkonen M. 2007, s.46).

Kaikille metalleille ei esiinny selkeää myötörajaa ja jännitys-venymä kuvaaja vaihtelee eri materiaalien kesken. Tällöin lujuuslaskennassa hyödynnetään $R_{p0,2}$ venymärajaa. $R_{p0,2}$ venymärajan avulla ilmoitetaan vetojännityksen suuruus, jolloin vetokoesauvassa syntyy 0,2 %:n pysyvä venymä. Myötörajan jälkeen tulee tasavenymäalue, jossa vetokoesauvassa tapahtuu tasaista venymistä vetojännityksen kasvaessa. Tasavenymäalueen korkein kohta on murtoraja, jonka perusteella määritetään R_m vetomurtolujuus. Vetomurtolujuus lasketaan kaavan 6 mukaan:

$$R_m = \frac{Fmax}{A0} \qquad (6)$$

F_{max} on vetokokeen suurin voima [N] ja A_0 vetosauvan alkuperäinen poikkipinta-ala [mm^2]. Murtovenymä lasketaan kaavan 7 mukaisesti:

$$A = \frac{Lu - Lo}{Lo} \text{ x } 100\ \% \qquad (7)$$

L_u on katkenneen koesauvan pituus koealueelta millimetreissä ja L_o on alkuperäinen koepituus millimetreissä. Murtorajan jälkeen vetokoesauva jatkaa venymistä, mutta samalla se ohenee eli kuroutuu ja lopulta vetokoesauva katkeaa. Kuroutumisen aikana vetokoesauvan poikkipinta-ala pienenee kyseissä kohdassa (Lepola P., Makkonen M. 2007, s.45 ja s.47).

Metalli voi murtua kahdella tavalla, joko sitkeästi tai hauraasti. Sitkeässä murtumassa tapahtuu ennen murtumista plastinen muodonmuutos, tämän jälkeen venyminen ja lopuksi kuroutuminen. Haurasmurtumassa ei tapahdu mitään edellä mainituista (Autere E., Ingman Y., Tennilä P. 1982, s.291).

Vetokokeen avulla on selvitetty hitsausliitoksen staattinen lujuus ja kuinka hitsausliitos murtuu. Käyttäytyykö hitsausliitos sitkeästi vai murtuuko se hauraasti. Tekemällä vetokokeet molemmilla valuteräksillä on tutkittu valuterästen vaikutusta hitsausliitoksen lujuuteen. Vetokokeen aikana hyödynnettiin Aramis-kamerajärjestelmää ja DIC mittausta. Sen avulla seurattiin hitsausliitoksen käyttäytymistä vetokokeen aikana. Koekappaleeseen oli kiinnitetty hienovenymäanturi, joka mittaa venymää 80 mm pituudelta. Tämän lisäksi on kiinnitetty toinen anturi mittaamaan kiinnitysleukojen siirtymää vetokokeen aikana. Nämä on esitetty kuvassa 13.

Kuva 13. Vetokone ja Aramis-laitteisto. Hienovenymäanturi kiinnitettynä koekappaleeseen sekä siirtymäanturi oikeassa alakulmassa mittaamassa kiinnitysleuan siirtymää.

Aramis-laitteiston toiminta perustuu optiseen 3D-mittaukseen (DIC) ja se hyödyntää kahta kameraa. DIC-mittauksia voi tehdä 2D ja 3D-tasoissa Kamerat seuraavat mitattavan kappaleen pinnassa olevia mittauspisteitä ottamalla valokuvia ja seuraamalla niiden liikkeitä. Mittauspisteiden liikkeiden perusteella ohjelmisto pystyy laskemaan kappaleissa tapahtuvia muodonmuutoksia. DIC-mittauksen avulla voidaan mitata ilman kontaktia esimerkiksi kappaleen venymiä ja siirtymiä. DIC-mittausta voidaan hyödyntää laajasti eri insinöörialoilla muun muassa varmentaa FE-analyysien tuloksia, tehdä laaduntarkkailua ja materiaali-, sekä rakenneanalyyseja (Hohmann B., Bruck P., Esselman T., Schmidt T. s.1-3).

Aramis-laitteisto asennettiin viistosti vetokoesauvaan nähden noin 45 º kulmaan. Näin pystytään mittaamaan samanaikaisesti hitsin juuren puolen ja hitsin poikkipinta-alan käyttäytymistä vetokokeen aikana. Vetokoesauvoihin maalattiin laikukas kuvio mustalla ja harmaalla maalilla, jotta saadaan Aramis-laitteistolle hyvät kiinteät mittauspisteet.

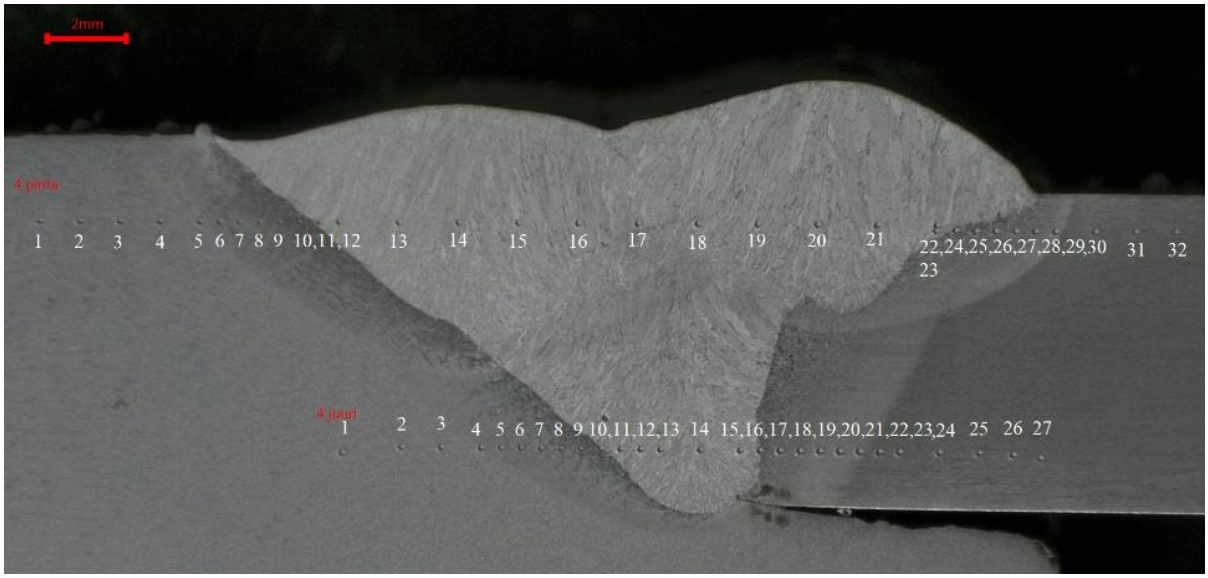
4 TULOKSET

Laboratoriokokeiden tulokset on esitelty tässä osiossa. Saadut HV 5 kovuuskokeiden tulokset koekappaleista 3 ja 4 on kuvattuina kappaleessa 4.1 ja vetokokeen tulokset koekappaleista 5,6,7 ja 8 kappaleessa 4.2.

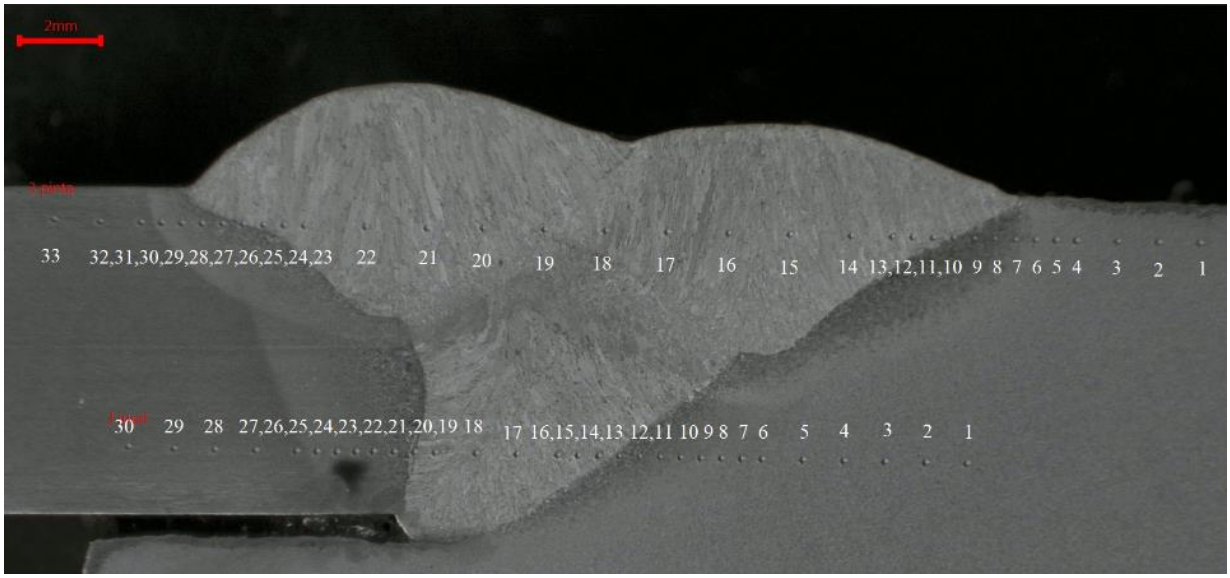
4.1 Kovuuskoe HV5

Kovuuskokeiden mittaukset on suoritettu painaumariveinä, joita on tehty jokaiseen koekappaleeseen neljä kappaletta hitsin eri kohtiin. Mitattavina alueina on ollut hitsin pinta, juuri ja keskiosa. Tämän lisäksi on tehty painaumarivi valuteräksen muutosvyöhykkeen puolelle karkearakeisen alueen läheisyydessä, koska kyseinen alue on yksi kriittisimmistä hitsausliitoksessa.

Mittaussuuntana hitsin juuren ja pinnan kovuuspisteissä on valuteräksestä teräslevyyn päin. On syytä ottaa huomioon, että koekappaleiden makrokuvat ovat peilikuvina toisiinsa nähden. Mittapisteiden väliset etäisyydet on esitetty liitteessä III ja mittauspisteiden kovuuden arvot liitteessä IV. Painaumapisteitä on otettu tiiviimmin kiinnostavimmilla alueilla kuten sularajan ja muutosvyöhykkeen alueilla. Lyhyin mitattava väli on ollut 0,5 mm. Kuvissa 14 ja 15 on esitetty hitsin pinnan ja juuren kovuuspisteet makrokuvissa.

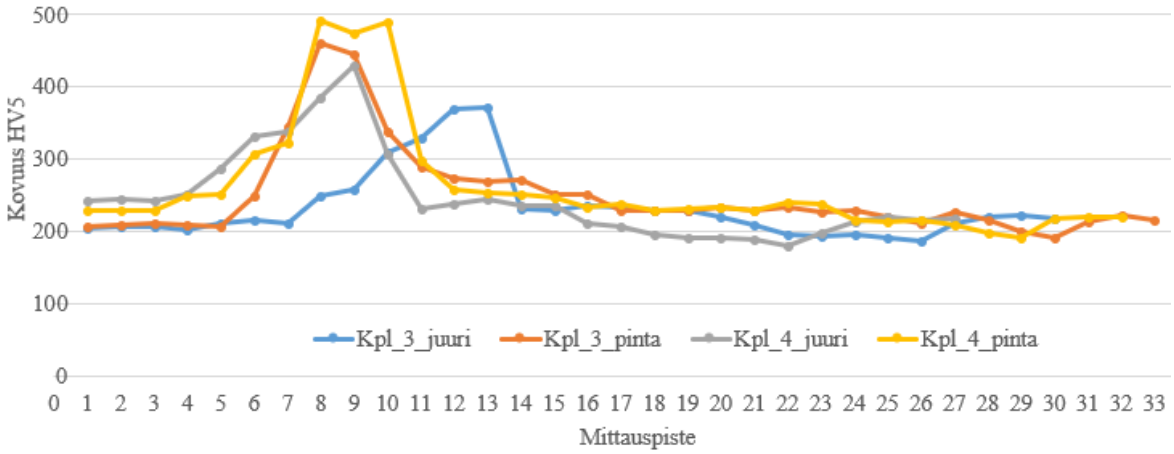


Kuva 14. Koekappaleen 4 pinnan ja juuren kovuuspisteiden sijainti.



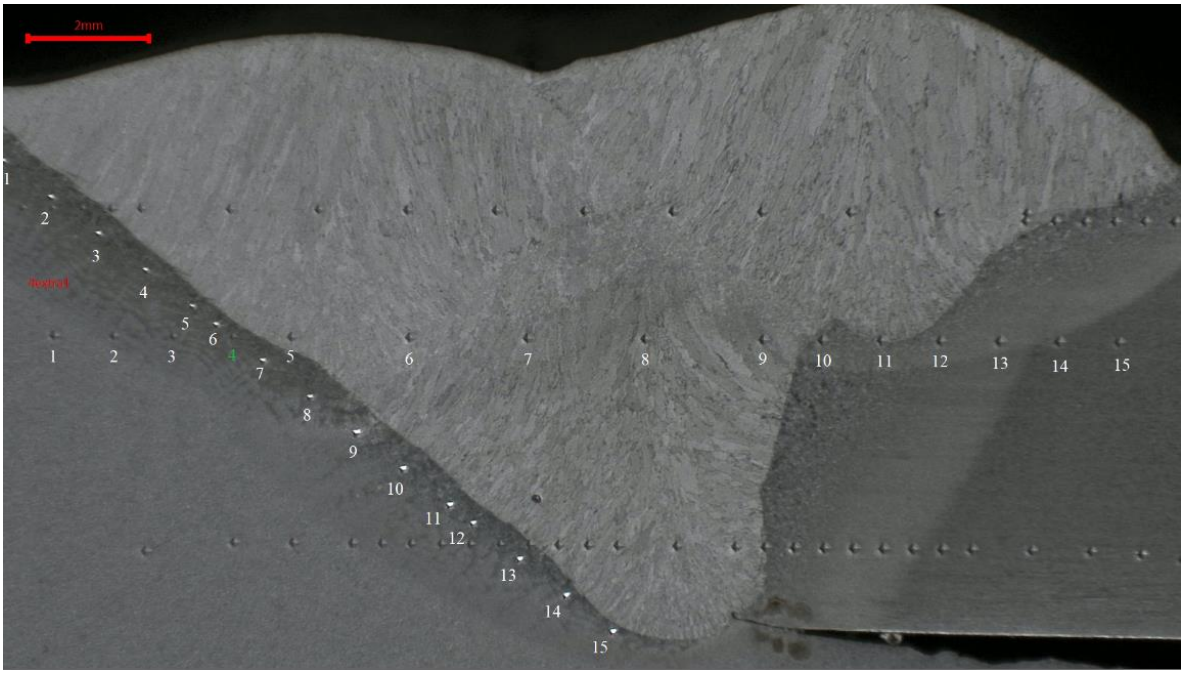
Kuva 15. Koekappale 3 pinnan ja juuren kovuuspisteiden sijainti.

Kuvassa 16 on piirretty kuvaajat saaduista kovuuspisteistä, jotta voidaan vertailla saatuja kovuuksia.

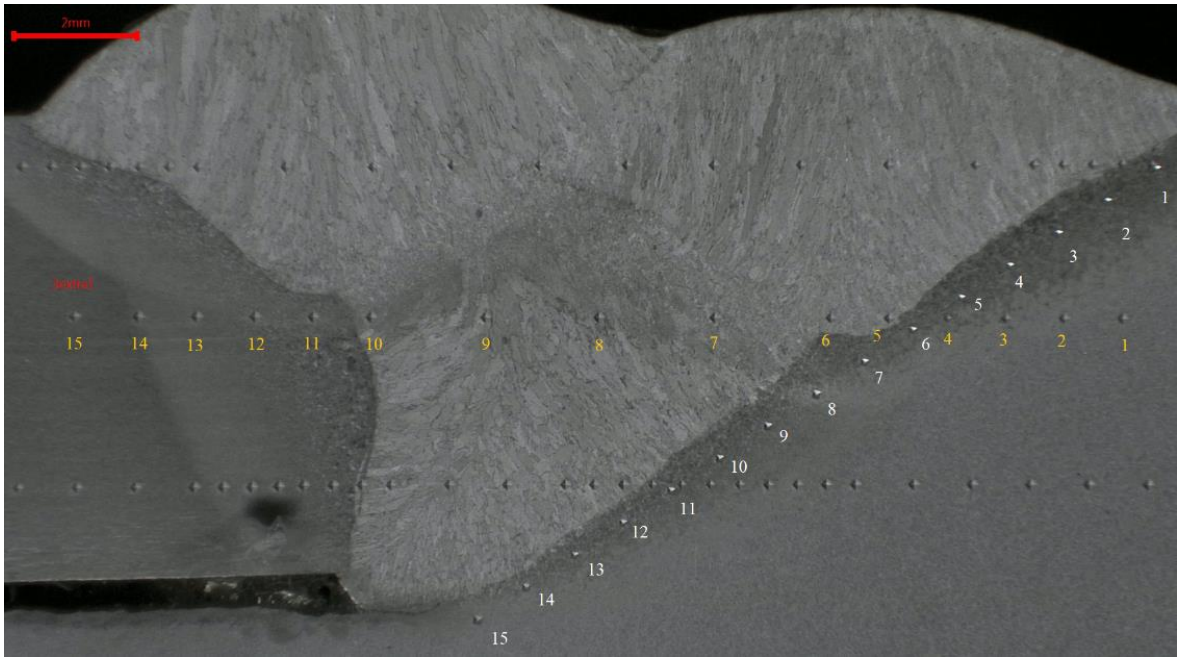


Kuva 16. Koekappaleiden pinnan ja juuren kovuuskuvaajat.

Kuvissa 17 ja 18 on esitetty hitsin keskiosan ja valun HAZ-alueen puolen kovuuspisteiden sijainnit. Valuteräksen muutosvyöhykkeen HAZ-alueen pisteet ovat mitattu hitsin pinnasta juuren päin. Hitsin keskiosan pisteet ovat mitattu valuteräksestä teräslevyyn päin.

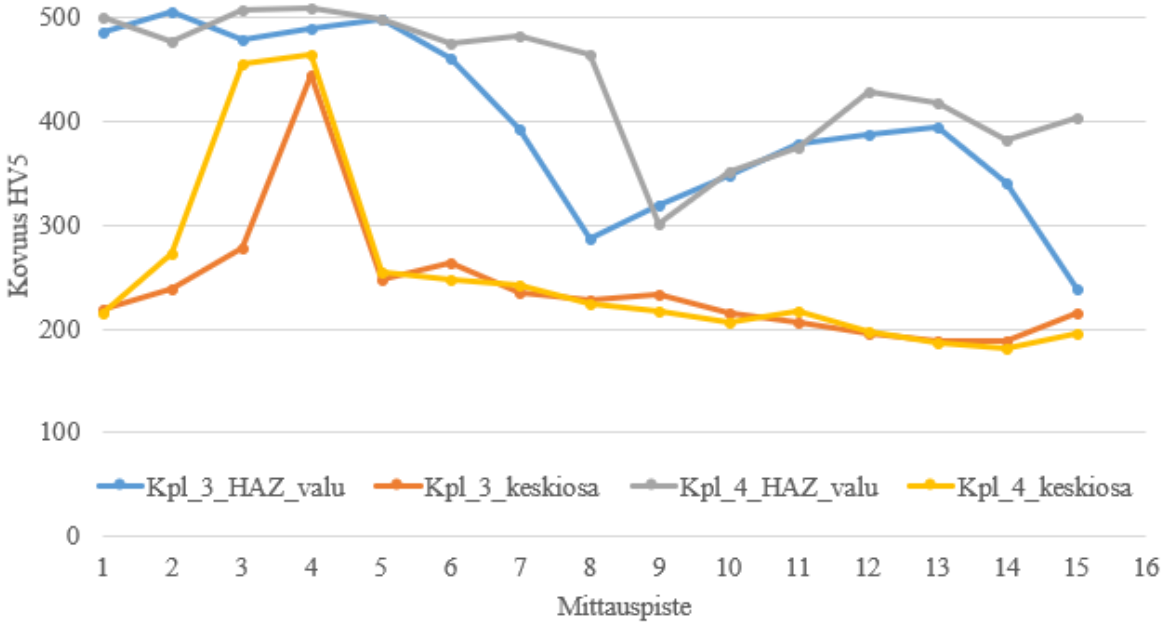


Kuva 17. Koekappaleen 4 kovuuspisteiden sijainti hitsin keskiosassa ja haz-alueella.



Kuva 18. Koekappale 3 kovuuspisteiden sijainti HAZ ja keskiosa.

Saaduista kovuuspisteistä ja niiden sijainneista tehdyt kovuuskuvaajat on esitelty kuvassa 19.



Kuva 19. Koekappaleiden 3 ja 4 kovuuskuvaajat HAZ-alueelta valuteräksen puolelta ja hitsin keskiosasta.

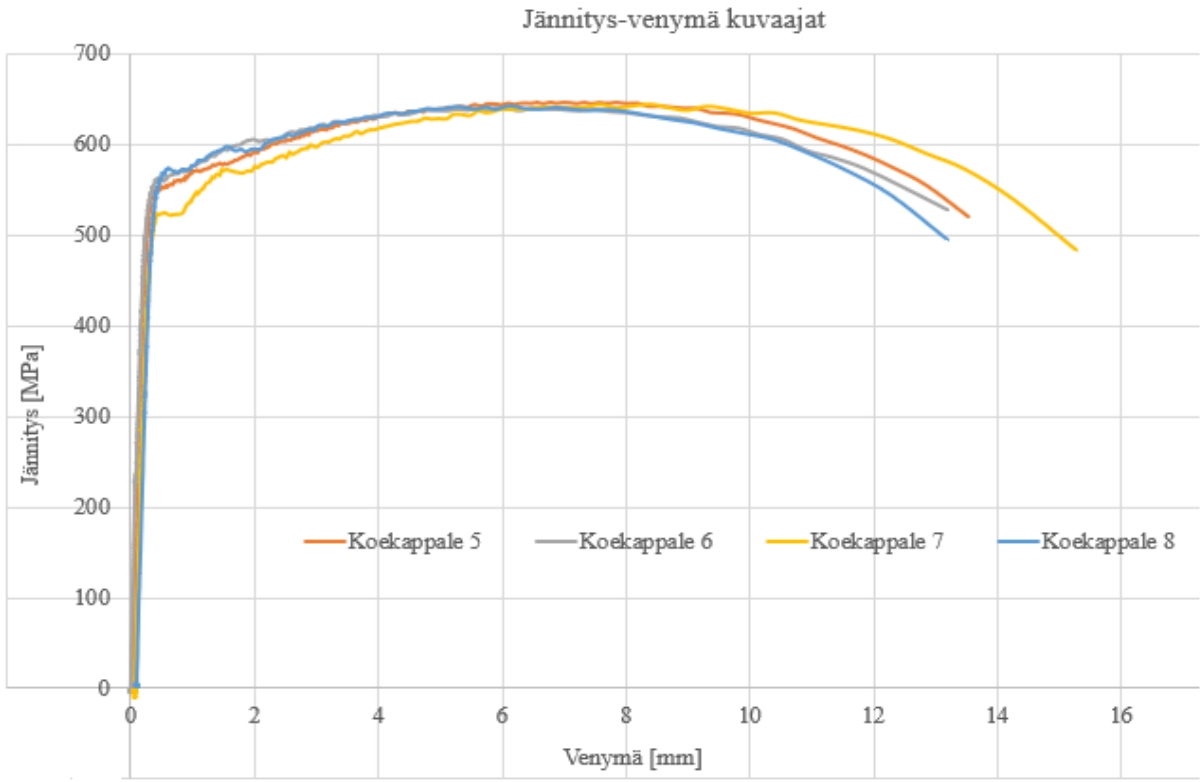
Yhteenvetona taulukossa 10 on kaikkien kovuuskuvaajien maksimi arvot saaduista mittauksista.

Taulukko 10. Kovuuskuvaajien maksimi arvot.

	Suurin kovuusarvo HV5, Koekappale 3 (G24Mn6)	Suurin kovuusarvo HV5, Koekappale 4 (G26CrMo4)
Hitsin juuri	372	430
Hitsin keskiosa	445	465
Hitsin pinta	462	493
HAZ-alue valun puoli	506	510

4.2 Vetokoe ja aramis

Vetokokeen avulla saadut jännitys-venymä kuvaajat vetokoekappaleille on esitetty kuvassa 20.



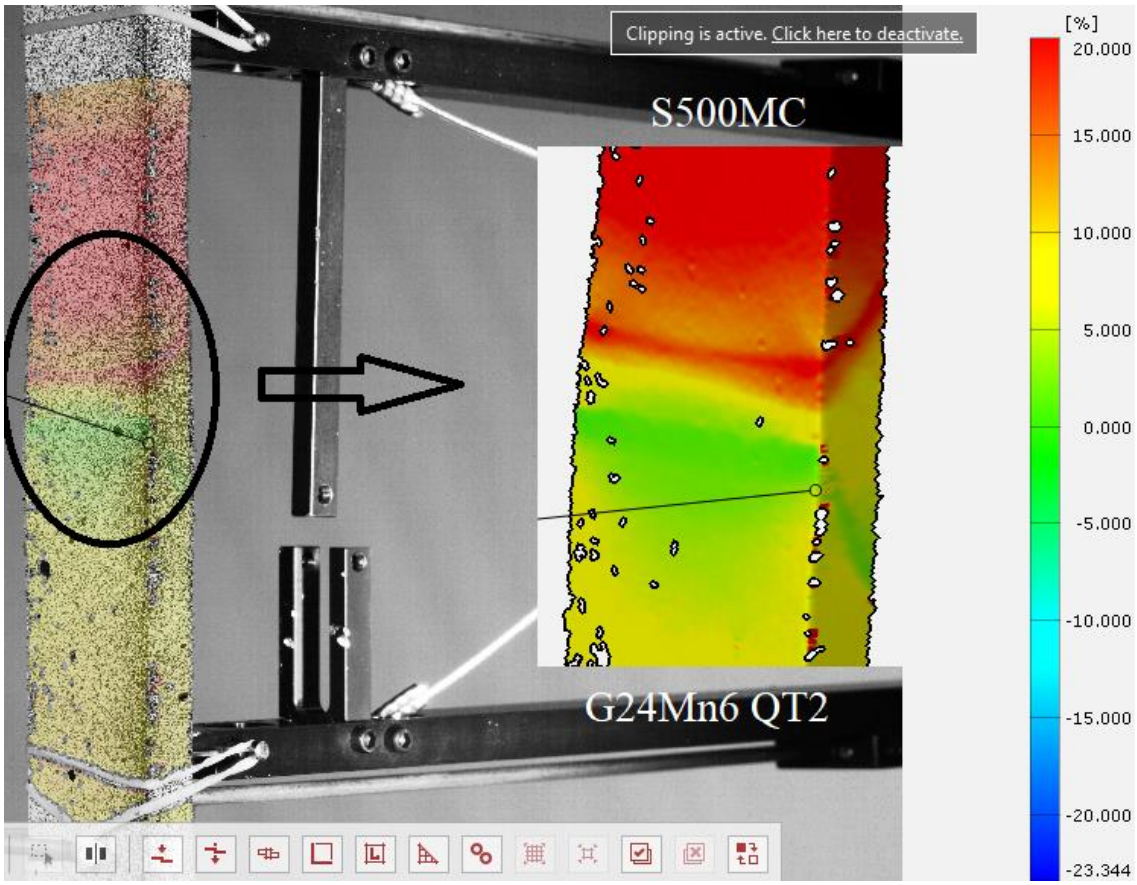
Kuva 20. Koekappaleiden jännitys-venymä kuvaajat vetokokeesta.

Saatujen tuloksien pohjalta on laskettu koekappaleiden murtolujuus ja murtovenymä taulukkossa 11 kaavojen 6 ja 7 avulla.

Taulukko 11. Vetokokeen tulokset.

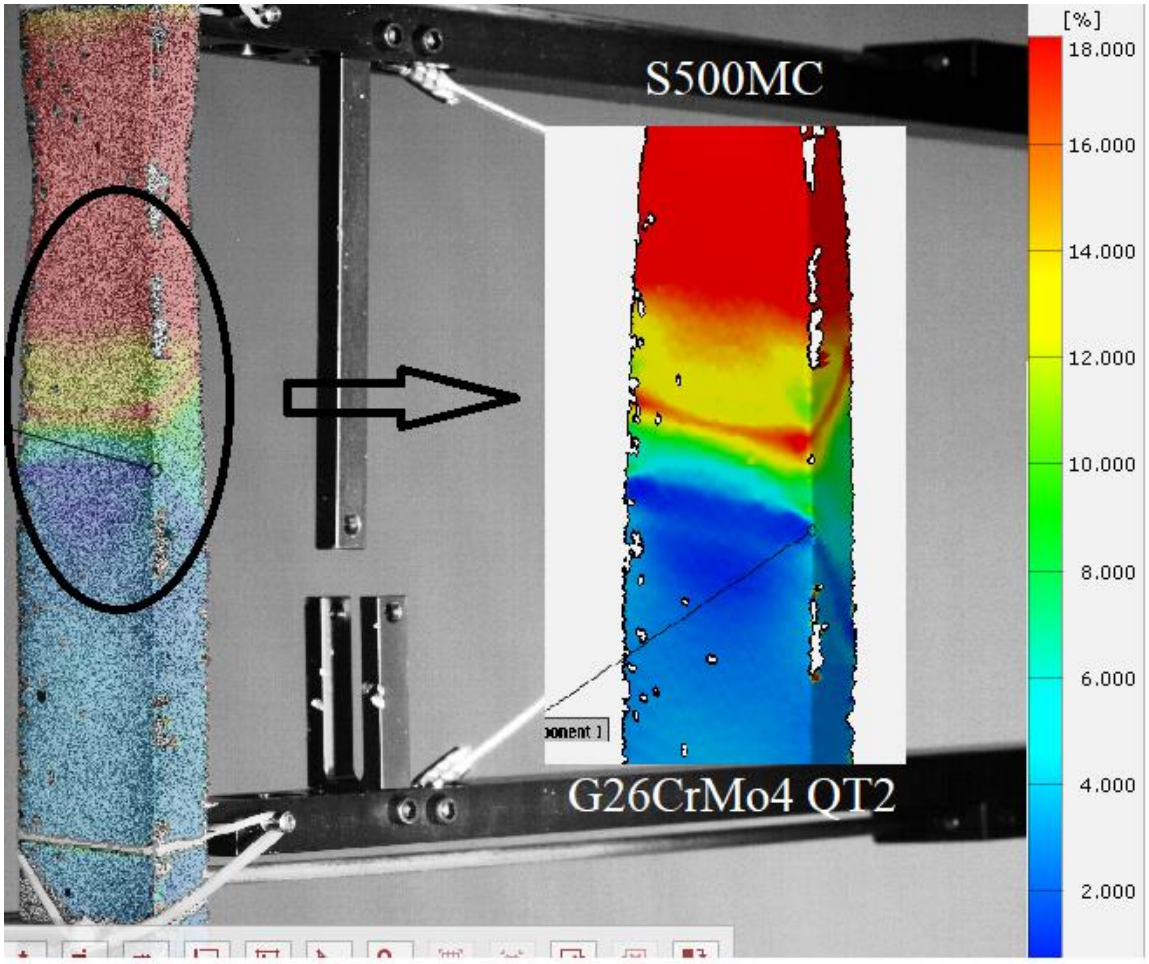
Koekappale	Suurin voima F_{max} [kN]	Murtolujuus *Rm* [Mpa]	Kokonais venymä [mm]	Murtovenymä *A* [%]
5	126,01	646	13,5	13,5
6	126,66	641	13,2	13,2
7	125,49	644	15,3	15,3
8	127,09	643	13,2	13,2

Murtumankehittymistä hitsin alueella nähdään molemmille materiaaleille kuvissa 21 ja 22.



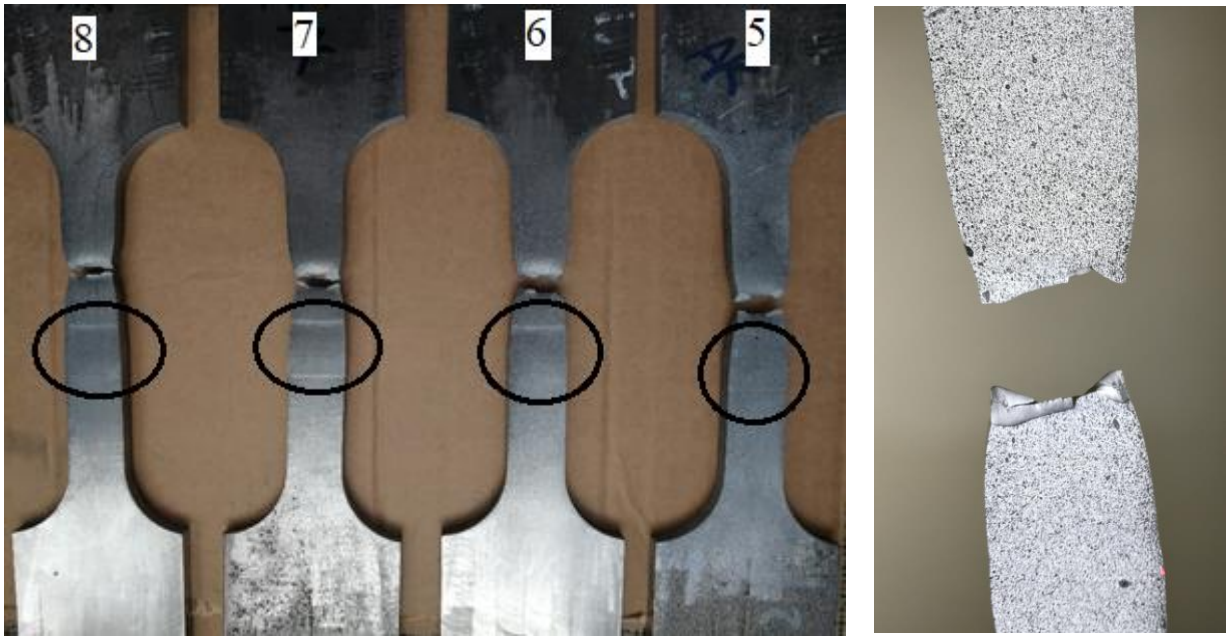
Kuva 21. Aramis-mittauskuvaa juuri ennen murtumaan kokonaisvenymä [%] koekappaleessa 7.

Kuvissa 21 ja 22 olevat valkoiset pisteet ovat kohtia, jossa ohjelmisto ei pysty laskemaan tuloksia kyseiseen kohtaan. Tämä johtuu osittain siitä, että mittaus on tehty viistosti. Tällöin koekappele on maalattu hitsin juuren puolelta ja samoin poikkileikkauksen puolelta. Tämän vuoksi maalia tarttuu helposti kulmaan ja maali muodostaa tasaisen pinnan eikä pilkukasta kuviota, jolloin Aramis-mittalaitteiston on vaikea saada kiinteitä mittapisteitä mittausta varten.



Kuva 22. Aramis-mittauskuvaa juuri ennen murtumaan kokonaisvenymä [%] koekappaleessa 8.

Murtumien sijainnit koekappaleissa on esitetty kuvassa 23 ja samalla myös näkyy koekappaleen 5 murtopinta. Kuvassa ylhäällä vetokoesauvassa on teräslevy S500MC ja alhaalla valuteräs.



Kuva 23. Murtuman sijainti koekappaleissa ja murtopinta koekappaleesta 5.

Kuvassa 23 ympyröidyllä alueella sijaitsee koekappaleen hitsi. Ympyrän sisällä koekappaleissa näkyvät vaakasuoraiset viivat ovat hitsin sularajan kohdat.

,

5 TULOSTEN POHDINTAA

Saadut tulokset ovat samansuuntaisia teorian kanssa ja tulosten avulla on saatu eroja valuterästen välille. Kovuuskokeiden tuloksien perusteella valuteräksen G24Mn6 perusaineen kovuus on noin 203-210 HV ja valuteräksen G26CrMo4 perusaineen kovuuden ollessa noin 230-244 HV. Teräslevyn S500MC perusaineen kovuus on noin 214-219 HV. Hitsin kovuus vaihtelee sen eri kohdissa välillä 215-271 HV. Hitsin laajempi kovuuden vaihtelu johtuu siitä, että toinen ja kolmas palo ovat lämpökäsitelleet aiemmin hitsattuja palkoja ja aiheuttaen eri kovuuksia hitsin poikkipinta-alalle.

Kovuuskuvaajista huomataan G26CrMo4 valuteräksen kovuusarvojen olevan hieman korkeampia kuin G24Mn6 valuteräksen. Tämä tulee myös ilmi kovuuskuvaajien maksimiarvoista taulukosta 10. Tämä on yhtenevä teorian kanssa, sillä G26CrMo4 valuteräs karkenee hitsauksen seurauksena enemmän kuin G24Mn6 valuteräs.

Hitsin pinnan kovuuden arvot ovat selkeästi korkeammat kuin juuren. Tämä johtuu liian alhaisesta lämmöntuonnista toisessa ja kolmannessa palossa. Tämän vuoksi jäähtyminen on nopeaa ja muodostuu kovempia mikrorakenteita muutosvyöhykkeelle, pääasiassa martensiittia. Mikrorakennetta voidaan arvioida kuvan 4 CCT-käyrän perusteella. Hitsin pinnan kovuusarvojen ovat lähellä 500 HV molemmilla valuteräksillä muutosvyöhykkeellä, kun vastaavasti juuren alueella maksimi arvot ovat 372 HV G24Mn6-valuteräksellä ja G26CrMo4-valuteräksellä 430 HV.

Hitsin juuren arvot ovat kylmähalkeilun kannalta sallituissa rajoissa, mutta valuteräksien muutosvyöhykkeellä hitsin pinnan läheisyydessä olevat arvot eivät ole. Ne ylittävät suositellun 450 HV rajan. Ensimmäisen palon suuremman lämmöntuonnin ansiosta jäähtymisnopeus hidastuu ja se edes auttaa sitkeämpien mikrorakenteiden syntyä. Tämän takia pintapalkojen lämmöntuonti kannattaa olla lähempänä ensimmäisen palon lämmöntuontia, jotta saataisiin kasvatettua $T_{8/5}$ -jäähtymisaikaa ja täten kovuusarvot olisivat lähempänä juuren arvoja.

Koekappaleiden pinnan ja juuren kovuuskuvaajista huomataan teoriaosuudessa esitelty kapea teräslevyn perusainetta pehmeämpi kohta, joka syntyy termomekaanisesti valsatuille teräslevyille hitsauksen seurauksena hitsin viereen.

Kaikki koekappaleet murtuivat sitkeästi S500MC teräslevyn puolelta. Tämä havaitaan hyvistä murtovenymän arvoista ja koekappaleiden murtopinnasta. Murtopinta on repaleinen ja epätasainen, mikä kertoo materiaalin murtuneen sitkeästi. Valuteräksellä ei ollut vaikutusta murtuman sijantiin. Murtumanarvot vastaavat S500MC teräksen murtolujuus arvoja. Koekappaleiden muodonmuutoskyky on hyvä. Valuteräksien vaikutus huomataan jännitys-venymä kuvaajista ja Aramis kuvista. G24Mn6 valuteräs alkaa venymään plastisesti vetokokeen aikana ja se havaitaan, että koekappaleiden kokonaisvenymä on aavistuksen suurempi tällä valuteräksellä kuin G26CrMo4:llä. Valuteräksien käyttäytyminen tulee ilmi Aramis-kuvista. Niistä nähdään G24Mn6 valuteräksen venyvän enemmän kuin G26CrMo4 valuteräksen. G26CrMo4 valuteräs venyy kimmoalueella eikä juurikaan veny plastisesti. Tämä johtuu siitä, että G24Mn6 valuteräksen myötöraja on sama 500 MPa kuin teräslevyn S500MC. G26CrMo4 valuteräksen myötöraja on korkeampi 550 MPa.

Aramis-kuvista havaitaan myös, että hitsausliitoksen korkeimmat murtovenymän arvot sijaitsevat teräslevyn lämpövyöhykkeen suuntaisesti valuteräksestä riippumatta. Tämä pehmennyt vyöhyke on havaittu kovuuskokeissa. Valuteräksen puolen muutosvyöhykeellä on huomattavasti suurempia kovuuden arvoja ja se vaikuttaa hitsausliitoksen käyttäytymiseen. Liitos ei juurikaan tältä kohtaan veny johtuen kovista mikrorakenteista.

Vetokoekappale seitsemän kokonaisvenymä on suurempi kuin muilla vetokoekappaleilla. Tämä voi mahdollisesti johtua vetokoesauvojen koneistuksesta. Hitsi ei välttämättä sijaitse aivan keskellä koealuetta, jolloin teräslevyä on pituudeltaan enemmän vetokoekappaleessa seitsemän kuin muissa koekappaleissa ja tällöin kokonaisvenymä on pidempi, koska vetokoesauvat murtuivat teräslevyn puolelta.

5.1 Mahdollisten virheiden tarkastelu

Makrokuvista huomataan, että hitsauksesta on jäänyt särö juuren puolelle molemmissa koekappaleissa. Tämä ei vaikuta tässä työssä tehtyihin tuloksiin. Alkusärö juuren puolella vaikuttaisi merkittävästi hitsausliitoksen väsymiskestävyyteen ja sen tuloksiin.

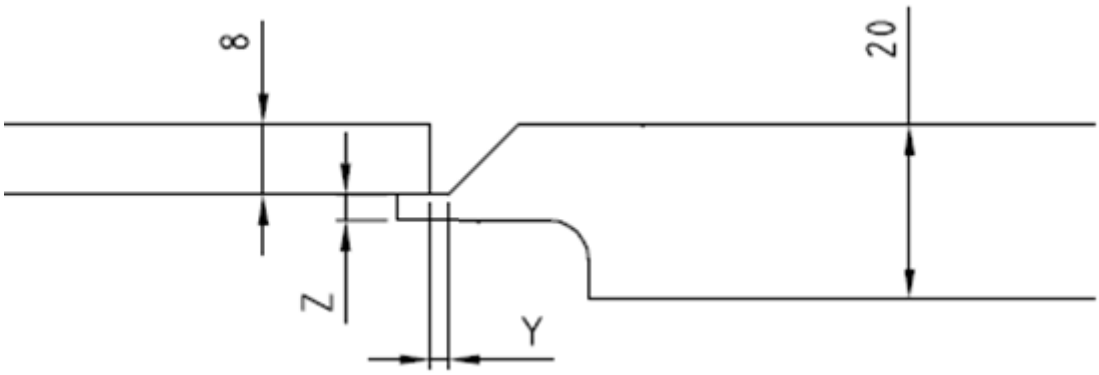
Toisen ja kolmannen palon alhaisempi lämmöntuonti aiheutti hitsausliitoksen pintaan lähestyttäessä voimakasta kovuuden kasvua verrattuna pohjapalkoon sekä kovuuden kasvua muutosvyöhykkeellä. Tämä voidaan välttää pitämällä lämmöntuonti lähellä ensimmäisen palon lämmöntuontia, jotta jäähtymisaika olisi kymmenen sekuntia tai enemmän.

Jännitys-venymä kuvaajien mittauksessa alkuosa kuvaajasta on mitattu hienovenymäanturilla kuuteen millimetriin asti. Tämän jälkeen kuvaaja on piirretty loppuun anturilla, joka mittaa siirtymää vetokoneen alaleuasta. Tällä ei ole merkittävää vaikutusta saatuihin tuloksiin, koska alussa mahdollisesti tapahtunut kiinnityksen luistaminen ja vetokonelaitteiston ”eläminen” rasituksen alaisena tapahtuu vetokokeen alussa ja tällöin hienovenymäanturi on suorittanut mittausta. Tämän jälkeen alaleuan siirtymää mittaava anturi mittaa pelkästään koekappaleen venymää.

5.2 Jatkotutkimusaiheet

Hitsin juuren puolelle ei saa jäädä alkusäröä. Alkusärö hitsinjuuren puolella on erittäin huono väsymiskestävyyden kannalta. Tässä opinnäytetyön tutkimuksessa hitsausliitokseen jäi alkusärö, kun liitoskappaleet olivat toisissaan kiinni ilman vapaaväliä. Yhtenä tutkimuskohteen olisi tutkia mahdollisimman pieni vapaa väli Y kuvassa 24, jotta voidaan varmistua tunkeuman olevan riittävä. Vapaavälin ollessa mahdollisimman pieni myös hitsin poikkipinta-ala pysyisi pienenä ja vältyttäisiin käyttämästä liikaa lisäainelankaa ja näin pystytään säästämään hitsauksen kustannuksia.

Liitoksen uudelleen suunnittelulla voidaan vaikuttaa oleellisesti hitsauksen aikana syntyvän lämmön kontrollointiin. Uudelleen suunnittelun avulla kuvassa 24 vähennetään massaa hitsin juuren ympäriltä ja näin pystytään kasvattamaan $T_{8/5}$-jäähtymisaikaa ilman lämmöntuonnin lisäämistä. Lepola P. ja Ylikangas R. mukaan paksuudelle Z ei ole olemassa tarkkaa määritelmää. Juurituen ainevahvuus määräytyy jatkettavan materiaalin mukaan.



Kuva 24. Liitoksen parannusehdotus.

Toisena jatkotutkimusaiheena valmistuksen näkökulmasta olisi tutkia mahdollisuutta hitsata kyseinen hitsi kahdella palolla kolmen sijasta. Tämän avulla saataisiin nostettua hitsauksen tuottavuutta ja samalla pienennettyä valmistuksen kustannuksia. Samalla voisi saada jäähtymisnopeutta pidennettyä. Suuremman $T_{8/5}$-jäähtymisajan avulla saataisiin syntymään sitkeämpiä mikrorakenteita hitsin muutosvyöhykkeelle.

Materiaalien vertailun tueksi olisi hyvä tehdä murtumatestit ja väsymiskestävyyden tarkastelu sekä vetokoe -40 ºC lämpötilassa. Näiden kokeiden avulla saataisiin kattavasti todettua valuteräksen vaikutus hitsausliitoksessa. Nämä kokeet antaisivat lisää tietoa päätöksenteon tueksi valuteräksien vaihtamisessa.

6 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä on tutkittu teorian ja laboratoriokokeiden avulla kahden valuteräksen eroja ja niiden vaikutusta hitsausliitoksen lujuuteen. Tutkittavat valuteräkset ovat G24Mn6 QT2 ja G26CrMo4 QT2. Teoriaosuudessa on esitelty molempien valuteräksien ominaisuudet ja seosaineet sekä niiden vaikutusta hitsaukseen. Teoriaosuudessa on tuotu myös esiin $T_{8/5}$-jäähtymisajan vaikutusta materiaalin mikrorakenteeseen. Tämän jälkeen hitsausliitokselle tehtiin kovuuskokeet ja vetokoe hyödyntäen Aramis-mittausta.

Laboratoriokokeet olivat linjassa teorian kanssa ja isompia eroja ei löytynyt valuteräksien välille. Teoriaosuuden pohjalta G26CrMo4-valuteräs karkenee enemmän hitsauksen seurauksena kuin G24Mn6 valuteräs ja tämä tuli esiin kovuuskokeissa. Tämän vuoksi G24Mn6 soveltuu paremmin hitsattavaksi ilman korotettua työlämpötilaa. Vetokokeessa murtumansijainti ja murtumatyyppi eivät olleet riippuvaisia valuteräksestä. Kaikkien koesauvojen hitsausliitokset murtuivat teräslevyn puolelta. Hitsausliitokset käyttäytyivät sitkeästi. Aramis kuvista huomataan G24Mn6-valuteräksen venyvän enemmän vetokokeen aikana kuin G26CrMo4 valuteräksen. Tämä johtuu G26CrMo4-valuteräksen korkeammasta myötörajasta.

Koekappaleisiin jäi alkusärö hitsin juuren puolelle. Tällä ei ole vaikutusta tässä työssä tehtyihin kokeisiin. Toisen ja kolmannen palon alhaisempi lämmöntuonti pienensi $T_{8/5}$ jäähtymisaikaa ja synnytti kovia mikrorakenteita martensiittia hitsin muutosvyöhykkeelle hitsin pinnan läheisyydessä.

Jatkotutkimusaiheina voisi suunnitella hitsausliitos uudelleen siten, että massaa olisi vähemmän hitsin juuren ympärillä. Näin voidaan kontrolloida jäähtymisaikaa ilman lämmöntuonnin lisäämistä. Tämän lisäksi tulisi etsiä pienin mahdollinen vapaaväli teräslevyn ja valuteräksen välillä, jotta voidaan varmistua kunnollisesta läpitunkeumasta. Tuottavuuden kannalta olisi hyvä tutkia mahdollisuutta hitsata liitos kahdella palolla kolmen sijasta. Murtumatestit ja väsymiskestävyyskoe olisivat hyvä tehdä hitsausliitokselle ja ne toisivat lisää tietoa valuteräksen vaikutuksesta. Tämän tutkimuksen perusteella G24Mn6 valuteräs voi korvata G26CrMo4 valuteräksen tässä työssä tutkitussa liitoksessa.

LÄHTEET

Amraei, M., Skriko, T., Björk, T. & Zhao, X. 2016. Plastic strain characteristics of butt-welded ultra-high strength steel (UHSS). Thin–Walled Structures, 109. s. 227–241.

Autere E., Ingman Y., Tennilä P. 1982. Valimotekniikka 1. Insinööritieto Oy. 415 s.

Björk, T., Toivonen, J. & Nykänen, T. 2012. Capacity of Fillet Welded Joints Made Of Ultra High-Strength Steel. Welding in the World, 56: 3– 4. s. 71–84.

ESAB Oy. 2018. Hitsauslisäaineet OK AristoRod 12.63. [Viitattu 25.6.2018]. Saatavissa: http://www.esab.fi/fi/fi/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=410847&tab=2

Hohmann B., Bruck P., Esselman T., Schmidt T. Digital Image Correlation (DIC): An Advanced Nondestructive Testing Method for Life Extension of Nuclear Power Plants. [Viitattu 25.4.2018]. 8 s. Saatavissa: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/070/43070819.pdf

Hitsaustekniikka. 2007. Työkaluja hitsauskoordinoijalle hitsausten suunnittelua varten. Hitsaustekniikka 02/2007, s.4.

Hitsaustekniikka. 2011. Raex-kulutusteräs – keinot oikeaan hitsaukseen. Hitsaustekniikka 05/2011, s.4.

Lepola P., Makkonen M. 1998. Hitsaus ja teräsrakenteet. 1. painos. WSOY – Kirjapainoyksikkö Porvoo. 559 s.

Lepola P., Makkonen M. 2007. materiaalit ja niiden käyttö. 5. painos. Werner Söderström Osakeyhtiö. 314 s.

Lepola P., Ylikangas R. 2016. Hitsaustekniikka ja teräsrakenteet. 1. painos. Helsinki Sanoma Pro Oy. 415 s.

Metallinjalostajat ry. 2000. Teräskirja. 6. painos. Libris. 76 s.

Metalliteollisuuden Keskusliitto MET. 2001. Raaka-ainekäsikirja 1: Muokatut teräkset. 3. painos. Tammer-paino Oy. 361 s.

Metalliteollisuuden Keskusliitto MET. 2001. Raaka-ainekäsikirja 2: Valuraudat ja valuteräkset. 2. painos. Tammer-paino Oy. 196 s.

Ovako Oy. 2012. Ovakon terästen hitsaus. 61 s. [Viitattu 3.5.2018] Saatavissa : http://www.ovako.com/PageFiles/49/Ovakon_terasten_hitsaus_15724.pdf

SFS-EN 1011-1. 2009. Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset. Osa 1: Yleisohejet kaarihitsaukselle. 2.painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 25 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

SFS-EN 1011-2. 2001. Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset. Osa 2: Ferriittisten terästen kaarihitsaus. 1.painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 113 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

SFS-EN 10149-2. 2013. Kuumavalssatut lujat kylmämuovattavat teräslevytuotteet. Osa 2: Termomekaanisesti valssattujen terästen tekniset toimitusehdot. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 25 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

SFS-EN 10293. 2015. Valuteräkset yleiseen käyttöön. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 33 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

SFS-EN 4136. 2012. Hitsien rikkova aineenkoetus metalleille. Poikittainen vetokoe. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 23 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

SFS-EN 9015-1. 2011. Hitsien rikkova aineenkoetus metalleille. Kovuuskokeet. Osa 1: Kaarihitsausliitosten kovuuskoe. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 37 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

SFS-EN 6507-1. 2018. Metallic materials. Vickers hardness test. Part 1: Test method. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 36 s. This standard is approved in English.

SSAB Oy. 2018. SSAB Domex S500MC tuotetiedot. [Viitattu 10.5.2018]. Saatavissa: https://www.ssab.fi/tuotteet/brandit/ssab-domex-structural-steel/products/ssab-domex-500mc

Vander Voort G. F. 1991. Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels. ASM International, printed in the United States of America. s.766.

Vähäkainu O. 2003. Hitsaajan opas: Rautaruukin teräkset. 2003. 3. painos. Otava. 112 s.

LIITTEET

LIITE I Koekappale 3 alkuaineanalyysin tulokset G24Mn6

23.03.2018 10:48:46

LUT Kone Hitsaustekniikka

Sample Identification

Quality SampleNo Customer

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.223	0.433	1.445	0.026	<0.150	0.208	0.053	0.028	0.014	0.026
2.	0.213	0.420	1.405	0.023	<0.150	0.201	0.051	0.026	0.013	0.029
3.	0.212	0.422	1.430	0.024	<0.150	0.203	0.052	0.027	0.014	0.028
∅	**0.216**	**0.425**	**1.427**	**0.024**	**<0.150**	**0.204**	**0.052**	**0.027**	**0.014**	**0.028**
σ	0.0061	0.0070	0.020	0.0016		0.0036	0.0010	0.0010	0.00071	0.0016
υ	2.824	1.647	1.402	6.667		1.765	1.923	3.704	5.071	5.714

LIITE II Koekappale 4 alkuaineanalyysin tulokset G26CrMo4

23.03.2018 10:55:17

LUT Kone Hitsaustekniikka

Sample Identification

Quality SampleNo Customer

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.266	0.328	0.647	0.023	<0.150	1.048	0.206	0.031	0.013	0.031
2.	0.270	0.300	0.634	0.024	<0.150	1.027	0.202	0.024	0.012	0.025
3.	0.271	0.299	0.642	0.023	<0.150	1.016	0.203	0.024	0.012	0.027
∅	**0.269**	**0.309**	**0.641**	**0.023**	**<0.150**	**1.030**	**0.204**	**0.026**	**0.012**	**0.028**
σ	0.0026	0.016	0.0066	0.00071		0.016	0.0021	0.0041	0.00071	0.0031
υ	0.967	5.178	1.030	3.087		1.553	1.029	15.77	5.917	11.07

LIITE III Kovuuskokeen mittauspisteiden sijainnit painaumariveillä koekappaleissa 3 ja 4.

	Koekappale 4, mittapisteiden sijainti painaumarivillä (mm)				Koekappale 3, mittapisteiden sijanti painaumarivillä (mm)			
Mittauspiste	Pinta	Keskiosa	Juuri	HAZ, valu	Pinta	Keskiosa	Juuri	HAZ, valu
1	0	0	0	0	28	18	20,5	14
2	1	1	1	1	27	17	19,5	13
3	2	2	2	2	26	16	18,5	12
4	3	3	3	3	25	15	17,5	11
5	4	4	3,5	4	24,5	14	16,5	10
6	4,5	6	4	4,5	24	13	15,5	9
7	5	8	4,5	5,5	23,5	11	15	8
8	5,5	10	5	6,5	23	9	14,5	7
9	6	12	5,5	7,5	22,5	7	14	6
10	6,5	13	6	8,5	22	5	13,5	5
11	7	14	6,5	9,5	21,5	4	13	4
12	7,5	15	7	10	21	3	12,5	3
13	9	16	7,5	11	20,5	2	12	2
14	10,5	17	8,5	12	19,5	1	11,5	1
15	12	18	9,5	13	18	0	11	0
16	13,5	-	10	-	16,5	-	10,5	-
17	15	-	10,5	-	15	-	9,5	-
18	16,5	-	11	-	13,5	-	8,5	-
19	18	-	11,5	-	12	-	7,5	-
20	19,5	-	12	-	10,5	-	7	-
21	21	-	12,5	-	9	-	6,5	-

(liite III jatkoa)

22	22,5	-	13	-	7,5	-	6	-
23	22,5	-	13,5	-	6	-	5,5	-
24	23	-	14,5	-	5,5	-	5	-
25	23,5	-	15,5	-	5	-	4,5	-
26	24	-	16,5	-	4,5	-	4	-
27	24,5	-	17,5	-	4	-	3	-
28	25	-	-	-	3,5	-	2	-
29	25,5	-	-	-	3	-	1	-
30	26,5	-	-	-	2,5	-	0	-
31	27,5	-	-	-	2	-	-	-
32	28,5	-	-	-	1	-	-	-
33	-	-	-	-	0	-	-	-

LIITE IV Kovuuskoetulokset mittapisteissä koekappale 3 ja 4

	Koekappale 4, kovuusarvot mittauspisteen kohdalla				Koekappale 3, kovuusarvot mittauspisteen kohdalla			
Mittauspiste	Pinta	Keskiosa	Juuri	HAZ, valu	Pinta	Keskiosa	Juuri	HAZ, valu
1	230	215	242	501	215	215	217	239
2	229	273	244	478	222	188	222	341
3	229	455	242	508	213	189	219	395
4	248	465	251	510	192	195	210	387
5	252	255	288	498	201	207	186	379
6	306	247	332	476	216	215	192	348
7	322	243	338	483	226	234	195	319
8	493	225	385	465	211	228	193	287

(liite IV jatkoa)

9	475	218	430	301	219	236	196	393
10	490	206	306	351	229	264	209	461
11	298	217	231	375	227	247	221	498
12	259	198	238	429	233	445	230	490
13	253	186	244	419	229	279	229	479
14	252	181	235	382	233	239	233	506
15	246	195	236	404	230	219	235	487
16	233	-	210	-	230	-	230	-
17	237	-	207	-	230	-	232	-
18	229	-	195	-	251	-	372	-
19	232	-	192	-	251	-	369	-
20	234	-	192	-	271	-	329	-
21	230	-	188	-	268	-	310	-
22	239	-	180	-	273	-	257	-
23	238	-	197	-	290	-	248	-
24	216	-	214	-	339	-	210	-
25	214	-	219	-	445	-	216	-
26	215	-	216	-	462	-	210	-
27	208	-	218	-	344	-	203	-
28	198	-	-	-	250	-	206	-
29	190	-	-	-	207	-	207	-
30	217	-	-	-	208	-	204	-
31	221	-	-	-	212	-	-	-
32	219	-	-	-	208	-	-	-
33	-	-	-	-	206	-	-	-

LIITE V Hitsauslisäaineen lujuusarvot hitsattuna M21 suojakaasulla (ESAB, 2018).

Tyypilliset lujuusarvot					
As welded					
Murtolujuus	**Myötöraja**	**Suojakaasu**	**Venymä**	**Stress Relieved Temperature**	**Stress Relieved Testing Time**
590 MPa	490 MPa	EN 80Ar/20CO_2 (M21)	29 %	-	-