



**TURUN
YLIOPISTO**

Suurlujuusteräksien MAG-hitsaus

Konetekniikan laitos
Kandidaatintutkielma

Viljami Karjalainen

29.4.2026

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidaatintutkielma

Koulutusohjelma, oppiaine: Konetekniikka

Tekijä(t): Viljami Karjalainen

Otsikko: Suurlujuusteräksien MAG-hitsaus

Ohjaaja(t): Timo Kemppainen

Sivumäärä: 20 sivua

Päivämäärä: 29.4.2026

Tiivistelmä:

Teräksiä, joiden myötölujuus on pääosin 400-690 MPa luokkaa, kutsutaan suurlujuusteräksiksi. Näiden käyttö teollisuudessa on jatkuvassa kasvussa. Korkeiden myötölujuuksien ansiosta voidaan käyttää yhä ohuempia ainevahvuuksia, joilla saadaan rakenteiden painoa vähennettyä merkittävästi. Näiden terästen suurimmat käyttökohteet ovat auto- sekä laivateollisuus.

Suurlujuusteräkset ovat alttiita vetyhalkeilulle. Tämän takia juuri MAG-täytelankahitsaus on toimiva liittämismenetelmä näille teräksille, koska sen avulla saadaan pidettyä vetypitoisuudet alhaisina. Mitä lujempi teräs on, sitä suuremmat riskit vetyhalkeilulle on. Tämän takia hitsausparametrien kanssa täytyy olla tarkka. Lämmöntuonti ja jäähtymisaika ovat tärkeimmät parametrit materiaalin ominaisuuksien säilyttämisen kannalta.

Avainsanat: MAG-hitsaus, Suurlujuusteräs

Sisällysluettelo

1	Merkinnät ja lyhenteet	4
2	Johdanto	5
2.1	Suurlujuusteräksien käyttö ja taustat	5
2.2	Tavoitteet ja ongelmanasettelu	5
2.3	Rajaukset	5
3	MAG-hitsaus prosessina	6
3.1	Toimintaperiaatteet ja laitteisto	6
3.2	Lisäaineen siirtymistavat	7
3.3	Suojakaasut	7
3.4	Hitsauslisäaineet	8
4	Suurlujuusteräket materiaalina	10
4.1	Terästen luokittelu ja ominaisuudet	10
4.2	Mikrorakenne	11
4.3	Hiiliekvivalentti (CEV)	12
5	Suurlujuusterästen hitsattavuus ja haasteet	14
5.1	Lämmöntuonti ja jäähtymisaika	14
5.2	Vetyhalkeilu	14
5.3	Muutosvyöhykkeen (HAZ) ongelmat	15
5.4	Hitsausvirheet	15
6	Prosessinhallinta	17
6.1	Esilämmitys ja palkojen välinen lämpötila	17
6.2	Hitsausparametrien ikkuna	17
7	Yhteenveto	18
	Lähteet	19

1 Merkinnät ja lyhenteet

Lyhenteet:

MAG – Metal active gas

HAZ – Heat affected zone

AHSS – Advanced high-strength steels

UHSS – Ultra high strength steels

CE – hiiliekvivalentti

%C – hiilipitoisuus

%Mn – mangaanipitoisuus

%Cr – kromipitoisuus

%Mo – molybdeenipitoisuus

%V – vanadiinipitoisuus

%Ni – nikkelpitoisuus

%Cu – kuparipitoisuus

2 Johdanto

2.1 Suurlujuusteräksien käyttö ja taustat

Suurlujuusteräksiä käytetään nykypäivän teollisuudessa yhä enemmän. Niiden korkean lujuuden ansiosta saadaan merkittäviä rakenteellisia, sekä ympäristöllisiä etuja, kuten rakenteiden painon vähentämistä ja pienempiä hiilidioksidipäästöjä. Kevyemmät rakenteet ja ohuemmat ainevahvuudet avaa monia mahdollisuuksia. Näiden mahdollisuuksien käyttö vaatii kuitenkin sopivien liittämismenetelmien löytämistä, esimerkiksi hitsauksessa. [1]

2.2 Tavoitteet ja ongelmanasettelu

Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan suurlujuusteräksien liittämistä MAG-hitsauksella. MAG-hitsaus on teollisuudessa todella yleinen ja toimiva menetelmä, mutta suurlujuusteräkset ovat todella vaativia hitsattavia. Tämän takia hitsausparametrien säätö on tarkkaa ja vaativaa. Työssä keskitytään tarkastelemaan näiden terästen hitsattavuutta ja sen suurimpia haasteita. Suurlujuusterästen suurimpina ongelmina hitsattavuudessa pidetään vetyhalkeilua, sekä hitsauksessa lämmön aiheuttamaa mikrorakenteen muuttumista. [2]

2.3 Rajaukset

Tutkielmassa keskitytään käsittelemään MAG-täytelankahitsausta. Suurlujuusterästen ollessa erityisen herkkiä vetyhalkeilulle, saadaan materiaalin vetypitoisuus pidetty halutulla tasolla käyttämällä saumattomia täytelankoja. Työssä tarkastellaan metalli-, rutiili- ja emästytelankojen toimivuutta suurlujuusteräksiä hitsatessa. Tutkielman teossa on hyödynnetty tekoälyä tiedon etsintään lähteistä.

3 MAG-hitsaus prosessina

Hitsaus on menetelmänä yksinkertaisesti kahden tai useamman osan liittämistä toisiinsa. Tämä saavutetaan erilaisin keinoin, kuten tuomalla lämpöä tai puristusta osien liitospintaan [3].

MAG-hitsaukselle on olemassa omat ISO-standardin mukaiset prosessikohtaiset numerotunnukset. Umpilangalla hitsatessa käytetään liitosprosessin merkintänä ISO 4063 – 135. Jauhetäytelankaa käytettäessä merkintä on ISO 4063 – 136 ja metallitäytelangalla ISO 4063 – 138 [4].

MAG-hitsauksessa käytetään osien liittämiseen lämpöä. Tarkemmin ottaen tarvittava lämpö MAG-hitsauksessa saavutetaan valokaaren avulla. Valokaari on sähköpurkaus, joka tapahtuu kaasussa. Tämä sähköpurkaus on helppo saada aikaan, ja sen erinomaisen tehotiheyden takia se on tärkein energianlähde hitsauksessa. Valokaari näkyy paljaalle silmälle kirkkaana valona ja katsominen suoraan valokaareen paljaalla silmällä on haitallista. [3]

Hitsaustapahtuman onnistuminen edellyttää suojakaasun käyttöä. Suojakaasu eristää hitsaustapahtuman ympäröivältä ilmalta. Suojakaasua kutsutaan myös nimellä hitsausapuaine. [3]

Lämmön ja suojakaasun lisäksi osien liitoskohtaan, jota hitsataan, tuodaan myös lisäainetta. MAG-hitsauksessa käytetään lisäaineena täytelankaa tai umpilankaa. Tässä tutkielmassa keskitytään MAG-täytelankahitsaukseen. Suurlujuusteräket ovat erityisen alttiita kylmähalkeilulle, joten tämän vuoksi etenkin saumattomat täytelangat ovat suosiossa niiden pienen vetypitoisuuden vuoksi [5]. Yleisimmät MAG-hitsauksessa käytettävät lisäaineet ovat rutiilitäytelangat, metallitäytelangat sekä emäksiset täytelangat [3].

3.1 Toimintaperiaatteet ja laitteisto

MAG-hitsauksessa käytettävä laitteisto koostuu virtalähteestä, langansyöttölaitteesta, hitsauspistoolista, maadoituskaapelista, suojakaasujärjestelmästä sekä tarvittavista kaapeleista. Hitsatessa langansyöttölaite syöttää lisäainelankaa hitsauspolttimelle.

Hitsauspistooli välittää hitsausvirran, suojakaasun sekä lisäainelangan hitsattavalle alueelle. Hitsausvirta kulkee johdinta pitkin virtalähteestä pistoolin kärjessä sijaitsevaan kosketussuuttimeen. Tästä suuttimeesta virta siirretään hitsauslankaan. Näiden osien lisäksi on maadoituskaapeli. Jotta sähköpiiri sulkeutuisi oikein, on maadoituskaapeli kiinnitettävä työkappaleeseen mahdollisimman hyvällä kontaktilla. Jos maadoituskaapeli on huonosti kiinni, hitsausprosessi ei toimi oikein ja valokaaresta tulee epävakaa.

Hitsausprosessin hallinnassa olennaisessa osassa ovat langansyöttölaite sekä virtalähde. Tyypillisesti käytetään vakiovirtalähdettä, josta säädetään hitsausjännite halutulle tasolle. Hitsausvirta puolestaan säätyy automaattisesti langansyöttönopeuden mukana. MAG-hitsaus prosessina onkin anteeksiantava, jos käyttäjä vie hitsauspistoolin yllättäen kauemmas työkappaleesta. Tällöin valokaari pitenee, jolloin myös jännite nousee ja hitsausvirta pienenee. Virran pienentyessä lanka sulaa hitaammin, jolloin langan etäisyys työkappaleeseen palautuu. Tämä toimii myös toiseen suuntaan, kun pistooli viedään lähemmäs kappaletta. Tällöin virta nousee ja lanka alkaa sulaa nopeammin, jolloin etäisyys kappaleeseen palautuu jälleen alkuperäiseen. [3]

3.2 Lisäaineen siirtymistavat

MAG-täytelankahitsauksessa aineensiirtymistapoja on kaksi. Aine voi siirtyä joko suihkuna tai pisaroina. Siirtymistapa riippuu hitsauksessa käytetyistä muista arvoista ja tyypeistä, kuten hitsausvirrasta, lisäainelangan tyyppistä sekä käytettävästä suojakaasusta. [3]

3.3 Suojakaasut

Oikeanlainen suojakaasu on erittäin tärkeä osa onnistunutta hitsausprosessia. Vääränlainen suojakaasu voi johtaa epätoivottuihin tuloksiin hitsatessa ja sen jälkeen. Kosmeettiset virheet, kuten roiskeet, hitsin epätoivottu muoto ja pinnanlaatu johtuvat

usein ongelmista suojakaasun kanssa. Myös rakenteelliset ominaisuudet määräytyvät pitkälti suojakaasun käytöstä.

Hitsin tiiviys sekä vetypitoisuus saadaan oikeanlaisiksi, kun suojakaasu on oikea ja sitä käytetään oikein. MAG-täytelankahitsauksessa käytettävät metallitäytelangat hitsataan useimmiten seoskaasulla, josta suurin osa on argonia. Yleisimmässä suojakaasussa on 75 % argonia ja 25 % hiilidioksidia. Tämän suojakaasun ISO-standardin mukainen numerotunnus on ISO 14175 – M21 [6], [7]. Myös hiilidioksidilla hitsattavia metallitäytelankoja on olemassa, mutta niiden käyttö on vähäisempää kyseisten lankojen aiheuttamien roiskeiden vuoksi.

Rutiilitäytelankoja voi käyttää vapaammin, niitä voi hitsata joko seoskaasulla tai hiilidioksidilla. Suojakaasu valitaan rutiilitäytelankoja käytettäessä haluttujen hitsausominaisuuksien perusteella. Kun halutaan siisti hitsi ilman roiskeita tai huujuja, valitaan suojakaasuksi seoskaasu. Yleisin seoskaasu on myös rutiilitäytelankojen kanssa 75 % argon, 25 % hiilidioksidi. Tällä kaasulla myös valokaari pysyy vakaana, mikä helpottaa ja vakauttaa hitsaustapahtumaa. Emästytelangat toimivat samalla periaatteella kuin metallitäytelangat. Niitä voi hitsata joko seoskaasulla tai hiilidioksidilla.[8]

Vaikka hiilidioksidin pitoisuus on seoskaasuissa usein alhainen, se on kuitenkin tarpeellinen osa kaasua. Useimmiten hiilidioksidin pitoisuus pyritään pitämään yli 15 %:n, tällä varmistetaan hyvät hitsausominaisuudet. Jos CO₂-pitoisuus on liian alhainen, valokaaren vakaus ja muoto kärsii. Korkeammalla CO₂-pitoisuudella (n. 20 %) varmistetaan oikean muotoinen ja pituinen valokaari. Myös hitsin leveys ja tunkeuma paranee, kun nostetaan CO₂-pitoisuutta seoskaasussa. [9], [10]

Suojakaasun määrä on olennainen osa onnistunutta hitsaustapahtumaa. Suojakaasun virtausta säädetään hitsaustapahtuman, parametrien sekä hitsattavan aineen perusteella. Suojakaasun yleisin käytetty virtausnopeus on 15–25 l/min [3].

3.4 Hitsauslisäaineet

MAG-täytelankahitsauksen lisäaineet jaetaan kahteen ryhmään: metallitäytelankoihin sekä jauhetäytelankoihin. Suurimpana erona näiden kahden välillä täyteaine. Metallitäytelangoissa suurimman osan täytteestä muodostaa metallijauhe, jonka

tehtävänä on muodostaa hitsiainetta. Tämän vuoksi metallitäytelangat eivät muodosta hitsatessa lainkaan kuonaa, koska sitä muodostavat aineet puuttuvat täytteestä. Usein metalli- sekä jauhetäytelangat erotetaan toisistaan kuonan muodostuksen perusteella. Jauhetäytelangat ovat kuonaa muodostavia lankoja. Niiden täyte sisältää hitsiainetta tuottavan metallijauheen lisäksi myös muita aineita, jotka muodostavat hitsiin kuonakerroksen päälle. [3]

Jauhetäytelankoja on kahta erilaista: rutiilitäytelangat sekä emästäytelangat. Näiden lankojen erot löytyvät komponenteista, joista niiden täyte muodostuu. Näissä kahdessa lankatyypissä on lisäksi sisäisiä eroja. Rutiilitäytelankoja on erilaisia riippuen kuonan käyttäytymisestä. Kun hitsataan jalko- tai alapiena-asennossa, muodostuvan kuonan ei tarvitse olla jäykkää, jolloin käytetään jalkohitsauslankaa. Näissä langoissa kuona on löysempää kuin toisessa rutiilitäytelankatyypissä, asentolangoissa. Asentolangoissa kuona on jäykempää, joten hitsaaminen erilaisissa asennoissa helpottuu. Esimerkiksi hitsattaessa alhaalta ylöspäin kuonan täytyy tukea yläpuolelle muodostuvaa hitsisulaa, jottei muodostunut se valu alas kappaletta. [3]

Emästäytelankoja käytetään, kun hitsiaineelta tarvitaan laadullisia ominaisuuksia. Emästäytelankojen hitsiaineen etuja on sen tiiviys, hyvät sitkeysominaisuudet sekä erittäin pienet vetypitoisuudet. Emästäytelangat kestävät myös vetoisuutta hyvin, joten ne eivät ole niin tarkkoja hitsauspaikan valinnan kannalta. [3]

4 Suurlujuusteräket materiaalina

Suurlujuusteräksiksi luokitellaan teräket, joiden myötölujuus liikkuu pääosin 360–690 MPa välissä. Nykypäivänä tosin löytyy myös moderneja suurlujuusteräksiä, joiden myötölujuus voi ylittää jopa yli 1000 MPa. Näitä teräksiä kutsutaan ultralujiksi teräksiksi (UHSS). Suurlujuusteräksille on olemassa omat ISO-standardit. Termomekaanisesti valssattujen hienoraeterästen, joiden myötölujuus > 360 MPA, numerotunnus on ISO/TR 15608 – 2. Yli 360 MPa myötölujuuden nuorutusterästen numerotunnus on ISO/TR – 15608 – 3. [8]

Suurlujuusteräket ovat kevyitä suhteutettuna niiden lujuuteen. Tämän ansiosta teollisuudessa voidaan käyttää yhä pienempiä ainevahvuuksia. Pienemmät ainevahvuudet taas johtavat pienempiin hiilidioksidipäästöihin. Suurlujuusteräksiä käytetään laajalti esimerkiksi autoteollisuudessa sekä laivanrakennuksessa. [11]

4.1 Terästen luokittelu ja ominaisuudet

Suurlujuusteräket voidaan jakaa eri luokkiin sukupolvien avulla. Yleisesti nykyajan edistyneitä suurlujuusteräksiä kutsutaan lyhenteellä (AHSS). Suurlujuusteräksiä (HSS) on käytetty jo 1980-luvulta lähtien. Tällöin suurlujuusteräksien myötölujuus oli 400–500 MPa luokkaa.

Ensimmäisen sukupolven suurlujuusteräksiin kuuluu MS-, DP-, TRIP- sekä CP-teräket. Toiseen sukupolveen luetaan TWIP, L-IP ja AUST SS. Nämä kaksi sukupolvea, varsinkin ensimmäinen on ollut teollisuuden käytössä jo kymmeniä vuosia. Kolmas sukupolvi, johon kuuluu Q&P- sekä TPN-teräket ovat myös laajalti käytössä nykypäivän teollisuudessa. Eniten näitä teräksiä käytetään autoteollisuudessa. Esimerkkinä kolmannen sukupolven teräksistä löytyy teräsvalmistajan SSAB:n lanseeraama Docol-tuoteperhe. Nämä teräket ovat suunnattuja juurikin autoteollisuudelle [12]. Suurlujuusteräksiä valmistetaan erilaisilla menetelmillä, riippuen halutuista ominaisuuksista. [11]

4.2 Mikrorakenne

Mikrorakenne on yksi suurin tekijä, kun puhutaan teräksen hitsattavuudesta.

Suurulujuusteräksille tyypilliset ominaisuudet voidaan saavuttaa pääasiassa kolmella eri tavalla. Niin kuin edellä mainittiin, suurulujuusteräksen valmistustapa riippuu paljon halutuista ominaisuuksista [11].

Kun halutaan korkeaa lujuutta ja hyvää sitkeyttä, valmistetaan teräs karkaisulla ja päästöllä (QT) sekä kuumavalssauksella. Teräs ensin kuumavalssataan, jonka jälkeen suoritetaan karkaisu ja päästö.

Kuumavalssaus suoritetaan austeniittialueella, jossa teräksen rakenne on pehmeää ja helposti muokattavaa. Kuuma metalli ajetaan kahden valssin läpi eli valssataan.

Valssauksessa saavutetaan haluttu ainevahvuus teräkselle. Valssauksen jälkeen teräksen annetaan jäähtyä ennen karkaisua ja päästöä. Karkaisussa teräs kuumennetaan takaisin austeniittialueelle, eli austenitoidaan. Kun teräs on ollut austeniittialueella tarvittavan ajan, se jäähdytetään nopeasti eli sammutetaan.

Sammutus tapahtuu yleensä öljyyn tai veteen, riippuen teräksen ominaisuuksista, kuten karkenevuudesta ja kappaleen koosta. Sammutuksen ideana on estää pehmeän ferriittirakenteen syntyminen ja saada teräkselle haluttu martensiittirakenne.

Martensiitti omaa suuren kovuuden, mutta on todella haurasta. Eri teräkset vaativat eri jäähtymisnopeuden, jotta haluttu martensiitti muodostuu. Tätä jokaiselle teräkselle ominaista jäähtymisnopeutta kutsutaan kriittiseksi jäähtymisnopeudeksi. Martensiitin haurauden vuoksi teräs ei ole käyttövalmis vielä. Tarvitaan lämpökäsittely, jolla saavutetaan tarvittava sitkeys teräkselle. Tämä saavutetaan nostamalla teräksen lämpötila tarvittavan korkealle, eli tekemällä päästö, jotta martensiittipitoisuudet laskevat halutulle tasolle. Yleensä päästö tehdään 150–750 °C lämpötiloissa.

Suurulujuusteräksien päästö tehdään noin 450–700 °C lämpötilassa. Tällöin karkaisun ja päästön yhdistelmästä puhutaan nimellä nuorutus. Nuorutusteräksen lopullinen rakenne koostuu martensiitista ja bainiitista. Bainiitti muodostuu, kun käytännön päästössä jäähdytysnopeus ei ole välttämättä täysin sama kappaleen jokaisessa kohdassa. Vajaa jäähdytysnopeus kappaleen eri kohdissa aiheuttaa sen, ettei austeniitti muutu kokonaan pelkäksi martensiitiksi, vaan ohessa muodostuu myös bainiittia. [8], [13]

Toinen tapa, jolla saadaan haluttu rakenne teräkselle, on suorakarkaisu (DQ). Siinä tehdään alussa kuumavalssaus, jonka jälkeen kappaleen ei anneta jäähtyä huoneenlämpöön, vaan se sammutetaan heti, yleensä vesisuihkuun. Tällä saadaan estettyä austeniitin muuttuminen pehmeäksi ferriitiksi, samoin kuten nuorrutuksessa. DQ teräksen rakenne koostuu bainiitista, martensiitista tai molemmista. Erona tässä menetelmässä nuorrutukseen (QT) on korkeampi kovuus lopputuloksena, joka mahdollistaa paremman hitsattavuuden alhaisemman hiiliekvivalentin avulla. [11]

Ultralujia teräksiä (UHSS) valmistetaan termomekaanisella kuumavalssauksella. Tässä menetelmässä kuumavalssaus suoritetaan austeniittialueella, rekristallisaatiolämpötilan alapuolella. Valssauksen jälkeen suoritetaan suora sammutus, eli hitaan jäähtymisen sijaan teräs jäähdytetään nopeasti takaisin huoneenlämpötilan lähelle. Näin estetään jälleen pehmeän ferriitin muodostuminen. Tässäkin menetelmässä lopputuloksena teräksen rakenne on martensiittia ja bainiittia. [8], [11], [14]

Nykyään on myös muita valmistusmenetelmiä, esimerkiksi autoteollisuudelle suunnatussa sammutus ja osittaminen (Q&P) -menetelmässä saadaan vähennettyä komponenttien painoa säilyttäen teräksen korkea sitkeys ja lujuus. Ensin teräs austenitoidaan eli lämmitetään austeniittitasolle. Sitten teräs sammutetaan ensimmäisen kerran, jotta muodostuu martensiittirakenne. Tämän jälkeen tulee osittamisvaihe, eli terästä pidetään vakio- lämpötilassa, jonka aikana hiili siirtyy pois martensiitista austeniittiin. Osittamisen jälkeen teräs sammutetaan uudelleen, huoneenlämpöön. Lopputuloksena saadaan mikrorakenne, joka koostuu martensiitista sekä jäännösausteniitista. [14], [15]

4.3 Hiiliekvivalentti (CE)

Teräksen hitsattavuuden mittarina käytetään usein hiiliekvivalenttia. Se kertoo, kuinka helposti teräs karkaistuu hitsauksen lämpövaikutusvyöhykkeellä (HAZ).

Suurulujuusteräksien hitsauksessa usein vastaan tuleva ongelma on kylmähalkeilu.

Tämä liittyy hiiliekvivalenttiin, korkea hiiliekvivalentti mahdollistaa martensiitin

muodostumista lämpövaikutusvyöhykkeellä (HAZ). Tiivistettynä korkea hiiliekvivalentti lisää martensiitin muodostumista HAZ:illa ja se vuorostaan lisää riskiä kylmähalkeilulle. Kun teräksen CEV on yli tietyn rajan (n. 0,4–0,45 %) on suositeltavaa käyttää esilämmitystä ennen hitsaustapahtumaa kylmähalkeilun estämiseksi. Teräksen valmistustavalla on suuri vaikutus hiiliekvivalenttiin. Esimerkiksi termomekaanisella kuumavalssauksella valmistetut teräkset omaavat alhaisen hiiliekvivalentin ja siksi eivät usein tarvitse esilämmitystä ennen hitsausta [11]. Hiiliekvivalentti lasketaan SFS-EN 1011-2:2001 standardin mukaan kaavalla 1 [8].

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

5 Suurlujuusterästen hitsattavuus ja haasteet

HSS terästen hitsaukseen liittyy monia huomioon otettavia seikkoja ja ongelmia. HSS teräkset ovat erityisen herkkiä vetyhalkeilulle, joka onkin suurin ongelma niiden hitsauksessa. Yleisesti terästä pidetään hyvänä hitsattavana ilman tarvetta esimerkiksi esilämmitykselle, kun $CEV < 0,4$ [8].

Puhuttaessa ultralujista teräksistä (UHSS), jotka valmistetaan suorakarkaisulla (DQ) ongelmaksi hitsattavuudessa huomataan myös standardien vajaavaisuus. Usein hitsausstandardit koskevat vanhempia, pienemmän lujuuden omaavia teräksiä. Suorakarkaistujen UHSS terästen niukkaseosteisuus näkyy pehmenemisenä HAZ alikriittisellä SCHAZ ja interkriittisellä ICHAZ alueella johtuen hitsauksen lämpösyklistä. [14]

5.1 Lämmöntuonti ja jäähtymisaika

Lämmöntuonnin kanssa täytyy tasapainoilla, kun halutaan saada aikaiseksi hyvä liitos. Liian suuri lämmöntuonti leventää pehmenyttä aluetta ja heikentää vetolujuutta. Liian pieni lämmöntuonti hitsiin vuorostaan nostaa aineen kovuutta, jolloin riski säröilylle kasvaa.

Jäähtymisaikaa valittaessa täytyy miettiä, mitä ominaisuuksia halutaan vaalia. Kun halutaan säilyttää liitoksen iskutkeysominaisuudet mahdollisimman hyvin, valitaan jäähtymisajaksi 2–10 sekuntia. Usein kuitenkin halutaan ottaa huomioon liitoksen kokonaislaatu, eikä vain tiettyä ominaisuutta. Tällöin jäähtymisaika lyhenee 2–4 sekuntiin. Tämä jäähtymisaika on todettu optimaaliseksi, kun lämmöntuonti on noin 0,5 kJ/mm ja hitsausnopeus 1 m/min. [14]

5.2 Vetyhalkeilu

Vetyhalkeilua esiintyy, kun teräksen rakenteen sisään jää pieniä loukkuja (engl. traps), joiden sisään vety jää. Myöhemmin tämä vety voi päästä vapautumaan teräksen osiin, joissa jännitys on suurta ja aiheuttaa halkeilua. Tämä ilmiö on ongelma varsinkin, kun puhutaan suurlujuusteräksistä. Mitä lujempi teräs on, sitä herkempi se on

vetyhalkeilulle. Halkeilua ei aina tapahdu, vaikka teräksen rakenteessa olisi loukkuja. Varsinkin hitailla venymänopeuksilla teräksen alttius halkeilulle kasvaa. Tällöin vety kerääntyy kohtiin, joissa jännitys on suurta ja aiheuttaa halkeilua.

Erilaiset epämuodostumat, kuten naarmut sekä lovet nostavat teräksen alttiutta vetyhalkeilulle. [16], [17]

5.3 Muutosvyöhykkeen (HAZ) ongelmat

Suurlujuusteräksien hienojakoinen mikrorakenne muuttuu herkästi lämmöntonnin seurauksena. Tämän takia lämmöntontiin kiinnitetään suurta huomiota hitsatessa. Mikrorakenteen muuttuminen aiheuttaa suurta rakenteen pehmenemistä, joka heikentää liitosta. Muutosvyöhykkeellä tapahtuvan pehmenemisen vaikutukset riippuvat paljon liitostyypistä. HAZ-alueella tapahtuva pehmeneminen ei ole niin haitallista, kun puhutaan pienahitsiliitoksista. Näissä liitoksissa kuormitus usein ohjataan poikittaisesti perusaineeseen. Päittäisliitoksissa herkästi syntyvät hitsikuvut aiheuttavat rasituksen ohjautuvan pehmenneelle HAZ-alueelle. [2], [14], [17], [18]

5.4 Hitsausvirheet

Hitsauksessa pyritään minimoimaan hitsausvirheet, jotta liitoskohta olisi mahdollisimman vahva. Hitsausvirheiksi luetaan SFS 3052 sanastostandardin mukaan ”epäjatkuvuudet hitsissä tai poikkeamat hitsin muodossa”. Epäjatkuvuudet hitsissä tarkoittaa esimerkiksi aloitus- ja lopetuskohtia kesken hitsin. Tämä ei niinkään ole ongelma, kun hitsausmenetelmänä on MAG. Kuitenkin muilla hitsausmenetelmillä tulee paljon aloitus- sekä lopetuskohtia hitsiin. Esimerkiksi puikkohitsauksessa näitä tulee paljon, koska hitsauspuikot kuluvat nopeasti, tällöin puikko tulee vaihtaa uuteen. Poikkeamat hitsin muodossa vuorostaan tarkoittavat joukkoa erilaisia virheitä, jotka vaikuttavat eri tavalla hitsin kestävyys ja muotoon. Esimerkkejä on aiemmin mainittu vetyhalkeilu, joka on ongelmana erityisesti suurlujuusteräksien hitsauksessa. Lisäksi hitsausvirheiksi luokitellaan reunahaavat, liitosvirheet, vajaa hitsautumissyvyys, kuuma- sekä kraaterihalkeamat sekä läpi palaminen. Hitsausvirheitä on monia erilaisia,

siitä syystä onkin kehitetty virheille oma kansainvälinen standardi ISO 5817. Siinä virheet jaetaan ryhmiin ja jokaiselle virheelle on oma numerotunnus. [3], [19]

6 Prosessinhallinta

Hitsausarvojen valvonta sekä säätö ovat keskiössä, kun puhutaan suurlujuusterästen hitsauksesta. Kuten aiemmin mainittu, lämmöntuonti sekä jäähtymisaika ovat kriittisimmät tekijät teräksen ominaisuuksien säilymisen kannalta.

6.1 Esilämmitys ja palkojen välinen lämpötila

Esilämmityksen tarkoituksena on minimoida riskit vetyhalkeilulle. Esilämmitys hidastaa jäähtymistä, joka edesauttaa vedyn poistumista. Teräkset jaetaan hiiliekvivalentin avulla helposti hitsattaviin sekä vaikeasti hitsattaviin. Yleisesti kun $CEV < 0,41$, on teräs helposti hitsattavaa, eikä se vaadi erityistoimenpiteitä, kuten esilämmitystä. Vaikka hiiliekvivalentin perusteella teräs olisi helposti hitsattavaa, esilämmitys voi olla tarpeen, kun puhutaan paksuista levyistä. [20]

6.2 Hitsausparametrien ikkuna

Verrattuna tavallisiin teräksiin, suurlujuusteräokset ovat paljon tarkempia hitsausparametreista. Optimaalisten parametrien löytäminen tarkkaa, koska pienikin muutos tietyssä parametrissa vaikuttaa suuresti.

MAG-hitsauksen on huomattu olevan optimaalisin menetelmä, koska sillä saadaan pidettyä lämmöntuonti maltillisena, menettämättä tunkeumaa.

MAG-hitsatessa lämmöntuonnin maksimiksi on asetettu 1,5 kJ/mm, hitsatessa S700MC-terästä. [11]

7 Yhteenveto

Työssä tarkasteltiin suurlujuusteräksien MAG-täytelankahitsausta ja siinä huomioitavia kriittisiä tekijöitä. Havaittiin, että suurlujuusterästen hitsauksen kaksi keskeisintä haastetta ovat alttius vetyhalkeilulle sekä lämpövaikutusvyöhykkeen (HAZ) mikrorakenteen pehmeneminen. Vetyhalkeilun riskiä voidaan tehokkaimmin torjua käyttämällä alhaisen vetypitoisuuden omaavia, saumattomia täytelankoja sekä soveltamalla esilämmitystä tapauksissa, joissa materiaalin hiiliekvivalentti (CEV) tai ainevahvuus on suuri. Lämpövaikutusvyöhykkeen mekaanisten ominaisuuksien säilyttäminen puolestaan edellyttää jatkuvaa tasapainoilua lämmöntuonnin ja jäähtymisajan välillä. Optimaalisen iskusitkeyden ja kokonaislaadun saavuttamiseksi jäähtymisaika on usein rajoitettava vain muutamiiin sekunteihin (2–10 s).

Yhteenvetona voidaan todeta, että suurlujuusteräksien onnistunut suurlujuusterästen MAG-hitsaus perustuu pitkälti tarkkaan prosessinhallintaan. Toisin kuin tavanomaisilla teräksillä, hitsausparametrien sallittu alue on erittäin kapea, ja pienetkin poikkeamat esimerkiksi lämmöntuonnissa vaikuttavat lopputulokseen merkittävästi. Laadukkaan ja kestäväen hitsiliitoksen takaaminen ei siis vaadi vain oikeiden lisäaineiden ja suojakaasujen valintaa, vaan ennen kaikkea materiaalin mikrorakenteen käyttäytymisen syvällistä ymmärrystä sekä hitsausarvojen jatkuvaa valvontaa.

Lähteet

- [1] S. Aliksson ja M. Henningsson, "Why Aren't Advanced High-Strength Steels More Widely Used?", *J. Ind. Ecol.*, vol. 19, nro 4, s. 645–655, elo 2015, doi: 10.1111/jieec.12212.
- [2] T. Lahtinen, P. Vilaça, P. Peura, ja S. Mehtonen, "MAG Welding Tests of Modern High Strength Steels with Minimum Yield Strength of 700 MPa", *Appl. Sci.*, vol. 9, nro 5, tammi 2019, doi: 10.3390/app9051031.
- [3] J. Lukkari, *Hitsaustekniikka: perusteet ja kaarihitsaus*. Helsinki: Opetushallitus, 1997.
- [4] "ISO 4063:2023", SFS Suomen Standardit. Viitattu: 22. huhtikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://store.sfs.fi/fi/iso-4063-2023>
- [5] A. Holzner, "MAG welding of high-strength fine-grained structural steel with powder cored wires", *Weld. Int.*, vol. 28, nro 6, s. 446–460, kesä 2014, doi: 10.1080/09507116.2012.753227.
- [6] "SFS-EN ISO 14175:2008/AC:2015", SFS Suomen Standardit. Viitattu: 22. huhtikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://store.sfs.fi/fi/sfs-en-iso-14175-2008ac-2015>
- [7] "SFS-EN ISO 14175:2008", SFS Suomen Standardit. Viitattu: 22. huhtikuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://store.sfs.fi/fi/sfs-en-iso-14175-2008>
- [8] A. Kirjoittaja Kyröläinen, *Hitsauksen materiaalioppi. Osa 1, Metalliopin perusteet, terästen luokittelu ja valmistus, rakenneterästen käyttäytyminen hitsauksessa, murtuminen ja korroosio*, [Toinen painos]. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y., 2019.
- [9] X. (崔雪菲) Cui, J. (陈姬) Chen, M. (陈茂爱) Chen, ja C. (武传松) Wu, "Investigating arc and molten metal transport phenomena in gas metal arc welding with Ar-CO₂ gas mixtures using a numerical method", *Phys. Fluids*, vol. 36, nro 3, s. 033123, maaliskuu 2024, doi: 10.1063/5.0194395.
- [10] Y. Zhao, X. Shi, K. Yan, G. Wang, Z. Jia, ja Y. He, "Effect of shielding gas on the metal transfer and weld morphology in pulsed current MAG welding of carbon steel", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 262, s. 382–391, joulukuu 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.07.003.
- [11] "Kandidaatintyo_Hannu Lund.pdf". Viitattu: 3. maaliskuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/129978/Kandidaatintyo_Hannu%20Lund.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [12] "Docol® Autoteollisuuden teräslaadut", SSAB. Viitattu: 11. maaliskuuta 2026. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.ssab.com/fi-fi/brandit-ja-tuotteet/ssab-docol/autoteollisuuden-teraslaadut>
- [13] H. 1 Geng ym., "Achieving 1.7 GPa Considerable Ductility High-Strength Low-Alloy Steel Using Hot-Rolling and Tempering Processes", s. 4495, 2024, doi: 10.3390/ma17184495.
- [14] T. Skriko, "DEPENDENCE OF MANUFACTURING PARAMETERS ON THE PERFORMANCE QUALITY OF WELDED JOINTS MADE OF DIRECT QUENCHED ULTRA-HIGH-STRENGTH STEEL".

- [15] I. I. Sabirov *ym.*, "Advanced High-Strength Steels by Quenching and Partitioning", s. 1419, 2021, doi: 10.3390/met11091419.
- [16] J. Venezuela, Q. Liu, M. Zhang, Q. Zhou, ja A. Atrens, "A review of hydrogen embrittlement of martensitic advanced high-strength steels", *Corros. Rev.*, vol. 34, nro 3, s. 153–186, 2016, doi: 10.1515/correv-2016-0006.
- [17] O. Vähäkainu, *Hitsaajan opas 1998: Rautaruukin teräkset*, 2. p. Raaha: Rautaruukki, 1997.
- [18] T. Lahtinen, P. Vilaça, P. Peura, ja S. Mehtonen, "MAG Welding Tests of Modern High Strength Steels with Minimum Yield Strength of 700 MPa", tammi 2019, doi: 10.3390/app9051031.
- [19] J. I. Liu, K. T. S. of M. T. Li, ja B. U. Transportation, "Intelligent Metal Welding Defect Detection Model on Improved FAST-PNN", s. 1523, 2022, doi: 10.3390/coatings12101523.
- [20] N. J. den Uijl *ym.*, "Prediction of Post Weld Hardness of Advanced High Strength Steels for Automotive Application using a Dedicated Carbon Equivalent Number", *Weld. World*, vol. 52, nro 11, s. 18–29, marras 2008, doi: 10.1007/BF03266679.