

Iiro Sippola

HITSAUSMENETELMIEN VAIKUTUKSET HITSAUSVÄÄRISTYMIIN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Jorma Vihinen
Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Iiro Sippola: Hitsausmenetelmien vaikutukset hitsausvääristymiin
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Huhtikuu 2023

Hitsauksesta seuraa aina lämpökuormaa työkappaleeseen, mikä aiheuttaa hitsausvääristymiä, jos niitä ei etukäteen oteta huomioon. Hitsausvääristyminen aiheuttaa taipuneita kappaleita, jotka eivät sovi yhteen toisien osien kanssa. Vääristymisen takia työkappaleille joudutaan jättämään myös suuremmat työstövarat, jotka kasvattavat materiaali- ja työstökonekustannuksia. Vääristyneiden kappaleiden oikominen siis kuluttaa aikaa ja rahaa, mikä voidaan välttää oikean hitsausmenetelmän, ennaltaehkäisymenetelmien ja oikean materiaalivalinnan kautta. Työssä keskitytään materiaaliltaan teräksisiin ohutlevyihin eli noin 0,5–5 mm vahvuisiin levyihin, joissa hitsausvääristymät näyttelevät tärkeää osaa. Työn tarkoituksena on tuottaa tutkimustietoa, joka auttaisi hitsausmenetelmien ja -materiaalien valinnassa silloin, kun halutaan välttää hitsausvääristymiä.

Työ jakaantuu kolmeen pääluokkaan, joista ensimmäinen käsittelee erilaisia hitsausmenetelmiä ja niiden välisiä eroja ja erojen syitä. Toisessa pääluvussa käsitellään hitsausvääristymien ennaltaehkäisymenetelmiä, jotka ovat myös tärkeässä osassa muodonmuutosten välttämiseksi. Kolmantena pääluokana työssä vertaillaan eri terästyyppien hitsattavuutta ja niiden välisiä vääristymäherkkyyksiä. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksen muodossa, eikä siihen sisällynyt käytännön kokeita.

Työstä selvisi, että laserhitsaaminen tarkemmin avaimenreikälaserhitsaus tuottaa vähiten vääristymiä työkappaleeseen. Laserhitsauksen lisäksi myös elektronisuihkuhitsaus tuottaa todella vähän vääristymiä. MIG/MAG-hitsaus näyttää tuottavan yleisesti vähemmän muodonmuutoksia kuin TIG-hitsaus, vaikka joissain sovellutuksissa tilanne voikin kääntyä päinvastaiseksi. Laserhitsausta sekä kaasukaarihitsausprosesseja voidaan myös pulssittaa, jolloin työkappaleen lämpökuormaa saadaan vähennettyä, mutta silloin hitsausnopeus pienenee ja hitsausprosessi muuttuu epävakaammaksi. Ennaltaehkäisymenetelmiä löytyy useita, joista monet ovat yksinkertaisia asioita, kuten oikea hitsausjärjestys taka-askelhitsaamalla, hitsauskiinnittimien eli jigien ja juuritukien käyttäminen sekä huolellinen silloitushitsaus. Terästyypeistä selviää, että austeniittiset vakioteräokset ja austeniittis-ferriittiset eli duplex teräokset ovat parhaiten hitsattavia. Näistä kahdesta terästyyppistä duplex-teräoksen hitsaus on haastavampaa, mutta se tuottaa vähemmän hitsausvääristymiä.

Avainsanat: hitsaus, hitsausvääristymät, hitsausmuodonmuutokset, terästyyppit

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TERÄSLEVYJEN HITSAUSMENETELMÄT	3
2.1 Kaasukaarihitsausmenetelmät	4
2.1.1 MIG/MAG-hitsaus	5
2.1.2 TIG-hitsaus	7
2.2 Laserhitsaus	10
2.2.1 Avaimenreikälasershitsaus	12
2.2.2 Sulattava lasershitsaus	14
3. MUODONMUUTOSTEN VÄLTÄMISMENETELMÄT TERÄSLEVYLLÄ	15
3.1 Hitsausjärjestys	15
3.2 Teräslevyjen esivalmistelut	16
3.3 Pulssihitsaus	17
4. TERÄSTYYPPIEN VAIKUTUKSET VETELYYN	19
4.1 Austeniittiset ruostumattomat teräkset	19
4.2 Ferriittiset ruostumattomat teräkset	20
4.3 Austeniittis-ferriittiset (duplex) -teräkset	21
4.4 Martensiittiset ruostumattomat teräkset	23
5. YHTEENVETO	25
LÄHTEET	27

LYHENTEET JA MERKINNÄT

FEM	Finite Element Method
HAZ	Heat Affected Zone
GMAW	Gas Metal Arc Welding
MIG	Metal Inert Gas welding
MAG	Metal Active Gas welding
TIG	Tungsten Inert Gas welding
EB	Electron Beam Welding
°	aste
°C	celsiusaste
K	kelvinaste
m	metri
cm	senttimetri
mm	millimetri
nm	nanometri
Hz	hertsi
W	watti

1. JOHDANTO

Hitsauksesta seuraa aina lämpökuormaa työkappaleeseen, mikä aiheuttaa hitsausvääristymiä, jos niitä ei etukäteen oteta huomioon. Hitsausvääristymisen eli vetelyn tai hitsausmuodonmuutosten huomioimatta jättäminen aiheuttaa rumasti taipuneita kappaleita, jotka eivät sovi yhteen toisien osien kanssa. Vääristyneiden kappaleiden oikominen kelvolliseksi on kallista ja aikaa vievää, minkä takia hitsausvääristymien mittaaminen ja ennaltaehkäiseminen on erityisen tärkeää. Työkappaleille voidaan jättää pienemmät työstövarat, jos hitsausvääristymät pystytään pitämään hyvin kontrollissa, minkä ansiosta tuotteiden valmistamisen materiaali- ja työstökonekustannukset ovat pienemmät. Erityisesti ohuet kappaleet, joihin tarvitaan sauman kestävyuden takia paljon hitsiä, ovat herkkiä lämpövääristymille. Tässä työssä keskitytäänkin ohutlevyjen eli paksuudeltaan 0,5 mm – 5 mm teräslevyjen hitsausmenetelmiin ja niiden hitsausvääristymien tarkasteluun.

Hitsausalalla on viime vuosina yleistynyt myös uudenlaisia menetelmiä, joiden avulla hitsausvääristymiä voitaisiin paremmin kontrolloida ja minimoida. Tällä hetkellä yksi tällainen menetelmä on laserhitsaus, joka on jo maailmalla eniten hyödynnetyimpiä ja tutkituimpia lasertyöstömenetelmiä (Kujanpää et al. 2005, s. 23). Perusaineen ja lisäaineen laajeneminen ja supistuminen hitsausprosessin lämmitys- ja jäähdytysjaksojen aikana aiheuttaa hitsausvääristymiä (Narwadkar & Bhosle 2016). Kiinteytymisen jälkeen lisäaine sulautuu perusaineeseen ja on suurimmassa laajenemismuodossaan. Jäähtymisen jälkeen työkappale kuitenkin supistuu tilavuuteen, jossa se olisi normaalisti alemmissa lämpötiloissa. Lisäaine on kuitenkin jo kiinni perusaineessa, jolloin muodostuu jännityksiä ja hitsausvääristymiä. Nämä vääristymät voidaan jaotella pitkitäis-, poikittais- ja kulmavääristymiin.

Toiset hitsausmenetelmät ovat herkempiä aiheuttamaan vääristymiä kuin toiset, ja tässä opinnäytetyössä vertaillaan kirjallisuuskatsauksena eri menetelmien aiheuttamia hitsausvääristymiä. Työn alussa käydään läpi yleisimmät teräslevyihin sovellettavat hitsausmenetelmät ja vertaillaan niiden aiheuttamia muodonmuutoksia, jonka jälkeen käsitellään muita muodonmuutosten välttämismenetelmiä. Lopuksi perehdytään erilaisten terästyypin vaikutuksiin muodonmuutoksissa eli vetelyssä, ja kootaan yhteenvetoon tärkeimmät tulokset. Hitsausvääristymiä laajasti vertailevaa suomenkielistä tutkimusta ei ole julkaistu tai helposti yritysten saatavilla, minkä takia tiedon löytäminen on haas-

tavaa. Työn tarkoitus onkin tuottaa tutkimustietoa, joka auttaisi hitsausmenetelmien ja - materiaalien valinnassa silloin, kun halutaan välttää hitsausvääristymiä.

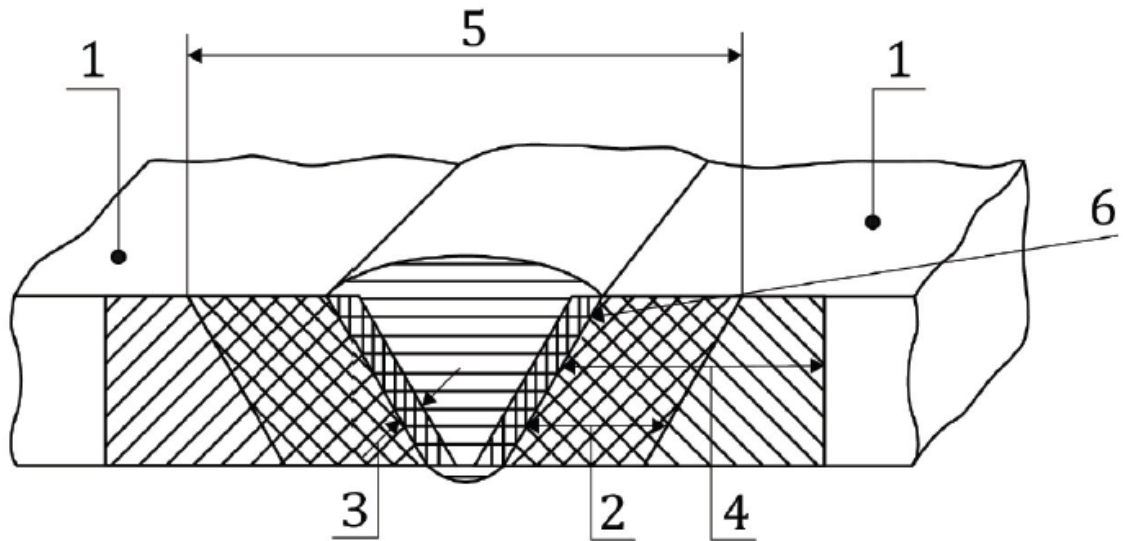
2. TERÄSLEVYJEN HITSAUSMENETELMÄT

Hitsauksessa keskeistä on tuottaa hitsisaumaa työkappaleeseen eli tässä tapauksessa ohueen teräslevyyn siten, että metallien rakeet kiinnittyvät kiinteästi toisiinsa ja huomattavia hitsausvääristymiä ei esiintyisi. SFS 3052 (2020) -standardin mukaan hitsaus on ”liitosmenetelmä, jossa osia liitetetään lisäaineen avulla tai ilman lisäainetta käyttämällä hyväksi lämpöä ja/tai puristusta siten, että osien välillä on jatkuva yhteys”. Jos hitsauksessa käytetään lisäainetta, esimerkiksi lisäainelankaa, lämmöntuonti työkappaleeseen lisääntyy selvästi ja hitsausvääristymiä tulee helpommin. Hitsauksessa käytettävän lisäaineen sulamispisteen on myös oltava suurin piirtein sama kuin perusaineen sulamispiste (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 50).

Monissa tutkimuksissa käytetään tutkimusmenetelmänä ja analysointityökaluna äärellistä elementtimenetelmää eli FEM:iä (engl. *finite element method*). Sillä pystytään tietokoneen avulla numeerisesti laskemaan ja simuloimaan lämmönsiirtoa sekä hitsauskokeiden koekappaleiden lämpövääristymiä. FEM jakaa monimutkaisen ongelman pienempiin ja yksinkertaisempiin osiin, joita kutsutaan äärellisiksi elementeiksi, jotka ratkaistaan numeeristen algoritmien avulla. Se on erityisen kätevä työkalu monimutkaisten ongelmien ratkaisemiseen, minkä analyttiset ratkaisut eivät ole mahdollisia tai käytännöllisiä toteuttaa. 3D-lämpömekaaninen äärellinen elementtimalli eli FEM on mahdollistanut fysikaalisten kokeiden korvaamisen simuloimalla rakenteiden termomekaniikan käyttäytymistä (Naghavi et al. 2012; Zhou, Cao, et al. 2018a; Zhou, Wang, et al. 2018b). FEM on tehokas menetelmä ruostumattomien terästen hitsausprosessin eri levykohdissa tapahtuvan pystysuuntaisen muodonmuutoksen, kulmavääristymien ja pitkittäistaipuman analysoimiseksi (del Coz Diaz et al. 2010). Syntymä- ja kuolematekniikoilla (engl. *birth and death technique*) voidaan parantaa tarkkuutta tai yksinkertaistaa laskentaa, kun koekappaleiden nopeasti muuttuville alueille keskitetään tarkkuutta. Tällä tekniikalla tavallaan kuoletetetaan elementtejä, ja kun elementtejä aktivoidaan uudelleen, syntyneet elementit palautuvat vakioarvoihin.

Hitsausalalle on viime vuosina tullut uutta tekniikkaa, kuten laserhitsausmenetelmiä, joilla mahdollisesti pystytään tuottamaan teräslevyyn vähemmän lämpökuormaa ja täten myös vähemmän hitsausvääristymiä. Laserhitsausmenetelmistä puhutaan myöhemmin tässä luvussa, jossa pääasiassa keskitytäänkin sulahitsaukseen eli hitsaukseen, jossa sulatetaan railopinnat paikallisesti ilman ulkoista voimaa lisäaineen kanssa

tai ilman. Perehdytään seuraavaksi hitsauksen aiheuttamiin vyöhykkeisiin, joiden määritelmää tarvitaan myöhemmin.



Kuva 1. Hitsausliitoksen vyöhykkeet: 1. perusaine, 2. muutosvyöhyke, 3. sulamisvyöhyke, 4. lämpövyöhyke, 5. hitsausvyöhyke, 6. sularaja (SFS 3052 2020, s. 10).

Kuvasta 1 nähdään hitsausliitoksen aiheuttamat erilaiset vyöhykkeet perusaineeseen eli numeroon 1. Muutosvyöhyke eli HAZ (engl. *heat affected zone*) nro 2 on osa sulamatonta perusainetta, johon hitsaus on aiheuttanut mikrorakennemuutoksia. Sulamisvyöhykkeellä (engl. *fusion zone*) eli nro 3 tarkoitetaan kaikessa sulaneessa metallissa eli hitsiaineessa perusaineen sulanutta osaa. Numerolla 4 eli lämpövyöhykkeellä (engl. *heat affected area*) taas tarkoitetaan perusaineen osuutta, jonka lämpötila on hitsauksen aikana ollut työlämpötilaa korkeampi. Hitsausvyöhyke (engl. *weld zone*) nro 5 on hitsiaineen ja muutosvyöhykkeen sisältävä vyöhyke. Numerolla 6 tarkoitetaan sularajaa (engl. *fusion line*) eli hitsiaineen ja sulamattoman perusaineen välistä rajaa. (SFS 3052 2020, s. 6–11)

2.1 Kaasukaarihitsausmenetelmät

Kaasukaarihitsaus eli GMAW (engl. *gas metal arc welding*) voidaan jakaa käytettävän elektrodin mukaan kahteen pääryhmään: sulavaan elektrodi-ryhmään ja sulamattomaan elektrodi-ryhmään. Sulavaa elektrodia käytetään yleisesti MIG-hitsauksessa (engl. *metal inert gas welding*) ja MAG-hitsauksessa (engl. *metal active gas welding*), kun taas TIG-hitsauksessa (engl. *tungsten inert gas welding*) elektrodi on sulamaton. Pistehitsauksessa (engl. *spot welding*) elektrodi on myös sulamaton. Siinä kappaleita puristetaan elektrodien välissä yhteen ja johdetaan sähkövirtaa teräslevyjen läpi, jolloin materiaali sulaa ja muodostuu pistemäinen hitsisauma. Pistehitsausta voidaan tehdä

MIG/MAG-menetelmillä sekä myös TIG-menetelmällä. MIG/MAG-hitsaustekniikat ovat perinteisesti puoliautomaattisia kaasukaarihitsausmenetelmiä, joissa lisäaineena käytettävää lankaa syötetään automaattisesti vakionopeudella suojakaasulla suojattuun hitsauskohtaan, jossa lisäainelangan kärjen ja perusaineen välissä palava valokaari sulattaa lisäainetta ja työkappaleen perusainetta (Lepola et al. 2005, s. 103). Liitettävät pinnat sulavat, minkä jälkeen muodostunut hitsisula jähmettyy hitsisaumaksi.

Kaarihitsausmenetelmien peruseriaatteena on lisäainelangan sulaminen perusaineseen valokaaren ansiosta. Yleensä lisäainelankaa syötetään vakionopeudella langansyöttölaitteiston välityksellä, jolloin langansyöttönopeus ja hitsausvirta ovat riippuvaisia toisistaan. Tämä tarkoittaa sitä, että suuremmalla langansyöttönopeudella tarvitaan myös suurempi hitsausvirta sulattamaan pidempi lisäainelanka. Myös mitä paksumpaa lankaa käytetään, sitä enemmän tarvitaan hitsausvirtaa, jota yleensä säädetään pienentämällä lisäainelangansyöttönopeutta.

2.1.1 MIG/MAG-hitsaus

MIG/MAG-hitsaus eli metallikaasukaarihitsaus on kaasukaarihitsausmenetelmä, jossa valokaari palaa suojakaasun ympäröimänä lisäainelangan ja työkappaleen välillä. Aineensiirtyminen tapahtuu pieninä sulapisaroina lisäainelangan kärjestä hitsisulaan. MIG/MAG-prosessit eroavat toisistaan käytettävän suojakaasun perusteella, ja niissä valokaari on yleensä itsestään säätävä, jolloin valokaari pysyy vakiopituisena hitsauksen aikana.

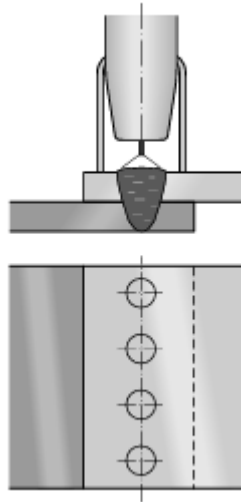
MIG-hitsauksessa käytetään inerttistä, toisin sanoen reagoimatonta eli passiivista suojakaasua. Inerttisenä kaasuna käytetään yleensä argonia (Ar) tai argonin ja heliumin (He) kaasuseoksia. Suojakaasu suojaa hitsisulaa, elektrodia ja lisäainelanganpäätä ilman hapelta ja typeltä, jotka muuten aiheuttaisivat voimakasta hapettumista, huokosia ja seosaineiden poispalamista. MIG-hitsausta käytetään ei-rautametallisiin hitsauskohteisiin esimerkiksi alumiinin, titaanin ja kuparin hitsaukseen (Lukkari 2002, s. 159; Lepola et al. 2005, s. 103).

MAG-hitsauksessa suojakaasuna käytetään aktiivista kaasua, kuten hiilidioksidin ja argonin kaasuseosta (75 % Ar + 25 % CO₂) tai hapen ja argonin kaasuseosta (98 % Ar + 2 % O₂). Hitsaus siis määritellään MAG-hitsaukseksi, jos suojakaasun CO₂- tai O₂-pitoisuus on suurempi kuin 0 %. Suojakaasu antaa valokaarelle edellytykset palaa toivotulla tavalla. MAG-hitsausta käytetään pääasiassa terästen hitsaamiseen (Lukkari 2002, s. 159; Lepola et al. 2005, s. 103).

MAG/MIG-hitsatessa voidaan parametreja säätämällä vaikuttaa valokaareen ja hitsata erityyppisillä kaaritapahtumilla, joilla voidaan osaltaan myös vaikuttaa hitsausvääristymien muodostumiseen. Erilaisia kaaritapahtumia ovat kylmäkaari eli lyhytkaari, seka-kaari, kuumakaari ja pulssikaari. MIG/MAG-hitsauksessa aineensiirtymisen päämekanismeja ovat oikosulkusiirtyminen ja suihkumainen siirtyminen. Oikosulkusiirtymistä tapahtuu lyhytkaarihitsauksessa ja suihkumaista siirtymistä kuumakaarihitsauksessa (Lukkari 2002, s. 169; Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 287).

Lyhytkaarihitsauksessa valokaari siis sammuu jaksottaen lisäainelangan ja perusaineen välillä syntyvien oikosulkujen aikana. Oikosulkuja syntyy lisäainelangan törmätesä perusaineseen, sillä lyhytkaarihitsauksen kaarijännite on alhainen verrattuna lisäainelangansyöttönopeuteen, jolloin valokaaren teho ei ehdi sulattamaan lisäainelankaa tarpeeksi nopeasti. Oikosulun tapahtuessa virta nousee jännitteen pysyessä vakiona, mistä seuraa langan välitön sulaminen ja valokaari syttyy uudelleen (Lepola et al. 2005, s. 115). Valokaari- ja oikosulkuvaiheet toistuvat 30–200 kertaa sekunnissa eli oikosulkuvaiheen taajuus on 30–200 Hz. Valokaaren ajoittaisen sammumisen takia hitsisulan lämpötila ja sulamisvyöhyke ovat pieniä, jolloin myös muodonmuutokset jäävät pienemmiksi (Lepola et al. 2005, s. 115).

MIG/MAG-hitsauslaitteilla voidaan myös hitsata kaksi päällekkäistä levyä toisiinsa pistemäisillä hitseillä eli pistehitsaamalla. Tällöin korkean hitsausvirran aiheuttama tunkeuma sulattaa päällimmäisen levyn läpi myös osan alemmasta levystä. Hitsattavan levyn paksuus on käytännössä 0,5 mm – 5 mm. Eripaksuisten levyjen kanssa läpihitsaus suoritetaan ohuemman levyn puolelta. Pistehitsausta varten MIG/MAG-laitteiston kaasusuutin pitää vaihtaa tukijaloilla varustettuun pistehitsaussuuttimeen ja langansyöttönopeus/hitsausvirta säädetään huomattavasti suuremmaksi kuin normaalissa hitsauksessa. Kuvasta 2 nähdään paremmin tukijaloilla varustettu pistehitsaussuutin, joka helpottaa myös silloitushitsauksia. (Lepola et al. 2005, s. 137–138)



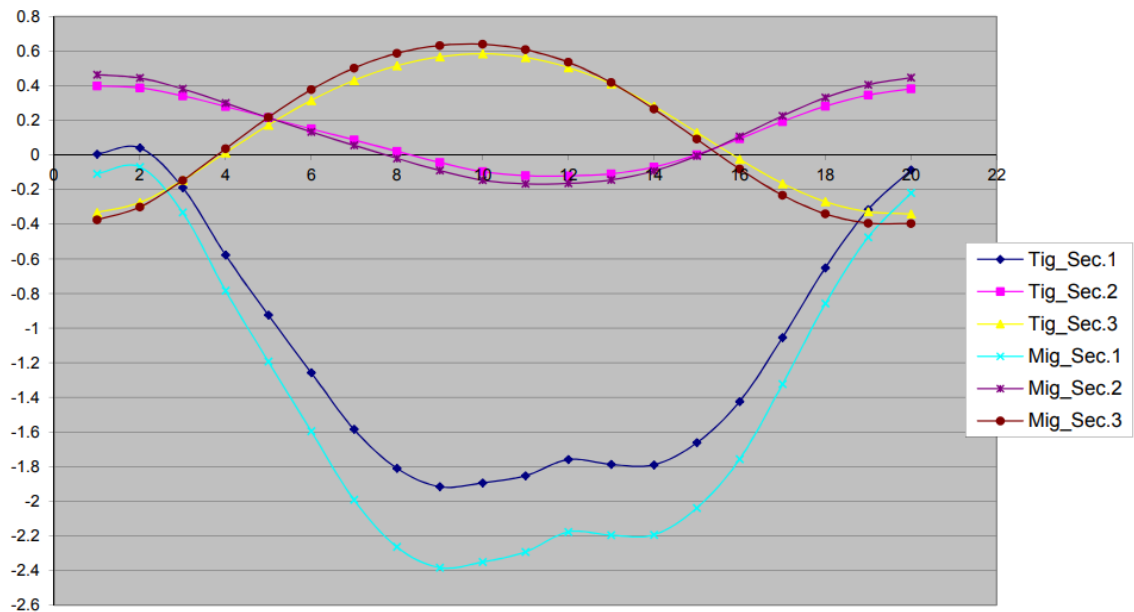
Kuva 2. MIG/MAG-pistehitsaus (Lepola et al. 2005, s. 137).

2.1.2 TIG-hitsaus

TIG-hitsaus on inerttinen kaasukaarihitsausprosessi, jossa valokaari palaa sulamattoman volframielektrodin ja työkappaleen välillä. Valokaaren lämpö sulattaa perusainetta, johon hitsisula muodostuu. Suojakaasuna siinä yleensä käytetään argonia (Ar), joka samalla suojaa elektrodin kuumen kärjen hapettumiselta (Lukkari 2002, s. 249; Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 351; Lepola et al. 2005, s.159). TIG-hitsauksen periaatteellinen ero muihin kaasukaarihitsausprosesseihin, plasmahitsausta lukuun ottamatta, on elektrodin sulamattomuus. Muissa kaasuhitsausprosesseissa lisäainelanka tai puikko toimivat sulavina elektrodeina. TIG-hitsausta voidaan suorittaa ilman lisäainetta tai lisäaineen kanssa, ja sen yhtenä etuna onkin riippumaton lämmön- ja lisäaineentuonti. Käsin hitsatessa mahdollinen lisäaine tuodaan toisella kädellä hitsauslankana hitsisulaan, johon se sulaa. TIG-hitsaus soveltuu monien eri metallien hitsaamiseen, ja teräksistä sillä pystyy hitsaamaan ruostumattomia, haponkestäviä, seostamattomia ja niukkaseosteisia teräksiä sekä valurautaa (Lepola et al. 2005, s. 159–160). Sen tyypillinen aineenpaksuusalue on 0,5–1,5 mm, jota paksummat työkappaleet hitsataan taloudellisesti muilla hitsausprosesseilla (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 351). MIG/MAG-pistehitsauksen tavoin myös TIG-pistehitsaamalla voidaan hitsata levyjä päällekkäisliitoksella. Läpihitsattavan levyn paksuus saa olla enintään 2 mm. (Lepola et al. 2005, s. 190)

Naghavin et al. (2012) kirjoittamassa artikkelissa vertaillaan yksilanka TIG- ja MIG-hitsausmenetelmien vaikutuksia halkaisijaltaan 274 mm, seinämän vahvuudeltaan 6,2 mm ja materiaaliltaan SUS304 olevissa putkissa tapahtuvia hitsausvääristymiä. Kyseisessä vertaisarvioidussa artikkelissa on muodostettu suhteellisen tarkka FEM-malli mo-

lemmista menetelmistä, mikä on validoitu samanlaisen toistettavan kokeellisen työn perusteella. Kyseisessä kokeellisessa työssä oli automaattinen TIG-ympärihitsauskone edistyneellä järjestelmäohjauksella, joka voi ohjata samanaikaisesti virtalähdettä, putkea pyörittävää istukkaa, hitsauspoltinta, inerttikaasua (Ar) ja automaattista langansyöttölaitetta (Sattari-Far & Javadi 2008). Juuriväliä ei käytetty ja siltahitsejä oli 4 kappaletta. Vaikka tässä kandidaatintyössä keskitytään pääasiassa teräslevyjen muodonmuutoksiin, on putkien ympäri hitsaaminen yksi yleisimmin käytetyistä liittämisprosesseista teollisuudessa ja ne kuvaavat tarpeeksi hyvin eroja eri hitsausmenetelmien välillä. Hitsauksen aikana käytetty erittäin epätasainen lämpötilakenttä aiheuttaa vääristymiä putken lopullisessa geometriassa ja putkien yleisin vääristymä on halkaisijan muutos. Työkappaleeseen kohdistetaan hitsauksessa erittäin monimutkainen lämpökierto, joka aiheuttaa peruuttamattomia elastoplastisia muodonmuutoksia muutosvyöhykkeen (HAZ) ympärillä (Naghavi et al. 2012). Lämpökierron avulla vääristymien numeerinen simulointi on tarkkaa työtä, mutta mahdollista. Simuloinnissa pitää ottaa tarkasti huomioon muun muassa lämmönsiirto, metallurgiset muutokset ja mekaanisten kenttien vuorovaikutukset (Naghavi et al. 2012). Lämmöntuontiin liittyvistä ilmiöistä pitää huomioida ainakin hitsauskaari, materiaalien vuorovaikutus ja nestedynamiikka hitsisulassa.



Kuva 3. Hitsausvääristymien vertailu MIG- ja TIG-hitsaustekniikoilla (Naghavi et al. 2012).

Kuvasta 3 nähdään austeniittisen ruostumattoman teräsputken FEM simuloidut muodonmuutokset kolmella eri mittausetäisyydellä V-liitoksesta. Vertailun vuoksi FEM-malli on muodostettu MIG- sekä TIG-hitsaustekniikoille, mittausetäisyyksien ollessa 10 mm, 150 mm ja 290 mm. FEM-tulosten tulosten ja kokeellisten mittausten välinen poik-

keama 10 mm mittausetäisyydellä on vain noin $\pm 10\%$ eli simulointi kuvaa hitsausta tarkasti. Kuvasta 3 huomataan, että suurimmat vääristymät tulevat etäisyydeltä 10 mm eli V-liitoksen lähimmältä mittausetäisyydeltä. Tässä kohdassa MIG-menetelmän maksimivääristymä on -2,4 mm ja TIG-menetelmän -1,9 mm, joten vääristymäpoikkeama 10 mm etäisyydellä on 0,5 mm. Etäisyyksillä 150 mm ja 290 mm vääristymäpoikkeamat ovat jo paljon pienempiä. Maksimivääristymä on etäisyydellä 150 mm MIG-menetelmällä 0,465 mm ja TIG-menetelmällä 0,4 mm eli maksimipoikkeama on enää noin 13 % 10 mm mittausetäisyyden poikkeamasta. 290 mm päässä V-liitoksesta simuloituna maksimivääristymä on MIG-menetelmällä 0,64 mm ja TIG-menetelmällä 0,59 mm, jolloin poikkeama on 0,05 mm eli 10 % etäisyyden 10 mm poikkeamasta. Tästä voidaan päätellä, että mitä kauemmaksi hitsisaumasta mennään, sitä vähemmän näiden kahden hitsausmenetelmän aiheuttamien vääristymien välillä olisi FEM-mallin mukaan eroa toisiinsa. MIG- ja TIG-menetelmien välillä havaitaan enemmän hitsausvääristymän poikkeamaa lähellä putken aksiaalihitsisaumaa menetelmien erilaisten lämpötilajakaumien takia (Naghavi et al. 2012). Tästä voidaan tehdä päätelmä, että MIG-hitsauksessa muodostuu enemmän vääristymiä kuin TIG-hitsauksessa, koska MIG-hitsausmenetelmällä työkappaleeseen keskittyy enemmän lämpöä (Naghavi et al. 2012).

Taulukkoon 1 on koottu hitsausvääristymiä, jotka selvästi mukailevat kuvan 4 esittämiä lämmöntuonteja eri hitsausmenetelmillä. Kyseisessä taulukossa on työkappalemateriaalina käytetty RAEX HSF 640 -hienoraeterästä. Taulukon 1 perusteella TIG-hitsaus tuottaa enemmän hitsausvääristymiä kuin MAG-hitsaus, jota voi hitsausvääristymien kannalta verrata hyvin myös MIG-hitsaukseen. Toisaalta edellisessä kappaleessa todetaan Naghavin et al. (2012) tekemään vertaisarvioituun artikkeliin perustuen, että hie-man ohutlevyä paksumpaa putkea ympäri hitsatessa TIG-hitsaus tuottaa pienemmän maksimivääristymän kaikilta kolmelta etäisyydeltä simuloituna.

Taulukko 1. Hitsausvääristymät eri hitsausmenetelmillä, perustuu lähteeseen (Martikainen 1993, Kyröläinen & Lukkari 2002 mukaan).

Perusaine: hienoraeteräs RAEX HSF 640				
Levynpaksuus: 4 mm				
Koekappale: 4 x 75 x 300 mm				
Mittapituus: 225 mm				
Hitsausprosessi	Kutistuma pituussuuntaan (%)	Kutistuma poikittaissuuntaan (%)	Taipuma pituussuuntaan (mm)	Kulmamuodonmuutos (°)
MAG	0,12	0,2	1,5	2,2
TIG	0,18	0,6	4,0	4,0
Jauhekaari	0,29	0,4	6,0	3,2
Plasma	0,10	0,05	1,3	1,0

2.2 Laserhitsaus

Laserhitsaus on yleistynyt viime vuosina paljon uusien sovelluskohteiden myötä. Aikaisemmin sitä on käytetty paljon autoteollisuudessa ja nykyään sen sovellutuksia etsitään aktiivisesti myös konepajateollisuuden puolella. Laserhitsaus on konepajasovelluksissa yleensä syvätunkeuma- eli avaimenreikähitsausta (engl. *keyhole laser welding*) (Kujanpää et al. 2005, s. 158). Laserhitsauksen yleistymisen esteenä on sen asettamat tiukat vaatimukset liitettävien kappaleiden tarkkuudelle. Se edellyttää tarkkojen osien käyttämistä, missä hitsausrillot ovat hyvälaatuisia, tarkkaa kiinnitintekniikkaa sekä suurta tarkkuutta lasersäteen liikuttelussa (Kujanpää et al. 2005, s. 157).

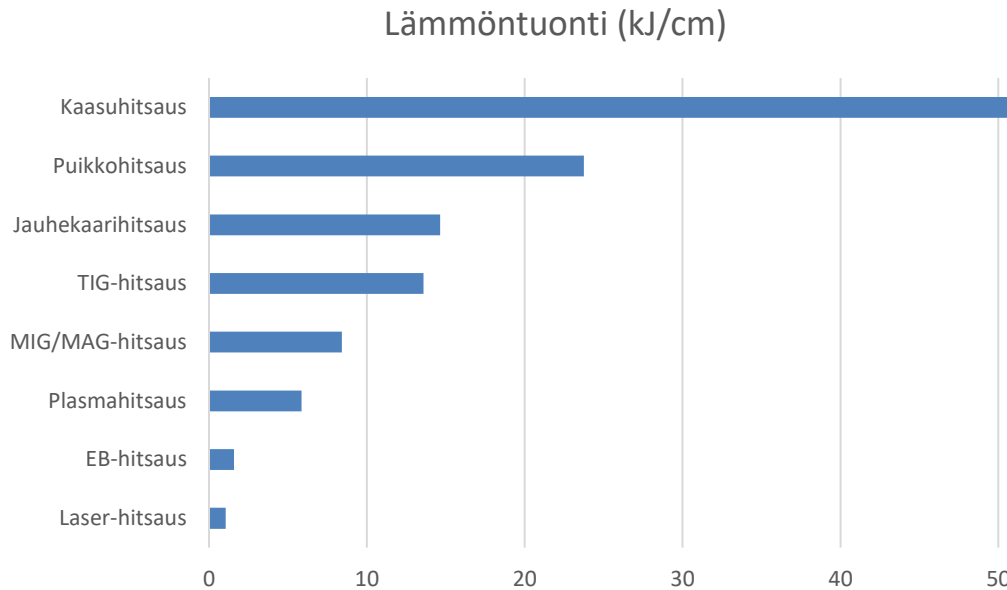
Laserhitsauksen suuri etu on pienet muodonmuutokset, mikä tarkoittaa pientä hitsauksen jälkeisten työvaiheiden määrää, mikä taas tarkoittaa rahan sekä ajan säästämistä. Pienet muodonmuutokset mahdollistavat myös esikoneistettujen osien hitsaamisen ilman loppukoneistustarvetta. Paras tapa minimoida laserhitsauksen aiheuttamia muodonmuutoksia on valita sopivat parametrit, kuten laserteho, hitsausnopeus, polarisaatio ja polttopisteen koko (Kujanpää et al. 2005; Zhou, Cao, et al. 2018a; Zhou, Wang, et al. 2018b). Laserhitsaus on tarkka prosessi, jossa muodonmuutoksia syntyy helposti laserhitsauksen aikana, jos hitsausparametrit ovat väärin. Tällöin muodonmuutokset heikentävät merkittävästi hitsausliitoksen laatua, erityisesti lujuuden ja mittatarkkuuden

osalta (Zhou, Cao, et al. 2018a). Taulukkoon 2 on koottu materiaaliltaan RAEX 640 hienoraeteräksen päittäisliitoksen muodonmuutokset laserhitsattuna ja muilla hitsausmenetelmillä hitsattuna. Myös taulukossa 1 käytetään materiaalina RAEX 640 hienoraeterästä, joten tulosten pitäisi olla keskenään vertailukelpoisia. Päittäisliitoksella tarkoitetaan liitosta, jonka osien pinnat ovat 135°–180° kulmassa toisiinsa nähden (SFS 3052 2020, s. 16).

Taulukko 2. Laserhitsauksen aiheuttamat muodonmuutokset verrattuna perinteisiin hitsausmenetelmiin, perustuu lähteeseen (Salminen 1987, Kujanpää et al. 2005 mukaan).

Menetelmä	TIG	Plasma	Laser	EB
Teho (kW)	3	6	60	6
Siirretty teho (kW)	2	4	5	5
Hitsausenergia (kJ/mm)	0,7	0,4	0,15	0,15
Hitsausnopeus (m/min)	0,2	0,6	2	2
Poikittainen kutistuma (mm)	0,6	0,05	≈ 0	≈ 0
Kulmavetäytymä (°)	4	1	≈ 0	≈ 0

Taulukosta 2 huomataan se, että laser- ja elektronisuihkuhitsauksessa (EB) suuri siirretty teho ei näy työkappaleen hitsausenergiassa läheskään niin paljon kuin esimerkiksi TIG-hitsauksessa. Huomataan myös se, että tässä diplomityössä tutkittu poikittainen kutistuma (mm) ja kulmavetäytymä (°) ovat sekä laserhitsauksessa että elektronisuihkuhitsauksessa mitättömiä verrattuna TIG-hitsaukseen. TIG-hitsauksen huonoja puolia avaimenreikähitsaukseen verrattuna ovat alhainen tunkeuma ja tuottavuus, suuri hitsipalon koko ja lämpövääristymät (Ion 2005). Avaimenreikähitsaus on kilpailukykyistä, kun valmistelemattomaan levyyn tarvitaan kapea ja täysin läpäisevä hitsausauma.



Kuva 4. Hitsausmenetelmien lämmöntuonnit 4 mm paksun teräslevyn hitsauksessa, perustuu lähteeseen (Weman 1997, Kyröläinen & Lukkari 2002 mukaan).

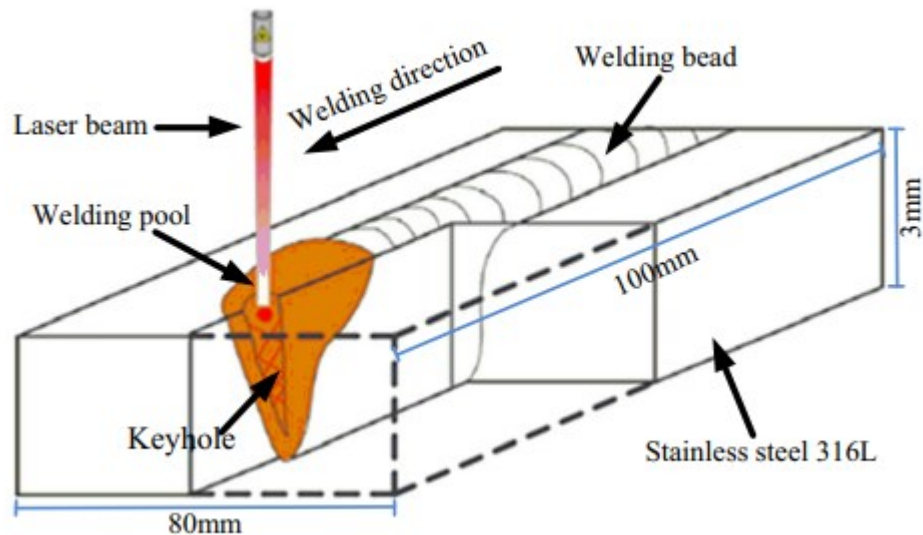
Kuvassa 4 on esimerkki lämmöntuonnista 4 mm paksuun ohutlevyyn eri hitsausmenetelmillä. Kyseinen esimerkki kuvaa hyvin ohutlevyn hitsausta yhdellä palolla, mutta tilanne voi olla erilainen paksujen levyjen hitsauksessa. Kuvasta 4 nähdään myös selvästi, että suuren energiatihedysten prosessit laser- ja elektronisuihkuhitsaus (EB-hitsaus) tuovat työkappaleeseen paljon muita menetelmiä vähemmän lämpöä, minkä ansiosta niissä muodostuu hitsausvääristymiä vain vähän. Täysin samaan lopputulokseen päästään myös taulukossa 2. Energiatiheys kuvaa lämmöntuonnin keskittymistä. Pienelle alueelle keskittyvä energia merkitsee pientä lämmöntuontia, suurta hitsausnopeutta, rakennemuutosten tapahtumista hyvin kapealla muutosvyöhykkeellä (HAZ) ja pieniä hitsausmuodonmuutoksia (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 265–266). Suuri energiatiheys saa siis aikaan syvän ja kapean tunkeuman, joka merkitsee myös pienempiä hitsausmuodonmuutoksia.

2.2.1 Avaimenreikälasershitsaus

Avaimenreikähitsauksessa suuritehoiseksi säde fokusoidaan työkappaleen pintaan tai noin 25 % aineenpaksuudesta pinnan alapuolelle, jolloin materiaaliin höyrystyy kapea ja syvä tunkeutuva reikä (Ion 2005; Kujanpää et al. 2005). Avaimenreikähitsaus on yksi harvoista fuusioliitosprosesseista, jotka pystyvät tuottamaan riittävästi tehoa voittaakseen nopean lämpövirtauksen korkean lämmönjohtavuuden omaavissa seoksissa (Ion 2005). Reikä pysyy hitsauksen aikana auki tasapainolla höyrönpaineen sekä ympäröivän sulan materiaalin aiheuttamien voimien välillä. Avaimenreiän synty-

minen teräkseen vaatii $10^6 W/cm^2$ säteen tehoitiheyden (Kujanpää et al. 2005, s. 159). Teollisilla lasersäteillä on monta eri tehoitiheyden suuruusluokkaa. Ne voivat saavuttaa jopa $10^8 W/cm^2$ tehoitiheyden, vaikka tällaista tehoitiheyttä onkin vaikea hallita ja normaalisti avaimenreikähitsausta suoritetaan noin $10^6 W/cm^2$ tehoitiheydellä (Ion 2005, s. 2). Laserin tehoa laskiessa rakenneteräksille karkeana kaavana voidaan pitää seuraavaa: 1,5 mm paksuista terästä kohden tarvitaan 1 kW tehoa 1 m/min hitsausnopeudella (Ion 2005, s. 2). Vastaavia suhteita löytyy muillekin materiaaleille.

Avaimenreikähitsauksessa lämmöntuonti on erilaista kuin perinteisemmillä menetelmillä. Säde absorboituu avaimenreiän reunoista usean sisäisen heijastuksen avulla, jolloin lämpö jakaantuu tasaisesti koko ainepaksuudella ja muutosvyöhyke (HAZ) on kapea ja yhdensuuntainen hitsipalon kanssa (Ion 2005; Kujanpää et al. 2005). Konventionaalisessa hitsauksessa taas lämpö tuodaan työkappaleen pinnalle, josta se johtuu ja sekoittuu syvemmälle perusaineeseen. Hitsaussauman aiheuttamat vääristymät johtuvat pääasiassa kuvassa 5 nähtävän hitsisulan (engl. *welding pool*) lämpötilakentän muutoksista hitsausprosessin aikana (Zhou, Cao, et al. 2018a). Tämä hitsisula on kokonaan sulaa materiaalia ja se ympäröi avaimenreikää (engl. *keyhole*) (Ion 2005), kuten myös kuvasta 5 nähdään. Avaimenreikähitsauksessa on pienen lämmöntuonnin, kapean muutosvyöhykkeen (HAZ) ja suuren hitsausnopeuden takia paljon lyhyempi jäähtymisaika kuin esimerkiksi kaarihitsausmenetelmillä (Kujanpää et al. 2005; Zhou, Cao, et al. 2018a).

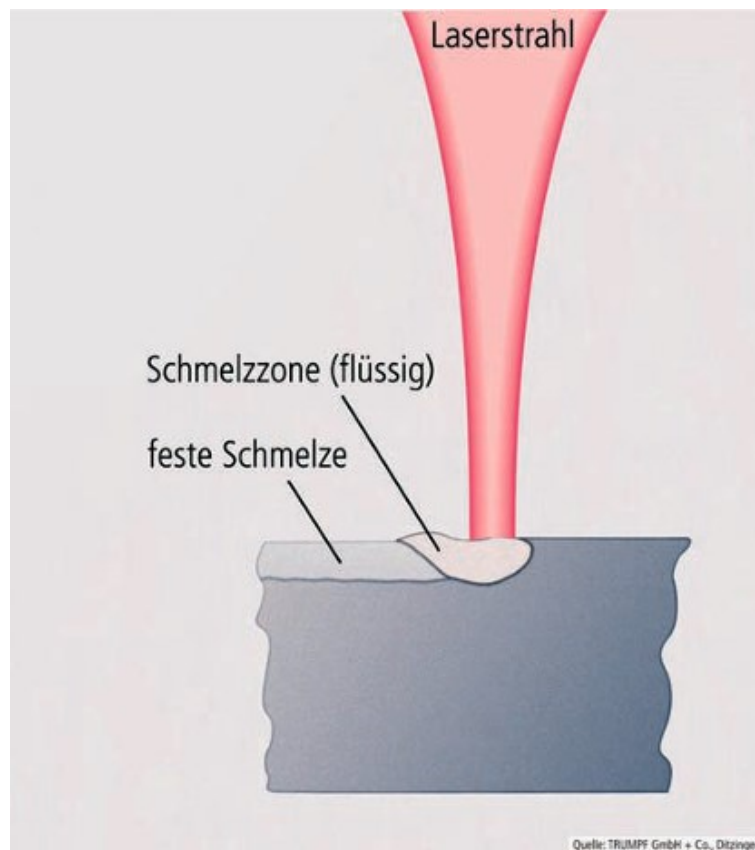


Kuva 5. Avaimenreikähitsaus (Zhou, Cao, et al. 2018a; Zhou, Wang, et al. 2018b).

2.2.2 Sulattava laserhitsaus

Avaimenreikähitsauksen edellytyksenä on tarvittavan rajatehotiheyden $10^6 W/cm^2$ saavuttaminen. Kuitenkin jos tehotiheys ei ole tarpeeksi suuri lasertehon tai polttopisteen koon takia, laserhitsaus on sulattavaa. (Kujanpää et al. 2005, s. 159) Sulattava laserhitsaus muistuttaa yleisempiä kaarihitsausmenetelmiä, kuten MIG/MAG-hitsausta, sillä siinä lasersäde samanlailla kuumentaa materiaalin pinnan ja lämpö siirtyy materiaalin sisällä johtumalla ja sekoituksen avulla hitsisulassa. Lisäainetta voidaan käyttää molemmilla prosesseilla eli avaimenreikähitsauksessa ja sulattavassa laserhitsauksessa.

Sulattavalla laserhitsauksella saadaan aikaiseksi matalampi ja leveämpi hitsi, kuin aiemmassa aliluvussa puhutulla avaimenreikähitsauksella. Kuvassa 6 on esimerkki sulattavasta laserhitsauksesta, josta nähdään sen pienempi tunkeuma ja matalampi hitsipalko verrattuna avaimenreikähitsaukseen. Verrattuna avaimenreikähitsaukseen sulattavalla laserhitsauksella on kuitenkin pienemmät railotoleranssit ja sillä pystytään hitsaamaan ohuitakin kappaleita, joiden toleranssivaatimukset eivät mahdollista avaimenreikähitsausta (Kujanpää et al. 2005, s. 159). Joissain sovellutuksissa sulattava laserhitsaus onkin paremmin sovellettavissa oleva prosessi kuin avaimenreikähitsaus.



Kuva 6. Sulattava laserhitsaus: Lasersäde (Laserstrahl), Sulamisvyöhyke (Schmelzzone), Jähmettynyt sula (feste Schmelze) (Trumpf 1996, Kujanpää et al. 2005 mukaan).

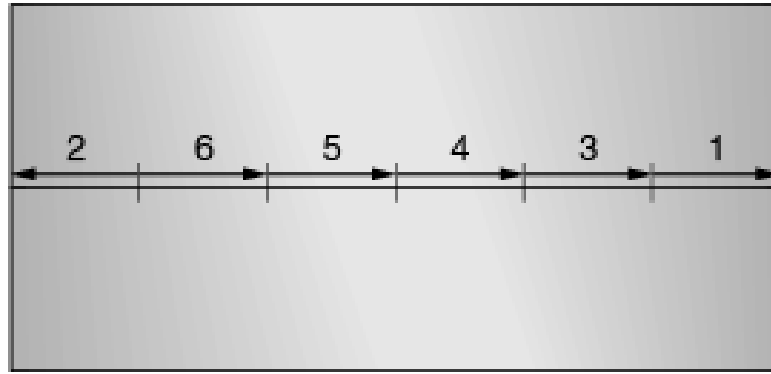
3. MUODONMUUTOSTEN VÄLTÄMISMENETELMÄT TERÄSLEVYLLÄ

Hitsauksen aiheuttamia muodonmuutoksia eli vetelyä voidaan välttää muun muassa oikealla hitsausjärjestyksellä, hitsauksen esivalmisteluilla ja pulssihitsauksella. Esivalmisteluihin kuuluu työkappaleen silloittaminen ja erilaisien hitsauskiinnittimien sekä juuritukien käyttäminen. Pulssihitsauksella saadaan hitsausnopeutta laskemalla pienennettyä lämpökuormaa, hitsausjännityksiä ja niiden myötä vähennettyä muodonmuutoksia työkappaleessa.

3.1 Hitsausjärjestys

Hitsausjännitysten muodostumista voidaan estää vaikeasti hitsattavissa kappaleissa taka-askel-hitsauksella eli hitsausjännitysten eteneminen tavallaan lukitaan pienemmille alueille (Lepola et al. 2005, s. 199). Hitsausjännitykset aiheuttavat työkappaleeseen muodonmuutoksia, joten niiden välttäminen oikealla hitsausjärjestyksellä on tärkeää.

Taka-askelhitsauksella tarkoitetaan hitsauksen suoritustekniikkaa, jossa lyhyitä hitsejä hitsataan vastakkaiseen suuntaan liitoksen hitsauksen yleiseen etenemissuuntaan nähden siten, että loppukohta on edellisen hitsin aloituskohdan päällä (SFS 3052 2020, s. 58). Kuvassa 7 esitetään oikeaoppinen taka-askelhitsausjärjestys, jossa yleinen etenemissuunta on oikealta vasemmalle numerojärjestyksessä. Siinä hitsaaminen aloitetaan oikeasta reunasta nro 1 ja hitsataan lyhyt hitsi vastakkaiseen suuntaan eli vasemmalta oikealle päin. Tämän jälkeen siirrytään vasempaan reunaan nro 2 ja hitsataan lyhyt hitsipalko oikealta vasemmalle. Tällä tavoin lukitaan teräslevy paikoilleen ja seuraavat hitsit hitsataan lyhyinä palkoina vasemmalta oikealle, kun yleinen etenemissuunta säilyy oikealta vasemmalle.



Taka-askelhitsaus
Hitsausjännitysten eteneminen lukitaan

Kuva 7. Hitsausjännitysten etenemisen lukitseminen (Lepola et al. 2005, s. 199).

3.2 Teräslevyjen esivalmistelut

Silloittaminen on tärkeä työvaihe ennen varsinaista hitsausta. Siinä liitetään rakenteelliset työkappaleet toisiinsa lyhyillä siltahitseillä, jotka pitävät varsinaisen hitsauksen aikana kappaleet oikeassa asennossa toisiinsa nähden. SFS 3052 (2020) -standardin mukaan siltahitsiä käytetään työkappaleiden tai kokoonpanon kiinnittämiseen oikeaan asentoon varsinaista hitsausta varten. Liian suuri lämmöntuonti silloitusvaiheessa puolestaan aiheuttaa muodonmuutoksia ja jättää ilmarakoja kappaleiden väliin (Jernström 2019). Ruostumattomien teräslevyjen silloituksia hitsatessa pitää myös huomioida sen noin 1,5-kertaa suurempi lämpölaajenemiskerroin rakenneteräksiin verrattuna. Ilmarakon kokoa asetettaessa tulee huomioida suurempi lämpölaajeneminen ja ennakoida suuri kutistuminen. (Lepola et al. 2005, s. 199) Riittävän lujilla ja tiheillä siltahitseillä ja oikealla hitsausjärjestyksellä voidaan estää haitallista vetelyä. (Lepola et al. 2005, s. 204)

Levyjen hitsaaminen juurituella pienentää muodonmuutoksia. Juurituella voidaan rakentaa tuki hitsisulalle ja joissain tapauksissa myös muotoilla hitsipalkoa. Sen käytöllä vetely jää vähäiseksi, jolloin hitsaus on mahdollista suurella virralla ja nopeudella. (Lepola et al. 2005, s. 172)

Hitsauskiinnittimien eli jigien käyttäminen on yksi tehokas keino vetelyn hallitsemiseen, jolla saadaan merkittävästi vähennettyä muodonmuutoksia. Niiden tehtävänä on paikoittaa osat ennen hitsausta ja pitää ne paikoillaan hitsauksen aikana. Kiinnitykset perustuvat joko tarkkoihin osiin tai kiinnitysvoimaan, joka paikoittaa kappaleen tarkkaa johdetta vasten. Paineilma soveltuu yleensä hyvin kiinnitysvoiman tuottamiseen. Toisaalta jigi ei saa muuttaa työkappaleen muotoa tai rajoittaa kappaleen hitsattavuutta.

Laserhitsauksessa kiinnittimien paikoitustarkkuuden on oltava huomattavasti parempi (jopa $\pm 0,1$ mm) kuin kaarihitsauksessa, mutta toisaalta kiinnittimiin ei kohdistu suuria voimia, sillä laserhitsauksessa lämmöntuonti on vähäistä (Kujanpää et al. 2005, s. 175). Muodonmuutoksia voidaan estää myös esitaivuttamalla tai asettamalla työkappale ylikulmaan, jolloin hitsisauman jäähtyessä se kutistuu ja vetää kappaleen oikeaan asentoon (Lepola et al. 2005, s. 203). Kappaleen paikoitus kiinnittimeen kannattaa tehdä niin, että säteellä lähestyttävän pinnan paikka tunnetaan eli tuotteesta vain hitsattavan liitoksen on oltava kohdassa, jonka sijainti tunnetaan hitsauksen aikana.

3.3 Pulssihitsaus

Pulssituksella tarkoitetaan tehon vaihtelua säännöllisesti ajan kanssa ja sen tarkoituksena on saavuttaa suurempi tehotiheys. Laserhitsauksessa voidaan soveltaa pulssihitsausta. Suuren tehotiheyden avulla saadaan aikaan syvempi tunkeuma liitokseen ja pienempi lämmöntuonti (Kujanpää et al. 2005, s. 159). Pulssituksen ansiosta lämpövyöhyke siis kapenee, jolloin lämpöherkissä materiaaleissa esiintyy vähemmän muodonmuutoksia. Yleensä pulssihitsauksessa käytetään pulssitettua Nd:YAG- tai CO₂-laseria ja tulevaisuudessa myös diodilaseria tullaan käyttämään näissä sovelluksissa (Kujanpää et al. 2005, s. 159). Pulssitetussa laserhitsauksessa nykyään kuitenkin käytetään eniten jo kuitu- ja diodilasereita, jotka ovat nykyisin tekniikaltaan parempia kuin Nd:YAG-laserit. Nd:YAG-lasereita kuitenkin vielä käytetään paljon tehoa vaativassa pulssihitsauksessa. Laserhitsauksen pulssituksella voidaan käyttää pidempää polttoväliä, jolloin liitoksen tavoiteltavuus on parempi ja optiikkaan osuu vähemmän roiskeita. Toisaalta pulssitetulla laserilla hitsausnopeus on pienempi ja hitsausprosessi epävaakaampi, mistä voi seurata hitsivirheitä kuten kuumahalkeamia ja huokoisuutta (Kujanpää et al. 2005, s. 160).

MIG/MAG-hitsausta voidaan myös suorittaa pulssikaarihitsauksena. Pulssikaarella saadaan aikaan suihkumainen ainesieritys eli kuumakaari myös pieniä virta- ja jännitearvoja käytettäessä, mikä ei ilman pulssitusta olisi käytetyllä langanhalkaisijalla ja keskimääräisellä virralla mahdollista. Ilman pulssitusta hitsaus olisi tällöin lyhytkaari tai sekakaarihitsausta. Pulssikaari saadaan aikaiseksi syöttämällä virtapulseja suurella taajuudella tietyn perusvirran päälle, jolloin aineensieritys tapahtuu virtapulssien aikana. Pulssi-arvot valitaan yleensä niin, että kukin pulssi irrottaa aina vain yhden sulapi-saran. Pulssitaajuus vaihtelee 20–400 Hz välillä ja huippuvirta on yleensä noin kaksinkertainen vakiovirtaan verrattuna. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 287–289)

TIG-hitsauksessa voi myös hyödyntää pulssihitsausta ja sitä voidaan suorittaa tasavirralla sekä vaihtovirralla. Siinä hitsausvirta vaihtelee perusvirran ja pulssivirran eli huip-

puvirran välillä. Pulssivirran aikana muodostuu hitsisula ja tunkeuma, kun taas perusvirran aikana hitsisula jäähtyy ja osittain jähmettyy. Pulssitaajuus on yleensä pieni noin 1–10 Hz eli 1–10 kertaa sekunnissa. Mekanisoidussa hitsauksessa käytetään lisäksi myös suuritaajuisia (20000 Hz) TIG-pulssihitsausta. TIG-pulssihitsauksella voidaan säännöstellä lämmöntuontia, tunkeumaa ja hitsisulan kokoa paremmin kuin jatkuvalla virralla hitsatessa. Pulssihitsauksella päästään parempaan tunkeumaan kun jatkuvalla virralla, mutta pienemmällä lämmöntuonnilla (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 352). Pääasiassa sitä käytetään ohuiden materiaalien, kuten teräsohutlevyjen hitsauksessa, ja sen käyttäminen pienentää hitsausjännityksiä ja muodonmuutoksia. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 352; Lepola et al. 2005, s. 166)

4. TERÄSTYYPPIEN VAIKUTUKSET VETELYYN

Teräs on määritelty rautapohjaiseksi (Fe) metalliseokseksi, jossa hiilipitoisuus (C) on alle 1 %. Ruostumattomaksi teräksen tekee kromi (Cr). Kromin ansiosta teräksen pintaan muodostuu todella ohut, noin muutamien kymmenien nanometrien paksuinen oksidikerros (Kyröläinen & Lukkari 2002, s.10). Ruostumattomilla teräksillä on kyky vastustaa korroosiota eli syöpymistä, mikä johtuu suurilta osin passivaatiosta eli suojaavan oksidikerroksen vaikutuksesta korroosiota vastaan (Kyröläinen & Lukkari 2002; Kujanpää et al. 2005; Lepola et al. 2005). Ruostumattomien terästen ruostumattomuus ja syöpymättömyys saadaan aikaiseksi seosaineilla, joista tärkein korroosionkestoa parantava seosaine on siis kromi. Sitä täytyy ruostumattomuuden aikaan saamiseksi olla teräksessä vähintään 12 % (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 10; Lepola et al. 2005, s. 196). Vähiten seostetulla eli 12 % Cr-pitoisuuden omaavalla ruostumattomalla teräksellä syöpymisnopeus pienenee jo voimakkaasti, mutta syöpymiskestävyyttä voidaan parantaa edelleen nostamalla Cr-pitoisuus 16–18 % tasolle, mikä on tavallisimpien ruostumattomien terästen kromipitoisuus (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 10). Ruostumattomia teräksiä on neljää eri päätyyppiä: austeniittinen, ferriittinen, austeniittiferriittinen eli duplex-teräs ja martensiittinen. Kujanpää et al. (2005) toteavat, että näistä päätyypeistä selvästi eniten käytetään austeniittisiä ruostumattomia teräksiä, yli 90 %.

Hitsausvirheitä voi syntyä epäedullisten hitsausolosuhteiden (hitsausnopeus, -virta), teräksen epäedullisen peruskoostumuksen tai teräksen epäpuhtauksien vuoksi (Kyröläinen & Lukkari, 2002). Materiaalien metallurgia on tärkein niiden hitsattavuutta määrittävä tekijä (Kyröläinen & Lukkari 2002; Kujanpää et al. 2005). Korkea hiilipitoisuus (yli 0,25 %) aiheuttaa ongelmia karkenemisen ja kuumahalkeilun vuoksi. Laserhitsaukselle erityisen ongelmallisia materiaaleja ovat sellaiset materiaalit, joilla on hyvä lämmönjohtavuus ja suuri heijastavuus käytettävän laservalon aallonpituudelle. Tavalliset teräkset, seostamattomat teräkset ja ruostumattomat teräkset ovat erittäin hyvin laserhitsattavia. (Kujanpää et al. 2005, s. 169–173)

4.1 Austeniittiset ruostumattomat teräkset

Suurin osa ruostumattomista teräksistä kuuluu austeniittisiin teräksiin, jotka ovat ei magneettisia ja karkenemattomia. Austeniittiset ruostumattomat teräkset voidaan jakaa kolmeen ryhmään: ruostumattomiin teräksiin, haponkestäviin teräksiin ja tulenkestäviin

teräksiin. Ne sisältävät kromia (Cr) 18–20 %, nikkeliä (Ni) 8–12 % ja usein myös molybdeenia (Mo) 1–4 % (Lepola et al. 2005, s. 196). Molybdeenin sekoittaminen teräkseen lisää syöpymiskestävyyttä, kun taas suuri kromi- ja nikkelseostus tekee teräksestä tulenkestävän. Kromi- ja molybdeenipitoisuutta voidaan tarvittaessa nostaa jopa Mo-pitoisuuteen 7–8 %, kun tavoitellaan austeniittisia erikoisteräksiä, mutta samalla pitää nostaa myös nikkelpitoisuutta. Haponkestävissä teräksissä käytetään vakioteräksen seostuksen rinnalla molybdeeniä pitoisuudella 2–3 %. Pelkät austeniittiset vakioteräokset ovat kuitenkin jo monipuolisia erinomaisen muovattavuuden ja hitsattavuuden ansiosta. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 10)

Austeniittisilla teräksillä on noin 50 % suurempi lämpölaajenemiskerroin kuin seostamattomilla teräksillä. Lisäksi niiden lämmönjohtavuus on noin 65 % pienempi kuin seostamattomilla teräksillä, mikä johtaa hitaaseen hitsausalueen jäähtymisnopeuteen. (Kyröläinen & Lukkari 2002; Lepola et al. 2005) Näiden fysikaalisten ominaisuuksien takia hitsausjännitykset ovat pistemäisiä ja niiden aiheuttamat vetelyt ovat huomattavasti suurempia seostamattomiin teräksiin verrattuna. Ruostumattomilla teräksillä on yleisestikin noin 5–7 kertainen ominaisvastus verrattuna seostamattomaan teräkseen, joten lämpöä syntyy enemmän samalla hitsausvirralla (Lepola et al. 2005, s. 197). Suuren ominaisvastuksen takia ruostumattomalle teräkselle tarkoitettujen hitsauspuikkojen virransietokyky on huono, ja ne ovat lyhyempiä kuin seostamattomille teräksille tarkoitetut puikot.

4.2 Ferriittiset ruostumattomat teräkset

Ferriittiset ruostumattomat teräkset ovat kromi- tai kromi-molybdeeni-teräksiä, joissa nikkelpitoisuudet yleensä ovat alle 0,5 % (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 16). Ferriittisten terästen lujuus on korkeampi kuin austeniittisten terästen, ja myös niissä pääseosaineena käytetään kromia yleisillä seosainepitoisuuksilla 12 % ja 17 %. Tulenkestävissä ferriittisissä teräksissä kromipitoisuus on 17–30 %. (Lepola et al. 2005, s. 196) Kromipitoisuuden kasvaessa korroosion- ja hapettumisenkestävyys paranevat korkeissa lämpötiloissa, mutta samalla teräksen hitsaus ja käsittely hankaloituvat (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 225). Ferriittisissä teräksissä käytetään kromin lisäksi seosaineen siis myös molybdeenia, nikkeliä sekä mahdollisesti lisäksi piitä (Si), niobia (Nb) ja titaania (Ti). Titaanin avulla ferriittiä voidaan stabiloida, jolloin teräs säilyy täysin ferriittisenä korkeissakin lämpötiloissa (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 17). Titaanipitoisuutena voidaan käyttää esimerkiksi 0,4 prosenttia, jolloin voidaan sanoa teräksen olevan Ti-stabiloitu. Ferriittisiä teräksiä käytetään Suomessa aika vähän, mutta uusien paremmin

hitsattavien teräslaatuojen ansiosta niiden kulutus on kuitenkin kasvamassa (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 17–18).

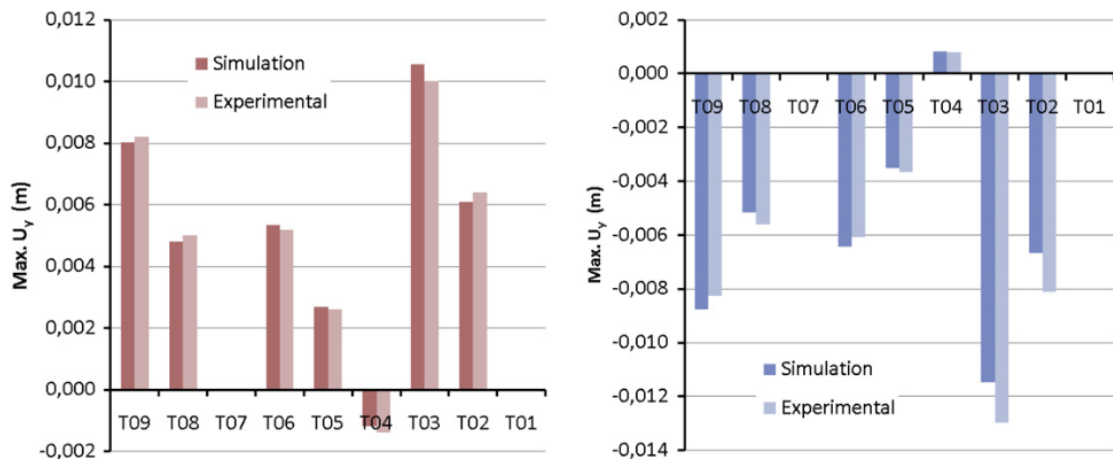
Ferriittisten terästen hitsaaminen voidaan jaotella stabiloimattomiin ja stabiloituihin ferriittisiin teräksiin. Joissain lähteissä niukkahiilliset ferriittis-martensiittiset teräkset ovat luokiteltu ferriittiseksi teräkseksi, mutta tässä työssä ne luokitellaan martensiittisten terästen alle, koska muutosvyöhyke (HAZ) muuttuu martensiittiseksi hitsatessa. Stabiloimattomat ferriittiset teräkset sisältävät yleensä hiiltä 0,1 % asti, jolloin korkeassa lämpötilassa (yli 850°) muodostuu austeniittia ja samanaikaisesti raekoko kasvaa (yli 900°:ssa). Teräksen jäähtyessä nopeasti austeniitti muuttuu martensiitiksi. Hitsauksessa tällä tavalla syntynyt isorakeinen martensiittinen mikrorakenne haurastaa perusainetta muutosvyöhykkeellä (HAZ). Tällaisen hitsatun teräksen muutosvyöhyke saadaan kuitenkin hyvinkin sitkeäksi lämpökäsittelyn avulla. Haurastumisen takia stabiloimattomien ferriittisten terästen hitsattavuus on huono. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 226)

Stabiloitujen ferriittisten terästen hitsattavuus on stabiloimattomia teräksiä parempi, vaikka joissain stabiloiduissakin teräksissä havaitaan pieniä määriä martensiitin muodostumista ja siitä johtuvaa haurautta. Stabiloitujen terästen hitsattavuutta rajoittaa pääasiassa raekoon kasvaminen ja siitä johtuva hauraus, minkä takia hitsaukseen suositellaan mahdollisimman pientä hitsausenergiaa. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 226–227)

4.3 Austeniittis-ferriittiset (duplex) -teräkset

Ruostumattomien duplex-terästen nimi seuraa niiden sisältämästä kahdesta eri kiderakenteesta. Siinä on sekaisin austeniittista eli pintakeskeistä kuutiollista kiderakennetta ja ferriittistä eli tilakeskeistä kuutiollista kiderakennetta. Duplex-teräkset ovat kromi-nikkeli- ja kromi-nikkeli-molybdeeni-teräksiä (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 18). Näiden pääseosaineiden pitoisuudet on tasoitettu siten, että austeniittia ja ferriittiä on suurin piirtein saman verran. Riittävä austeniitin osuus mikrorakenteessa takaa teräksen hitsausauman sitkeyden. Duplex-teräkset ovat erittäin matalahiillisiä ja hiilipitoisuudet ovat enintään 0,03 %. Niiden hitsattavuus on hyvä, mutta hitsaus on kuitenkin vaativampaa kuin austeniittisen vakioteräksen hitsaus, koska liitokseen on saatava oikea austeniittis-ferriittinen mikrorakenne ja hitsisula ei ole niin juoksevaa kuin vakioteräksellä (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 199). Nykyaikainen tyypillinen hyvin hitsattava duplex-teräksen koostumus on 22 % Cr – 5 % Ni – 3 % Mo (EN 1.4462) tai vastaava kromi-nikkeli-teräs on koostumukseltaan 23 % Cr – 4 % Ni (EN 1.4362).

Duplex-terästen käyttökohteet ovat lisääntyneet viime aikoina, erityisesti kemian-, öljy- ja kaasuteollisuudessa sekä esimerkiksi massa- ja paperiteollisuudessa, niiden erinomaisen korroosiokestävyyden ja mekaanisten ominaisuuksien vuoksi (Kyröläinen & Lukkari 2002; del Coz Diaz et al. 2010). Duplex-terästen lujuus on noin kaksinkertainen verrattuna austeniittiseen teräkseen, lisäksi sillä on suuri pintakovuus (Lepola et al. 2005; del Coz Diaz et al. 2010). Duplex-terästen lämpölaajeneminen ja lämmönjohtavuus ovat hiiliteräksen ja austeniittisen teräksen väliltä. Duplex-teräksellä on austeniittista ruostumatonta terästä korkeampi lämmönjohtavuus ja pienempi lämpölaajenemiskerroin, minkä myötä duplex-teräs ei aiheuta niin suuria lämpöjännityksiä työkappaleeseen kuin austeniittinen teräs (del Coz Diaz et al. 2010). Myös Lepola et al. (2005) toteavat, että duplex-teräkset toimivat hyvin hitsatessa pienen lämpölaajenemiskertoimen ansiosta, jolloin muodonmuutokset jäävät pieniksi.



Kuva 8. Ruostumattoman duplex-teräksen (kuvassa vas.) ja austeniittisen teräksen (kuvassa oik.) pystysuuntaiset muodonmuutokset lämmön vaikutuksesta (del Coz Diaz et al. 2010).

Kuva 8 perustuu del Coz Diaz:n et al. (2010) tekemään tutkimukseen, jossa vertailtiin ruostumattoman duplex-teräksen ja ruostumattoman austeniittisen teräksen hitsausvääristymiä TIG-hitsausmenetelmällä. Kuvasta 8 nähdään yhdeksästä eri mittauspisteestä mitattuna maksimi pystysuuntaiset muodonmuutokset, jotka olivat isompia oikeanpuoleisessa pylväsdiagrammissa eli austeniittisella ruostumattomalla teräksellä. Tutkimus osoitti, että materiaaliominaisuudet voivat vaikuttaa merkittävästi kahden eri ruostumattoman teräksen lopulliseen muotoon. Tässä tutkimuksessa materiaalien välillä huomataan päinvastainen kulmamuodonmuutos ja pituussuuntainen taipuma, kun näitä teräksiä hitsataan samanlaisella TIG-menetelmällä. Erot eivät kuitenkaan loppujen lopuksi ole kovinkaan suuria ja tutkimus tuloksia voidaan soveltaa myös muun tyyppisille hitsausprosesseille. Maksimi pystysuuntainen muodonmuutos saavutetaan katkaisulämpötilassa (engl. *cut-off temperature*), joka on laskennallisesti 1173 K dup-

lex-teräkselle ja 1073 K austeniittiselle teräkselle. Eli myös duplex-teräksen korkeampi katkaisulämpötila viittaa sen paremmuuteen hitsausvääristymien hallinnassa.

4.4 Martensiittiset ruostumattomat teräkset

Martensiittiset ruostumattomat teräkset käsittävät laajan joukon kromiteräksiä, joissa kromipitoisuudet vaihtelevat 12–18 % välillä, nikkeliä voi olla 4 % seospitoisuuteen asti ja myös vähän molybdeeniä voidaan käyttää. Niiden mikrorakenteessa martensiitin rinnalla voi esiintyä myös joko austeniittia tai ferriittia, jolloin martensiittiset ruostumattomat teräkset voi seostuksensa perusteella jakaa kolmeen ryhmään (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 18):

- ferriitis-martensiittiset teräkset (niukkahiiliset 13 % Cr-teräkset)
- martensiittiset teräkset (runsashiiliset 13 % Cr- ja 17 % Cr-teräkset)
- martensiittis-austeniittiset teräkset (erittäin niukkahiiliset 13 % Cr – 4 % Ni, 13 % Cr – 6 % Ni ja 16 % Cr – 5 % Ni)

Martensiittisten terästen hitsattavuus on rajoitetumpaa tai huonompaa kuin austeniittisillä ja ferriittisillä teräksillä, sekä niiden hitsaus vaatii lähes aina erityistoimenpiteitä. (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 18–19; Kujanpää et al. 2005, s. 280). Martensiittiselle ruostumattomalle teräkselle tyypillistä on korkea hiilipitoisuus (yli 0,1 %) ja martensiitin muodostuminen hitsauksen aikana, jolloin hitsisaumasta tulee hauras ja kova. Hitsatessa martensiittinen teräs karkaistuu voimakkaasti, mikä johtaa haurauteen ja halkeiluun. Tämän takia sen hitsattavuus on yleisesti ottaen huono tai erittäin huono.

Korkean hiilipitoisuuden seoksia hitsatessa suositellaan austeniittisen ruostumattoman teräksen käyttöä lisäainelankana, jotta hitsin lujuutta voidaan lisätä ja halkeilua välttää. Haurautta ja halkeilua voidaan kuitenkin välttää myös nostamalla työlämpötila 350 °C:seen ja myöstemällä hitsisauma hitsauksen jälkeen 650–750 °C lämpötilassa. (Kujanpää et al. 2005, s. 280) Myös Kyröläinen & Lukkari (2002, s. 18) toteaa, että martensiittisten ruostumattomien terästen hiilipitoisuudet ovat ferriittisiä korkeampia, koska ne ovat tarkoitettu karkaistavaksi ja päästöehkutuksen avulla teräksiin saadaan hyvä lujuus-sitkeys-yhdistelmä.

Martensiittis-austeniittiset teräkset ovat yleensä valurautateräksiä, joiden tärkein käyttökohde on vesiturbiinit. Ne ovat lujia teräksiä, mutta mikrorakenteensa ansiosta myös huomattavasti sitkeämpiä ja paremmin hitsattavia kuin runsashiiliset eli martensiittiset teräkset (Kyröläinen & Lukkari 2002). Niukkahiilisten ferriittis-martensiittisten terästen hitsattavuus on myös hyvä. Niissä muutosvyöhykkeen tulee olla hitsauksen jälkeen ki-

derakenteeltaan täysin martensiittinen, jolloin teräs on sitkeä myös matalissa lämpötiloissa (Kyröläinen & Lukkari 2002, s. 228–229). Yleisesti erilaisia martensiittisiä ruostumattomia teräksiä käytetään ruokailuvälineissä, työkaluissa, turbiineissa, muoteissa, kiinnittimissä ja höyrykattiloissa.

5. YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli vertailla eri hitsausmenetelmiä ja selvittää, mitkä menetelmät tuottavat vähiten hitsausvääristymiä. Esitellyistä menetelmistä laserhitsaus, tarkemmin avaimenreikälaserhitsaus, tuotti vähiten vääristymiä työkappaleeseen. Myös elektroni-suihkuhitsaus tuottaa todella vähän muodonmuutoksia. Nämä molemmat hitsausmenetelmät ovat sädehitsausprosesseja, joilla on korkeat energiatiheddet. Korkeiden energiatihedysien avulla saavutetaan myös suuri hitsausnopeus, pieni lämmöntuonti ja muutosvyöhyke pysyy kapeana. MIG/MAG-hitsaus näyttää yleisesti tuottavan vähemmän hitsausmuodonmuutoksia kuin TIG-hitsaus. Kuitenkin Naghavin et al. (2012) tekemässä vertaisarvioidussa tutkimuksessa TIG-hitsaus aiheutti noin 26 % pienemmän maksimivääristymän kuin MIG-hitsaus. Toisaalta kyseinen tutkimus suoritettiin hitsaamalla austeniittista teräsputkea eikä teräslevyä, ja seinämän vahvuus oli 6,2 mm eli paksumpi kuin tähän työhön määritelty ohutlevy.

Hitsausvääristymien ennaltaehkäisy menetelmiä löytyi useita kuten hitsausjärjestys taka-askelhitsaamalla, hitsauskiinnittimien eli jigien ja juuritukien käyttäminen sekä huolellinen silloitushitsaus, jossa jätetään oikean kokoinen ilmarako. Myös pulssihitsaus auttaa vähentämään muodonmuutoksia hitsatessa. Sitä voidaan käyttää hyväksi laserhitsauksessa, johon pulssitetut kuitu- ja diodilaserit ovat nykyään parhaiten soveltuvia lasereita. Myös MIG/MAG- ja TIG-hitsausprosesseilla voidaan pulssihitsata sopivilla välineillä. Pulssituksella saadaan lämmöntuontia vähennettyä, mutta hitsausnopeus on pienempi ja hitsausprosessi epävakaampi, mistä voi seurata hitsivirheitä kuten kuuma-halkeamia ja huokoisuutta.

Parhaiten hitsattavia teräksiä ovat austeniittiset vakioteräokset ja austeniittis-ferriittiset eli duplex-teräokset. Duplex-teräoksen hitsaus on kuitenkin haastavampaa kuin austeniittisen vakioteräoksen hitsaus, koska liitokseen on saatava oikea austeniittis-ferriittinen mikrorakenne eikä hitsisula ole niin juoksevaa kuin vakioteräöksellä. Del Coz Diaz et al. (2010) tekemässä tutkimuksessa kuitenkin havaittiin duplex-teräoksen tuottavan vähemmän pystysuuntaista hitsausmuodonmuutosta kuin austeniittinen ruostumaton teräs. Näiden kahden teräoksen välillä havaittiin myös päinvastainen kulmamuodonmuutos ja pituussuuntainen taipuma. Ferriittiset teräokset voidaan jakaa stabiloimattomiin ja stabiloituihin teräksiin, joista stabiloituilla on parempi hitsattavuus. Martensiittisten terästen hitsattavuus on suuren hiilipitoisuuden takia kaikista terästyypeistä huonoin.

Toisaalta tässä kandidaatintyössä luokiteltiin martensiittiseksi myös erittäin niukkahilliset martensiittis-austeniittiset teräkset ja niukkahilliset ferriittis-martensiittiset teräkset, joiden hitsattavuus on puolestaan hyvä. Molemmat teräkset säilyvät sitkeinä hitsauksen jälkeen ja ovat paremmin hitsattavia kuin runsashiiliset martensiittiset teräkset.

LÄHTEET

del Coz Diaz, J. J., Menendez Rodriguez, P., Garcia Nieto, P. J. & Castro-Fresno, D. (2010). Comparative analysis of TIG welding distortions between austenitic and duplex stainless steels by FEM. *Applied Thermal Engineering*, 30(16), 2448–2459. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.06.016

Ion, J. C. (2005). *Chapter 16—Keyhole Welding In Laser Processing of Engineering Materials*. Elsevier Ltd. (pp. 395–455). DOI: 10.1016/B978-075066079-2/50019-2

Jernström, P. (2019). MicroTack mullistaa ohutlevyjen silloitushitsauksen. *Kemppi. Welding Value Blog*. Päivitetty 19.6.2019. Saatavissa (viitattu 19.2.2023): <https://weldingvalue.com/fi/2019/06/microtack-mullistaa-ohutlevyjen-silloitushitsauksen/#91172527>

Kujanpää, V., Salminen, A. & Vihinen, J. (2005). Lasertyöstö. *Teknologiainfo Teknova*.

Kyröläinen, A. & Lukkari, J. (2002). Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus (2. p.). Metalliteollisuuden keskusliitto.

Lepola, P., Makkonen, M. & Immonen, P. (2005). Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. WSOY.

Lukkari, J. (2002). Hitsaustekniikka: Perusteet ja kaarihitsaus (4. tark. p.). *Opetushallitus*.

Martikainen, J. (1993). NDT-tarkastuksen käsikirja. SHY.

Naghavi, S. M., Darvizeh, A. & Khalkhali, R. A. (2012). *Comparison of welding distortions between TIG and MIG welding technique in pipes*. 110–116, 1741–1747. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.1741

Narwadkar, A. & Bhosle, S. (2016). Optimization of MIG Welding Parameters to Control the Angular Distortion in Fe410WA Steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(16), 2158–2164. DOI: 10.1080/10426914.2015.1127939

Salminen, A. (1987). Lasertyöstön tuotesuunnittelulle tarjoamat mahdollisuudet. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.

Sattari-Far, I. & Javadi, Y. (2008). Influence of welding sequence on welding distortions in pipes. *The International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(4), 265–274. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2007.07.003

SFS 3052 (2020). Hitsaussanasto. Yleistermi. *Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry*, Helsinki, 128 s.

Trumpf GmbH+Co. (1996). Faszination Blech-Flexible bearbeitung eines vielseitigen Werkstoffs. *Rondo Druck Ebersbach-Rosswälden*, 168 s.

Weman, K. (1997). *Svetshandbok. Liber AB.*

Zhou, Q., Cao, L., Zhou, H. & Huang, X. (2018a). Prediction of angular distortion in the fiber laser keyhole welding process based on a variable-fidelity approximation modeling approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(3), 719–736. DOI: 10.1007/s10845-018-1391-1

Zhou, Q., Wang, Y., Choi, S. K., Cao, L. & Gao, Z. (2018b). Robust optimization for reducing welding-induced angular distortion in fiber laser keyhole welding under process parameter uncertainty. *Applied Thermal Engineering*, 129, 893–906. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.081