TIG-HITSAUSPROSESSIMODIFIKAATIOT – CASE: TIP TIG

TIG welding process modifications – Case: TIP TIG

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2023

Ilja Riikonen

Tarkastajat: Apulaisprofessori Tuomas Skriko

Laboratorioinsinööri Esa Hiltunen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Ilja Riikonen

TIG – Hitsausprosessimodifikaatiot – Case: TIP TIG

Konetekniikan kandidaatintyö

2023

45 sivua, 35 kuvaa, 5 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastaja(t): Apulaisprofessori Tuomas Skriko ja Laboratorioinsinööri Esa Hiltunen

Avainsanat: hitsaus, TIG, TIP TIG, kuumalanka-TIG, tuottavuus

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan TIG-hitsauksen tehostamista erilaisilla prosessimodifikaatioilla. Työssä kartoitetaan TIG-hitsauksen tehostamisen nykytilannetta, sekä vertaillaan eri valmistajien prosessivariaatioita keskenään kaupallisesta näkökulmasta ja aikaisempien tutkimusten pohjalta.

Kandidaatintyössä suoritettujen hitsauskokeiden avulla tutkitaan tarkemmin kuumalanka-TIG-hitsausta ja langansyötön oskillaatiota, sekä niiden yhdistämistä TIP TIG hitsausprosessissa. Hitsauskokeet suoritettiin rakenneteräksellä S355 ja ruostumattomalla teräksellä AISI 316 L. Koekappaleita hitsattiin jalkohitsinä (PA) ja alapienahitsinä (PB).

Tutkimuksessa todetaan kirjallisuuden pohjalta kuumalanka-TIG:in mahdollistavan jopa moninkertaisen hitsiaineentuoton perinteiseen TIG-hitsaukseen verrattuna. Kuumalangan mahdollistama tuottavuuden lisäys oli selkeästi havaittavissa myös hitsauskokeissa. Langansyötön oskillaation todetaan parantavan hitsiaineentuottoa, jokseenkin vähemmän kuin kuumalanka. Yhdistettynä näiden variaatioiden tuottamat tulokset ovat odotetusti hieman paremmat kuin kumpikaan variaatio yksinään. Kahden tai useamman prosessimodifikaation yhdistäminen siis voi olla hyödyllistä TIG-hitsauksen tuottavuuden parantamisen kannalta.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Ilja Riikonen

Tig welding process modifications – Case: TIP TIG

Bachelor's thesis

2023

45 pages, 35 figures, 5 tables and 2 appendices

Examiners: Associate professor Tuomas Skriko and Laboratory engineer Esa Hiltunen

Keywords: Welding, TIG, TIP TIG, hotwire TIG, productivity

This bachelor's thesis investigates the productivity enhancement of TIG welding with a variety of TIG welding process modifications. The study aims to survey the state of these process modifications through a commercial viewpoint, assisted by previous research.

With the use of welding tests, the study aims to take a closer look at hotwire TIG and wire feed oscillation, as well as combining these two in a process known as TIP TIG. The welding experiments were carried out with two materials: structural steel S355 and stainless steel AISI 316 L. Test welds were carried out as butt joints (PA) and T-joints (PB).

The study concludes based on previous research that hotwire TIG can drastically improve the deposition rate of the process compared to conventional TIG welding. This improvement potential was also found on the welding experiments. Wire feed oscillation was also found to improve the deposition rate, although not as significantly as hotwire. The combination of these two variations produced results better than each of them alone, as expected. The combining of two or more TIG welding process modifications can be beneficial to improve productivity.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

h	Tunti
Hz	Hertsi
k	Korkeus
kg	Kilogramma
l	Leveys
mm	Millimetri

Lyhenteet

DC	Direct Current
DCEN	Direct Current Electrode Negative
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
TIG	Tungsten Inert Gas

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto ... 6
1.1 Työn tavoite ... 6
1.2 Työn suorittaminen ja rajaus ... 7
2 Kirjallisuuskatsaus ... 8
2.1 Kuumalanka-TIG ... 8
2.1.1 TOPTIG ... 10
2.1.2 Jetline ... 12
2.2 Langansyötön oskillaatio ... 12
2.2.1 TIP TIG ... 13
2.2.2 TIGSPEED ... 15
2.3 Keyhole TIG ... 17
2.3.1 K-TIG ... 18
2.3.2 TIP TIG FOCUS ... 19
2.3.3 ArcTig ... 20
2.3.4 ForceTIG ... 20
2.4 A-TIG ... 21
3 Hitsauskokeet ... 23
3.1 Koejärjestelyt ... 23
3.1.1 Hitsattavat kappaleet ... 24
3.1.2 Hitsauslaitteisto ... 25
3.1.3 Hitsausparametrit ... 26
4 Tulokset ... 27
4.1 Makrohieet ... 28
4.2 Pinnanlaatu ... 35
5 Johtopäätökset ... 39
Lähteet ... 41

1 Johdanto

Hitsaaminen on yleisesti käytetty tapa metallien liittämiseen. Hitsaamalla saavutetaan liitokselle usein paremmat mekaaniset ominaisuudet kuin muilla liitostavoilla. TIG (Tungsten Inert Gas) hitsaus on hitsausprosessi, jossa sulamattoman volframielektrodin ja työkappaleen välisellä valokaarella sulatetaan työkappaletta ja tarvittaessa sulaan syötetään lisäainetta joko käsin tai koneellisesti. TIG hitsaus tuottaa yleensä parempilaatuisia liitoksia kuin muut kaasukaarihitsausmenetelmät. TIG hitsauksen yksi merkittävä huono puoli on sen hitaus suurilla ainepaksuuksilla. (Lepola, P., Makkonen, M., 1998, s.197–199)

TIG hitsauksen hitauden vuoksi sen tehostaminen on tärkeää. TIG-hitsauksen tehostamiseen löytyy markkinoilta useita erilaisia prosessivariaatioita. Prosessivariaatioiden löytäminen ja vertailu on hankalaa niiden runsauden vuoksi. Tuottamalla yhteenveto markkinoilta löytyvistä TIG-hitsausprosessimodifikaatioista voidaan helpottaa eri variaatioiden vertailua ja hitsauksen tehostamista.

TIG hitsauksen tehostamiseen liittyvät prosessimodifikaatiot jakautuvat karkeasti tapoihin, joilla voidaan lisätä hitsiaineentuottoa, ja tapoihin, joilla voidaan lisätä tunkeumaa. Eri hitsauslaitevalmistajat saattavat myydä samankaltaisia prosessimodifikaatioita eri nimillä.

Tutkittavaan aiheeseen liittyy useita erilaisia prosessimodifikaatioita, joita voidaan käyttää joko yksinään tai yhdistellä. Esimerkiksi kuumalanka-TIG voidaan yhdistää moneen automaattisen langansyötön sisältävään prosessimodifikaatioon. TIP TIG langansyöttölaitteisiin on integroitu kuumalanka -ominaisuus.

1.1 Työn tavoite

Kandidaatintyön kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on kartoittaa markkinoiden nykytilannetta TIG-hitsaukseen liittyvien prosessimodifikaatioiden osalta ja mahdollisesti verrata modifikaatioista tehtyjen aikaisempien tutkimusten osoittamia hyötyjä keskenään.

Kandidaatintyön kokeellisen osuuden tarkoituksena on tutkia, onko TIP TIG langansyötön ja kuumalangan yhteisvaikutus hitsauksen tunkeumaan ja tuottavuuteen suurempi kuin TIP TIG langansyötön ja kuumalangan summa.

Työn keskeiset tutkimuskysymykset ovat:

1. Miten eri prosessimodifikaatiot vaikuttavat TIG-hitsauksen tuottavuuteen?
2. Minkälainen vaikutus kuumalangan ja langansyötön oskillaation yhdistämisellä on TIG-hitsauksen tuottavuuteen?

1.2 Työn suorittaminen ja rajaus

Työn hitsauskokeet suoritetaan LUT-yliopiston hitsaustekniikan laboratoriossa. TIP TIG Suomi antaa kokeiden suorittamiseen tarvittavat materiaalit, sekä lainaa kokeiden suorittamisen ajaksi TIP TIG hitsauskonetta.

Tutkimuksessa pyritään jättämään huomiotta hitsaajan taitotaso. Hitsaajan taitotaso voi vaikuttaa merkittävästi TIG-hitsauksen laatuun ja tehokkuuteen. Taidosta huolimatta monilla prosessimodifikaatioilla voidaan saavuttaa huomattavasti parempaa tuottavuutta hitsaukselle. Osa tässä työssä käsiteltävistä TIG-hitsausprosessimodifikaatioista ovat käytettävissä myös käsin, mutta useimmat vaativat hitsauksen mekanisointia tai automaatiota.

2 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksessa käydään läpi kaupallisesta näkökulmasta markkinoilta löytyviä TIG-hitsausprosessivariaatioita ja perehdytään niiden taustalla oleviin toimintoihin ja periaatteisiin aikaisempien tutkimusten pohjalta. Prosessimodifikaatiot voidaan luokitella niiden toimintaperiaatteen perusteella (taulukko 1). Esimerkiksi suuri osa modifikaatioista pyrkii suurempaan hitsiaineentuottoon mekanisoimalla lisäaineen syötön. Toisaalta osa variaatioista pyrkii lisäämään tunkeumaa merkittävästi, siten nopeuttaen hitsausprosessia.

Taulukko 1: kirjallisuuskatsauksessa käsiteltävien variaatioiden jaottelu.

Menetelmä	Tuote	Valmistaja / kehittäjä
Kuumalanka-TIG	TOPTIG	Lincoln Electric
	Jetline	Miller Electric
Langansyötön oskillaatio	TIP TIG	TIP TIG
	tigSpeed	EWM
Keyhole-TIG	TIP TIG Focus	TIP TIG
	ArcTig	Fronius
	ForceTIG	EWM
Työkappaleen esikäsittely	A-TIG	EO Paton Institute of Electric Welding

2.1 Kuumalanka-TIG

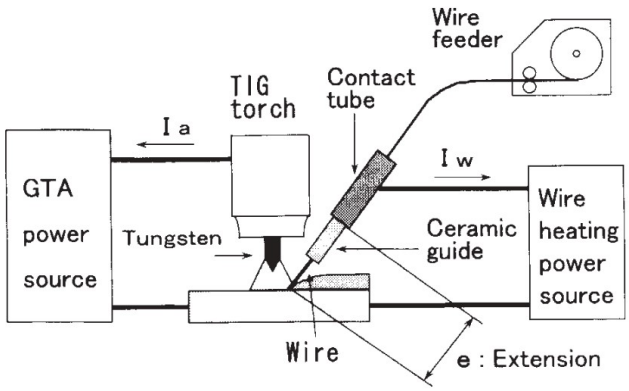
Kuumalanka TIG (engl. Hotwire TIG) tarkoittaa TIG-hitsausprosessimodifikaatiota, jossa lisäainelanka esilämmitetään. Esilämmityksen mahdollistamiseksi langansyötön on oltava mekanisoitu. Lisäainelangan esilämmitys tapahtuu kuumentamalla lisäainetta erillisellä virtalähteellä (kuva 1). (Bao, Han ja Wang 2020)

Jo 1980-luvulla Cornu ja Weston kirjoittivat kuumalanka-TIG:in soveltuvuudesta erilaisiin hitsauskohteisiin. Muun muassa ohuilla materiaaleilla ennakkoluulot olivat, ettei kuumalangasta välttämättä ole hyötyä. Kuumalangan todettiin kuitenkin tasoittavan vaihtelua hitsin laadussa ja siten mahdollistavan hieman nopeammat hitsausnopeudet myös ohuille

kappaleille, joissa hitsiaineentuotto ei ollut suurin vaatimus. Cornun ja Westonin mukaan kuumalanka-TIG:illä voidaan saavuttaa jopa kolminkertainen hitsiaineentuotto kylmällä lisäaineella tehtävään TIG-hitsaukseen nähden. (Cornu ja Weston 1988) Myös tuoreempien tutkimusten mukaan kuumalanka-TIG:illä voidaan saavuttaa noin 2-3 kertainen hitsiaineentuotto ja hitsausnopeus perinteiseen TIG hitsaukseen verrattuna. (Bao et al. 2020)

Kuumalangalla voidaan saavuttaa hitsausliitoksille vielä normaalia TIG-hitsaustakin parempi laatu. Cornu ja Weston kirjoittavat lämpötilan nousun puhdistavan lisäainelangan pinnalta epäpuhtauksia ennen lisäainelangan päätymistä sulaan. Eli vähemmän epäpuhtauksia päätyy hitsiin. Lisäaineen korkea lämpötila myös vähentää hitsin huokoisuutta. (Cornu ja Weston 1988)

Kuumalankaominaisuus edellyttää omaa erillistä virtalähdettä hitsausvirtalähteen lisäksi. Kuumalangan tarvitsema virta on kuitenkin suhteellisen pieni, eli virtalähde on mahdollista integroida samaan laitteistoon hitsausvirtalähteen kanssa. Tällöin maadoitus hitsattavaan kappaleeseen onnistuu samalla maadoituksella kuin varsinaisen hitsausvirran maadoitus. Yleensä käytössä on DCEN (Direct current electrode negative) virta langan lävitse, eli esilämmitykseen käytettävän virtalähteen negatiivinen napa liitetään kuvan 1 mukaisesti langansyötön suuttimeen. (Hori, Watanabe, Myoga ja Kusano 2004)



Kuva 1: Kuumalanka-TIG kokoonpano. (Hori et al. 2004)

Langan esilämmitykseen käytettyyn virtaan liittyvä langan negatiivinen varaus saattaa aiheuttaa hitsauksessa valokaaren ja langan välille hylkimisreaktion, jota kutsutaan magneettiseksi puhallukseksi (engl. Magnetic arc blow). Magneettinen puhallus työntää valokaarta

ja lisäainetta poispäin toisistaan, jolloin hitsauksen toteuttaminen voi vaikeutua. (Hori et al. 2004)

Magneettista puhallusta on pyritty vähentämään esimerkiksi kääntämällä kuumalangan virran suuntaa, jolloin sähkömagneettinen voima vetää lankaa ja valokaarta lähemmäs toisiaan. Ongelmaksi syntyy tällöin tapaus, jossa valokaari ei koskekaan hitsattavaan kappaleeseen, vaan virta kulkee suoraan elektrodista lisäainelankaan. Vaihtoehtoisesti hylkimisreaktiota voidaan vähentää tai jopa välttää pulssittamalla kuumalankavirtaa. Vaihtovirtaa ja virran kytkemistä päälle ja pois on kokeiltu ja niiden on todettu vähentävän magneettipuhallusta. (Hori et al. 2004)

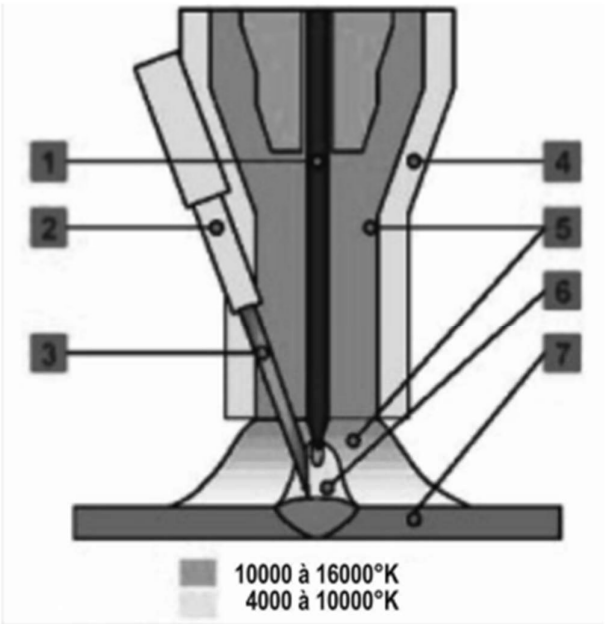
2.1.1 TOPTIG

TOPTIG on robotisoituun hitsaukseen tarkoitettu TIG-hitsausprosessi, jossa lisäainelanka syötetään elektrodiin nähden todella terävässä kulmassa läheltä elektrodia (kuva 2). Joissain tapauksissa langansyöttö tapahtuu jopa kaasusuuttimen sisäpuolelta (Lincoln Electric 2018). Lisäainelangan ohjauksella elektrodin läheltä sulaan saavutetaan lisäainelangan esilämmitys ilman erillistä kuumalanka -virtaa. TOPTIG:llä voidaan saavuttaa jopa 60 % korkeampi hitsiaineentuotto kuin perus TIG:llä 300 ampeerin virralla. (Silva, Schwedersky ja Rosa 2020) Hitsiaineentuoton kannalta TOPTIG ei yllä samoihin lukemiin kuin tyypillinen kuumalanka, jonka uskotaan mahdollistavan jopa 300 % korkeampi hitsiaineentuotto perinteiseen TIG-hitsaukseen verrattuna.

TOPTIG prosessia on mahdollista soveltaa millä tahansa TIG-hitsausvirtalähteellä, mutta prosessiin tarvitaan poltin ja langansyöttöyksikkö. Virtalähteeltä vaaditaan valmiudet etäohjaukseen, sillä TOPTIG on robottikäyttöön tarkoitettu hitsausprosessi. Langansyöttöyksiköltä TOPTIG-prosessi vaatii mahdollisuutta vähintään 10 m/min langansyöttönopeuteen. (Fortain, Guiheux ja Opderbecke 2013)

Langansyötön ja elektrodin välisen lyhyen etäisyyden ansiosta polttimen pää voi olla rakenteeltaan todella kompakti. Kompakti poltin mahdollistaa TOPTIG:lle todella hyvän ulottuvuuden. pieni etäisyys ja jyrkkä langansyötön kulma tarkoittaa myös, että hitsausliitoksen laatu tai prosessin onnistuminen eivät ole riippuvaisia langansyötön tulosuunnasta hitsauksen kulkusuuntaan nähden. (Silva et al. 2020)

TOPTIG hitsausprosessissa esiintyy kahdenlaista aineensiirtymismuotoa. Pisaramaista aineensiirtymistä sekä jatkuvaa aineensiirtymistä. Jatkuva aineensiirtyminen tapahtuu nopealla lisäainelangansyötöllä. jatkuvassa aineensiirtymisessä lisäaine sulaa hitsiin mukaan samalla nopeudella kuin sitä syötetään. Pisaramaisessa aineensiirtymässä taas lisäainelangan päähän sulaa lisäainepisara, joka ajoittain putoaa hitsisulaan. Pisaramainen aineensiirtyminen esiintyy pienemmillä langansyöttönopeuksilla kuin jatkuva aineensiirtyminen. (Fortain et al. 2013)



1	Electrode
2	Wire guide
3	Welding metal
4	Nozzle
5	Protection gas
6	Arc
7	Base metal

Kuva 2: TOPTIG prosessikuva (Lincoln Electric 2018)

2.1.2 Jetline

Jetline on Miller electric:in kehittämä hitsauksen mekanisointiin tarkoitettu tuotelinja. Tuotelinjaan kuuluu mekanisointi- ja automaatiotarvikkeiden lisäksi kuumalankavälineistö. Millerin Jetlinen kuumalanka välineistöön kuuluu erillinen virtalähde, langansyötin, poltinkokoonpano ja ohjauspaneeli (kuva 3). Jetline kuumalanka virtalähteen maksimivirta on 280 ampeeria. (Miller Electric 2023)

Kuva 3: Miller Electric Jetline Hot Wire Feed -laitteisto. (Miller Electric 2023)

2.2 Langansyötön oskillaatio

Langansyötön oskillaatio tarkoittaa lisäainelangan lineaarista edestakaista liikettä langansyötön suuntaisesti. Lisäainelangansyötön oskillaatiota kutsutaan myös dynaamiseksi langansyötöksi tai pulssimaiseksi langansyötöksi. Oskillaatiossa langansyötön liikesuunta voi vaihdella eteenpäin ja taaksepäin, tai langansyöttö voi tapahtua jatkuvasti eteenpäin vaihtuvalla nopeudella. (Pigozzo, e Silva, Galeazzi ja Pereira 2022)

Langansyötön oskillaatiolla tavoitellaan aineensiirtymisen pisaroiden koon ja siirtymätiheyden parantamista. Jatkuvalla langansyötöllä lisäainelangan päähän kertyy merkittävän kokoinen lisäainepisara. Suurempi pisarakoko huonontaa hitsin ulkonäköä ja sitkeyttä.

Pienemmällä pisarakoolla, joka saavutetaan dynaamisella langansyötöllä, saavutetaan symmetrisemmät hitsit. (Gonçalves e Silva, Correa Riffel, Pompermaier Okuyama ja Dalpiaz 2019)

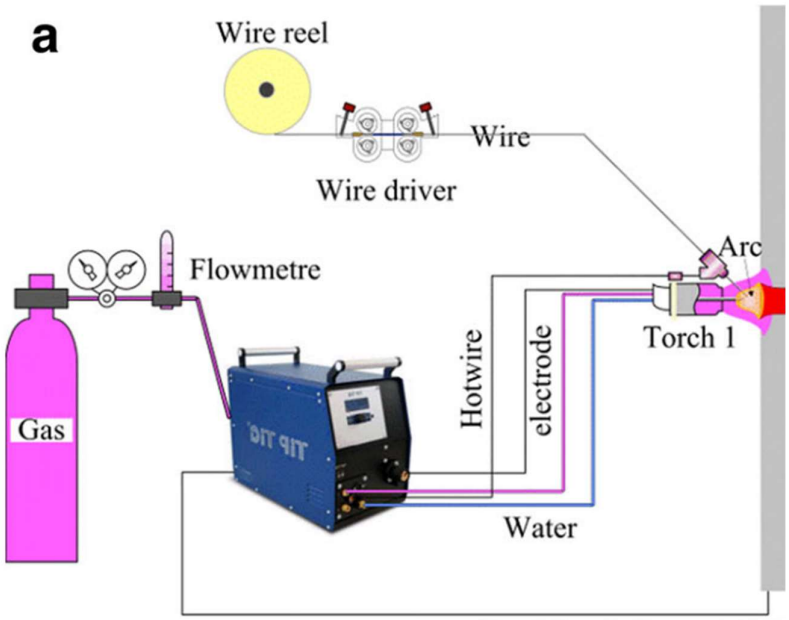
Riffel ja muut tutkivat langansyötön oskillaation vaikutusta korroosionkestävyyteen rakenneteräkseen tehdyssä päällehitsissä, jossa lisäaineena käytettiin inconel 625:ttä. Tutkimuksessa todettiin langansyötön oskillaation vähentävän sekoittumista ja siten parantavan tehdyn hitsin korroosionkestävyyttä. Riffelin mukaan oskillaation vaikutukset ovat selkeämmin nähtävissä korkeammilla virroilla hitsattaessa. Parhaat tulokset saavutettiin koesarjan korkeimmalla oskillaatiotaajuudella, joka oli 18 Hz. (Riffel et al. 2020)

Oskilloivalla langansyötöllä tehdyillä TIG-hitsausliitoksilla on myös havaittu olevan hyvät väsymiskestävyysominaisuudet. Das Neves ja muut tutkivat eri taajuuksilla tapahtuvan oskillaation vaikutusta liitoksen väsymiskestävyyteen verrattuna manuaalisella TIG-hitsauksella valmistettuun liitokseen. Myös tässä tapauksessa oskillaatiolla valmistetuista näytteistä koesarjan korkeimmalla oskillaatiotaajuudella valmistettu liitos sai parhaat tulokset. Koesarjan korkein oskillaatiotaajuus oli 15 Hz. das Nevesin mukaan oskilloivalla langansyötöllä tehdyssä liitoksessa esiintyy vähemmän virheitä mikrorakenteessa, joka voi perustella pidemmän väsymiskestoiän. (das Neves et al. 2022)

Joissain tapauksissa langansyötön oskillaatiolla on saavutettu jopa 40 % suurempi tunkeuma kuin ilman oskillaatiota. (Pigozzo et al. 2022). Tunkeuman ja tuottavuuden osalta langansyötön oskillaatiosta on vaikea löytää tietoa. Voidaan kuitenkin todeta, että langansyötön oskillaatiolla on muita merkittäviä etuja TIG-hitsauksessa, mitkä helpottavat hitsin toteutusta ja parantavat hitsin ominaisuuksia.

2.2.1 TIP TIG

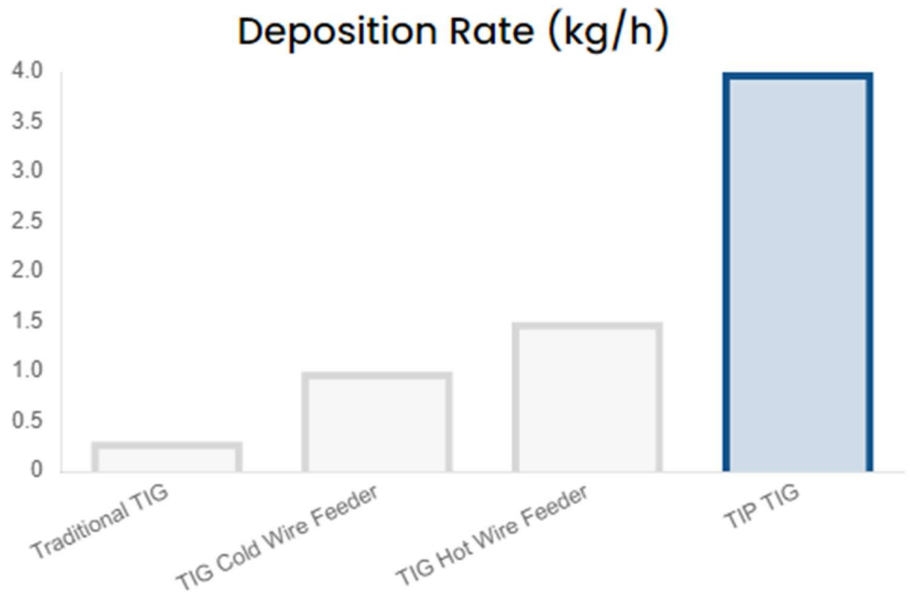
TIP TIG on itävaltalainen yritys, joka tuottaa hitsauslaitteistoja. TIP TIG-hitsauskoneisiin kuuluu langansyöttölaitteisto, joka yhdistää kuumalangan sekä lisäainelangan oskillaation (kuva 4). TIP TIG:in lisäainelangan oskillaatio tuo hitsisulaan liike-energiaa, joka parantaa tunkeumaa ja sulan hallittavuutta. TIP TIG soveltuu todella laajasti eri materiaaleille ja erilaisiin käyttökohteisiin. (Wilson 2007)



Kuva 4: TIP TIG prosessikaavio. (Wang et al. 2021)

TIP TIG-hitsausprosessi on käytettävissä käsin sekä robottihitsauksessa. Käsin hitsattaessa TIP TIG:llä voidaan saavuttaa jopa kolminkertainen nopeus normaaliin TIG-hitsaukseen nähden (Wilson 2007). TIP TIG:in valmistajan laatiman taulukon (kuva 5) mukaan TIP TIG mahdollistaa yli kymmenkertaisen hitsiaineentuoton perinteiseen käsin tehtävään TIG-hitsaukseen verrattuna. Taulukon mukaan TIP TIG yltää jopa neljän kilogramman hitsiaineentuottoon tunnissa. Tämä lukema on todella korkea verrattuna puoleentoista kilogrammaan, jonka taulukon mukaan voi saavuttaa pelkällä kuumalanka-TIG:llä.

TIP TIG laitteistoissa langansyötön oskillaation taajuus on säädettävissä välillä 0–20 Hz, mutta valmistaja suosittelee 17 Hz taajuutta kaikkiin käyttökohteisiin. (TIP TIG 2023)

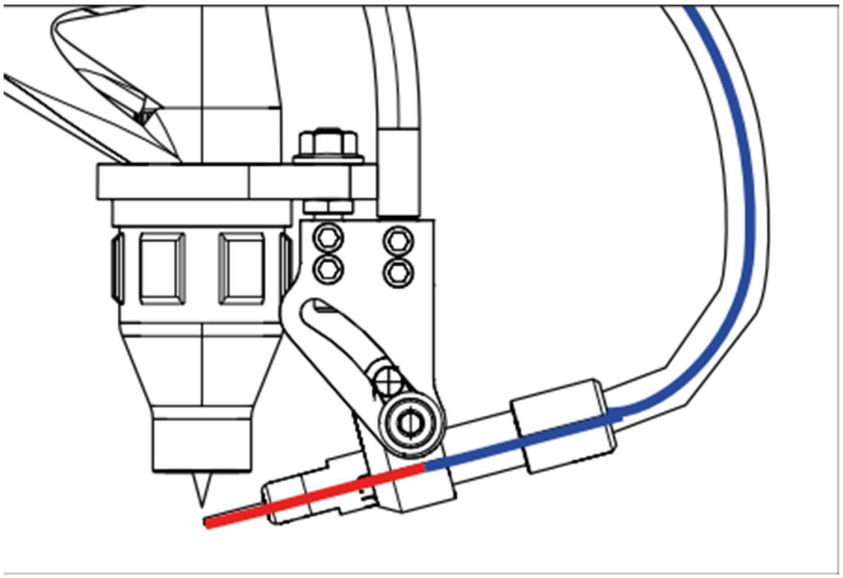


Kuva 5: TIP TIG hitsiaineentuotto (TIP TIG 2023)

2.2.2 TIGSPEED

EWM on saksalainen hitsauskonevalmistaja. EWM:n kehittelemä tigSpeed on TIG virtalähteeseen yhdistettävä langansyöttölaitteisto, jonka avulla voidaan parantaa hitsauksen tuottavuutta. TigSpeed langansyöttölaitteistoja on saatavilla kuumalankaominaisuudella ja langansyötön oskillaatiolla varustettuna. TIGspeed langansyöttölaitteiden oskillaation taajuus on säädettävissä 1–16 Hz välillä. (EWM 2018)

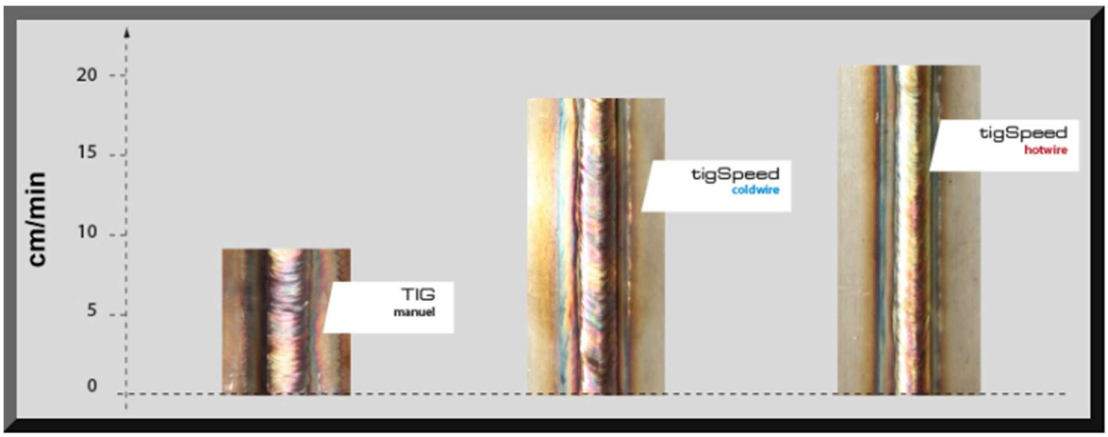
EWM:n laatimasta kuvaajasta (kuva 6) on huomattavissa, että kuumalangalla varustetussa tigSpeedissä kuumalankavirta syötetään langansyötön suuttimen kannattimen kautta suuttimesta itse lisäainelankaan, jolloin lisäainelanka kuumenee vain hyvin paikallisesti juuri ennen hitsisulaan päätymistä. Lisäainelangan syöttö tapahtuu loivassa kulmassa elektrodiin nähden, läheltä hitsattavaa kappaletta.



Kuva 6: tigSpeed hitsauspää kuumalangalla (EWM 2023a).

EWM:n mukaan tigSpeed mahdollistaa ilman kuumalankaa jopa 60 % korkeamman hitsiaineentuoton manuaaliseen TIG-hitsaukseen verrattaessa. Sen lisäksi tigSpeedin sanotaan mahdollistavan jopa kaksinkertaisen hitsausnopeuden manuaaliseen TIG-hitsaukseen nähden. Kuumalangalla EWM ilmoittaa hitsausnopeuden nousevan vielä hiukan. (EWM 2023a)

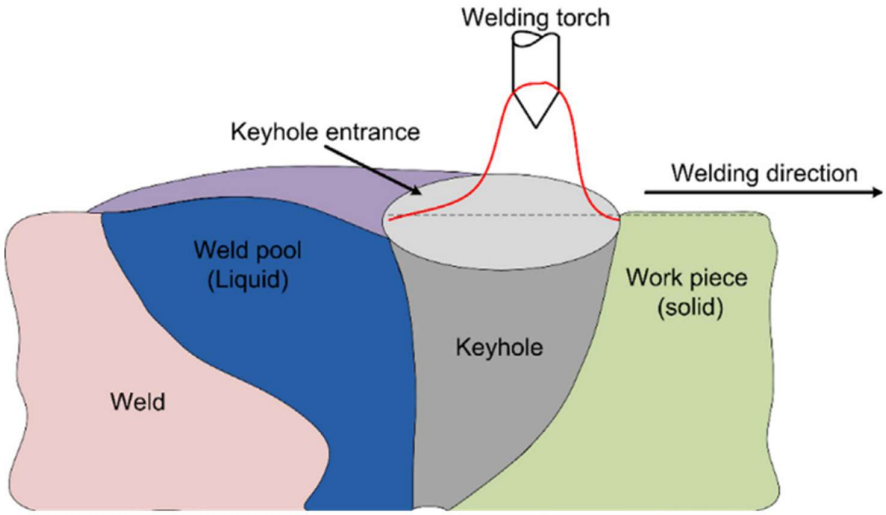
Kuumalangasta puhuttaessa yleisesti on kuitenkin todettu hitsausnopeuden voivan jopa kolminkertaistua kylmään automaattilangansyöttöön nähden. Voisi siis kuvitella tigSpeedinkin saavuttavan kuumalangalla huomattavasti parempia tuloksia, mutta EWM:n laatiman taulukon (kuva 7) perusteella kuumalangan tuoma lisähyöty hitsausnopeuteen on suhteellisen pieni.



Kuva 7: tigSpeed hitsausnopeuden vertailu manuaaliseen TIG-hitsaukseen (EWM 2023a).

2.3 Keyhole TIG

Keyhole TIG on tarkasti keskitetyllä suurella virralla tehtävä TIG-prosessi. Keyhole-TIG-hitsaus vaatii mekanisointia tai automaatiota. Keyhole-TIG-hitsauksen periaatteena on jäähdyttää elektrodia huomattavasti normaalia TIG-hitsausta voimakkaammin, jolloin elektrodin päässä sijaitseva todella kuuma niin kutsuttu katodialue pienenee. Keyhole-TIG-hitsauksessa käytetään suhteellisen korkeita hitsausvirtoja, tyypillisesti hitsausvirta on yli 500 ampeeria. Kapea valokaari ja korkea hitsausvirta muodostavat korkean kaaripaineen, joka Keyhole-hitsauksessa läpäisee hitsisulan pintajännityksen, muodostaen ”keyholen” eli avaimenreikämäisen muodon sulaan (Kuva 8). Pintajännityksen läpäiseminen merkitsee käytännössä tunkeuman lisääntymistä. (Liu et al. 2016)

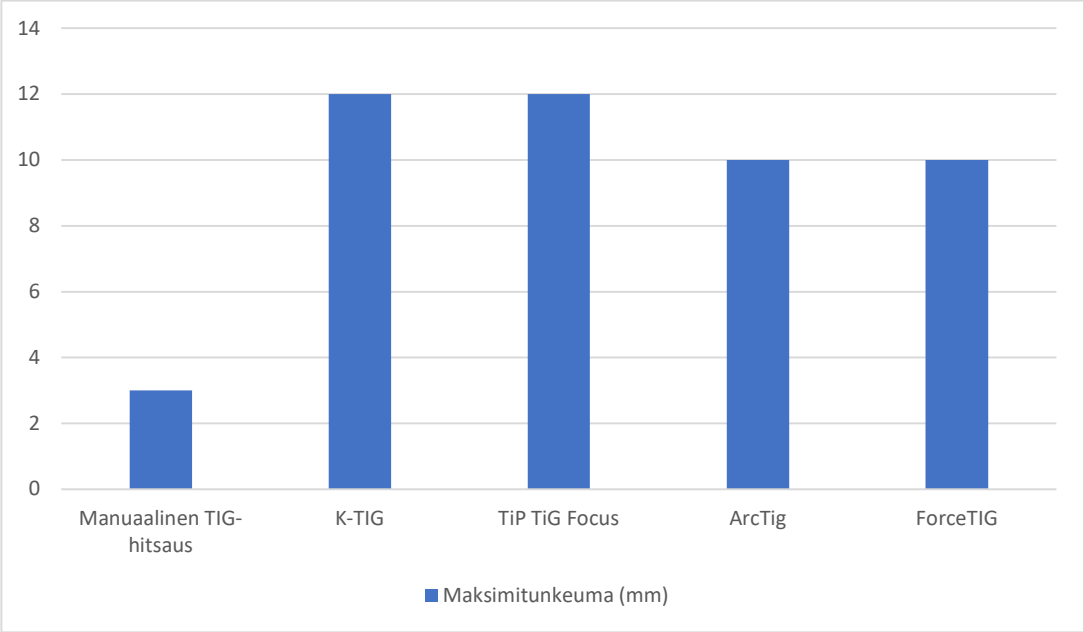


Kuva 8: Keyhole TIG-hitsaus. (Liu et al. 2016)

Keyhole TIG-hitsausta on yritetty soveltaa erilaisille hitsattaville materiaaleille vaihtelevin tuloksin. Pääosin materiaalista riippumatta Keyhole-TIG:llä on onnistuttu kasvattamaan tunkeumaa. Saavuttaen jopa 12 mm:n läpitunkeuman titaanilevyjä hitsatessa. (Sharma, Tyagi, Priyanshu ja Sharma 2022)

Eri valmistajien kaupallisten esitteiden ja tiedotteiden sisältämät tiedot poikkeavat toisistaan merkittävästi. Keyhole-TIG laitteistoja valmistavien yritysten omille keyhole-variaatioilleen

ilmoittamat suurimmat tunkeumat ovat listattuna kuvassa 9. On huomioitava, ettei näiden lukemien taustoja ole avattu sen suuremmin. Tunkeuma voi vaihdella merkittävästi hitsattavan materiaalin myötä.



Kuva 9: Eri valmistajien keyhole-variaatioiden mainostettu suurin tunkeuma

Osa valmistajista kertoo hitsausnopeuden prosentuaalisena lisäyksenä manuaalisen TIG-hitsauksen nopeuteen, kun taas osa valmistajista antavat nopeuden suoraan. Tämä aiheuttaa niin suurta vaihtelua lukemiin, ettei lukemat vaikuta edes vertailukelpoisilta.

2.3.1 K-TIG

K-TIG on Australiassa perustettu hitsauslaitevalmistaja, joka erikoistuu keyhole-TIG-hitsauslaitteistoihin, sekä niihin liittyviin automaatioratkaisuihin. Kyseisen yrityksen kaikki laitteet ovat keyhole-TIG laitteistoja (kuva 10). (K-TIG 2023)

K-TIG:n valmistajan nettisivuilta on tilattavissa sähköpostitse vertailutaulukoita (liite 1), joissa verrataan K-TIG:iä muihin hitsausprosesseihin. Tässä tapauksessa vertailu tapahtuu manuaaliseen TIG-hitsaukseen. Vertailutaulukon mukaan K-TIG yltää jopa 12 mm:n tunkeumaan. Taulukossa valmistaja kertoo K-TIG:in voivan saavuttaa jopa 1000 mm/min hitsausnopeuden. (K-TIG 2023)

Kuva 10: K-TIG poltin (How to weld stainless steel with keyhole TIG 2017)

2.3.2 TIP TIG FOCUS

TIP TIG Focus on TIP TIG:in kehittämä keyhole TIG prosessi. TIP TIG Focus yhdistää keyhole TIG:in sekä TIP TIG langansyötön hyödyt (kuva 11). Valmistajan mukaan TIP TIG Focus voi saavuttaa jopa 12 mm:n läpitunkeuman. TIP TIG Focus soveltuu monille eri materiaaleille. Valmistaja listaa nettisivuillaan muun muassa teräkset, duplex-teräkset, titaanin ja alumiinin materiaaleiksi, joita TIP TIG Focuksella voi hitsata. Valmistaja ei kuitenkaan kerro tarkemmin materiaalikohtaisia suurimpia tunkeumalukuja. Valmistajan nettisivujen mukaan TIP TIG Focuksen voivan saavuttaa jopa 1200 mm/min hitsausnopeuden. (TIP TIG 2023b)

Kuva 11: TIP TIG Focus poltin (TIP TIG 2023a)

2.3.3 ArcTig

ArcTig on froniuksen kehittämä keyhole-TIG prosessi. Froniuksen mukaan ArcTig mahdollistaa jopa 10 mm:n ainepaksuuksien hitsaamisen yhdellä palolla, Fronius kuitenkaan ei kerro, millä materiaalilla kyseinen lukema saavutetaan. ArcTig on mekanisoituun ja automatisoituun hitsaukseen soveltuva menetelmävariaatio (kuva 12). Valmistajan mukaan ArcTig kasvattaa hitsausnopeutta jopa 100 % manuaaliseen TIG-hitsaukseen verrattuna. (liite 2)

Kuva 12: ArcTig hitsauspoltin ja langansyötön suutin (Fronius 2018)

2.3.4 ForceTIG

ForceTIG on EWM:n kehittelemä keyhole-TIG laitteisto (kuva 13). ForceTig:in erityisominaisuuksiin sisältyy esimerkiksi elektrodin jäähdytys, joka mahdollistaa korkeamman hitsausvirran käytön. ForceTIG on sovellettavissa vain kokonaan mekanisoidussa tai automatisoidussa hitsauksessa. Valmistajan mukaan forceTig:illä voidaan hitsata jopa 10 mm:n ainepaksuuksia. EWM kertoo forceTig:in parantavan hitsausnopeutta 100 % perinteiseen TIG-hitsaukseen verrattuna. ForceTig:iin on mahdollista yhdistää kuumalanka. (EWM 2023b)

Kuva 13: EWM forceTig poltin (EWM 2023a)

2.4 A-TIG

A-TIG eli aktivoitu TIG-hitsaus on eräs TIG-hitsausprosessimodifikaatio (kuva 14). A-TIG:ssä hitsattava kappale esikäsitellään oksideilla tai halogenideilla. Esikäsittelyn helpottamiseksi käsittelyaine seostetaan etanoliin tai asetoniin ja levitetään hitsattavan kappaleen pintaan harjalla tai suihkuttamalla. Käsittelyn avulla saavutetaan kapeampi valokaari sekä hitsisulan ominaisuudet ja käyttäytyminen paranee. A-TIG:illä voidaan saavuttaa jopa 200 % lisäys tunkeumaan. Tunkeuman suureneminen perustuu valokaaren kaventamiseen ja hitsisulan sekä kiinteän pohjamateriaalin välisen pintajännityksen pienentämiseen. (Vidyarthy ja Dwivedi 2016)

Tyypillisellä TIG-hitsausprosessilla voidaan saavuttaa noin 2,5 mm syvyinen tunkeuma (Sharma et al. 2022). A-TIG:in mahdollistamalla 200 %:n lisäyksellä siis voitaisiin yltää jopa 7,5 millimetrin suuruiseen tunkeumaan.

A-TIG:issä käytetyt tahnat höyrystyvät hitsauksen aikana pois hitsattavasta kappaleesta. A-TIG siis tuottaa enemmän huuruja kuin perinteinen TIG-hitsaus. A-TIG on sovellettavissa laajalti erilaisille hitsattaville materiaaleille, mutta prosessin parametrit ja käytettävät aktivointiaineet vaihtelevat merkittävästi eri hitsattaville materiaaleille. (Vidyarthy ja Dwivedi 2016)

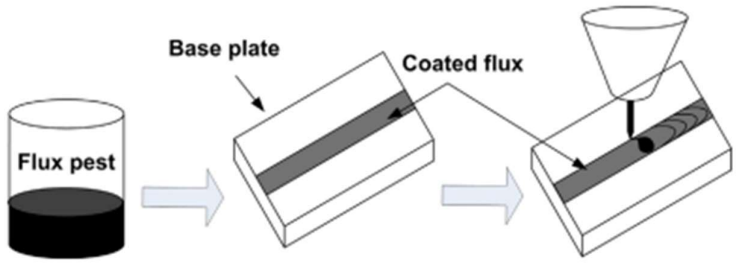


Fig. 1. Schematic of processing of A-TIG.

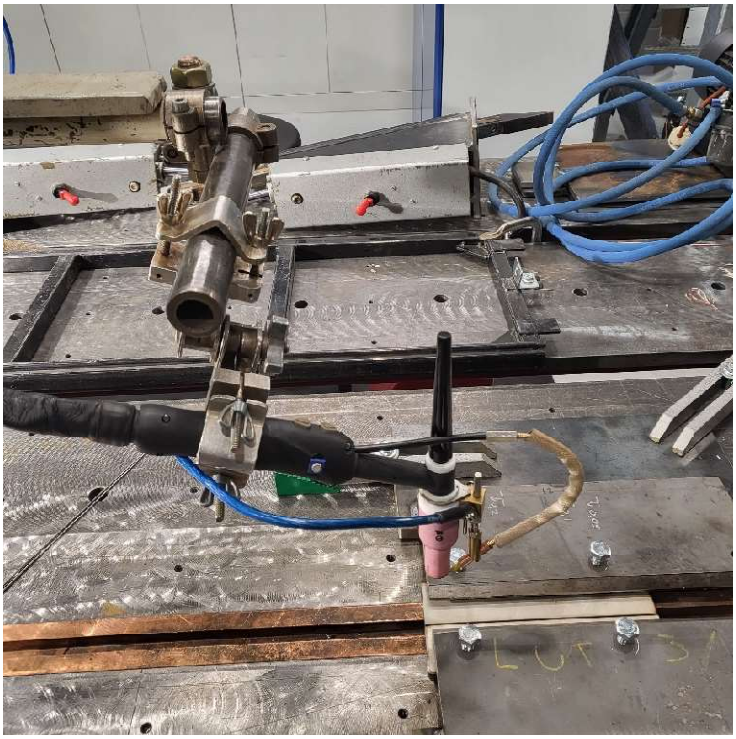
Kuva 14: A-TIG esikäsittely (Vidyarthy ja Dwivedi 2016)

3 Hitsauskokeet

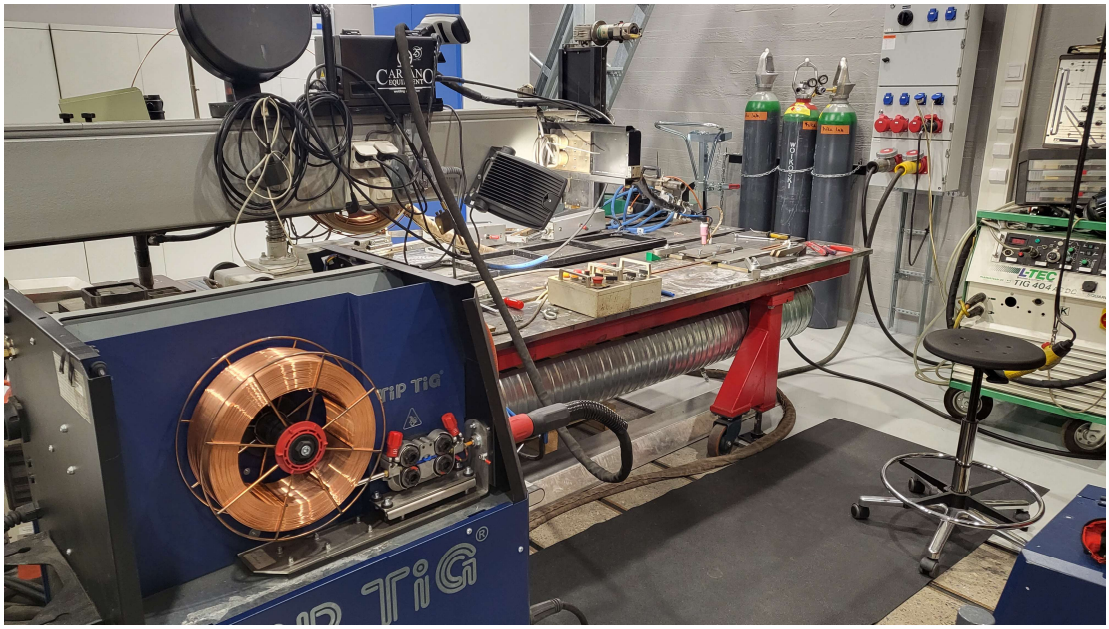
Tutkimuksen kokeellisessa osuudessa vertailtiin TIP TIG -langansyöttölaitteiston edestakaisen liikkeen sekä lisäainelangan esilämmityksen vaikutuksia TIG-hitsauksen tuottavuuteen. Tarkoituksena oli selvittää, onko näillä ominaisuuksilla merkitystä hitsausprosessin tuottavuuteen yksitellen tai yhdistettynä.

3.1 Koejärjestelyt

Hitsauskokeet suoritettiin LUT-yliopiston hitsaustekniikan laboratoriossa. Kaikkiin tehtyihin hitseihin käytettiin TIP TIG – TIG 500 Compact DC -hitsauslaitteistoa. Hitsain kiinnitetiin hitsaustorniin (kuvat 15 ja 16), joka mahdollisti elektrodin tarkan asettelun koekappaleeseen nähden ja suoraviivaisen liikkeen hitsauksen aikana.



Kuva 15: TIP TIG poltin kiinnitettynä hitsaustorniin.



Kuva 16: TIP TIG hitsauskone sekä hitsaustornin vaakapalkki, jossa kiinni TIP TIG poltin.

3.1.1 Hitsattavat kappaleet

Kokeissa hitsattiin rakenneterästä S355 sekä ruostumatonta terästä AISI 316 L. Koekappaleet olivat noin 200 mm pitkiä, 8 mm paksuja, ja noin 40 mm leveitä. Koehitsit suoritettiin päittäisliitoksina ja pienaliitoksina. Päittäisliitokset tehtiin jalkoasennossa (PA) I-railoon, jossa ilmarako oli 2 mm. Pienaliitokset hitsattiin alapiena-asennossa (PB), eikä ilmarakoa jätetty.

Päittäisliitoksia varten koekappaleet kiinnitettiin pöytään ja varmistettiin railon olevan yhdensuuntainen hitsaustornin liikkeen kanssa. Elektrodin etäisyys hitsattavista kappaleista oli 2 mm.

Pienaliitoksissa koekappale kiinnitettiin ruuveilla takaosastaan pöytään, jolloin etupuolelle jäi tilaa hitsata. Ruuvikiinnityksen avulla varmistettiin koekappaleiden olevan yhdensuuntaisesti hitsaustornin liikkeen kanssa. Elektrodin etäisyydeksi mitattiin ennen jokaista liitosta kaksi millimetriä vaaka- sekä pystylevystä.

Jokaiselle materiaalin ja liitostyypin parille tehtiin hitsit vaihdellen lisäainelangan syötön parametreja taulukon 2 mukaisesti. Koekappaleita oli yhteensä 16.

Taulukko 2: Hitsauskoematriisi

Koekappale	Materiaali	Liitostyyppi	Kuumalanka/ kylmälanka	Langansyöttö
1	AISI 316 L	Piena-	Kuuma	Lineaarinen
2	AISI 316 L	Piena-	Kuuma	Oskilloiva
3	AISI 316 L	Piena-	Kylmä	Lineaarinen
4	AISI 316 L	Piena-	Kylmä	Oskilloiva
5	AISI 316 L	Päittäis-	Kuuma	Lineaarinen
6	AISI 316 L	Päittäis-	Kuuma	Oskilloiva
7	AISI 316 L	Päittäis-	Kylmä	Lineaarinen
8	AISI 316 L	Päittäis-	Kylmä	Oskilloiva
9	S355	Piena-	Kuuma	Lineaarinen
10	S355	Piena-	Kuuma	Oskilloiva
11	S355	Piena-	Kylmä	Lineaarinen
12	S355	Piena-	Kylmä	Oskilloiva
13	S355	Päittäis-	Kuuma	Lineaarinen
14	S355	Päittäis-	Kuuma	Oskilloiva
15	S355	Päittäis-	Kylmä	Lineaarinen
16	S355	Päittäis-	Kylmä	Oskilloiva

3.1.2 Hitsauslaitteisto

Hitsauskokeisiin käytettiin TIP TIG – TIG 500 Compact DC -hitsauskonetta. Kyseiseen hitsauskoneeseen on yhdistetty virtalähde ja langansyöttökoneisto. Langansyöttöön sisältyy kuumalanka sekä TIP TIG:in lisäainelangan oskillaatio. Lisäainelangan lämmitys tapahtuu sähkövirralla. Kyseisessä hitsauslaitteessa kuumalangan lämmitys toteutetaan 70 A virralla. Langansyötön oskillaation taajuus kokeiden aikana oli 20 Hz.

Hitsauskokeissa käytettiin halkaisijaltaan 4 mm:n paksuista toriumseosteista volframielektrodia. Elektrodi teroitettiin tarvittaessa, ja elektrodin kärjen kulma oli noin 45 astetta. Hitsauskaasuna käytettiin puhdasta argonia. Kokeissa käytettiin 1 mm:n paksuista lisäainelankaa. Kullekin hitsatulle materiaalille käytettiin perusainetta vastaavaa lisäainetta.

3.1.3 Hitsausparametrit

Lähtökohtaisesti hitsausparametrit oli tarkoitus pitää vakiona hitsauskokeiden ajan. Kuumalangalla ja kylmälangalla tehtyjen onnistuneiden liitosten parametrien välillä havaittiin kuitenkin niin suurta vaihtelua, että esimerkiksi hitsausnopeutta ja hitsausvirtaa oli pakko muuttaa näillä variaatioilla. Taulukossa 3 on listattu jokaiselle koekappaleelle käytetyt hitsausparametrit.

Kuumalangalla tehdyt pienaliitokset suoritettiin 300 ampeerin virralla ja 25 cm/min hitsausnopeudella. Lisäainetta näihin liitoksiin syötettiin noin 0,7 kg/h. Kylmällä lisäainelangalla vastaava koekappale hitsattiin 260 ampeerin suuruisella virralla ja 12 cm/min hitsausnopeudella. Kylmälangalla hitsiaineentuotto oli noin 0,3 kg/h.

Päittäisliitoksina tehdyissä koekappaleissa hitsausvirta onnistuttiin pitämään samansuuruisena, mutta hitsausnopeutta oli jälleen muutettava eri variaatioilla hitsattaessa. Kuumalangalla tehdyt päittäisliitokset onnistuttiin tekemään 30 cm/min hitsausnopeudella ja 0,8 kg/h hitsiaineentuotolla, kun taas kylmälangalla hitsausnopeus puolittui 15 senttimetriin minuutissa ja hitsiaineentuotto putosi 0,4 kilogrammaan tunnissa.

Taulukko 3: Hitsausparametrit koekappaleittain

koekappale	Hitsausnopeus (cm/min)	Langansyötön nopeus (m/min)	Hitsausvirta(A)	hitsiaineentuotto (kg/h)
1	25	0,19	300	0,71
2	25	0,19	300	0,71
3	12	0,83	260	0,31
4	12	0,83	260	0,31
5	30	0,23	200	0,85
6	30	0,23	200	0,85
7	15	0,10	200	0,38
8	15	0,10	200	0,38
9	25	0,19	300	0,71
10	25	0,19	300	0,71
11	12	0,83	260	0,31
12	12	0,83	260	0,31
13	30	0,23	200	0,85
14	30	0,23	200	0,85
15	15	0,10	200	0,38
16	15	0,10	200	0,38

4 Tulokset

Hitsauskokeiden tuloksia tulkitaan hitsauksen onnistumisen sekä makrohieen perusteella. Hitsauksen onnistumisella tarkoitetaan sitä, onnistuuko hitsaaminen ylipäätään tietyillä hitsausparametrien arvoilla. Makrohieestä tutkitaan päittäisliitoksissa hitsin muotoa ja syvyyttä. Vastaavasti pienaliitoksilla tutkitaan tuotettua a-mittaa ja tunkeumallista a-mittaa. Kaikkien hitsien ulkonäöstä on olemassa valokuvia ja niistä mahdolliset havainnot tuodaan esille.

Hitsauskokeiden tulosten kvantifiointiin käytetään hitsiaineentuottoa. Hitsiaineentuotto on laskettu jokaisen hitsin kohdalla lisäainelangan syötön perusteella. TIP TIG -hitsauskoneen ohjauspaneeli ilmoittaa langansyötön suuruuden kokonaislukuna. TIP TIG:in nettisivuilta löytyvän langansyöttölaskurin mukaan yksi yksikkö näytöllä vastaa 2,5 tuumaa lankaa minuutissa (TIP TIG 2023c). Yhtä langansyöttöyksikköä kohden hitsauskone syöttää noin 6,35 cm lisäainelankaa. Teräksen tiheyden ollessa 7850 kg/m^3 yksi langansyöttöyksikkö vastaa noin 0,023 kg/h hitsiaineentuottoa.

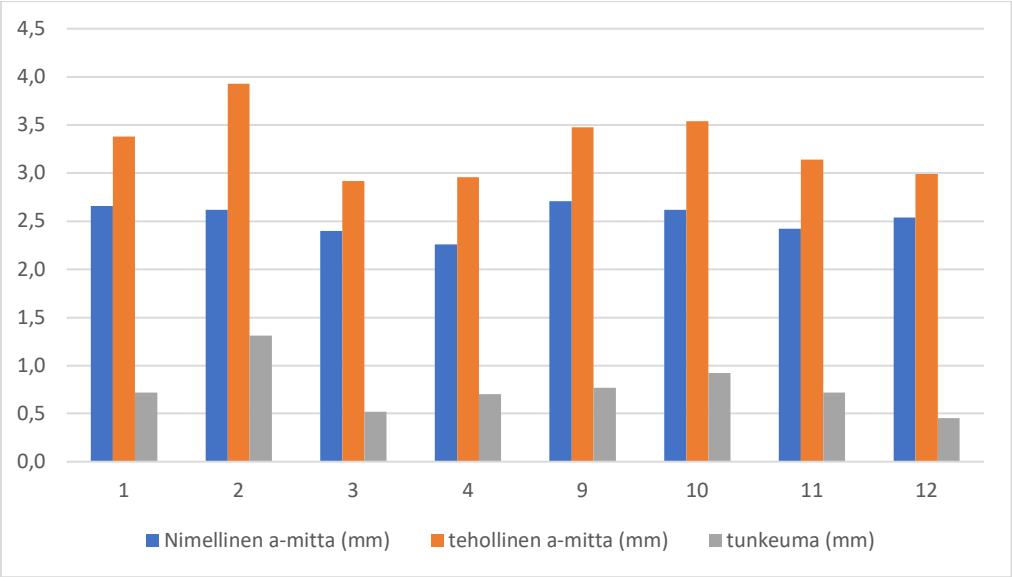
Hitsauskokeiden toteutus aloitettiin päittäisliitoksista. Kokeiden valmistelussa käytettiin merkittävästi aikaa sopivien hitsausparametrien löytämiseen ja tarkoituksena oli pitää hitsausvirta ja -nopeus sekä langansyötön nopeus vakiona kaikissa kokeissa. Merkittävä havainto tulikin heti, kun hitsauslaitteiston kuumalanka kytkettiin pois päältä. Hitsaus ei yksinkertaisesti onnistunut samoilla parametreillä ilman kuumalankaa. Kylmällä lisäainelangalla hitsattaessa kuljetusnopeutta jouduttiin vähentämään 30 cm/min -> 15 cm/min. Hitsausnopeuden pienentyessä myös lisäainelangansyötön nopeutta oli pienennettävä merkittävästi. 2,28 m/min -> 1,01 m/min.

Hitsiaineentuotto pienaliitoksissa kuumalangalla oli hitsauskokeissa noin 0,7 kg/h, ja ilman kuumalankaa noin 0,3 kg/h. Ilman kuumalankaakin olisi varmasti mahdollista saavuttaa tätä lukemaa korkeampi hitsiaineentuotto, mutta hitsien onnistuminen edellytti näissä olosuhteissa rajallisella ajalla ja resursseilla tyytymistä juuri näihin hitsausparametreihin. Myös päittäisliitoksissa kuumalangalla hitsiaineentuotto oli hieman yli kaksinkertainen kylmälankaan nähden.

Kuumalangalla määritetyillä parametreillä kylmällä langalla hitsatessa suurin ongelma oli, ettei kaikki lisäaine sulanut hitsiin mukaan. Kiinteä lisäainelanka työnsi vastaan polttimeen, minkä seurauksena poltin liikahteli ja teki koko hitsausprosessista epävakaan. Näiden ongelmien seurauksena lisäainelangan syöttönopeutta vähennettiin hieman, jolloin seuraava ongelma tuli esiin. Samalla hitsausvirralla ja vauhdilla kaari sulatti liikaa materiaalia, eikä lisäaine riittänyt täyttämään hitsiä. Tällöin virtaa jouduttiin laskemaan. Pienemmän virran seurauksena hitsausnopeutta oli vähennettävä onnistuneen hitsin saavuttamiseksi. Päittäisliitoksissa virta onnistuttiin pitämään vakiona, mutta hitsausnopeutta ja lisäaineensyötön nopeutta oli vähennettävä.

4.1 Makrohieet

Pienahitsien makrohieistä saatavista tiedoista tärkeimpiä ovat nimellinen a-mitta, sekä tehollinen a-mitta. Kuvassa 17 on listattu makrohieistä mitatut a-mitat jokaiselle pienahitsille. Kuvasta huomataan, että pääosin pienahitsien ulkoinen a-mitta on parin kymmenesosamillimetrin sisällä toisistaan. Vaihteluun vaikuttaa kuumalangalla ja ilman tehtyjen hitsien välisten parametrien ero. Suurin tunkeuma saavutettiin koekappaleessa 2. Muuten tunkeumalliset a-mitat ovat myös arvattavasti hyvin samankaltaisia.



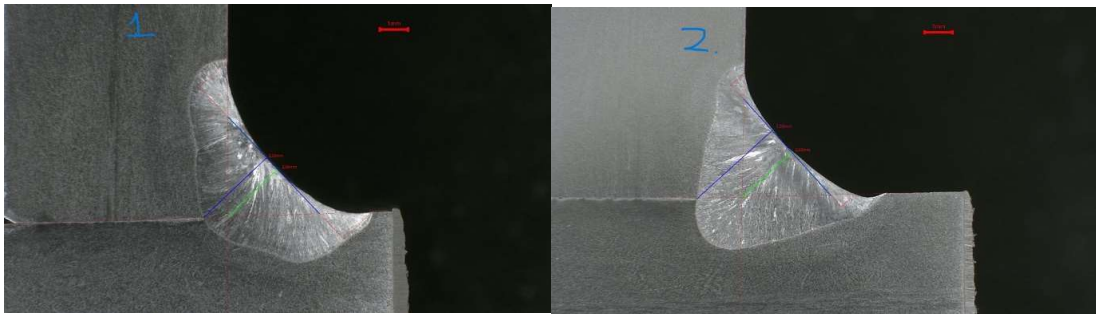
Kuva 17: Hitsauskokeiden pienaliitosten a-mitat.

Pienaliitoksista koekappaleet 1 , 2 , 9 ja 10 toteutettiin kuumalangalla, näistä 1 ja 9 tehtiin ilman langansyötön oskillaatiota ja 2 sekä 10 tehtiin langansyötön oskillaatiota hyödyntäen. Kuvasta 17 huomataan langansyötön oskillaation parantavan tunkeumaa lähes jokaisessa testivariaatiossa. Poikkeuksena tähän on koekappale 12, jossa on merkittävästi pienempi tunkeuma ja tehollinen a-mitta, kuin vastaavissa olosuhteissa ilman oskillaatiota toteutetulla koehitsillä 11. Koekappaleen 12 makrohieestä on kuitenkin huomattavissa, että hitsi on merkittävästi suuntautunut liitoksen alalevyyn. Epäsymmetrinen hitsi osaltaan aiheuttaa a-mitan pienenemisen.

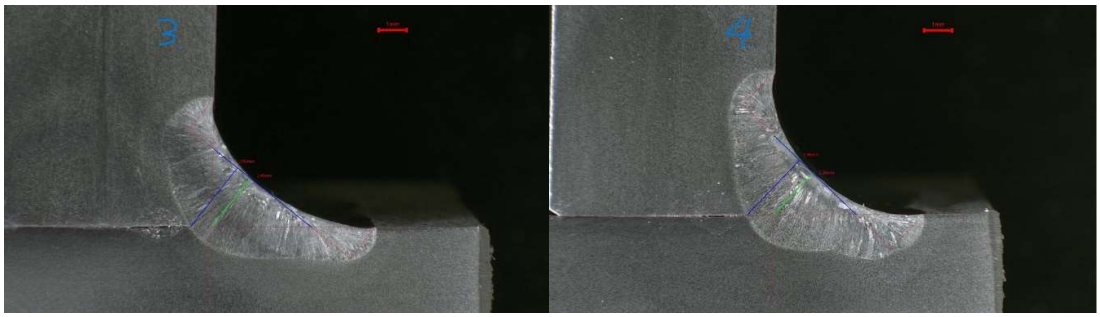
Pienaliitoksista suurin tehollinen a-mitta on koekappaleessa 2, joka on ruostumattomaan teräkseen tehty hitsi TIP TIG:n langansyötön oskillaatiota ja kuumalankaa hyödyntäen. Koekappaleessa 2 tunkeuman suuruus on lähes kaksinkertainen koekappaleeseen 1 nähden (kuva 18). Samoilla hitsausparametreillä tehtyyn kokeeseen 10 nähden ainoa muutos on materiaali. Koekappaleessa 10 ei ole havaittavissa yhtä suurta eroa sen verrokkikappaleeseen 9 nähden (kuva 20).

Koehitsien 3 ja 4 (kuva 19) tehollinen a-mitta on lähes identtinen, mutta kappaleessa 4 on pienempi nimellinen a-mitta. Makrohiekuvista huomataan hitsien olevan hieman eri muotoisia. Hitsissä 4 on suurempi tunkeuma. Hitsin 4 tunkeumaprofiili näyttää olevan hieman terävämmän ja syvemmän muotoinen kuin hitsissä 3. Samanlainen tunkeumaprofiilin erimuotoisuus näkyy huomattavasti selkeämmin verratessa hitsejä 1 ja 2, joista hitsin 2 tunkeuma muistuttaa muodoltaan enemmän MIG/MAG hitsiä kuin TIG-hitsiä. Samoilla hitsausparametreillä langansyötön oskillaatio siis lisää tunkeumaa tehden hitsin tunkeumaprofiilista terävämmän ja syvemmän.

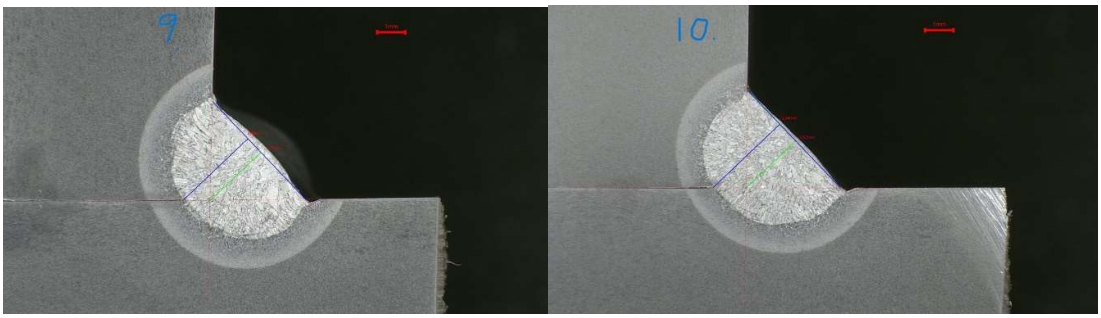
Koekappaleissa 11 ja 12 (kuva 21) on havaittavissa merkittävästi suurempaa reunahaavaa kuin muissa pienaliitoskokeissa. Hitsausvirta on siis ollut luultavasti liian suuri, tai lisäainetta ei ole syötetty riittävällä tahdilla. Hitsauskokeita suorittaessa tehtyihin havaintoihin perustuen voidaan todeta, että nämä koekappaleet olisi pitänyt toteuttaa pienemmällä virralla tai hitsausnopeudella.



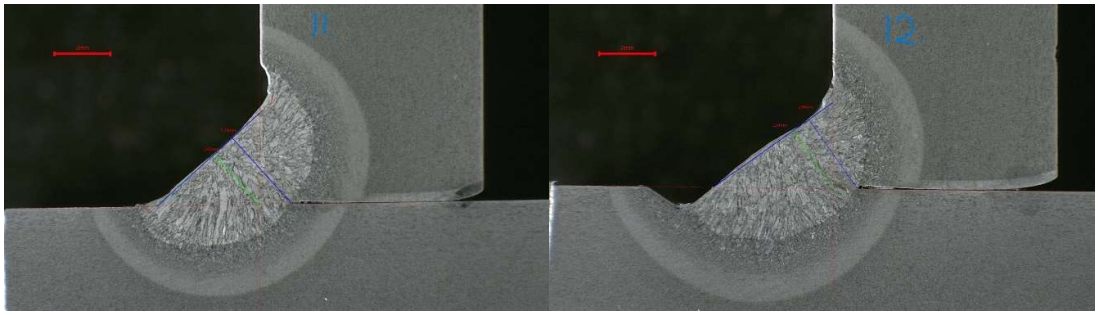
Kuva 18: koekappaleiden 1 (vas) ja 2 makrohiekuvat



Kuva 19: Koekappaleiden 3 (vas) ja 4 makrohiekuvat



Kuva 20: Koekappaleiden 9 (vas) ja 10 makrohiekuvat

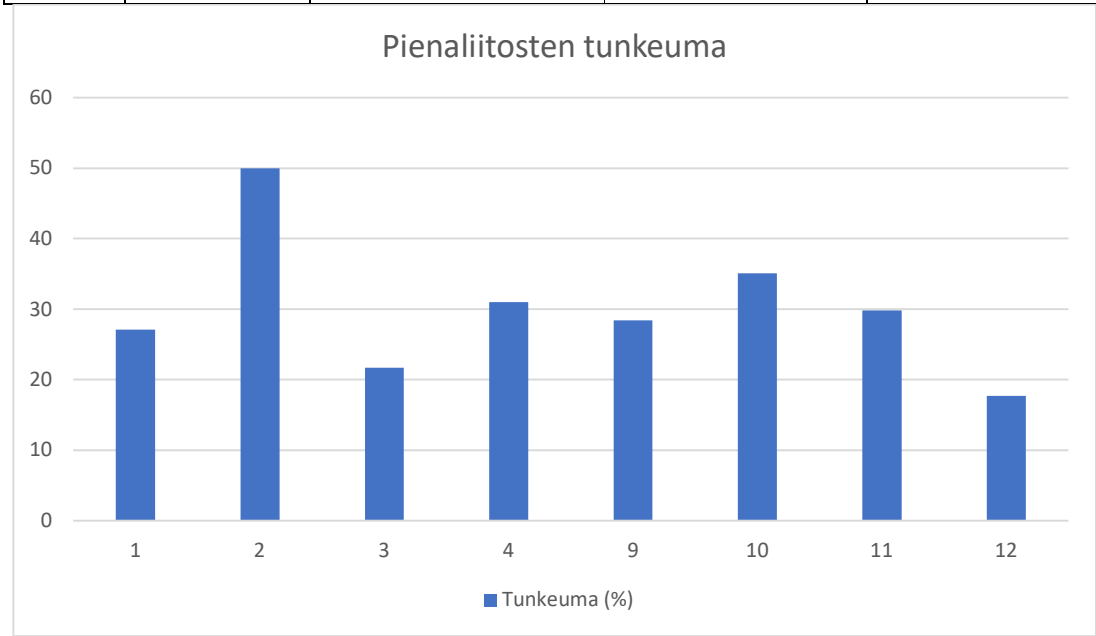


Kuva 21: Koekappaleiden 11 (vas) ja 12 makrohiekuvat

Taulukossa 4 on listattuna pienaliitosten a-mitat, tunkeumat, sekä tunkeuma kuvattuna prosenttilukuna tehollisesta a-mitasta. Kyseinen prosenttiluku on pienaliitosten osalta havainnollistettu myös kuvassa 22. Kuvan 22 perusteella voidaan todeta tunkeuman osuuden tehollisesta a-mitasta olevan suurin koekappaleessa 2.

Taulukko 4: Pienahitsien a-mitat.

koe	Nimellinen a-mitta (mm)	Tehollinen a-mitta (mm)	tunkeuma (mm)	Tunkeuma (%)
1	2,66	3,38	0,72	27,1
2	2,62	3,93	1,31	50,0
3	2,40	2,92	0,52	21,7
4	2,26	2,96	0,7	31,0
9	2,71	3,48	0,77	28,4
10	2,62	3,54	0,92	35,1
11	2,42	3,14	0,72	29,8
12	2,54	2,99	0,45	17,7



Kuva 22: Pienaliitosten tunkeuma ilmaistuna prosenttilukuna nimellisestä a-mitasta.

Päittäisliitosten vertailussa keskitytään pääosin tunkeuman, eli hitsin syvyyden suuruuteen. Sen lisäksi huomiota kiinnitetään hitsin leveyteen, sekä syvyys/leveys-suhteeseen. Pääasiallisesti syvempi tunkeuma on parempi, sillä se tarkoittaa hitsausprosessin kannalta vähemmän esivalmisteluja, sekä nopeampaa hitsausprosessia. Päittäisliitosten hitsin leveydet, syvyydet sekä syvyys/leveys suhteet on listattu taulukkoon 5.

Taulukko 5: Päittäisliitosten hitsien mitat koekappaleittain

	Hitsin leveys (mm)	Tunkeuma (mm)	k/l
5	8,26	2	0,24
6	8,68	2,19	0,25
7	10,62	2,31	0,22
8	10,97	2,76	0,25
13	5,69	2,21	0,39
14	6,52	2,44	0,37
15	7,5	3,45	0,46
16	7,31	3,4	0,47

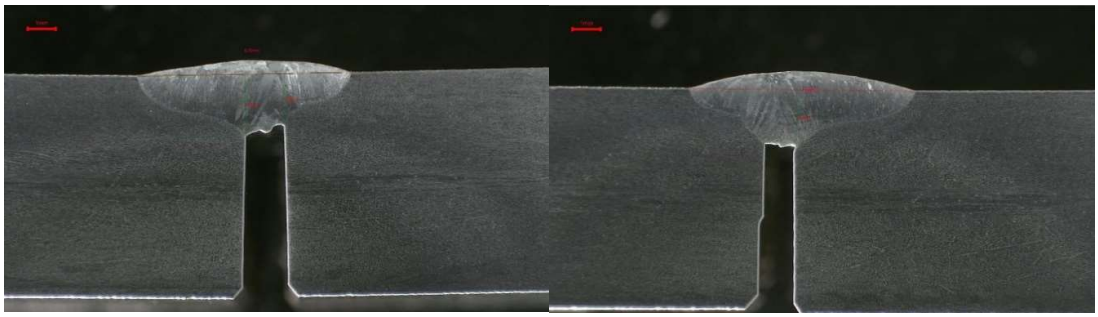
Koekappaleen 5 ja 6 (kuva 23) väliset erot ovat pienet, mutta suhteellisesti koekappaleessa 6 on kuitenkin noin 10 % suurempi tunkeuma. Myös hitsin leveys on koekappaleessa 6 suurempi. Koekappaleiden syvyys:leveys suhteet ovat lähes identtiset. Tässä tapauksessa siis langansyötön oskillaatiolla ei ollut merkittävää vaikutusta. Koekappaleet 7 ja 8 (kuva 24) ovat myös hyvin samoissa hitsin poikkileikkauksen mitoissa keskenään, mutta näistä kahdesta koekappaleessa 8 on kuitenkin lähes 20 % suurempi tunkeuma. Makrohiekuvista kuitenkin nähdään hitsin 8 olevan ainakin paikallisesti hyvin toispuoleinen.

Rakenneteräksisillä koekappaleilla kaikissa makrohiekuvissa ilmenee pientä reunahaavaa. Vaikka hitsausparametrit pysyivät samoina verrokkiryhmien kesken, rakenneteräksisissä koekappaleissa on kautta linjan vähintään 10 % syvempi tunkeuma kuin ruostumattomilla teräksillä. Koekappaleissa 13-16 hitsikupu on huomattavasti kuperampi kuin ruostumattomilla teräksillä koekappaleissa 5-8.

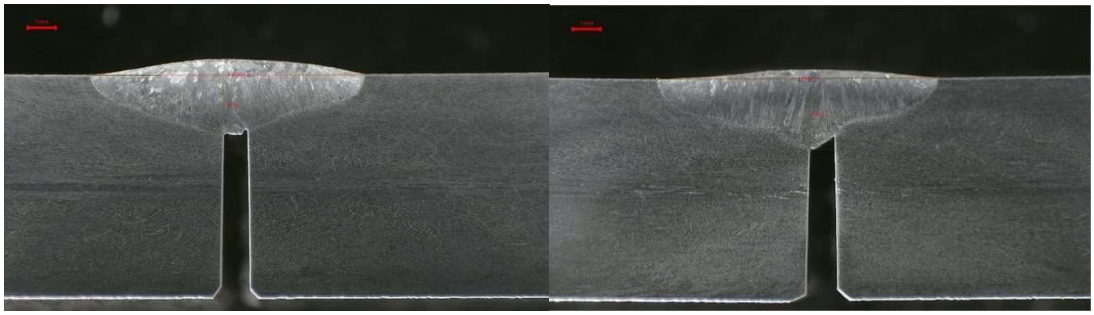
Koekappaleiden 13 ja 14 (kuva 25) välillä on hitsin muodossa huomattava ero. kappaleessa 13 lisäainetta on jäänyt kuprulle perusaineen linjan yläpuolelle, mutta koekappaleessa 14 kaikki lisäaine on päätynyt hitsausrailoon. Koekappaleessa 14 kuitenkin hitsin juuressa on

pientä toispuoleisuutta ja lisäaine ei ole kaikilta osin sulanut perusmateriaaliin kiinni. Myös hitsi 13 on railossa hieman toispuoleisesti. Lisäaineen sijoittumisen ero johtunee koekappaleen 14 paremmasta kohdistuksesta hitsauksen ajaksi, jolloin lisäaine on päässyt työntymään syvälle hitsausrailoon.

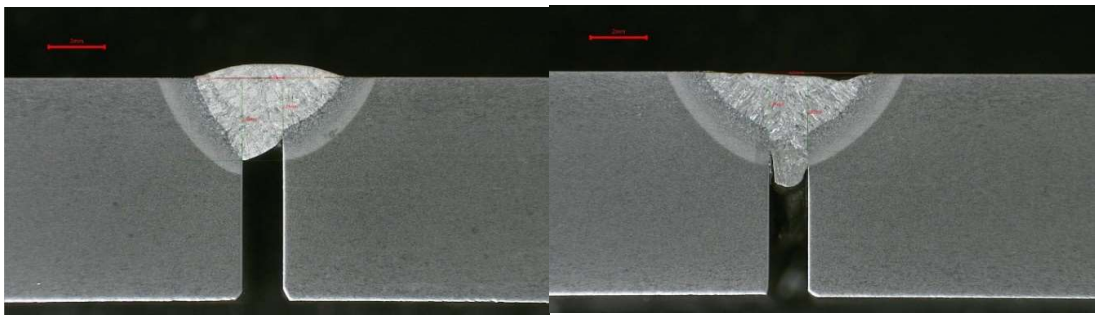
Koekappaleissa 15 ja 16 (kuva 26) ei näy muuta merkittävää eroa, kuin koekappaleessa 15 esiintyvä pienehkö hitsialueen reunojen vajoaminen.



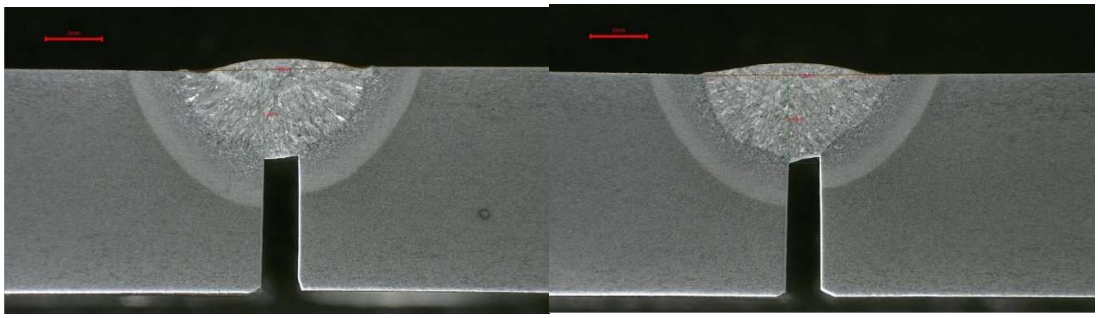
Kuva 23: Koekappaleiden 5 (vas) ja 6 makrohiekuvat



Kuva 24: Koekappaleiden 7 (vas) ja 8 makrohiekuvat

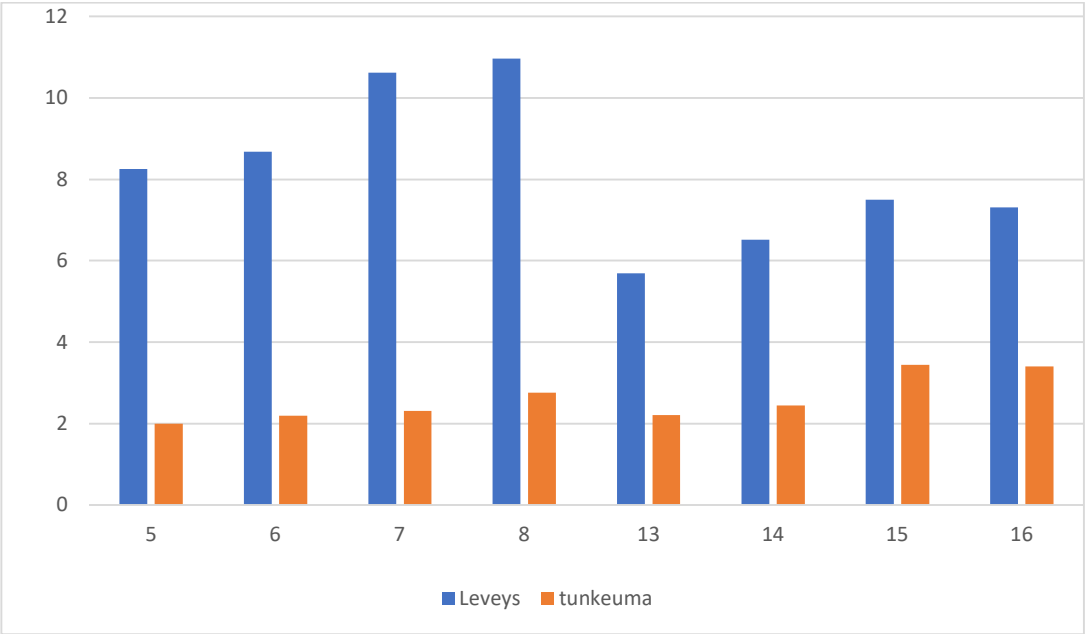


Kuva 25: Koekappaleiden 13 (vas) ja 14 makrohiekuvat



Kuva 26: koekappaleiden 15 (vas) ja 16 makrohiekuvat

Kuvaan 27 on koottu kaikkien päittäisliitosten makrohiekuvista mitatut hitsien leveydet sekä tunkeumat. Kaaviosta on nähtävissä trendi, jonka mukaan langansyötön oskillaatio kasvattaa tunkeumaa kaikissa kappaleissa. Tunkeuman lisäksi lähes jokaisessa tapauksessa oskillaatio sai aikaan myös leveämmän hitsin. Huomattavaa on, että kylmällä lisäainelangalla tehdyt hitsit ovat leveydeltään suurempia kuin kuumalankaa hyödyntäen tehdyt liitokset. Tämä johtuu todennäköisesti merkittävästi hitaammasta hitsausnopeudesta, jota kylmälankahitsauksissa sovellettiin.



Kuva 27: Päittäisliitosten leveydet ja tunkeumat

4.2 Pinnanlaatu

Jokaista tehtyä hitsausliitosta tarkasteltiin myös ulkoisesti. Pääasiallisesti vertailukelpoisten liitosten, eli niiden, jotka suoritettiin keskenään samoilla hitsausparametreillä, välillä esiintyneet erot ovat hyvin pieniä. Koekappaleissa ei ole huomattavissa merkittäviä roiskeita hitsausprosessista.

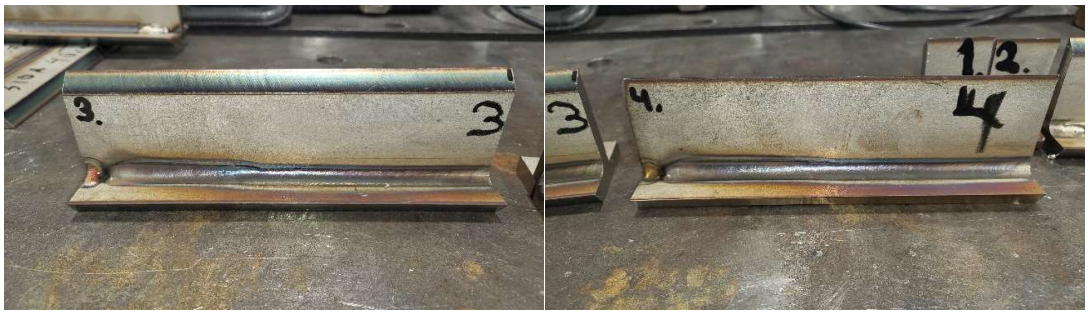
Lähes kaikissa koekappaleissa on näkyvissä hitsin puolivälin paikkeilla pieni sivuttaissiirtymä. Kokeita toteuttaessa tämän arvioitiin johtuvan hitsaustornin liikkeen mukana tulevasta pienestä sivuttaisesta heilahduksesta. Siirtymä luultavasti ei vaikuttanut kokeiden tuloksiin juuri yhtään, sillä notkahdus tapahtui jokaisella kappaleella suunnilleen samassa kohdassa, ja kaikki makrohieet otettiin samalta puolelta notkahdusta.

Ruostumattomasta teräksestä tehtyjen pienaliitosten ulkonäössä ei juurikaan ole kommentoitavaa. Ehkä pieni huomio siitä, että koekappaleissa 1 ja 2 (kuva 28) värinmuutosta esiintyy vähemmän ja pienemmällä alueella kuin koekappaleissa 3 ja 4 (kuva 29). Tämä on taas kerran selitettävissä kuumalangan ja kylmälangan välisen hitsausnopeuden ja siten myös lämmöntuonnin erolla. Koekappaleisiin 3 ja 4 on siis nähtävästi tuotu hitsausprosessissa enemmän lämpöä kuin koekappaleisiin 1 ja 2.

Rakenneteräksisissä vastaavanlaista eroavaisuutta on vaikeampi huomata. Koekappaleissa 9 ja 10 (kuva 30) alalevyn reunassa näkyy selkeää värikirjoa lämmöstä. Alalevy on kuitenkin koekappaleilla 11 ja 12 (kuva 31) eri päin, eli valoa vasten kuvissa vastaava pinta ei ole näkyvissä. Ulkomuodoltaan rakenneteräkseen tehdyt hitsit näyttävät pääosin hyvältä, pienenä poikkeuksena koekappaleissa 11 ja 12 havaittavissa oleva pieni reunahaava. Samat reunahaavat ovat näkyvissä myös makrohiekuvissa.

Erityismainintana koekappaleen 12 hitsauksen loppupäässä joko kappale tai hitsaustorni on todennäköisesti liikahtanut, tai kappale on alkujaankin kohdistettu huonosti. Tämän takia hitsin viimeiset pari senttiä ovat kokonaan alalevyssä. Myös makrohiekuvasta oli nähtävissä, että hitsi oli koekappaleessa 12 hieman suuntautunut alalevyyn.

Kuva 28: Koekappaleet 1 (vas) ja 2



Kuva 29: Koekappaleet 3 (vas) ja 4

Kuva 30: Koekappaleet 9 (vas) ja 10

Kuva 31: Koekappaleet 11 (vas) ja 12

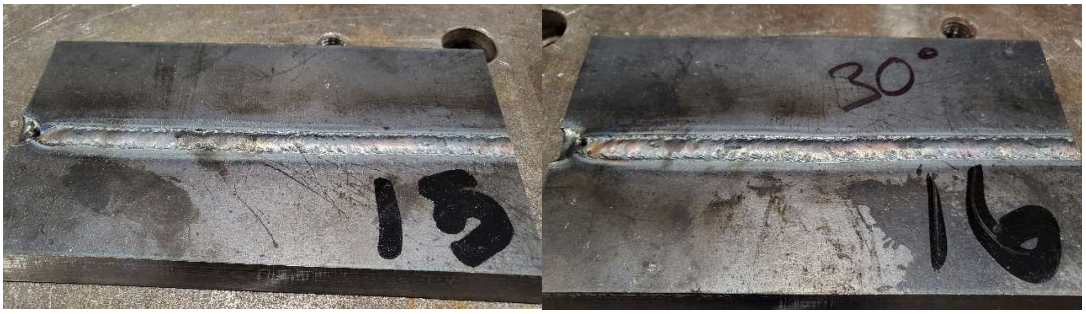
Kuten pienaliitoksissa, myös ruostumattomien terästen päittäisliitoksissa ulkonäölliset eroavaisuudet ovat hyvin vähäisiä. Myös näistä on huomattavissa, että koekappaleilla 7 ja 8 (kuva 33) lämmöstä värjääntynyt alue on suurempi kuin koekappaleilla 5 ja 6 (kuva 32).

Rakenneteräkseen tehtyihin päittäisliitoksiin (kuvat 34 ja 35) pätee samat havainnot kuin vastaaviin pienaliitoksiinkin, kylmälangalla tehdyissä koekappaleissa on nähtävissä pientä reunahaavaa, joka näkyi myös makrohiekuvissa.

Kuva 32: Koekappaleet 5 (vas) ja 6

Kuva 33: Koekappaleet 7 (vas) ja 8

Kuva 34: Koekappaleet 13 (vas) ja 14



Kuva 35: Koekappaleet 15 (vas) ja 16

5 Johtopäätökset

Tutkimuksen tarkoituksena oli kartoittaa ja vertailla olemassa olevia prosessimodifikaatioita TIG-hitsauksen tuottavuuden parantamiseen. Tutkimus koostui kirjallisuuskatsauksesta ja kokeellisesta osuudesta. Kirjallisuuskatsauksessa etsittiin tietoa useista erilaisista ja eri hitsauslaitevalmistajien valjastamista tavoista tehostaa TIG-hitsausta. Hitsauskokeissa taas perehdyttiin kahteen eri tuottavuuden parantamisen tapaan ja niiden yhdistämiseen, sekä variaatioiden vertailuun.

Kirjallisuuskatsauksen tuloksena voidaan jakaa TIG-hitsauksen tehostaminen karkeasti kahteen ryhmään: lisäaineentuoton kasvattamiseen ja tunkeuman kasvattamiseen. Aiempien tutkimusten perusteella kuumalanka-TIG mahdollistaa noin 2-3 kertaisen lisäaineentuoton kylmään lisäainelangansyöttöön verrattuna. Lisäainelangansyötön mekanisointiin laitteistoillaan pyrkivät esimerkiksi EWM ja TIP TIG. Molemmat tarjoavat lisäainelangansyötön oskillaatiota laitteillaan. Aikaisempien tutkimusten mukaan lisäainelangan oskillaatio voi parantaa hitsausliitoksen korroosionkestävyyttä sekä väsymiskestoikää.

Kirjallisuuskatsauksessa tunkeumaa kasvattavina prosessimodifikaatioina esiintyivät keyhole-TIG-hitsaus sekä A-TIG hitsaus. Keyhole-TIG:illä voidaan aikaisempien tutkimusten mukaan saavuttaa jopa 12 millimetrin ainepaksuuksilla läpitunkeuma. Aktivoitu TIG-hitsaus puolestaan yltää jopa 7,5 mm tunkeumaan.

Kokeellisessa osuudessa keskityttiin TIP TIG laitteistoon ja sen yhdistämien kuumalangan sekä langan oskillaation yhteisvaikutukseen. Koetuloksia verratessa voidaan todeta, että kuumalangan merkitys TIG-hitsauksen tuottavuuteen on huomattava. Langansyötön oskillaatiolla oli odotettua pienempi vaikutus, mutta vaikutus oli kuitenkin olemassa. Koesarjalla huomattiin selkeästi trendi, jossa langansyötön oskillaatio mahdollisti suurempaa tunkeumaa. Tunkeuma vastaavasti mahdollistaisi joissain tapauksissa nopeamman hitsausprosessin.

Vaikka suoranaisesti kokeellisessa osuudessa tutkitun prosessivariaatioyhdistelmän osalta aikaisempi tutkimus on hyvin vähäistä tai jopa olematonta. Kokeellisen osuuden tulokset vastasivat odotuksia sekä kuumalangan, että oskillaation osalta aikaisempaan tietoon

nähden. Kokeellisen osuuden osalta on hyvä huomata, että kullakin koejärjestelyvariaatiolla tuotettiin vain yksi koekappale. Tältä osin koetulosten tarkkuus voi olla vaihteleva.

Lähteet

Bao LL, Han T ja Wang Y (2020) Microstructure and Properties of Lean Duplex Stainless Steel UNS S32101 Welded Joint by Hot Wire TIG Welding. *Materials Science Forum* 993: 466-473.

Cornu J and Weston J, (1988) *Advanced Welding Systems. 3, TIG and Related Processes.* Bedford; IFS.

das Neves N, Fernandes MF, Von Dollinger CF,de Avila, Assis JMK ja Voorwald HJC (2022) Effects of GTAW Dynamic Wire Feeding Frequencies on Fatigue Strength of ASTM A516-70 Steel Welded Joints. *Journal of Materials Engineering and Performance* 31(8): 6435-6450.

EWM. EWM Hitsauskoneet ja Tarvikkeet. 2023a [EWM:n kotisivuilla]. [Viitattu 10.3.2023]. Saatavissa: https://www.ewm-group.com/en/innovation-research/tig-welding-processes

EWM. tigSpeed TIG Cold/Hot Wire Welding. 2018. [EWM:n www-sivuilta]. [Viitattu 17.8.2023] Saatavissa: https://www.ewm-group.com/d/index.php?pw=Prospekte/053_000060_00001.pdf

EWM. TIG-Hitsaus. 2023b. [EWM:n www-sivuilla]. [Viitattu 16.8.2023]. Saatavissa: https://www.ewm-group.com/de/innovation-forschung/schweissverfahren-wig.html

Fortain JM, Guiheux S ja Opderbecke T (2013) Thin-sheet metal welding. *Welding International* 27(1): 30-36.

Fronius. Welding Technology. 2018. [Froniuksen www-sivuilla]. [Viitattu 17.8.2023]. Saatavissa: https://www.fronius.com/en/welding-technology/info-centre/magazine/2018/well-cooled-at-maximum-power

Gonçalves e Silva RH, Correa Riffel K, Pompermaier Okuyama M ja Dalpiaz G (2019) Effect of dynamic wire in the GTAW process. *Journal of Materials Processing Technology* 269: 91-101.

Hori K, Watanabe H, Myoga T ja Kusano K (2004) Development of hot wire TIG welding methods using pulsed current to heat filler wire - research on pulse heated hot wire TIG welding processes. *Welding International* 18(6): 456-468.

How to weld stainless steel with keyhole TIG. 2017 [www-sivu]. Fabricating and metalworking, 2017. [Viitattu 17.8.2023]. Saatavissa: https://www.fabricatingandmetalworking.com/2017/10/how-to-weld-stainless-steel-with-keyhole-tig

K-TIG. Automated welding. 2023. [K-TIG:n www-sivuilla]. [Viitattu 16.8.2023]. Saatavissa: www.k-tig.com

Lepola, P. & Makkonen, M. (1998) Hitsaus ja teräsrakenteet. Helsinki: WSOY.

Lincoln Electric. TOPTIG Original Instructions. 2018. [Lincolcn Electricin www-sivuilla]. [Viitattu 7.2.2023]. Saatavissa: https://assets.lincolnelectric.com/assets/EU/OperatorManuals/Automation/5600-en-f.pdf

Liu Z, Fang Y, Cui S, Luo Z, Liu W, Liu Z, Jiang Q ja Yi S (2016) Stable keyhole welding process with K-TIG. *Journal of Materials Processing Technology* 238: 65-72.

Miller Electric. Automation systems. 2023. [Miller Electric:in www-sivuilla]. [Viitattu 16.8.2023]. Saatavissa: https://www.millerwelds.com/equipment/automation-systems/jetline-fixed-automation/jetline-accessories-m30138#!/?product-options-title=jetline-hot-wire-feeder-jet1520.

Pigozzo IO, e Silva RHG, Galeazzi D ja Pereira AS (2022) Pulsed dynamic wire feeding with low insertion angle in GTAW process: a metal transfer characterization. *Welding in the World* 66(10): 2107-2118.

Riffel KC, e Silva RHG, Haupt W, da Silva LE ja Dalpiaz G (2020) Effect of dynamic wire in the GTAW process: Microstructure and corrosion resistance. *Journal of Materials Processing Technology* 285: 116758.

Sharma G, Tyagi R, Priyanshu ja Sharma P (2022) Variants of TIG welding process for improvement of weld penetration depth - A review. *Materials Today : Proceedings* 64: 1362-1366.

Silva RHGe, Schwedersky MB ja Rosa ÁFd (2020) Evaluation of toptig technology applied to robotic orbital welding of 304L pipes. *The International Journal of Pressure Vessels and Piping* 188: 104229.

TIP TIG. HDMT Focus. 2023a. [TIP TIG:in www-sivuilla]. [Viitattu 17.8.2023]. Saatavissa: tiptig-international.com/HDMTFocus.html

TIP TIG. Keyhole TIG welding. 2023b. [TIP TIG:in www-sivuilla]. [Viitattu 17.8.2023]. Saatavissa: https://tiptig.com/keyhole-tig-welding

TIP TIG. Wire Speed Calculator. 2023c. [TIP TIG:in www-sivuilla]. [Viitattu 7.2.2023]. Saatavissa: https://tiptig.com/support/wire-speed-calculator/

Vidyarthy RSja Dwivedi DK (2016) Activating flux tungsten inert gas welding for enhanced weld penetration. *Journal of Manufacturing Processes* 22: 211-228.

Wang L, Zhao P, Pan J, Tan L ja Zhu K (2021) Investigation on microstructure and mechanical properties of double-sided synchronous TIP TIG arc butt welded duplex stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 112(1-2): 303-312.

Wilson M (2007) TIP TIG: new technology for welding. *Industrial Robot* 34(6): 462-466.

Liite 1: K-TIG vs TIG vertailutaulukko (K-TIG 2023)

K-TIG vs TIG

@K-TIG

KEYHOLE TIG AND TUNGSTEN INERT GAS COMPARED

FEATURES	GTAW	K-TIG
Depth of Penetration	Typically 3mm (1/8") maximum. Anything over this, and typical edge preparation is required.	K-TIG can provide depth of penetration from between 3mm (1/8 Inch) material thickness up to 12mm (1/2 Inch) depending on the material type and application. **Note, material thicknesses outside of these ranges can also be achieved with K-TG with different approaches**
Welding Speed	Average between 100mm (4 Inch) per minute and 150mm (6 Inch) per minute. For each weld pass regardless of material thickness.	Average between 250mm (10 Inch) per minute and 1000mm (40 Inch) for full penetration Single Pass Welding.
Weld Quality	Extremely high. GTAW is a sought after process for many welding application that requires the highest results.	Much like conventional GTAW... Extremely high quality welding.
Joint Preparation	Any and all but typically dependent on the skill level of the operator.	Greatest strengths lie with Full Penetration butt welds. There is a lot of flexibility in joint types that make up full penetration butt welds. K-TIG can be programmed as a conventional GTAW welder to accommodate all other joints types.
Weld Appearance	Completely reliant on the skill level of the operator.	Being an automated process, The weld appearance is very smooth and consistent. Minimal penetration push through and consistent cap profile.
Distortion	Often requires additional care and management	Dramatically minimised by the ability to perform welds with great depth of penetraton and with no root gap.
Process Consistency	Completely reliant on the skill level of the operator.	Being an automated process, extremely consistent and repeatable.
Equipment Consumable Costs	Lifetime costs are high. Cheap consumables but are constantly being replaced due to wear and costs add up over time.	Lifetime costs very low. K-TIG's equipment consumables are built to last a very long time in the most extreme conditions
Operator Skillset	Typically one of the highest skill level welding processes.	Once set up, the skill level to perform extremely high quality welding can be performed by any trained operator.
Duty Cycle	Typically 20% - 30% at Maximum Amperage	All K-TIG welding systems have a 100% duty cycle at 1000 AMPS

K-TIG
ADVANCED WELDING SYSTEMS
Learn More Today:
www.k-tig.com

Disclaimer: The information contained on this page is for general information only. All information is provided in good faith, however we make no representation of any kind, express or implied regarding the accuracy, adequacy, validity, reliability, availability or completeness of any information on this page.

Liite 2: Froniuksen nettisivuilta löytyvä ArcTig esite. (Fronius 2018)

TIG

APPLICATIONS

/ Construction of tanks and vessels
/ Pipeline construction
/ Continuous production of pipes
/ Special machine construction
/ Turbine production

REDUCTION OF PREPARATORY WORK AND REWORKING

/ Minimal to no joint preparation up to a material thickness of 10 mm
/ No weld-pool support needed
/ Low level of weld seam crowning and low distortion
/ No spatter

EASY TO USE

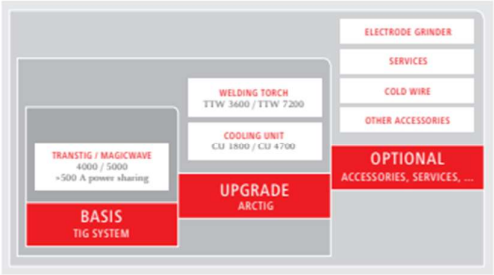
/ Welding parameters are easy to set and select
/ Easy changing and regrinding of electrodes
/ Electrode clamping system for setting the free end of the electrode
/ Flexibility in terms of welding position

REDUCTION OF THE WELD SEAM VOLUME

/ Welding operations in materials up to 10 mm thick without joint preparation
/ Savings on gas, filler metal and electricity

INCREASED WELDING SPEED

/ Up to a 100% increase in the welding speed compared to the traditional TIG process



System Overview ArcTig

What's your welding challenge?
Let's get connected.

www.fronius.com