LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0401 KANDIDAATINTYÖ JA SEMINAARI

PULSSITUKSEN VAIKUTUS TANDEM-MAG-PÄÄLLEHITSAUKSESSA
EFFECT OF PULSE PARAMETER IN TANDEM MAG-WELDING

Lappeenrannassa 19.1.2015

Mikko Ronkanen

Tarkastaja: Yliopisto-opettaja Suoranta Raimo

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO ... 3
2 TANDEMHITSAUS ... 4
2.1 Hitsausasennot, liitostyypit ja mekanisoitavuus ... 5
2.2 Tandemhitsauksen lisäaineet ja suojakaasut ... 7
2.3 Tandemhitsaus verrattuna muihin hitsausprosesseihin ... 8
3 PULSSITUS ... 10
4 MAGNEETTINEN PUHALLUS ... 12
4.1 Magneettinen puhallus tandemhitsauksessa ... 13
5 SEKOITTUMISASTE ... 14
6 PULSSITUKSEN VAIKUTUS TANDEM-HITSAUKSESSA ... 15
6.1 Hitsauslaitteisto ... 15
6.2 Perusaineet ja hitsausaineet ... 16
6.3 Hitsausarvot ... 17
7 TUTKIMUSTULOKSET ... 18
8 TULOSTEN ANALYSOINTI JA JOHTOPÄÄTÖKSET ... 20
9 LÄHTEET ... 22
LIITE
Liite 1. Koekappaleiden makrohieet

1 JOHDANTO

Hitsauksen tehokkuutta pyritään parantamaan eri keinoin, jotta hitsaustuotanto olisi kannattavampaa sekä joissain tapauksissa edes mahdollista. Hitsausprosessia voidaan tehostaa tuomalla hitsisulaan toinen virrallinen lanka. Tällaista hitsausta kutsutaan tandemhitsaukseksi. Tandemhitsauksessa käytetään tavallisesti kahta lankaa, joilla molemmilla on omat virtalähteensä ja täten ovat säädettävissä omille parametreilleen.

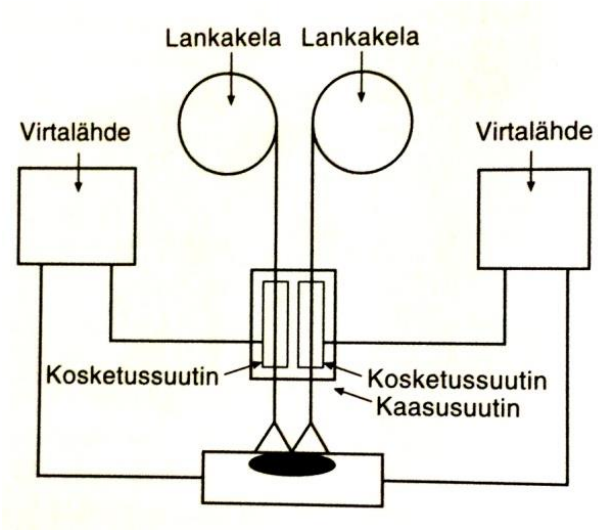
Työssä tutkitaan voidaanko pulssituksen parametreja säätämällä saada pinnoitukseen soveltuvat hitsausarvot tandemhitsauksessa. Pulssituksella vaikutetaan lisäaineen siirtymisen hitsauksessa siten, että virtapulssin aikana irtoaa pisara lisäainetta hitsisulaan (Lukkari, 2002, s. 172).

Työssä suoritettiin hitsauskokeet Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsauslaboratoriossa kesäkuussa 2013. Hitsauslaitteistossa käytettiin pulssitettua aluetta ja lisäksi pulssitonta MIG-aluetta. Pulssituksessa valittiin negatiivisia, positiivisia sekä 0-arvon pulsseja. Pulssituksen lisäksi valittiin etummaiselle ja takimmaiselle hitsauslangalle pulssiton MIG-hitsausvirta. Hitsauskokeita tehtiin kaikkiaan 14 kappaletta, joiden poikkileikkauskuvasta tutkittiin sekoittumisaste.

Työn teoriaosuudessa keskitytään tandemhitsaukseen ja siinä käytettävään laitteistoon. Lisäksi käsitellään sekoittumisasteen määräytyminen ja magneettinen puhallus tandemhitsauksessa. Työn ensimmäisessä osassa tutustutaan tandemhitsauksen periaatteeseen ja toimintaan sekä pulssituksen periaatteeseen. Koeosuudessa esitellään koejärjestelyt ja hitsausparametrit sekä kokeiden suorittaminen. Tutkimustulosten perusteella on suoritettu analysointi sekä johtopäätökset kappaleessa 7.

2 TANDEMHITSAUS

MIG/MAG-prosesseihin on saatu jauhekaarihitsauksessa jo kauemmin käytetty monilankatekniikka. Tandemhitsauksessa käytetään kahta lankaa, joilla molemmilla on omat virtalähteensä. Molemmille langoille on omat eristetyt kosketussuuttimet, jolloin langat pystyvät toimimaan erilaisilla hitsausparametreillä. Kosketussuuttimet ovat saman ellipsinmuotoisen kaasusuuttimen sisällä. Tandemlaitteiston periaate on esitetty kuvassa 1. (Lukkari, 2001, s. 133; Lukkari, 2002, s. 191–192.)



Kuva 1. Tandemlaitteiston periaate (Lukkari, 2001, s. 134).

Tandemlaitteisto sisältää kaksi virtalähdettä, joihin on asennettu tandemhitsaukseen soveltuvat ohjelmistot. Molemmat hitsauslangat vaativat omat langansyttölaitteistot, jotka ohjaavat hitsauslangan kosketussuuttimille. Hitsauslaitteistossa on vesijäähdytin, joka jäähdyttää hitsauspoltinta. Polttimeen tulee lisäksi suojakaasunsyöttö. Hitsauslaitteisto tulee mekanisoida tai robotisoida käytettävyyden takia. (Nadzam, 2003, s. 30.)

Tandemhitsauksessa on mahdollista säätää suutinten kulmaa ja sekä lankojen tulokulmaa toisiinsa nähden. Suuttimet tandemlaitteistossa ovat yleensä hieman kallellaan toisiaan nähden. Suuttimien välinen kulma on yleensä noin 10°. Hitsauslankojen välinen etäisyys hitsin pinnassa on yleensä noin 4-10 millimetriä. Tandemhitsauksessa käytetään usein pulssikaarta, joka vakauttaa hitsaustapahtumaa. Muut hitsauksessa käytettävät kaarityypit ovat kuumakaari-kuumakaari, kuumakaari-pulssikaari sekä pulssikaari-kuumakaari. Tandemhitsauksessa sula on tyypillisesti pitkänomainen. Ensimmäisellä hitsauslangalla tehdään hitsiin tunkeuma ja taaempi lisäainelanka muotoilee hitsin pintaa. (Lukkari, 2001, s. 133–134; Uusitalo, 2011, s. 16.)

Tandemhitsauksen etuina on esimerkiksi hyvin suuri nopeus pienahitsauksessa ja limiliitoksissa (Lukkari, 2001, s. 132). Meurosen (1998, s. 4-5) mukaan tandemhitsausta käytetään: ”nostolaite- ja ajoneuvoteollisuudessa, maanrakennuslaite- ja maatalouslaitetollisuudessa, auto- ja laivanrakennusteollisuudessa, lämmityskattila- ja säiliönvalmistusteollisuudessa, sekä kevyestä ja raskaasta konepajateollisuudesta”.

Tandemhitsausta muistuttavassa TWIN-hitsauksessa käytetään myös kahta lisäainelankaa. TWIN-hitsauksessa on molemmilla lisäainelangoilla yhteinen virtalähde, eikä täten hitsausparametrejä pysty säätämään yhtä monipuolisesti kuten tandemhitsauksessa. (Meuronen, 1998, s. 1.)

2.1 Hitsausasennot, liitostyypit ja mekanisoitavuus

Tandemhitsausta voidaan käyttää eri asennoissa. Kuitenkin ehdottomasti käytetyin on jalkoasento. Lakipienasta sekä vaaka- ja pystyhitsauksesta on olemassa kokemusta. Tandemhitsauksessa yksilankahitsausta suurempi hitsisula voi kuitenkin aiheuttaa haasteita tietyissä tapauksissa. Suurempi hitsisula tuleekin huomioida erityisesti, kun hitsataan muissa kuin jalkoasenossa. (Meuronen, 1998, s.1-5.)

Tandem-MIG/MAG soveltuu erinomaisesti seuraaviin liitosmuotoihin:

- jalkoasennossa suoritetut päälekkäishitsit
- vaaka- ja jalkoasennossa suoritettavat pienahitsit
- porrasmuotoiset hitsit jalkoasennossa
- jalkoasennossa suoritettavat viistetyt hitsit

- J-muotoiset railohitsaukset
- kaartuvat piena- ja jalkohitsit

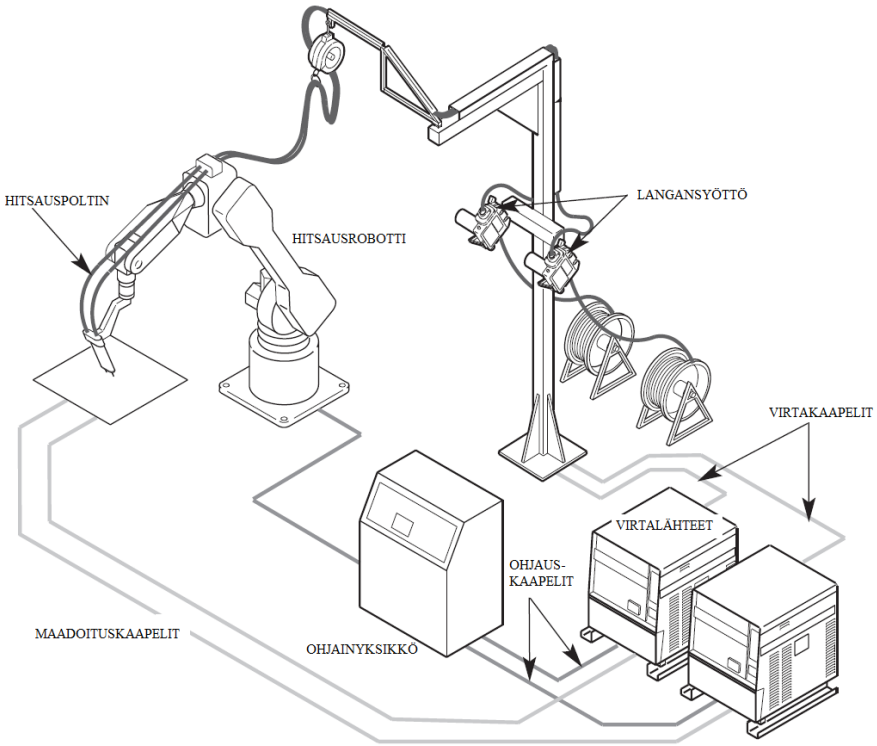
(Lincoln Electric, 2005, s. 11.)

Tandem- MIG/MAG soveltuu huonosti seuraaviin liitosmuotoihin:

- magneettiselle puhallukselle herkät hitsauskohteet
- hankalia kulmia ja käännöksiä vaativat hitsaukset
- saumaushitsauksiin
- ohuiden materiaalipaksuuksien päittäisliitokseen

(Lincoln Electric, 2005, s. 11.)

Tandem-MIG/MAG-hitsaus on käytännössä aina mekanisoitu tai robotisoitu. Mekanisoinnin tarve johtuu nestejäähdytetyn polttimen koosta, suuresta sulatustehosta ja suuresta hitsausnopeudesta. Tandemhitsauksessa käyttökohteita rajoittaa suuri polttimen koko sekä hitsauksessa vaaditaan yksilankahitsausta suurempi säde kääntymiseen. Erityisesti ahtaissa tiloissa hitsattaessa tulee huomioida polttimen koon asettamat rajoitukset. Jalkoasentoa haastavammissa hitsausasennoissa on erityisen tärkeää oikeanlaiset hitsausparametrit sekä hyvä mekanisointi. Robotisoidun tandemhitsauslaitteiston periaate on esitetty kuvassa 2. (Meuronen, 1998, s. 1-5.)



Kuva 2. Esimerkkikokoonpano robotisoidusta tandemhitsauslaitteistosta (mukaillen: Lincoln Electric, 2005, s. 13).

2.2 Tandemhitsauksen lisäaineet ja suojakaasut

Yleisesti tandemhitsauksessa käytetään lisäainelankoina umpilankoja. Käytössä olevat langanpaksuudet ovat tavallisesti noin 1,2 mm. Halkaisijaa voidaan kuitenkin muuttaa tarpeen mukaan paksummaksi tai ohuemmaksi. Lisäainelangat voivat olla myös keskenään erilaisia. Hitsauksen lisäaineena voidaan käyttää siis esimerkiksi kahta eri seosta samanaikaisesta tai umpilanka-täytelanka -yhdistelmää. (Meuronen, 1998, s. 4-5.)

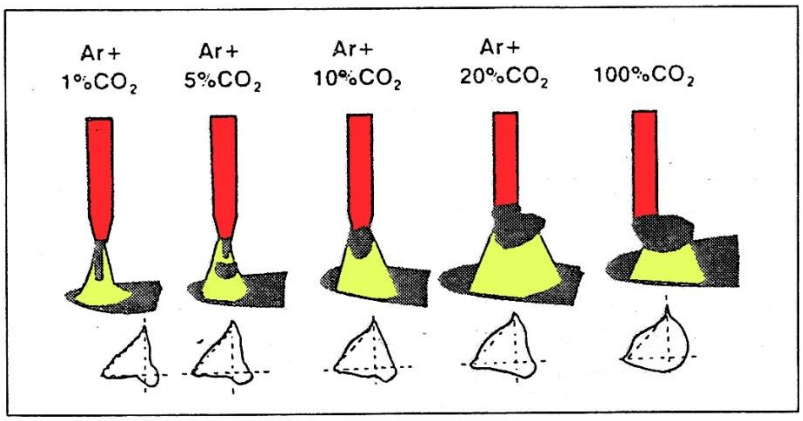
Myöskään tandemhitsauksessa käytettävät suojakaasut eivät poikkea perinteisistä MIG/MAG-suojakaasuista. Suojakaasua käytetään suojaamaan kaaritila ja hitsisula ympäröiviltä ympäristötekijöiltä. Suojakaasu vaikuttaa muun muassa seuraaviin ominaisuuksiin hitsaustapahtumassa:

- vaikutus hitsiaineen kemialliseen koostumukseen
- lujuus- ja iskusitkeysominaisuudet hitsiaineessa
- kaarityyppi eli aineensiirtymistapa
- roiskeiden muodostuminen
- valokaaren vakavuus

- palon muoto
- tunkeuma
- hitsisulan kostutus ja juoksevuus
- vaikutukset hitsisavuihin
- hitsauksen tuottavuuden muutokset

(Lukkari, 2002, s.197.)

Hitsauskaasut voidaan jaotella inertteihin (argon (Ar), helium (He)), hapettaviin (hiilidioksidi (CO_2), happi (O)), pelkistäviin (vety(H)) ja reagoimattomiin (typpi(N)) hitsauskaasuihin. Sekä hapettavat, että pelkistävät kaasut reagoivat hitsisulan kanssa, kun taas inertti kaasu ei reagoi kemiallisesti hitsisulan kanssa. Reagoimaton kaasu, typpi, on normaalisti reagoimaton kaasu, mutta korkeissa lämpötiloissa kaasulla on typettävä vaikutus. Suojakaasun vaikutus hitsisulaan esitetään kuvassa 3. (Lukkari, 2002, s. 198.)

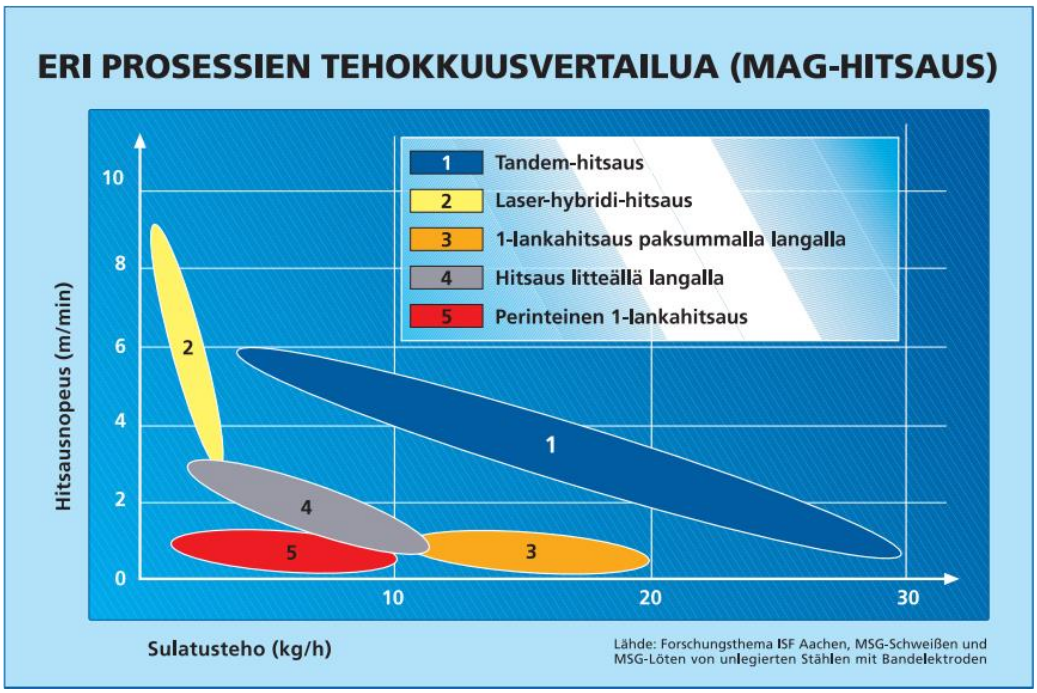


Kuva 3. Suojakaasun vaikutus tunkeumaan ja aineensiirtymiseen (mukaillen: Lukkari, 2002, s. 198).

2.3 Tandemhitsaus verrattuna muihin hitsausprosesseihin

Tandemhitsauksella saadaan suurennettua hitsausnopeutta ja hitsiaineen tuottoa saadaan samalla suuremmaksi verrattuna perinteisiin yksilankamenetelmiin. Ohutlevyosissa voidaan hyödyntää suurentunut sulatusteho suurempana nopeutena. Tandemhitsausta käytettäessä saadaan tunkeumaa suurennettua verrattuna yksilankahitsaukseen. Tunkeuman ollessa suuri, voidaan hitsata paksumpaa materiaalia tietyllä nopeudella. Tämä on myös voimassa siten, että tiettyä paksuutta voidaan hitsata suuremmalla nopeudella. Käytettävä hitsausprosessi on merkittävässä osassa tunkeuman muodostumiseen. Usein MAG- tai TIG – hitsauksessa

lämpö leviää laajemmalle alueelle ja tällöin tunkeuma jää pienemmäksi verrattuna esimerkiksi lävistävään key-hole – hitsaukseen tai laser- ja plasmahitsaukseen. Tandemhitsausta käytettäessä sulatustehon ja hitsausnopeuden käyttöalue on laaja, joka ilmenee kuvasta 4. (Kyröläinen & Lukkari, 2002, s. 53; Meuronen, 1998, s. 1-5.)



Kuva 4. Eri MAG-prosessien vertailu tandemhitsaukseen. Pystyakselilla on esitetty hitsausnopeus (m/min) ja vaaka-akselilla sulatusteho (kg/h). (Meuro-Tech, 2013, s. 3.)

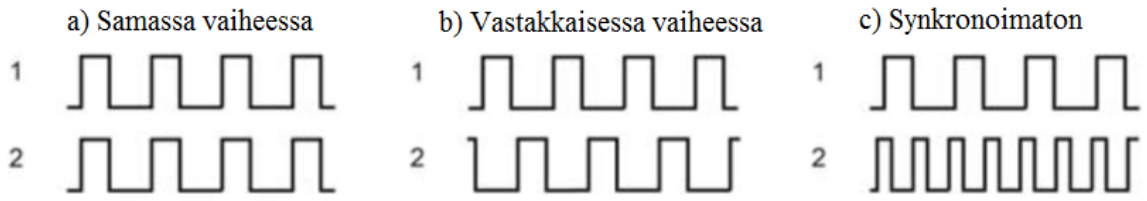
3 PULSSITUS

Pulssihitsauksessa aineensiirtyminen tapahtuu pisaramaisesti pulssivirran avulla. Pulssikaari muodostetaan syöttämällä suuritaajuuksisia virtapulsseja perusvirran päälle. Tällöin jokainen pulssi irrottaa yhden pisaran hitsauslisäainetta. Pulssitaajuus on hitsauskoneissa säädettävä ja se voi olla esimerkiksi 50–300 Hz. Pulssihitsauksessa perusvirta pitää valokaaren yllä sekä lisäksi sulattaa langan pään ja hitsisulan. Kuitenkin aineensiirtyminen tapahtuu vasta pulssituksen kohdalla. Hitsauksessa käytetään sitä suurempaa perusvirtaa, mitä pienempi pulissitaajuus on käytössä. Suurta pulssitajauutta käytettäessä pisaroiden määrä on suurempi ja lämmöntuonti kasvaa. Ohuiden ainepaksuuksien hitsauksessa käytetäänkin pienempiä pulssitaajuuksia. (Lukkari, 2001, s. 128–129.)

Nykyään virtalähteissä on synerginen pulssitus, joka helpottaa pulssituksen käyttöä. Pulssivirta ja pulssituksen taajuus on kytketty toisiinsa siten, että pulssituksen säätö tapahtuu ainoastaan yhdestä nupista. Säätö on toteutettu siten, että virtapulssin aikana siirtyy ainoastaan yksi virtapulssi. Tällöin aineensiirtyminen on hallittua kaikilla langansyöttönopeuksilla. Synergiasäätimen lisäksi käytössä on usein myös hienosäätö, jolla voidaan vaikuttaa valokaaren pituuteen. (Lukkari, 2001, s. 129.)

Samaa hitsiaineentuottoa käytettäessä pulssihitsauksessa lämmöntuonti on pienempi verrattuna lyhytkaari- tai kuumakaarihitsaukseen. Asentohitsauksessa hitsauksen pulssitus auttaa pienentämään hitsisulaa, koska sula ehtii jäähtyä pulssien välissä. Pulssihitsauksessa hitsausnopeus ja hitsiaineen tuotto ovat suurempia verrattuna lyhytkaarihitsaukseen. Kuumakaarihitsaukseen verrattuna vetelyt ja lämmöntuonti ovat pienempi käytettäessä pulssihitsausta. (Lukkari, 2001, s. 130; Street, 1990, s. 49.)

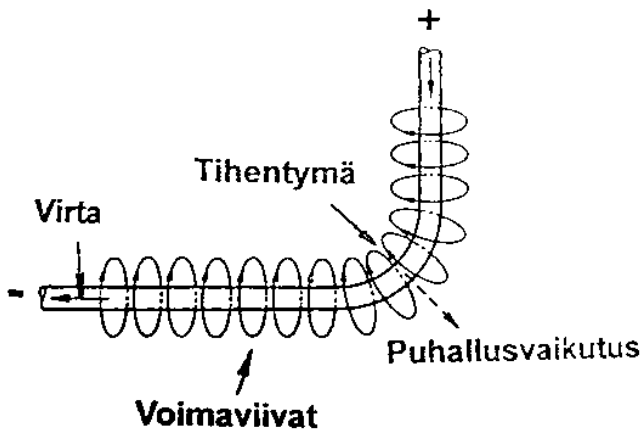
Tandemhitsauksessa pulssitus vakauttaa hitsaustapahtumaa. Pulssitusta käytettäessä sulapisarat eivät häiritse toisiaan. Lankojen pulssitustaajuutta ohjataan usein siten, että pulssit tulevat ajallisesti peräkkäin. Muita pulssitusvaihtoehtoja on esitetty kuvassa 5. Tällöin sulapisarat siirtyvät hitsisulaan vuorotellen. (Lukkari, 2001, s. 134.)



Kuva 5. Tandemhitsauksen pulssituksen vaihtoehtoja. (Mukaillen: Yudodibroto & Hermans & Richardson, 2006).

4 MAGNEETTINEN PUHALLUS

Hitsauksessa käytetty sähkövirta muodostaa ympärilleen magneettikentän. Magneettikenttä voidaan havaita virrallisen lisäaineen ja valokaaren ympärillä. Valokaaren kohdalla tapahtuu magneettisten voimaviivojen laajentuma ja tihentymä (kuva 6). Näiden tuloksena on epätasainen magneettikenttä. Tihentymässä magneettinen kenttä on voimakkaampi, mikä aiheuttaa valokaaren taipumista heikomman kentän suuntaan. Kyseisestä ilmiöstä käytetään nimitystä magneettinen puhallus. (Lukkari, 2002, s. 75.)



Kuva 6. Magneettikentän muodostuminen hitsauksessa (Lukkari, 2002, s. 75).

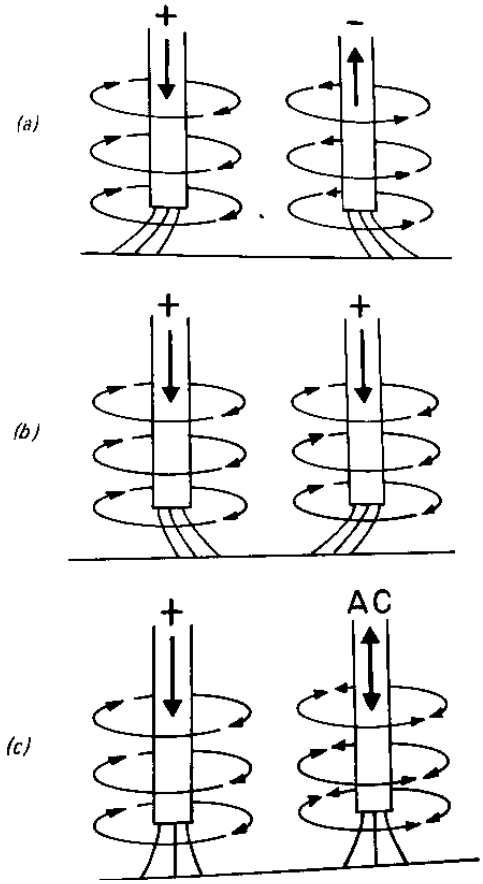
Hitsausvirran suuruus sekä virran kulkureitti vaikuttavat magneettiseen puhallukseen. Virran suuretessa magneettisen puhalluksen määrä kasvaa. Virran kulkureittiin voidaan vaikuttaa maadoittimen sijoittelulla sekä usean maadoittimen käytöllä. Magneettinen puhallus on usein voimakkaampaa levyn reunassa. Tällöin apupalan käytöllä voidaan yrittää pienentää magneettista puhallusta. (Lukkari, 2002, s. 75–76.)

Vaihtovirtahitsauksessa magneettisen puhalluksen merkitys on vähäinen. Vaihtovirta aiheuttaa kappaleeseen pyörrevirtoja, jotka aiheuttavat magneettikentän. Kyseinen magneettikenttä kompensoi puhalluksesta aiheutuvan magneettikentän. (Lukkari, 2002, s. 76.)

4.1 Magneettinen puhallus tandemhitsauksessa

Magneettinen puhallus vaikuttaa tandemhitsauksessa yksilankahitsausta enemmän. Magneettisen puhalluksen vaikutusta voidaan kuitenkin pienentää aloitus- ja lopetuspaloja hyödyntämällä sekä hyvin valmistetulla työkappaleen maadoituksella. (Uusitalo, 2011, s. 17.)

Magneettiset kentät aiheuttavat magneettista puhallusta molempiin valokaariin, kun käytetään kahta hitsauslankaa. Kun hitsauslangat ovat toisiinsa nähden erinapaisia, magneettiset kentät pyrkivät hylkimään toisiaan. Hitsauslankojen ollessa saman napaisia, magneettiset kentät pyrkivät vetämään toisiaan puoleensa. Mikäli hitsauksessa käytetään toisella langalla vaihtovirtaa ja toisella tasavirtaa, magneettinen puhallus on hyvin vähäistä. Tämä on esitettynä kuvassa 7. (The Lincoln Electric Company, 1973, s. 3.2-3.)



Kuva 7. Magneettisen puhalluksen vaikutus kaksilankahitsauksessa. Tapauksessa (a) hitsauslangat ovat erinapaiset, tapauksessa (b) hitsauslangat ovat saman napaiset, sekä tapauksessa (c) toinen hitsauslangoista on vaihtovirralla ja toinen tasavirralla. (The Lincoln Electric Company, 1973, s. 3.2-3.)

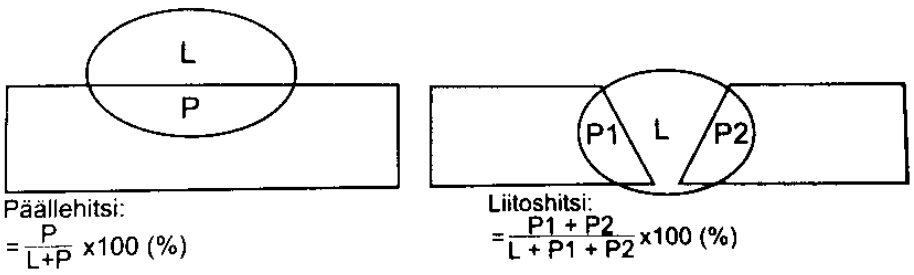
5 SEKOITTUMISASTE

Sekoittumisasteella tarkoitetaan perusaineen osuutta hitsiaineessa. Sekoittumisasteeseen vaikuttavat merkittävästi esikuumennus, aineenpaksuus, railonmuoto, lisäaineen halkaisija, hitsausvirta, napaisuus, kaarijännite ja hitsausnopeus. Railohitsauksessa etenkin lisäaineen suuntauksella on merkitystä sekoittumisasteen määräytymisessä. Lisäksi päällehitsauksessa vierekkäisten palkojen limityksellä on tärkeä vaikutus sekoittumisasteeseen. Sekoittumisasteen määräytymisen hallinta on erittäin tärkeää etenkin eripariliitoksia tehdessä. Eri hitsausprosesseille tyypillisiä sekoittumisasteita ovat:

- jauhekaarihitsaus nauhalla: 10-15 %
- puikkohitsaus: 15-30 %
- lisäaineellinen TIG-hitsaus: 20-60 %
- MIG/MAG –pulssihitsaus: 10-20 %
- MIG/MAG –hitsaus: 20-40 %
- langallinen jauhekaarihitsaus: 40-80 %
- lisäaineeton TIG –hitsaus : 100 %

(Kyröläinen & Lukkari, 2002, s. 443.)

Sekoittumisaste lasketaan päällehitsauksessa jakamalla hitsin alapuolinen pinta-ala koko hitsin pinta-alalla. Liitoshitsin sekoittumisasteen laskennassa jaetaan liitettävien kappaleiden hitsin pinta-ala koko hitsin pinta-alalla. Päällehitsin ja liitoshitsin sekoittumisasteen laskentaan käytetyt pinta-alat ilmenee kuvasta 8**.** (Kyröläinen & Lukkari, 2002, s. 443.)



Kuva 8. Päällehitsin ja liitoshitsin sekoittumisasteen laskeminen. (Kyröläinen & Lukkari, 2002, s. 443.)

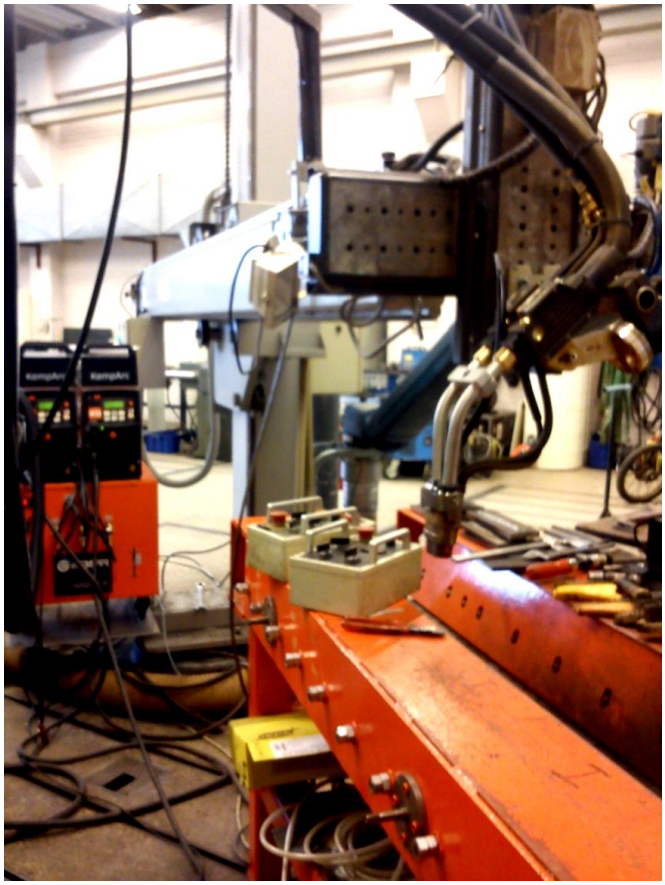
6 PULSSITUKSEN VAIKUTUS TANDEM-HITSAUKSESSA

Koejärjestelyssä tutkittiin pulssin vaikutusta tandem-hitsauksessa. Tandemhitsauskoneella on mahdollista hitsata kahdilla toisistaan riippumattomilla hitsausparametreillä. Kokeessa käytettiin eri pulssituksen arvoja, sekä tämän lisäksi osassa kokeista oli käytössä pulssittomat hitsausparametrit toisessa hitsauslangassa. Hitsauskokeissa oli käytössä pulssituksen arvot: -5, 0 ja +5. Näiden parametriyhdistelmien avulla saatiin 14 koehitsiä. Kokeet suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsaustekniikan laboratoriossa. Hitsatuista kappaleista kuvattiin makrohieet, joiden avulla arvioitiin hitsauksen sekoittumissuhdetta.

6.1 Hitsauslaitteisto

Hitsauslaitteistona on käytetty Kemppi Oy:n KempArc Pulse TCS-laitteistoa. Laitteistossa on kaksi virtalähdettä sekä kaksi DT 400-langansyöttölaitteistoa. Hitsauspää on vesijäähdytetty KempCool 40-laitteistolla. Polttimena käytettiin Abicor Binzelin WH800 D10 – tandempoltinta.

Poltin on kiinnitetty puomiin, jonka päässä oli vaaka- ja pystysuuntaan liikkuva servotoiminen kiinnitin. Puomin liikettä käytettiin hitsauksessa kuljetusnopeutena. Kappale kiinnitettiin pyörityspöytään ruuvipenkin avulla. Pyörityspöytä toimi ainoastaan hitsaustasona, eikä sitä käytetty hitsausliikkeen tuottamiseen. Hitsausliike tuotettiin puomin avulla. Maadoitus suoritettiin molemmista virtalähteistä pyörityspöydän maadoituspisteeseen. Kokeissa hitsauslanka oli positiivisessa navassa. Kuvassa 9 on käytetty hitsauslaitteisto. Kuvasta poiketen hitsauspolttimena käytettiin toista poltinta, eikä hitsausalustana ei käytetty kuvan oranssia tasoa.



Kuva 9. Hitsauskokeissa käytetty laitteisto.

6.2 Perusaineet ja hitsausaineet

Hitsattava perusaine oli laadultaan S355-terästä. Koekappaleina oli kahdenlaisia teräslevyjä, joiden levynpaksuudet olivat 33 mm tai 21 mm. Levyjen pituudet olivat riittävät, jotta hitsauksessa aloitus- ja lopetuskohdat voidaan jättää huomiotta. Kokeet hitsattiin kappaleiden valssaussuuntaan.

Hitsauslisäaineena käytettiin ESAB OK AristoRod 12.50 umpilankaa, jonka paksuus on 1,2 mm. Käytetty lisäainelanka soveltuu valmistajan mukaan hyvin seostamattomille rakenneteräksille ja hienoraeterästen MAG-hitsaukseen. Hitsauslanka on kuparoimatonta. (ESAB, 2013.) Suojakaasuna käytettiin Woikosken SK-18 – kaasua. Aktiivisessa kaasussa on 18 % hiilidioksidia (CO_2) ja 82 % argonia (Ar). Kaasun virtaus oli 15 l/min. (Woikoski, 2013.)

6.3 Hitsausarvot

Koekappaleeseen hitsattiin kolme hitsiä rinnakkain. Koekappaleet piirrotettiin siten, että palkojen välinen etäisyys oli 5 millimetriä. Langat olivat perättäin ilman limitystä. Hitsausnopeutena käytettiin 75 cm/min. Vapaalanganpituutena käytettiin 20 mm. Hitsauslanka oli positiivisessa navassa.

Kokeeseen valittiin pulssituksen arvot: +5, 0, -5. Näistä muodostettiin kaikkiaan 7 erilaista yhdistelmää. Tämän lisäksi otettiin hitsauslaitteesta pulssiton MIG-prosessi mukaan toiselle langalle. Täten saatiin yhteensä 14 koehitsiä, jotka on esitetty taulukossa 1. Etulangalla tarkoitetaan hitsaussuuntaan nähden ensimmäistä hitsauslankaa, vastaavasti takalangalla hitsaussuuntaan nähden jälkimmäistä hitsauslankaa. Hitsauksissa käytetty jännite oli 31,0 volttia. Pulssihitsauksessa käytetty hienosäädön arvo oli 2 ja dynamiikan arvo oli -3.

Taulukko 1. Valitut hitsausrvot.

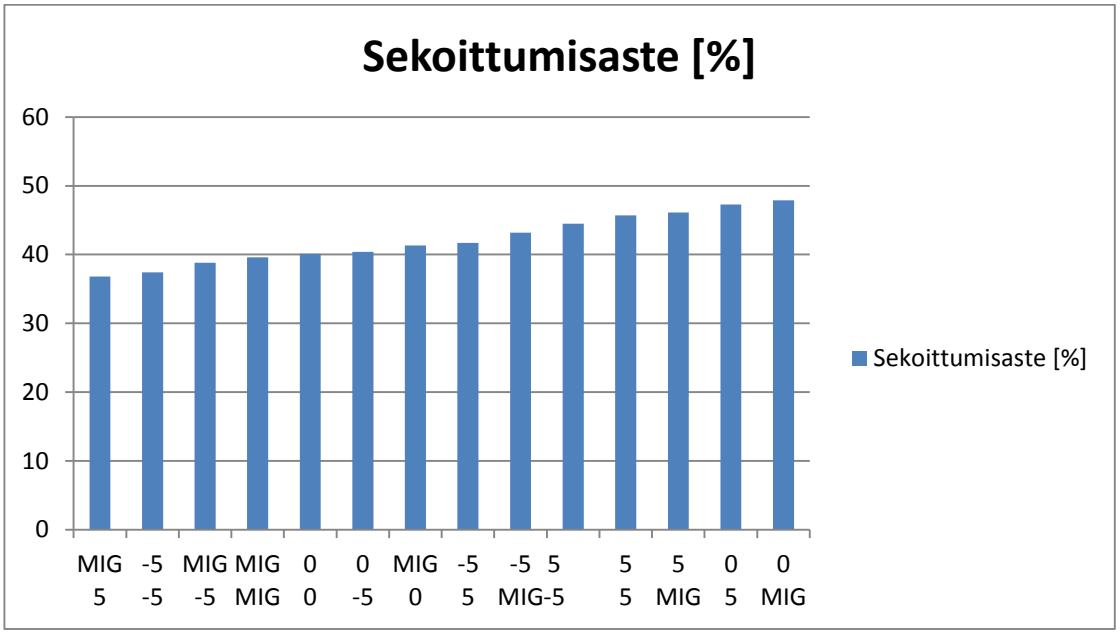
Koe Nro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Pulssi etulanka	+5	0	-5	-5	0	0	+5	-5	0	5	MIG	MIG	MIG	MIG
Pulssi takalanka	+5	0	-5	+5	+5	-5	-5	MIG	MIG	MIG	5	0	-5	MIG

7 TUTKIMUSTULOKSET

Kaikista hitseistä tehtiin makrohie kappaleen keskeltä. Makrohieestä tutkittiin sekoittumisaste JMicroVision 1.2.7-ohjelmalla. Ohjelma on ilmainen ja ladattavissa internetistä. Sekoitumisasteet ilmenevät taulukosta 2. Sekoittumisasteteen laskemista varten hitsin kuvasta rajattiin kappaleen pinnan yläpuolinen ja alapuolinen osuus hitsistä. Sekoittumisaste saatiin jakamalla kappaleen pinnan alapuolella olevan hitsin pinta-ala hitsin koko pinta-alalla. Taulukosta ilmenee myös materiaalin pinnan alapuolella oleva hitsin tunkeuman korkeus millimetreinä sekä materiaalin pinnan yläpuolella oleva hitsin kuvun korkeus millimetreinä. Taulukon viimeisessä sarakkeessa on myös laskettu näiden mittojen suhde toisiinsa jakamalla alapuolinen pituusmitta yläpuolisella mitalla ja kertomalla 100 %. Kuvassa 10 on esitetty kaaviomuodossa sekoittumisasteiden muutos.

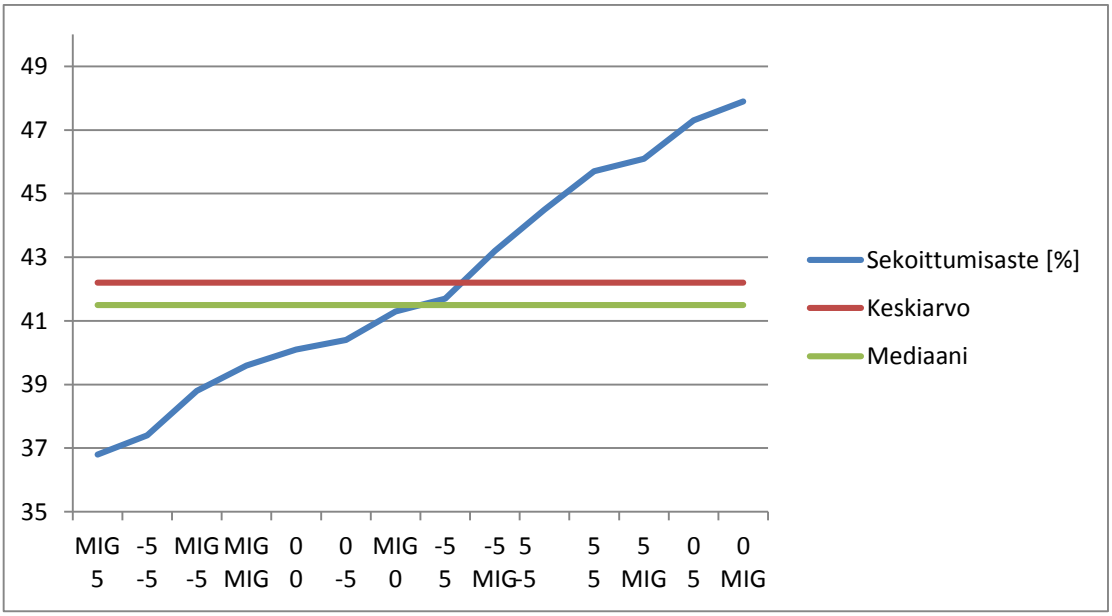
Taulukko 2. Sekottumisasteet järjestettynä pienimmästä suurimpaan.

Sekoittumisaste [%]	Etulanka	Takalanka	Koe nro	Alapuolen tunkeuma [mm]	Pinnan yläpuolella [mm]	Alapuoli /yläpuoli [%]
36,8	MIG	5	11	3,686	5,114	72,1
37,4	-5	-5	3	4,301	4,301	100
38,8	MIG	-5	13	4,513	4,866	92,7
39,6	MIG	MIG	14	4,957	5,328	93,0
40,1	0	0	2	4,367	4,451	98,1
40,4	0	-5	6	4,486	5,386	83,3
41,3	MIG	0	12	4,261	4,673	91,2
41,7	-5	5	4	4,579	4,551	100,6
43,2	-5	MIG	8	4,481	4,267	105,0
44,5	5	-5	7	4,215	4,385	96,1
45,7	5	5	1	4,746	4,155	114,2
46,1	5	MIG	10	4,467	4,385	101,9
47,3	0	5	5	4,942	4,616	107,1
47,9	0	MIG	9	4,93	4,454	110,7



Kuva 10. Sekoittumisasteet kaaviona.

Sekoittumisasteiden keskiarvo on 42,2 % ja mediaani 41,5 %. Kokeissa käytettiin vertailukohtana pulssitonta hitsauskoetta. Tämän MIG-MIG-kokeen sekoittumisasteeksi saatiin 39,6 %. Sekoittumisasteiden ero hitsauskokeissa on suurimmillaan 11,1 %. Sekoittumisasteet vaihtelivat 36,8 prosentista 47,9 prosenttiin. Kuvassa 11 on vielä kuvattuna keskilukujen suhde kokeisiin.

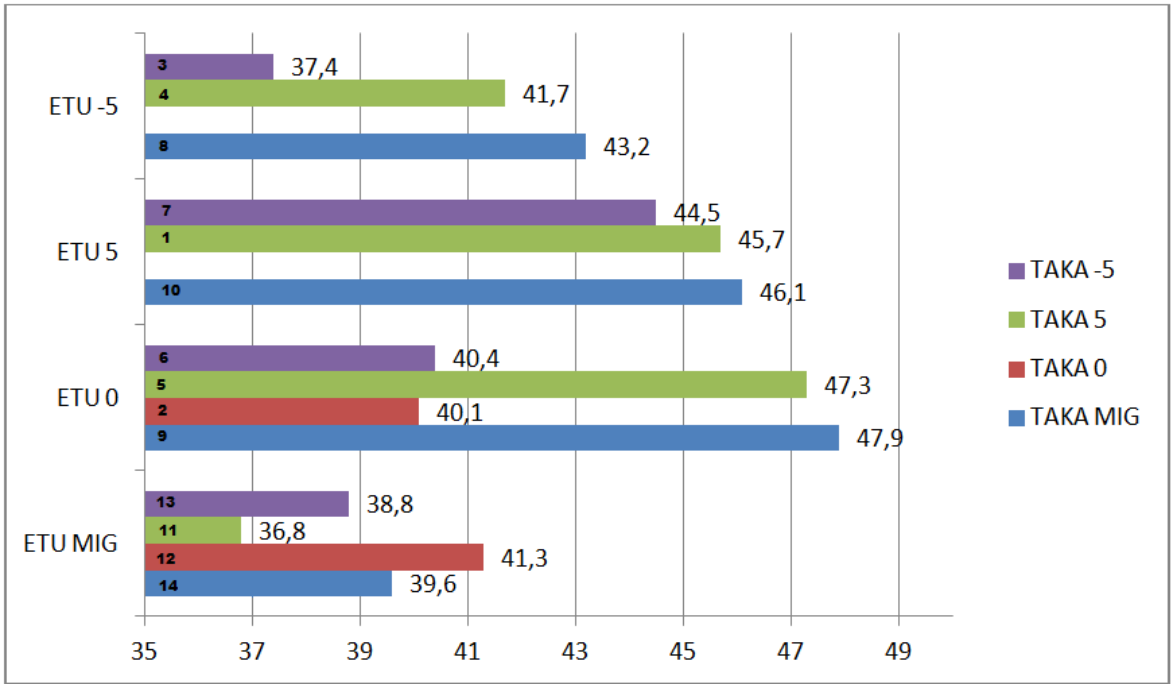


Kuva 11. Hitsauskokeiden keskiluvut.

8 TULOSTEN ANALYSOINTI JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tandemhitsauksessa pulssitusta säätämällä voidaan vaikuttaa sekoittumisasteeseen. Vertailukohtana käytetty hitsauskoe, jossa molemmat langat ovat pulssittomalla MIG-puolella, sijoittui sekoittumisasteellaan selvästi pienempien sekoittumisasteiden joukkoon.

Suurimmat sekoittumisasteet saatiin säädöillä, joissa takalanka on MIG-puolella tai pulssituksen säädöllä +5. Tällöin etummainen lanka oli pulssituksen säädöllä 0 tai +5. Kokeet 1, 7 ja 10, joissa etummainen lanka oli pulssituksen säädöllä +5, saivat suurimpia sekoittumissuhteita riippumatta oliko takimmainen lanka -5, +5 tai MIG-puolella. Kaikilla kyseisistä kokeista sekoittumisasteet olivat yli keskiarvon. Kuvassa 12 on selvennetty kaaviomuodossa etulangan pulssituksen suhde takalangan pulssitukseen.



Kuva 12. Etulangan pulssituksen suhde takalangan pulssitukseen. Kaaviossa on pystyakselilla etummaisen langan pulssituksen arvot ja vaaka-akselilla takimmaisen hitsauslangan pulssituksen arvot.

Etummaisen langan ollessa pulssituksen asetuksella -5, hitsauskokeiden sekoittumisaste jäi pienemmäksi. Tämä huomataan kokeista 4 ja 8, joissa takimmainen lanka on MIG-puolella tai +5 asetuksella. Myös toiseksi pienin sekoittumissuhde saatiin molempien lankojen ollessa -5 asetuksella. Sekoittumisastetta pienentää myös etummaisen langan ollessa MIG-asetuksella. Pienin sekoittumissuhde saatiin etummaisen langan ollessa MIG-asetuksella ja takimmaisen langan ollessa +5 pulssituksella.

Kokeet 2, 6 ja 12 ovat hyvin lähellä vertailukohtana käytetty MIG-MIG-asetusta. Kyseisissä kokeissa pulssituksen arvo oli usein 0 tai -5 tai MIG. Vertailukohteen sekoittumisasteen lähelle päästiin, kun etummainen lanka on MIG-asetuksella tai pulssituksen asetuksella 0.

Voidaankin päätellä, että pieneen sekoittumisasteeseen päästään käytettäessä etummaisella langalla joko pulssitonta MIG-asetusta tai yhdistelmää, jossa molemmat langat ovat pulssituksen asetuksella -5. Suureen sekoittumisasteeseen päästään takimmaisen langan ollessa MIG-asetuksella tai +5 -asetuksella olevalla pulssituksella.

Hitsin sekoittumisasteeseen määrää siis tandemhitsauksessa huomattavasti etummaisen ja takimmaisen langan asetus. Etummaisella langalla on suuri merkitys hitsin tunkeumaan. Taulukosta huomataan myös, että tunkeuman syvyys kasvaa sekoittumissuhteen kasvaessa. Mikäli pinnoitushitsauksessa halutaan pientä sekoittumissuhdetta myös tunkeuman syvyys jää tällöin pienemmäksi.

9 LÄHTEET

ESAB. 2013. OK AristoRod™ 12.50 [verkkodokumentti]. [Viitattu 14.12.2013]. Saatavissa: http://products.esab.com/Templates/T041.asp?id=114407

Kyröläinen, A. & Lukkari, J. 2002. Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus. 2. painos. Tampere: Tammer-Paino Oy. 526 s.

Lincoln Electric. 2005. Tandem MIG – High-Speed and High-Deposition Welding [verkkodokumentti]. 16 s. [Viitattu 28.12.2013] Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX370.pdf

Lukkari, J. 2001. Alumiinit ja niiden hitsaus. Tampere: Tammerpaino Oy. 251 s.

Lukkari, J. 2002. Hitsaustekniikka – Perusteet ja kaarihitsaus. 4. tarkistettu painos. Helsinki: Edita Prima Oy. 292 s.

Meuronen, I. 1998. TANDEM-MIG/MAG –hitsaus. Hitsaustekniikka 6/98. [verkkodokumentti]. 5 s. [Viitattu 3.11.2013]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.meuro-tech.fi/pdf/MIG-MAG-TANDEM-hitsaus.pdf

Meuro-Tech. 2013. Tandem – MIG/MAG – hitsaus [verkkodokumentti]. 3 s. [Viitattu 12.2.2014]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.meuro-tech.fi/pdf/MIG-MAG-TANDEM-hitsaus%20lyhyesti.pdf

Nadzam, J. 2003. Tandem GMAW Offers Quality Weld Deposits, High Travel Speeds. Welding Desing and Fabrication Volume 76, Issue 11. Pages 28-31.

Street, J. A. 1990. Pulsed arc welding. Abington: Abington Publishing. 57 s.

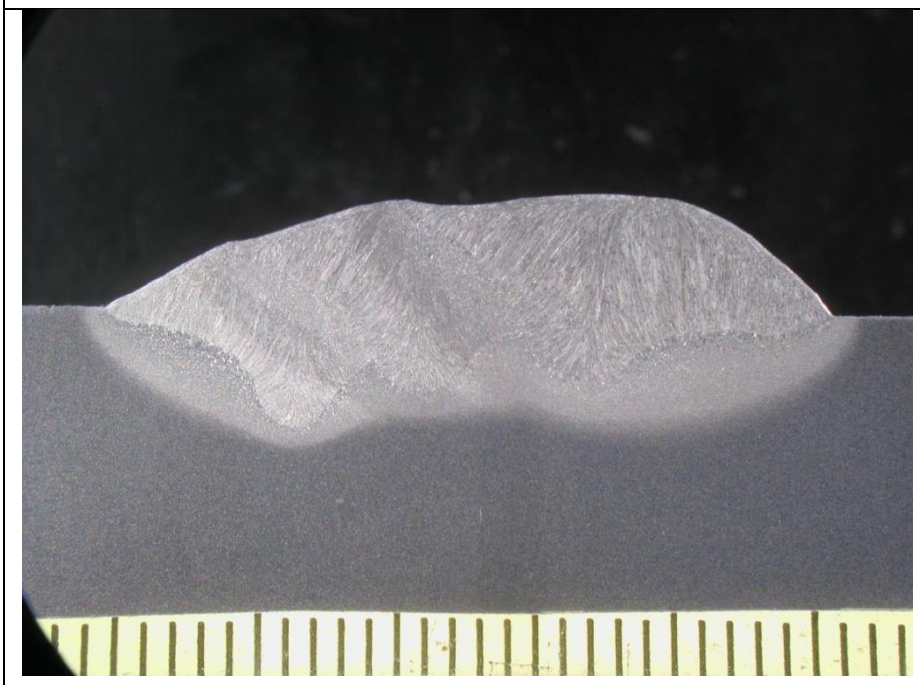
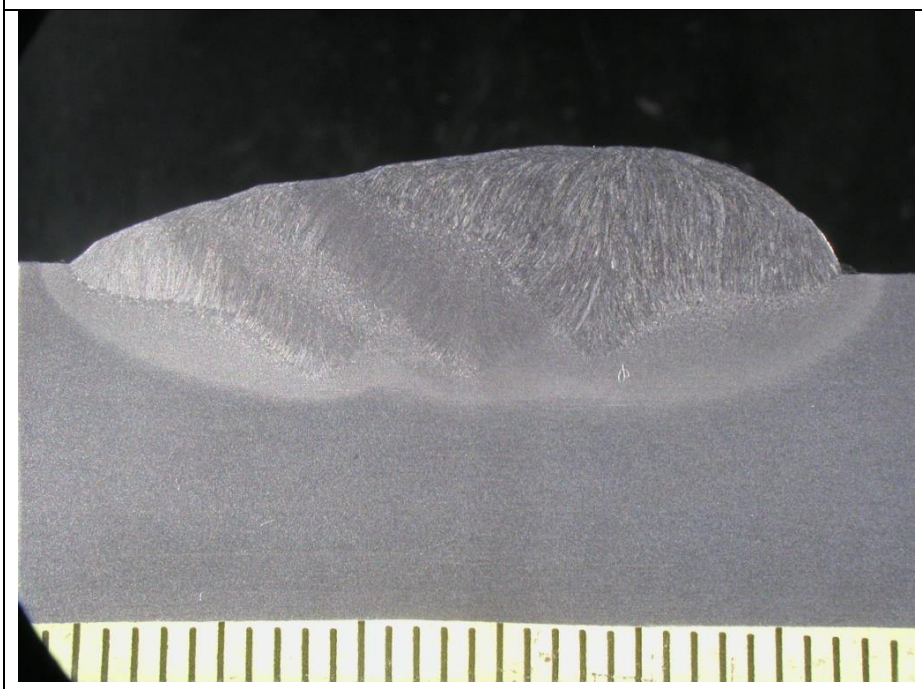
The Lincoln Electric Company. 1973. The Procedure Handbook of Arc Welding. Twelft Edition. Ohio.

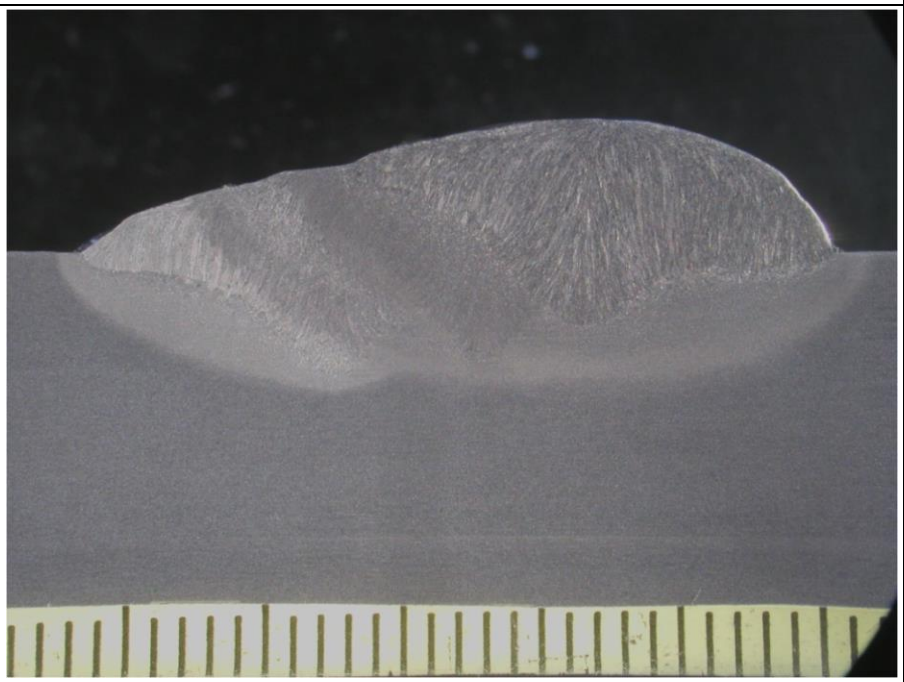
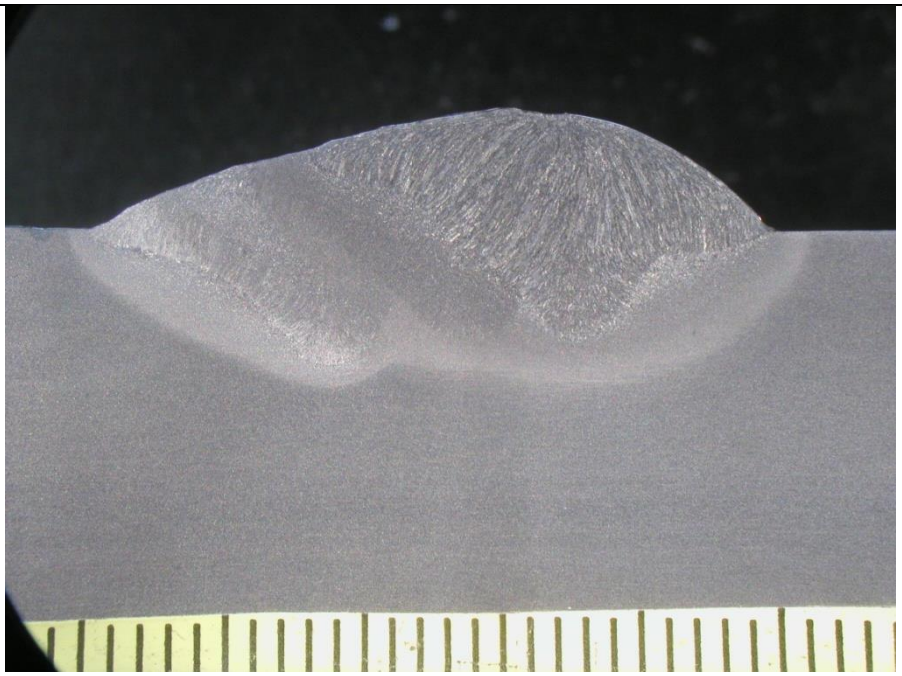
Uusitalo, J. 2011. Tandem-MIG/MAG –hitsauksen uusi tuleminen. Kemppi Pro News 2011 [verkkodokumentti]. [Viitattu 23.4.2014]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://productinfo.kemppi.com/flipbook/pronews_2011/fi/files/assets/downloads/publication.pdf

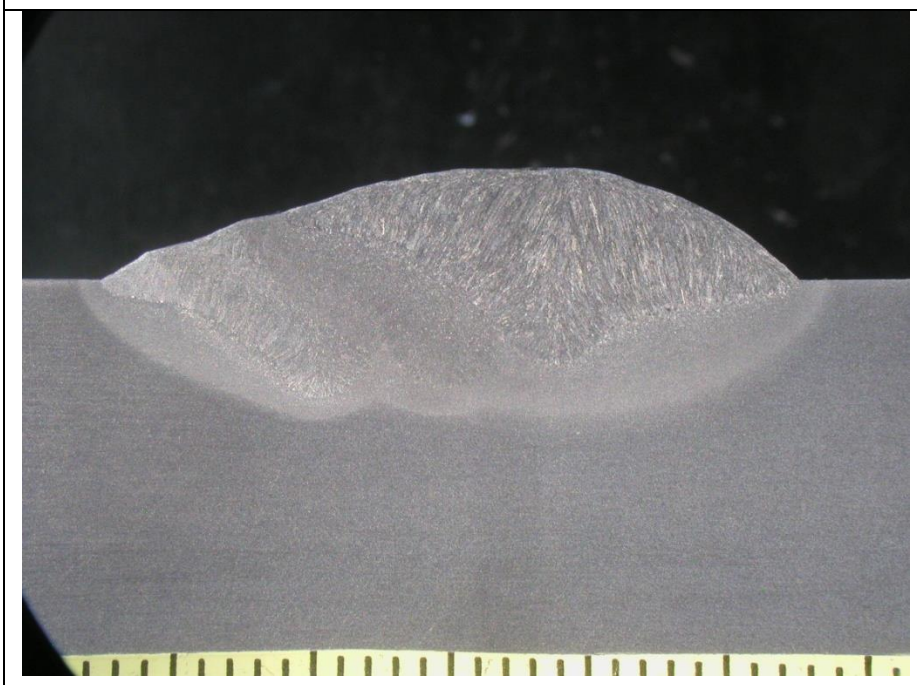
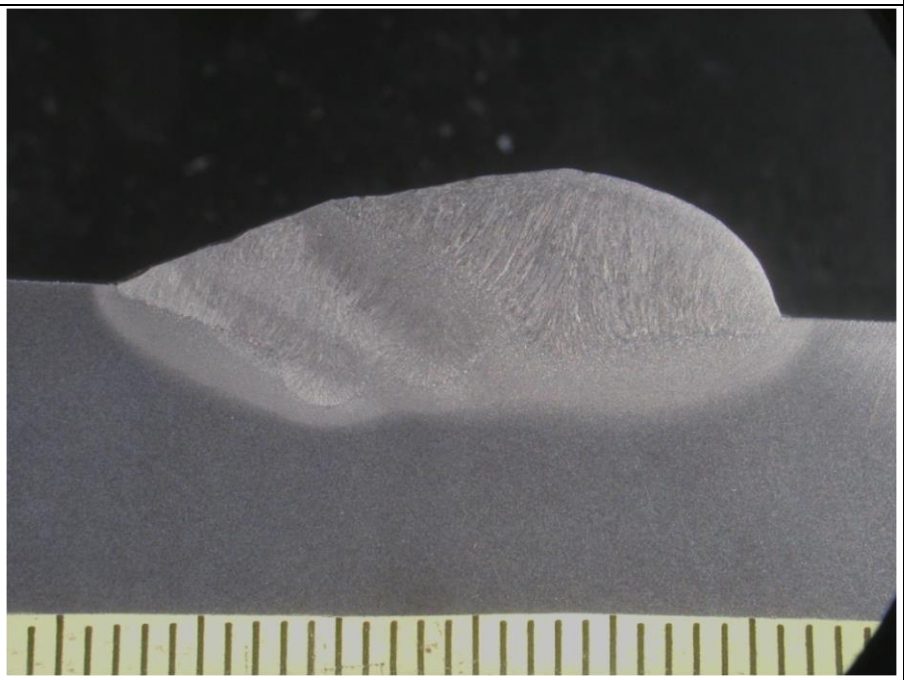
Yudodibroto, B.Y.B., Hermans, M.J.M., Richardson, I.M., 2006. IIW Doc. No. XII-1910–06. The Influence of Pulse Synchronisation on the Process Stability during Tandem Wire Arc Welding.

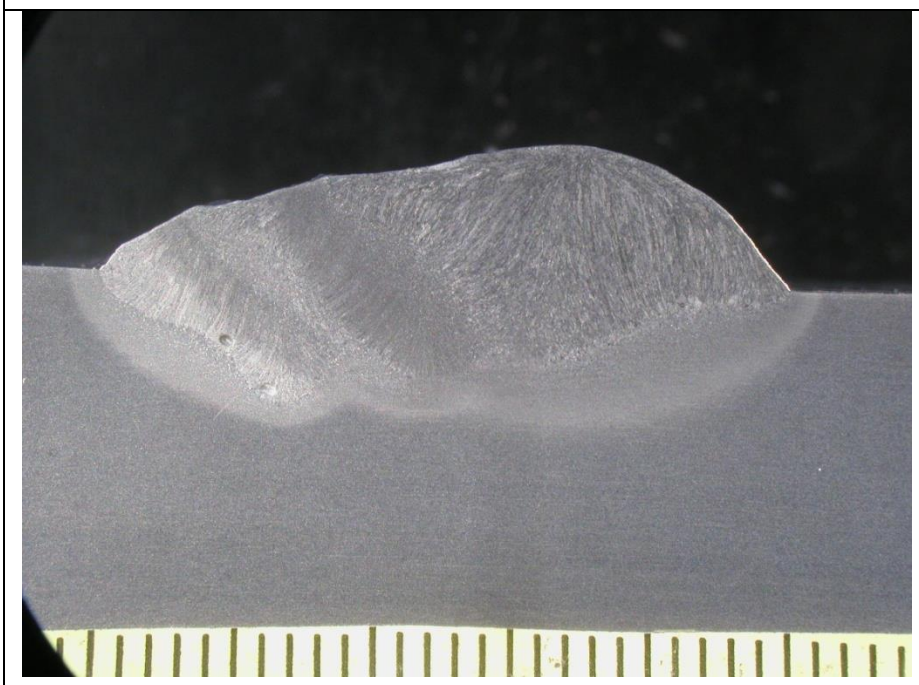
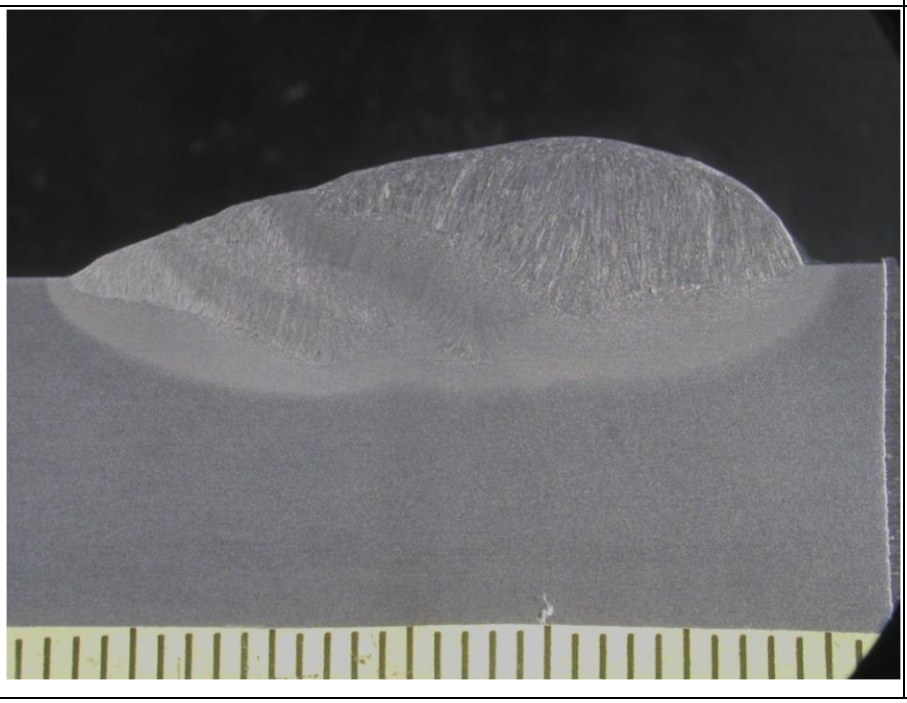
Woikoski. 2013. Kaasuseokset [verkkodokumentti]. [Viitattu 12.1.2014]. Saatavissa: http://www.woikoski.fi/node/4/teollisuus/hitsaus/seoskaasut-hitsaukseen

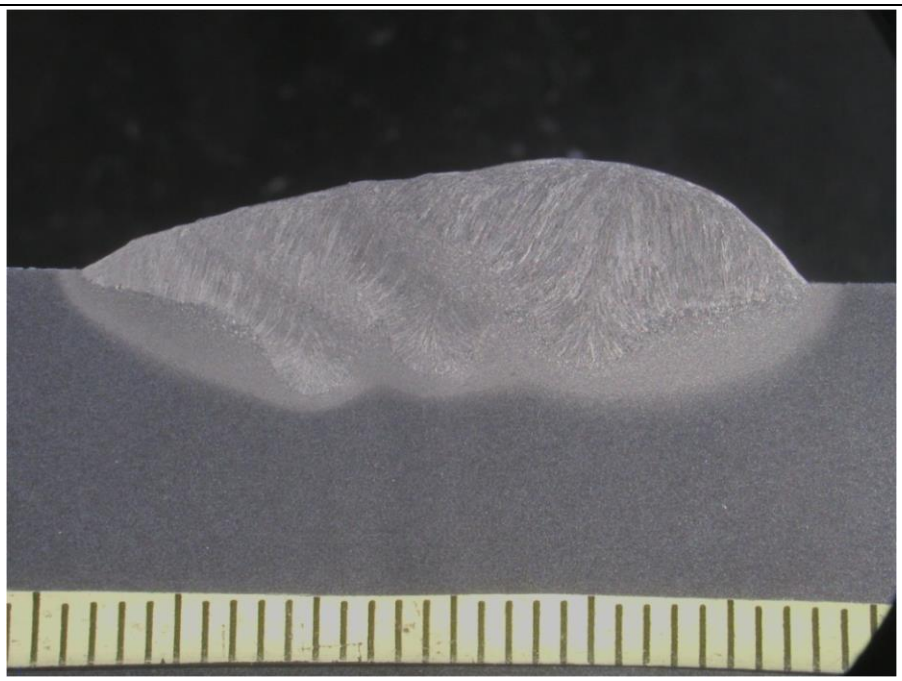
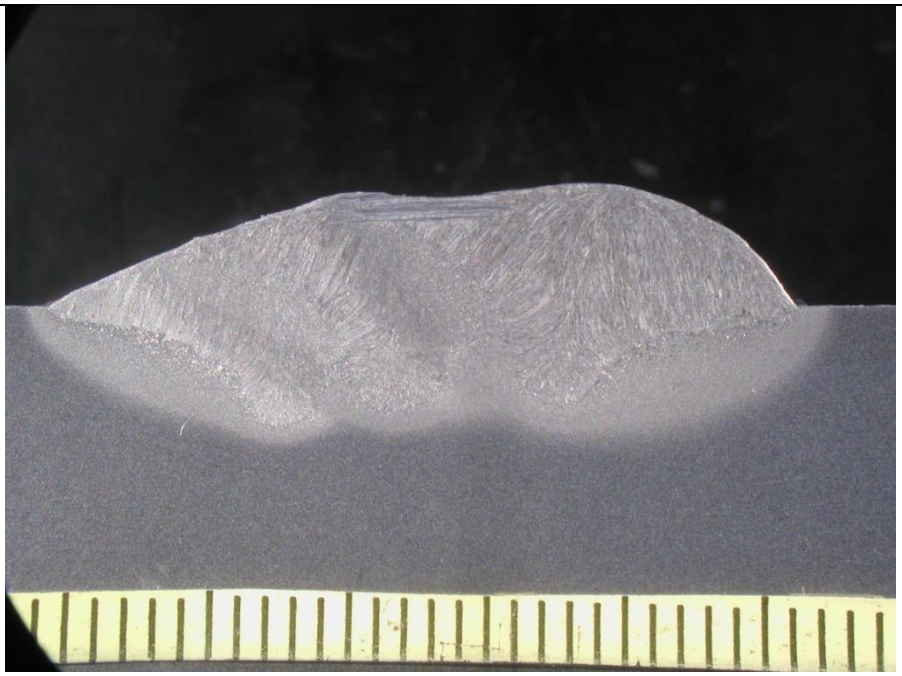
Koekappaleiden makrohieet

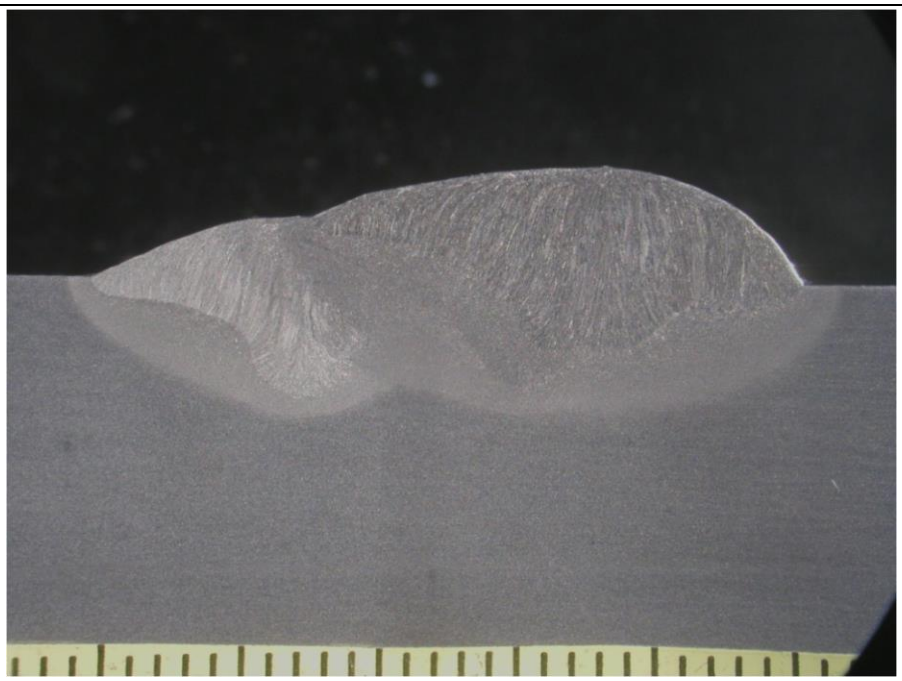
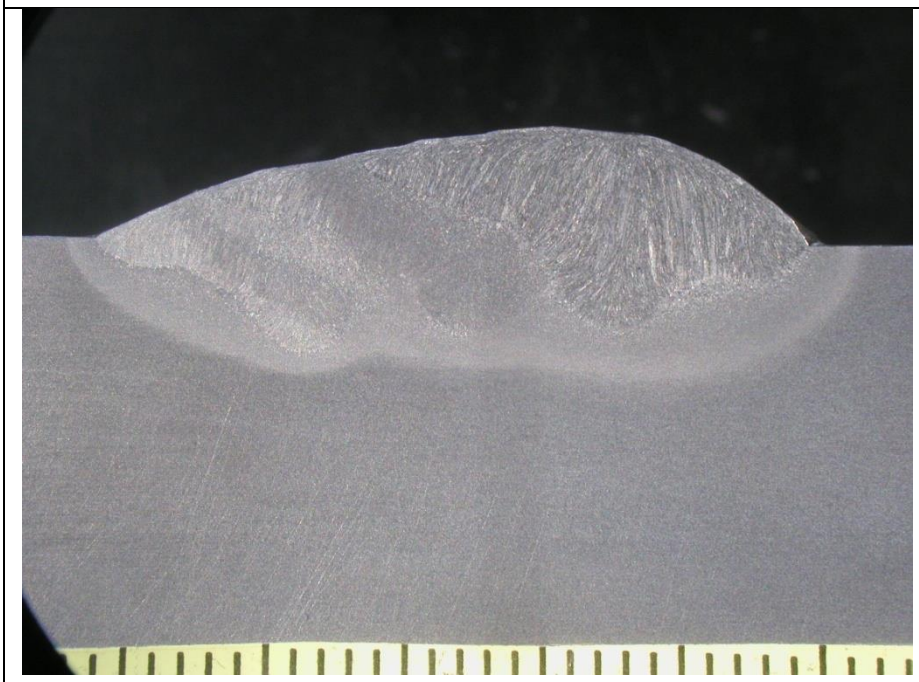
Kuva	Koe nro:	EL	TL
	1	+5	+5
	2	0	0

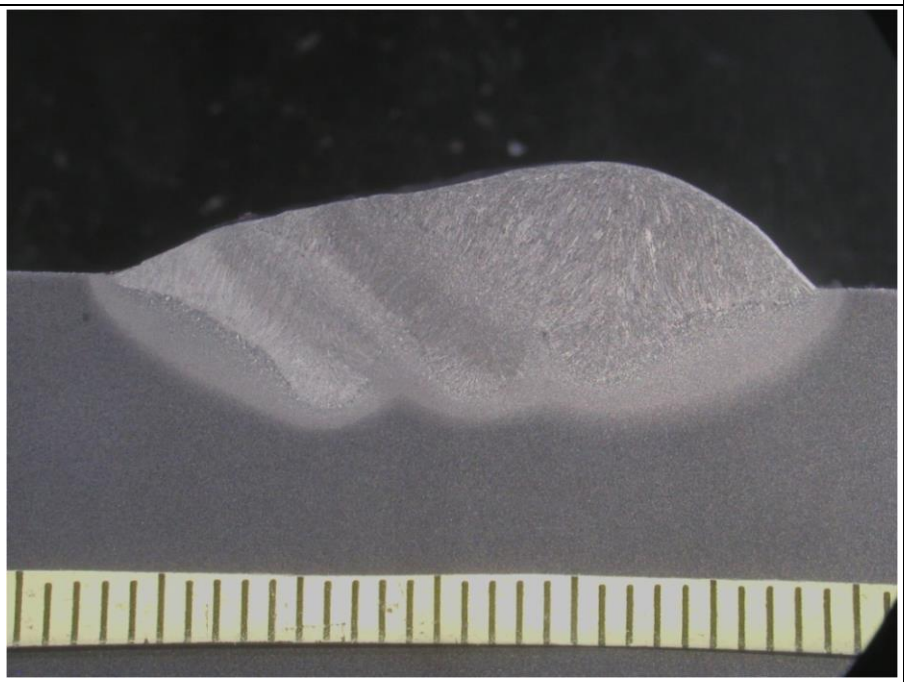
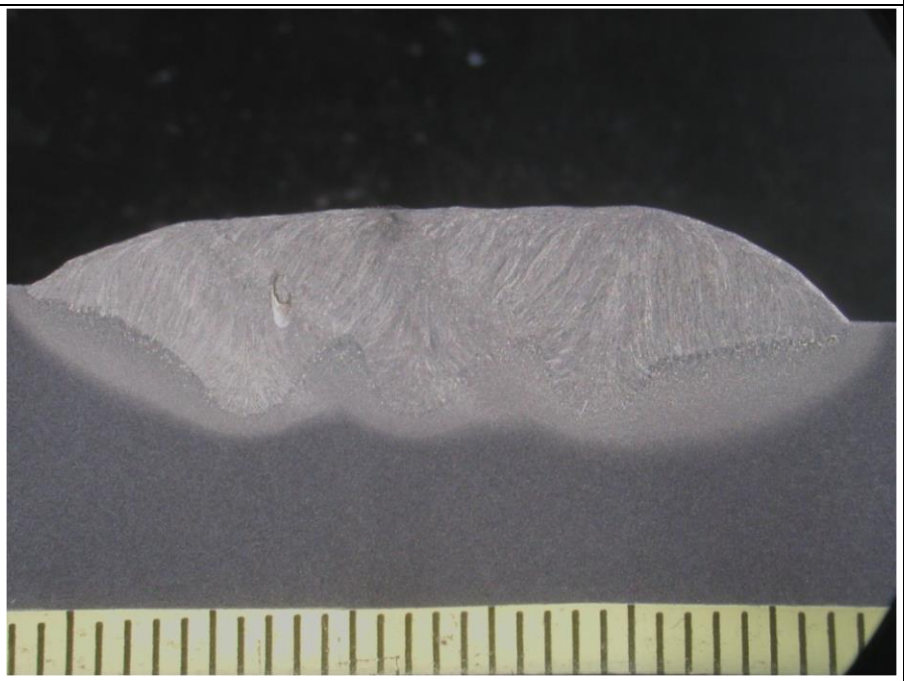
Kuva	Koe nro:	EL	TL
	3	-5	-5
	4	-5	+5

Kuva	Koe nro:	EL	TL
	5	0	+5
	6	0	-5

Kuva	Koe nro:	EL	TL
	7	+5	-5
	8	-5	MIG

Kuva	Koe nro:	EL	TL
	9	0	MIG
	10	5	MIG

Kuva	Koe nro	EL	TL
	11	MIG	-5
	12	MIG	0

Kuva	Koe nro	EL	TL
	13	MIG	-5
	14	MIG	MIG