

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma
BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

ALUMIININ JA TERÄKSEN SEKALIITOKSEN HITSAUS
WELDING OF ALUMINIUM-STEEL DISSIMILAR JOINT

Lappeenrannassa 28.1.2011

Jouni Taimisto 0208856

Sisällysluettelo

1.	Johdanto	2
2.	Alumiini	2
3.	Teräs.....	4
4.	Teräksen ja alumiinin sekaliitos.....	7
5.	TIG –juottohitsaus	7
6.	Räjähitsaus.....	10
7.	Kitkahitsaus pyörivällä työkalulla (FSW).....	12
8.	Laserhitsaus	20
9.	Johtopäätökset.....	22
10.	Yhteenveto.....	24
	LÄHTEET	25

1. Johdanto

Ajoneuvo- ja laivateollisuudessa konstruktion paino näyttelee suurta osaa ajoneuvon tehontarpeelle. Lisäksi viime aikoina noussut ympäristöajattelu on luonut tarvetta ajoneuvopäästöjen vähentämiseksi. Konstruktion painoa madaltamalla myös tehontarve, ja samalla myös polttoaineen kulutus laskee. Pienempi polttoaineen kulutus puolestaan laskee sekä päästöjä että käyttökustannuksia. Yksi keino rakenteiden keventämiseksi on käyttää yleisesti käytetyn teräksen ohella alumiinia konstruktiomateriaalina. Konstruktion painon laskun lisäksi eri materiaalien käytöllä samassa konstruktiossa saavutetaan lujuus- ja koroosionesto-ominaisuuksien optimaalisempaa hyödyntämistä. Aihealueesta löytyy hyvin niukasti kirjallisuutta, ja tästä syystä tässä tutkielmassa käydään läpi lähinnä uusista sovelluksista tehtyjä artikkeleita ja tutkimuksia. Tässä tekniikan kandidaattityössä käydään läpi eri metodeja teräksen ja alumiinin eripariliitoksen hitsaamiseksi.

Työn tavoitteena on kartoittaa eri hitsausprosesseja, joilla alumiinin ja teräksen eripariliitoksen hitsaus on suoritettavissa. Lisäksi tarkoituksena on arvioida prosessien hyviä ja huonoja puolia, ongelmakohtia sekä soveltuvuuskohteita.

2. Alumiini

Alumiini on kolmanneksi yleisin alkuaine maapallolla. Se muodostaa herkästi yhdisteitä hapen ja muiden alkuaineiden kanssa, joten se ei esiinny puhtaana maankuoressa, vaan useimmiten oksideina tai silikaatteina. Alumiinia valmistetaan lähes yksinomaan bauksiitista, jossa Al_2O_3 osuus on 50-60%. Alumiinin hilatyyppi on pintakeskeinen kuutio, joka tekee siitä suhteellisen helposti seostettavan aineen. Pintakeskeisestä hilarakenteesta johtuen alumiini ei ole taipuvainen lohkomurtumiseen, ja näin ollen se soveltuu hyvin sekä kylmä- että kuumamuokkaukseen. /1/

Alumiini on hyvin pehmeä metalli, eikä siksi sovellu puhtaana lujuutta vaativiin kohteisiin. Seostamattoman alumiinin murtolujuus on pehmeässä tilassa vain noin 60MPa. Kylmämuokkaamalla alumiinin lujuus saadaan noin kaksinkertaiseksi. Alumiiniin voidaan lisätä seosaineita, joilla saavutetaan hyödyllisiä ominaisuuksia. Taulukossa 1 nähdään alumiinin yleisimmät seosaineet. /1/

Taulukko 1 : Alumiinin seosaineiden vaikutukset. /1/

Seosaine	Vaikutus
Kupari	Parantaa lujuutta
Mangaani	Alentaa sulamisaluetta ja parantaa juoksevuutta
Pii	Lisää lujuutta menettämättä oleellisesti sitkeyttä
Magnesium	Lisää lujuutta menettämättä oleellisesti korroosionkestävyyttä
Magnesium/Pii	Lisää lujuutta, muovattavuutta ja pursotettavuutta menettämättä oleellisesti korroosionkestävyyttä
Sinkki	Antaa magnesiumin ja kuparin kanssa suuren lujuuden

Euroopassa on käytössä EN-standardien ja amerikkalaisen Aluminium Associationin mukainen merkintäjärjestelmä muokattaville alumiineille, joka perustuu seoksen pääseosaineisiin (taulukko 2).

Taulukko 2 : EN-standardien mukainen alumiinien merkintäjärjestelmä. /1/

1xxx-sarja	Al, vähintään 99%
2xxx-sarja	Cu
3xxx-sarja	Mn
4xxx-sarja	Si
5xxx-sarja	Mg
6xxx-sarja	Mg ja Si
7xxx-sarja	Zn
8xxx-sarja	muut

Alumiini muodostaa herkästi hapen kanssa reagoidessaan pinnalleen oksidikalvon (Al_2O_3). Oksidimuodossaan alumiini ei ole herkkä reagoimaan muiden aineiden kanssa, ja oksidikalvo suojaa perusmateriaalia hyvin korrodoivilta olosuhteilta. Oksidikalvo on pysyvä pH-alueella 4-9. Vaikkakin meren läheisyydessä oleva ilman kloridipitoisuus vaikuttaakin negatiivisesti alumiinin korroosionkestoon, on alumiini silti hyvin käyttökelpoinen metalli meri- ja teollisuusympäristöissäkin. Merivettä kestävä parhaiten AlMg- ja AlMgMn-seokset, joiden magnesiumipitoisuus on yli 2.5%. Meriolosuhteissa käytettävissä alumiinirakenteissa käytetään myös usein katodista suojausta korroosionkeston tehosteena. /1/

3. Teräs

Rauta on kaikkein yleisimmin käytetty metalli. Sen kulutus on noin kymmenen kertaa suurempaa kuin kaikkien muiden metallien kulutus yhteensä. Puhtaan raudan sulamispiste on 1528°C . Valtaosa käytetystä raudasta on hiiltä sisältäviä seoksia, joista käytetään nimitystä teräs, kun hiilipitoisuus on alle 2.11% ja valurauta, kun hiilipitoisuus on yli 2.11%. /2/

Teräksen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa suuresti seostamalla siihen muita alkuaineita. Teräksen yleisimmät seosaineet ovat hiilen lisäksi mangaani, kromi, nikkeli, molybdeeni, pii, alumiini, vanadiini ja volframi. Taulukosta 3 nähdään eri seosaineiden vaikutukset teräksen ominaisuuksiin. /2/

Taulukko 3. Teräksen yleisimmät seosaineet ja niiden vaikutukset. /3/

Seosaine	lujuus	sitkeys	karkenevuus	hitsattavuus
Hiili	+	-	+	-
Mangaani	+	-	+	-
Kromi	+	-	+	-
Nikkeli	+	+	+	-
Molybdeeni	+	+	+	-
Pii	+	-	+	+
Volframi	+	+	+	-

Hiili

Hiilen sulamislämpötila on 3632°C. Se kestää korkeita lämpötiloja, jos ei joudu kosketuksiin hapen kanssa. Hiili lisää teräksen lujuutta parantaen karkenevuutta. Seostamaton teräs on hyvin hitsattavaa, mikäli hiilipitoisuus on alle 0.25%. Tätä korkeammilla hiilipitoisuuksilla hitsausjännitykset voivat aiheuttaa karkenemishalkeamia. /3/

Mangaani

Mangaanin sulamispiste on 1260°C. Sitä käytetään kaikissa teräksissä mellotusvaiheen jälkeen ylimääräisen hapen poistoon. Se myös sitoo epäpuhtautena esiintyvän rikin vähemmän haitalliseen sulkeumamuotoon. Mangaani on hiilen jälkeen yleisin terästen seosaine. Mangaaniseostuksella saadaan teräkselle korkeampi lujuus ja kovuus. /3/ /4/

Kromi

Kromin sulamispiste on 1616°C. Se on teräksen seosaineista monipuolisin, lisäten vetolujuutta, kovuutta, karkenevuutta ja kulumiskestävyyttä heikentäen samalla sitkeyttä. Runsaasti seostettuna kromi muodostaa ilman kanssa kosketuksiin joutuessaan teräksen pintaan korroosiolta suojaavan oksidikerroksen. Yli 12% kromia sisältäviä teräksiä kutsutaan ruostumattomiksi teräksiksi. /3/, /4/

Nikkeli

Nikkelin sulamispiste on 1455°C. Nikkeli parantaa teräksen sitkeyttä kaikissa lämpötiloissa, lisää lujuutta ja kasvattaa hieman karkaisusyvyyttä. Runsaasti nikkelseosteinen teräs on kylmänäkin austeniittinen. /3/

Molybdeeni

Molybdeenin sulamispiste on 2610°C. Se lisää teräksen lujuutta ja sitkeyttä myös korkeissa lämpötiloissa ja sitä käytetään seosaineena esimerkiksi höyrykattiloissa ja höyryturbiineissa käytettävissä kuumalujissa teräksissä. Seostamalla austeniittiseen ruostumattomaan teräkseen noin 2,5% molybdeenia teräksestä saadaan haponkestävää. Molybdeeni parantaa syöpymiskestävyyttä. /3/

Pii

Piin sulamispiste on 1420°C. Se on tavallinen teräksen tiivistysaine. Se lisää teräksen kovuutta ja lujuutta heikentäen samalla iskusitkeyttä. /3/

Alumiini

Alumiinin sulamispiste on 658°C. Sitä käytetään esimerkiksi valuterästen tiivistysaineena hyvin pienillä seostuksilla (n. 0,05%). Teräksen alumiiniseostuksella voidaan vähentää hitsauksessa tapahtuvaa myötövanhenemistä. Sitä käytetään

seosaineena typetysteräksissä, joissa hyvä kulumiskestävyys perustuu koviin alumiininitridipartikkeleihin. /3/, /4/

Vanadiini

Vanadiinin sulamispiste on 1900°C. Se estää karkearakeisuuden muodostumista hitsissä. Vanadiini lisää teräksen lujuutta korkeissa lämpötiloissa heikentämättä sitkeyttä. /3/

Volframi

Volframin sulamispiste on 3380°C. Se muodostaa hiilen kanssa karbideja ja lisää teräksen kovuutta korkeissa lämpötiloissa. /3/

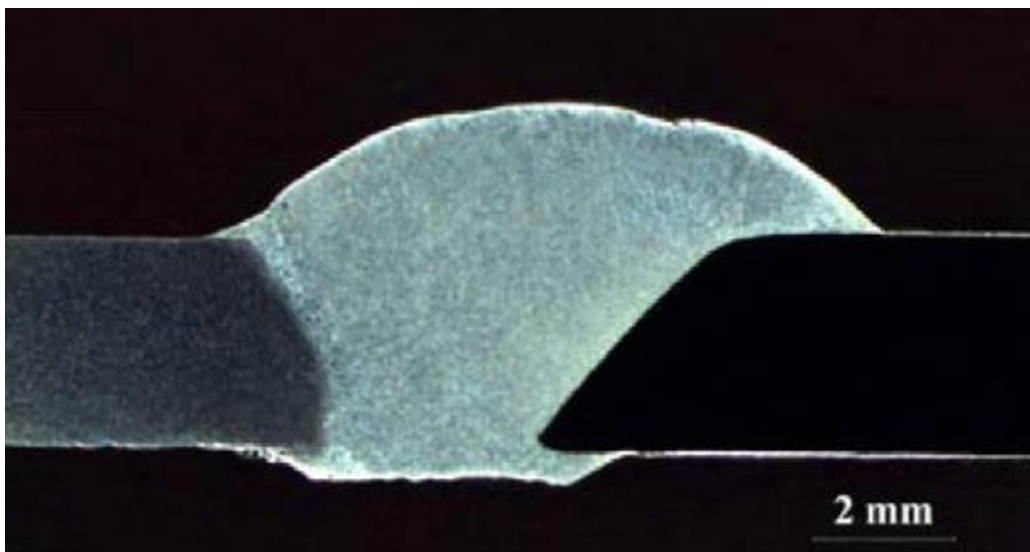
4. Teräksen ja alumiinin sekaliitos

Teräksen ja alumiinin yhteenliittämisen haasteita. Metallien suuresti eroavat sulamislämpötilat estävät perinteisen sulahitsauksen. Lisäksi metallien välillä tapahtuu lämpötilan vaikutuksesta kemiallinen reaktio, jossa syntyy kovia ja hauraita metallien välisiä yhdisteitä (intermetallic compounds, IMC), jotka haurautensa vuoksi heikentävät liitoksen lujuutta huomattavasti. Optimaalisinta olisi löytää liitostapa, jossa IMC-vyöhykettä ei synny ollenkaan liitettävien kappaleiden välille.

5. TIG –juottohitsaus

TIG-juottohitsaus on TIG-hitsauksen sovellus, joka mahdollistaa alumiinin ja teräksen eripariliitoksen kaarihitsauksen. Perinteiset kaarihitsausprosessit eivät sovellu teräksen ja alumiinin eripariliitoksen hitsaukseen metallien materiaaliominaisuuksien vuoksi. Suurin syy tähän on materiaalien suuresti eroavat sulamispisteet.

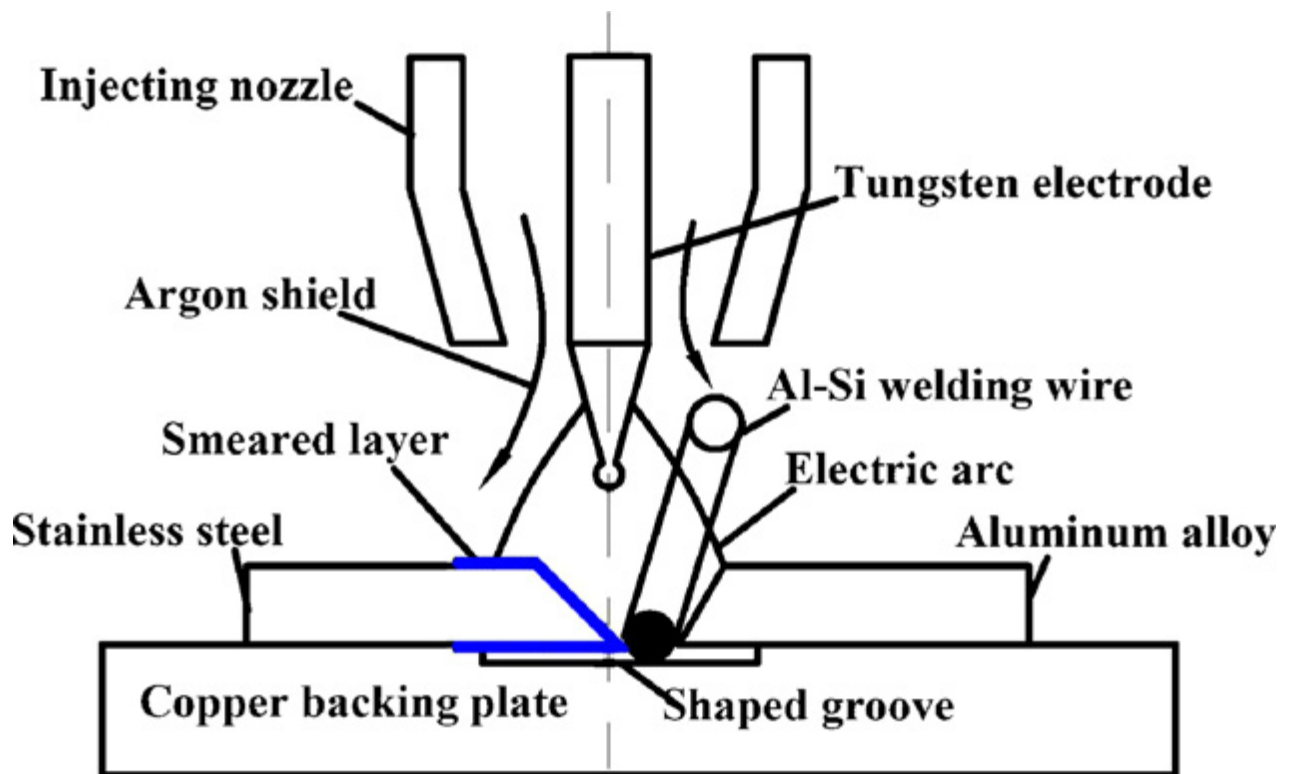
TIG-juottohitsaus ikäänkuin kiertää tämän sulamispisteiden aiheuttaman ongelman niin, että käytetty prosessilämpötila riittää muodostamaan hitsiliitoksen alumiinilevyn puolelle, muttei sulata terästä, vaan teräslevy yhdistyy liitokseen juottamalla. Kuvassa 1 nähdään TIG-juottohitsauksella aikaansaatu teräs-alumiini eripariliitos. /5/



Kuva 1. TIG-juottohitsattu teräs-alumiini eripariliitos. /5/

Sula alumiini ei ole tarpeeksi juoksevaa kastellakseen teräslevyn pinnan, joten lisäaineeseen täytyy sisällyttää juoksute, joka parantaa juotteen kastelevuutta ja levittyvyyttä. /5/

TIG-juottohitsausprosessissa V-railonmuotoon työstetyt teräs- ja alumiinilevyt asetetaan kuparisen taustalevyn päälle. Kuparilevyssä on levyjen liitoskohdalla syvennys, jotta hitsauslisäaine pääsee juoksemaan myös levyjen alapuolelle. Kuparinen taustalevy toimii hyvänä lämpönieluna kuparin hyvän lämmönjohtavuuden ansiosta. Lämmön nopea poistuminen on prosessissa tärkeää, sillä alumiinin ja raudan korkeassa lämpötilassa keskenään muodostamat kovat ja hauraat IMC yhdisteet laskevat liitoksen lujuutta merkittävästi. Prosessin periaate nähdään kuvassa 2. /5/



Kuva 2. TIG-juottohitsaus alumiinin ja teräksen eripariliitokselle. /5/

TIG-juottohitsausta on tutkittu melko vähän. Kiinassa tehdyissä tutkimuksissa 5A06 alumiinin ja SUS321 ruostumattoman teräksen TIG-juottohitsatun liitoksen vetolujuudeksi saatiin 120MPa käytettäessä 4047 Al-Si lisäainetta ja 172.5MPa Al-Cu6 lisäaineella. Huolestuttavia havaintoja ovat teräksen ja alumiinijuotteen välille syntyvien IMC yhdisteiden kovuusarvot, jotka kipuavat korkeimmillaan jopa 700HV. /1/, /6/

Puhtaan Fe_4Al_{13} yhdisteen kovuus on kuitenkin 890HV, joten lisäaineen kupari on saattanut laskea liitosvyöhykkeeseen muodostuneen yhdisteen kovuutta samalla parantaen sen lujuutta. IMC-vyöhykkeen kasvaessa yli $10\mu m$ paksuiseksi liitoksen lujuus alkaa laskea nopeasti, sillä särö pääsee muodostumaan vyöhykkeen suuntaisesti. /5/, /6/

Myös piin lisäyksen lisäaineeseen on näytetty parantavan liitoksen lujuutta vähentämällä IMC-yhdisteiden muodostumista. Tutkimusten valossa näyttäisi kuitenkin siltä, että prosessin lämpötila on kaikkein suurin yksittäinen tekijä IMC-yhdisteiden

syntyyn ja lajiin. Kuumemmissa lämpötiloissa syntyvät yhdisteet FeAl₂ ja FeAl₃ ovat kovempia ja hauraampia kuin Fe₂Al₅ jota syntyy rajoittamalla hitsauslämpötilaa. IMC-yhdisteiden syntyä ei voida kokonaan eliminoida, koska alumiinin ja teräksen liitos tapahtuu juuri metallien välisinä sidoksina, mutta yhdisteiden koostumusta voidaan ainakin lämmöntuontia rajoittamalla kontrolloida. Mahdollista on myös, että yhdisteiden syntyprosessia voidaan rajoittaa jollain hitsauslisäaineella, joista ainakin kuparilla ja piillä on todettu olevan yhdisteiden syntyä rajoittavia vaikutuksia. /7/

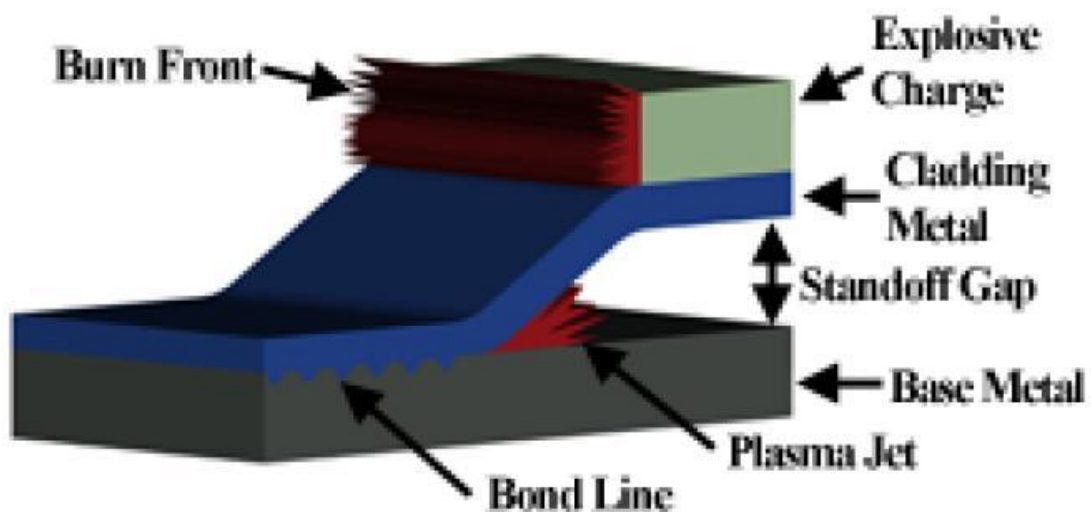
6. Räjätyshitsaus

Räjätyshitsaus on kiinteän tilan hitsausprosessi, jossa tarkkaan kontrolloidulla kemiallisilla räjähteillä tuotetulla räjähdysenergialla saatetaan hitsattavat kappaleet yhteen suurella nopeudella. Törmäyksen vaikutuksesta kappaleiden välille syntyy korkealuokkainen metallurginen hitsiliitos. Räjätyshitsauksessa vaikutusaika on niin lyhyt, että prosessissa ei mennä metallien sula-alueelle ja siten reaktiovyöhyke yhteen liitettävien kappaleiden välillä jää ohueksi. /8/

Räjätyshitsauksessa perusmetalli käytännössä päällystetään toisella metallilla. Perusmetalli- ja päällystemetallilevyt asetetaan yhdensuuntaisesti tukevalle alustalle niin, että perusmateriaalilevy on alustaa vasten. Levyt ei ole kosketuksissa toisiinsa, vaan niiden välissä on oltava tarkkaan mitoitettu rako, jotta prosessi onnistuisi. Päällystemetallilevyn yläpuolella on tasainen kerros kemiallista räjähdysainetta, jolla hitsausenergia saadaan aikaan. Yleisimmin käytetty räjähdysaine on ANFO (Ammonium Nitrate-Fuel Oil) edullisen hintansa vuoksi, mutta myös muita kemiallisia räjähteitä käytetään, kun käytettävältä räjähteeltä vaaditaan erilaista palonopeutta. /9/, /10/

Räjähdysaineen syttyessä räjähdysrintama kulkee hitsaussuuntaan koko hitsattavan alueen leveydeltä. Räjähdys saa pinnoitemateriaalin iskeytymään perusmateriaaliin tietyllä törmäyskulmalla, joka riippuu käytetyn räjähdysaineen räjähdysnopeudesta ja

levyjen väliin jätetyn raon leveydestä. Törmäyksen tuottama voima saa liitettävien kappaleiden pintakerroksissa materiaalin muuttumaan muutaman atomikerroksen paksuudelta plasmaksi, joka etenevän räjähdysaallon vaikutuksesta muodostaa plasmasuihkun hitsaussuuntaan. Plasmasuihku työntää mennessään metallien pinnoille muodostuneet oksidit ja mahdolliset muut epäpuhtaudet pois puhdistaan samalla hitsauspinnat. Törmäyksen voimasta kappaleiden välille syntyy metallurginen sidos. Kuvassa 3 nähdään räjäytyshitsauksen periaatekuva. /9/, /10/



Kuva 3. Räjäytyshitsauksen periaatekuva /10/

Liitoskohdan nopeasta jäähtymisestä johtuen IMC-yhdisteiden muodostuminen on hyvin vähäistä. Räjäytyshitsattujen kappaleiden makrokuvista voidaan yleensä helposti nähdä hitsausprosessille tyypillinen aaltomainen liitospinta, jonka aaltomuoto riippuu käytetystä räjähdysaineesta ja kappaleiden välisestä törmäyskulmasta. Räjäytyshitsauksella aikaansaadun hitsin vetolujuus ylittää pääsääntöisesti päällystemateriaalin vetolujuuden. /10/

Räjäytyshitsaamalla tuotetut kaksoismetallipalat mahdollistavat useissa hitsatuissa konstruktioiden sellaisten metalliparien käytön, joka perinteisillä kaarihitsausmenetelmillä olisi mahdoton toteuttaa. Kaksoismetallikappaleita käytettäessä tulee kuitenkin huomioida se, että lämpövaikutus saa liitospinnan

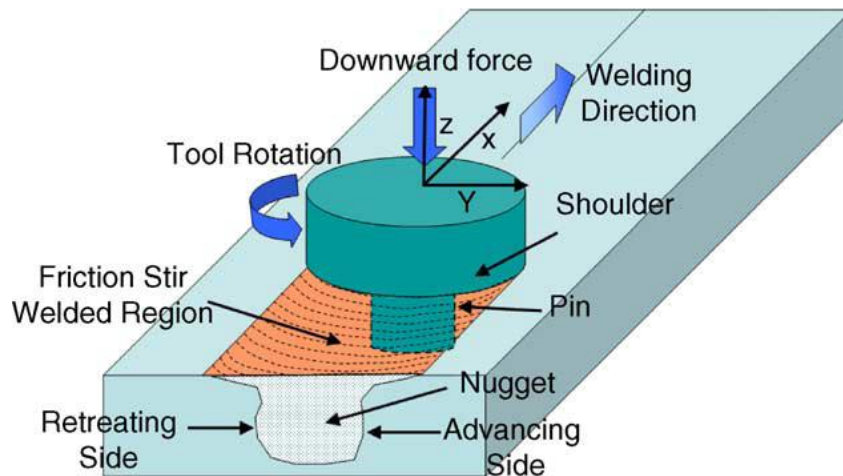
materiaalit reagoimaan keskenään ja yhdistymään hauraiksi ja koviksi IMC-yhdisteiksi. Hitsauksen lämmöntuontia siis tulee kontrolloida tarkasti liitospaloja käytettäessä. Räjähdyshitsaus ei myöskään ole kovin joustava hitsausprosessi, ja soveltuukin lähinnä kaksoiskomponenttipalojen tekemiseen, joiden liittäminen lopulliseen konstruktion vaatii jonkun muun hitsausprosessin käyttöä.

Koska hitsausenergia tuotetaan räjähteillä, ympäristöhaitat ovat suuresti rajoittava tekijä prosessin käyttöönotolle. Kerralla käytettävät räjähdemäärät vaihtelevat välillä 10 – 1000kg. Pienemmillä panoksilla ympäristöhaitat jäävät meluhaitoiksi, mutta suuremmat räjähdykset saattavat jo aiheuttaa rakennevaurioita ympäröiviin rakennuksiin. /10/, /11/

7. Kitkahitsaus pyörivällä työkalulla (FSW)

Kitkahitsaus pyörivällä työkalulla (FSW) on verrattain uusi hitsausmenetelmä. Se on kiinteän tilan liittämismenetelmä, eli liitettävien materiaalien lämpötila ei prosessin aikana missään vaiheessa nouse yli sulamispisteen. FSW on kehitetty Iso-Britannian hitsausinstituutissa (TWI) 1990-luvun alkupuoliskolla ja alunperin sitä käytettiin pelkästään alumiinien hitsaukseen. Sillä pystyttiin liittämään korkeasti seostettuja 2XXX ja 7XXX –sarjan alumiineja, joita ei perinteisin menetelmin juurikaan voinut hitsata hitsin huonon mikrorakenteen ja huokoisuuden aiheuttamien mekaanisten ominaisuuksien laskun vuoksi. /12/

FSW-prosessi on periaatteeltaan hyvin yksinkertainen, muistuttaen erittäin paljon jyrintää. Sekä jyrinnässä että FSW:ssa numeerisesti ohjatulla pyörivällä työkalulla työstetään materiaalia. Suurimpana erona on se, että FSW:ssa materiaalia ei poistu prosessista, vaan työkalun pyörimisliike siirtää menosuunnasta irronneen materiaalin työkalun taakse, jonne siirtynyt materiaali muodostaa hitsiliitoksen. Kuvassa 4 nähdään FSW:n periaatekuva. /12/



Kuva 4. Kitkahitsaus pyörivällä työkalulla. /12/

Pyörivällä työkalulla on kolme tehtävää:

- Pyöriessään työkalun neulaosa irrottaa materiaalia menosuunnastaan siirtäen sen pyörimisliikkeen avulla työkalun taakse. Työkalun takana siirtynyt materiaali plastisoituu ja muodostaa hitsiliitoksen.
- Samalla kun työkalu irrottaa materiaalia, syntyy kitkalämpöä, joka työstöarvojen ollessa oikein asetettu on juuri riittävä pehmentämään materiaalia kuitenkin nostamatta lämpötilaa yli sulamispisteen.
- Työkalun neulan yläpuolella oleva suuri olake suojaa hitsiä ja estää materiaalia poistumasta hitsausprosessista. Neula on hieman lyhyempi kuin hitsattava materiaalin paksuus, jonka johdosta materiaalia ei pääse poistumaan myöskään hitsin alaosaan.

FSW:lla on useita etuja moniin perinteisiin hitsausprosesseihin verrattuna. Koska koko hitsausprosessi tapahtuu kiinteässä tilassa, muodostunut lämpö jää vähäiseksi. Matalasta prosessilämmöstä seuraa se, että työkappaleiden lämpömuodonmuutokset jäävät hyvin vähäisiksi. Tästä johtuen työkappaleiden mittatarkkuus ja prosessin toistettavuus ovat hyvin hallittavissa. /12/

Koska hitsi muodostuu työkappaleista irronneesta materiaalista, hitsausprosessissa ei ole mainittavia materiaalihäviöitä, eikä siihen tarvitse tuoda ulkopuolista lisäainetta. Perusmateriaalin ja hitsin mikrorakenne pysyy hyvänä, koska pieni prosessilämpö ei edesauta rakeenkasvua. Hienon mikrorakenteen ansiosta liitoksen ominaisuudet ovat erinomaiset, eikä kuumahalkeilua pääse syntymään hitsiin. /12/

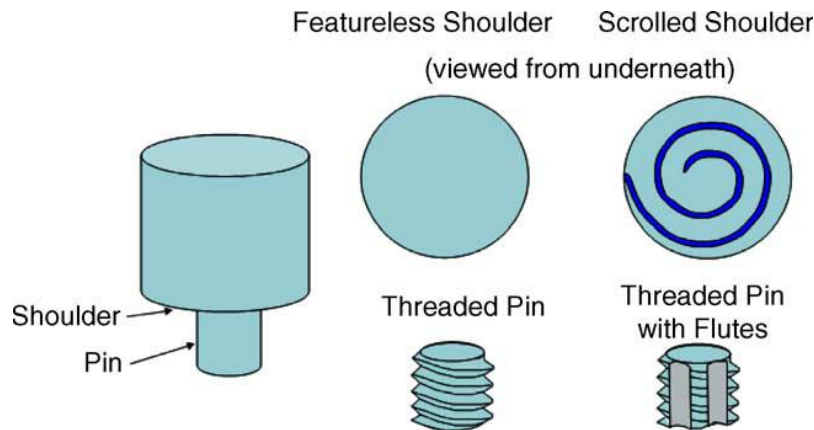
Koska FSW on kiinteän tilan hitsausmenetelmä ja työkalun suuri olake suojaa koko hitsausprosessia, erillistä suojakaasua ei tarvita. Hitsaustapahtuma on hyvin puhdas, eikä liuottimia tai muita puhdistusaineita tarvita. Lisäksi FSW mahdollistaa eri materiaalipaksuuksien yhteenliittämisen, joka antaa tuotesuunnittelulle vapaammat kädet suunnitella rakenteeltaan ja painoltaan kevyempiä konstruktioita. FSW on myös hyvin energiatehokas prosessi, vaaten vain noin 2.5% laserhitsauksen energiatarpeesta. Taulukossa 4 nähdään FSW prosessin edut ja hyödyt. /12/

Taulukko 4. FSW-prosessin hyödyt. /12/

Metallurgiset edut	Ympäristöedut	Energiaedut
Kiinteän tilan prosessi	Ei suojakaasua	Materiaalin hyödynnettävyys
Pienet kappaleen muodonmuutokset	Ei pintojen puhdistamista	Matala energiankulutus
Hyvä mittatarkkuus	Ei jyrsäntähävikkiä	
Ei materiaalihävikkiä	Ei liuottimia	
Liitoksen erinomaiset metallurgiset ominaisuudet		
Hieno mikrorakenne		
Ei halkeilua		

FSW prosessi perustuu monimutkaiseen materiaalin siirtymiseen ja plastiseen deformaatioon. Hitsausparametrit, työkalugeometria ja liitoksen suunnittelu vaikuttavat suuresti materiaalin siirtymiseen ja lämmön jakautumiseen, ja täten ovat suurin vaikuttaja aikaansaadun hitsiliitoksen mikrorakenteeseen. /12/

Työkalun geometria on suurin vaikuttaja prosessin etenemisessä. Se vaikuttaa suuresti prosessin materiaalivirtoihin ja määrää hyvin pitkälti saavutettavan hitsausnopeuden. Työkalu muodostuu olakkeesta ja neulasta. Kuvassa 5 nähdään FWS:n työkalujen periaatekuva. /12/

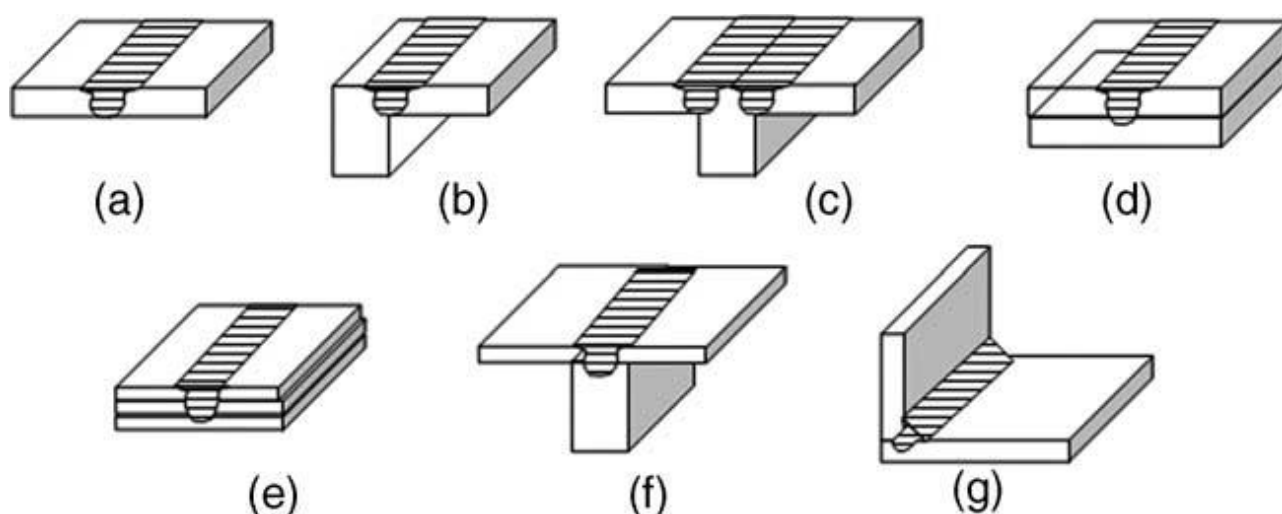


Kuva 5. FSW-työkalujen periaatekuva. /12/

Kuten aiemmin todettiin, työkalun tärkeimmät tehtävät on lämmittää työkappaleita paikallisesti ja siirtää materiaalia. Hitsauksen alussa työkalun upotuksen aikana ainoastaan neula tuottaa prosessiin lämpöä, mutta työkalun ollessa kokonaan upotettuna suurin lämmönmuodostaja on työkalun olake. Lämmönmuodostuksen näkökulmasta neulan ja olakkeen keskinäinen kokoero vaikuttaa kaikkein eniten lopputulokseen. Toinen työkalun tehtävä on sekoittaa ja siirtää materiaalia. Mikrorakenteen ja hitsin ominaisuuksien kannalta työkalun muotoilulla on suurin vaikutus. Yleisimmin käytetään kuperaa olakkeen muotoa ja kierteistä sylinterimäistä neulaa. /12/

Prosessiparametreista työkalun pyörimisnopeus myötä- tai vastapäivään ja työkalun siirtymisnopeus hitsauslinjaan nähden ovat tärkeimmät. Työkalun pyöriminen sekoittaa irronneen perusmateriaalin neulan ympärillä ja työkalun liikkuminen siirtää sekoitetun materiaalin työkalun taakse muodostamaan hitsin. Mitä suurempi työkalun pyörimisnopeus on, sitä enemmän kitkalämpöä muodostuu. /12/

Parhaiten FSW:lle soveltuvat liitosmuodot ovat päittäis- ja päällekkäisliitokset ja niiden variaatiot, mutta myös pienahitsi on mahdollinen. Päittäis- ja päällekkäisliitokset eivät vaadi erityisvalmisteluita liitettävien levyjen pintojen suhteen, vaan kaksi puhdasta metallilevyä voidaan helposti liittää yhteen. Kuvassa 6 nähdään FSW:lle soveltuvia liitosmuotoja. /12/

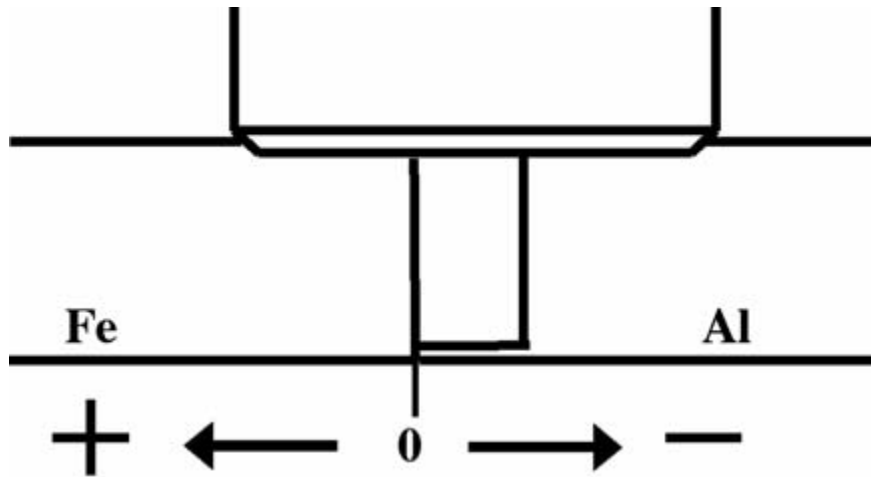


Kuva 6. FSW-prosessille soveltuvia liitosmuotoja. /12/

Teräksen ja alumiinin eripariliitoksen valmistaminen FSW:llä luo uusia haasteita liitosparametrien valinnalle. Teräs kovempaan materiaalina synnyttää pyörivän työkalun kanssa yhteen osuessaan paljon enemmän kitkalämpöä kuin alumiini. Koska lämpötilaa joudutaan kuitenkin rajoittamaan alumiinin alhaisen sulamispisteen vuoksi, työkalun paikoituksella on suuri merkitys hitsiliitoksen onnistumiselle.

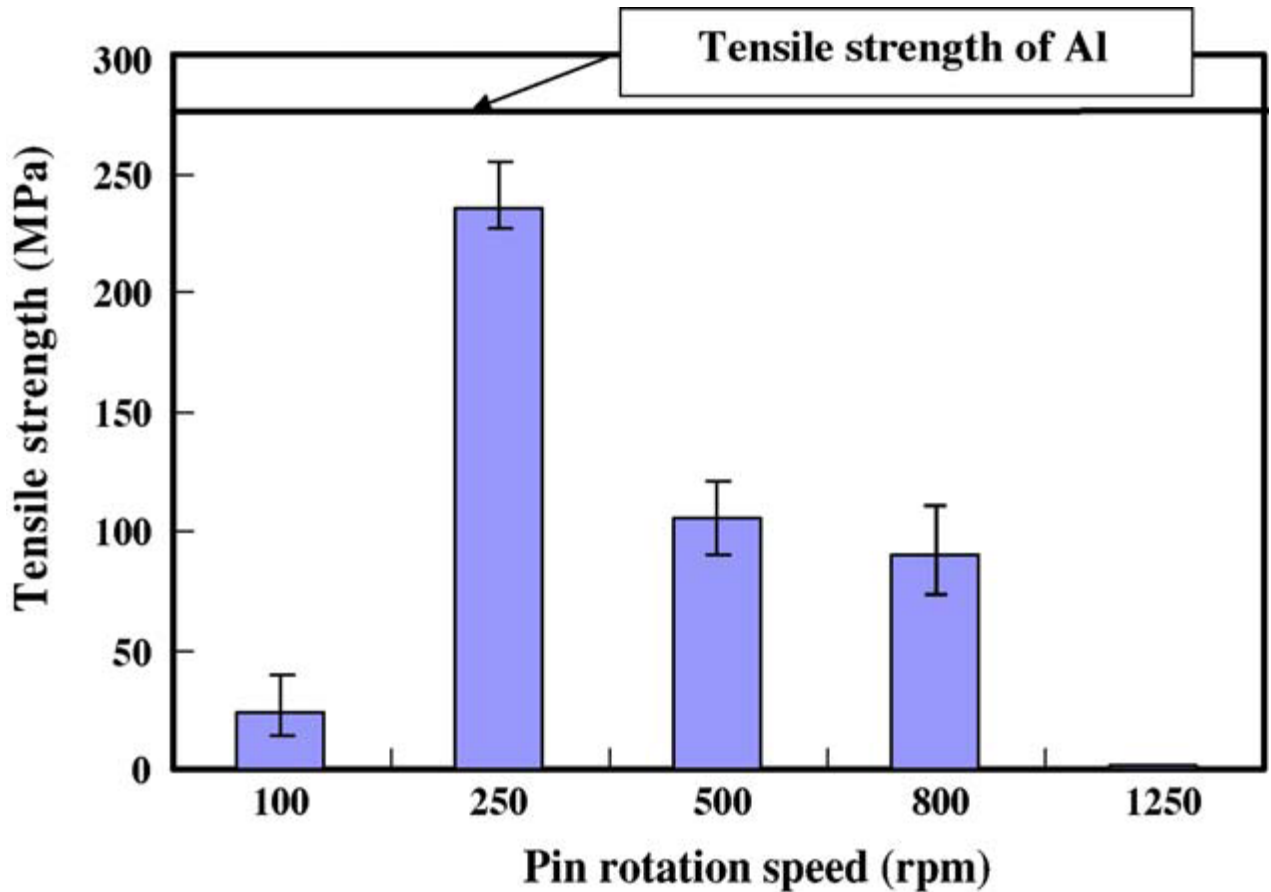
Japanissa tehdyssä tutkimuksessa Al5083 alumiiniseos ja matalaseosteisen SS400 teräs liitettiin yhteen kitkahitsaamalla pyörivällä työkalulla. Tutkimuksessa testattiin FSW-prosessia kyseisten materiaalien yhteenliittämiseksi eri työstöparametreilla. Testattavia parametreja oli työkalun pyörimisnopeus ja neulan offset-arvo. Käytetyn työkalun olakeosa oli halkaisijaltaan 150mm, työkalun neula halkaisijaltaan 2mm ja pituudeltaan 1,9mm. Molempien yhteenliitettävien materiaalien ainevahvuus oli 2mm. Offset-arvo on työkalun paikoitukseen liittyvä muuttuja, joka osoittaa työkalun neulan

paikan liitoslinjaan nähden. Tutkimuksessa nolla-arvo oli asetettu kohtaan, jossa työkalu on kokonaan alumiinilevyn puolella (Kuva 7). /13/



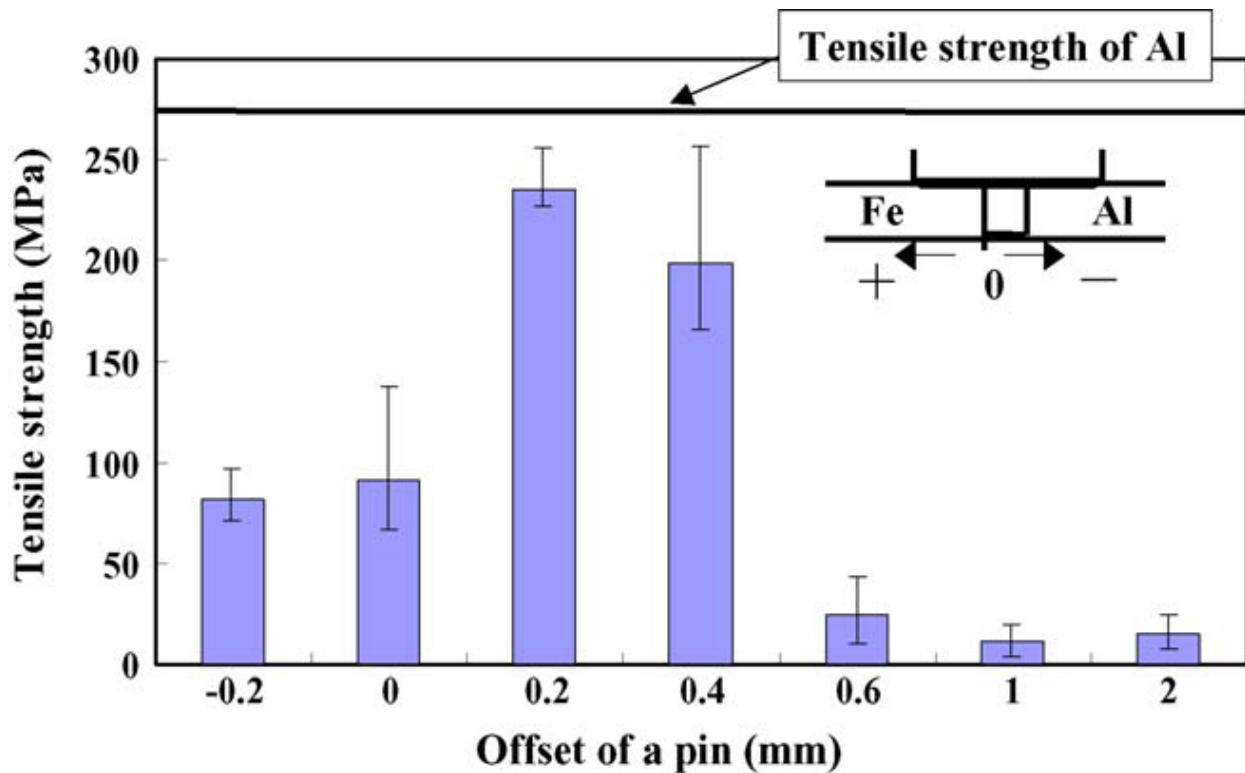
Kuva 7. Työkalun offset-arvon määrittäminen. /13/

Työkalun optimaaliseksi pyörimisnopeudeksi saatiin 250 kierrosta/min. Alhaisemmillä pyörimisnopeuksilla muodostunut kitkalämpö ei ollut riittävä pehmentämään materiaaleja johtaen nopeaan työkalun kulumiseen ja huonolaatuiseen hitsiin. Korkeammilla nopeuksilla hitsiin alkoi muodostua sulkeumia ja lopulta kitkalämpö oli niin korkea että alumiinissa seosaineena ollut magnesium syttyi palamaan eikä hitsausta voitu jatkaa. Kuvassa 8 nähdään eri pyörimisnopeusarvoilla aikaansaatuisten hitsiliitosten lujuus. /13/



Kuva 8. Eri työkalun pyörimisnopeusarvoilla aikaansaatujen hitsien lujuus. /13/

Optimaaliseksi työkalun paikoituksen offset-arvoksi saatiin +0.2, eli työkalun ollessa 0.2mm teräslevyn puolella. Pienemmillä arvoilla teräslevyn pinnan oksidikalvo ei poistunut tarpeeksi hyvin ja liitos jäi heikoksi. Suuremmilla arvoilla taas teräksestä irronneet partikkelit olivat suurempia ja aiheuttivat lisäksi hitsiin huokosia madaltaen liitoksen lujuutta. Kuvassa 9 nähdään offset-arvon vaikutus liitoksen lujuuteen. /13/



Kuva 9. Offset-arvon vaikutus liitoksen lujuuteen. /13/

Optimoiduilla arvoilla tuotetun hitsin lujuudeksi saatiin n. 87% käytetyn alumiiniseoksen lujuudesta. Samankaltaisia tuloksia saatiin saksalais/italialaisessa tutkimuksessa, jossa 4mm paksuiset Al 6013-T4 ja X5CrNi18-10 levyt liitettiin yhteen FSW:llä. Käytetty työkalun pyörimisnopeus oli 800 kierrosta/min ja työstönopeus 80mm/min. Liitoksen väsymisarvoiksi mitattiin noin 70% käytetyn alumiiniseoksen vastaavista arvoista. /13/, /14/

FSW vaikuttaa lupaavalta menetelmältä alumiinin ja teräksen eripariliitoksen hitsaamiseksi. Oikein asetetuilla työstöparametreilla hitsissä päästään hyvin lähelle käytetyn alumiiniseoksen lujuutta. Lisäksi FSW tukee useita liitosmuotoja ja on jopa robotisoitavissa. Essenin hitsausmessuilla 2009 esiteltiin useita nivelvarsirobotisoituja FSW sovelluksia, jotka mahdollistavat kaksoiskaarevien 3D-pintojen hitsaamisen. Cytec:n, KUKA:n ja Esab:n installaatioissa kaikissa käytettiin 500 kg:n kapasiteetin nivelvarsirobottia 3D työkappaleen hitsaamiseen. Prosessin vaatiman suuren aksiaalivoiman (tyypillisesti 10kN) vuoksi hitsattavat materiaalipaksuudet eivät kuitenkaan voi olla kovin suuria. /12/, /15/

8. Laserhitsaus

Laserhitsaus on menetelmä, jossa hitsausenergia tuodaan prosessiin fokusoidun lasersäteen muodossa. Suuren energiatiheiden ansiosta säteen teho fokuksipisteessä riittää sulattamaan ja jopa höyrystämään kohdemateriaalin. Laser on akronyymi sanoista light amplification by stimulated emission of radiation, eli laser on stimuloidun emission avulla vahvistettua valoa. Laservalolla on sama aallonpituus, se on yhdensuuntaista ja sen säteet ovat kaikki samassa vaiheessa. Laservalo syntyy optisessa väliaineessa, joka voi olla kiinteää, nestemäistä tai kaasumaista. Väliaineeseen pumpataan sähkö- tai valoenergiaa jolloin väliaineen atomien elektroneit virittyvät korkeammalle energiatasolle, josta takaisin palatessaan ne lähettävät vakioaallonpituuksista valoa. /16/

Laserhitsaus jakautuu sulattavaan laserhitsaukseen ja avaimenreikähitsaukseen. Sulattavassa laserhitsauksessa lasersäde kuumentaa hitsattavan materiaalin pintaa ja lämpö siirtyy materiaalissa johtamalla sulattaen sitä. Sulattavaa laserhitsausta käytetään yleensä sovelluksiin, joissa avaimenreikähitsaus ei pienten materiaalipaksuuksien tai railotoleranssien takia tule kysymykseen. Sulattava hitsaus onnistuu myös pienemmällä laserteholla ja suuremmalla polttopisteen koolla kuin avaimenreikähitsaus. /16/

Avaimenreikähitsauksessa lasersäde fokusoidaan kappaleen pintaan tai vähän sen alapuolelle materiaalin sisään. Hitsattavaan materiaaliin höyrystyy säteen suuren tehotiheyden ansiosta avoin reikä joka pysyy avoinna höyrystyvän metallin aiheuttaman paineen ansiosta. Avaimenreiän syntymiseksi lasersäteiden teho on terästä hitsattaessa ylitettävä 10^6W/cm^2 . Sädetä kuljetetaan halutun hitsauslinjan mukaisesti, jolloin muodostuneen avaimenreiän edetessä reiän etuosassa sulanut materiaali kulkeutuu reiän takaosaan jähmettymään ja muodostamaan hitsin. /16/

Laserhitsauksella on monia etuja perinteisiin kaarihitsausmenetelmiin verrattuna. Pieni säteen vaikutusaika kappaleeseen pitää lämmöntuonnin pienenä. Tästä taas on etuna pienet lämpömuodonmuutokset ja se mahdollistaa esimerkiksi esikoneistettujen osien yhteen hitsaamisen ilman loppukoneistustarvetta. Lisäksi hitsit voidaan sijoittaa lähelle lämpöherkkiä komponentteja ja perusmateriaalin

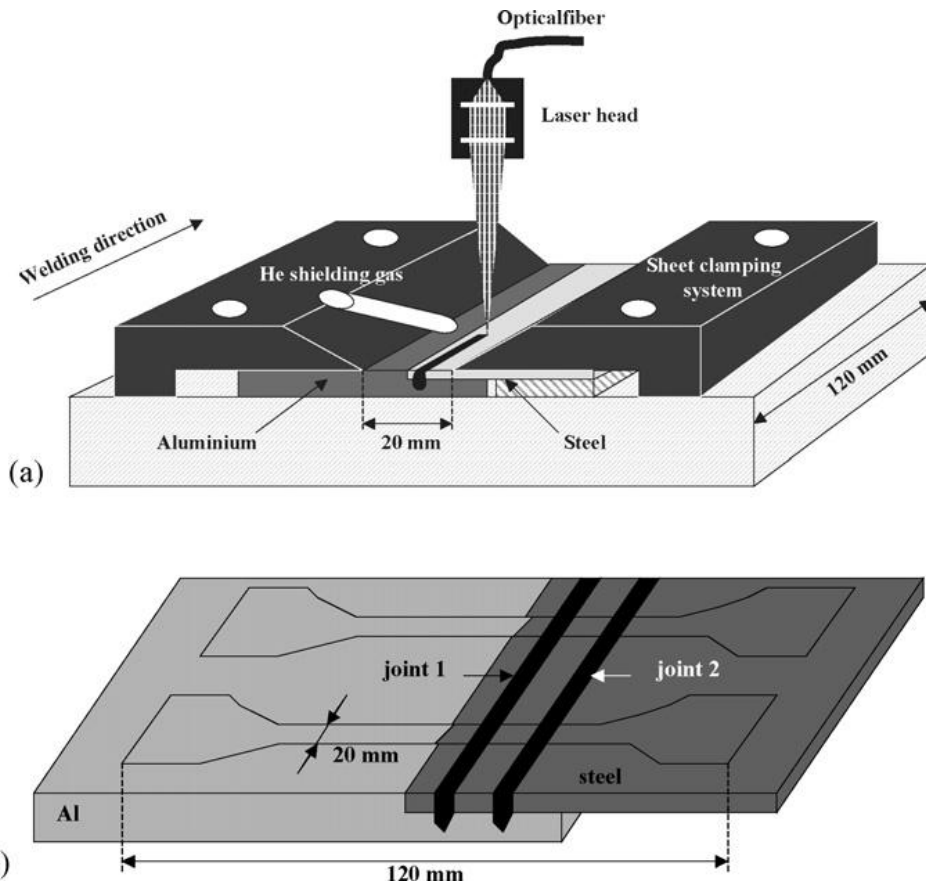
metallurgiset muutokset kuten rakeenkasvu ja lämpövyöhykkeen leveys voidaan pitää hyvin hallinnassa. /16/

Laserhitsauksessa hitsausnopeudet voivat olla useita metrejä minuutissa ja prosessi on hyvin robotisoitavissa, sillä laserhitsaus onnistuu kaikissa asennoissa, kunhan optiikka on kunnolla roiskesuojattu. /16/

Teräksen ja alumiinin eripariiliitoksen laserhitsaus perustuu hyvin paljon samaan ideaan kuin TIG-juottohitsaus. Koska metallien sulamispisteet eroavat toisistaan suuresti ja korkea lämpötila aiheuttaa IMC-yhdisteiden syntymistä, lasersäde kohdistetaan teräsosaan, joka sulaessaan johtaa lämpöä alumiinikappaleeseen ja muodostaa kappaleiden välille hitsiliitoksen. Tällaisella järjestelyllä liitoskohdan lämpötilaa saadaan kontrolloitua paremmin. IMC-reaktiokerroksen paksuuden ylittäessä 10µm alkaa hitsiliitoksen lujuus laskea huomattavasti. Tämä johtuu siitä, että mitä paksumpi hauras IMC-vyöhyke on, sitä helpommin siihen pääsee muodostumaan vyöhykkeen suuntaisia halkeamia. Tästä syystä IMC-kerroksen paksuus tulisi rajoittaa paksuuteen 10µm. /17/

Ranskalaisessa tutkimuksessa tutkittiin matalahiillisen teräksen ja 6056-T4 alumiinin hitsausta päällekkäisliitoksena avaimenreikälaserhitsauksella. Käytetyn teräslevyn paksuus oli 1,2mm ja alumiinilevy 2,5mm. Alumiinilevyyn oli tehty teräslevyn kokoinen sovite, ja alumiinin paksuus liitoskohdassa oli 1,3mm. /18/

Hitsaus suoritettiin Nd:YAG laserilla, jonka tehoalue oli 2.25-3.5kW ja hitsausnopeutta vaihdeltiin välillä 4-6m/min. Suojakaasuna käytettiin heliumia. Kuvassa 10 nähdään prosessin kulku ja esivalmistelut kokonaisuudessaan. /18/



Kuva 10. Alumiinin ja teräksen eripariliitoksen avaimenreikähitsaus ja koesauvojen valmistelu. /18/

Kun hitsin tunkeuma alumiinin puolelle pidettiin alle $500\mu\text{m}$ syvyisenä, saatiin aikaiseksi virheettömiä hitsejä, joiden Fe_2Al_5 ja/tai FeAl_3 faasien paksuudet vaihtelivat välillä $5\text{-}20\mu\text{m}$. Hitsin alumiinipitoisuudella huomattiin olevan suuri riippuvuus hitsiliitoksen kovuuteen, joka taas puolestaan kasvoi tunkeumaa kasvatettaessa. Paras aikaansaatu vetolujuus oli noin 250N/mm^2 ja se saavutettiin $200\text{-}400\mu\text{m}$ tunkeumasyvyydellä ja liitoksen murtumakohdaksi muodostui hitsi-alumiini –rajapinta. /18/

9. Johtopäätökset

Alumiinin ja teräksen eripariliitoksen hitsaaminen on mahdollista edellä esitellyillä prosesseilla. Koska IMC-yhdisteet kovuutensa ja haurautensa vuoksi vaikuttavat negatiivisesti hitsin lujuuteen, hitsausprosessin lämmöntonolla on suuri vaikutus

aikaansaadun hitsiliitoksen lujuuteen. Parhaassa tapauksessa IMC-yhdisteiden syntyä voidaan hillitä tai tietyillä hitsausprosesseilla eliminoida lähes kokonaan. Esitellyt prosessit eroavat toisistaan suuresti, mutta ne voidaan käytännössä jakaa sulahitsaukseen ja kiinteän tilan hitsaukseen. Koska lämpö on suuressa osassa hauraiden yhdisteiden syntymekanismissa, kiinteän tilan prosessit vaikuttavat kaikkein lupaavimmilta hitsiliitoksen lujuutta ajatellen.

Koska korkea prosessilämpötila on omiaan synnyttämään tai kasvattamaan jo olemassa olevaa IMC-vyöhykettä metallien liitoskohdassa, kaikkein lupaavimmalta hitsausprosessilta tutkimusten valossa vaikuttaa kitkahitsaus pyörivällä työkalulla. Koska alumiinin ja teräksen eripariliitoksen hitsaaminen on erittäin tarkkaa työtä, prosessiparametrit joutuu todennäköisesti hakemaan tilannekohtaisesti eri materiaaleille ja materiaalipaksuuksille. Lisäksi on suotavaa, että prosessi on korkeasti automatisoitavissa tasalaatuisen hitsiliitoksen aikaansaamiseksi. FSW:n käyttökohteet rajoittuvat lähinnä ohutlevyjen hitsaukseen, kun taas räjäytyshitsaamalla tuotettujen välikappaleiden käyttö mahdollistaa myös suuremmat materiaalipaksuudet. Räjäytyshitsattujen välikappaleiden käytössä tulee kuitenkin huomioida asennushitsauksen lämmöntuonti, sillä vaikka itse asennuspalassa IMC-yhdisteitä ei olisi, asennushitsauksen lämpövaikutus voi saada aikaan kemiallisen reaktion alumiinin ja teräksen välillä.

Tutkimuksissa oli annettu aikaansaatuisten hitsiliitosten lujuusarvot lähinnä vetolujuuksina. Tämä jättää hieman arvelujen varaan sen, miten hyvin hauraita IMC yhdisteitä sisältävä liitos kestää taivutusta tai väsyttävää kuormitusta. Kuitenkin vetolujuuksien perusteella FSW :llä ja laserhitsauksella tuotettujen hitsien lujuudet näyttävät olevan noin 250MPa, TIG juottohitsauksen parhaan tuloksen ollessa 172,5MPa. Lupaavimmilta teräksen ja alumiinin liitosprosesseilta vaikuttaa tutkimusten perusteella FSW ja räjäytyshitsaamalla tuotettujen välikappaleiden käyttö. Räjäytyshitsatut palat mahdollistavat järeämpien rakenteiden liittämisen konstruktion, ja koska molemmat prosessit ovat kylmähitsausprosesseja, oikein asetetuilla parametreilla IMC-yhdisteet eivät muodostu kriittiseksi tekijäksi hitsin lujuudessa.

10. Yhteenveto

Tutkimuksessa käytiin läpi alumiinin ja teräksen eripariliitoksen hitsaamisen soveltuvia hitsausprosesseja. Johtuen materiaalien suurista mekaanisista eroavaisuuksista ja lämpövaikutuksen aikaansaamasta metallien välisten hauraiden yhdisteiden syntymisestä, hitsaus on vähintäänkin haasteellista kaikilla läpikäydyillä prosesseilla. Kylmähitsausprosessit vaikuttivat kaikkein lupaavimmilta alumiinin ja teräksen suuresti eroavien sulamislämpötilojen tuomien ongelmien ja IMC-yhdisteiden syntymekanismin kontrolloimiseksi. Lupaavimmiksi prosesseiksi nousivat räjäytyshitsaus ja kitkahitsaus pyörivällä työkalulla, sillä näillä prosesseilla liitospinnan IMC-kerroksen syntyminen pystytään eliminoimaan lähes kokonaan. Koska prosessiparametrien tarkkuus on hitsin laadun kannalta hyvin ratkaiseva tekijä, käytetyn hitsausprosessin automaation taso tulisi olla mahdollisimman korkea hitsin tasalaatuisuuden takaamiseksi.

LÄHTEET

- /1/ Lukkari, J., Alumiinit ja niiden hitsaus, Metalliteollisuuden keskusliitto MET, Tammerpaino Oy, 2001
- /2/ Miekko-oja, H.M., Uudistettu Miekko-ojan metallioppi, Teknillisten tieteiden akatemia, Otava, 1986
- /3/ Lepola, P., Hitsaus ja teräsrakenteet, WSOY, 1998
- /4/ Teräksen seosaineet ja niiden vaikutus teräksen ominaisuuksiin, [Internetlähde] [viitattu 4.11.2010], <http://www.tuittusteel.fi/suomi/artikkelit/seosaineet.html>
- /5/ Song, J.L., Spreading behavior and microstructure characteristics of dissimilar metals TIG welding–brazing of aluminum alloy to stainless steel, Materials Science and Engineering A 509 s.31–40, 2009
- /6/ Lin, S.B., Brazability of dissimilar metals tungsten inert gas butt welding–brazing between aluminum alloy and stainless steel with Al–Cu filler metal, Materials and design, 2009
- /7/ Zhang, H.T., Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium–zinc-coated steel joints made by a modified metal inert gas welding–brazing process, Materials Characterization 58 s.588–592, 2007
- /8/ Souriau PA&E, Bonded explosive welding, [verkkodokumentti], [viitattu 17.10.2010], <http://www.pacaero.com/pdf/resourcecenter/Insert%20%20Bonded%20Explosive%20Welding.pdf>
- /9/ Young G.A., Banker J.G., Explosion Welded, Bi-Metallic Solutions to Dissimilar Metal Joining, Proceedings of the 13th Offshore Symposium, February 24, 2004, Houston, Texas

/10/ Cutter, D., What can you do with explosion welding, [verkkodokumentti], [viitattu 17.10.2010], <http://www.pacaero.com/pdf/resourcecenter/White%20Paper%20-%20Explosive%20Welding%20AWS.pdf>

/11/ Kokkonen, A., Räjätyshitsaus on myrkkyä lähiympäristön asukkaille, [verkkoartikkeli], [viitattu 18.10.2010], Etelä-Saimaa, 2007, <http://www2.lappeenranta.fi/lehtitietokanta/artikkeli.php?id=7979>

/12/ Mishra R.S., Ma Z.Y., Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering R 50 s.1-78, 2005

/13/ Watanabe, T., Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding, Journal of Materials Processing Technology 178 s. 342–349, 2006

/14/ Uzun, H., Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 To X5CrNi18-10 stainless steel, Materials and Design 26 s. 41–46, 2005

/15/ Hiltunen, E., Robottihitsaus Essenissä, Hitsaustekniikka-lehti, 6/2009

/16/ Kujanpää,V., Salminen, A., Vihinen, J., Lasertyöstö, Teknologiateollisuus, Tammer-paino Oy, 2005

/17/ Sierra G., Galvanized steel to aluminium joining by laser and GTAW processes, Materials characterization 59, s.1705-1715, 2008

/18/ Sierra G., Steel to aluminium key-hole laser welding, Materials Science and Engineering A 447 s.197–208, 2007