

Soğuk metal transfer kaynağı ile birleştirilmiş AA6061-galvanizli çelik sacların karakterizasyonu

Hülya DURMUŞ^{1*}, Nilay ÇÖMEZ¹, Metin YURDDAŞKAL^{2,3}

¹Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Manisa.

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Elektronik Malzemeler Üretim ve Uygulama Merkezi, Buca-İzmir.

³Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Buca-İzmir.

Makale Gönderme Tarihi: 20.02.2017

Makale Kabul Tarihi: 17.03.2017

Öz

Bu çalışmada, AA6061 ve galvanizli çelik sacların birleştirilmesi, bindirme kaynağı şeklinde AlSi5 dolgu teli kullanılarak soğuk metal transfer kaynağı ile gerçekleştirilmiştir. Isı girişinin, çelik ve alüminyum arasındaki intermetalik bileşik tabakasının oluşumu ve bu tabakanın kaynaklı sacların mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Bu kaynak yöntemi, Temel olarak düşük akım, düşük voltaj ve düşük ısı girdisi ile karakterize edilir ve kısa devre (daldırma transferi) modunda çalışmaktadır. Soğuk metal transferi kaynağı ile birleştirilmiş sacların mekanik özellikleri, çekme ve sertlik testleri ile intermetalik tabakanın ise nano indentasyon testi uygulanarak belirlenmiştir. Kaynaklı numunelerin çekme dayanımı incelendiğinde ısı girdisinin artmasıyla maksimum çekme dayanımı ve birim uzama değerleri artmıştır. Kaynak sırasında oluşan ısı girdisinin Al/Çelik arasında oluşan intermetaliklerin çeşidi ve tabaka kalınlığı üzerinde etkili olduğu bulunmuştur. SEM-EDX analizleri sonucunda elde edilen miktarlara göre hesaplamalardan ve faz diyagramından A numunesinde FeAl ve Al₃Fe, B numunesinde ise Al₃Fe ve Al₃Fe₂Si intermetaliklerinin oluşumuna rastlanmıştır. A numunesinde oluşan intermetalik tabakanın sertlik ve elastisite modülü B numunesine göre daha yüksek elde edilmiştir.

Sonuçta; soğuk metal transfer kaynağı diğer ark kaynak yöntemleri ile kıyaslandığında parçaların daha fazla ısınarak bağlantının mekanik özelliklerini kötü etkilemesi önlenilecek ve böylece Al-Çelik saclarının uygun kaynak parametreleri kullanılarak ve intermetalik tabaka kalınlığı kontrollü oluşturularak soğuk metal transferi kaynağı ile başarılı bir şekilde birleştirilebilecektir.

Anahtar Kelimeler: AA 6061, Galvanizli Çelik, Soğuk Metal Transferi kaynağı, İntermetalik.

Giriş

Alüminyum alaşımları, havacılık, gemi inşaatı, demir yolu ve otomobillerde hafiflik sağlayan malzemelerdir (Liu vd, 2015). Otomotivde yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının çeliğe kıyasla pahalı olması, beraberinde ekonomik kaygıları da getirmiştir. Bunun sonucunda, alüminyumun çelikle birlikte kullanılabilirdiği ince sac malzemelerden oluşan hibrit yapılar, hafifliği sağlayan ekonomik bir çözüm olmuştur. Bundan dolayı çeliğin alüminyumla birleştirilmesi kaçınılmaz hale gelmiştir (Liu vd, 2015; Ünel ve Taban, 2017). Geleneksel gazaltı kaynak yöntemleri; ince parçalarda, çökeltme sertleştirme uygulanmış, yüksek dayanımlı alüminyum alaşımların ve Fe/Al gibi farklı metal çiftlerinin kaynağında aşırı ısı girdisinden dolayı başarılı olamamıştır. Isı girdisinin fazla olması kaynak bölgesindeki mekanik özelliklerin kötüleşmesine, sıcak çatlama duyarlılığının ortaya çıkmasına, kaynak metalinde kayda değer miktarda gözenek oluşumuna ve özellikle ince saclarda meydana gelen yanma ve çarpılma gibi sorunlara sebep olmaktadır (Rykala ve Pfeifer, 2013).

Fe/Al kaynaklı bağlantılarının kullanıldığı pek çok durumda, galvanizli çelik sac çelik ana malzemesi olarak kullanılmaktadır, çünkü Zn kaplaması çeliği kaynak öncesinde oksidasyona karşı korur. Aksi halde oksit tabakası dolgu metalinin çelik sac yüzeyindeki iletilebilirliğini olumsuz yönde etkiler. Galvaniz kaplama kalınlığının en az 10 µm olacak şekilde 10–20 µm arasında korunması, işlemin iyi bir ark performansı ve çok az bir sıçramayla gerçekleşmesini sağlar. Çelik yüzeyindeki çinko kaplama, çinkonun düşük ergime noktası ve ark basıncı sebebiyle kaynak esnasında kendiliğinden dışarı itilir (Furukawa, 2006; Kang & Kim, 2015).

Fe-Al faz diyagramına göre, düşük ergime noktasına sahip alüminyum, ergimiş çelikle temas ettiğinde Fe, Al katı çözeltilerini ve her bir karışım oranında, sert ve kırılgan karakteristik sergileyen, demirce zengin Fe₃Al,

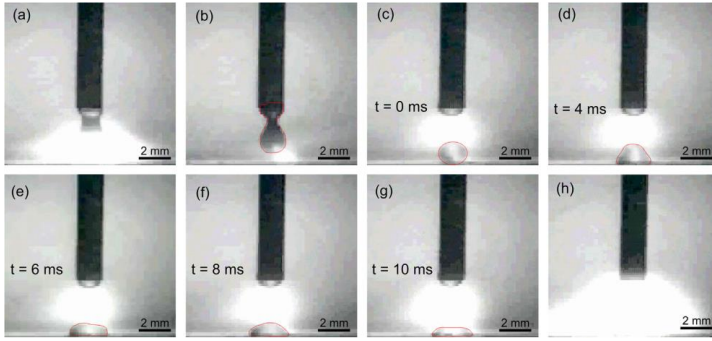
FeAl ve alüminyumca zengin FeAl₂, Fe₂Al₅, FeAl₃ ve Fe₂Al₃ intermetalik (metallerarası) bileşiklerini oluşturarak geleneksel gazaltı kaynak yöntemleri ile birleştirmeyi imkansız hale getirmektedir (Hussein vd., 2015; Shahverdi vd., 2002; Furukawa vd., 2006; Kah vd., 2012; Liu vd., 2015; Torkamany vd., 2010). Fe-Al intermetalik fazlarının oluşumu, alüminyum ve çelik arasında etkili bir birleştirmenin elde edilmesi açısından gereklidir. Fakat intermetalik oluşumunun ~10 µm üzerinde olması birleştirmenin kırılgan hale gelmesine de sebep olabilmektedir (Cao vd., 2014). Bu nedenle intermetalik tabaka boyutu kontrol altına alınması gerekmektedir. Ayrıca kaynak sonrası meydana gelen distorsiyon, nihai

ürünün estetiğini bozmakta ve bu olumsuzluğu gidermek için ölçümler yapılmasına ya da kaynak sonrası işlemler için laboratuvar harcamalarına sebep olmaktadır. Son yıllarda, kaynak ekipmanı üreticilerinin araştırma-geliştirme çalışmaları, özellikle sınırlı kaynaklanabilirliğe sahip ince malzemelerin ve farklı metal çiftlerinin kaynağına çözüm için düşünülen yeni düşük enerjili kaynak türü olan soğuk metal transferi kaynağının ortaya çıkmasını sağlamıştır (Rykala ve Pfeifer, 2013).

Soğuk metal transferi kaynağının geleneksel gazaltı kaynaklarından en önemli farkı, kaynak işlemine ve tüm sürecin kontrolüne entegre edilmiş olan tel hareketidir ve işlemin tamamen dijital kontrollü olmasıdır (Rajeev vd. 2014; Feng vd., 2009). Temel olarak düşük akım, düşük voltaj ve düşük ısı girdisi ile karakterize edilir ve kısa devre (daldırma transferi) modunda çalışır (Rajeev vd. 2014). Kısa devre oluştuktan sonra, dijital proses kontrolü hem güç beslemesini keser, hem de dolgu telini geri çeker (Feng vd., 2009; Yang vd., 2013). Tel geri çekme hareketi, kısa devre sırasında ergiyik haldeki damlacığın ayrılmasına yardım eder ve böylelikle elektromanyetik gücün yardımı olmaksızın kaynak banyosuna metal transferi gerçekleşmiş olur (Şekil 1) (Feng vd., 2009).

Yüksek sıcaklıkta farklı metallerin temas halinde olması durumunda intermetalik bileşiklerin oluşumu ve büyümesi çok karşılaşılan bir durumdur. Oluşan intermetalik tabakanın türü ve kalınlığı, optimum birleştirmelerin elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bouche' vd. (1998), katı demir ve sıvı alüminyum arasında oluşan intermetalik tabakanın büyüme kinetiğini daldırma testi ile araştırmışlardır (Bouche vd., 1998). Katı haldeki

çeliğin 700-900 °C aralıklarında değişen sıcaklıklarda ergiyik alüminyuma daldırılarak gerçekleştirilen testler sonucunda, Fe_2Al_5 ve $FeAl_3$ tespit edilmiştir. Bu fazların büyümesinin yayınma ile kontrol edildiğini bildirmişlerdir. Dolayısıyla farklı metallerin kaynağında ısı girdisi, difüzyon işlemiyle kontrol edilebilen kırılğan intermetalik bileşiklerin oluşumuyla doğrudan bağlantılı olduğu için büyük bir



Şekil 1. Kaynak sırasında metal transferinin gerçekleştiği ilk çevrim (Zhou ve Lin, 2014)

öneme sahiptir (Yang vd., 2013, Cao vd., 2013, Zhou ve Lin, 2014). Bu kırılğan tabaka, farklı metallerin kaynağında nihai mekanik özelliklerini etkiler. Dolayısıyla en iyi kaynaklı birleştirme performansını elde edebilmek için ısı girdisinin düşük olması tercih sebebidir (Zhou ve Lin, 2014). Literatürde, yüksek kalitede alüminyum-çelik bağlantılarını elde edebilmek için katı hal ve ergitme kaynak teknikleri denenmiştir (Liu vd., 2015).

Springer vd. (2011) de benzer şekilde alüminyum ve düşük karbonlu çeliğin sürtünme karıştırma kaynağında karıştırıcı uç tarafından kopartılmış çelik parçacıklarını alüminyum ana malzemesi içerisinde gözlemlemişlerdir (Springer vd., 2011). Sürtünme karıştırma kaynağı, farklı metal çiftlerinin birleştirilmesinde düşük ısı girdisi sağlanmasından ötürü tercih edilen bir yöntemdir. Ancak birleştirilecek malzemelerin mekanik dayanımları arasındaki farkın büyük olması, karıştırıcı ucun kaynak işlemi boyunca aşınmaya

maruz kalması sürtünme karıştırma kaynağı ile üretilen kaynak dikişleri boyunca her noktada benzer özelliklerin sağlanması güçtür. Ayrıca sürtünme karıştırma kaynak yönteminin ekipman maliyeti, esnek bir üretim hattına sahip olmaması ve karıştırıcı ucun aşınması sebebiyle değişime ihtiyaç duyması, alternatif olarak mühendisleri düşük ısı girdisi sağlayabilecek ergitme kaynak yöntemlerini kullanmaya ve geliştirmeye sevk etmiştir.

Sierra vd. (2007), 6056-T4 ve 6016-T4 alüminyum alaşımları ile düşük karbonlu çeliği lazer kaynağı ile birleştirmişlerdir (Sierra vd., 2007). Al-Fe bindirme kaynağında kusursuz kaynak dikişleri, çeliğin alüminyum üzerinde olduğu durumda elde edilmiştir. Kaynak-alüminyum arayüzeyinin, kalınlıkları 5 ila 20 μm arasında değişen Fe_2Al_5 ve/ya da $FeAl_3$ fazlarından meydana geldiği görülmüştür. İrizalp vd. (2014), AA1050-galvanizli çelik sacın soğuk metal transferi kaynağı sonucunda oluşan

intermetalik tabakanın kalınlığı 5 µm altında bulunmuşlardır. Zhang vd. (2009), alüminyum ve çelik çiftini soğuk metal transferi ile birleştirmeyi başarmışlardır. Çalışmaları sonucunda çelik-alüminyum arayüzeyinde Fe₂Al₃ ve FeAl₃ intermetalik bileşiklerinden meydana gelen bir tabakanın oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Bu makalede AA6061 alüminyum alaşımı ve galvanizli çelik sacların soğuk metal transferi kaynağı sonucunda parçaların mekanik özellikleri ve oluşan intermetalikler araştırılmıştır.

Materyal ve Metod

2 mm kalınlığındaki AA6061 (Tablo 1) ve galvanizli çelik (EN 10143-DX 51D+Z) (Tablo 2), 1.2 mm çapında AlSi5 dolgu teli (Tablo 1) kullanılarak soğuk metal transfer kaynağı ile birleştirilmiştir (Şekil 2). AA6061 levha malzemenin oksit tabakası mekanik temizleme ile uzaklaştırılmış ve kaynak işlemi öncesinde yüzey aseton ile temizlenmiştir. Kaynak işlemi sırasında argon gazı (15 l/dak) ile kaynak banyosu korunmuştur. Kaynak parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Sacların soğuk metal transfer kaynağı işlemi.

Tablo 1. AA6061 alüminyum alaşımının ve AlSi5 kaynak telinin kimyasal bileşimi (%ağ.)

Element	Mg	Si	Cr	Cu	Fe	Zn	Mn	Ti	Al
AA6061	0.86	0.51	0.17	0.34	0.19	0.1	-	-	Kalan
AlSi5	-	5	-	<0.01	<0.3	<0.01	<0.01	<0.01	Kalan

Tablo 2. Galvanizli çelik sacın kimyasal bileşimi (%ağ.)

C	Mn	P	S	Si	Ti	Fe
0.051	0.216	0.018	0.013	0.014	0.001	Kalan

Tablo 3. Çalışmada kullanılan soğuk metal transferi kaynak parametreleri

Numune	Akım	Voltaj	İlerleme hızı (mm/dak)	Isı girdisi (J/mm)
(A)	88	12.5	500	118.80
(B)	114	14.2	700	124.88

Metalografik İncelemeler

Kaynakla birleştirilmiş saclardan hazırlanan numunelerin parlatma işlemleri yapıldıktan sonra dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı

sacların daha iyi incelenebilmesi için AA6061 Keller ve çelik Nital reaktifleri ile dağlanmıştır. Nikon LV150 optik mikroskop ve Clemex yazılımı, soğuk metal transferi kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kaynak bölgesinin

mikroyapı incelemesi ve intermetalik tabakaların kalınlığının ölçülmesi için kullanılmıştır.

Mekanik Testler

Kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerinin tespiti için çekme, sertlik ve nanoindentasyon testleri uygulanmıştır. Oda sıcaklığında Shimadzu Autograph (250 kN) gerilme test cihazında DIN EN 895 standardına göre çekme testi yapılmıştır.

Kaynak bölgesi Vickers mikrosertlik ölçümleri Future-Tech FM700 cihazı ile 100 g yük ve 10 s ile ölçülmüştür. Çok ince bir bölge olduğu düşünülen ısıdan etkilenen bölgenin tespiti için de bu test gerçekleştirilmiştir.

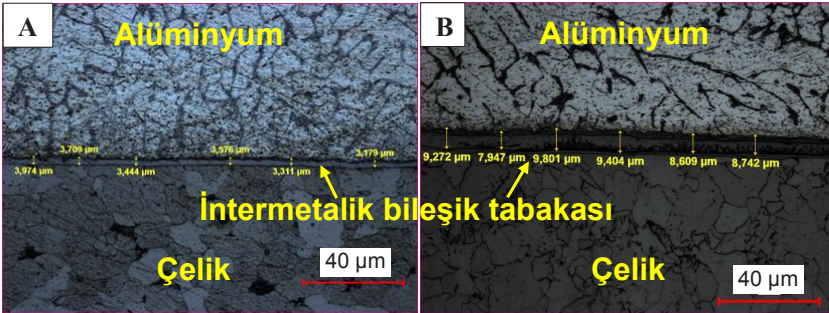
Al-Fe intermetalik fazlarının elastik modülünü ve sertliğini belirlemek amacıyla Berkovich indenterü ile 5 mN yük altında nanoindentasyon testi uygulanmıştır. Nanoindentasyon testleri, mikrosertlik testlerinde elde edilen izlerden daha küçük izlere yol açacak yükleri kullanan ve yapılan indentasyonun derinliğini ölçen sertlik ölçümleridir. Derinlik duyarlı bu aletlerde mikrosertlik testlerinde yapılan görsel

ölçümlerden ziyade, sertlik otomatik olarak rapor edilmektedir

Deneyisel sonuçlar Metalografik İnceleme

Soğuk metal transferi kaynağı ile farklı parametrelerde birleştirilen numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Şekil 3' te de görüldüğü gibi birleştirme bölgesinde ince bir intermetalik tabaka oluşmuştur. Bu tabakaların oluşumu ısı girdisi ile ilgilidir. İyi bir birleşmenin elde edilmesi açısından gereklidir. Fakat intermetalik oluşumunun $\sim 10 \mu\text{m}$ üzerinde olması birleştirimin kırılma hale gelmesine de sebep olabilmektedir (Cao vd., 2014). Clemex yazılımı ile incelemeler sonucunda intermetalik tabaka kalınlıkları A ve B numunelerinde sırasıyla $3.53 \pm 0.28 \mu\text{m}$ ve $8.96 \pm 0.66 \mu\text{m}$ olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla artan ısı girdisinin tabaka kalınlığını artırdığı görülmüştür.

Metalografik incelemeler sonucunda, ısı girdisinin artmasıyla B numunesinin kaynak metalinde ve çelik ana malzemesinde A numunesine göre tanelerin irileştiği gözlenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. A ve B numunelerinde birleşme bölgesinde oluşan intermetalik tabaka ve mikroyapısı.

SEM-EDX incelemelerinden A ve B numunelerinin birleşme bölgesinin analizi yapılmıştır (Tablo 4). Tablo 5' te oluşan intermetalik fazların Al-Fe faz diyagramına ve hesaplamalara göre oluşan bileşikleri ve mekanik

özellikleri verilmiştir. Isı girdisi farklı türde intermetaliklerin fazların oluşmasına neden olmuştur.

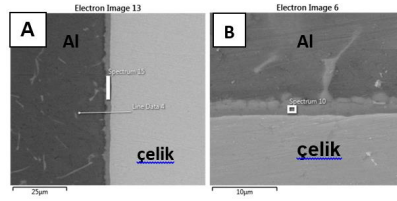
SEM incelemeleri sonucunda alüminyum-çelik kaynaklı parçalarında intermetalik tabakanın

alüminyum dolgu metaline doğru büyüdüğü tespit edilmiştir (Tablo 4). Al/Fe intermetalik bileşiklerinin alüminyum kaynak metaline doğru büyümesi difüzyon mekanizmaları, alüminyumun ve demirin difüzyon katsayıları ile açıklanmaktadır. Shao vd. (2015), demirin sıvı

alüminyum içerisindeki difüzyon katsayısının, alüminyumun katı haldeki demir içerisindeki difüzyon katsayısına kıyasla daha yüksek olması sebebiyle demir atomlarının sıvı alüminyuma kolayca yayılabileceğini bildirmişlerdir.

Tablo 4. İntermetalik tabakanın SEM-EDX analizi (ağırlıkça %)

Numune kodu	Al	Si	Fe	Zn
(A)	53.52	2.85	43.49	0.14
(B)	73.17	6.73	20.10	-



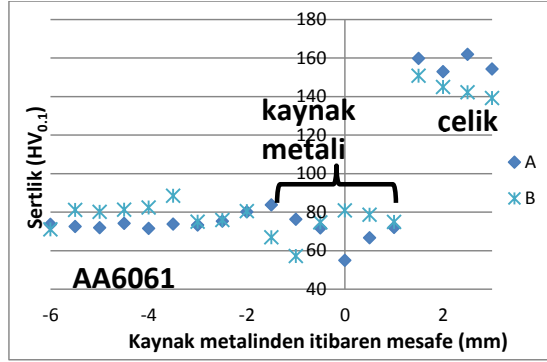
Tablo 5. Al/Çelik birleşme bölgesinde oluşan intermetalikler ve mekanik özellikleri

Numune kodu	Al-Fe ve Al-Fe-Si diyagramlarına göre oluşan fazlar	İntermetalik tabakanın mekanik özellikleri	
		Sertlik (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)
(A)	FeAl, FeAl ₃	27.76	173.13
(B)	FeAl ₃ , Al ₈ Fe ₂ Si	11.2	169.59

Mekanik Test Sonuçları

A ve B numunelerine uygulanan sertlik testi sonucunda elde edilen sertlik değerleri Şekil 4' de grafik olarak verilmiştir. B numunesinin çelik ana malzemesinde meydana gelen tane irileşmesi sebebiyle, bu bölgede sertliğin A numunesine göre daha düşük olduğu görülmüştür. Her iki

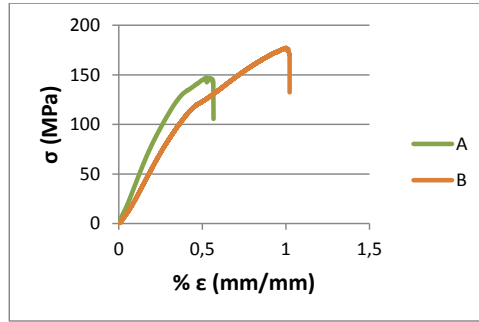
numunede de en düşük sertlik değerleri kaynak metalinde tespit edilmiştir. Elrefaey (2015), AA7075 (T6) alaşımından levhaları ER5356 kaynak teli kullanarak soğuk metal transferi kaynağı ile birleştirmiştir. Mikrosertlik ölçümleri sonucunda kaynak metalinde en düşük sertlik değerinin tespit edilmesini, bu bölgede daha az alaşım elementi bulunmasına, çökeltilerin eksikliğine ve tane büyümesine bağlamıştır.



Şekil 4. A ve B numunelerinin kaynak bölgesi sertlik dağılımı

A ve B numunelerine uygulanan çekme testi sonucunda elde edilen çekme eğrileri Şekil 5'te verilmiştir. Numunelerde, intermetalik tabakanın 10 µm altında olması ve çok az da olsa artan ısı girdisi ile maksimum çekme dayanımının ve şekil değiştirmenin arttığı tespit edilmiştir (Şekil 5). A numunesinde elastisite modülü daha yüksek FeAl₃ intermetalikliğinin oluşmasının da bu sonuca etkisi olduğu düşünülmektedir. Cao vd.

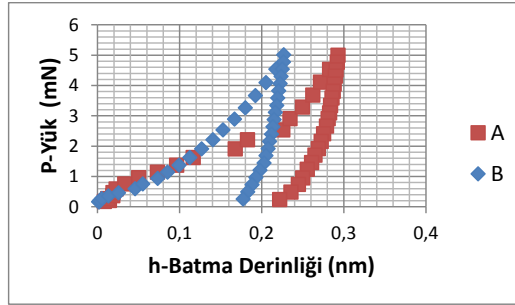
(2013), alüminyum ve galvanizli çelik sacı soğuk metal transferi kaynağı ile birleştirmişler ve çalışmaları sonucunda bağlantı dayanımının artan ısı girdisi ile artış gösterdiğini, ancak uygulanan ısının 200 J/mm²'yi aşması durumunda dayanımın düşüş gösterdiğini bildirmişlerdir. Bu çalışmada da ısı girdisi 200 J/mm²'nin altında hesaplanmıştır.



Şekil 5. A ve B numunelerinin çekme eğrileri

İntermetalik tabakanın mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla nanoindentasyon testi yapılmış ve P-h eğrileri elde edilmiştir. Şekil 6'da verilen P-h eğrilerinden ve Tablo 5'te verilen değerlerden A numunesinin intermetalik tabakasının B numunesine göre mekanik özelliklerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. B numunesinde silisyum içeriğinin A numunesine kıyasla daha yüksek olduğu EDX

analizleri ile tespit edilmiştir (Tablo 4). Song vd. (2009), kırılğan Al-Fe intermetalik bileşiklerinin yerine Si ilavesi ile daha az zararlı olan Al-Fe-Si bileşikleri oluşturulabileceğini bildirmişlerdir. Dolayısıyla B numunesinde oluşan Al₈Fe₂Si fazının intermetalik tabakanın kırılğanlığını azalttığı nano indentasyon sonuçları ile ispatlanmıştır.



Şekil 6. Al/çelik arayüzünde oluşan A ve B numunelerindeki intermetalik faza ait P-h diyagramları

Sonuçlar

1. Kaynak sırasında oluşan ısı girdisinin Al/Çelik arasında oluşan intermetaliklerin çeşidi ve tabaka kalınlığı üzerinde etkili olduğu bulunmuştur.

2. B numunesinin çelik ana malzemesinde meydana gelen tane irileşmesi sebebiyle, bu bölgede sertlik A numunesine göre daha düşük tespit edilmiştir. Her iki numunede de en düşük sertlik değerleri kaynak metalinde tespit edilmiştir.

3. Kaynaklı numunelerin çekme dayanımı incelendiğinde ısı girdisinin artmasıyla maksimum çekme dayanımı ve birim uzama değerleri artmıştır (İntermetalik tabaka kalınlığı $10 \mu\text{m}$ ' nin altında olması şartıyla).

4. SEM-EDX analizleri sonucunda A numunesinde FeAl ve Al_3Fe , B numunesinde ise Al_3Fe ve $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ intermetaliklerinin oluşumuna rastlanmıştır. A numunesinde oluşan intermetalik tabakanın sertlik ve elastisite modülü B numunesine göre daha yüksek elde edilmiştir.

Sonuçta; Al-Çelik saclarının soğuk metal transferi kaynağı ile uygun kaynak parametreleri kullanılarak ve intermetalik tabaka kalınlığı kontrollü oluşturularak başarılı bir şekilde birleştirilebilecek, soğuk metal transfer kaynağı diğer ark kaynak yöntemleri ile kıyaslandığında parçaların daha fazla ısınarak bağlantının mekanik özelliklerini kötü etkilemesi önenebilecektir.

Teşekkür

Yazarlar, bu makale çalışmasının oluşması için 1002 Hızlı destek programındaki 215M623 numaralı proje desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

Kaynaklar

Bouche, K., Barbier, F., Coulet, A., 1998. Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium, *Materials Science and Engineering A*, **249**, 167-175.

Cao, R., Yu, G., Chen, J.H., Wang, P.C., 2013. Cold metal transfer joining aluminum alloys-to-galvanized mild steel, *Journal of Materials Processing Technology*, **213**, 1753-1763.

Cao, R., Sun, J. H., Chen, J. H., Wang, P. C., 2014. Weldability of CMT Joining of AA6061-T6 to Boron Steels with Various Coatings, *Welding Journal*, **93**, 193-204.

Feng, J., Zhang, H., He, P., 2009. The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding, *Materials & Design*, **30**, 1850-1852.

Furukawa, K. 2006. New CMT arc welding process – welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets, *Welding International*, **20(6)**, 440-445.

Hussein, S. A., Tahir, A. S. M., Hadzley, A. B. 2015. Characteristics of aluminum-to-steel joint made by friction stir welding: A review, *Materials Today Communications*, **5**, 32-49.

İrizalp, A.O., Durmuş, H., Yüksel, N., Türkmen, İ., Uzun, R.O., 2014. Mechanical Properties of

- Dissimilar and Similar Cold Metal Transfer Welded Galvanized Steel 1314 and Aluminium AA1050”, *MP Materials Testing*, **56(10)**, 874-878.
- Kah, P., Suoranta, R., Martikainen, J., 2012. Advanced gas metal arc welding processes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **67(1-4)**, 655–674.
- Kang, M., & Kim, C. (2015). Joining Al 5052 alloy to aluminumized steel sheet using cold metal transfer process. *Materials & Design*, **81**, 95-103.
- Liu J. , Jiang S. , Shi Y. , Kuang Y. , Huang G., Zhang H. , 2015. Laser fusion – brazing of aluminum alloy to galvanized steel with pure Al filler powder, *Opt Laser Technol*, **66**, 1–8.
- Rajeev, G.P., Kamaraj, M., Bakshi, S.R., 2014. Al-Si-Mn Alloy Coating on Aluminum Substrate Using Cold Metal Transfer (CMT) Welding Technique, *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, **66(6)**, 1061-1067.
- Rykała, J., Pfeifer, T., 2013. Robotised CMT welding of 6xxx series aluminium alloys, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, **6**, 5-11,
- Shahverdi, H. R., Ghomashchi, M. R., Shabestari, S., Hejazi, J. 2002. Microstructural analysis of interfacial reaction between molten aluminium and solid iron, *Journal of Materials Processing Technology*, **124**, 345-352.
- Sierra, G., Peyre, P., Deschaux-Beaume, F., Stuart, D., Fras, G., 2007. Steel to aluminium key-hole laser welding, *Materials Science and Engineering: A*, **447 (1-2)**, 197–208.
- Song, J. L., Lin, S. B., Yang, C. L., Fan C. L., 2009. Effects of Si additions on intermetallic compound layer of aluminum–steel TIG welding–brazing joint, *J Alloy Compd*, **488**, , 217–222.
- Springer, H., Kostka, A., Santos, J. F., Raabe, D., 2011. Influence of intermetallic phases and Kirkendall-porosity on the mechanical properties of joints between steel and aluminium alloys, *Materials Science and Engineering A*, **528**, 4630–4642.
- Torkamany, M.J., Tahamtan, S., Sabbaghzadeh, J., 2010. Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminum alloy by Nd:YAG pulsed laser, *Materials & Design*, **31 (1)**, 458–465.
- Ünel, E., Taban, E., 2017. Properties and optimization of dissimilar aluminum steel CMT welds, *Weld World*, 61:1–9.
- Yang, S., Zhang, J., Lian, J., Lei, Y., 2013. Welding of aluminum alloy to zinc coated steel by cold metal transfer, *Materials & Design*, **49**, 602–612.
- Zhang, H. T., Feng, J. C., He, P., Zhang, B. B., Chen, J. M., Wang, L., 2009. The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel, *Materials Science and Engineering A*, **499**, 111–113.
- Zhou, Y., Lin, Q., 2014. Wetting of galvanized steel by Al 4043 alloys in the first cycle of CMT process”, *Journal of Alloys and Compounds*, **589**, 307–313.
- Acikarsiv.ankara.edu.tr/browse/27833/Tez.pdf(10.01.2017)

Characterization of AA6061-Galvanized Steel Sheets Joined by Cold Metal Transfer Welding

Extended abstract

Aluminum alloys are materials providing lightness in aviation, shipbuilding, railways and automobiles. Aluminum alloys, which are widely used in automotive industry, are expensive compared to steel, also brought about economic concerns. As a result, hybrid structures made of thin sheet materials, which aluminum can be used with steel, have been an economic solution providing lightness. Therefore, joining of steel with aluminum has become inevitable. Traditional gas welding methods; Thin parts have not been successful due to excessive heat input at the welded joints of different metal alloys such as high strength aluminum alloys and Fe/Al, which have been subjected to precipitation hardening. Excessive heat input causes problems such as deterioration of the mechanical properties of the weld zone, sensitivity to hot cracking, pore formation in the weld metal, and burning and collision, especially in thin sheets. According to the Fe-Al phase diagram, aluminum having a low melting point, Fe, Al solid solutions when contacted with molten steel, and ferric-rich Fe_3Al , $FeAl$ and aluminum rich $FeAl_2$, Fe_2Al_3 , $FeAl_3$ and $Fe_{23}Al_{12}$ intermetallic compounds, making it impossible to combine them with conventional gas welding method.

In recent years, research and development efforts of welding equipment manufacturers have led to the emergence of cold metal transfer welding, a new type of low-energy welding thought to be the solution to the joining of thin materials and metal alloys with limited weldability. Cold metal transfer welding which is characterized with low heat input and spatter-free weld, is recommended for joining dissimilar materials. Cold metal transfer welding is a short-circuiting metal transfer. The droplet detachment is assisted by a backward movement of the wire. The wire feeder gives the wire a back-drawing force when the liquid droplet on the wire tip contacts the weld pool; meanwhile, the shorting-circuiting current is reduced to a very low level. Then, the droplet transfers into the weld pool without liquid bridge fracture which happens in conventional arc welding. It indicates that cold metal transfer not only reduces the heat input but also keeps free of spatters

because it does not need a high current to fracture the liquid bridge.

In this study, overlap welding of AA6061 and galvanized steel sheets was carried out by cold metal transfer method using AlSi5 filler wire. The effect of heat input on mechanical properties and the formation of intermetallic compound (IMC) layer between steel and aluminum were investigated. Mechanical properties of the joints were determined by tensile and hardness tests and also applying nano indentation to intermetallic layer. In order to determine the elastic modulus and hardness of Al-Fe intermetallic phases, a nanoindentation test was applied under a load of 5 mN with Berkovich indenter. Then nanoindentation test was performed and P-h curves were obtained. It has been determined that the intermetallic layer of sample A has higher mechanical properties than sample B. The EDX analysis was found to be higher for silicon B than for sample A. The Al_8Fe_2Si phase formed in B sample is proved by the results of nano indentation which reduces the intermetallic layer's brittleness. It has been found that the heat input formed during welding acts on the type and thickness of the intermetallic formed between Al / Steel.

The hardness of this region is lower than that of sample A because of grain refinement in the steel main material of B sample. In both cases, the lowest hardness values were determined on the weld metal. When the tensile strength of the welded samples is examined, the maximum tensile strength and the unit elongation values are increased by increasing the heat input (provided that thickness of the intermetallic is less than 10 μm). SEM-EDX analysis revealed the formation of $FeAl$ and Al_3Fe in sample A, and Al_3Fe and Al_8Fe_2Si intermetallics in sample B. The hardness and modulus of elasticity of the intermetallic layer formed at A were higher than the B sample.

As a result; by cold metal transfer welding, It can be successfully combined with Al-Steel sheets by using appropriate welding parameters and intermetallic layer thickness control, can prevent the parts from heating up more adversely affecting the mechanical properties of the joints compared to other arc welding methods.

Keywords: AA 6061, Galvanized Steel, Cold Metal Transfer Welding, Intermetallic.