

En Aw 6063 Alüminyum Alaşımı Boruların Plakalara Dıştan Bir Takım Yardımıyla Sürtünme Kaynağı Yapılabilirliğinin İncelenmesi

Cemal MERAN^{*1}, Emre KORKMAZ¹, Elif AYKANAT¹, Selin DEĞİRMENCİ¹

¹*Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 20160, Denizli*

Geliş tarihi: 23.12.2015

Kabul tarihi: 30.03.2016

Özet

Eşanjör ve ekonomizerlerde sıklıkla rastladığımız boru-plaka kaynak bağlantılarında kullanılan geleneksel kaynak yöntemlerine alternatif olabilecek olan bu çalışmada AlMg0,7Si (EN AW 6063) alüminyum alaşımı malzemeden üretilen boruların yine aynı malzemeden üretilen plakalara dışarıdan bir takım yardımıyla sürtünme kaynağı yapılabilirliği incelenmiştir. Çalışma esnasında 5x50x70 mm boyutlarındaki AlMg0,7Si malzemeden plakalara önce Ø20,5, Ø21, Ø21,5, Ø22 mm ölçülerinde delikler açılmıştır. Plakalara 2 mm et kalınlığında, 20 mm çapında ve sırasıyla 45,5, 46, 46,5, 47 mm olmak üzere 4 farklı uzunluktaki borular 950 min⁻¹ devir sayısında dışarıdan bir takım yardımıyla sürtünme kaynağı (DTYSK) ile birleştirilmiştir. Deneyler sırasında takım omzu ve boru arasındaki baskı yükleri sabit tutularak her bir parametre için kaynak esnasında ulaşılan deney sıcaklıkları tespit edilmiştir. Kaynaklı bağlantıların özel olarak hazırlanan fiyestür yardımıyla kesme deneyleri yapılmıştır. Kaynaklı bağlantı kesme mukavemetleri deney parametrelerine bağlı olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 6063, AlMgSi, DTYSK, Sürtünme kaynağı, Sürtünme karıştırma kaynağı

Investigation of Friction Weldability of En Aw 6063 Aluminium Alloy Tube to Tube Plate Using an External Tool

Abstract

The traditional welding methods are commonly used tube to tube plate of heat exchangers and economiser. In this study it was investigated that application of an alternative welding method which called friction welding of tube to tube plate by using an external tool was used joining of AlMg0,7Si (EN AW 6063) aluminium alloy. The AlMg0,7Si plates with dimensions 5x50x70 mm were drilled Ø20,5, Ø21, Ø21,5, Ø22 mm. The four different sizes AlMg0,7Si tubes with dimensions 2 mm wall thickness, 20 mm outer diameter, respectively 45,5, 46, 46,5, and 47 mm length friction welded to plate using an external tool (FWTPET) at constant 900 min⁻¹ tool rotational speed. The vertical force between tool shoulder and tube was constant during the welding, and temperature was measured at every different welding parameters. The shear test was done for determining for welded joints using special fixture. Shear strength of welded joints were determined depend on welding parameters

Keywords: 6063, AlMgSi, FWTPET, Friction welding, Friction stir welding

* Sorumlu yazar (Corresponding author) : Cemal MERAN, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Denizli.
cmeran@pau.edu.tr

1. GİRİŞ

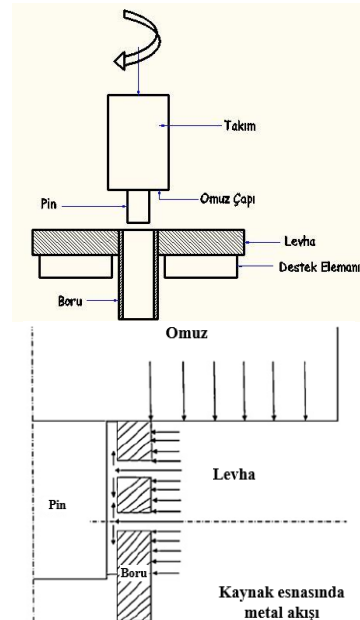
Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) günümüzden yaklaşık 15 yıl önce İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde (TWI) geliştirilen ve halen üzerinde oldukça fazla araştırma yapılan bir katı hal kaynak yöntemidir. Geleneksel ergitmeli kaynak yöntemleriyle kaynağı güç olan özellikle yaşlanma sertleşmesine tabi tutulmuş alüminyum alaşımlarının kaynağında başarı ile kullanılmaktadır [1]. Bu yöntem kısa kaynak süresi, minimum yüzey hazırlama ve otomasyon kolaylığı gibi kendine özgü avantajlarından dolayı uygun bir alternatif kaynak olarak günümüzde kullanılmaktadır [2]. Bu yöntemden bazı alüminyum alaşımlarının yanı sıra bakır alaşımlarının, titanyum alaşımlarının ve bazı tür çeliklerin birleştirilmesinde yararlanılmaktadır [3]. Birleştirilecek parçalar alın altına arada boşluk kalmayacak şekilde sabitlendikten sonra parça hareketi ile veya takımın dönme ve ilerleme hareketi ile kaynak yapılabilir [4].

Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan omuz ve karıştırıcı uçtan (pim) oluşan tükenmeyen takım, iş parçalarının birleştirme bölgesinden daldırılır ve birleşme çizgisi boyunca dönerek ilerletilir. Takımın iki ana görevi vardır: (a) iş parçasının ısıtılması, (b) kaynaklı birleşmenin oluşması için malzeme akışı [5]. Pim, malzemelere temas ettiğinde sürtünme kaynağında ki duruma benzer bir durum oluşarak temas noktasında ısı sürtünmenin de etkisi ile artarak malzemenin plastik şekil değişimine sebep olur. Bu malzemelerin akışına olanak sağlar. Karıştırıcı uçtan omuza kadar olan bölgedeki sürtünme ısısı, karıştırıcı çevresi ile malzeme üst yüzeyi ve omuzun temas yüzeyi arasında yumuşamış (hamurlaşma) bir metal oluşturur ve bu malzeme pimin ucundan arkaya doğru karıştırılır. Karıştırılan malzeme, hidrostatik basınç yardımı ile soğuyarak katılaştır ve birleşme sağlanır [3].

Sürtünme kaynağında ise birleştirme ergimeye bağlı olmadan birleştirilecek parçaların ara yüzeylerinde meydana gelir. Sürtünme kaynağı esnasında malzeme ara yüzeyleri düşük yük altında temas haline getirilir ve deformasyon işlemi

sağlanır. Daha sonra uygulanan yükler artırılarak kaynaklanacak parçaların ara yüzeyleri boyunca sürtünme ısısı oluşumu sağlanır. Bu aşamadan sonra sürtünme ısısı üretimi sona erer ve kaynaklanacak parçaların ara yüzeylerinin her iki tarafında ısınan malzemeye uygulanan gerilme yavaşça artırılır ve kaynaklı birleşme sağlanır. İşlem sonrası birleşme bölgesinde oluşan metal yığılması torna ile alınarak düzensizlik giderilir [6].

Dıştan bir takım yardımıyla sürtünme kaynağı (DTYSK) ise yukarıda açıklanan sürtünme ve sürtünme karıştırma kaynaklarının bir nevi karışımından oluşmaktadır. Bu yöntemde sürtünme karıştırma kaynağına benzer şekilde omuz ve uçtan oluşan bir takım boru yüzeyine farklı baskı yükleri ve devirlerde sürtünerek boruda sürtünme sebebiyle yumuşama sağlamaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağından farklı olarak ise takım ucun yani pin karıştırma işlemi yapmamakta, boru içinde boşta dönmekte ve takıma ya da iş parçasına ilerleme hareketi verilmemektedir (Şekil 1). İşlem öncesi plaka üzerine boru çapından çok az büyüklükte bir delik açılır. Devamında boru plaka yüzeyinden hafif çıkıntı yapacak şekilde elle montajı yapılır.



Şekil 1. DTYSK Mekanizması ve kaynak esnasındaki metal akışı [7, 26]

Devamında boru iç çapından daha küçük çapa sahip uca sahip (sadece yataklama amaçlı) takım boru içine daldırılır ve omuzlardan boru yüzeyine sürtünerek çıkıntı boru kısmını sürtünme ısısı yardımıyla hamurlaştırır. Hamurlaşan metal takım omzunun aşağı yönlü baskı yüküyle boru ile plaka çapları arasındaki boşluklu kısımdan aşağı doğru akmaya başlar ve kaynak işlemi gerçekleştirilir.

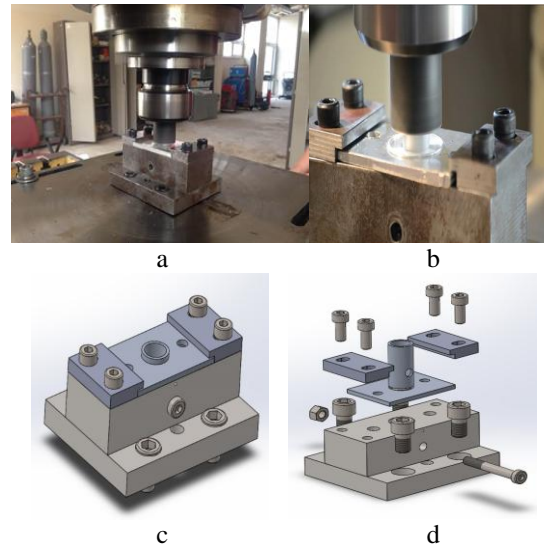
DTYSK'da kaynak kalitesine etki eden parametreler takımın devir sayısı, takımın baskı kuvveti, boru ile takım arasındaki boşluk, boru uzunluğu (boru ucunun plakadan taşma miktarı), uygulanma süresi, omuz çapı ve sıcaklık olarak sıralanabilir. Bu parametreler arasında kaynaklanabilirlik üzerinde en etkili iki parametre takım devir sayısı ve baskı kuvvetidir. Bu değişkenliklerin her ikisi de kaynak esnasında sürtünme esaslı sıcaklığı doğrudan etkilemekte ve kaynak bölgesinin metalurjik özelliklerinin değişmesine yol açmaktadır. Dıştan bir takım yardımıyla boruların plakalara sürtünme kaynağı üzerine ülkemizde bu bildirinin sahiplerine ait bir adet çalışmadan başka herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır [10]. Uluslararası alanda ise bu çalışmaları ilk defa yapan S. Muthukumaran'a ait çalışmalara rastlanmıştır [11-25].

2. MALZEME VE YÖNTEM

Deneyler için kullanılan boru ve plaka malzemesi kimyasal bileşimi Çizelge 1'de, mekanik özellikleri ise Çizelge 2'de verilen EN AW 6063-T5 (AlMg0,7Si) alüminyum alaşımıdır. Plaka boruya dıştan bir takım yardımıyla sürtünme kaynağı (DTYSK) yöntemiyle kaynak edilmiştir. DTYSK deneylerinde dik başlı freze, sıcaklık ölçme sistemi, yük ölçer, sürtünme için takım ve deney numunesi bağlama aparatları kullanılmıştır. DTYSK deneylerinde Şekil 2'de görülen dik başlı freze tezgahı ve tutturma tertibatı kullanılmıştır.

Kaynak edilecek plakalar 5x50x70 mm boyutlarında kesilmiştir. Plaka üzerine \varnothing 20,5-22 mm çapında delikler açılmış ve \varnothing 20 mm çapında 2 mm et kalınlığında 4 farklı boyda (45,5, 46, 46,5 ve 47 mm) boru, delik içerisine arada 0,25-1 mm arasında boşluk kalacak şekilde yerleştirilerek

kaynak edilmeye çalışılmıştır (Şekil 3). Borunun plaka ile birleşeceği kısma yumuşayan metalin akıp doldurmasıyla bağlantısının daha iyi oluşması için boru ucundan 3 mm aşağıda merkezi olacak şekilde çepre çevre 3'er mm çapında 8 adet delik açılmıştır. 45,5 mm boyunda alınan borunun levha yüzeyinden taşma miktarı 0,5 mm iken 47 mm boyunda alınan boruda ise bu değer 2 mm olmaktadır.



Şekil 2. Deney düzeneği; freze (a, b), numune tutturma aparatı (c), numuneleri tutturma tertibatı patlatılmış görünüm (d)

Çizelge 1. EN AW 6063 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (%) - EN 573-3 [7]

	Si	Mg	Fe Maks.	Cr Maks.	Cu Maks.	Zn Maks.	Mn	Ti Maks.	Diğ.
EN AW 6063	0,2 0,6	0,45 0,90	0,35	0,10	0,10	0,10	0,1	0,10	Her biri maks. % 0,05. Toplam maks. % 0,15

DTYSK çalışmalarında Şekil 4'de boyutları verilen X210Cr12 (1,2080) soğuk iş takım çeliğinden tek bir takım kullanılmıştır. Kaynaklı bağlantıların deney için üretilen özel bir aparat içine yerleştirilerek kesme dayanımları tespit edilmiştir. Yapılan tertibatla kaynaklı bağlantının

kaynak dikişinden kopması sağlanarak kesme dayanımı değerleri tespit edilmiştir.

Çizelge 2. EN AW 6063 Alüminyum Alaşımının Farklı Temperleme İşlemlerindeki Mekanik Özellikleri - TS EN 755-2:2010 [7,8,9]

	Temper Şekli*	R _m (MPa)	R _{p0,2}	A (%)	HBW En az	Kesme Dayanımı, R _{mk} (MPa)
EN AW 6063	O, H111	130	-	18	25	0,52R _m = 0,52x175= 90 ^[8] 56 ^[9]
	T4	130	65	14	50	
	T5	175	130	8	65	
	T6	215	170	10	75	
	T64	180	120	12	65	
	T66	245	200	10	80	

* Temper şekilleri açıklamalar;

O: Sıcak şekillendirme işlemlerinden sonra gerekli tavlama özelliklerine ulaşan tavllanmış mamuller O temper olarak gösterilir.

H111: Germe veya doğrultma gibi daha sonraki işlemler sırasında tavllanmış ve hafifçe gerinme sertleşmesine (H11'den az) uğramış.

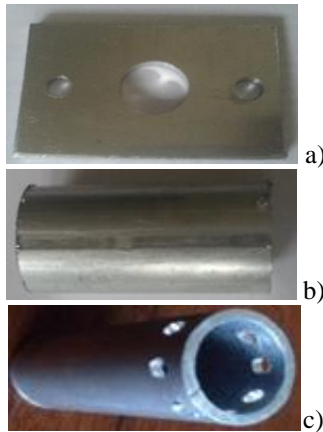
T4: Katı çözelti ısıtılması görmüş ve doğal yaşlandırılmış.

T5: Yüksek sıcaklıktaki bir şekillendirme işleminden soğutulmuş, sonra yapay yaşlandırılmış.

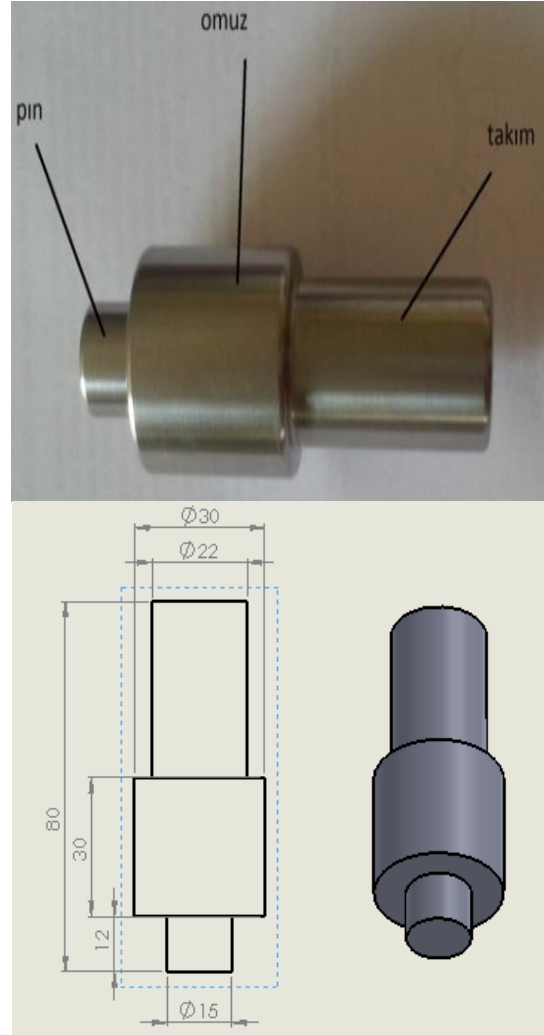
T6: Katı çözelti ısıtılması görmüş ve yapay yaşlandırılmış.

T64: Katı çözelti ısıtılması görmüş ve sonra da şekillendirilebilir özelliğini iyileştirmek için eksik yaşlandırma şartlarında (T6 ile T61 arasında) yapay yaşlandırılmış.

T66: Katı çözelti ısıtılması görmüş ve yapay yaşlandırılmış – Mekanik özellik seviyesine özel proses kontrolüyle ulaşılan T6'dan daha yüksek (6000 serisi alaşımlar).



Şekil 3. Deneylerde kullanılan 5x50x70 mm ebatlarındaki levha (a) ve Ø20 çapındaki boru delik açılmadan önce (b) ve sonrası (c)



Şekil 4. DTYSK esnasında kullanılan takım

3. DENEYLER VE SONUÇLAR

Deneylerde bir boru plakaya DTYSK yöntemiyle birleştirilmiştir. Bu çalışmada çalışılan deney parametreleri Çizelge 3'de verilmiştir. 16 farklı parametrede yapılan deneysel çalışmalar esnasında takım dönme devri 950 min⁻¹ olarak sabit tutulmuştur.

Deneyler esnasında takım omzu tarafından boruya uygulanan dikey yük 1,4-2,3 kN arasında ve oluşan sıcaklık ise ortalama 410-660 °C arasında ölçülmüştür. Ölçümler kaynaklanan boru

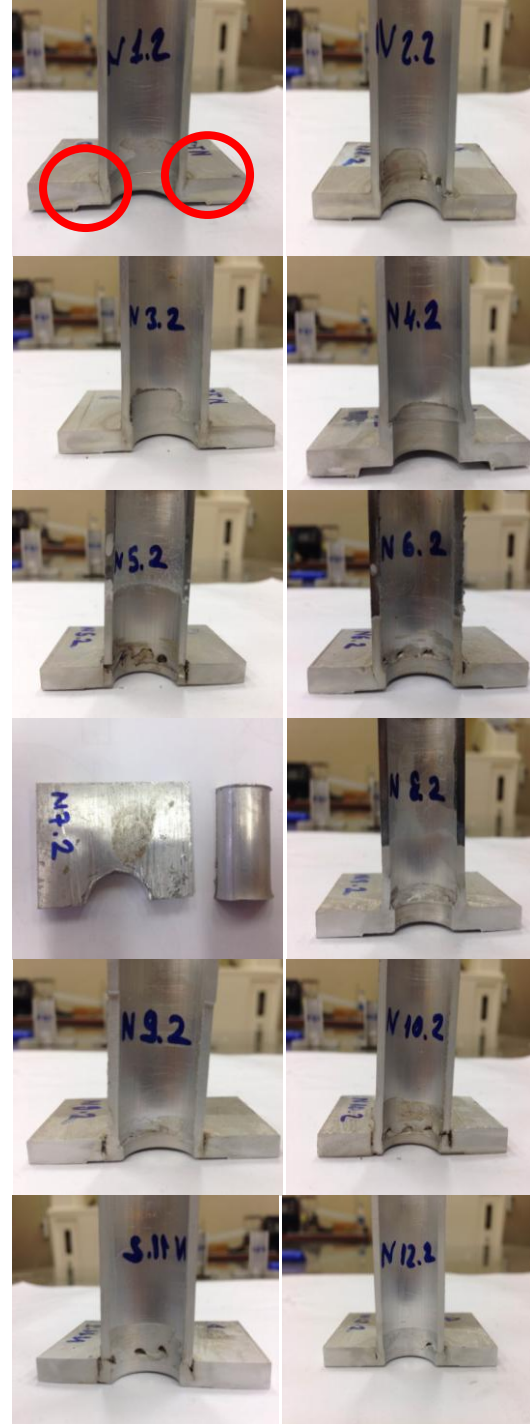
yüzeyinin en sıcak olacağı öngörülen bölgeden Testo kızılötesi sıcaklık ölçüm cihazı ile yapılmıştır.

Çizelge 3. Deney parametreleri ve kesme deneyi sonuçları

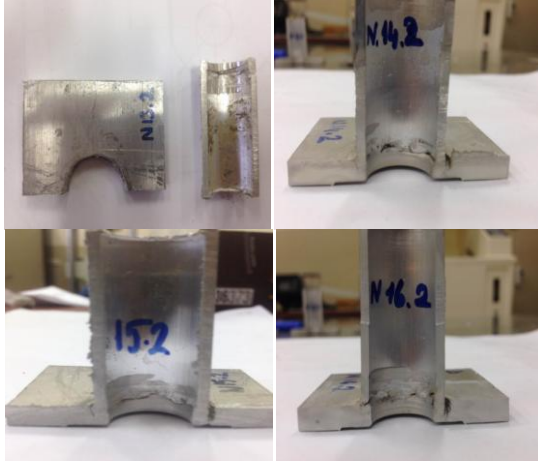
	Takım Dönme Devri (rpm)	Boru Uzunluğu (mm)	Plaka Yüzeyinden Taşma Miktarı (mm)	Plaka Üzerine Açılan Delik Çapı (mm)	Boru Dış Çapı ile Plaka Deligi Arası Fark (mm)	Sıcaklık (°C)	Yük (kN)	Kesme Dayanımı, R_{maks} (MPa)
N1	950	45,5	0,5	20,5	0,25	550	2,3	53
N2	950	46	1	20,5	0,25	500	2	33
N3	950	46,5	1,5	20,5	0,25	550	2	40
N4	950	47	2	20,5	0,25	550	2	44
N5	950	45,5	0,5	21	0,5	410	1,8	22
N6	950	46	1	21	0,5	600	2	35
N7	950	46,5	1,5	21	0,5	550	1,6	10
N8	950	47	2	21	0,5	650	1,7	2
N9	950	45,5	0,5	21,5	0,75	550	1,5	36
N10	950	46	1	21,5	0,75	500	1,5	5
N11	950	46,5	1,5	21,5	0,75	550	1,5	10
N12	950	47	2	21,5	0,75	650	1,7	35
N13	950	45,5	0,5	22	1	550	1,5	4
N14	950	46	1	22	1	600	2	37
N15	950	46,5	1,5	22	1	660	1,4	5
N16	950	47	2	22	1	600	2,2	17

Her bir kaynak parametresinde 3 adet kaynak yapılmıştır. Bunlardan biri dikey olarak kesilerek, kaynaklı bölge görünür hale getirmek için dağlanmıştır. Şekil 5’de görüleceği üzere bazı kaynak parametrelerinde kaynaklı birleştirmenin gerçekleşmediği makroskobik kesitte net olarak görülmektedir. Bu bağlantıların kesme dayanımları da diğerlerine göre çok düşük çıkmıştır (N7, N8, N10, N13, N15).

Kaynaklı bağlantıların kesme dayanımlarını ölçmek için özel bir aparat kullanılarak bir pin yardımıyla boru plakadan ayrılmıştır (Şekil 6). Boru plaka ara yüzey kesme dayanımları Çizelge 3’de verilmiştir.



Şekil 5. DTYSK bağlantıların görünüşleri



Şekil 5. DTYSK bağlantıların görünüşleri (devamı)

Kesme dayanımları ve makroskobik açıdan değerlendirildiğinde en iyi kaynaklı birleştirme N1, N3, N4 kodlu kaynak parametrelerinde elde edilmiştir. Borunun çapı ile takımın pin arasındaki boşluk ne kadar yakın olursa o kadar daha iyi sonuçlar vermektedir.

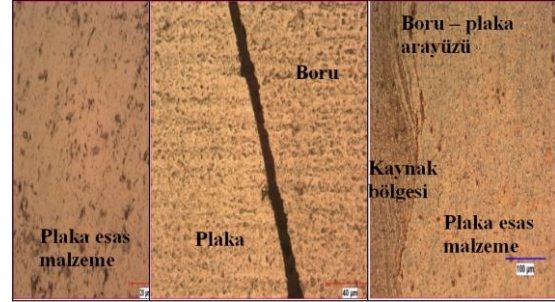


Kesme pimi Aparat Deney sonrası ayrılmış boru - plaka

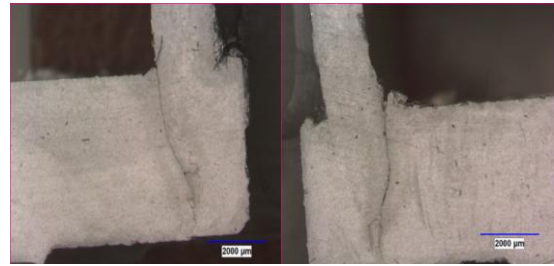
Şekil 6. DTYSK bağlantıların kesme deneyinde kullanılan aparat ve deney sonrası

Literatürde alüminyum ve alaşımlarının kesme dayanımlarına bakıldığında 6063-T5 için 56-90 MPa arasında değerlerle karşılaşılmaktadır [8-9]. Yapılan deneysel çalışmalarda 53 MPa kesme dayanımına sahip boru plaka bağlantıları tespit edilmiştir. Buradan sonuçların tatmin edici olduğu söylenebilir. Borunun çapı ile takımın pin arasındaki boşluk ne kadar yakın olursa o kadar daha iyi sonuçlar vermektedir. Metalografik içyapı incelendiğinde gerek kaynak bölgesinde gerekse dışında daha önce oluşmuş olan katı çökeltilerin

varlığını sürdürdüğü görülmektedir (Şekil 7). Yani kaynak esnasında ulaşılan sıcaklıklar bu katı çökeltilerin bozulmasına neden olmamıştır.



Şekil 7. DTYSK boru-plaka bağlantılarının iç yapı görünüşleri



Şekil 8. DTYSK yapılmış boru-plaka ara yüzünde birleşme eksikliği

Bu durumda bazı kaynaklı bağlantıların mukavemetinin istenilenden düşük çıkmasının sebebi yeterli birleştirme sağlanamaması olarak açıklanabilir. Düşük dayanımlı boru-plaka birleştirme ara yüzüne dikkatli bakıldığında dayanımın düşmesine neden olan nüfuziyet eksikliklerinin, çatlakların olduğu, boru-plaka üst birleşim yerinin perçinlemeye benzer kapandığı görülmektedir (Şekil 8). Ancak bu bağlantılar dahi çok yüksek dayanım gerektirmeyen, sızdırmazlık gereken yerlerde yeterli gelebilir.

4. TARTIŞMALAR

Boruların plakalara dışarıdan bir takım yardımıyla sürtünme kaynağı üzerine yapılan bu çalışma yöntemi ülkemizde uygulanan ikinci çalışma olma özelliği taşımaktadır. Çalışmalarda bazı geliştirilmesi gereken noktaların bulunduğu görülmüştür. Özellikle çalışmalar esnasında

uygulanan dikey yükü sabit tutan bir sistem, gerçekleştirilecek birleştirmelerin daha istikrarlı ve tekrar edilebilir olmasını sağlayacaktır. Ayrıca birleştirme esnasında erişilen sıcaklık mertebesinin farklı noktalardan daha hassas olarak ölçülmesi malzemelerde ortaya çıkacak olan yaşlanma etkisinin yorumlanmasını kolaylaştıracaktır.

Deneylerde literatürde yapılan bir çalışmaya dayanılarak [14] borular üzerine 3 mm çapında 8 adet delik açılmış ve ön deneyler yapılmıştır. Delik açılan borularda tatmin edici sonuçlar alındığından çalışmalarda bu şekilde devam edilmiştir. Aynı çalışma üzerine delik açılmadan da tekrarlanabilir. Bununla beraber yapılan çalışmalarda dışarıdan bir takım yardımıyla boruların plakalara sürtünme kaynağı ile birleştirilebileceği görülmüştür. Elde edilen dayanım sonuçları da memnun edici sınırlar içindedir. Kaynak işleminin kolay uygulanabilir olması sebebiyle alüminyum ve alaşımları ile başlayan çalışmaların hızla çeliklere doğru yönlendirilmesi özellikle kazan, eşanjör vb. ürünler imal eden firmalar açısından önem teşkil edecektir.

Bununla birlikte farklı baskı kuvvetlerinde, takım omuz çapı ve profilinin etkileri de yine çalışılabilir parametreler arasında düşünülmektedir. Elbette ki çalışılabilir diğer bir parametre ise bu yöntemin diğer malzemelere uygulanabilirliğidir.

Sonuç itibarıyla yapılan çalışma göstermiştir ki boruların plakalara dışarıdan bir takımla birleştirilebilirliği üzerine kullanılan borunun plaka yüzeyinden taşma miktarı, boru dış çapı ile levha deliği arasında kalan boşluk kaynaklı bağlantı mukavemetini etkileyen önemli bir parametredir.

5. TEŞEKKÜR

Yazarlar metalografik iç yapı inceleme esnasındaki yardımlarından dolayı Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümünden Araş.Gör. Ali Tekin Güner'e teşekkür ederler.

6. KAYNAKLAR

1. Çam, G., 2002. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulamaları, 9. Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 8-10 Mayıs 2002, Pamukkale Üniversitesi, 450-458, Denizli.
2. Çam, G., 2003. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlardaki Geliştirmeler, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve Sergisi, 47-62, Kocaeli.
3. Şık, A. ve Kayabaş, Ö., 2003. Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Yapılan Alüminyum Kaynağında Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniv. Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fak. Der., 11, 30-43.
4. <http://bilginform.com/surtunme-karistirma-kaynagi.html>
5. Mishra, R. S. and Ma, Z. Y., 2005. Friction Stir Welding and Processing, Materials Science and Engineering R 50, 1-78.
6. Kang C.Y., North T.H., Perovic D.D., 1996. Microstructural Features Of Friction Welded MA 956 Superalloy Material” Metall. And Mater. Trans. A, V26A, 4019-4029.
7. Yüksel, M., Meran, C., 2013. Malzeme Bilgisine Giriş, Malzeme Bilimleri Serisi -Cilt 2, MMO yayını, yayın No: MMO/545/2, Ankara, 568.
8. Can, A.Ç., 2015. Makine Elemanları, Boy Yayınları, sy12, Denizli.
9. Yelbey, İ., 2002. Yelbey B., Kalıp Konstrüksiyonu ve Kalıp yapımı, 11.
10. Meran, C., Korkmaz, E., Küçükömeroğlu T., Aksoy, A., Kestel, M., Akder, İ., 2015. Boruların Plakalara Dışarıdan Bir Takımla Sürtünme Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi, IX. Ulusal Kaynak Teknolojileri Kongre ve Sergisi, Ankara, 471-480.
11. Muthukumaran, S., Athul, P., Venukumar, S., 2013. Friction Welding of Cu-Tube To Al-Tube Plate Using An External Tool By Threaded Tube Interference Method, Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding, 129-135.
12. Senthil Kumaran, S., Muthukumaran, S., Vinodh, S., 2011. Optimization of friction

- welding of tube to tube plate using an external tool by hybrid approach, *Journal of Alloys and Compounds* 509, 2758–2769.
13. Senthil Kumaran, S., Muthukumaran, S., Vinodh, S., 2010. Optimization of friction welding of tube to tube plate using an external tool, *Struct Multidisc Optim*, 42:449–457.
 14. Senthil Kumaran, S., Muthukumaran, S., Vinodh, S., 2011. Optimization of friction welding of tube-to-tube plate using an external tool by Taguchi method and genetic algorithm, *Int J Adv Manuf Technol*, 57:167–182.
 15. Muthukumaran, S., Senthil Kumaran, S., Saket Kumar, S., 2011. Friction welding of Cu-tube to Al-tube plate using an external tool, *Trans. IIM Vol. 64, Issue 3*, 255-260.
 16. Senthil Kumaran, S., Muthukumaran, S., and Chandrasekhar Reddy, C., 2013. Effect of Tube Preparations on Joint Strength in Friction Welding of Tube-to-Tube Plate Using an External Tool Process, *Experimental Techniques* 37,24–32.
 17. Senthil Kumaran, S., Muthukumaran, S., and Chandrasekhar Reddy, C., 2013. Suitability of Friction Welding of Tube to Tube Plate Using an External Tool Process for Different Tube Diameters—A Study, *Experimental Techniques* 37, 8–14.
 18. Kumar, C.V., Muthukumaran, S., Pradeep, A., Kumaran, S.S., 2011. Optimizational study of friction welding of steel tube to aluminum tube plate using an external tool process, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)*, Vol.6, No.2, 300-306.
 19. Balaji, G.K., Muthukumaran, S., Senthilkumaran, S., Pradeep, A., 2012. Optimization of Friction Welding of Tube-to-Tube Plate Using an External Tool with Filler Plate, *Journal of materials engineering and performance* 21 (7), 1199-1204.
 20. Senthil Kumaran S., Muthukumaran, S., 2014. Effect of projection on joint properties of friction welding of tube-to-tube plate using an external tool, *Int J Adv Manuf Technol*, 75:1723–1733.
 21. Senthil Kumarana, S., Muthukumarana, S., Venkateswarlua, D., Balajia, G.K. and Vinodhb, S., 2012. Eco-friendly aspects associated with friction welding of tube-to-tube plate using an external tool process, *International Journal of Sustainable Engineering*, Vol. 5, No. 2, 120–127.
 22. Senthil Kumaran, S., Muthukumaran, S., Vinodh, S., 2010. Taguchi method and genetic algorithm based optimization of FWTPET process parameters, *International Conference on Frontiers in Mechanical Engineering (FIME)*, v60.
 23. Muthukumaran, S., Kumar, C.V., Kumaran, S.S., Pradeep, A., 2012. Interfacial Microstructure and Strength of Friction Welding of Steel Tube to Aluminium Tube Plate using an External Tool, *Advanced Materials Research* 383, 877-881.
 24. Senthil Kumaran, S., Muthukumaran, S., 2014. Effect of projection on joint properties of friction welding of tube-to-tube plate using an external tool, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 75, Issue 9, pp 1723-1733.
 25. Muthukumaran, S., Pradeep, C., Vijaya Kumar, C., Senthil Kumaran, S., 2010. Mechanical and metallurgical properties of aluminium 6061 alloy tube to tube plate welded joints welded by friction welding using an external tool process, *International Welding Symposium*, 235-239.
 26. Aykanat, E., Değirmenci, S., 2016. AA6063 (AlMg0,7Si) Boruların Plakalara Dıştan Bir Takımla Sürtünme Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi, Lisans Tezi, PAÜ Müh. Fak. Makine Mühendisliği Bölümü, Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cemal Meran.