

## Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Farklı Tipteki Alüminyum Bağlantıların Tahribatlı ve Tahribatsız Muayenesi

Furkan SARSILMAZ<sup>1\*</sup>, Serkan ÖZEL<sup>2</sup>, İlhan CANDAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Cumhuriyet Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü / SİVAS

<sup>2</sup>Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü / ELAZIĞ

<sup>3</sup>Kalite Kontrol Bölümü, Emek Boru Makine A.Ş. - Sincan / ANKARA

Alınış Tarihi:23.07.2008, Kabul Tarihi:23.03.2009

**Abstract:**In this study, AA 5754 (AlMg3) and AA 5083 (AlMg4,5Mn0,7) aluminum plates having different chemical and mechanical properties were welded by using friction stir welding (FSW) process. In order to determine the effect of different rotational and traverse speeds on joints the mechanical tests employed in experiment. Therefore all specimens were subjected to destructive (tensile, impact toughness and fatigue) and non-destructive (fluoroscope) testing. Destructive test showed that different mechanical strength results could be obtained when the rotational and traverse speeds varied on the welded joints. The end of destructive inspection, insufficient bonding regions was examined throughout weld nugget as porosity, tunnel and void appearance due to lower rotational and higher traverse speed. The best mechanical test result was obtained from that of the welded samples using 1400 rpm and 250 mm/min traverse speed welding conditions.

**Keywords:** Friction Stir Welding, Aluminum Alloys, Destructive And Non-Destructive Inspection, Welding Region.

### Destructive and Non-Destructive Inspection of Dissimilar Aluminium Joints Welded by Friction Stir Welding Process

**Özet:**Bu çalışmada farklı kimyasal ve mekanik özelliklere sahip AA 5754 (AlMg3) ile AA 5083 (AlMg4,5Mn0,7) alüminyum alaşım levhaları, günümüzde yeni geliştirilen sürtünme karıştırma kaynak (SKK) yöntemiyle birleştirilmiştir. Çalışmada farklı devir ve ilerleme hızlarının, kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla tahribatlı (çekme, çentik darbe, ve yorulma) ve tahribatsız (floroskopik) testler uygulanmıştır. Tahribatlı testler sonucunda farklı kaynak dönme ve ilerleme hızlarının, bağlantının mekanik test sonuçlarını etkilediği belirlenmiştir. Tahribatsız test sonucunda ise düşük devir sayısının ve yüksek ilerleme hızının, kaynak bölgesinde yetersiz birleşme meydana getirmesiyle, dikiş boyunca bölgesel porozite, tünel ve boşluklu bölgelerin oluştuğu görülmüştür. En iyi mekanik test sonucunu, 1400 devir dönme hızı ve 250 mm/dak ilerleme hızı işlem parametresi ile birleştirilen numune sergilemiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürtünme Karıştırma Kaynağı, Alüminyum Alaşımları, Tahribatlı Ve Tahribatsız Muayene, Kaynak Bölgesi.

### Giriş

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi, özellikle demir dışı metallere alüminyum alaşımları için tercih edilen yeni ve alternatif bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu yöntem, ergitmeli kaynak yöntemlerinde (MIG, TIG, elektrik ark kaynağı) sıklıkla karşılaşılan olumsuzlukların giderilmesi amacıyla ilk defa 1991 yılında The Welding Institute-TWI (Kaynak Enstitüsü) tarafından icat edilmiştir (Thomas ve Nicholas, 1997; Çam, 2005; Cabello vd., 2008). Özellikle ısı işlem ve dövme ile mukavemet kazandırılan alüminyum alaşımlarının geleneksel ergitme kaynak yöntemleriyle (MIG, TIG, elektrik ark kaynağı) birleştirmelerinde yüksek ısı girdisi, bu alaşımların ısı genleşmelerinin yüksek olması ve katılma sıcaklık aralıklarının geniş olmasından dolayı kaynak dikişinde düşük ergime dereceli fazların oluşumuna ve dolayısıyla tane sınırlarında meydana gelen katılma ile çatlak oluşumuna neden olabilmektedir (Fujii vd., 2006; Oğuz, 1990; Çam, 2002). Bununla birlikte ısı işlem gören alüminyum serilerinin, geleneksel yöntemler kullanılarak yapılan ergitmeli kaynaklarında oluşan yüksek ısı girdisi sebebiyle kaynaklı bölgede, sertleştirici çökeltilerin çözünmesi ile sertlik ve mukavemette ciddi düşüşler söz konusu olmaktadır (Cabello vd., 2008;

Fujii vd., 2006; Elangovan ve Balasubramanian, 2007). Sürtünme karıştırma kaynağında, geleneksel ergitmeli kaynak yöntemlerine göre daha düşük ısı girdisiyle çalışılması, malzemedeki mikroyapısal ve mekanik bozulmaları azaltmaktadır.

Düşük ısı girdisinin, kaynağın mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği bilinmektedir (Fujii vd., 2006). Bunun sağlanabilmesi için uygun kaynak parametrelerinin seçimi önem arz etmektedir. Bu yöntemde koruyucu gaz, ilave kaynak metali ve kaynak edilecek parçalarda kaynak ağzı hazırlamaya gerek duyulmamaktadır (Külekci ve Şık, 2003). Kaynak yapılırken sağlığı olumsuz etkileyecek zararlı gazlar ve ultra-viyola ışınlar söz konusu olmaması nedeniyle çevreci bir yöntemdir (Şık, 2005).

Bilindiği üzere alüminyum alaşımlarının oldukça hafif olmasına karşılık, mukavemet özelliklerinin oldukça yüksek olması nedeniyle günümüzde savunma sanayii, otomotiv, demiryolu vagonları imalatı, uçak sanayii ve makine imalat sanayisinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Taban ve Kaluç, 2005). Yöntemin en önemli uygulama alanı alüminyum alaşımları olmasına

karşın günümüzde farklı tipteki Al serileri ve demir esaslı alaşımların da kaynaklı uygulamaları, araştırmacıların dikkatini çekmektedir (Uzun v.d, 2005). Literatür incelemelerinde 5XXX serilerinin, kendi seri grubundan olan farklı bir alaşımla SKK işlemi kullanılarak birleştirilmesi üzerine detaylı yapılmış çalışmaların oldukça az sayıda olduğu saptanmıştır.

Literatürdeki bu boşluğun doldurulması amacıyla bu çalışmada, özellikle taşımacılık ve otomotiv endüstrisinde geniş kullanım alanı bulan (Steuwer v.d, 2006) ve soğuk deformasyonla sertleştirilip mukavemet kazandırılan alüminyum alaşımlarından AA 5754 (AlMg3) ve AA 5083 (AlMg4,5Mn0,7) yeni bir katı hal kaynak tekniği olan sürtünme karıştırma kaynağıyla başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Tahribatlı ve tahribatsız testler yardımıyla kaynaklı bağlantıların kalitesi, farklı işlem parametreleri göz önüne alınarak değerlendirilmiştir.

## Materyal ve Metot

Bu çalışmada, 6 mm kalınlığında temin edilen ve kimyasal içerikleri Çizelge 1’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 2’de verilen alüminyum çiftleri AA 5754 ve AA 5083 deney malzemesi olarak kullanılmıştır. 300 x 100 x 6 mm boyutlarında işlenen alaşım çiftleri, yatay oluk pozisyonuna (küt alın) uygun şekilde hazırlanmışlardır. Kaynak öncesi Al alaşımlarının birleştirilecek alın yüzeyleri oksit, kir ve yağ gibi birleşme zorluğuna neden olacak unsurlardan, alın frezeleme işlemiyle arındırılmışlardır.

Çalışmada FU 315x1250 V/2 marka 7,5 kW, motor gücünde konsol tipi üniversal başlıklı freze tezgâhı kullanılmıştır. Ayrıca kaynak başlangıç kılavuz delikleri açılan birleştirilecek plakalar, alın pozisyonunda, arada boşluk kalmayacak şekilde freze tezgâh tablası üzerine, pabuçlar kullanılarak sabitlenmiştir. Sabitlenen levhaların birleşme çizgisi, komparatör yardımıyla ayarlanarak, karıştırıcı uç ile paralelliği sağlanmıştır. Tezgâh üzerinde gerekli işlem parametreleri (devir sayısı, ilerleme hızları v.b.) seçildikten sonra, bütün kaynak işlemleri için saat yönünde dönüş hareketi tercih edilmiştir. Birleştirilecek parçaların tamamına 0.1 mm omuz batma derinliği verilmiştir.



Şekil 1. SKK yönteminin şematik gösterimi

Çizelge 1. Deney çalışmalarında kullanılan malzemelerin nominal kimyasal bileşimi

Alaşım Elementleri (% Ağırlık)	Malzeme	
	AA 5754	AA 5083
Cr	0,3	0,1
Fe	0,4	0,4
Si	0,4	0,4
Zn	0,2	0,25
Mn	0,05	0,7
Mg	2,9	4,5
Al	Kalan	Kalan

Çizelge 2. Deney çalışmalarında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	AA 5754	AA5083
Çekme Dayanımı (MPa)	215	300
Akma Dayanımı (MPa)	100	145
Elastiste modülü (MPa)	70500	71000
Sertlik (HV)	55	75

Karıştırıcı uç malzemesi olarak K100 çeliğinden yapılmış konik vida geometrisine sahip 20 mm genişliğinde karıştırıcı uç kullanılmıştır. Karıştırıcı uç, birleştirilecek olan plakalara dik olarak ayarlandıktan sonra, literatüre uygun olarak 2.5° başlık eğim açısı verilmiştir (Elangovan ve Balasubramanian, 2008; Murr v.d, 1998). Kaynaklı birleştirmeler, literatür taraması sonucunda saptanan, SKK’ da mikroyapı ve mekanik davranışlar üzerinde farklı etkiler oluşturacağı tahmin edilen parametreler seçilerek gerçekleştirilmiştir (Elangovan ve Balasubramanian, 2008; Özsoy ve Kaluç, 2002) (Çizelge 3). Aynı levha üzerinde, her parametreye ait en az üç deney numunesi çıkarılacak şekilde hazırlanan plakaların kaynak işlemi, Şekil 1 ‘de görülen alın pozisyonunda gerçekleştirilmiştir.

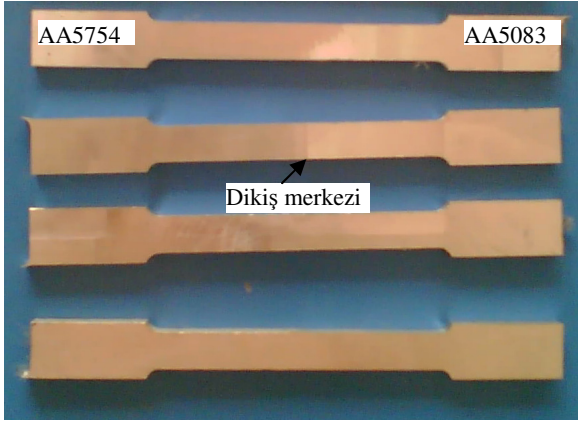
Numunelerin tahribatsız muayene incelemeleri, Emek Boru Mak. AŞ.’deki laboratuvarlarda gerçekleştirilmiştir. Kaynak dikişinin elektromanyetik radyo dalgalarıyla muayenesi YXLON firması tarafından kurulan floreskopik muayene cihazı yardımıyla yapılmıştır.

Çizelge 3. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan kaynak parametreleri

Numune Kod Numarası	Karıştırıcı Uç Eğim Açısı	Dönme Hızı dev./dak.	İlerleme Hızı mm/dak.
A1	2,5°	900	160
A2			250
B1	2,5°	1400	160
B2			250

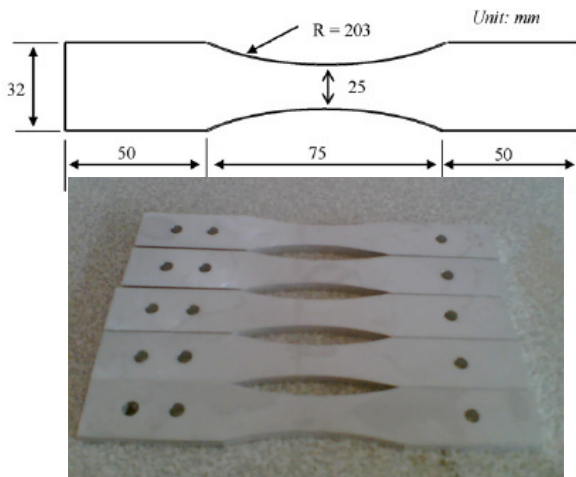
Çekme çentik darbe ve yorulma deneylerinin belirlenmesi amacıyla numuneler kaynak dikişine dik doğrultuda olacak biçimde, her bir mekanik testin ölçülerine uygun

şekilde CNC freze tezgahına programlanarak ince çakı yardımıyla işlenmişlerdir. Mekanik davranışları belirlemek için ise kaynaklı bağlantılardan DIN 50109 standardına uygun olarak çıkarılan numunelere çekme deneyi uygulanmıştır (Şekil.2). Kaynaklı bağlantıların maksimum çekme mukavemet değerleri Instron marka çekme test cihazında, 2 mm/dak. çene hızı altında elde edilmiştir. Çentik darbe numunelerinin yüzeyleri zımpara ve parlatma işleminden sonra her bir numunenin tek yüzeyine tam ortaya denk gelecek şekilde çentikleri açılmıştır. Numunelere uygulanan çentik darbe testleri, TS-269 standardında charpy olarak 300 joule, izod olarak 165 joule test yapabilme kapasitesine sahip Heckert marka cihaz vasıtasıyla uygulanmıştır.



Şekil 2. Kaynaklı birleştirmeden çıkarılan çekme numuneleri

Kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımlarını belirlemek için numuneler, ASTM-E466 standardında işlenerek, Testronic marka yorulma test cihazında ve eksenel gerilme şartlarında, gerilme oranı  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0.1$  olacak şekilde çekme/çekme yorulma testi uygulanmış ve S/N diyagramları elde edilmiştir. Bütün testler için işlem frekansı 72 Hz olarak belirlenmiş ve bütün bağlantılara eksenel sinüzoidal yük genlikli yorulma testi uygulanmıştır. Her parametre için en az 8 deney numunesi (Şık, 2005) yorulma testlerine tabii tutulmuştur (Şekil 3).



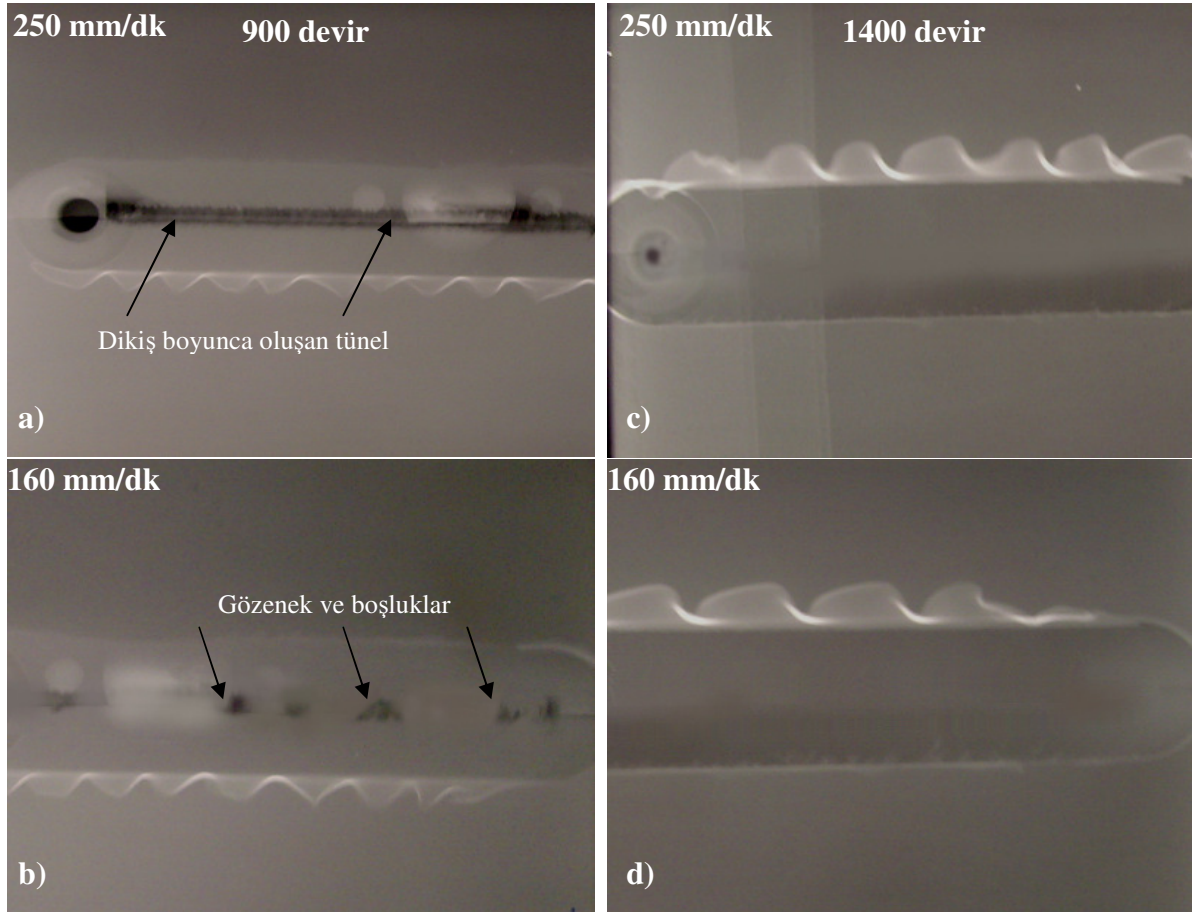
Şekil 3. B2 kaynaklı levhasından dikiş yönüne dik doğrultuda çıkarılan yorulma test numuneleri (boyutlar mm).

## Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

### Tahribatsız floroskopik muayene incelemeleri

Şekil 4 'de kaynak dikişi üzerinden alınan floroskopik muayene yüzey filmleri verilmiştir. Görüntüler değerlendirildiğinde, düşük devir sayısı ve yüksek ilerleme hızlarında birleştirilen A2 numunesinde (Şekil 4a) dikiş boyunca boşluk ve tünel oluşumunun meydana geldiği görülmektedir. Aynı devir sayısı ile gerçekleştirilen A1 numunesinde ise, ilerleme hızının düşüğüyle tünel oluşumunun tamamen kaybolduğu fakat bölgesel boşluklardan oluşan kümelerin varlığı, Şekil 4.b' de görülmektedir. İlerleme miktarının azalmasına paralel olarak boşluk oluşumunun azalması, kaynak için gerekli olan sürtünme sıcaklığının sağlanmasıyla doğrudan ilişkilidir. Lee ve diğ. (2003) yaptıkları çalışmalarında artan devir sayısı ve düşük ilerleme hızlarının kaynak bölgesinde daha fazla sürtünme ısıyı ürettiğini iddia etmişlerdir. A1 ve A2 numunelerinde oluşan kaynak hatalarının sebebi, düşük devir nedeniyle oluşan düşük sıcaklığın, kaynak bölgesinde karıştırıcı takımın malzeme taşınımı için gerekli olan malzeme akışını ve viskoziteyi sağlamamasıyla oluştuğu düşünülmektedir. Çünkü SKK işleminde omuz tarafından ısıtılan malzeme, karıştırıcı pim vasıtasıyla ilerleme yönünden alınarak arka tarafa doğru tabaka şeklinde sıvanmaktadır. Uç önündeki malzemeyi, ilerleme hızına bağlı miktarda malzemeyi geriye doğru ekstürize ederek ilerler. Bu taşıma işleminin gerçekleşmesinde malzemenin yeterli plastikliğe ulaşması gerekir. Tabakalar arasında boşluğun oluşmaması, omuzun ürettiği sıcaklık ve karıştırıcı uç geometrisine bağlıdır (Su vd., 2003; Lee vd., 2003). Bu nedenle aynı uç geometrisi kullanılarak azalan ilerleme hızında gerçekleştirilen A1 numunesinin kaynağında, tünel oluşumu tamamen kaybolmuş fakat yerel boşlukların oluşumu önlenememiştir.

B1 ve B2 numunelerine ait floroskopik muayene filmleri Şekil 4c ve 4d 'de verilmiştir. Bu resimler incelendiğinde, herhangi bir boşluk, tünel ve bağlantısız bölgelerin yer almadığı birleştirmeler elde edilmiştir. Bu durum oluşmasında yüksek devir sayısının önemli rol oynadığı düşünülmektedir. Çünkü 1400 devir/dak hızında daha yüksek sürtünme sıcaklığı oluşmakta ve bu da taşınım sırasında viskoz malzeme akışını kolaylaştırarak her iki ilerleme hızlarında da boşluk oluşumunu engellemektedir.



Şekil 4. Dikiş yüzeyinden alınan floroskopik muayene filmleri

#### Tahribatlı mekanik test sonuçları

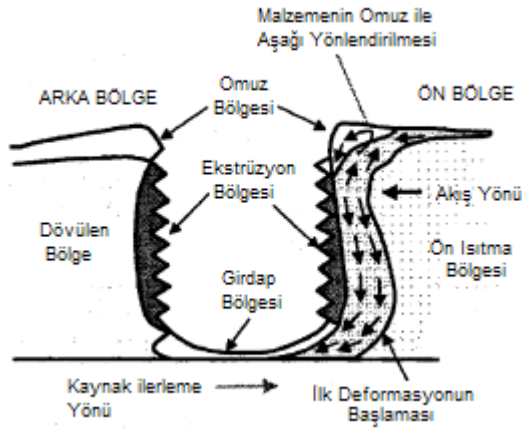
Çizelge 4’de çekme, çentik darbe ve yorulma testlerine ait mukavemet değerleri verilmiştir.

#### Çizelge 4. Mekanik test sonuçları

Numune kod numarası	Çekme mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Yorulma mukavemeti (MPa)	Çentik darbe mukavemeti (Joule)
A1	144	7,1	41	11
A2	126	3,3	23	8
B1	168	13,4	53	26
B2	178	16,5	64	22

Devir sayısının kaynaklı bağlantıların çekme dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, kaynak dikişinde tünel oluşumuyla birlikte geniş boşlukların meydana geldiği floroskopik testlerde tespit edilmişti. Bu olumsuz durumun bir sonucu olarak 900 devir/dak. dönme hızıyla birleştirilen A1 ve A2 numunelerinde diğer numunelere nazaran, çekme mukavemetinin kayda değer oranda düştüğü gözlenmiştir. A1 numunesinde ise ilerleme hızının bir miktar düşmesiyle sürtünme sıcaklığındaki artışa paralel olarak, tünel oluşumu azalarak, yerini küçük boyutlardaki boşluklara bırakmıştır. Aynı devirde birleştirilen A2 numunesinde ise 250 mm/dak. ilerleme hızının etkisiyle kaynak hatalarından oluşan bir dikiş meydana gelmiştir. A2 numunesinde ölçülen çekme ve yorulma değerleri (126 ve 23 MPa) A1 numunesinden oldukça düşüktür (144 ve 41 MPa). Kaynak hatalarının varlığıyla numunenin % uzama değerlerinde, yorulma ömürleri ve çevrim sayılarında da düşüşler tespit edilmiştir. Kaynakta yetersiz ısı girdisiyle oluşan hatalı

birleşmenin çekme ve yorulma mukavemet değerlerinde ciddi düşümlere yol açması, ilerleme hızının azaltılmasıyla (160mm/dak) bu değerlerde, 250 mm/dak işlem parametresine göre yerini miktar yükselişe bırakmıştır. 1400 dev/dak ile birleştirilen B1 ve B2 nolu numunelerin çekme ve yorulma sonuçları değerlendirildiğinde, artan devir sayısı ile birlikte bu numunelerin daha iyi mekanik özellikler sergilediği hatasız birleştirmeler elde edilmiştir. Devir sayısı artışı ile bağlantıların çekme mukavemet değerleri, 900 dev/dak ile birleştirilen numunelerden yaklaşık 30 ila 60 MPa daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu artışta kaynak esasında plastik deformasyona ve şiddetli ekstürüzyona neden olan sıcaklığın etkisi büyüktür. Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında kaynak merkezinde yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta ana yapı, dövülerek ilerleme hızı ile geriye doğru şiddetli bir şekilde ekstürize edilmektedir (Şekil 5) (Mishra ve Ma, 2003).

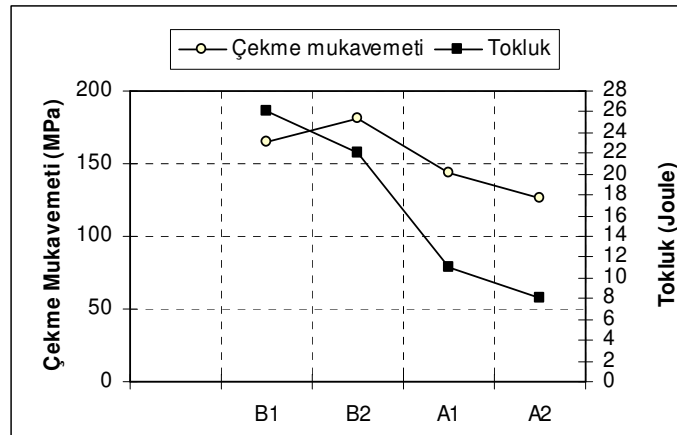


Şekil 5. SKK işleminde karıştırma esnasında malzemedeki deformasyon aşamaları (Mishra ve Ma, 2003)

Bu işlem neticesinde kaynak merkezindeki tane morfolojisi tamamen değişim göstermektedir. Dövme ve plastik deformasyona uğrayan dikiş merkezindeki taneler, normal boyutlarına göre daha fazla incilir (Rhodes, 1997). Böylece kaynak merkezinin mukavemet değerlerinde bir miktar artış meydana gelir. Kaynak merkezine komşu bölgede ise taneler olduğundan daha fazla irileşerek bu sıcaklıkta tavlanırlar. Çekme

deneyi esnasında da 1400 devir/dak ile birleştirilen numunelerin tamamı daha sünek yapıya sahip bu bölgeden (AA 5754 tarafından) kırılmışlardır. Özellikle 160 mm/dak ile 1400 devir/dak da birleştirilen B1 numunesinin çekme ve yorulma değerleri, B2 numunesinden bir miktar daha düşüktür. Bu durum soğuk şekil verme işlemi gören 5XXX serilerinde ve ısıl işlem ile sertleştirilen alüminyum alaşımlarında sık karşılaşılan bir durumdur (Çam, 2002). İdeal devir sayısı ile birleştirilen kaynaklarda artan ilerleme hızları, kaynak merkezine nüfuz eden sıcaklığı düşürmektedir. Bu sıcaklık azalması ise ısıl işlem veya soğuk işleme mukavemet kazandırılan alüminyum alaşımlarının kaynağında, mukavemet değerlerinin sınırlı oranda yitirilmesine yol açmaktadır. Yapılan çalışmada mekanik testler açısından ideal kaynak parametresi 1400 devir/dak dönme hızı ve 250 mm/dak ilerleme hızı olarak belirlenmiştir.

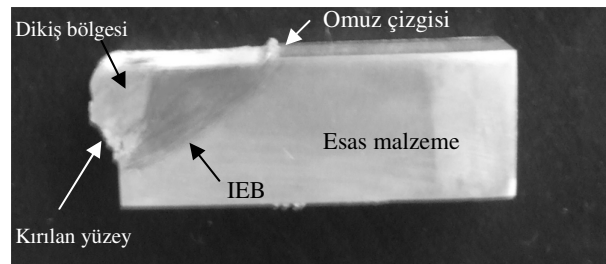
Çentik darbe test sonuçları incelendiğinde, düşük devir sayısı ile birleştirilen numunelerde kaynak hatalarının varlığı sebebiyle içyapıdaki gözeneklerin ve boşlukların ayrıca bir çentik etkisi yaptığı, böylece numunelerin tokluğunun önemli derecede düştüğü belirlenmiştir. Ayrıca Şekil 6 'da uygulanan parametrelere göre çentik darbe tokluğu ile çekme mukavemeti ilişkisi görülmektedir.



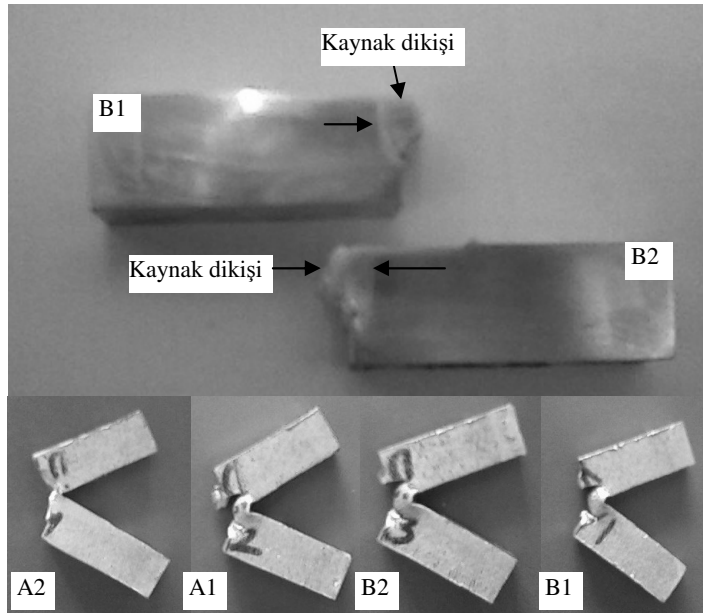
Şekil 6. Numunelere ait çekme deneyi ve çentik darbe tokluğu grafikleri

1400 devir sayısı ile birleştirilen numunelerde de 160 mm/dak ilerleme hızı ile birleştirilen numune (B1), daha fazla enerji absorbe ederek tok bir özellik sergilemiştir. B2 numunesinde ise tokluk ve süneklik, B1 numunesinden 4 joule daha düşük elde edilmiştir. Bu durum, üretimde esnasında soğuk deformasyon ile mukavemetlendirilen esas malzemelerin dayanım ve sertlik özelliklerinin, yüksek kaynak ilerleme hızı neticesinde, B1 numunesine göre daha sınırlı oranda bozulmasıyla doğrudan ilişkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca çentik darbe işlemi sonucunda kırılmaların tamamı, dikiş merkezinin bitişiğindeki daha sünek yapıya sahip ısıdan etkilenen bölgede (IEB) meydana gelirken (Şekil 7), A1 numunesinde ise iç yapıda oluşan kaynak hataları ve geniş tünel oluşumu sebebiyle kırılmaların, kaynak merkezinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir (Şekil 8 ve 9). Dikiş bölgesinden kırılan A1 numunesinin içyapısı

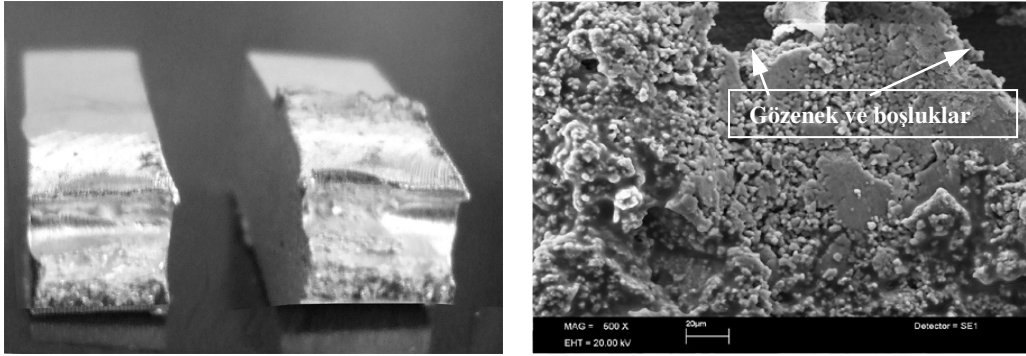
yüksek büyütmelemlerde incelendiğinde, geniş boşluk ve gözeneklerin yer aldığı kaynak hataları tespit edilmiştir (Şekil 9).



Şekil 7. B2 numunesinin kaynak bölgesini gösteren makroyapı fotoğrafı



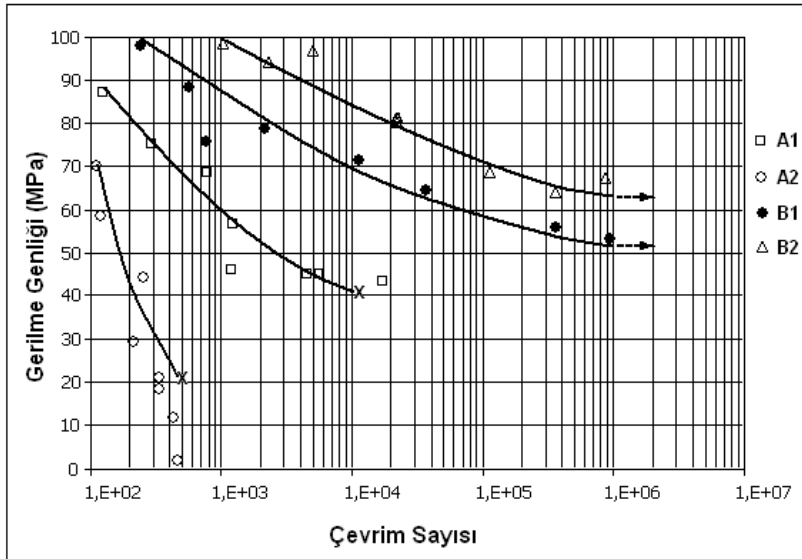
Şekil 8. Çentik darbe testleri uygulanmış numuneler



Şekil 9. Çentik darbe testi sonucu kırılan A1 numunesinin kırık yüzeyinden alınan makro ve SEM fotoğrafı

Şekil 10 'da kaynaklı bağlantılara ait Wöhler diyagramında, bütün parametrelerde yapılan yorulma testleri karşılaştırmalı olarak tek diyagram halinde verilmiştir. Eğriler incelendiğinde dört numune de birbirinden farklı yorulma dayanımı ve yorulma çevrim süresi karakteristikleri gösterdiği gözlenmiştir. Özellikle kaynak hatalarının ciddi boyutlara ulaştığı A2 numunesinde, diğer test numunelerine göre en düşük yorulma dayanım değerleri elde edilmiştir (23 MPa). Ayrıca bu numunenin yorulma çevrim sayısı, yüksek çevrimli ( $>10^3$ ) test standartlarına da ulaşamamıştır ( $<4 \times 10^2$ ). A1 numunesinde ilerleme hızının düşmesine bağlı olarak ısı girişinin artması ve böylece malzemenin bir miktar akıcılık kazanmasıyla artan karıştırma kabiliyeti, dikiş merkezinde kaynak hatalarının miktarını azaltmıştır. Bu durum bağlantının, yorulma ömrünü ( $10^4$ ) ve dayanım değerlerini (41 MPa) yükseltmiştir. Kaynak sırasında

oluşan ısı girdisinin numunelerdeki mukavemet değerlerini değiştirmesi beklenen bir durumdur. Isı girdisine bağlı olarak çekme testlerinde olduğu gibi, yorulma test verilerinde de ısıdan etkilenen bölgenin etkilene derecesine bağlı olarak numunelerin yorulma mukavemet değerlerinin değişim gösterdiği görülmüştür. Hatasız birleştirmelerin elde edildiği, B1 ve B2 numunelerinde yorulma dayanım değerleri sırasıyla 53 MPa ve 64 MPa olarak kaydedilmiştir. Bu iki numune de test boyunca herhangi bir kırılma görülmediğinden, deneyleri  $10^6$  yorulma çevrim sınırına kadar devam ettirilmiştir. B2 numunesinin yorulma dayanımının B1 numunesinden yüksek çıkmasında, hiç kuşkusuz soğuk şekil verme sertleşmesine tabii tutulan ana malzemenin dikiş bölgesinin, 250 mm/dak kaynak ilerleme hızının etkisiyle, kısmi olarak daha düşük bir sıcaklıkta tavlama etkisi büyüktür.



Şekil 10. Numunelerin karşılaştırmalı S/N diyagramları

## Sonuçlar

- 1) AA 5754 ile AA 5083 alüminyum alaşım levhalarının, birbirlerine sürtünme karıştırma kaynağı uygulanarak oluşturulmuş bağlantılar üzerine yapılan floroskopik muayene incelemelerinde en başarılı birleştirmeler, 1400 dev/dak dönme hızı altında yapılan kaynaklarda elde edilmiştir. 900 dev/dak dönme hızı ile yapılan kaynakların tamamında, yetersiz işlem sıcaklıkları neticesinde meydana gelen yetersiz ekstrüzyon kabiliyeti nedeniyle dikiş bölgesinde boşluk ve tünel oluşumu gibi kaynak hatalarına rastlanmıştır. Fakat bu hataların boyutlarında, düşen kaynak ilerleme hızına paralel (160 mm/dak) doğrultuda azalma göstermiştir.
- 2) Çekme testi deneylerinde en yüksek mukavemet değeri, B2 (1400 dev/dk-250 mm/dak) numunesinde 178 MPa çekme mukavemeti ve %16,5 uzama olarak elde edilmiştir.
- 3) Yorulma deney sonucunda da yine B2 numunesi, 64 MPa dayanım ve  $10^6$  çevrimi aşan bir yorulma performansı sergilemiştir. Her iki testte de artan ilerleme hızının oluşturduğu daha düşük sürtünme sıcaklığı, kaynaklı bağlantının mukavemet değerlerinde olumlu etki yapmıştır. Ancak düşük devir sayısı ile birleştirilen A serilerinde ise kaynak hatalarının varlığı nedeniyle çekme, yorulma ve çentik muayene sonuçlarının oldukça düşük çıktığı görülmüştür.
- 4) 1400 dev/dak dönme hızıyla gerçekleştirilen deneylerin çentik darbe test sonuçları ise 900 dev/dak işlem parametresine kıyasla oldukça yüksek değerler sergilemiştir. En yüksek tokluğu 1400 dev/dak dönme hızı ve 160 mm/dak ilerleme hızıyla yapılan B1 numunesinde 26 J olarak kaydedilmiştir. Ayrıca çentik darbe testi sonucunda oluşan kırılmalar, daha sünek yapıda olan kaynak dikişinin bitişiğindeki ısıdan etkilenen bölgede meydana gelmiştir.

## Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde, yardımlarıyla destek sağlayan Emek Boru Mak (Sincan-Ankara) A.Ş. ye sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

## Kaynaklar

- Cabello, M. A., Rückert, G., Huneau, B., Sauvage, X. 2008. Comparison of TIG Welded and Friction Stir Welded Al-4.5Mg-0.26Sc Alloy. Journal of Materials Processing Technology, 197, 337-343.
- Çam, G. 2002. Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Uygulamaları. 9. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Denizli, 450-458.
- Çam, G. 2005. Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) –Al Alaşımları için Geliştirilmiş Yeni bir Kaynak Teknolojisi. Mühendis ve Makine, 46, 30-39.
- Elangovan, K., Balasubramanian, V. 2008. Influence of Tool Pin Profile and Tool Shoulder Diameter on the Formation of Friction Stir Processing Zone in AA 6061 Aluminum Alloy. Materials Design, 29, 362-373.
- Elangovan, K., Balasubramanian, V. 2007. Influences of Pin Profile and Rotational Speed of the Tool on the Formation of Friction Stir Processing Zone in AA2219 Aluminium Alloy. Materials Science and Engineering A, 459, 7-18.
- Fujii, H., Cui, L., Maeda, M., Nogi, K. 2006. Effect of Tool Shape on Mechanical Properties and Microstructure of Friction Stir Welded Aluminum Alloys. Materials Science and Engineering A, 419, 25-31.

- Kurt, A., Boz, M., Özdemir, M. 2004. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Hızının Birleşebilirliğe Etkisi. Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 19, 2, 191-197.
- Külekci, M. K., Şık, A. 2003. Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Alüminyum Alaşımı Levhaların Birleştirilmesi ve Elde Edilen Kaynaklı Bağlantıların Özellikleri. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7, 3, 70-75.
- Lee, W. B., Yeon, Y. M., Jung, S. B. 2003. Evaluation of the Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 6005 Aluminum Alloy. Materials Science and Technology, 19, 513-518.
- Mishra, R. S., Ma, Z. Y. 2005. Friction Stir Welding and Processing. Materials Science and Engineering R, 50, 1-78.
- Murr, L.E., Liu, G., McClure, J.C. 1998. TEM Study of Precipitation and Related Microstructures in Friction-Stir-Welded 6061 Aluminum. Journal of Materials Science, 33, 1243-1251.
- Oğuz, B. 1990. Demirdışı Metaller Kaynağı. Metalurji-Uygulama, Oerlikon Yayınları, İstanbul.
- Özsoy, M., Kaluç, E. 2002. Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynağının Esasları. Mühendis ve Makina Dergisi, 513, 19-26.
- Rhodes, C.G., Mahoney, M.W., Bingel, W.H., Spurling, R.A. Bampton, C.C. 1997. Effect of Friction Stir Welding on Microstructure of 7075 Aluminum. Scripta Materialia, 36, 69-75.
- Sarsılmaz, F., Özdemir, N., Özel, S. 2008. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen AA6061/AA7075 Çiftinde Karıştırıcı Uç Omuz Genişliğinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi. Selçuk Üniv. Teknik Online Dergisi, 7, 1, 51-61.
- Steuer, A., Peel, M. J., Withers, P.J. 2006. Dissimilar Friction Stir Welds in AA5083-AA6082: The Effect of Process Parameters on Residual Stress. Materials Science and Engineering A, 441, 187-196.
- Su, J. Q., Nelson, T. W., Mishra, R., Mahoney, M. 2003. Microstructural Investigation of Friction Stir Welded 7050-T651 Aluminum. Acta Materialia, 51, 713-729.
- Şık A. 2005. Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Alüminyum Levhaların Eğme ve Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi. SAÜ Fen Bilimleri Dergisi, 9, 12-17.
- Taban, E., Kaluç, E. 2005. EN AW-5083-H321 Alüminyum Alaşımının MIG, TIG ve Sürtünme Karıştırma Kaynaklı (FSW) Bağlantılarının Mekanik ve Mikroyapısal Özellikleri. Mühendis ve Makine Dergisi, 46, 541, 40- 51.
- Thomas, W. M., Nicholas, E. D. 1997. Friction Stir Welding for the Transportation Industries. Materials and Design, 18, 4/6, 269-273.
- Uzun, H., Donne, C. D., Argagnotto, A., Ghidini, T., Gambaro, C. 2005. Friction Stir Welding of Dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 Stainless Steel. Materials Design, 26, 41-46.