

AKÜ FEMÜBİD 18 (2018) 015901 (324-335)

AKU J. Sci. Eng. 18 (2018) 015901 (324-335)

DOI: 10.5578/fmbd.66765

## Farklı Kalınlıktaki AA6061-T6 Levhaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı için Uygun Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi

**Güven İpekoğlu<sup>1</sup>, Özgür Akçam<sup>2</sup>, Gürel Çam<sup>1</sup>**<sup>1</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Merkez Kampüs, 31200, İskenderun, Hatay.<sup>2</sup>GSI SLV-TR Kaynak Teknolojisi Test ve Mesleki Gelişim Merkezi Ltd. Şti., Çiğdem Mah., Gökkuşuğu Sitesi, Mavi Blok No:37-38, 06520 Balgat, Çankaya, Ankara.

e-posta: guven.ipekoglu@iste.edu.tr

Geliş Tarihi:28.09.2018

; Kabul Tarihi:03.04.2018

### Özet

**Anahtar kelimeler**  
Sürtünme karıştırma kaynağı; AA6061-T6; Kaynak parametreleri; İçyapı; Mekanik özellikler.

Bu çalışmada, dört farklı kalınlıktaki AA6061-T6 levhaların sürtünme karıştırma kaynağı ile hatasız birleştirilebilmesi için kullanılması gereken kaynak parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, her bir levha kalınlığı için bir olmak üzere, dört farklı karıştırıcı takım temin edilmiş ve bu uçlar kullanılarak her bir levha kalınlığı için uygun kaynak parametreleri tayin edilmiştir. Elde edilen kaynaklı bağlantıların makro ve mikro boyutta içyapısı incelenmiş, çekme deneyi ve sertlik ölçümleri ile mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu çalışma, farklı kalınlıklardaki AA6061-T6 alaşımı levhaların uygun karıştırıcı takımlar ve kaynak parametreleri ile başarılı bir şekilde birleştirilebileceğini ortaya koymuştur.

## Determination of the Suitable Weld Parameters for Friction Stir Welding of AA6061-T6 Plates with Different Thicknesses

### Abstract

**Keywords**  
Friction stir welding; AA6061-T6; Weld parameters; Microstructure; Mechanical properties.

In this study, it was aimed to determine the weld parameters required in order to successfully join AA6061-T6 plates with four different thicknesses by FSW. For this purpose, four different stirring tools (one tool for each plate thickness) have been obtained and used to determine suitable weld parameters for each plate thickness. The microstructures of the joints obtained were investigated in both macro- and micro-scale, and their mechanical properties were determined by conducting microhardness measurements and tensile testing. The current study clearly indicated that AA6061-T6 plates with different thicknesses can be successfully FS welded provided that suitable stirring tools and weld parameters are used.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Sürtünme karıştırma kaynağında (SKK), özellikle alüminyum ve alüminyum alaşımları gibi düşük ergime dereceli malzemelerin, fakat ergime noktasının altındaki sıcaklıklarda, plastik deformasyona karşı gösterdiği dirençten ve bunun sonucu (sürtünme nedeniyle) açığa çıkan ısıdan yararlanılmaktadır. Bu yöntemde birleştirilmek istenen yüzeyler yüksek basınç ile birbirine doğru bastırılırlar. Bu konumda iken, dönmekte olan karıştırıcı ucun birleşim yüzeyine daldırılarak kaynak

hattı boyunca hareket ettirilmesi ile oluşan ısı ve ilave baskının etkisi ile yeni ve homojen bir yapı (kaynak dikişi) oluşur (Thomas et al. 1991; Mishra and Ma 2005; Nandan et al. 2008; Çam 2011; Çam and Mısıkoğlu 2014; Çam and İpekoğlu 2017).

Endüstride özellikle Al-alaşımlarının kaynağında yaygın olarak kullanılan bu kaynak yöntemi (Çam and İpekoğlu 2017), Cu-alaşımları (Çam et al. 2009; Çam et al. 2008; Küçükömeroğlu et al. 2016), Mg-alaşımları (Yang et al. 2010; Zhang et al. 2005; Lim et al. 2005) ve hatta uygun karıştırıcı uç kısıtlamalarının

aşılması durumunda çelikler (Thomas et al. 1999; Ueji et al. 2006; Miyazawa et al. 2012) ve titanyum alaşımları (Çam 2011) gibi yüksek ergime dereceli malzemelerin kaynak işlemlerinde de kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Bu kaynak yönteminde metalin ergimesi söz konusu olmadığı için, kaynak bölgesinde ergimeden ötürü söz konusu olan sorunlar oluşmamaktadır.

AA6061 yüksek korozyon direnci ile ön plana çıkan bir Al-alaşımı türüdür. Bu sayede kendine geniş bir kullanım alanı bulmakta olup bu alaşımın SKK ile birleştirilmesi üzerine pek çok çalışma yapılmıştır (Trueba et al. 2015; Cao et al. 2017; Liu et al. 2013; Elongovan and Balasubramanian 2008; Feng et al. 2010). Ancak farklı kalınlıktaki levhaların farklı batıcı uçlar kullanılarak kaynak edilebilirliğinin optimize edildiği bir çalışmaya literatürde rastlanılmamıştır. Bu doğrultuda, yapılan bu çalışma ile farklı kalınlıktaki AA6061-T6 alaşımı levhaların her biri için farklı bir karıştırıcı uç kullanılmak suretiyle literatür destekli belirlenen kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilmiş ve elde edilen kaynaklı bağlantıların içyapı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, dört farklı kalınlıkta AA6061-T6 Al-alaşımı plaka (3, 4, 5 ve 6,2 mm) ve bu levhaların kaynağında kullanılmak üzere 4 adet SKK karıştırıcı takım (pim uzunlukları sırasıyla: 2,8 mm, 3,8 mm, 4,8 mm ve 6 mm; omuz çapları: 10 mm, 12 mm, 15 mm ve 15 mm olan) piyasadan ticari olarak temin edilmiştir, Şekil 1. Temin edilen bu takımlar konik yapıda olup, pim çapları, dip çapı/tepe çapı olmak üzere yukarıdaki sırayla 3,5 mm/2,5mm, 4 mm/2,5 mm, 6 mm/3,5 mm ve 6 mm/3,5 mm'dir. Ayrıca, 6,2 mm kalınlığındaki levhalar için temin edilen takımın pim kısmı dış açıldıktan sonra çepeçevre üç yüzeyden düzleştirilmiş (pah kırılmış) üçgen geometriye sahiptir. Bu alaşımın sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kullanılacak parametrelerden devir hızı, literatürden ve daha önce yapılan çalışmalarımızdan, gerek AA6061 gerekse AA7075 Al-alaşımı levhalarda kaynak hatası içermeyen bağlantılar elde edilmesini sağladığından,

1000 devir/min olarak seçilmiştir (İpekoğlu et al. 2012; İpekoğlu et al. 2013; İpekoğlu et al. 2014a; İpekoğlu et al. 2014b; İpekoğlu and Çam 2014; Çam et al. 2014). Her bir levha et kalınlığı için iki farklı ilerleme hızı seçilmiş ve bu suretle her bir et kalınlığı için ideal kaynak hızı belirlenmeye çalışılmıştır. İlerleme hızlarının tayininde karıştırıcı takım omuz çapı (d)/levha kalınlığı (t) oranına dikkat edilmiş ve buna göre her bir levha için ikişer farklı ilerleme hızı denenmiştir. Bu orana dikkat edilmiş olmasının sebebi, Sevel ve Jaiganesh (2015)'in AZ80A ve AZ91C Mg-alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi üzerine yapmış oldukları çalışmada bu oranın hatasız kaynak elde etmede etkili bir oran olduğunu ortaya koymuş olmalarıdır. Önceki çalışmalarda (İpekoğlu et al. 2013; İpekoğlu et al. 2014a) 3,17 mm kalınlığındaki AA6061-T6 Al-alaşımı levhalarda d/t oranı 4,7 iken 150 mm/min ilerleme hızının hatasız kaynak elde edilmesini sağladığı tespit edildiğinden, bu çalışmada 3 mm levha kalınlığında d/t oranı 3,3 olduğundan öncelikli olarak daha düşük bir ilerleme hızı olan 100 mm/min denenmiş, sonuç görsel olarak tatmin edici olunca üst hız olarak 150 mm/min ilerleme hızı uygulanmıştır. Bu başlangıç bilgisinin ışığında d/t oranlarına dikkat edilerek her bir levha için ikişer tane ilerleme hızı tayin edilmiş ve belirlenen kaynak parametreleri kullanılarak kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Batıcı uç açısı, 3 ve 4 mm kalınlığındaki levhalar için 0,7°; 5 ve 6,2 mm kalınlığındaki levhalar için 0,5° olarak kullanılmıştır. Bu eğim açılarının belirlenmesinde batıcı uç omuz çapı esas alınmıştır. Dört levhada da batıcı ucun levha üzerine yaklaşık olarak eşit miktarda baskı uygulaması amaçlanmıştır. 3 ve 4 mm kalınlığındaki levhalarda kullanılan takımların omuz çapı sırasıyla 10 mm ve 12 mm olup, yaklaşık aynıdır. Dolayısıyla, bu levhalar için aynı eğim açısı (0,7°) kullanılmıştır. Benzer şekilde, 5 mm ve 6,2 mm kalınlığındaki levhalar için kullanılan takımların omuz çapları aynı olup 15 mm'dir ve bu nedenle bu levhalar için de aynı eğim açısı (0,5°) seçilmiştir. Her bir levha için kullanılan kaynak parametreleri Tablo 1'de detaylı olarak verilmiştir.



**Şekil 1.** Çalışmada kullanılan SKK takımları (sol baştan itibaren pim uzunlukları 2,8 mm, 3,8 mm, 4,8 mm ve 6 mm; omuz çapları da sırasıyla 10 mm, 12 mm, 15 mm ve 15 mm'dir).

Kaynaklı levhaların her birinden, birer adet metalografi numunesi (içyapı ve mikrosertlik

ölçümlerinde kullanılmak üzere) ve kaynaklı levhaların kaynak performans değerlerini belirlemek amacıyla çekme deneyleri çalışmalarında kullanılmak üzere üçer adet çekme numunesi çıkarılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri 200 g yük etkisi altında 10 s bekleme süresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri ise 0,1 mm/min çene hızı kullanılarak yapılmıştır. İçyapı incelemeleri için, numuneler standart zımparalama ve parlatma işlemlerini müteakip Keller dağlama solüsyonu içinde 120 s dağlanmıştır. Kaynaklı levhalardan çıkarılan numunelerden makro ve mikro görüntüler alınarak kaynak bölgelerindeki içyapılar detaylı bir şekilde incelenmiş, bu suretle kaynak işleminde kullanılan kaynak parametrelerinin levhaların içyapısı ve dolayısıyla mekanik özellikleri üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

**Tablo 1.** Levha türüne göre kullanılan kaynak parametreleri

Kalınlık (t) (mm)	Omuz Çapı (d) (mm)	d/t	Devir (min <sup>-1</sup> )	İlerleme Hızı (mm/min)	Batma Derinliği (mm)	Batıcı Uç Açısı (Derece)	Gösterim
3	10	3,3	1000	100	0,1	0,7	3-1
				150			3-2
4	12	3	1000	75	0,1	0,5	4-1
				100			4-2
5	15	3	1000	75	0,15	0,5	5-1
				100	0,1		5-2
6,2	15	2,4	1000	50	0,1	0,5	6-1
				75			6-2

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. İçyapı Özellikleri

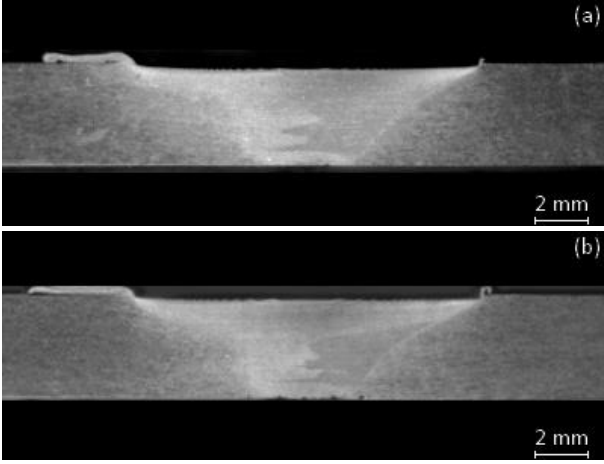
Tüm kaynaklı levhalardan (levha kalınlıkları 3 mm, 4 mm, 5 mm ve 6,2 mm) çıkarılan numunelerden alınan makro görüntüler sırasıyla Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'de verilmektedir.

Şekil 2 detaylı olarak incelendiğinde 3 mm kalınlığındaki kaynaklı bağlantıların her ikisinin de kaynak bölgesinde herhangi bir kaynak hatasına rastlanmamıştır. Bu levhalar, 1000 devirde her iki ilerleme hızı ile de başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Benzer şekilde, 4 mm, 5 mm ve 6,2 mm kalınlıklardaki levhaların kaynağında kullanılan farklı ilerleme hızlarının da, kaynak bölgesinde herhangi bir kaynak hatası oluşumuna yol açmadığı gözlenmiştir (Şekil 3-5).

Ayrıca, Şekil 2-5 detaylı olarak incelendiğinde kaynak edilen levha kalınlığı arttıkça kullanılan karıştırıcı uç omuz çapı ve karıştırıcı pim çapı arttığı için kaynak bölgesinin genişliğinin arttığı görülmektedir. Bu ilk sonuçlar, kaynak işlemlerinin 1000 devirde kullanılan ilerleme hızı aralığında yapılabileceğini göstermektedir.

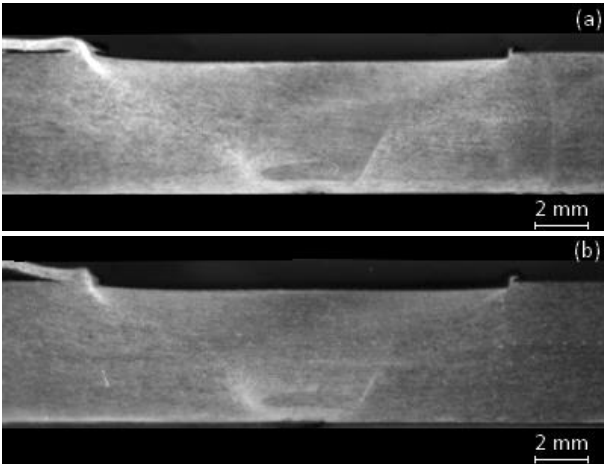
Çalışmada kullanılan tüm farklı et kalınlığındaki AA6061-T6 baz levhaların (levha kalınlıkları 3 mm, 4 mm, 5 mm ve 6,2 mm) iç yapıları Şekil 6'da verilmektedir. İçyapı, tüm et kalınlıkları için alfa taneleri ve optik mikroskop ile görülebilen alfa matrisinde rastgele dağılmış büyük partiküllerden (metaller arası bileşiklerden) oluşmaktadır. Alfa matrisi içerisinde rastgele dağılmış harf-görünümlü Fe<sub>3</sub>SiAl<sub>12</sub> partikülleri ve yine rastgele dağılmış büyük ve yuvarlak Mg<sub>2</sub>Si partikülleri mevcuttur (İpekoğlu et al. 2013; İpekoğlu et al. 2014a). Farklı et kalınlığındaki levhaların içyapısındaki alfa taneleri

kaba taneli olup, farklı et kalınlığındaki levhaların yapısındaki alfa tanelerinin boyutu arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir.

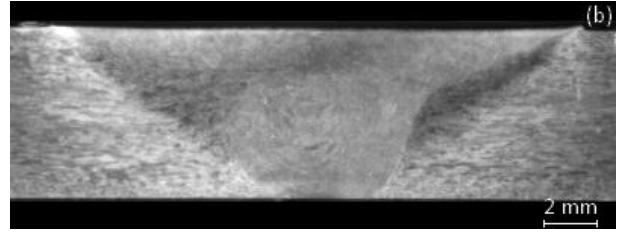
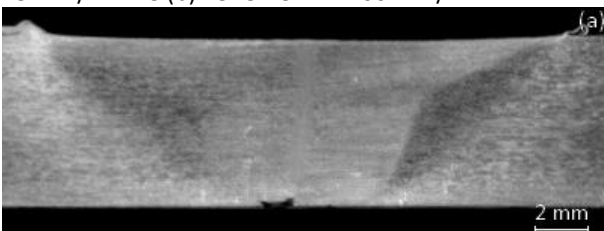


Şekil 2. 1000 devirde SKK ile birleştirilmiş 3 mm kalınlıktaki levhaların makro görüntüleri: (a) ilerleme hızı: 100 mm/min ve (b) ilerleme hızı: 150 mm/min.

Bu alaşımın içyapısında ayrıca, yaşlandırma sertleştirmesi ile oluşturulan ve alaşımın yüksek mukavemetini sağlayan, ancak optik mikroskop ve hatta taramalı elektron mikroskopunda bile görülemeyen çökelti partikülleri ( $Mg_2Si$ ) bulunmaktadır.

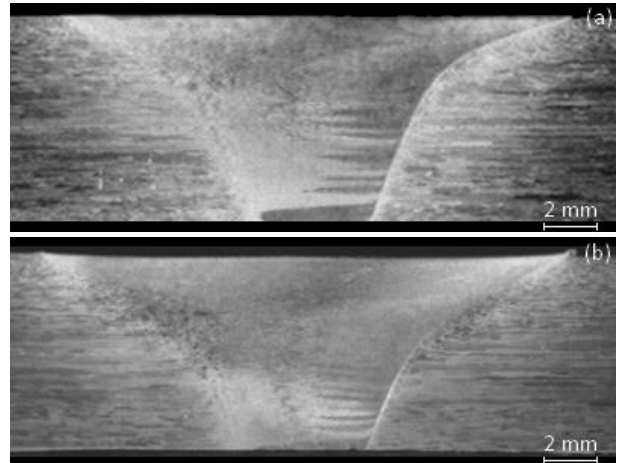


Şekil 3. 1000 devirde SKK ile birleştirilmiş 4 mm kalınlıktaki levhaların makro görüntüleri: (a) ilerleme hızı: 75 mm/min ve (b) ilerleme hızı: 100 mm/min.



Şekil 4. 1000 devirde SKK ile birleştirilmiş 5 mm kalınlıktaki levhaların makro görüntüleri: (a) ilerleme hızı: 75 mm/min ve (b) ilerleme hızı: 100 mm/min.

Baz malzemedan kaynak merkezine doğru gidildikçe iç yapıda söz konusu olan değişimleri göstermek amacıyla, 4 mm kalınlığındaki SKK'lı levhanın baz malzeme, geçiş bölgesi ve kaynak merkezinden alınan optik mikroskop görüntüleri Şekil 7'de örnek olarak verilmektedir. Bu şekilden baz levha yapısındaki alfa tanelerinin termomekanik olarak etkilenen bölgede (TMEB) ve kaynak bölgesinde küçüldüğü, yani kaynak işlemi sonrası iç yapıda tane rafinasyonu olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, SKK yöntemi ile Al-alaşımının kaynağı söz konusu olduğunda, kaynak işlemi sırasında söz konusu olan plastik deformasyondan ileri gelmektedir (Mishra and Ma 2005; Nandan et al. 2008; Çam and Mıstıkoğlu 2014).



Şekil 5. 1000 devirde SKK ile birleştirilmiş 6,2 mm kalınlıktaki levhaların makro görüntüleri: (a) ilerleme hızı: 50 mm/min ve (b) ilerleme hızı: 75 mm/min.

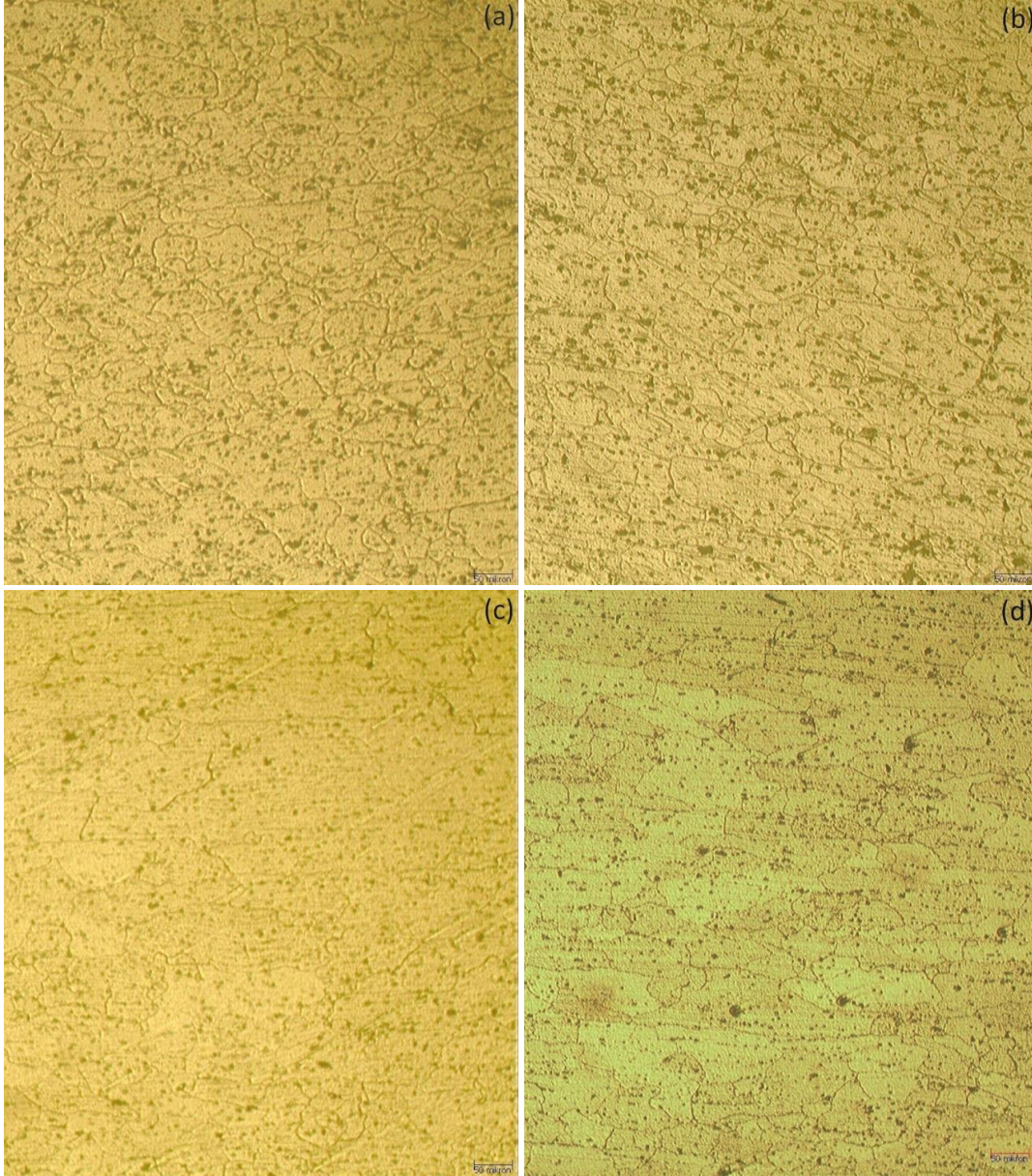
Şekil 8, 1000 devir/min dönme hızı kullanılarak iki farklı ilerleme hızında SKK ile birleştirilmiş 3 mm kalınlığındaki AA6061-T6 levhaların yeniden kristalleşen bölgesinde (DKB) tane rafinasyonu gerçekleştiğini göstermektedir. Ancak, tane rafinasyonu daha yüksek ilerleme hızı (150 mm/min) kullanıldığında söz konusu olan daha düşük ısı



girdisinden dolayı daha yüksek mertebededir, yani daha ince taneli bir içyapı oluşmaktadır.

Benzer sonuçlar, tüm diğer levha kalınlıklarındaki kaynaklarda da gözlenmiştir, Şekil 9-11. Ancak, bu şekillerin tamamı (Şekil 8-11) karşılaştırıldığında tane rafinasyonunun ince levhalarda (3 mm ve 4 mm, özellikle de 3 mm kalınlığındaki levhada) daha belirgin ve oluşan alfa fazının daha ince taneli

olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle 4 mm ve 5 mm kalınlığındaki levhalar aynı devir ve aynı ilerleme hızlarında kaynak yapıldığından ince levhalardaki bu daha ince taneli yapı oluşumuna kaynak esnasındaki daha düşük ısı girdisi ile birlikte kalın levhalarda ısı transferinin daha yavaş ve dolayısıyla kaynak sonrası soğuma hızının daha düşük olmasının yol açtığı düşünülmektedir.

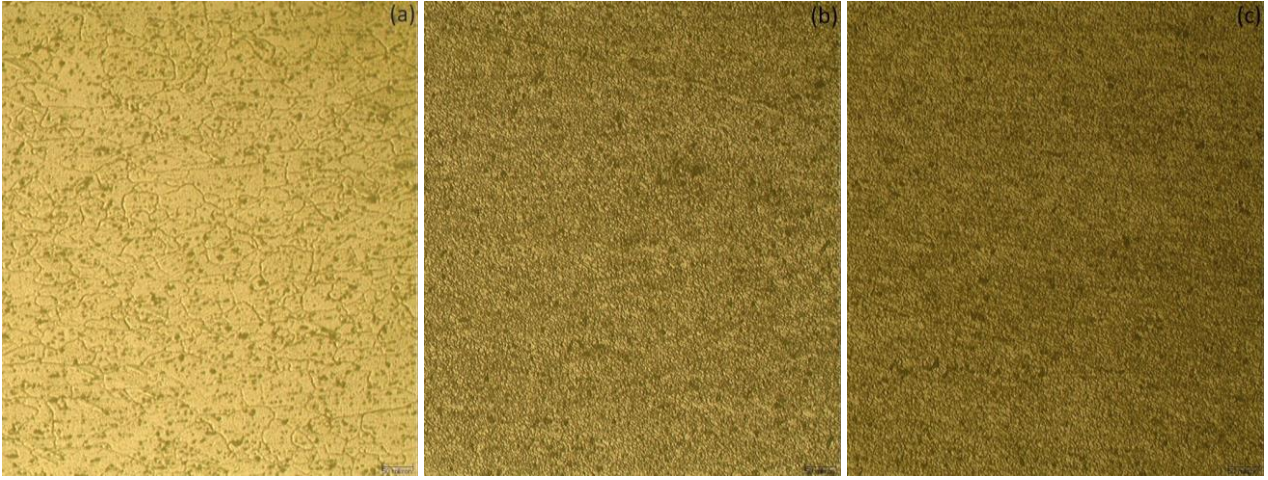


**Şekil 6.** Baz levhaların içyapılarını gösteren optik mikroskop görüntüleri. Levha kalınlıkları: (a) 3 mm, (b) 4 mm, (c) 5 mm ve (d) 6,2 mm.

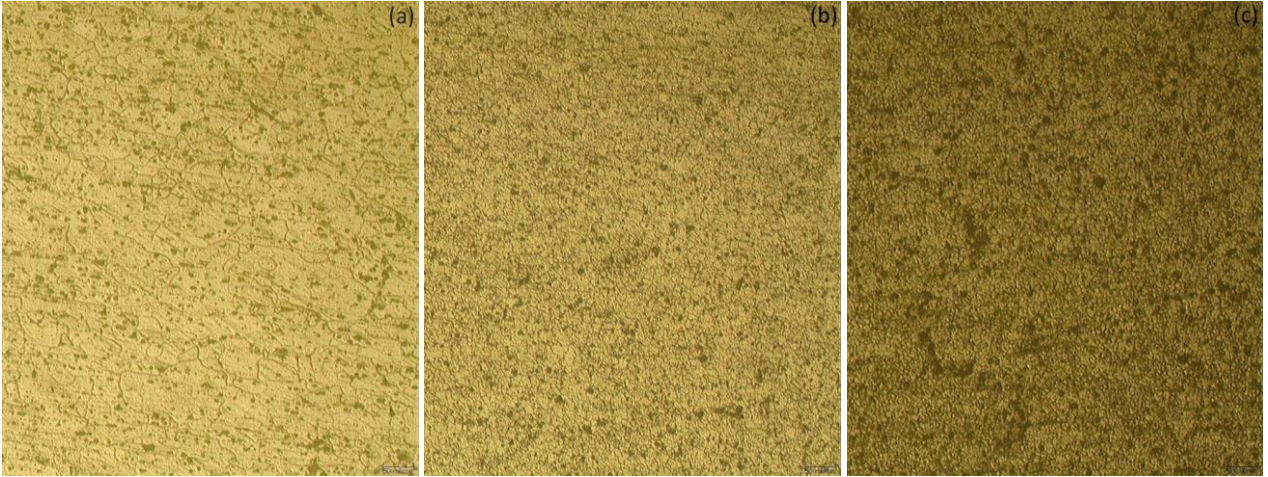




**Şekil 7.** 1000 devir ve 75 mm/min ilerleme hızında SKK yapılmış 4 mm kalınlıktaki levhada farklı bölgelerinin iç yapısını gösteren optik görüntüleri: (a) baz levha, (b) geçiş bölgesi (IEB+TMEB+DKB: ısıdan etkilenen bölge+termomekanik olarak etkilenen bölge+dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge) ve (c) DKB.

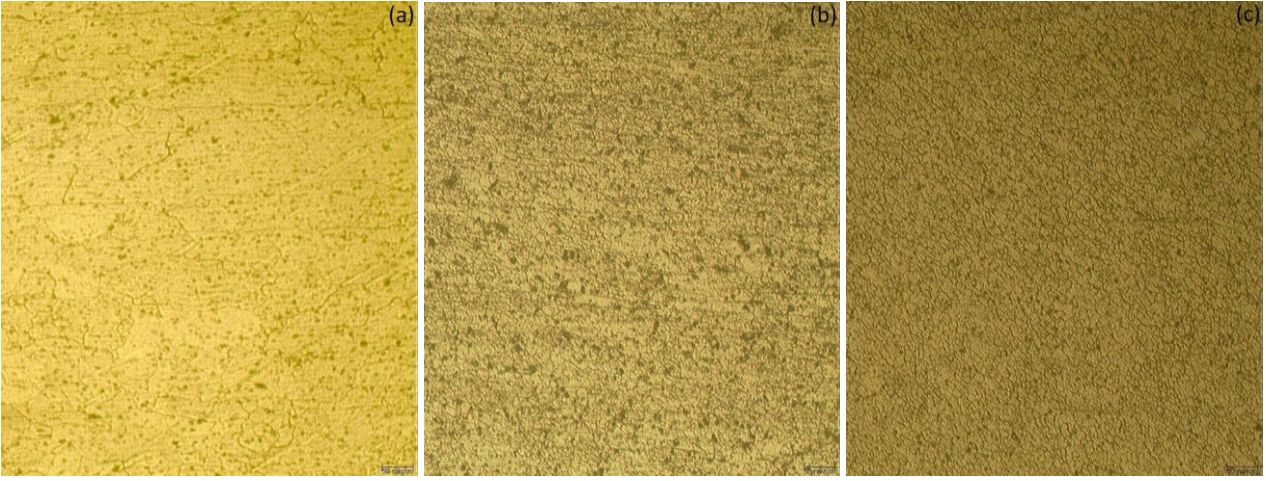


**Şekil 8.** 1000 devirde SKK yapılmış 3 mm kalınlığındaki Al6061-T6 levhalarda kaynak sonrası tane rafinasyonunu gösteren optik resimler: (a) baz levhanın iç yapısı, (b) 100 mm/min ilerleme hızında SKK'lı levhanın dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgesinin (DKB) iç yapısı ve (c) 150 mm/min ilerleme hızında SKK'lı levhanın dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgesinin (DKB) iç yapısı.

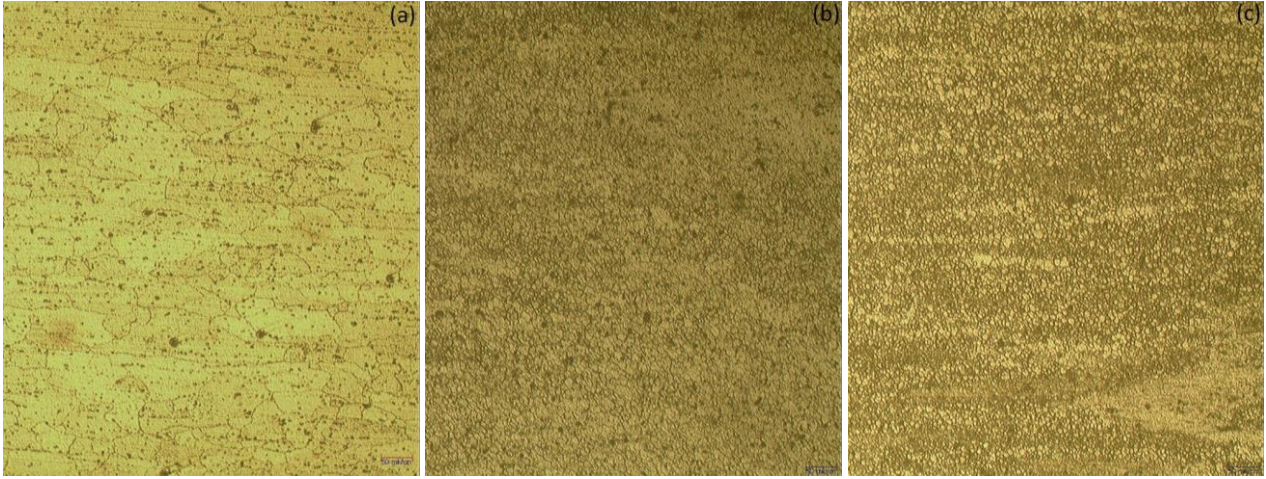


**Şekil 9.** 1000 devirde SKK yapılmış 4 mm kalınlığındaki Al6061-T6 levhalarda kaynak sonrası tane rafinasyonunu gösteren optik resimler: (a) baz levhanın iç yapısı, (b) 75 mm/min ilerleme hızında SKK'lı levhanın dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgesinin (DKB) iç yapısı ve (c) 100 mm/min ilerleme hızında SKK'lı levhanın dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgesinin (DKB) iç yapısı.





**Şekil 10.** 1000 devirde SKK yapılmış 5 mm kalınlığındaki Al6061-T6 levhalarda kaynak sonrası tane rafinasyonunu gösteren optik resimler: (a) baz levhanın iç yapısı, (b) 75 mm/min ilerleme hızında SKK'lı levhanın dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgesinin (DKB) iç yapısı ve (c) 100 mm/min ilerleme hızında SKK'lı levhanın dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgesinin (DKB) iç yapısı.



**Şekil 11.** 1000 devirde SKK yapılmış 6,2 mm kalınlığındaki Al6061-T6 levhalarda kaynak sonrası tane rafinasyonunu gösteren optik resimler: (a) baz levhanın iç yapısı, (b) 50 mm/min ilerleme hızında SKK'lı levhanın dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgesinin (DKB) iç yapısı ve (c) 75 mm/min ilerleme hızında SKK'lı levhanın dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgesinin (DKB) iç yapısı.

### 3.2. Sertlik Özellikleri

Çalışma kapsamında, metalografi numuneleri üzerinde levhanın tam ortasından olacak şekilde, 200 g yük kullanılarak kaynak bölgesinin bir ucundan diğer ucuna çok sayıda Vickers mikrosertlik ölçümü ( $HV_{0,2}$ ) yapılarak sertlik profilleri çıkarılmıştır. Her levha kalınlığı için iki farklı ilerleme hızında sürtünme karıştırma kaynağı yapılan levhaların sertlik profilleri karşılaştırma yapmak üzere Şekil 12'de verilmiştir. Genel olarak bu sertlik profillerine bakıldığında, tüm kaynaklı levhaların kaynak bölgesinde sertlik düşüşü gerçekleşmektedir. Diğer taraftan, metalografi çalışmasında tüm kaynaklı levhaların kaynak bölgesinde tane rafinasyonu olduğu tespit edilmişti

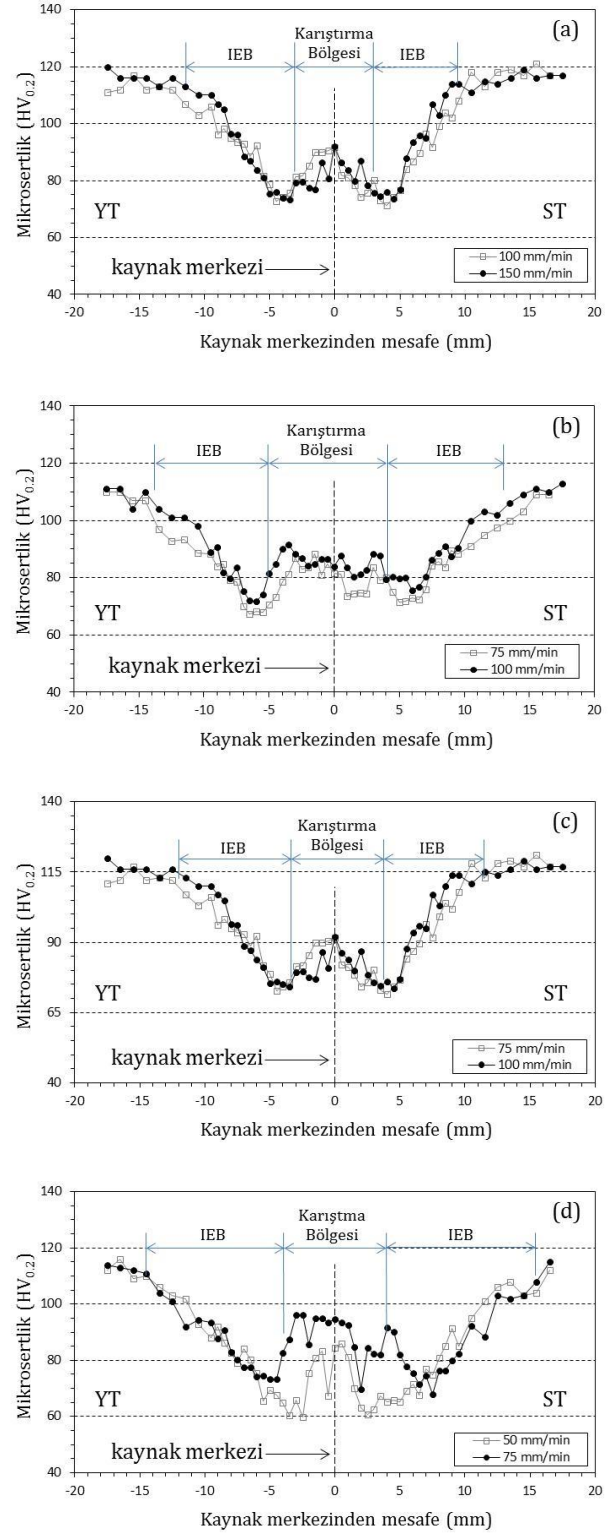
(Şekil 8-11). Kaynak bölgesindeki tane rafinasyonunun bu bölgede sertliği az da olsa artırması gerekir. Ancak, yaşlandırma sertleştirme yapılmış bu Al-alışımının (AA6061-T6) sertliği ve mukavemeti yaşlandırma işlemi ile aşırı doymuş alfa tanelerinden tüm içyapıya homojen dağılmış ince taneli (sadece geçirimli elektron mikroskobunda görülebilen) çökelti partiküllerinden gelmektedir. Yaşlandırma sertleştirme yapılmış Al-alışımının tamamında olduğu gibi bu alışımında da sertleştirme sonrası ısıya maruz kalma durumu söz konusu olduğunda (kaynak işleminde olduğu gibi), alışımın maruz kaldığı ısının mertebesine bağlı olarak, sertleştirme sağlayan ince taneli çökelti partiküllerinin çözünmesi ve/veya kabalaşması

nedeniyle sertlik ve mukavemet düşüşü olmaktadır. Bu sertlik düşüşü, kaynak sonrası hem ısıdan etkilenen bölgede hem de kaynak dikişinde gerçekleşmektedir. Kaynak dikişindeki (karıştırma bölgesi) sertlik kaybı sertleştirici çökelti partiküllerinin çözülmesinden kaynaklanırken, IEB'deki sertlik kaybı ise aşırı yaşlanmadan (yani çökelti partiküllerinin kabalaşmasından) dolayı olmaktadır (Woo et al. 2007).

Kaynak dikişinde tane rafinasyonu bu sertlik kaybını kısmen telafi ettiğinden IEB'de aşırı yaşlanma sonucu oluşan sertlik kaybı daha fazla olmaktadır. Bunun bir sonucu olarak genellikle minimum sertlik değerleri, tüm ergitme kaynaklarında olduğu gibi SKK sonucunda da bu bölgede olmaktadır. Bu çalışmada da, tüm kaynaklı levhaların kaynak bölgesinde sertlik düşüşü olduğu ve sertlik minimumunun da IEB'de olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, her levha kalınlığı için daha yüksek ilerleme hızında elde edilen kaynaklı levhaların kaynak bölgesindeki sertlik ve mukavemet kaybı daha düşük hızda elde edilen kaynaklı levhalara göre daha düşük mertebededir. Bunun nedeni de, daha yüksek hızda yapılan kaynaklardaki ısı girdisinin daha düşük hızdaki kaynaklarınkine nazaran daha düşük olması, dolayısıyla içyapıdaki etkilenmenin daha düşük mertebede kalmasıdır.

Bir başka bulgu ise, kaynak bölgelerindeki en yüksek oranda sertlik düşüşünün en kalın (6,2 mm) levhada gerçekleşmiş olmasıdır. Bunun nedeni, bu levhaların birleştirilmesi için kullanılan karıştırıcı takım omuz çapının ve yüzey alanının daha büyük olmasından ötürü ısı girdisinin en yüksek düzeyde olması ve levha kalınlığının diğerlerine göre fazla olmasından ötürü kaynak sonrası soğumanın da en düşük mertebede kalmasıdır.

Ayrıca, sertlik düşüşünün gerçekleştiği kaynak bölgesinin genişliği kalın levhalarda ince levhalardan daha geniştir. Bu sonuç da, makro görüntüleri ile uyum içerisindedir.



**Şekil 12.** 1000 devirde iki farklı ilerleme hızında SKK yapılmış AL6061-T6 levhaların sertlik profillerinin karşılaştırılması. Levha kalınlığı: (a) 3 mm, (b) 4 mm, (c) 5 mm ve (d) 6,2 mm. (YT: yığıma tarafı; ST: süpürme tarafı; IEB: Isıdan etkilenen bölge)



### 3.3. Çekme Deneyi Sonuçları

Sürtünme karıştırma kaynaklı levhalardan çıkarılan çekme numunelerinin deney sonuçları aşağıda tablo şeklinde özetlenmiştir. Her bir kaynaklı levhadan en az 3 numune çekilerek ortalama değerler hesaplanmıştır. Bu ortalama değerler kullanılarak da kaynak performans değerleri hesaplanmıştır. Kaynak performans değerleri akma sınırı performansı, çekme mukavemeti performansı ve uzama performansı olarak belirlenmiştir. Bu performans değerlerini hesaplamak için baz levhanın % 0,2 akma sınırı, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri literatürde verilen değer

aralıklarındaki minimum değerler olarak alınmıştır. Performans değerlerinin belirlenmesinde aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır:

$$\text{Akma Sınırı Performansı (\%)} = (\text{Kaynaklı Levhanın \%0,2 Akma Sınırı} / \text{Baz Levhanın \%0,2 Akma Sınırı}) \times 100$$

$$\text{Çekme Mukavemeti Performansı (\%)} = (\text{Kaynaklı Levhanın Çekme Muk.} / \text{Baz Levhanın Çekme Muk.}) \times 100$$

$$\text{Uzama Performansı (\%)} = (\text{Kaynaklı Levhanın \% Uzaması} / \text{Baz Levhanın \% Uzaması}) \times 100$$

**Tablo 2.** Çekme deneyi sonuçları

Numune	İlerleme Hızı (mm/min)	%0,2 Akma Sınırı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Akma Sınırı Performansı (%)	Çekme Mukavemeti Performansı (%)	Uzama Performansı (%)
BM	--	276	310	12	---	---	---
SKK'lı Levha (3 mm)	100	170; 161; 162 ( <b>164</b> )	220; 220; 221 ( <b>220</b> )	4,2; 4,3; 4,1 ( <b>4,2</b> )	59	71	35
	150	178; 183; 181 ( <b>181</b> )	224; 233; 230 ( <b>229</b> )	4,5; 4,2; 4,4 ( <b>4,4</b> )	66	74	37
SKK'lı Levha (4 mm)	75	152; 150; 152 ( <b>151</b> )	218; 213; 216 ( <b>216</b> )	4,9; 5,3; 5,2 ( <b>5,1</b> )	55	70	43
	100	155; 156; 153 ( <b>155</b> )	222; 223; 221 ( <b>222</b> )	5,6; 5,6; 5,5 ( <b>5,6</b> )	56	72	47
SKK'lı Levha (5 mm)	75	158; 154; 161 ( <b>158</b> )	212; 215; 216 ( <b>214</b> )	5,7; 5,8; 5,5 ( <b>5,7</b> )	57	69	48
	100	160; 162; 164 ( <b>162</b> )	226; 227; 229 ( <b>227</b> )	5,8; 5,0; 4,7 ( <b>5,2</b> )	59	73	43
SKK'lı Levha (6,2 mm)	50	140; 146; 147 ( <b>144</b> )	200; 211; 210 ( <b>207</b> )	3,9; 4,1; 4,1 ( <b>4,0</b> )	52	67	33
	75	148; 148; 150 ( <b>149</b> )	211; 210; 212 ( <b>211</b> )	4,9; 5,3; 4,6 ( <b>4,9</b> )	54	68	41

Not: Parantez içerisinde koyu olarak verilen değerler ortalama değerlerdir. Baz levha mekanik özellikleri olarak literatürden bu alaşım için (AA6061-T6) verilen değer aralıklarındaki minimum değerler alınmıştır (Int Kyn. 1).

Tablodan görüleceği üzere, farklı kalınlıktaki tüm levhaların, 1000 min<sup>-1</sup> devir hızında, yukarıda geometrileri verilen karıştırıcı uçlar kullanılarak yapılan kaynak işlemlerinde kullanılan her iki ilerleme hızında da oldukça yüksek kaynak performansı değerleri elde edilmiştir. Ancak, farklı kalınlıktaki tüm kaynaklı levhalar için geçerli olmak üzere, kaynak işlemi sırasında daha yüksek ilerleme

hızının kullanılması durumunda elde edilen mukavemet performansı değerleri, daha düşük hız kullanılarak elde edilen kaynaktakilere nazaran biraz daha yüksektir. 6,2 mm kalınlığındaki levha dışındaki diğer levha kalınlıklarında (3, 4 ve 5 mm) elde edilen kaynak mukavemet performansları sırasıyla %74, %72 ve %73'tür. Bu değerler oldukça yüksek olup, sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan kaynak

parametrelerinin uygun olduğunu göstermektedir. 6,2 mm kalınlığındaki levhalarda yapılan kaynaklar düşük ilerleme hızında (50 mm/min) %67 ve yüksek ilerleme hızında (75 mm/min) %68'lik bir kaynak mukavemet performansı değeri göstermiştir. Bu değerler daha ince levhalardaki kaynaklı bağlantıların mukavemet performansından biraz düşüktür. Ancak, et kalınlığı arttıkça kaynak esnasında ısı girdisi arttığından ve kaynak hızını düşürmek gerektiğinden bu normaldir.

Şekil 13'den görüleceği üzere, çekme deneyi numunelerinin tamamında kırılma IEB'de gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar ile Şekil 12'de verilen sertlik profilleri uyum içerisindedir. Şekil 12'den görüleceği üzere, tüm kaynaklı bağlantılarda en düşük sertlik değerleri çekme numunelerin kırıldığı IEB'de söz konusudur. Ayrıca, çekme numunelerinin kaynak bölgesi, çekme deneyi esnasında plastik olarak şekil değiştirirken, daha yüksek mukavemetli olan baz malzeme kısımları elastik bölgede kalmakta ve çekme deneyi sonunda elde edilen % uzama değerlerine herhangi bir katkıda bulunmamaktadır. Bu nedenle, mukavemet performans değerleri yukarıda bahsedildiği üzere oldukça yüksek iken, Tablo 2'den görüleceği üzere bağlantılardan elde edilen uzama performansı değerleri daha düşük seviyedir (% 33 ile % 48 arası).



**Şekil 13.** Çekme deneyi sonunda kırılma yerlerini gösteren örnek numuneler (Her bir levha kalınlığı için ikişer numune örnek olarak verilmiştir).

Dolayısıyla, sonuçlar olumlu olup, belirlenen kaynak parametreleri ile bu et kalınlığındaki AA6061-T6 levhaların sürtünme karıştırma kaynağının yapılabileceği görülmüştür.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, dört farklı kalınlıktaki (3, 4, 5 ve 6,2 mm) AA6061-T6 levhalar, her bir levha kalınlığı için uygun karıştırıcı takımlar kullanılarak, SKK yöntemiyle başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Elde edilen kaynaklı bağlantıların hiçbirinde kaynak hatasına rastlanılmamıştır.

Tüm kaynaklı bağlantıların kaynak dikişinde, dinamik olarak yeniden kristalleşme sonucunda oluşan tane rafinasyonu (ince taneli yapı oluşumu) gözlenmiştir. Buna ilaveten, kaynaklı bağlantıların tümünde minimum sertlik değerlerinin, aşırı yaşlanmanın söz konusu olduğu IEB'de olduğu tespit edilmiştir. 3, 4, 5 ve 6,2 mm kalınlığındaki kaynaklı bağlantılarda, sırasıyla %74, %72, %73 ve %68 mukavemet performans değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, farklı karıştırıcı takım omuz çapına ve farklı levha kalınlığına göre uygun kaynak parametrelerinin tayininde, d/t oranının etkili bir oran olduğu görülmüştür.

#### Kaynaklar

- Çam, G., 2011. Friction Stir Welded Structural Materials: Beyond Al-Alloys. *International Materials Reviews*, 56, 1-48.
- Çam, G., and İpekoğlu, G., 2017. Recent Developments in Joining of Aluminium Alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91 (5-8), 1851-1866.
- Çam, G., and Mıstıkoğlu, S., 2014. Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23 (6), 1936-1953.
- Çam, G., İpekoğlu, G., and Serindağ, H.T., 2014. Effects of use of higher strength interlayer and external cooling on properties of friction stir welded AA6061-T6 joints. *Science and Technology of Welding and Joining*, 19 (8), 715-720.



- Çam, G., Mistikoglu, S., and Pakdil, M. 2009. Microstructural and mechanical characterization of friction stir butt joint welded 63%Cu-37%Zn brass plate. *Welding Journal*, 88 (11), 225s-232s.
- Çam, G., Serindağ, H.T., Çakan, A., Mistikoğlu, S., and Yavuz, H. 2008. The effect of weld parameters on friction stir welding of brass plates. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 39 (6), 394-399.
- Cao, J.Y., Wang, M., Kong, L., Zhao, H.X., and Chai, P. 2017. Microstructure, texture and mechanical properties during refill friction stir spot welding of 6061-T6 alloy. *Materials Characterization*, 128, 54-62.
- Elangovan, K., and Balasubramanian, V. 2008. Influences of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir-welded AA6061 aluminum alloy joints. *Materials Characterization*, 59 (9), 1168-1177.
- Feng, A. H., Chen, D. L., and Ma, Z. Y. 2010. Microstructure and low-cycle fatigue of a friction-stir-welded 6061 aluminum alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41A, 2626-2641.
- İpekoğlu, G., and Çam, G., 2014. Effects of initial temper condition and postweld heat treatment on the properties of dissimilar friction-stir-welded joints between AA7075 and AA6061 aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45A (7), 3074-3087.
- İpekoğlu, G., Erim, S., and Çam, G., 2014a. Investigation into the influence of post-weld heat treatment on the friction stir welded AA6061 Al-alloy plates with different temper conditions. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45A (2), 864-877.
- İpekoğlu, G., Erim, S., and Çam, G., 2014b. Effects of temper condition and post weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of friction stir butt welded AA7075 Al-alloy plates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70 (1), 201-213.
- İpekoğlu, G., Erim, S., Kiral, B. G., and Çam, G., 2013. Investigation into the effect of temper condition on friction stir weldability of AA6061 Al-alloy Plates. *Kovove materialy*, 51 (3), 155-163.
- İpekoğlu, G., Kiral, B. G., Erim, S., and Çam, G., 2012. Investigation of the effect of temper condition friction stir weldability of AA7075 Al-alloy plates. *Materiali in Tehnologije*, 46 (6), 627-632.
- Küçükömeroğlu, T., Şentürk, E., Kara, L., İpekoğlu, G., and Çam, G. Microstructural and mechanical properties of friction stir welded nickel-aluminum bronze (NAB) alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance (JMEPEG)*, 25 (1), 320-326.
- Lim, S.G., Kim, S.S., Lee, C.G., Yim C.D., and Kim, S.J. 2005. Tensile behavior of friction-stir-welded AZ31-H24 Mg alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36A (6), 1609-1612.
- Liu, H.J., Hou, J.C., Guo H. 2013. Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy. *Materials & Design*, 50, 872-878.
- Mishra, R.S., and Ma, Z.Y. 2005. Friction Stir Welding and Processing., *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50, 1-78.
- Miyazawa, T., İwamoto, Y., Maruko, T., and Fujii, H. 2012. Development of high strength Ir based alloy tool for friction stir welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 17 (3), 213-218.
- Nandan, R., DebRoy, T., and Bhadeshia, H.K.D.H., 2008. Recent Advances in Friction-Stir Welding - Process, Weldment Structure and Properties. *Progress in Materials Science*, 53 (6), 980-1023.
- Sevvel, P., and Jaiganesh, V., 2015. Effect of tool shoulder diameter to plate thickness ratio on mechanical properties and nugget zone characteristics during fsw of dissimilar mg alloys. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68 (Suppl 1), S41-S46.
- Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Temple-Smith, P., and Dawes, C.J., December 1991. International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8 and US Patent Application No. 5,460,317.
- Thomas, W.M., Threadgill, P.L., and Nicholas, E.D. 1999. Feasibility of friction stir welding steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, 4 (6), 365-372.
- Trueba, L., Heredia, G., Rybicki, D., and Johannes L.B. 2015. Effect of tool shoulder features on defects and tensile properties of friction stir welded aluminum 6061-T6. *Journal of Materials Processing Technology*, 219, 271-277.
- Ueji, R., Fujii, H., Cui, L., Nishioka, A., Kunishige, K., and Nogi, K. 2006. Friction stir welding of ultrafine grained plain low-carbon steel formed by the martensite process. *Materials Science and Engineering A*, A423, 324-330.
- Woo, W., Choo, H., Brown, D.W., and Feng, Z. 2007. Influence of the tool pin and shoulder on microstructure and natural aging kinetics in a friction-stir-processed 6061-T6 aluminum alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 38A, 69-76.

Yang, J., Xiao, B.L., Wang, D., and Ma, Z.Y. 2010. Effects of heat input on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Mg–3Al–1Zn alloy. *Materials Science and Engineering A*, A527 (3), 708-714.

Zhang, D., Suzuki, M., and Maruyama, K. 2005. Microstructural evolution of a heat-resistant

magnesium alloy due to friction stir welding. *Scripta Materialia*, 52 (9), 899-903.

**İnternet kaynakları**

1-

<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma6061t6>, (13.08.2017)