



Makale / Research Paper

**Al 5754-Cu Malzeme Çiftinin Alın Sürtünme Karıştırma Kaynak
Kabiliyeti**

Recep ÇAKIR¹, Sare ÇELİK²

¹Personel Temin Merkezi Komutanlığı, Ankara, TÜRKİYE, cakirbey2006@hotmail.com

²Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Bölümü. 10145, Balıkesir, TÜRKİYE
scelik@balikesir.edu.tr

Özet: Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) bir katı hal birleştirme yöntemidir. Alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde özellikle kullanılan bu teknik, günümüzde farklı malzeme çiftlerinin başarılı bir şekilde birleştirilmesine olanak vermektedir. Bu çalışmada, alüminyum (AA5754) ve bakır levhalar 780, 1330 dev/dak takım dönme hızında, 20 ve 50 mm/dak kaynak hızında, 0 ve 1 mm takım konumlandırmasında sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirilmiştir. Kaynak parametrelerin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi incelenmiştir. Mekanik özelliklerinin tespitinde çekme testleri ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Kaynak bölgesi mikroyapıları optik mikroskobu ile incelenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Al-Cu parçaların çekme testi sonuçlarında %80,18 kaynak performansı elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sürtünme Karıştırma Kaynağı, AA5754, Cu, Mekanik Özellikler, Mikroyapı.

**Effect of Welding Parameters on Microstructure And Mechanical
Properties of Friction Stir Welded Al 5754-Cu**

Abstract: Friction Stir Welding (FSW) is a solid state joining process. FSW is especially suitable to join the sheet Al alloys, but now this technique allows different material couple to be welded continuously. In this study, 5754 aluminum alloy and commercially pure copper were produced at rotation rate (780, 1330 rpm) with pin position (0-1 mm) and weld speeds (20-50 mm min⁻¹) by friction stir welding. The effect of welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the joints was investigated. Tensile tests and microhardness measurements were used to determine the mechanical properties. Nugget zone microstructures were investigated by optical microscope. In the tensile test results, 80.18% weld performance was obtained in the friction stir welding merge of Al-Cu.

Keywords: Friction Stir Welding, AA5754, Cu, Mechanical Properties, Microstructure.

Bu makaleye atf yapmak için

Çakır, R., Çelik, S., "Al 5754-Cu Malzeme Çiftinin Alın Sürtünme Karıştırma Kaynak Kabiliyeti" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2017, 4(1); 82-91.

How to cite this article

Çakır, R., Çelik, S., "Effect Of Welding Parameters On Microstructure And Mechanical Properties Of Friction Stir Welded Al 5754-Cu" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2017, 4(1); 82-91.

1. Giriş

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), 1991 yılında İngiltere'deki Kaynak Enstitüsü (TWI) tarafından patenti alınmış ve geliştirilmiş olan bir yöntemdir [1]. SKK katı hal birleştirme yöntemi olarak önem kazanmış olup özellikle alüminyum alaşımlarında daha iyi mekanik özellikler elde edilebilmesi ve kısa sürede kaliteli birleştirmelerin gerçekleştirilmesi gibi avantajlarından dolayı, bu yöntem günümüzde önemli kaynak işlemleri arasına girmiştir [2,3]. Yöntemin klasik kaynak yöntemlerine nazaran uygulanmasında distorsiyon, porozite ve çatlakların olmaması gibi avantajı bulunmaktadır [4,5]. SKK ile alüminyum, magnezyum, titanyum, bakır ve çelik malzemelerin birleştirilmesinde çok iyi kaynak kalitesi sağlamıştır. Son zamanlarda da farklı malzeme çiftlerinin birleştirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır [6-8]. Farklı malzeme çiftlerinin hatasız birleştirilmesi özellikle bu malzeme çiftlerinin kimyasal alanda, nükleer alanda, otomotiv sektöründe, güç jeneratörleri ve elektronik endüstrisinde önemli uygulama alanları bulması yönüyle önemlidir [9,10]. Bakır ve alüminyum, iyi elektrik ve ısı iletkenliklerinin yanı sıra yüksek korozyon dirençleri ve mekanik özellikleri nedeniyle elektrik endüstrisi için önemli metaller arasında yer almaktadır. Özellikle yüksek doğru akım dağıtım hatlarında, bu iki metalin birbirine sağlam bir şekilde birleştirilebilmesi için farklı kaynak yöntemlerinin uygulanabilirliği araştırma konusu olmuş ve bakır/alüminyum birleştirilmesi ile ilgili çalışmalar gündeme gelmiştir [11]. AA1060 ve bakırın SKK yöntemi ile kaynak parametrelerinin kaynak bölgesi mikroyapısına ve mekanik özelliklere etkisinin incelendiği çalışmada yüksek dönme hızlarında ve 2-2.5 mm pim konumlandırması değerlerinde iyi çekme özellikleri elde edilmiştir [12]. AA6061 ile bakırın birleştirilmesinde mikroyapı değişikliği ve sıcaklık dağılımı üzerine yapılan çalışmada, kaynak bölgesinde $CuAl_2$, $CuAl$ ve Cu_9Al_4 gibi intermetalik bileşikler tespit edilmiştir [13]. Bakır (T2) ve alüminyum alaşımının (5A06) birleştirilmesinde kaynak ara bölgesinde yeni bir bakır-alüminyum intermetalik bileşik oluşmadığı belirtilmiştir [14]. AA 1060 ve bakır levhaların, karıştırıcı ucun alüminyum tarafına kaydırılması ile yapılan çalışmada ince, sürekli, düzgün bir Al-Cu intermetalik fazların oluşumuyla Al-Cu ara yüzeyinde iyi bir metalürjik bağlanma elde edilmiştir [15]. AA1050 ve saf bakır malzeme çiftinin birleştirilmesinde karıştırıcı uç alüminyum plaka tarafında tutularak yapılan çalışmada, hatasız birleşme sağlanarak, bakır/alüminyum ara yüzeyinde çok ince intermetalik bir tabaka meydana geldiği ifade edilmiştir [16]. Ancak, alüminyum ve bakır malzeme çifti ile yapılan çalışmalarda yeterince yüksek dayanımlara ulaşılamadığı ve takım konumlandırma parametresi ile az sayıda çalışma yapıldığı görülmüştür.

Bu çalışmada; 4 mm kalınlığına sahip alüminyum (AA5754) ve saf bakır levhalar 780 ve 1330 dev/dak takım dönme hızında, 20 ve 50 mm/dak takım ilerleme hızlarında, 0 ve 1 mm takım konumlandırmasında sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirilerek, birleştirmenin mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirme işlemi için 4 mm kalınlıkta Alüminyum 5754 ve %99,99 saflıkta elektrolitik bakır kullanılmıştır. Alüminyum ve bakır malzemeler 100x150 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Tablo 1'de alüminyum malzemenin, Tablo 2'de bakır malzemenin kimyasal içeriği, Tablo 3'de mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. AA 5754 malzemenin kimyasal içeriği (% ağırlık)

Si	Fe	Ti	Cr	Mg	Cu	Mn	Zn
0,111	0,295	0,007	0,006	2,834	0,009	0,125	0,008

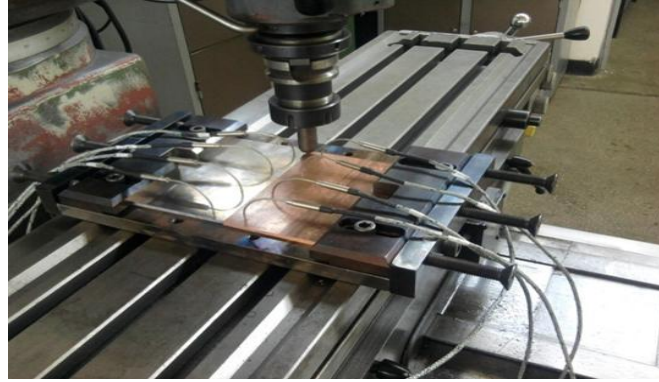
Tablo 2. Saf Cu malzemenin kimyasal içeriği (%ağırlık)

Cu	Al	Si	Ni	Fe	Zn	Sn
99.99	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001

Tablo 3. Alüminyum ve bakırın mekanik özellikleri

Özellikler	Alüminyum (Al) 5754	Bakır (Cu)
Çekme Mukavemeti (MPa)	206,4	231,38
Kopma Mukavemeti (MPa)	93,5	161,21
Uzama (%)	32,1	41,03
Sertlik (HV _c)	54	88

Cu malzeme ilerleme kenarına, alüminyum malzeme yığma kenarına alın alına, ayrılmayacak şekilde Şekil 1’de verildiği gibi bağlama kalıbına yerleştirilmiştir.



Şekil 1. Bağlama kalıbına yerleştirilmiş numuneler

Birleştirme sırasında parçalarla temas halinde olan karıştırıcı uça yüksek sıcaklıklar oluşacağından, işlem sırasında aşınma ve sertlik direncini koruyabileceği düşünülerek takım malzemesi yüksek hız çeliği (1.3343 tip) seçilmiştir. Üretimi yapılan karıştırıcı uca sertleştirme ısıl işlemi yapılarak 62 HRC sertlik değeri kazandırılmıştır. Çalışmada kullanılan takımın resmi Şekil 2’de verilmiştir. Takım omuz çapı 18 mm, pim ise M4x3.87 mm silindirik pimli yapılmıştır.



Şekil 2. SKK Takımı

Birleştirme işleminde ön çalışmalar ve literatür araştırması ile belirlenen sabit tutulan parametreler ise şunlardır:

- Takım dönme yönü : Saat yönü
- Başlık eğim açısı : 1,5°
- Kaynak başlangıcında bekleme süresi : 60 saniye

Deney optimizasyonu için değişik takım dönme ve ilerleme hızlarında deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde karıştırıcı uç alüminyum ve bakır levhaya 0 (sıfır) olarak konumlandırılmıştır. Yapılan birleştirmelerin hepsinde düşük çekme mukavemeti elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda ilerleme kenarına bakır ve alüminyum farklı farklı yerleştirilerek de deneyler yapılmıştır. Kaynak yüzey görünümünde sorun olmamakla birlikte içyapıda boşluklar oluşmuştur. Boşluklar ve kaynaklanmanın tam oluşmaması kaynaklı parçaların mekanik değerlerinin düşük olmasına neden olmuştur. Şekil 3’de “0” konumlu kaynak kesit görünümü verilmiştir. Kaynakta boşluklar açıkça görülmektedir. Malzemelerin tam olarak birbirine karışmadığı sonucuna varılmıştır. Daha sonra karıştırıcı ucun pozisyonunun değiştirilmesi ile çalışmalar yapılmıştır. Karıştırıcı uç bakıra nazaran daha yumuşak olan alüminyum tarafına konumlandırılmıştır. Ön çalışmalardan sonra takım konumlandırılmasının önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülerek, takım alüminyum tarafına 1 mm kaydırılarak, takım dönme hızı 780 ve 1330 dev/dak, ilerleme hızı ise 20 ve 50 mm/dak değerleri belirlenmiştir. Elde edilen birleştirmelerin kodlanmasında sırasıyla takım dönme hızı, ilerleme hızı ve takım konumlandırılması kullanılmıştır. Örnek;780/20/1.



Şekil 3. “0” konumlu kaynak kesit görünümü

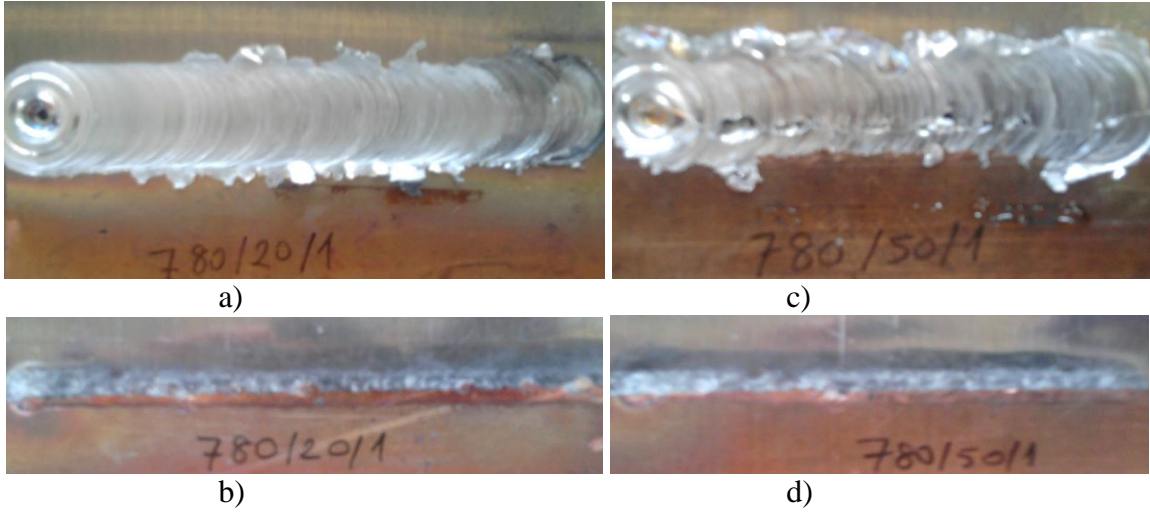
Elde edilen kaynaklı parçalar mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Çekme numuneleri kaynak yönüne dik olarak EN 10002-1 standardına uygun hazırlanmıştır. Deneylerin tamamında çekme hızı 2 mm/dak olarak belirlenmiştir. Şekil 4’de çekme numunesinin görüntüsü verilmiştir. Her deney için 3 adet çekme numunesi alınarak ortalaması alınmıştır. Numunelerin kaynak kesitine dik olarak üst ve alt yüzeyinden iki sıra Vickers mikrosertlik sertlik ölçümü yapılmıştır. İlk ölçüm üst yüzeyden 0,5 mm aşağıda, ikinci ölçüm alt yüzeyden 0,5 mm yukarıda olacak şekilde alınmıştır. Birleştirme sonrası kaynak bölgelerinde meydana gelen mikroyapı değişikliklerini tespit etmek amacı ile kaynak yönüne dik kesitte numuneler alınarak 220-1200 nolu zımparalar ile zımparalanmıştır. 3 µm ve 1 µm elmas pasta ile parlatması yapılarak dağlayıcı ile yüzey dağlanmıştır. Dağlama için bakır tarafı için, 100 ml saf su, 4 ml doymuş sodyum klorik, 2 g potasyum dikromat ve 5 ml sülfürik asitten oluşan dağlama reaktifi, alüminyum tarafı ise keller çözeltisi kullanılmış ve Nikon eclipse MA100 optik mikroskobu ile incelenmiştir.



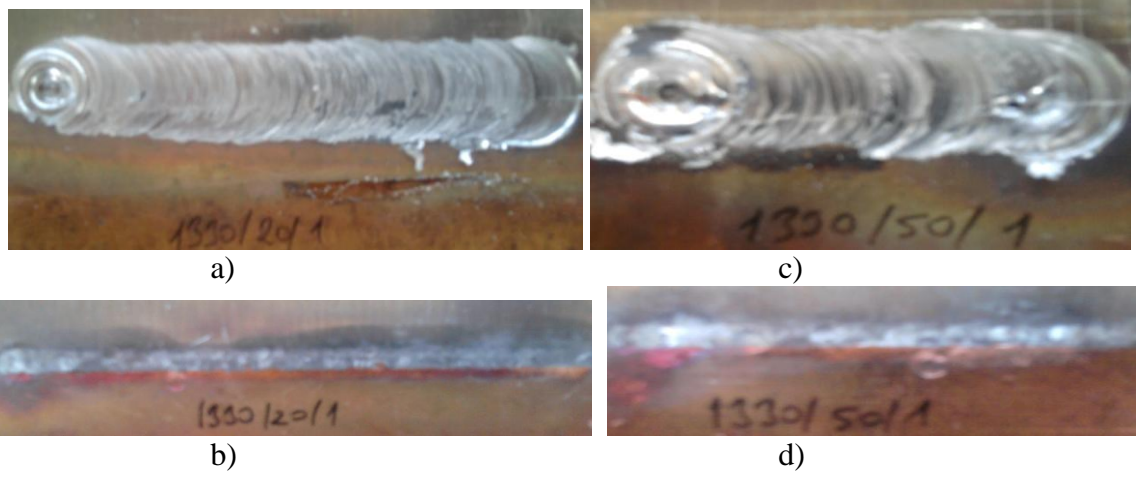
Şekil 4.Çekme numunesi

3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

SKK ile birleştirilen parçalardan alınan kaynak yüzeyleri ve kök görüntüleri Şekil 5. 1-2’de verilmiştir. Kaynak yüzeyleri ve kök görüntüleri incelendiğinde ilerleme hızının düşük olduğu birleştirmelerde (20 mm/dak) kaynakta boşluk, çukur, birleşme yetersizliği gibi kaynak hatalarına rastlanılmamıştır. İlerleme hızı arttığında ise (50 mm/dak.) kaynak yüzey kalitesinin azaldığı ve boşluklar oluştuğu görülmektedir.

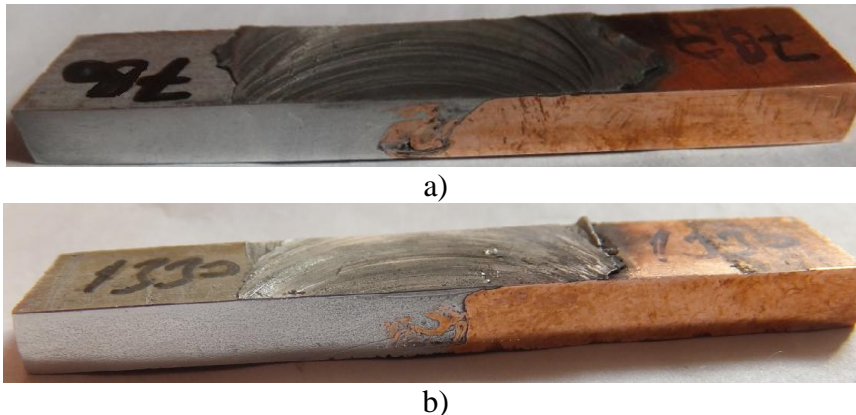


Şekil 5. 1) Kaynak yüzeyleri ve kök görüntüleri; a)780/20/1 numune yüzey, b) 780/20/1 numune kök, c)780/50/1 numune yüzey, d) 780/50/1 numune kök



Şekil 5. 2) Kaynak yüzeyleri ve kök görüntüleri; a)1330/20/1 numune yüzey, b) 1330/20/1 numune kök, c)1330/50/1 numune yüzey, d) 1330/50/1 numune kök

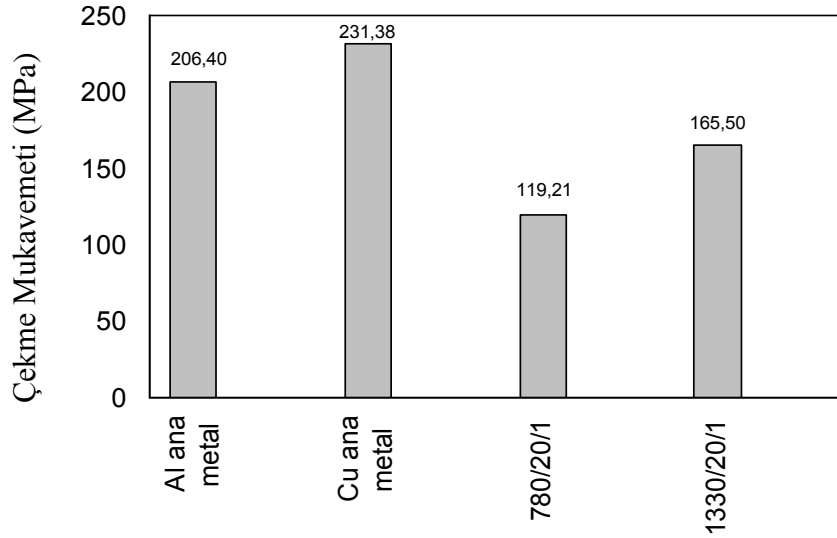
Ayrıca, takım konumlandırılması yapılarak SKK işlemi sonrası, numunelerin kaynak yönüne dik doğrultuda alınan kesit görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Kaynak kesit görüntüleri incelendiğinde, her iki birleştirmede de karışım bölgesi net bir şekilde görülmektedir. Şekil 6 a'da karışımın daha büyük parçacıklar halinde olduğu, Şekil 6 b'de ise daha ince bakır parçacıkların alüminyum malzeme içinde varlığı görülmektedir.



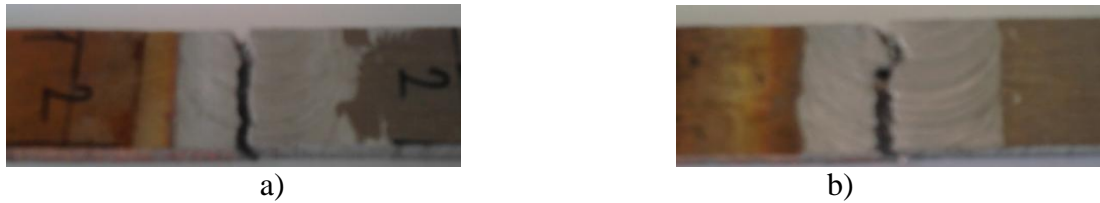
Şekil 6. Kaynak kesit görüntüleri, a) 780/20/1 numune, b) 1330/20/1 numune

Birleştirmelerin dayanım değerlerini tespit etmek amacıyla yapılan çekme testleri sonuçları grafik olarak Şekil 7’de verilmiştir. Ana metallerin çekme mukavemeti Al için 206,4 MPa, Cu için 231,38 MPa elde edilmiştir. En büyük çekme mukavemeti 1330/20/1 nolu numunede 165,50 MPa elde edilmiştir. 780/20/1 numunesinde çekme mukavemeti 119,21 MPa değeri elde edilmiştir. 780/50/1 ve 1330/50/1 numunelerinde ise çekme dayanımları düşük (50 MPa altında) çıkmıştır. 1330 dev/dak takım dönme hızında 780 dev/dak takım dönme hızına göre alüminyum matris içinde bakır parçacıkların homojen ve küçük parçacıklar şeklinde karışması Al-Cu birleşmesinde ara yüzeyde iyi bir bağlanma meydana getirerek dayanım değerlerinin artmasını sağlamıştır. Takım ilerleme hızının mekanik değerlere etkisi incelendiğinde; ilerleme hızının artması ile çekme dayanımlarında düşüşler gerçekleşmiştir. Bunun nedeni olarak yüksek ilerleme hızında alüminyumun ve bakırın tam olarak karışımının gerçekleşemediği ve iyi bir birleşmenin sağlanamaması olarak değerlendirilmiştir. Takım kaydırmasında, “0” konumlu birleştirmelerde birkaç geniş Cu parçacık Al matris ile kaynak bölgesinde karışmakta iken 1 mm takım konumlandırmasına irili ufaklı birçok bakır parçacığın Al matris içerisinde karışması dayanım değerlerinin yükselmesini sağlamıştır.

Çekme testi sonrası elde edilen kopma yüzeyleri Şekil 8’de verilmiştir. Çekme deneyi sonucunda kopmalar genellikle kaynak bölgesinde ve alüminyumun ısı tesiri altındaki bölgesinde (ITAB) gerçekleşmiştir. Kopmaların literatüre uygun olarak alüminyum tarafında olması, kaynak bölgesinin alüminyum tarafında oluşması ve Al ana metalinin çekme mukavemetinin Cu ana metalinden düşük olmasına bağlanmıştır [11].Kopma yüzeyleri incelendiğinde; çekme dayanımı yüksek numunenin diğerine göre daha girintili çıkıntılı olduğu ortaya çıkmıştır.

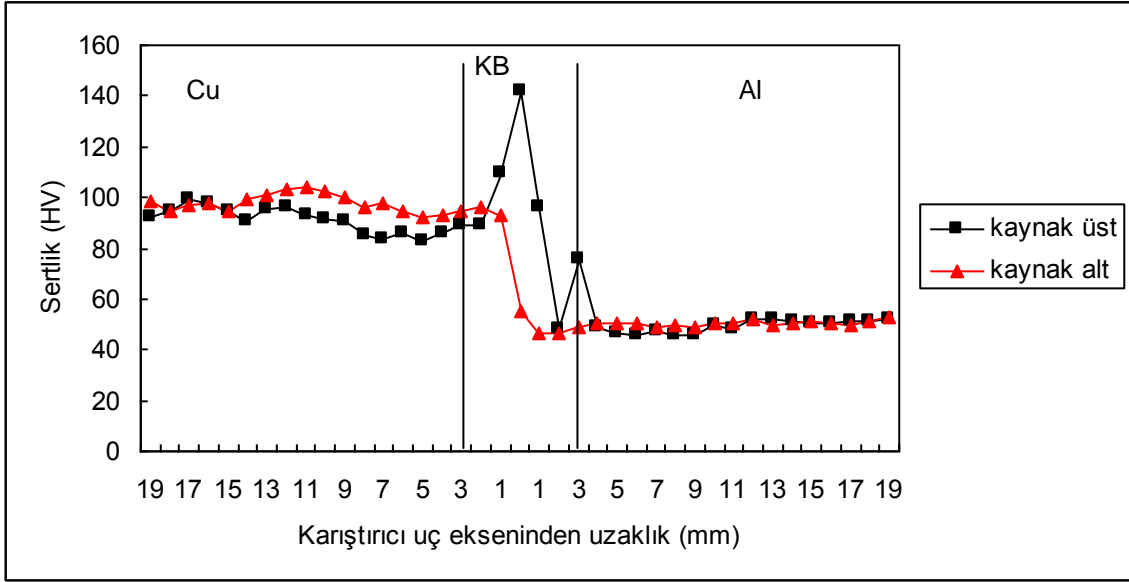


Şekil 7.Çekme testi sonuçları

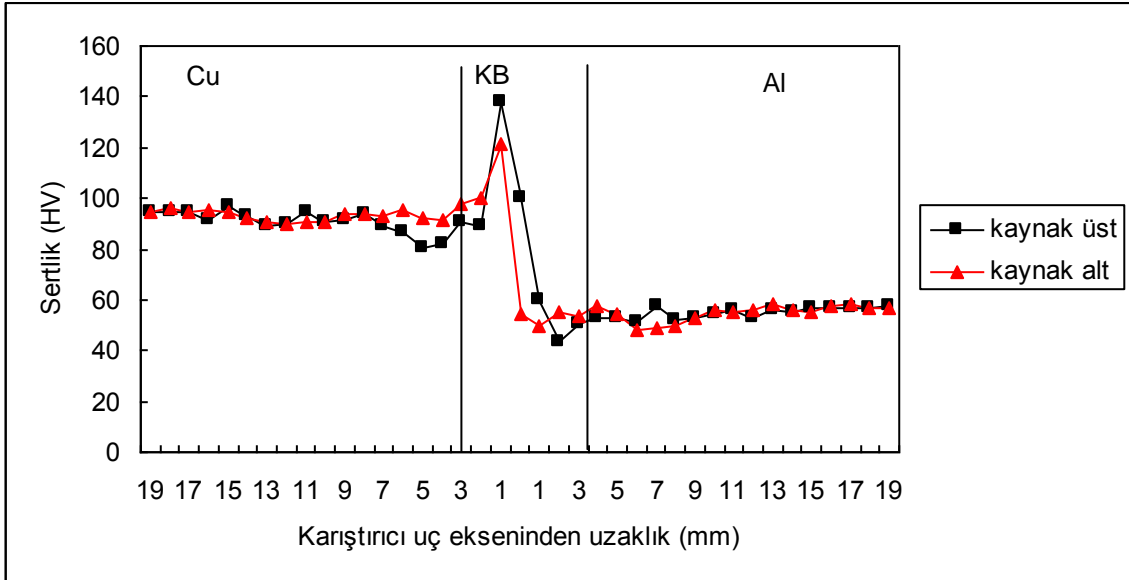


Şekil 8. Çekme testi sonrası yüzey görüntüleri a) 780/20/1 nolu numune, b) 1330/20/1 nolu numune

780/20/1 ve 1330/20/1 nolu numunelerinin kaynak alt ve üst bölgelerinin sertlik değerleri incelenmiştir. Şekil 9 ve Şekil 10’da kaynaklı numunelerin sertlik değişimleri verilmiştir. Ana metallerin sertlik değerleri ise; Cu ana metali için 88 HV, Al ana metali için ise 54 HV olarak elde edilmiştir.



Şekil 9. 780/20/1 nolu numunenin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

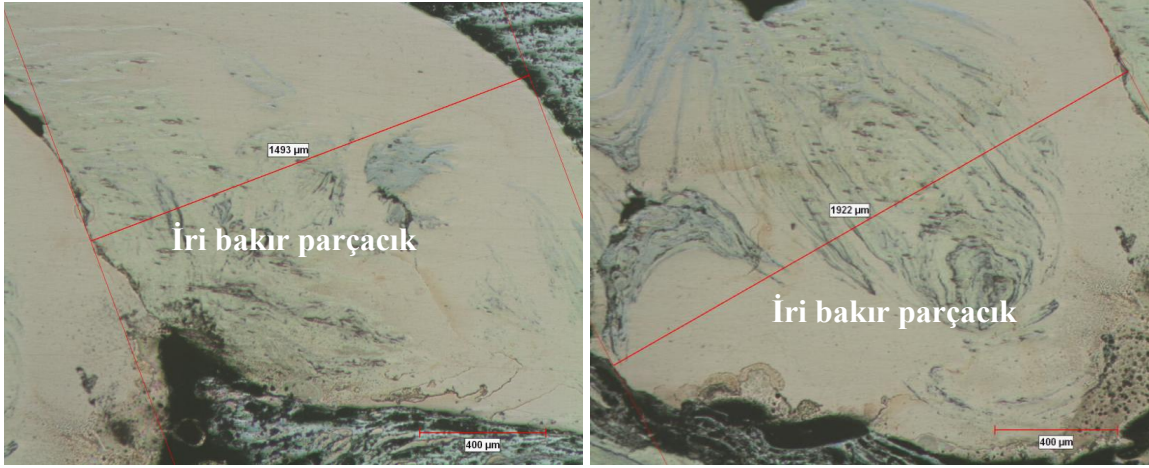


Şekil 10. 1330/20/1 nolu numunenin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

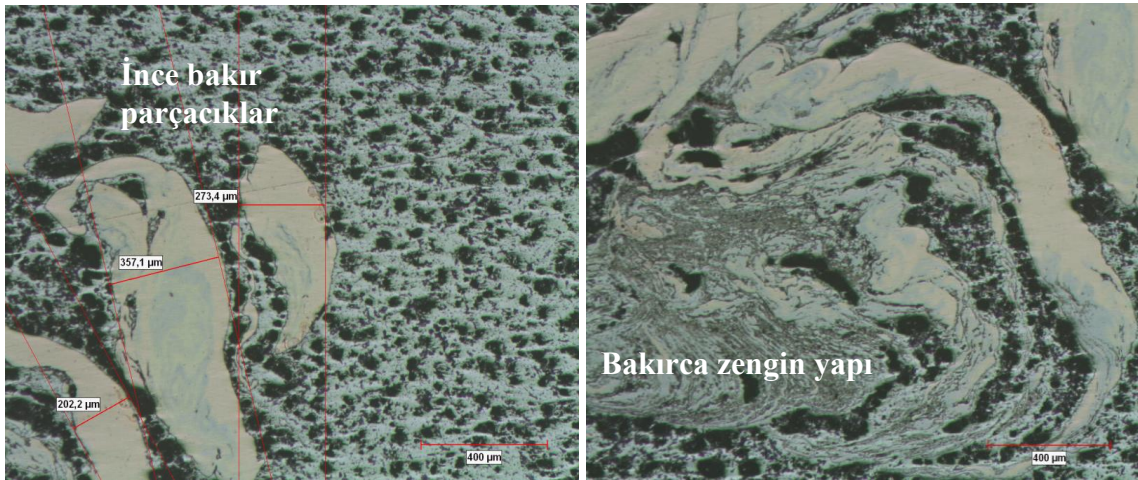
Şekil 9’da 780/20/1 numunesinde özellikle kaynak üst bölgesindeki sertlik artışları kaynak merkezindeki iri bakır parçacıkların olması ve intermetalik bileşenlerin varlığına bağlanmıştır. Şekil 10’da 1330/20/1 numunesinde sertlik değerlerindeki değişimlerin daha az olması mikroyapı içinde bakır partiküllerin daha homojen ve küçük parçacıklar şeklinde dağılım göstermesi olarak düşünülmüştür.

Kaynak bölgelerinin mikroyapı incelemesinde bütün numunelerin kaynak merkezi, alüminyum tarafı ve bakır tarafı ayrıntılı olarak incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, kaynak bölgesinin, karıştırıcı ucun pim kısmının alüminyum tarafına belirli değerlerde (1mm) kaydırılmasına bağlı olarak alüminyum tarafında olduğu tespit edilmiştir.

Bütün numunelerin mikroyapıları incelenmiş, kıyaslamak amacıyla 780/20/1 ve 1330/20/1 nolu numunelerin mikroyapıları sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 11. 780/20/1 nolu numunenin kaynak merkezindeki bakır parçacıklar



Şekil 12. 1330/20/1 nolu numunenin kaynak merkezindeki bakır parçacıklar

Mikroyapı incelemesinde; mukavemeti yüksek birleştirmede (1330/20/1) irili ufaklı birçok bakır parçacığının kaynak merkezinde düzenli olarak dağıldığı, tabakalı kompozit bir yapı oluşturarak iyi bir bağlantı sağladığı şeklinde değerlendirilmiştir. Mukavemeti düşük birleştirmede (780/20/1) kaynak merkezinde büyük bakır parçacıkların olduğu ve mekanik bağlanmanın tam sağlanamaması nedeniyle mukavemetinin istenen değerlere ulaşamadığı düşünülmüştür. Alüminyum matris içinde bakır parçacıkların homojen ve küçük parçacıklar şeklinde karışması Al-Cu birleşmesinde ara yüzeyde iyi bir bağlanma meydana getirmekte olup mekanik değerlerin artmasını sağlamıştır.

“0” konumlu yapılan birleştirmelerde birkaç geniş Cu parçacık Al matris ile kaynak bölgesinde karışmakta iken 1 mm takım konumlandırmasına irili ufaklı birçok bakır partikül Al matris içerisinde karışmış ve çekme dayanımlarının yükselmesini sağlamıştır. Bu durum literatür ile uyum göstermiştir. Takım konumunun “0” olduğu durumda kaynak yüzeyinde çatlak ve boşlukların meydana geldiği, birçok geniş bakır parçacıkların Al matristen sert olması nedeniyle deformasyonun ve karıştırmanın zorlaştığı ve bağlanmanın zayıfladığı belirtilmiştir. [12].

780 dev/dak takım dönme hızında yapılan birleştirmede çekme dayanımının diğer (1330dev/dak) takım dönme hızında elde edilen çekme dayanımından düşük çıkması, oluşan sıcaklığın az olması nedeniyle tam plastikliğin sağlanamaması nedeniyle Al-Cu arasındaki karışımı tam sağlayamaması olarak değerlendirilmiştir. 1330 dev/dak takım dönme hızında Al-Cu birleştirilmesinde gerekli sıcaklıkların olduğu bunda Al ana malzeme ile karıştırıcı ucun dönme hareketi ile Cu malzemeden taşıdığı bakır parçacıkların, karışımın kolaylaştığı ve Al-Cu ara yüzeyinde iyi bir bağlanma meydana geldiği değerlendirilmiştir. Takım dönme hızının 780 dev/dak’dan 1330

dev/dak'ya artmasıyla, ısı girdisinin arttığı ve iyi bir bağlanmanın meydana geldiği yapılan diğer bir çalışmada ortaya konulmuştur [12].

4. Sonuçlar

1. Bu çalışmada, ilerleme kenarına yerleştirilen saf Cu malzeme ile yığma kenarına yerleştirilen AA5754 malzeme, 780, 1330 dev/dak takım dönme hızında, 20, 50 mm/dak takım ilerleme hızlarında, 1 mm takım konumlandırmasında sürtünme karıştırma kaynağı başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. “0” takım konumlandırmasında kaynak kesitinde gözle görülür boşluklar ortaya çıkmış ve çekme dayanım değerleri düşüktür. Takım kaydırması yapılarak daha iyi mekanik değerler elde edilmiştir.
2. Çekme testi sonuçları incelendiğinde; en yüksek çekme dayanımı 1330 dev/dak takım dönme hızında, 20 mm/dak takım ilerleme hızında ve 1 mm takım konumlandırmasında 165,50 MPa olarak elde edilmiş olup Al ana metaline göre (206,4 MPa) %80,18 kaynak performansı elde edilmiştir.
3. Malzeme çiftinin farklı olduğu birleştirmelerde takım konumlandırmasının mekanik değerleri etkileyen önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir. “0” konumlu birleştirmelere nazaran takım kaydırması (1 mm) ile dayanım değerleri yükseltmiştir. İlerleme kenarına daha sert metalin, yığma kenarına daha yumuşak metalin yerleştirilmesinin iyi kaynak özellikleri verdiği ortaya çıkmıştır. Yumuşak metalin ilerleme kenarına taşınmasının daha kolay olduğu tespit edilmiştir.
4. Birleştirmelerin sertlikleri incelendiğinde; dayanım değeri düşük numunede sertlik değişimleri fazla olmuştur. Bu kaynak merkezindeki iri bakır parçacıkların ve intermetalik fazların oluşumuna bağlanmıştır. Yüksek mukavemetli numunede sertlik değerleri incelendiğinde, daha homojen bir karışımın olması ile ana malzemeye yakın sertlik değerlerinin olduğu tespit edilmiştir.
5. 1330 dev/dak. takım dönme hızında, 780 dev/dak. takım dönme hızına göre sürtünme karıştırma kaynağı için uygun ısı girdisinin sağlandığı ve optik incelemelerinde de iyi bir kaynaklanmanın meydana geldiği ortaya çıkmıştır.

5. Kaynaklar

- [1] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. TempleSmith, C.J. Dawes: International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8., The Welding Institute, TWI, (1991).
- [2] W.B. Lee, S.B. Jung: The joint properties of copper by friction stir welding, *Materials Letters* 58, (2004), pp.1041- 1046.
- [3] K.V. Jata, S.L. Semiatin: Continuous Dynamic Recrystallization During Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys, *Scripta mater.* 43 , (2000), pp.743-749.
- [4] Y.M. Hwang, P.L. Fan, C.H. Lin: Experimental study on Friction Stir Welding of copper metals, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, (2010), pp.1667-1672.
- [5] M. Felix Xavier Muthu, V. Jayabalan: Tool travel speed effects on the microstructure of friction stir welded aluminum-copper joints, *Journal of Materials Processing Technology* 217, (2015), pp. 105-113.
- [6] A. Abdollah-Zadeh, T. Saeid, B. Sazgari,: Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints, *Journal of Alloys and Compounds*, 460, (2008), pp. 535-538.

- [7] P. M. Mukuna, T. A. Esther: Friction Stir Welding of Dissimilar Materials between Aluminium Alloys and Copper - An Overview, Proceedings of the World Congress on Engineering 2013 Vol III, WCE 2013, July 3 - 5, 2013, London, U.K.
- [8] I. Galvão, D. Verdera, D. Gesto, A. Loureiro, D.M. Rodrigues: Influence of aluminium alloy type on dissimilar friction stir lap welding of aluminium to copper, Journal of Materials Processing Technology 213, (2013), pp. 1920– 1928.
- [9] T. Saeid, A. Abdollah-Zadeh, B. Sazgari,: Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum–copper lap joints made by friction stir welding, Journal of Alloys and Compounds ,490, (2010), pp.652–655.
- [10] A. Scialpi, L.A.C. De Filippis, P. Cavaliere,: Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy, Materials and Design,28, (2007), pp.1124–1129.
- [11] Z. Barlas, H. Uzun: Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Cu/Al-1050 aln birleştirmesinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 25, No 4, (2010), pp.857-865.
- [12] P. Xue, D.R. Ni, D. Wang, B.L. Xiao, Z.Y. Ma,: Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al–Cu joints, Materials Science and Engineering A , 528, (2011), pp.4683–4689.
- [13] J. Ouyang, E. Yarrapareddy, R. Kovacevic: Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper, Journal of Materials Processing Technology ,172, (2006), pp.110–122.
- [14] P. Liu, Q. Shi, W. Wang, X. Wang, Z. Zhang: Microstructure and XRD analysis of FSW joints for copper T2/aluminium 5A06dissimilar materials, Materials Letters,62, (2008), pp.4106–4108.
- [15] P. Xue, B.L. Xiao, D.R. Ni, Z.Y. Ma,: Enhanced mechanical properties of friction stir welded dissimilar Al–Cu joint by intermetallic compounds, Materials Science and Engineering A,527, (2010), pp.5723–5727.
- [16] C. Genevois, M. Girard, B. Huneau, X. Sauvage, G. Racineux: Interfacial Reaction during Friction Stir Welding of Al and Cu, DOI: 10.1007/s11661-011-0660-9, The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International (2011).