

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI YAPILMIŞ Cu/Al-1050 ALIN BİRLEŞTİRMESİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Zafer BARLAS ve Hüseyin UZUN

Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Esentepe Kampusu, 54187, Serdivan-Sakarya
barlas@sakarya.edu.tr, huzun@sakarya.edu.tr

(Geliş/Received: 09.02.2010; Kabul/Accepted: 02.07.2010)

ÖZET

Bu çalışmada, saf bakır (Cu) ve alüminyum (Al-1050) levhaların, 515 min⁻¹ sabit takım devir hızında ve farklı kaynak hızlarında sürtünme karıştırma kaynağıyla alın-alına birleştirilebilirlikleri incelenmiştir. En düşük kaynak hızında (12 mm min⁻¹) başarılı bir Cu/Al-1050 birleşirmesi elde edilebilirken, kaynak hızının 30 ve 50 mm min⁻¹ e artmasıyla oldukça zayıf birleşirmeler gerçekleşmiştir. Bu nedenle çalışmada, 12 mm min⁻¹ kaynak hızındaki birleşirmenin mikroyapı karakterizasyonu yapılmış ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Bu birleşirmede optik ve taramalı elektron mikroskopunda mikroyapı incelemeleri ile enerji dağılımlı X-ışınları spektroskopisi (EDS), X-ışınları difraksiyonu (XRD), çekme testi ve mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri ve EDS analizleri, karışım bölgesinin alüminyumca zengin ve bakırca zengin yapıları içerdiğini göstermiştir. Kaynak bölgesinin XRD incelemelerinde, AlCu, Al₂Cu₃, AlCu₄ ve Al₄Cu₉ metaller arası bileşiklerin varlığı tespit edilmiştir. İmaj analiz programıyla bakırca zengin fazların karışım bölgesindeki hacimsel oranının yaklaşık %32 olduğu hesaplanmıştır. Çekme testi sonuçları, Cu/Al-1050 birleşirmesinin çekme mukavemetinin Cu ana metalinkinden %50, Al-1050 ana metalinkinden ise %24 düşük olduğunu göstermiştir. Mikrosertlik ölçümlerinde ise, karışım bölgesindeki sertliklerin ana metallere göre arttığı ve 74–280 HV arasında değiştiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma kaynağı, Cu/Al-1050 alın birleşirmesi, mikroyapı karakterizasyonu, mekanik özellikler

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FRICTION STIR WELDED Cu/Al-1050 BUTT JOINT

ABSTRACT

In this study, the weldability of pure copper (Cu) plate to aluminum (Al-1050) plate has been investigated at a constant tool rotation speed of 515 rpm and different weld speeds by friction stir welding. While a relatively sound Cu/Al-1050 joint was achieved at the lowest weld speed (12 mm min⁻¹), very poor joints were obtained at the higher weld speeds (30 and 50 mm min⁻¹). Therefore in this study, microstructural characterization and mechanical properties of the joint at weld speed of 12 mm min⁻¹ were evaluated. Microstructure investigations by optical microscope and scanning electron microscope, energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), X-ray diffraction (XRD), tensile test and microhardness measurements were carried out in this joint. Microstructure inspections and EDS analysis revealed that the stir zone of the joint consisted of aluminum-rich and copper-rich structures. AlCu, Al₂Cu₃, AlCu₄ and Al₄Cu₉ intermetallic compounds were detected in the weld region by XRD. Volume fraction of copper-rich phases in the stir zone was calculated by image analysis software which is approximately 32%. Tensile test results show that the tensile strength of Cu/Al-1050 joint lower 50% and 24% than that of Cu base metal and Al-1050 base metal, respectively. It was observed that hardness's in the stir zone increased when compared to the base metals and varied between 74 HV and 280 HV.

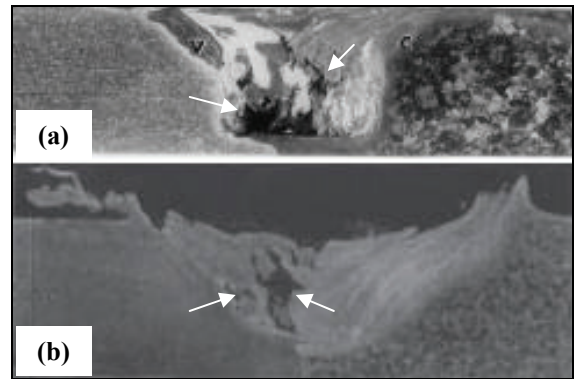
Keywords: Friction stir welding, Cu/Al-1050 butt joint, microstructural characterization, mechanical properties

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Farklı malzeme çiftlerinin birleştirilmesi uçak-uzay, otomotiv, kimya, nükleer, elektrik-elektronik ve enerji gibi endüstrilerdeki birçok uygulama için oldukça önem arz etmektedir [1–4]. Ancak, birleştirilecek olan malzemelerin sahip oldukları kimyasal, mekanik ve ısıl özelliklerindeki farklılıklar, geleneksel ergitme kaynak yöntemlerinin kullanımında bazı zorluklara yol açmaktadır [1]. Özellikle, kaynak bölgesinin mekanik özellikleri üzerine olumsuz etkisi olan sert ve gevrek metaller arası bileşik oluşumu, üstesinden gelinmesi gereken bir başka problem olarak görülmektedir [5, 6].

Bakır (Cu) ve alüminyum (Al), iyi elektrik ve ısıl iletkenliklerinin yanı sıra yüksek korozyon dirençleri ve mekanik özellikleri nedeniyle elektrik endüstrisi için önemli metaller arasında yer almaktadır [7]. Son yıllarda, özellikle yüksek doğru-akım dağıtım hatlarında, bu iki metalin birbirine sağlam bir şekilde birleştirilebilmesi için farklı kaynak yöntemlerinin uygulanabilirliği araştırma konusu olmaktadır [8]. Sürtünme kaynağı [9, 10], ultrason kaynağı [11], difüzyon kaynağı [12, 13] ve lazer kaynağı [14] gibi yöntemler, bakırın alüminyuma birleştirilmesi için incelenmekte olmasına rağmen, günümüzde diğer kaynak yöntemlerinin kullanılmasıyla ilgili çalışmalar da devam etmektedir. Bir katı-hal birleştirme yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağının (SKK), bu amaca yönelik aday birleştirme tekniklerinden biri olduğu düşünülmektedir. Genel olarak, ergitme kaynak yöntemlerinde bakır ve alüminyumun birleştirilmesinde en önemli problemler arasında yer alan iş parçalarının çarpılması, kaynak bölgesinde oksitlenme, sıcak çatlama riski, gaz boşlukları oluşumu gibi kaynak problemlerinin, SKK yöntemiyle en düşük düzeye indirilmesi öngörülmektedir [15]. Son zamanlarda, özellikle alüminyum/çelik [16], alüminyum/magnezyum [17], alüminyum/paslanmaz çelik [18], bakır/pirinç [19–21] gibi metalik malzeme çiftlerinin birleştirilmesinde başarıyla uygulanan SKK yönteminin, bakırın alüminyuma bindirme ve alın kaynağı birleştirmeleri için kullanıldığı bazı çalışmaların da yapıldığı görülmektedir [1, 22–27]. Murr vd. [25] tarafından gerçekleştirilen başlangıç niteliğindeki bir çalışmada, Cu levhanın Al-6061 levhaya SKK ile alın kaynağı denenmiştir. Yazarlar, deneysel çalışmalarda süreklilik gösteren bir kaynak dikişinin elde edilemediğini ve karışım bölgesinde Şekil 1a'da oklarla gösterilen oyuk ve boşlukların meydana geldiğini belirtmişlerdir. Okamura ve Aota [26] ise Cu levhanın Al-6061 levhaya SKK ile birleştirilmesinde, karıştırıcı uç ekseninin levhaların alın-alına temas yüzeylerine göre olan konumunun etkisini incelemişlerdir. Karıştırıcı uç eksenini, levhaların alın-alına temas yüzeylerinde iken yapılan Cu/Al-6061

birleştirmesinin karışım bölgesinde, Murr ve vd.'nin [25] çalışma sonuçlarına benzer, boşluk şeklinde görülmüştür (Şekil 1b). Ancak araştırmacılar, karıştırıcı ucun Al-6061 levhaya doğru kaydırılması sonucu kaynak kalitesinin arttığını ve nispeten daha sağlam bir birleştirmenin gerçekleştirilebildiğini belirtmişlerdir. Ouyang vd. [1] tarafından yapılan bir başka çalışmada, Cu ile Al-6061-T6 levhaların farklı takım devir hızları ve kaynak hızlarında alın-alına birleştirilebilirliği araştırılmış, ancak kaynak bölgesinde tespit edilen metaller arası bileşiklerin sağlam bir birleştirme elde etmeye engel olduğu ifade edilmiştir. Liu vd. [27] tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise, T2 ısıl işlem görmüş Cu levhalar 5A06 Al alaşımı levhalarla, farklı takım devir hızları ve kaynak hızları uygulanarak birleştirilmiştir. Araştırmacılar bu çalışmada, en iyi birleştirme özelliklerinin 950 min^{-1} takım devir hızında ve 150 mm min^{-1} kaynak hızında gerçekleştirilebildiğini bildirmişlerdir. Bununla birlikte, bu parametrelerdeki birleştirmenin herhangi bir metaller arası bileşik içermediği ve çekme mukavemetinin Cu-T2 ana metalle hemen hemen aynı, 5A06 Al ana metalden ise yaklaşık %6 düşük olduğu belirlenmiştir [27]. Sonuç olarak yapılan araştırmalar, Cu/Al alın birleştirmeleriyle ilgili deneysel çalışma sayısının oldukça sınırlı olduğunu ve elde edilen sonuçların ise farklılıklar arz ettiğini göstermektedir. Dolayısıyla, kullanılan SKK parametrelerinin detaylı olarak sunulduğu ve özellikle farklı alaşımlardaki Al ve Cu malzemelerle ilgili deneysel çalışma sonuçlarının mikroyapı ve mekanik özellikler açısından değerlendirildiği farklı çalışmalara da ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, öncelikli olarak SKK ile nispeten sağlam bir Cu/Al birleştirmesinin gerçekleştirilebilmesi hedeflenmiş ve elde edilen birleştirmenin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir.



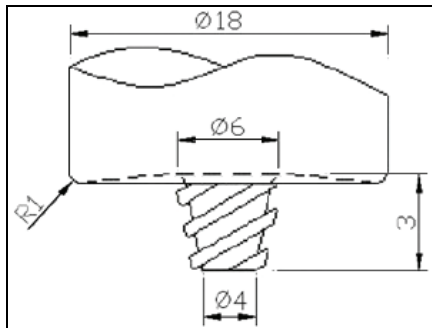
Şekil 1. SKK yöntemiyle Cu/Al birleştirmelerinde görülen kaynak hataları [25, 26] (Weld defects in Cu/Al joints by FSW)

Tablo 1. Saf Cu ve Al-1050 levhasal malzemelerin kimyasal içerikleri (Chemical compositions of pure Cu and Al-1050 plates)

Malzeme	Kimyasal içerik (% ağırlık)						
	Sn	Zn	Fe	Ni	Si	Al	Cu
Saf Cu	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	99,99
Al-1050	0,0024	0,02	0,45	0,0016	0,10	99,5	0,056

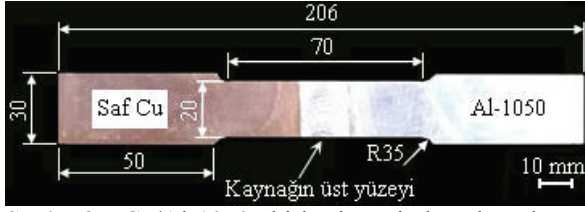
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada, 150×120×3 mm ebatlarında ve kimyasal içerikleri Tablo 1’de verilen saf Cu ve Al-1050 levhalar, SKK yöntemiyle alın-alına birleştirilebilmiştir. Birleştirme işlemleri öncesinde Cu levha kaynağın yığma kenarına (YK), Al-1050 levha ise ilerleme kenarına (İK) paslanmaz çelikten imal edilmiş bir altlık levha üzerine sabitlenmiştir. Cu/Al-1050 birleştirmeleri için AISI D2 çeliğinden, dış açılmış karıştırıcı uca sahip olan bir takım kullanılmıştır (Şekil 2). Karıştırıcı uç eksen, birleştirilecek levhaların alın-alına temas yüzeyleri eksen doğrultusunda ve levha yüzeyleri normaliyle 3° eğim açısı yapacak şekilde sabitlenmiştir. Birleştirmelerde takım, saat yönünde döndürülmüştür. Cu/Al-1050 birleştirmelerinde, 515 min⁻¹ sabit takım devir hızı ve 12, 30, 50 mm min⁻¹ olmak üzere üç farklı kaynak hızı (takım ilerleme hızı) uygulanmıştır. SKK ile birleştirme işlemlerinde, karıştırıcı uç Cu ve Al-1050 levha yüzeylerinden içeriye batırıldıktan ve takım omuz kısmı da levha yüzeylerine sürtünmeye başladıktan sonra ön-ısıtma amacıyla 15 saniye beklenmiş, sonrasında takıma ilerleme hareketi verilmiştir. Üç farklı kaynak hızında gerçekleştirilen birleştirmeler içerisinde nispeten en sağlam kaynak, 12 mm min⁻¹ kaynak hızında elde edilmiş ve çalışmada bu birleştirmenin mikroyapı ve mekanik özellikleri sunulmuştur. Ancak mikroyapı değerlendirmelerinde, konu ile ilgili yapılmış önceki çalışmalarda da [1, 22–27] vurgulandığı gibi, karışım bölgesi özelliklerinin Cu/Al-1050 birleştirmesinin performansı üzerine önemli etkileri olduğu için sadece bu bölgenin özellikleri incelenip değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Cu/Al-1050 birleştirilmelerinde kullanılan takımın geometrik detayları (ölçüler mm) (Geometrical details of the tool used for Cu/Al-1050 joints (dimensions in mm))

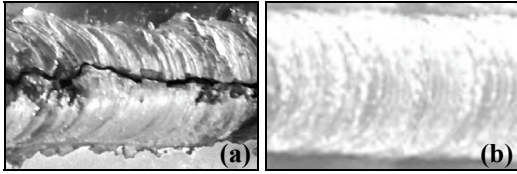
12 mm min⁻¹ kaynak hızında yapılan Cu/Al-1050 birleştirmesinin kaynak yönüne dik kesitinden, standart metalografi yöntemleri kullanılarak bir mikroyapı inceleme numunesi elde edilmiştir. Numunenin Cu tarafının dağlanması için 100 ml saf su, 4 ml doymuş sodyum klorür, 2 g potasyum dikromat ve 5 ml sülfürik asit içeriğine sahip dağlama reaktifi; Al-1050 tarafı için ise Keller dağlayıcı kullanılmıştır. Cu/Al-1050 birleştirmesinin mikroyapı görüntülemeleri ve incelemeleri için Clemex Vision Lite (sürüm 5.0) imaj analiz programı donanımlı Nikon Eclipse L150A optik mikroskop (OM) ile JEOL JSM 6060LV taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışınları spektroskopisi (EDS) kullanılmıştır. Cu/Al-1050 birleştirmesinin, saf Cu ve Al-1050 ana metallere göre olan kaynak performansının değerlendirilmesi için ise çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri, DIN EN 50123 standardına göre hazırlanan ana metaller ile Cu/Al-1050 birleştirmesine ait üçer adet çekme numunelerinde (Şekil 3), ilk ölçü boyu (l_0) 50 mm olan bir ekstansometre kullanılarak yapılmıştır. Ana metaller ve birleştirmeye ait üç numunenin ortalamaları çekme testi sonuçları olarak sunulmuştur. Birleştirmenin kaynak bölgesindeki Vickers mikrosertlik (HV) ölçümleri, mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numune yüzeyinin üst ve alt bölgelerinden, kaynak kesitine doğru 1'er mm içeriden ve kaynak yönüne dik doğrultularda sırasertlik şeklinde gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, Future-Tech FM 700 sertlik cihazında 9,81 N yük ve 30 sn bekleme süresi uygulanarak yapılmıştır. Kaynak bölgesi içerisindeki muhtemel faz değişikliklerinin tespiti için Rigaku marka cihazda, 20°<2θ<90° tarama aralığında, 40 kV–30 mA ve Cu/K-α radyasyon ışınıyla 0,02° mm⁻¹ tarama hızında X-ışını Difraksiyon (XRD) analizi yapılmıştır. XRD sonucu tespit edilen metaller arası bileşiklerin karışım bölgesi içerisindeki hacimsel oranının hesaplanması için imaj analiz programından faydalanılmıştır. ASTM E1245 standardı esas alınarak öncelikle, OM’de karışım bölgesinin ×500 büyütmede otuz farklı mikroyapı görüntülemesi yapılmıştır. Daha sonra her bir farklı mikroyapıdaki metaller arası bileşik oranı, kantitatif analiz yöntemiyle hesaplanmış ve bu otuz farklı mikroyapı bölgesinin ortalaması, karışım bölgesindeki metaller arası bileşik hacim oranı olarak sunulmuştur.



Şekil 3. Cu/Al-1050 birleşirmesinden hazırlanan çekme testi numunesi ve geometrik detayları (ölçüler mm) (Tensile test sample prepared from Cu/Al-1050 joint and its geometrical details (dimensions in mm))

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

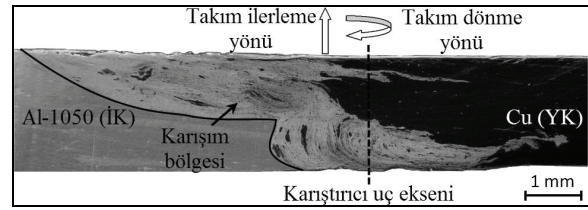
Şekil 4'de, 515 min^{-1} sabit takım devir hızında, en yüksek (50 mm min^{-1}) ve en düşük (12 mm min^{-1}) kaynak hızlarında gerçekleştirilen birleşirmelerin kaynak yüzey görünümleri gösterilmektedir. Yüksek kaynak hızlarının uygulandığı (30 ve 50 mm min^{-1}) Cu/Al-1050 birleşirmelerinde, kaynak işlemi sırasında ve hemen sonrasında, kaynak merkezi boyunca çatlamlar ve ayrılmalar meydana gelmiştir (Şekil 4a). Ancak, en düşük kaynak hızının uygulandığı 12 mm min^{-1} deki birleşirmede herhangi bir çatlama, kırılma vb hatalar görülmemiştir (Şekil 4b). Dolayısıyla bu çalışmada kullanılan, 515 min^{-1} sabit takım devir hızındaki 30 ve 50 mm min^{-1} kaynak hızlarında, yüksek kaynak hızına bağlı düşük ısı girdisinin sağlam bir Cu/Al-1050 birleşirmesi için yeterli olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 4. Farklı kaynak hızlarında gerçekleştirilen Cu/Al-1050 birleşirmelerinin kaynak yüzey görünümleri (a) 50 mm min^{-1} , (b) 12 mm min^{-1} (Weld surface appearances of Cu/Al-1050 joints performed at different weld speeds (a) 50 mm min^{-1} , (b) 12 mm min^{-1})

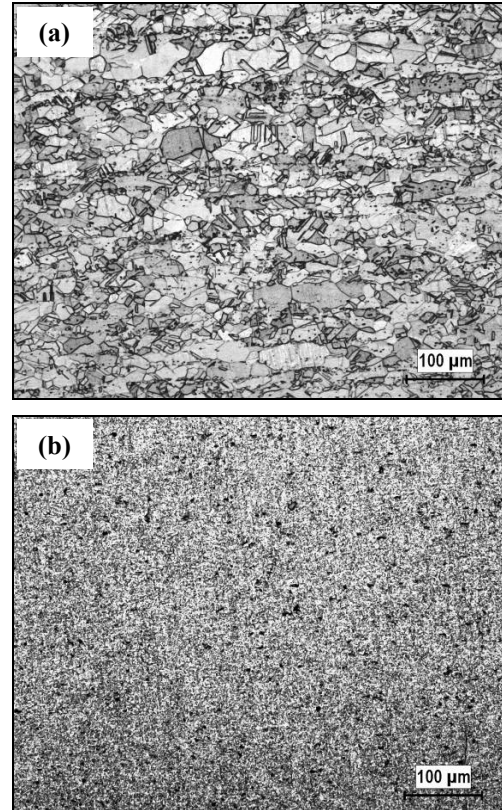
Şekil 5'de, 12 mm min^{-1} kaynak hızında yapılan Cu/Al-1050 alın kaynağının makroyapısı gösterilmektedir. Makroyapı incelemelerinde boşluk, oyuk, gözenek gibi kaynak hatalarının meydana gelmediği bir Cu/Al-1050 alın kaynağının gerçekleştirilebildiği belirlenmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, SKK sonrasında Cu ve Al-1050 ana metallerden belirgin bir şekilde ayırt edilebilen bir karışım bölgesi (KB) meydana gelmiştir. Bu bölge, SKK ile birleşirmelerde sıklıkla görülen oval ya da çanak şekilli bir görünümde olmayıp, özellikle Cu metal ile girintili-çukuntılara sahip asimetrik bir görünüm sergilemektedir. Kaynak kök kısmında ise yetersiz nüfuziyet, karışmamış bölge, çatlak oluşumu gibi kaynak hataları tespit edilmemiştir. Bu durum, karıştırıcı uç batma derinliğinin ve kullanılan diğer SKK parametrelerinin uygun olmasına bağlanmıştır. Levhaların alın-alına temas yüzeyleri veya bir başka

ifadeyle karıştırıcı uç eksenini dikkate alındığında, KB'nin alt kısımlarda Cu levhaya doğru, üst kısımlarda ise Al-1050 levhaya doğru uzandığı görülmektedir. Bu durum, esas olarak takım omuz kısmının dönme yönüne bağlı olarak plastikleşmiş malzemeyi taşıdığını göstermekle beraber, dış açılmış karıştırıcı ucun dönme hareketinin de uca yakın olan malzemeyi aşağıya doğru ötelediğini göstermiştir. Makroyapı incelemeleri, geleneksel SKK yöntemindeki gibi takım ekseninin birleştirilecek Cu ve Al levhaların alın-alına temas yüzeyleri doğrultusunda olması durumunda da, Okamura ve Aota'nın [26] çalışma sonuçlarından farklı olarak, tipik kaynak hataları meydana gelmeden Cu/Al birleşirmesi yapılabileceğini göstermiştir.



Şekil 5. Cu/Al-1050 birleşirmesinin makroyapı görünümü (Macrostructure appearance of Cu/Al-1050 joint)

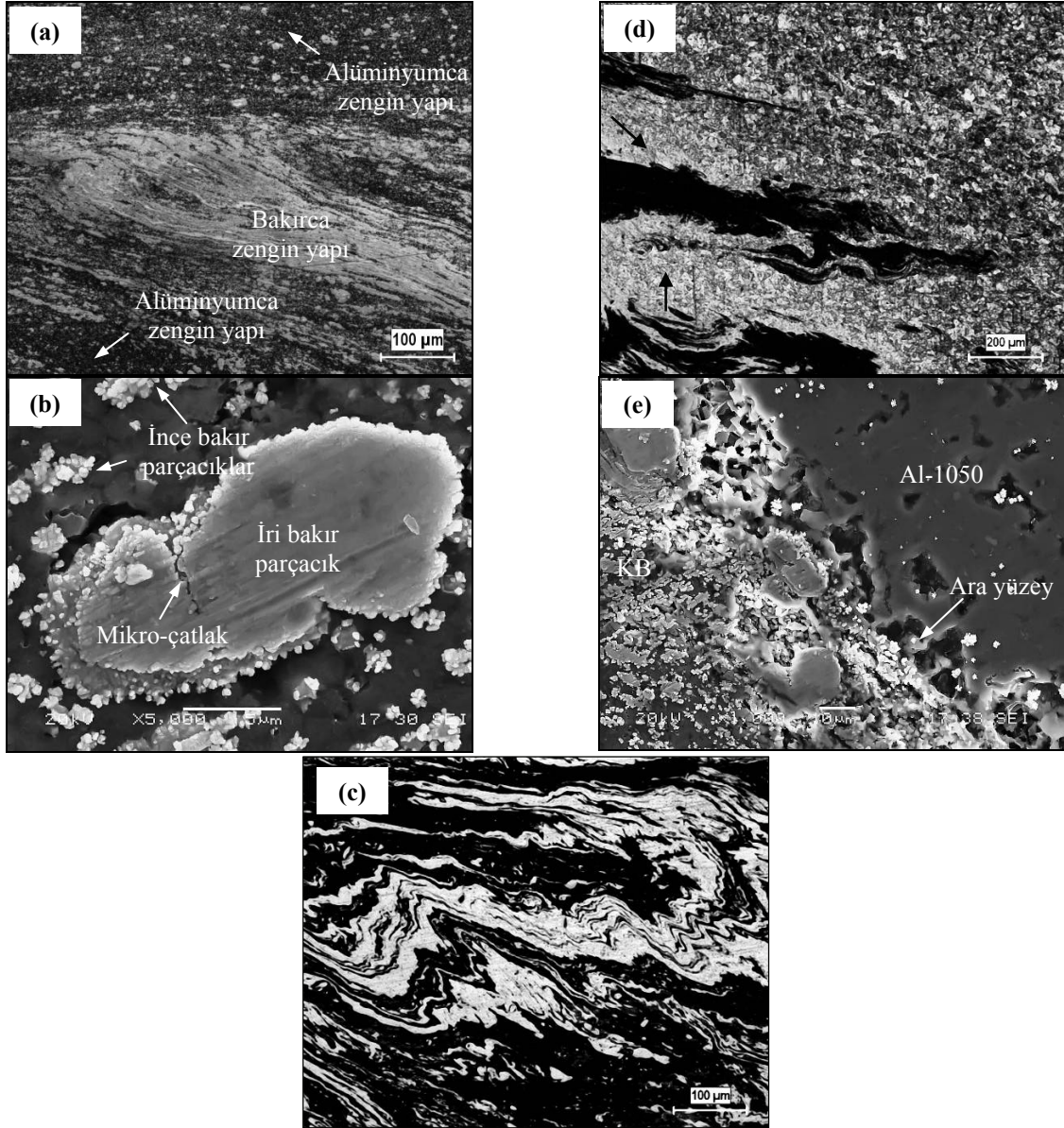
Saf Cu ve Al-1050 ana metallerin mikroyapıları Şekil 6'da gösterilmektedir. Cu ana metal yaklaşık $2-75 \mu\text{m}$ arasında değişen büyüklüklerde, düzensiz şekilli taneleri içerirken, Al-1050 eş-eksenli tanelerden meydana gelmiştir.



Şekil 6. Ana metallerin mikroyapı resimleri (a) saf Cu ve (b) Al-1050 (Microstructure images of the base metals (a) pure Cu and (b) Al-1050)

Tablo 2. Karışım bölgesindeki farklı yapıların EDS analiz sonuçları (EDS analysis results of different structures in the stir zone)

Yapı tanımı	Element	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc.
Alüminyumca zengin yapı	Al	Ka	1.197,96	21,887	93,975
	Cu	Ka	15,43	2,484	6,025
Bakırca zengin yapı	Al	Ka	55,28	4,738	17,347
	Cu	Ka	192,16	8,217	82,653
Bakırca zengin ince parçacık	Al	Ka	113,23	6,729	23,360
	Cu	Ka	202,83	9,007	76,640
Bakırca zengin iri parçacık	Al	Ka	57,70	4,803	14,118
	Cu	Ka	184,23	8,582	85,882

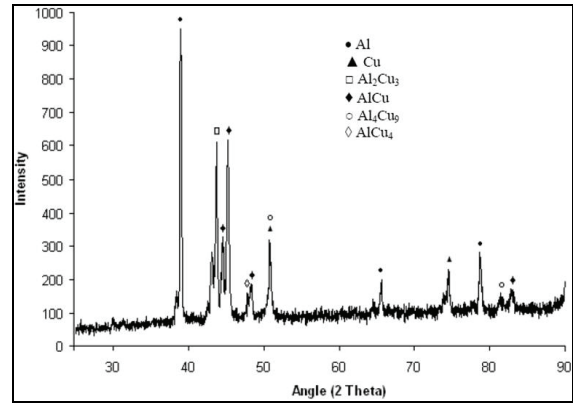


Şekil 7. Karışım bölgesinin OM ve SEM mikroyapı resimleri (a) alüminyumca zengin ve bakırca zengin yapılar, (b) ince bakır parçacıklar ve mikro-çatlaklı iri bakır parçacık, (c) bakırca zengin tabakalar, (d) KB ara yüzeyi çevresindeki bakıra ait tane yapısındaki farklılık, (e) Al-1050/KB ara yüzey geçiş bölgesi (OM and SEM microstructure images of the stir zone (a) aluminum-rich and copper-rich structures, (b) fine copper fragments and coarse copper fragment with micro-crack, (c) copper-rich layers, (d) difference in grain size of copper metal in the surroundings of the SZ interface, (e) transition region of Al-1050/SZ interface)

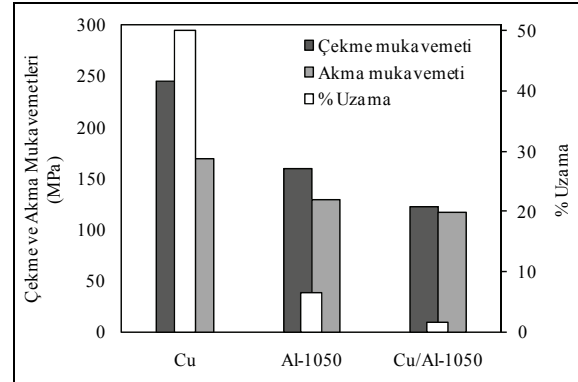
Şekil 7, KB içerisindeki farklı bölgelerden elde edilen OM ve SEM mikroyapı resimlerini, Tablo 2 ise KB içerisinde gerçekleştirilen EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Mikroyapı incelemeleri ve EDS analizleri sonucunda, SKK sırasında meydana gelen ısı artışı ve plastik deformasyonun, KB içerisinde üç farklı karakterde yapı oluşumuna neden olduğu belirlenmiştir. Bu yapılardan birincisi, yeniden kristalleşmiş ince tane yapısına sahip alüminyumca zengin malzemedir (Şekil 7a). Bu yapıyı, karışım bölgesinin matris elemanı olarak da tanımlamak mümkündür. İkincisi, bu alüminyum matris içerisine karışmış bakırca zengin yapı oluşumlarıdır (Şekil 7a). Üçüncüsü ise dış açılmış karıştırıcı ucun dönme hareketi neticesiyle bakır levhadan koparılıp ince taneli alüminyum matris içerisine sürüklenmiş bakırca zengin parçacık ve tabakaların oluşturduğu yapılardır. KB içerisindeki bakırca zengin parçacık ve tabakalar, farklı boyutlara sahip olmakla birlikte, alüminyum matris içerisinde heterojen bir şekilde dağılmıştır. Genel olarak bakırca zengin parçacıklar, Şekil 7b'de gösterildiği gibi, ince bakır parçacıklar ve nispeten daha iri bakır parçacıklar olarak tanımlanabilir. İnce bakır parçacıklar yaklaşık 1 µm'den daha küçük boyutlarda olup, alüminyum matris içerisinde genellikle kümelenmiş halde bulunmaktadır. İri bakır parçacıkların ise ince parçacıklara göre çok daha büyük ve düzensiz boyutlara sahip olduğu görülmektedir. Ancak Şekil 7b'den de görülebileceği gibi, bazı iri bakır parçacıklarda SKK sırasında dönmekte olan dış açılmış karıştırıcı ucun parçalama etkisinin neden olduğu mikro-çatlaklar tespit edilmiştir. Tabakalı bakırca zengin yapılar ise genellikle birbiri ardınca dizilmiş ve belirgin bir şekilde malzeme akış doğrultusunda yönelmiş yapılar olarak tanımlanmıştır (Şekil 7c). Şekil 7d'de ok işaretleriyle gösterilen Cu/KB ara yüzeyine yakın Cu metale ait tanelerin, bu metale ait diğer tanelerden daha küçük olduğu da belirlenmiştir. Tane büyüklüğündeki bu farklılığa, karıştırıcı ucun Cu/KB ara yüzeyine daha yakın olan taneleri daha fazla deformasyona uğratmasının neden olduğu düşünülmektedir. Tüm bunlarla birlikte, özellikle Al-1050/KB ara yüzey geçişindeki bazı bakırca zengin parçacıkların alüminyum matris içerisinden koparak ayrıldığı görülmüştür (Şekil 7e). Ancak bu duruma, mikroyapı incelemeleri öncesi numunede gerçekleştirilen mekanik zımparalama ve parlatma işlemlerinin neden olduğu tahmin edilmektedir.

Bakırın alüminyuma SKK ile birleştirilmesiyle ilgili yapılmış önceki çalışmalarda [1, 9–13, 22–24], bakırca zengin metaller arası bileşiklerin mekanik özellikler üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle, Cu/Al-1050 birleşmesinin kaynak bölgesinde X-ışınları difraksiyon analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 8, kaynak bölgesine ait XRD grafiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar Al ve Cu elementlerinin yanı sıra, önceki bazı çalışmalarda da [1, 9–13, 22–24] tespit edilen bakırca

zengin AlCu, AlCu₄, Al₂Cu₃ ve Al₄Cu₉ metaller arası bileşiklerin varlığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, imaj analiz programı ile karışım bölgesi içerisindeki bakırca zengin fazların hacimsel oranının yaklaşık %32±7 olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, SKK sırasındaki karıştırıcı ucun yoğun karıştırma hareketiyle beraber, takım omuz kısmının sürtünme sonucu ürettiği sıcaklık artışı, Cu/Al-1050 birleşmesinde bakırca zengin bu fazların ortaya çıkmasına neden olmuştur.



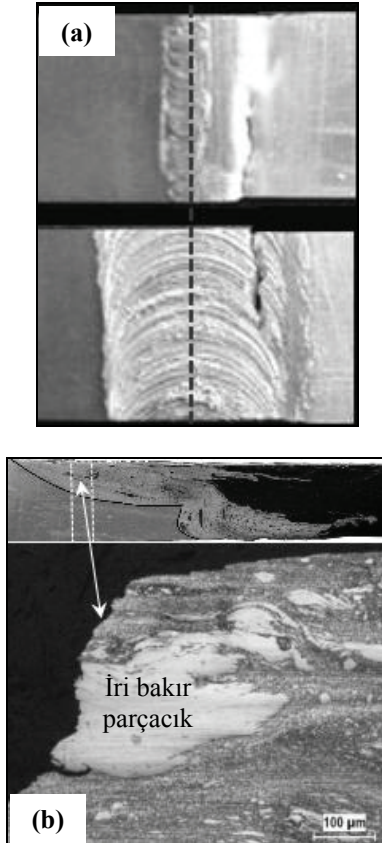
Şekil 8. Cu/Al-1050 birleşmesinin kaynak bölgesine ait XRD grafiği ve sonuçları (XRD patterns and results of the weld region of Cu/Al-1050 joint)



Şekil 9. Ana metaller ile Cu/Al-1050 birleşmesinin çekme testi sonuçları (Tensile test results of the base metals and Cu/Al-1050 joint)

Şekil 9, Cu/Al-1050 birleşmesinin yanı sıra saf Cu ve Al-1050 ana metallerin çekme testi sonuçlarını göstermektedir. Birleşmenin çekme mukavemeti (122 MPa) Al-1050 ana metalden yaklaşık %24, Cu ana metalden ise yaklaşık %50 düşüktür. Elde edilen bu kaynak performansının, Okamura ve Aota [26] tarafından yapılan oksijensiz Cu/Al-6061 birleşmesindeki en yüksek kaynak performansından (120 MPa; Al-6061'e göre ~%61 düşük) daha yüksek, Liu vd. [27] yaptığı Cu-T2/Al-5A06 birleşmesinden (296 MPa; Cu-T2 ile yaklaşık aynı) ise düşük olduğu görülmektedir. Cu/Al-1050 birleşmesinin %0,2 akma mukavemeti ise 117 MPa olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, Cu/Al-1050 birleşmesi ana metallere göre oldukça düşük bir % uzama değeri göstererek, kaynağın ilerleme kenarındaki alüminyum

levhada kırılmıştır. Bu durum, Şekil 10a'daki çekme numunesinin resimlerinde de açıkça görülmektedir. Ancak Şekil 10b'de verilen, birleştirmenin kırılma bölgesini içeren mikroyapı resminden ve bu bölgenin makroyapıdaki karşılığından da görülebileceği gibi kırılma tamamen KB içerisinde meydana gelmemiş olup, takım omuz kısmının altında kalan KB ile alüminyum metal boyunca gerçekleşmiştir. Çekme testi sırasında, Cu/Al-1050 birleştirmesindeki çatlak başlangıcının ise, kaynağın üst kısmındaki alüminyum matris ile iri bakır parçacık ara yüzeyinde olduğu ve birleştirmenin alt kısmına doğru ilerlediği tahmin edilmektedir. Dolayısıyla, Şekil 7b'de gösterilen bakır parçacıktaki mikro-çatlağın ise birleştirmenin çekme testi özelliklerinde öncelikli bir etkiye sahip olduğu düşünülmemektedir. Cu/Al-1050 birleştirmesinin çekme testi sonrası kırılma yüzeyi Şekil 11'de gösterilmektedir. Kırılma yüzeyindeki çukurcuklar ve düz yüzey görünümleri, çekme testinde hem sünek hem de gevrek kırılma mekanizmasının gerçekleştiğini göstermektedir.

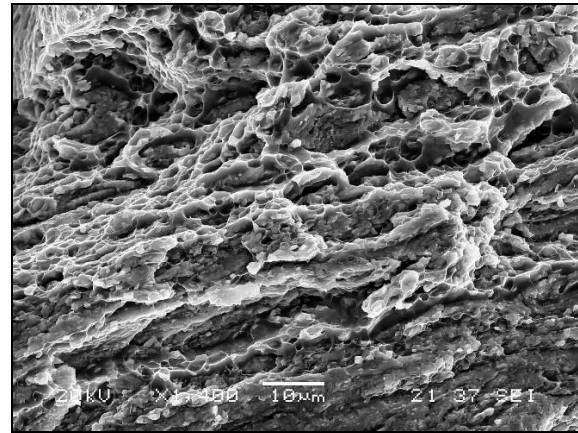


Şekil 10. Çekme testi sonrası numunedeki kırılma bölgesi (a) kaynağın kök ve yüzey görünümleri, (b) çatlak başlangıç bölgesinin makroyapıda ve mikroyapıda gösterimi (Fracture zone in the sample after tensile test (a) root and face appearances of the weld, (b) illustration of initial crack zone in microstructure and macrostructure)

Çekme testinde Cu/Al-1050 birleştirmesinin alüminyum levha tarafında kırılması, Al-1050 ana metalin çekme mukavemetinin saf Cu ana metalden daha düşük olmasına (bkz. Şekil 9) ve birleştirme

özellikleri üzerine önemli rolü olan KB'nin çoğunlukla alüminyum levha tarafında oluşmasına bağlanmıştır. Benzer sonuçlar önceki bazı SKK çalışmalarında da görülmüştür. Okamura ve Aota [26], Cu/Al alın birleştirmelerinde kırılmaların daima Al levhada ve KB ara yüzeyinde olduğunu belirtirken, Liu vd. [27] Cu-T2/Al-5A06 alın kaynağında kırılmanın, Al-5A06 malzemeye göre daha düşük çekme mukavemetine sahip olan Cu malzemede meydana geldiğini ifade etmiştir.

Mikroyapı incelemelerinde tespit edilen KB içerisindeki düzensiz şekillerde ve heterojen olarak dağılmış iri bakır parçacıklarının yanı sıra, metaller arası bileşiklerin varlığının Cu/Al-1050 birleştirmesinin mekanik özelliklerine olumsuz etkilerinin olduğu görülmektedir. Özellikle sert ve gevrek metaller arası bu bileşikler, birleştirmenin çekme ve akma mukavemeti değerlerinin yakın olmasına ve çekme testinde birleştirmenin düşük süneklik göstererek kopmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, KB içerisindeki bakır parçacık boyutunun optimize edilebilmesi, birleştirmenin çekme mukavemetini arttırmaya yardımcı olabilir. Bu durumun, gelecekteki deneysel çalışmalarda takım devir hızı ve kaynak hızı gibi iki ana parametrenin yanı sıra uygun karıştırıcı uç geometrisiyle de sağlanabileceğine inanılmaktadır.

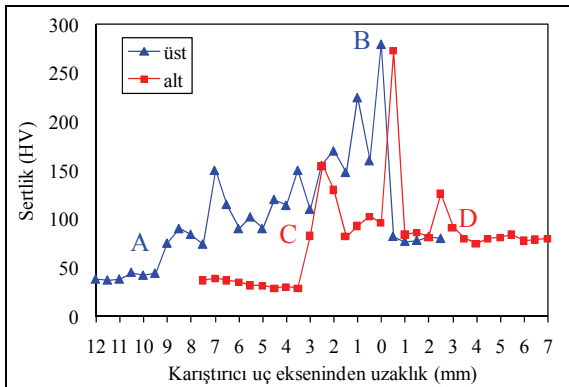


Şekil 11. Çekme testi sonrası Cu/Al-1050 birleştirmesinin kırılma yüzeyi (Fracture surface of Cu/Al-1050 joint after tensile test)

515 min⁻¹ takım devir hızında ve 12 mm min⁻¹ kaynak hızında gerçekleştirilen Cu/Al-1050 alın kaynağında elde edilen çekme mukavemeti, diğer katı-hal birleştirme yöntemleriyle yapılmış Cu/Al birleştirmelerinin çekme mukavemetleriyle karşılaştırıldığında; özellikle sürtünme ve difüzyon kaynak yöntemlerine göre daha yüksek mukavemetlerin elde edilebildiği görülmüştür. Örneğin; sürtünme kaynaklı saf Cu/Al-1050 birleştirmesinin çekme mukavemeti 87 MPa [9], difüzyon kaynağı yapılmış iki ayrı çalışmada saf Cu/saf Al birleştirmelerinin çekme mukavemetleri ise 61 MPa [12] ve 28 MPa [13] olarak tespit edilmiştir.

Cu/saf Al ultrason kaynağında ise yaklaşık 90 MPa çekme mukavemeti belirlenmiştir [11]. Sürtünme, difüzyon ve ultrason gibi diğer katı-hal kaynak yöntemleri uygulamalarında, özellikle birleştirilecek malzemelerin geometrilerinde bazı sınırlamaların olduğu görülmektedir. Sürtünme kaynağında genellikle dairesel kesitli çubuk ve boru şeklindeki malzemeler birleştirilebilirken; ultrason kaynağında, ince sac, yaprak ve tel gibi daha çok küçük ebatlı malzemelerin bindirme kaynakları yapılabilir. Örneğin; alüminyum malzemeler için maksimum kalınlık yaklaşık 2,5 mm iken, daha ağır metaller için bu kalınlık 1 mm'ye düşmektedir. Difüzyon kaynağında kaynak kalitesi ise önemli ölçüde birleştirilecek malzemelerin yüzey kalitelerine ve difüzyon için gerekli süreye bağlıdır. Zira bazı uygulamalarda, bir saatten daha fazla süreye ihtiyaç duyulabilmektedir. Genellikle bu yöntemlerde, en az orta seviyede beceriye sahip operatörlere ve yüksek maliyetlere gereksinim vardır [28, 29]. Tüm bunlar göz önüne alındığında, SKK yönteminin özellikle farklı geometrilere sahip Cu/Al alın ve bindirme birleştirmeleri için nispeten daha uygulanabilir olduğu görülmektedir.

Şekil 12, Cu/Al-1050 birleşirmesi kesitinin alt ve üst bölgeleri boyunca gerçekleştirilen mikrosertlik dağılımlarını göstermektedir. Sıra-sertlik ölçüm sonuçlarına göre, Al-1050 ana metalin ortalama sertliği 34 HV, Cu ana metalinki ise 80 HV'dir. KB'nin üst bölgesindeki (A-B) ortalama sertlik değeri 132 HV (75–280 HV), alt bölgedeki (C-D) ortalama sertlik ise 114 HV (81–273 HV) olmuştur. Sertlik ölçümlerinden de açıkça görülebileceği gibi, KB'nin ortalama sertlik değerleri hem Al-1050 hem de Cu ana metallerden oldukça yüksektir. KB içerisinde görülen bu sertlik artışları, yeniden kristalleşmiş ince taneli alüminyumca zengin yapıya, bakırca zengin yapıya ve metaller arası bileşiklerin varlığına bağlanırken, grafikte verilen KB sertliklerindeki dalgalanmalar ise mikroyapının heterojen olmasıyla açıklanabilir.



Şekil 12. Kaynak bölgesinin üst ve altındaki sertlik dağılımları (Hardness distributions along the top and bottom of the weld region)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- 1- Bu çalışmada, saf Cu levha Al-1050 levhaya 515 min⁻¹ takım devir hızında ve 12 mm min⁻¹ kaynak hızında sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle alın-alına başarıyla birleştirilmiştir. 515 min⁻¹ takım devir hızı sabit tutulup, kaynak hızının 30 ve 50 mm min⁻¹ e çıkarılması ile gerçekleştirilen birleştirmelerin ise başarısız olduğu görülmüştür.
- 2- Birleştirmenin mikroyapı incelemeleri ve EDS analizleri sonucunda, karışım bölgesinin yeniden kristalleşmiş ince taneli alüminyumca zengin matristen, bakırca zengin yapı ve parçacıklardan oluştuğu tespit edilmiştir.
- 3- Cu/Al-1050 birleşirmesinin kaynak bölgesinin XRD analizlerinde AlCu, AlCu₄, Al₂Cu₃ ve Al₄Cu₉ metaller arası bileşiklerin varlığı tespit edilmiştir. Karışım bölgesi içerisindeki bakırca zengin fazların hacimsel oranının yaklaşık %32±7 olduğu belirlenmiştir. Bu metaller arası bileşikler birleştirmenin düşük süneklik özelliği göstermesine neden olmuştur.
- 4- Birleştirmenin çekme mukavemeti (122 MPa), Al-1050 ana metalden yaklaşık %24, Cu ana metalden ise yaklaşık %50 düşük çıkmıştır.
- 5- SKK sonrası karışım bölgesinin ortalama sertliği ana metaller göre artmış ve sertlik değerleri 75–280 HV arasında değişmiştir. Karışım bölgesi içerisindeki sertlik farklılıkları, metaller arası bileşiklerin varlığına ve heterojen olarak dağılmış bakır parçacıklarının varlığına bağlanmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ouyang, J., Yarrapareddy, E., Kovacevic, R., "Microstructural Evolution in the Friction Stir Welded 6061 Aluminum Alloy (T6-Temper Condition) to Copper", **J Mater Process Tech**, Cilt 172, No 1, 110-122, 2006.
2. Vaidya, W.V., Horstmann, M., Ventzke, V., Petrovski, B., Kocak, M., Kocik, R., Tempus, G., "Structure-Property Investigations on a Laser Beam Welded Dissimilar Joint of Aluminium AA6056 and Titanium Ti6Al4V for Aeronautical Applications Part I: Local Gradients in Microstructure, Hardness and Strength", **Matwiss u Werkstofftech**, Cilt 40, No 8, 623-633, 2009.
3. Soundararajan, V., **Thermo-mechanical and Microstructural Issues in Joining Similar and Dissimilar Metals by Friction Stir Welding**, Doktora Tezi, Southern Methodist University, 2006.
4. Barlas, Z., **Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Cu ile CuZn37 Levhaların Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri**, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.

5. ASM Handbook, **Welding, Brazing, and Soldering**, vol. 6, Editör: Baker, H., ASM International, A.B.D., 1997.
6. Wagner, F., Zerner, I., Kreimeyer M., and Sepold, G., "Characterization and properties of dissimilar metal combinations of Fe/Al and Ti/Al-sheet materials", **International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics**, Florida, A.B.D., 1301-1310, 2001.
7. Russell, A.M., Lee, K.L., **Structure-Property Relations in Nonferrous Metals**, John Wiley & Sons, Inc., Publication, A.B.D., 2005.
8. Veerkamp, W.E., "Copper-to-Aluminum Transitions in High DC Bus System", **IEEE Trans Indust Appl**, Cilt 33, No 4, 1027-1034, 1997.
9. Lee, W.B., Bang, K.S., Jung, S.B., "Effects of Intermetallic Compound on the Electrical and Mechanical Properties of Friction Welded Cu-Al Bimetallic Joints During Annealing", **J Alloy Compd**, Cilt 390, No 1-2, 212-219, 2005.
10. Ochi, H., Yamamoto, Y., Ogawa, K., Tsujino, R., Sawai, T., "Evaluation of Tensile Strength of Friction-Welded Joints of Aluminium to Copper", **Mater Forum**, Cilt 28, 598-603, 2004.
11. Tsujino, J., Ueoka, T., "Ultrasonic Butt Welding of Aluminum, Anticorrosive Aluminum and Copper Plate Specimens", **Proceeding IEEE 1988 Ultrasonics Symposium**, New York, A.B.D., 493-496, 1988.
12. Ay, İ., Çelik, S., Çelik, İ., "Comparison of Properties of Friction and Diffusion Welded Joints Made Between the Pure Aluminium and Copper Bars", **BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, Cilt 1, No 2, 88-102, 1999.
13. Enjo, T., Ikeuchi, K., Akikawa, N., "Diffusion Welding of Copper to Aluminum", **Transactions of the Japan Welding Society**, Cilt 8, No 1, 77-84, 1977.
14. Pinto, M.A., Cheung, N., Ierardi, M.C., Garcia, A., "Microstructural and Hardness Investigation of an Aluminum-Copper Alloy Processed by Laser Surface Melting", **Mater Charact**, Cilt 50, No 2-3, 249-253, 2003.
15. Mishra, R.S., Ma, Z.Y., "Friction Stir Welding and Processing", **Mater Sci Eng R**, Cilt 50, No 1-2, 1-78, 2005.
16. Kimapong, K., Watanabe, T., "Friction Stir Welding of Aluminium Alloy to Steel", **Weld J**, Cilt 83, No 10, 277-282, 2004.
17. Somasekharan, A.C., Murr L.E., "Microstructures in Friction-Stir Welded Dissimilar Magnesium Alloys and Magnesium Alloys to 6061-T6 Aluminum Alloy", **Mater Charact**, Cilt 52, No 1, 49-64, 2004.
18. Uzun, H., Dalle Donne, C., Argagnotto, A., Ghidini, T., Gambaro, C., "Friction Stir Welding of Dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 Stainless Steel", **Mater Design**, Cilt 26, No 1, 41-46, 2005.
19. Meran, C., Kovan, V., "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Butt Welded Dissimilar Copper/Brass Joints", **Materwiss u Werkstofftech**, Cilt 39, No 8, 521-530, 2008.
20. Barlas, Z., Uzun, H., "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Butt Welded Dissimilar Cu/CuZn30 Sheets", **J Achiev Mater Manuf Eng**, Cilt 30, No 2, 182-186, 2008.
21. Barlas, Z., Uzun, H., "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Butt Welded Dissimilar Pure Copper/Brass Alloy Plates", **Int J Mater Res**, Cilt 101, No 6, 801-807, 2010.
22. Elrefaey, A., Takahashi, M., Ikeuchi, K., "Microstructure of Aluminum/Copper Lap Joint by Friction Stir Welding and Its Performance", **J High Temp Soc**, Cilt 30, No 5, 286-292, 2004.
23. Abdollah-Zadeh, A., Saeid, T., Sazgari, B., "Microstructural and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminum/Copper Lap Joints", **J Alloy Compd**, Cilt 460, No 1-2, 535-538, 2008.
24. Saeid, T., Abdollah-Zadeh, A., Sazgari, B., "Weldability and Mechanical Properties of Dissimilar Aluminum-Copper Lap Joints Made by Friction Stir Welding", **J Alloy Compd**, Cilt 490, No 1-2, 652-655, 2010.
25. Murr, L.E., Li, Y., Flores, R.D., Trillo, E.A., McClure, J.C., "Intercalation Vortices and Related Microstructural Features in the Friction-Stir Welding of Dissimilar Metals", **Mat Res Innovat**, Cilt 2, No 3, 150-163, 1998.
26. Okamura, H., and Aota, K., "Joining of Dissimilar Materials with Friction Stir Welding", **Weld J**, Cilt 18, No 11, 852-860, 2004.
27. Liu, P., Shi, Q., Wang, W., Wang, X., Zhang, Z., "Microstructure and XRD Analysis of FSW Joints for Copper T2/Aluminium 5A06 Dissimilar Materials", **Mater Lett**, Cilt 62, No 25, 4106-4108, 2008.
28. Black, J.T., Ronald, A.K., **DeGarmo's Materials & Processes in Manufacturing**, John Wiley & Sons, Inc., Publication, A.B.D., 2008.
29. Groover, M.P., **Fundamentals of Modern Manufacturing**, John Wiley & Sons, Inc., Publication, A.B.D., 2007.

