

Al-Cu-Al MALZEME ÇİFTİNİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAK KABİLİYETİ

R. KAÇAR, H. Ertek EMRE, H. DEMİR ve S.GÜNDÜZ

Teknoloji Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Balıklar kayası, 78050, Karabük

rkacar@karabuk.edu.tr, hayriveertek@karabuk.edu.tr, hdemir@karabuk.edu.tr,
sgunduz@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 09.04.2010; Kabul/Accepted: 16.02.2011)

ÖZET

Son yıllarda metalik malzemelerin birleştirilmesi büyük önem kazanmıştır. Özellikle gelişmiş ve yeni malzemelerin kaynağı endüstri için sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle katı hal kaynak yöntemleri bu malzemelerin birleştirilmesinde çok daha etkili hale gelmiştir. Bu yöntemlerden birisi de sürtünme karıştırma nokta kaynağıdır (SKNK). Bu çalışmada SKNK yöntemi kullanılarak, levha halindeki 5754 kalite alüminyum malzeme çifti bakır ara tabaka kullanarak (Al-Cu-Al) 1000 ve 1600 dev/dak dönme hızında 3 ve 5 saniye karıştırma zamanı kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirmelerin kaynak kabiliyetini belirlemek için mekanik özellik ve mikroyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ara tabaka kullanılmadan birleştirilen aynı cins malzeme çiftinden elde edilen bulgularla mukayese edilmiştir. Bakır ara tabaka kullanılarak SKNK yöntemiyle elde edilen birleştirmelerin mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum alaşımlar, bakır, sürtünme karıştırma nokta kaynağı, mekanik özellikler.

FRICION STIR SPOT WELDABILITY OF Al-Cu-Al MATERIAL COUPLE

ABSTRACT

Recently joining of metallic materials has gained a big importance. The problem can arise joining of advanced and new materials especially in industry. Thus, the solid state bonding methods have become much more popular effective in joining such materials. One of them is friction stir spot welding. In this study, 5754 quality aluminum couple using interlayer copper were joined by friction stir spot welding method using 1000 and 1600 rpm pin rotation for 3 and 5 second time intervals. The mechanical and metallurgical properties of weldment determined. The finding from this study compared with result that was obtained from FSSW Al-Al couple. The mechanical properties of FSSW welded Al-Cu-Al couple found better than Al-Al weldment.

Keywords: Aluminum alloys, copper, friction stir spot welding, mechanical properties.

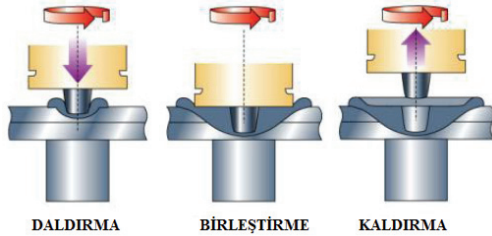
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) plastik akışkanlar dinamiğini kullanan bir katı-hal kaynak tekniğidir. Geleneksel yöntemlerle birleştirilmesi zor ve masraflı olan demir dışı metallerin birleştirilmesi amacıyla ortaya çıkan bir birleştirme çeşididir [1-3]. Kaynak yapılması çoğu zaman zor olan alüminyum, magnezyum ve diğer hafif metal alaşımlarının birleştirilmesinde SKNK başarılı bir performans göstermektedir [4-6]. Bu kaynak yöntemi 6 mm kalınlığa kadar aynı cins ve farklı cins malzemelerin kaynaklı birleştirmelerinde kullanılmaktadır [7,12-15].

SKNK yöntemi bindirme yapılmış iki levhaya yüksek devirde dönen omuzlu bir karıştırıcı uç daldırılarak yapılır. Prensip olarak sürtünme karıştırma kaynağının aynısı olup aralarında uygulama açısından fark bulunmaktadır [8-10]. Sürtünme kaynak yönteminde iki malzemenin sürtünmesi esnasında açığa çıkan ısı, sürtünen yüzeylerin kısa zamanda ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklara erişmesini sağlar. Sürtünen yüzeylerde bölgesel olarak birbirine değen ve sürtünen tepelikler, aniden kaynaklanır ve ardından koparlar. Sürtünme devam ettikçe, çok kısa zaman içinde yüksek sıcaklıklara erişilir ve sonunda uygulanan yığma kuvveti altında parçalar kaynaklanır [10]. Ancak SKNK yönteminde karıştırıcı uç, daha geniş çaplı bir

metal gövdeye bağlı, daha küçük çaplı karıştırıcı uç olarak şekillenmiştir.

Karıştırıcı uç birleşme bölgesi içine daldırıldığında (karıştırıcı ucun dalma derinliği kaynak nüfuziyeti olarak da söylenebilir) geniş çaplı omuz diye tarif edilen metal kısım birleştirilecek yüzeylere temas yapar. Omzun malzemeye teması kaynak bölgesinde ilave bir ısı sağlar. Karıştırıcı uçtan omuza kadar olan bölgedeki kombine sürtünme ısı, gömülmüş olan karıştırıcının çevresi ile malzeme üst yüzeyi ve omzun temas ettiği yüzeyde plastik değişime neden olur. Bu değişim malzemenin akışını sağlar ve birleşme olayı gerçekleşir. Daha sonra uç dönerken geri çekilir ve sonuçta kaynak yerinde karakteristik bir boşluk kalır [5,11-14]. Şekil 1’de batıcı ucun sürtünme kaynağı sırasındaki hareketleri şematik olarak gösterilmiştir[15].



Şekil 1. SKNK yöntemi işlem basamakları [15] (FSSW process description [15])

Literatürde Al 5754 ve Al 6061 kalite alaşımların SKNK birleştirmelerinin mekanik özellik ve mikroyapı ilişkisi ile ilgili çalışmalar olmasına rağmen Al levhaların ara malzeme kullanılarak SKNK ile ilgili çalışmalar sınırlıdır. Daha önce yapılan çalışmada, 5754 kalite alüminyum sac malzeme sürtünme karıştırma nokta direnç kaynağı yöntemi ile 1000 ve 1600 dev/dak dönme hızında 3 ve 5 saniye karıştırma zamanı kullanılarak birleştirilmiştir. Numunelerin çekme makaslama yükü taşıma kapasiteleri ve sertlik değerlerinin artan uç devir sayısı ve karıştırma süresi ile arttığı tespit edilmiştir [16].

Birleştirmenin dayanımını daha fazla arttırabilmek amacıyla bu çalışmada SKNK yöntemiyle birleştirilen 5754 kalite alüminyum alaşımının bakır ara malzeme kullanılarak birleştirme özelliklerine uç devir sayısı ve karıştırma süresinin etkisi araştırılmış ve ara yüzey kullanılmayan birleştirmeler ile mukayese edilmiştir. Birleştirmelerin çekme makaslama yükü taşıma kapasitesi ve sertlik dağılımı belirlenerek metalografik inceleme yapılmış böylece mikroyapı-mekanik özellik ilişkisi irdelenmiştir.

2. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

2.1. Kullanılan Malzemeler (Materials)

Çalışmada ticari olarak temin edilebilen, kimyasal bileşiminde % ağırlık olarak 0,15 Si, 0,33 Fe, 0,23

Mn, 3,12 Mg olan 5754 kalite, 2 mm kalınlığında alüminyum malzeme kullanılmıştır. Alüminyum malzeme çifti arasında ara tabaka olarak 0.5 mm kalınlığında bakır levhadan yararlanılmıştır. 5754 kalite alüminyum alaşımı temelde Al-Mg alaşımıdır. Kimyasal bileşiminde bol miktarda magnezyum barındırdığı için denizcilik ve otomobil sektöründe yaygın olarak kullanılması sebebiyle bu çalışmada tercih edilmiştir.

2.1.1. Deneysel numunelerin kaynak için hazırlanması (Preparation of Samples for Welding)

Çalışmada kullanılan alüminyum malzeme çifti 2 x 40 x 100 mm ebatlarında kesilerek kaynaklı birleştirme için hazır hale getirilmiştir. Bakır ara levha ise 0,5 x 40 x 40 mm ebatlarında kesilerek birleştirme için hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numunelerinin yüzeyleri yağ, kir ve pisliklerden arındırılmıştır. Birleştirme için hazırlanan numuneler araya bakır tabaka gelecek şekilde üst üste bindirilerek freze alt tablasına tutturulmak için geliştirilen kalıp içerisinde yerleştirilmiştir (Şekil 2).



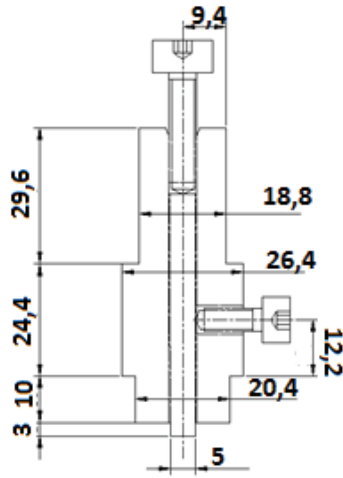
Şekil 2. Birleştirme yöntemi ve birleştirme sırasında deney numunelerini tutan kalıp (Friction stir spot welding method and the sample assembly mould)

2.1.2 Kaynak seti ve batıcı uç (Welding Sets and the Tool)

Karıştırıcı ucu tutan ve freze tezgâhının pens başlığına bağlamaya yarayan omuz, yüksek sıcaklıkta çalışabilen ve iyi derecede aşınma direncine sahip takım çeliğinden tasarlanarak imal edilmiştir. Karıştırıcı uç olarak ise çapı 5 mm olan matkap ucu sapı kullanılmıştır. Karıştırıcı ucun batma derinliğini ve sabitlenmesini ayarlayabilen vida sistemleri ise omuz üzerine tutturulmuştur. Tasarlanan ve imal edilen karıştırıcı uç ve omuz ölçüleri Şekil 3 (a), resmi ise Şekil 3 (b)’de gösterilmiştir. Karıştırıcı ucun batma derinliği 3.2 mm ayarlanmıştır (Şekil 4).

Birleştirme işlemi 7,5 KW motor gücüne, 1600 dev/dk dönme kapasitesine sahip KNUTH marka universal freze tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Ara tabaka kullanılmadan SKNK yöntemi ile birleştirilen

alüminyum malzeme çifti bulguları ile mukayese yapabilmek amacıyla karıştırıcı ucun dönme hızı 1000 ve 1600 devir/dk olarak seçilmiştir.

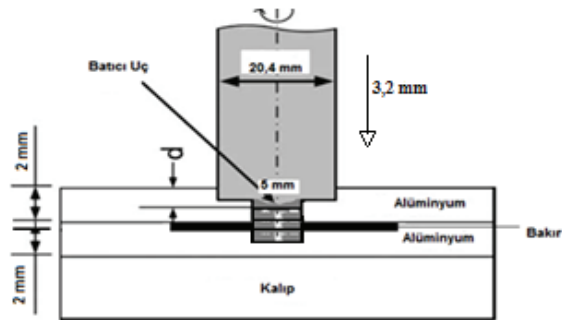


(a)



(b)

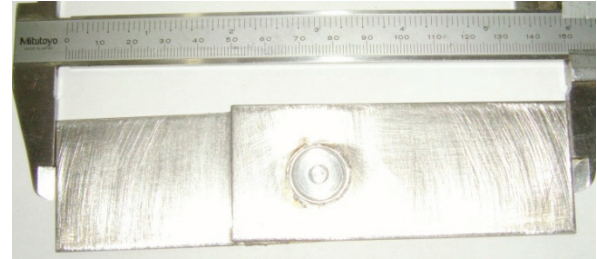
Şekil 3. (a) Karıştırıcı uç tutucusu boyutları **(b)** Karıştırıcı uç tutucusu resmi ((a) The dimension of pin holder, (b) Pin holder macrograph)



Şekil 4. Karıştırıcı ucun ve birleştirme işleminin şematik gösterimi. (The schematic representation pin and frictions stir spot welding methods.)

Yapılan literatür araştırmalarında da 750 dev/dak. altındaki dönme hızlarında kabul edilebilir mekanik özelliklerde birleştirmeler elde edildiği rapor edilmiştir [11]. Feng vd. yaptığı çalışmada ise yüksek dayanımlı çeliklerin SKNK yöntemiyle 1500 dev/dak sabit dönme hızında birleştirildiğini tespit etmiştir [17].

Karıştırıcı ucun malzemeye batma hızı dikey ekseninde hareket eden alt tabla ilerleme hızı ile 16 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Karıştırıcı uç malzemeye battıktan ve omuz malzemenin yüzeyine sürtünmeye başladıktan 3 veya 5 saniye sonra uç kaldırılmıştır. Ucun kalktığı noktada bir boşluk oluşmuştur. SKNK yöntemi ile birleştirilen numunenin resmi Şekil 5'de gösterilmiştir.



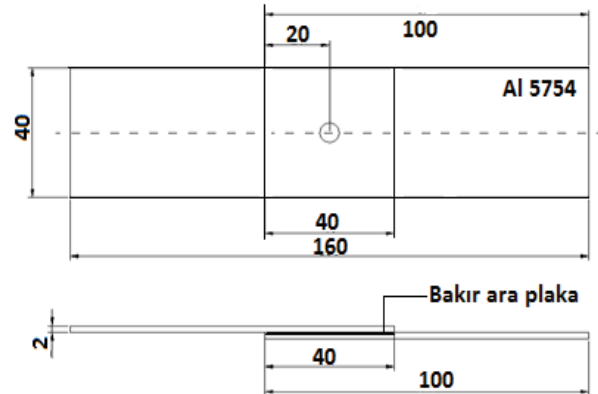
Şekil 5. SKNK yöntemi ile birleştirilen numunenin görüntüsü (The friction stir spot welded sample)

2.2 Numuneye uygulanan mekanik testler (Mechanical Test Applied on the Welded Sample)

Ara tabaka kullanılarak SKNK yöntemiyle birleştirilen Al-Cu-Al malzeme çiftine mekanik özellikleri belirlemek amacıyla çekme makaslama ve sertlik testi uygulanmıştır. Birleştirmelerin mikroyapı incelemeleri de gerçekleştirilerek mekanik özellik mikroyapı arasındaki ilişki tespit edilmeye çalışılmıştır.

2.2.1 Çekme makaslama testi (Tensile Shear Test)

Birleştirilmiş numunenin çekme makaslama yükü taşıma kapasitesini belirlemek amacıyla kullanılan deney numunelerinin boyutları verilmiştir (Şekil 6). Her bir şart için 3 adet deney numunesi Schimadzu marka çekme test cihazında 5mm/dak. çekme hızında çekme makaslama testine tabi tutulmuştur.



Şekil 6. Çekme makaslama deney numunesi boyutları (Tensile shear test sample dimension)

2.2.2 Sertlik ölçümü (Hardness Measurement)

SKNK ile birleştirilen bir adet numune kaynak merkezi ekseninde olacak şekilde ikiye ayrılmıştır. Ayrılan kısmın biri sertlik ölçümü için, diğer bölüm metalografik inceleme için kullanılmıştır. Önce kalıba alınan numune 1200 meshlik zımparaya kadar zımparalandıktan sonra, yüzeyi parlatılmış, ardından keller çözeltisi ile dağlanmış ve sertlik ölçümüne tabi tutulmuştur. Ölçüm işlemi SHIMADZU HMV marka mikrosertlik test cihazında gerçekleştirilmiştir. Cihazın batıcı ucuna 200g yük uygulanmıştır.

2.2.3 Metalografik İnceleme (Metallographic Evaluation)

Sertlik numunesinden geriye kalan bölüm metalografik inceleme için hazırlanmıştır. Bu amaçla; kaynaklı birleştirmeden 22 x 4 mm ebatlarında numune, kesme cihazında kesildikten sonra soğuk reçine ile kalıba alınmıştır. Kalıba alınan numune 320–1200 meshlik zımpara kullanılarak zımparalandıktan sonra 3 ve 1 μ elmas pasta ile keçede parlatılmıştır. Numunenin metalografik incelemesi için 50 ml metanol, 50 ml saf su, 2ml HF çözeltisi hazırlanarak 30 sn dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Mikroyapı incelemeleri 4X-100X büyütme kapasitesine sahip BOSCH Dinion^{XF} Colar Camera donanımlı MEIJI marka mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

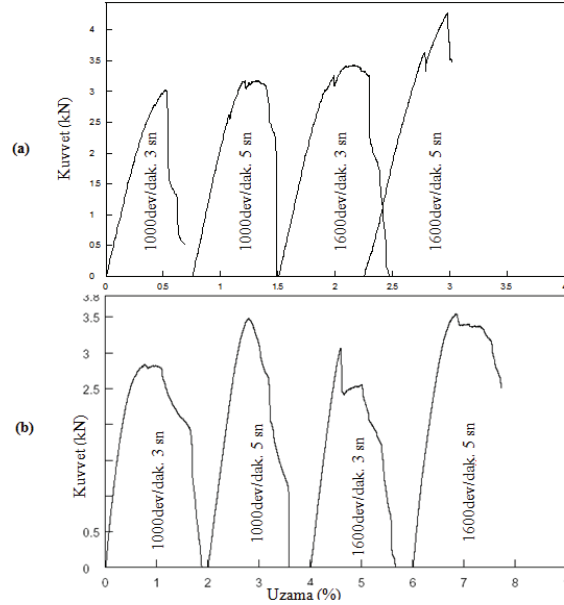
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Mekanik test sonuçları (Mechanical test results)

Bakır ara tabaka kullanılarak SKNK yöntemi uygulanmış numunelerin her bir şart için ortalama çekme makaslama test sonuçları Şekil 7 (a) ve ara tabaka kullanılmadan aynı kaynak parametreleri ile birleştirilmiş malzemenin test sonuçları ise Şekil 7 (b) de verilmiştir.

Şekil 7 (a)'dan görüldüğü üzere, bakır ara tabaka kullanılarak SKNK yöntemiyle birleştirilen numunelerin tüm şartlar için çekme makaslama yükü taşıma kapasiteleri yaklaşık olarak 3 ile 4,5 kN arasında dağılım sergilemektedir.

Kaçar ve diğerleri [16] tarafından yürütülen çalışmada bakır ara tabaka kullanılmadan birleştirilen aynı malzeme çiftinin çekme makaslama yükü taşıma kapasiteleri ise 2,8 ile 3,5 kN arasında dağılım sergilediği bulunmuştur (Şekil 7 (b)). Ara tabaka kullanılan birleştirmelerde çekme makaslama yükü taşıma kapasitelerinin arttığı ve her iki çalışmada da numunelerin çekme makaslama yükü taşıma kapasiteleri artan uç devir sayısı ve karıştırma süresi ile arttığı tespit edilmiştir.

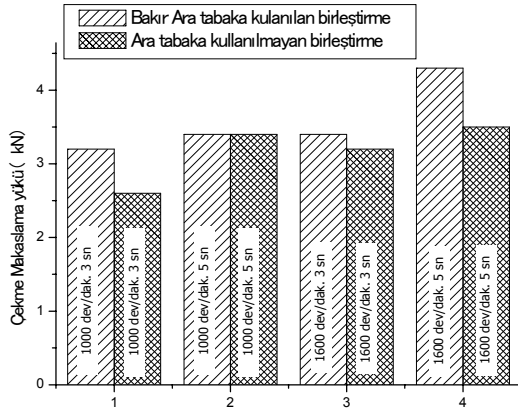


Şekil 7. (a) Bakır ara tabaka kullanılarak SKNK yöntemi ile birleştirilen numunelerin çekme makaslama taşıma yükü, **(b)** Ara tabaka kullanılmadan birleştirilen numunelerin test sonuçları [16] ((a)Tensile shear load bearing capacity of Al-Cu-Al FSSW samples, (b) Tensile shear load bearing capacity of Al-Al FSSW samples [16])

İlave olarak ara tabaka kullanılan ve kullanılmayan numunelerin çekme makaslama yükü taşıma kapasiteleri arasındaki fark Şekil 8'de verilen sütun grafiği ile de karşılaştırılmıştır.

Şekil 8'den de görüldüğü gibi bakır ara tabaka kullanılarak SKNK yöntemiyle birleştirilen numunelerin tüm şartlar için çekme makaslama yükü taşıma kapasiteleri ara tabakasız birleştirmelere göre daha yüksek bulunmuştur. Örneğin; 1000 dev/dak. uç devir sayısı ve 5 sn. karıştırma süresi için önemli bir fark gözlenmemekle beraber, 3 sn. karıştırma süresi için ara tabaka kullanılan numunelerin çekme makaslama yük değerleri ara tabakasız göre % 22 artış göstermiştir. Ara tabaka kullanılan numuneler, ara tabakasız numunelere göre 1600 dev/dak. uç devir sayısı ve 3 sn. karıştırma süresi için % 7 artış gösterirken, 5sn. karıştırma süresi için % 24 artış göstermektedir. Ara tabaka kullanılarak ve kullanılmadan aynı kaynak parametreleri ile birleştirilen numunelerin çekme makaslama yükü taşıma kapasitelerindeki farkın ara tabaka olarak kullanılan bakır levhanın alüminyuma sağladığı dayanım artışından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yapılan literatür taraması ve incelemeler sonucu devir sayısının ve süresinin artması kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. SKNK yöntemi ile birleştirilmiş levhaların mekanik özelliklerini belirleyen faktörler batıcı ucun devir sayısı, ucun batma derinliği ve karıştırma süresi olarak rapor edilmiştir [9,10].



Şekil 8. Bakır ara tabakalı ve ara tabakasız numunelerin farklı uç devir sayısı ve karıştırma süresi için çekme makaslama yük değerleri (Tensile shear loads of Al-Cu-Al and Al-Al samples for different rotation speed and stir time).

Her iki şartta da birleştirme sağlandığından dolayı elde edilen çekme makaslama yükü verileri birleştirme için seçilen ucun devir sayısının ve süresinin yeterli olduğuna işaret etmektedir.

Bağlantının sertlik dağılımı birleştirme üzerinde oluşan bölgeler göz önünde bulundurularak 1000 dev/dak 3 sn. için Şekil 9 (a) 1600 dev/dak. 3 sn için Şekil 9 (b) deki grafikte gösterilmiştir. Şekil 9'dan görüldüğü üzere birleştirmede kullanılan ana malzemenin sertliği yaklaşık olarak 68 HV_{0.2} bulunmuştur.

Karıştırıcı ucun malzeme yüzeyinin 50µm altından alınan ölçüm sonuçları her iki şart için ortalama 78 HV_{0.2} ölçülmüştür. Ana malzemeye göre bu sertlik farklılığı omuzun malzeme yüzeyine dönme sırasında etki ettirdiği deformasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Karıştırıcı ucun üst levha boyunca bıraktığı boşluk sınırı veya diğer bir ifadeyle uç çevresinden ana malzeme tarafına doğru yaklaşık 1 mm mesafeden üst levha boyunca sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçüm neticesinde elde edilen sertlik değerlerinin değişmediği tespit edilmiştir.

Ayrıca Al-Cu levha ara yüzeyinden karıştırıcı ucun bıraktığı boşluğa doğru sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Karıştırıcı ucun etki ettiği gerilim sonucunda ısı ve karıştırma etkisinde kalan bölgeye doğru gidildikçe sertlikte artış bulunmuştur. Bu sertlik artışının alüminyum bakır etkileşimi ve dinamik yeniden kristalleşmeyle oluşan ince taneli yapıdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kaçar ve diğerlerinin [16] yaptığı çalışmada ara tabaka kullanılmadan yapılan birleştirmelerde birleşme ara yüzeyinden itibaren alınan sertlik ana metale göre 8-15 HV_{0.2} artış gösterirken, bakır ara

tabaka kullanılarak elde edilen birleştirmelerde sertlik artışı 19-22 HV_{0.2} arasında değişmektedir. Bu farklılık uç çevresinde alüminyum bakır ara tabaka etkileşimine işaret etmektedir.

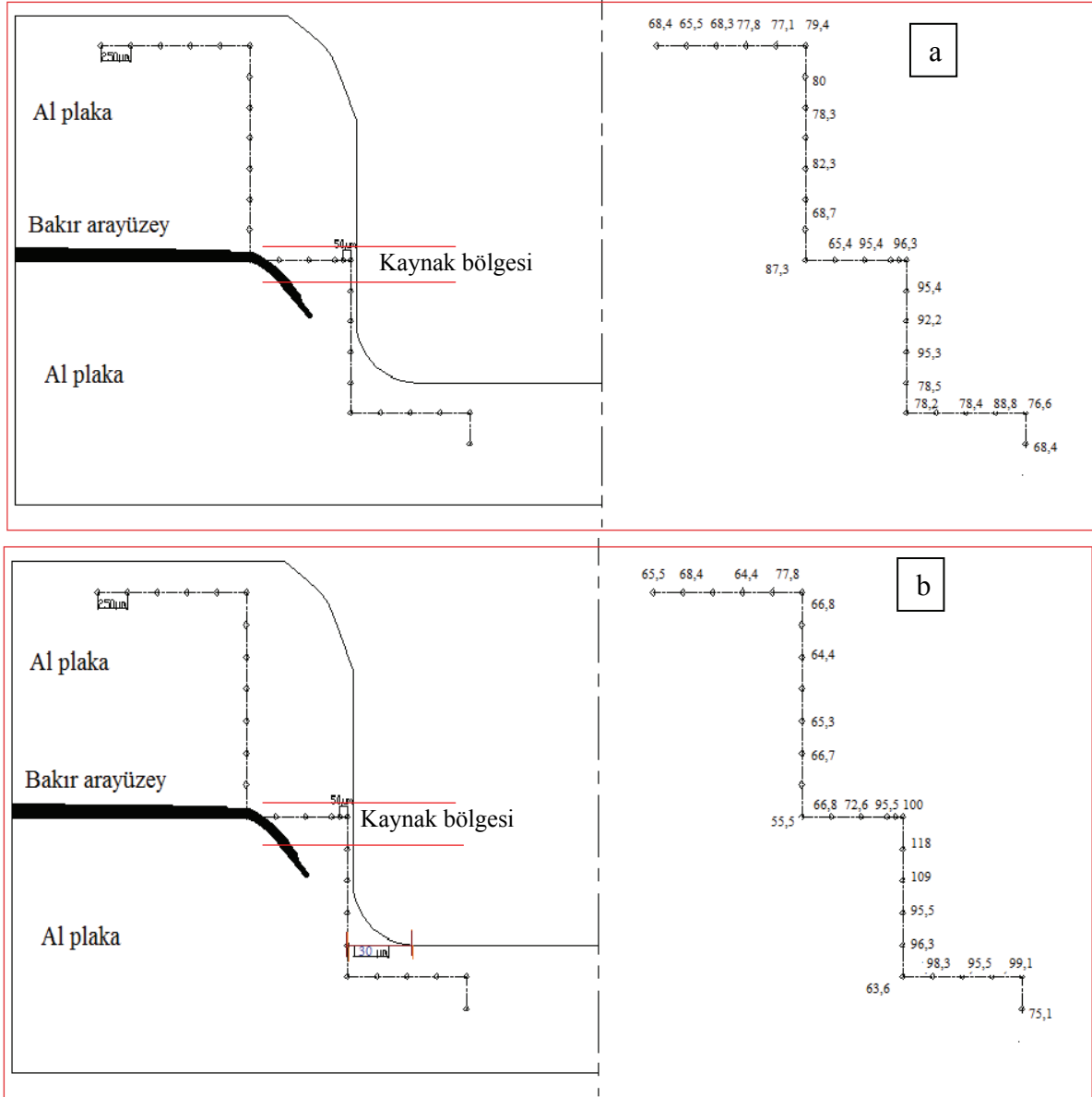
Yapılan literatür araştırmalarında SKNK katı hal kaynak yöntemi gibi düşünülmesine rağmen son çalışmalar Al-Mg veya Al-Cu birleştirmelerinde kaynak sırasında bölgesel erime (sıvılaşma) meydana getirebileceğini göstermiştir [18,19]. Yang ve diğerleri yaptığı çalışmada 2219 (Al-6,5 Cu) ile yapılan SKNK'da artan batıcı uç hızı ile ısı artışı meydana geldiğini ve sıvılaşma için yeterli sıcaklığın oluştuğunu, kaynak ara yüzeyinde karıştırma bölgesinde ince bir ötektik film tabakası meydana geldiğini rapor etmişlerdir [19].

Alt levha içerisinde uç çevresinden itibaren 30µm ana malzeme tarafında uç batma derinliği boyunca sertlik ölçümü de yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre 1000 dev/dak 3 sn. için ortalama 91,54 HV_{0.2} sertlik tespit edilirken, 1600 dev/dak 5 sn. için yaklaşık olarak ortalama 97,06 HV_{0.2} sertlik bulunmuştur. Sertlik artışının nedeni ucun dönme etkisiyle dinamik yeniden kristalleşmeye bağlı oluşan ince taneli yapıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Karıştırıcı ucun etrafındaki yarı katı-sıvı haldeki akıcı metalde çok yüksek oranda plastik deformasyonun oluştuğunu bununla 2-10µm boyutunda tanelerin yeniden kristalleşmesine önderlik edeceği belirtilmiştir [12-13].

Sertlik artışının bir diğer sebebi ise ucun dönme etkisiyle parçalanmış ve alüminyum matrisine ötelenen bakır kalıntıları olabilir. Bakır ve alüminyumun ısı ve karıştırma etkisi ile gerilim artışından dolayı lokal erime göstererek, batıcı uca yakın yüzeyinde intermetalik karakterli sert bir faz oluşturma olasılığı sertlik artışının bir diğer sebebi olarak değerlendirilebilir. SKNK sırasında sıcaklık oranı 210°C'den 400°C'ye ulaşana kadar, ana metalin içerdiği ikinci faz parçacıkları çözülmeye zaman bulamaz ve ergime derecelerine ulaştığında anında ergirler. Örneğin ikincil faz parçacıkları içeren Al 7075-T6 ana malzemesi, karıştırma bölgesi sıcaklığı 475°C, 480°C ve 490°C'ye ulaştığında kendiliğinden erir [20-22].

3.2 Metalografik inceleme sonuçları (Metalographic Evaluation Results)

SKNK yöntemiyle 1600 dev/dak dönme hızı ve 5 sn karıştırma süresinde birleştirilen numunenin mikroyapı dağılımı Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi birleştirmenin karıştırma bölgesi olarak adlandırılan bu bölümünde en çok göze çarpan unsurlardan bir tanesi batıcı ucun karıştırma hareketlerinden dolayı soğan kabuğuna benzeyen deformasyon halkalarının görülmesidir. Bu halkaların oluşumu tane büyüklük farkına, parçacık yoğunluğuna ve yapının oluşumuna atfedilmektedir [14].



Şekil 9 (a). 1000dev/dak. 3sn. ve (b) 1600dev/dak. 3sn. için SKNK uygulanan bakır ara yüzeyli Al 5754 alaşımının sertlik grafiği. (The hardness profile of FSSW sample a) 1000 rpm for 3s b) 1600 rpm for 3s)

Karıştırıcı ucun etrafındaki yarı katı-sıvı haldeki akıcı metalde çok yüksek oranda plastik deformasyon olduğu rapor edilmiştir [11]. Bununla birlikte karıştırıcı uç çevresinde 2–10 μm boyutunda tanelerin dinamik yeniden kristalleşmesine önderlik edeceği belirtilmiştir [12-15].

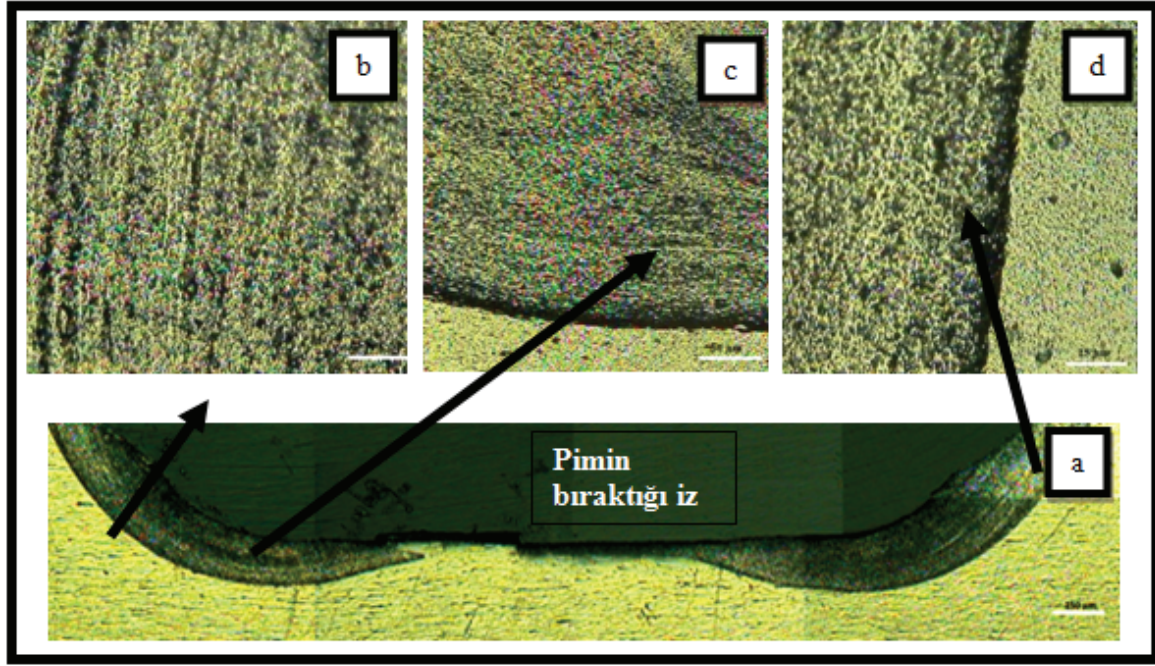
Termo-mekanik olarak etkilenen diğer kısım ise karıştırıcı uçtan daha uzak bölümde ucun dönme etkisiyle deformasyon altında olan plastik akış bölgesidir. Burada meydana gelen deformasyon çok daha az orandadır [11,20]. Metalografik inceleme sonucunda, sürtünme yüzeylerinde alüminyum-bakır etkileşiminin ürünü (intermetalik olduğu düşünülen) fazlar belirlenmiş olup, bu fazların yığılma süresi içinde alüminyum matris tarafına doğru itildiği gözlenmiştir. Bu olay olurken malzemenin homojen

akma gösterdiği net olarak ortaya çıkan deformasyon izlerinden görülmektedir (Şekil 11).

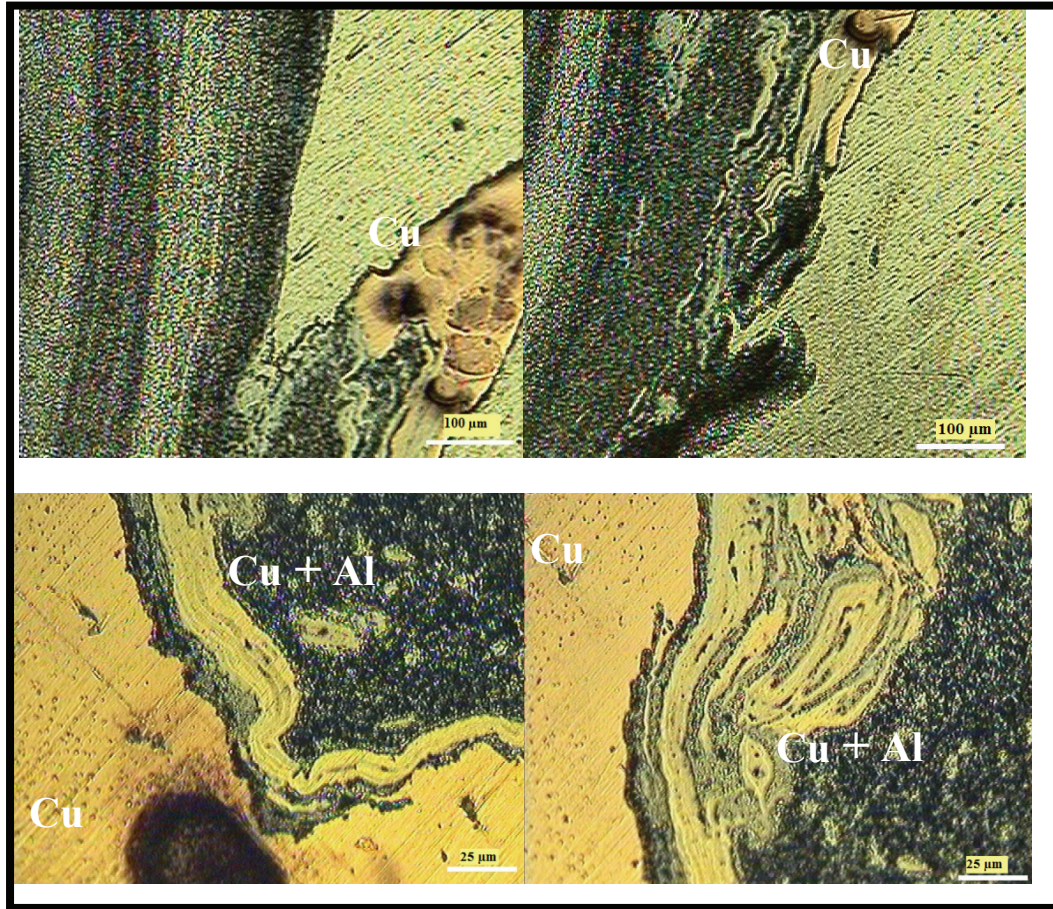
4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yürütülen bu çalışma neticesinde elde edilen bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- SKNK yöntemiyle birleştirilen Al-Cu-Al numunelerin çekme makaslama yükü taşıma kapasiteleri artan uç devir sayısı ve karıştırma süresiyle arttığı tespit edilmiştir. En düşük çekme makaslama yükü taşıma kapasitesi 1000 dev/dak. 3 saniye karıştırma süresi ile elde edilirken, en yüksek ise 1600 dev/dak. 3 saniye karıştırma süresi ile elde edilmiştir.



Şekil 10.(a) Uç boşluğu altında kalan mikroyapı profili (b) Plastik akışkanlık gösteren alüminyum tabaka, (c) Uçun karıştırma etkisi altında kalan bölge mikroyapısı, (d) Dinamik yeniden kristalleşme bölge mikroyapısı ((a) Microstructure profile under pin hole (b) Plastically deformed aluminium layer, (c) Microstructure of pin stirring zone, (d) Microstructure of dynamic recrystallized region



Şekil 11. Al-Cu-Al SKNK birleştirmesinin mikroyapı görüntüleri (The microstructure of friction stir welded Al-Cu-Al samples of FSSW)

- Bakır ara tabaka kullanılarak birleştirilen Al-Cu-Al malzeme çiftinin çekme makaslama yükü taşıma kapasiteleri bakır ara tabaka kullanılmadan aynı kaynak parametreleri ile elde edilen Al-Al birleştirmelerine oranla daha yüksek bulunmuştur. Bu dayanım artışında bakır ara tabakanın birleşme ara yüzeyinde alüminyum ile etkileşime girmesinin etkili olduğu düşünülmektedir.
- Al-Cu-Al birleştirmesinde alüminyum bakır ara yüzeyi boyunca uç boşluk sınırına doğru sertliğin arttığı tespit edilmiştir. Sertlik artışının sebebi olarak dinamik yeniden kristalleşmeyle oluşan ince taneli yapı, dönme etkisiyle parçalanmış ve alüminyum matris içerisine ötelenen bakır kalıntıları veya uç çevresinde sürtünmeden dolayı sıcaklık artışına bağlı olarak oluşabilecek intermetalik fazlar olabilir.
- Metalografik incelemeler neticesinde karıştırıcı ucun etrafındaki yarı katı-sıvı haldeki akıcı metalde çok yüksek oranda plastik deformasyon olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; ilave kaynak teli ve koruyucu gaz gerektirmeden kaynaklanması çok zor olan Al-Cu-Al malzeme çifti SKNK birleştirilmesi sağlanmıştır. Bakır ara tabaka kullanılan SKNK birleştirmelerin mekanik özellikleri olumlu yönde etkilendiği bulunmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Aota, K., Takahashi, M. and Ikeuchi, K., "Friction stir spot welding of aluminum to steel by rotating tool without probe", **Welding International**, Vol. 24, No. 2, 96–104, 2008.
2. Prangnell, P. B., Heason, C.P., Colligan, K. J., "Grain Structures in Al-alloy Friction Stir Welds Observed by Stop-Action Technique", **International Journal of Offshore and Polar Engineering**, Vol. 14, No. 4, December 2004.
3. Kurt, A., Boz, M., Özdemir, M., "Effect Of Welding Speed To Join Ability On The Friction Stir Welding" **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Vol. 19, No 2, 191–197, 2004.
4. Çam, G., "Sürtünme Karıştırma Kaynağı Al-Alaşımları İçin Geliştirilmiş Yeni Bir Kaynak Teknolojisi", **TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayını**, Cilt 46, Sayı 541, 30–39, Şubat 2005.
5. Şık, A., Kayabaş, Ö., "Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Yapılan Alüminyum Kaynağında Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", **Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi**, Sayı 12, 30–43, 2003.
6. Seidel, T.U, Reynolds, A.P, "Visualization of the Material Flow in AA2195 Friction Stir Welds Using a Marker Insert Technique", **Metallurgical and Material Transactions A**,32, Editor: D.E. Laughlin, ABD, 2879–2884, 2001.
7. Doğan S., **AA 5754–H22 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri**, Yüksek Lisans Tezi, O.G.Ü. Fen bilimleri Enstitüsü, 2006.
8. Kalunç, E., Taban E., "Otomobil endüstrisinde direnç nokta kaynağına alternatif bir yöntem: Sürtünen elemanla nokta kaynağı", **Kaynak Teknolojisi VI Ulusal Kongresi ve Sergisi**, TMMOB, 51–60, 9–10, Kasım 2007.
9. Charit, I., Misra, R.S., Abnormal grain growth in friction stir processed alloys, **Scripta Materila**, Vol 58, Issue 5, 367-371, 2008.
10. Kahraman, N., Yılbaş, B., Odabaşı, D. "H 2210 çeliği ile alüminyumun sürtünme kaynağı ile işlemi ve kaynak parametrelerinin kaynak üzerine etkilerinin deneysel olarak araştırılması", **6. Denizli Malzeme Sempozyumu**, Denizli, 1995.
11. Gerlich, A., Yamamoto, M., T. H. North, Local melting and tool slippage during friction stir spot welding of Al- alloys., **Conference on Welding and Joining Science and Technology**, 43, 2-11, 2008.
12. Awongetal, M. "Thermo-Mechanical Modeling of Friction Stir Spot Welding (FSSW) process: Use of an explicit adaptive meshing scheme", **SAE International**, 01–1251, 2005.
13. Gerlich, A., Su, P., T.H. North, Tool penetration during friction stir spot welding of Al and Mg alloys, **Journal of Materials science**, Vol.40, 6473-6481, 2005.
14. Heurtier, P., Jones, M.J., C. Desrayoud, J.H. Driver, F. Montheillet, Thermo mechanical conditions and resultant microstructures in friction stir welded 2024 aluminum, **Materials science forum**, **Trans tech publications** Vol. 426–432, No 4, Switzerland, 2927-2932, 2003.
15. Heurtier, P., Desrayoud, C., Montheillet F., A Thermo mechanical Analysis of the friction stir welding process, **Materials science forum**, **Trans tech publications** Vol. 396-402, No 3, Switzerland, 1537-1542, 2002.
16. Kaçar R., Gündüz S., Demir H., "5754 Kalite Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Kabiliyeti", **1. International Conference On Welding Technologies**, Gazi Universty, Ankara/Turkey, June 2009.
17. Feng, Z., Santella, M.L., David, S.A., Steel, R.J., Packer, S.M., Pan, T., Kua, M. , Bhatnagar, R.S. "Friction stir spot welding of advanced high

- strength steels-a feasibility study”, **SAE technical paper series**, 2005-01-1248, 2005.
18. Fonda, R., Fonda J.Bingert, K.Colligan, “Development of grain structure during friction stir welding”, **Scripta Materialia**, Volume 51, Issue 3, 243-248, 2004.
 19. Yang Y. K., Dong H., Kous, S., Liquation Tendency and Liquid- Film Formation in Friction Stir Spot Welding, **Welding journal, American Welding Society**, Vol. 87, 202-211, Miami, 2008.
 20. Droenen P-E., Ryum N., **Metallurgical and Materials Transactions A**, 25A, 521, 1994.
 21. Bjorneklett B., Frigaard O., Grong O., Myhr OR, Midling OT, **Proceedings of 6th International Conference on Aluminium Alloys**, Toyoashi, Japan, 1531, 1999.
 22. Li X-M., Starink MJ., **Materials Science and Technology**, 17, 1324-1328, 2001.