



Makale / Research Paper

Alüminyum ve Bakırın Sürtünme Karıştırma Kaynağında Düşük Devir ve Takım Pozisyonunun Etkisi

Sare ÇELİK^{*}, Recep ÇAKIR^a

^{*}Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, 10145, Çağış Kampüsü, Balıkesir, TÜRKİYE

^aGenelkurmay Başkanlığı, Bakanlıklar, Ankara, TÜRKİYE

scelik@balikesir.edu.tr, cakirbey2006@hotmail.com

Received/Geliş: 11.02.2018

Revised/Düzelme: 04.07.2018

Accepted/Kabul: 28.07.2018

Öz : Katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), ilk defa ergitme kaynak teknikleri ile birleştirilme işleminde zorluklarla karşılaşılacak alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde kullanılmıştır. Ancak günümüzde farklı malzeme çiftlerinin başarılı bir şekilde birleştirilmesine olanak vermektedir. Bu çalışmada, alüminyum (AA1050) ve bakır levhalar ısı girdisini azaltmak amacıyla düşük takım dönme hızında (630 dev/dak), üç farklı kaynak hızlarında (20, 30, 50 mm/dak) ve dört farklı takım konumlandırmasında (0-1-1,5-2 mm) sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirilmiştir. Kaynak parametrelerin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi incelenmiştir. Mekanik özelliklerinin tespitinde çekme ve mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Kaynak bölgesi mikroyapıları, optik ve elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve EDX analizleri yapılmıştır. Kaynak bölgesinde intermetalik fazlar tespit edilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Al-Cu parçaların çekme testi sonuçlarında %88,89 kaynak performansı elde edilmiştir

Anahtar kelimeler: Sürtünme Karıştırma Kaynağı, AA1050, Cu, Mekanik Özellikler, Mikroyapı,.

The Effect of Low Rotation Speed and Tool Position at Friction Stir Welding of Aluminum and Copper

Abstract: Friction Stir Welding (FSW) as solid state welding is especially suitable to join the sheet Al alloys, but now this technique allows different material couple to be welded continuously. In this study, 1050 aluminum alloy and commercially pure copper were produced at low rotation rate (630 rev/min) for reducing the heat input with four different pin position (0-1-1,5-2 mm) and three different weld speeds (20-30-50 mm/min) by friction stir welding. The influence of welding parameters on microstructure and mechanical properties of the joints was investigated. Tensile tests and microhardness measurements were used to determine of mechanical properties. Nugget zone microstructures were investigated by optical microscope and scanning electron microscope (SEM) and were analyzed in EDX. Depending on the XRD analysis intermetallic phase was observed to form in the interfacial region. In the tensile test results, 88,89 % weld performance was obtained in the friction stir welding merge of Al-Cu.

Keywords: Friction Stir welding, AA1050, Cu, Mechanical Properties, Microstructure.

1. Giriş

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), 1991 yılında İngiltere'deki Kaynak Enstitüsü (TWI) tarafından patenti alınmış ve geliştirilmiştir [1]. Son yıllarda metal ve malzeme biliminde büyük gelişmelerin sağlanması ile birlikte malzemelerin birleştirilmesi büyük önem kazanmıştır [2].

Bu makaleye atıf yapmak için

Çelik S., Çakır R., "Alüminyum ve Bakırın Sürtünme Karıştırma Kaynağında Düşük Devir ve Takım Pozisyonunun Etkisi", El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2018, 5(3); 706-719.

How to cite this article

Çelik S., Çakır R., "The Effect of Low Rotation Speed and Tool Position at Friction Stir Welding of Aluminium and Copper", El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2018, 5(3); 706-719.

Alüminyum alaşımlarının ergitme kaynak yöntemleriyle birleştirilmelerinde karşılaşılan problemlerin azaltılması amacıyla araştırmacılar, yeni kaynak yöntemleri üzerindeki çalışmalara yönelmişlerdir [3]. SKK yeni bir 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 [4-6]. İş parçasına karıştırıcı ucun daldırılması ve belirli bir hızda ilerletilmesi sayesinde meydana gelen sürtünme sonucu ısınan malzeme yumuşar, plastik olarak şekil değiştirir ve takımın basma kuvvetinden dolayı yüksek nitelikli çarpılma olmaksızın birleştirme işlemi gerçekleşir [7,8]. Yöntemin uygulanması sırasında duman ve ışın oluşmaması, koruyucu gaz, toz ve ilave tele gereksinim duyulmaması, kaynak ağzı hazırlığı gerekmemesi, distorsiyonlar, çekmeler ve sıçramaların olmaması gibi birçok üstünlüğü bulunmaktadır [9-11]. SKK son yıllarda; alüminyum, magnezyum, titanyum, bakır ve çelik malzemelerin birleştirilmesinde çok iyi kaynak kalitesi sağlamıştır [5,6,12]. Farklı malzeme çiftlerinin birleştirilmesi ile ilgili çalışmalar da yapılmaktadır [13-15]. 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 [16,17]. 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 [18]. Xue vd., AA1060 ve bakırın SKK yöntemi ile kaynak parametrelerinin kaynak bölgesi mikroyapısına ve mekanik özelliklere etkisini araştırdıkları çalışmada yüksek dönme hızlarında ve 2-2.5 mm pim konumlandırması değerlerinde iyi çekme özellikleri elde etmişlerdir [19]. Hongyu Sun vd., bindirme SKK yöntemi ile birleştirdikleri Al-Cu parçaların J integrali ile kırılma analizlerini incelemişlerdir [20]. Jiahu Ouyang vd., AA6061 bakırla kaynağında mikroyapı değişikliği ve sıcaklık dağılımı üzerinde yaptıkları çalışmada, mekanik olarak karışan bölgede $CuAl_2$, $CuAl$ ve Cu_9Al_4 gibi intermetalik bileşikler tespit etmişlerdir [21]. Peng Liu vd. ise, bakır (T2) ve alüminyum alaşımı (5A06) SKK yöntemi ile birleştirdikleri çalışmada kaynak ara bölgesinde yeni bir bakır-alüminyum intermetalik bileşik oluşmadığını belirtmişlerdir [22]. Xue vd., AA 1060 ve bakır levhaları, karıştırıcı ucun alüminyum tarafına kaydırılması ile sürtünme karıştırma kaynağı yapmışlar ve ince, sürekli, düzgün bir Al-Cu intermetalik fazların oluşumuyla Al-Cu ara yüzeyinde çok iyi metalürjik bağlanma sağlamışlardır [23]. C. Genevois vd., AA1050 ve saf bakır malzeme çiftinin birleştirilmesinde karıştırıcı uç alüminyum plaka tarafında tutularak yapılan çalışmada, iki malzeme arasında mekanik olarak bir karışma olmadığı, sürtünme ısısı sonucu bakır/alüminyum ara yüzeyinde difüzyon sağlandığı belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak hatasız birleşme sağlanarak, bakır/alüminyum ara yüzeyinde çok ince intermetalik bir tabaka meydana geldiği ifade edilmiştir [24]. Ancak, alüminyum ve bakır malzeme çifti ile yapılan çalışmalarda yeterince yüksek dayanımlara ulaşamadığı ve kaynaklı parça kalitesini önemli ölçüde etkileyen takım konumlandırma parametresi ile sınırlı sayıda çalışma yapıldığı görülmüştür.

Bu çalışmada; 4 mm kalınlığına sahip alüminyum (AA1050) ve saf bakır levhalar takım 630 dev/dak'lık dönme hızında, üç farklı takım ilerleme hızında (20, 30, 50 mm/dak) ve dört farklı takım konumlandırmasında (0-1-1,5-2 mm) sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirilmiştir. Kaynaklı parçaların mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Düşük takım dönme hızının seçilmesinde amaç ısı girdisini düşük tutarak, düşük sıcaklıklarda çalışılmasından dolayı metaller arası oluşabilecek yapı değişimlerinin en az seviyede tutulabilmesi araştırılmıştır.

2. Malzeme ve Yöntem

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirme işlemi için 4 mm kalınlıkta Alüminyum 1050 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. AA1050 malzemenin kimyasal içeriği (%ağırlık)

| Al | Fe | Ti | Zn | Mg | Cr | Mn | Ni | Si | Pb |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 99.756 | 0.207 | 0.017 | 0.007 | 0.006 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | <0.001 |

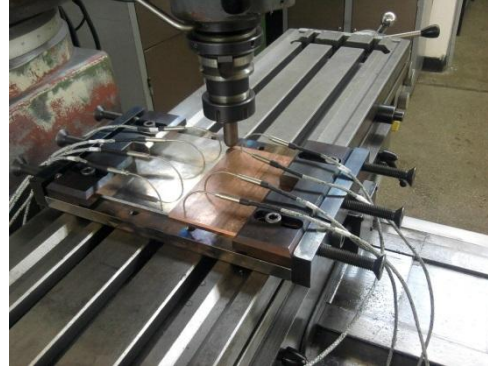
Tablo 2. Saf Cu malzemenin kimyasal içeriği (%ağırlık)

| 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) | Bakır (Cu) |
|------------------------|----------------|------------|
| Çekme Mukavemeti (MPa) | 111,20 | 231,38 |
| Kopma Mukavemeti (MPa) | 63,09 | 161,21 |
| Uzama (%) | 14,98 | 41,03 |
| Sertlik (HV) | 41 | 88 |

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



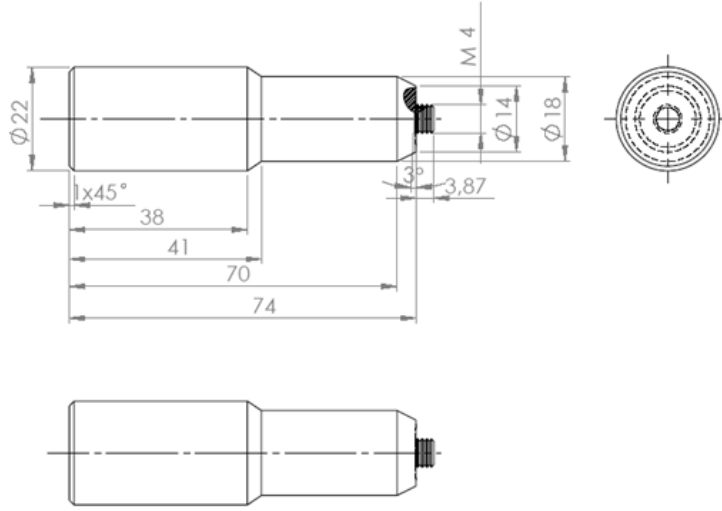
Şekil 1. Tezgâh üzerine bağlama kalıbı ile yerleştirilmiş numuneler

Birleştirme sırasında parçalarla temas halinde olan karıştırıcı uçta yüksek sıcaklıklar oluşacağından, işlem sırasında aşınma ve sertlik direncini koruyabileceği düşünülerek takım malzemesi (1.3343 tip) yüksek hız çeliği 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.

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

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



Şekil 2. Karıştırıcı takım ölçüleri

Deney optimizasyonu için 630 dev/dak takım dönme ve farklı ilerleme hızlarında deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde karıştırıcı uç alüminyum ve bakır levhaya öncelikle “0” (sıfır) olarak konumlandırılmıştır. Yapılan birleştirmelerde düşük çekme mukavemetleri 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. Kaynak bölgesinde 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, Tablo 4’de verilen kaynak parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 3. “0” konumlu kaynak kesit görünümü

Tablo 4. Kaynak parametreleri

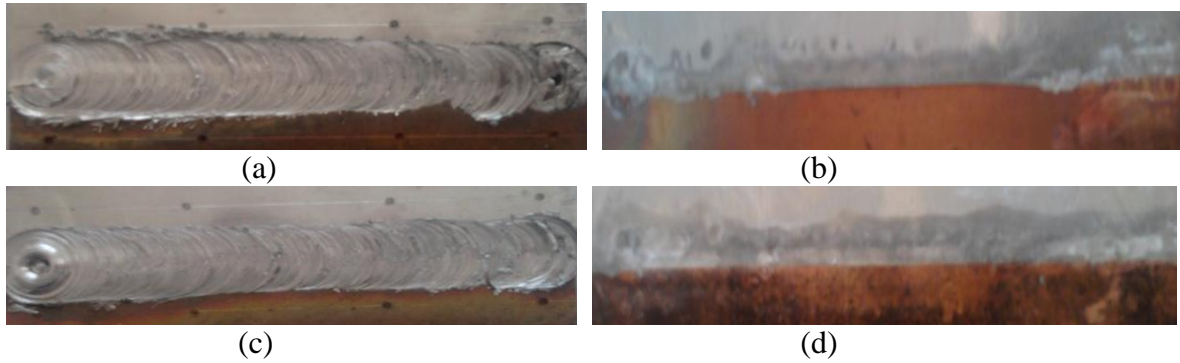
| Deney No | Takım dönme hızı (dev/dak) | İlerleme hızı (mm/dak) | Takım kaydırma (Al tarafına mm) |
|----------|----------------------------|------------------------|---------------------------------|
| 1 | 630 | 20 | 1,0 |
| 2 | | | 1,5 |
| 3 | | | 2,0 |
| 4 | | 30 | 1,0 |
| 5 | | | 1,5 |
| 6 | | | 2,0 |
| 7 | | 50 | 1,0 |
| 8 | | | 1,5 |
| 9 | | | 2,0 |

Elde edilen birleştirmelerin hepsi mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Çekme numuneleri kaynak dikişi orta noktada kalacak şekilde kaynaklama yönüne dik olarak EN 10002-1 standardına uygun hazırlanmıştır. Deneylerin tamamında çekme hızı 2 mm/dak olarak belirlenmiştir. Her şart için 3 adet çekme deneyi yapılarak ortalaması alınmıştır. Numunelerin kaynak kesitine dik olarak üst ve

alt yüzeyinden iki sıra Vickers mikrosertlik 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 için ise Keller çözeltisi kullanılmış ve Nikon Eclipse MA100 optik mikroskobu ile incelenmiştir. Ayrıca kaynak bölgeleri Scanning Electron Microscope (SEM) ile incelenerek noktasal ve çizgesel Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) analizleri yapılmıştır.

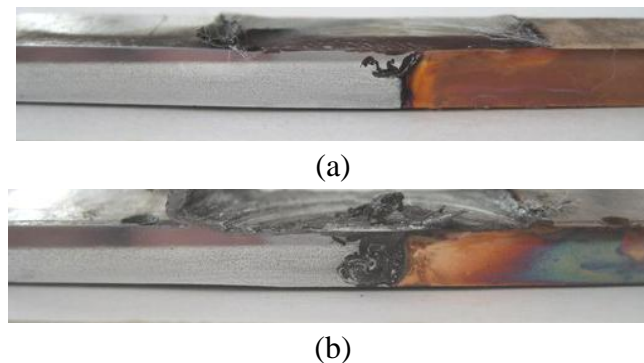
3. Bulgular ve Tartışma

Elde edilen bütün birleştirmelerin kaynak yüzeyleri ve kök görüntüleri alınmıştır. Kaynaklı numunelerden alınan kaynaklı parçaların görüntüleri Şekil 4’de verilmiştir. Kaynak yüzeyleri ve kök görüntüleri incelendiğinde genelde kaynakta boşluk, çukur, birleşme yetersizliği gibi kaynak hatalarına rastlanılmamıştır. Bazı birleştirme şartlarında kaynak bölgesinin çevresinde çapak oluşumu söz konusu olmuştur (Şekil 4.a).



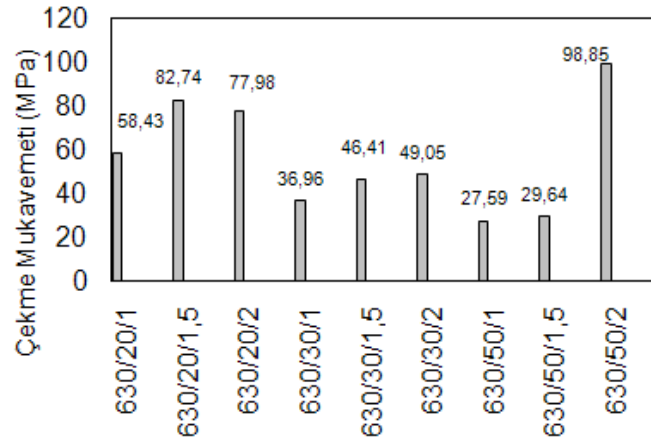
Şekil 4. Kaynak yüzeyleri ve kök görünüşleri, a) 630/50/1 yüzey, b) 630/50/1 kök, c) 630/50/2 yüzey, d) 630/50/2 kök.

Takım konumlandırılması yapılarak SKK işlemi sonrası, numunelerin kaynak esnasında meydana gelen kaynak kesit görüntüleri incelenmiştir. Şekil 5’de birleştirilen levhalardan kaynak yönüne dik doğrultuda alınan numunelerin kaynak kesit görüntüleri verilmiştir. Bütün numunelerde takımın Al tarafına konumlandırılmasından (1-1,5-2 mm) dolayı kaynak bölgesi alüminyum tarafında oluşmuştur. Kaynak kesitleri incelendiğinde 630/50/1 şartlarındaki numunede karışımın, kaynak bölgesinin çok fazla oluşmadığı, bu durumun da mekanik değerleri olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.

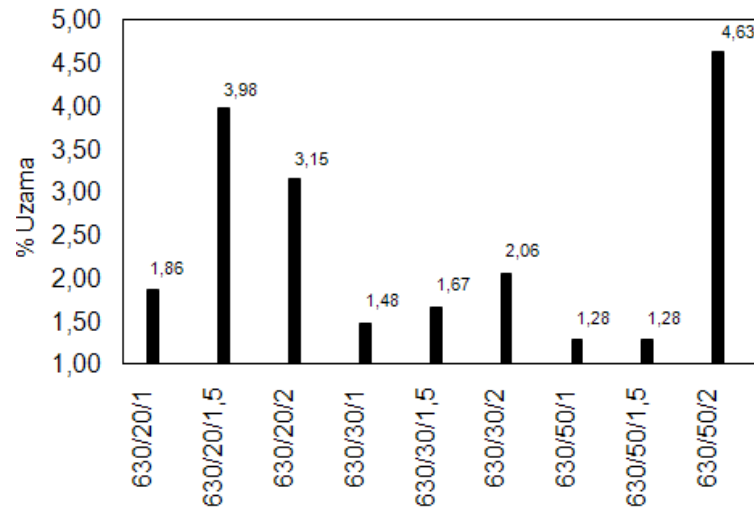


Şekil 6. Kaynak kesit görünüşleri, a) 630/50/1, b) 630/50/2

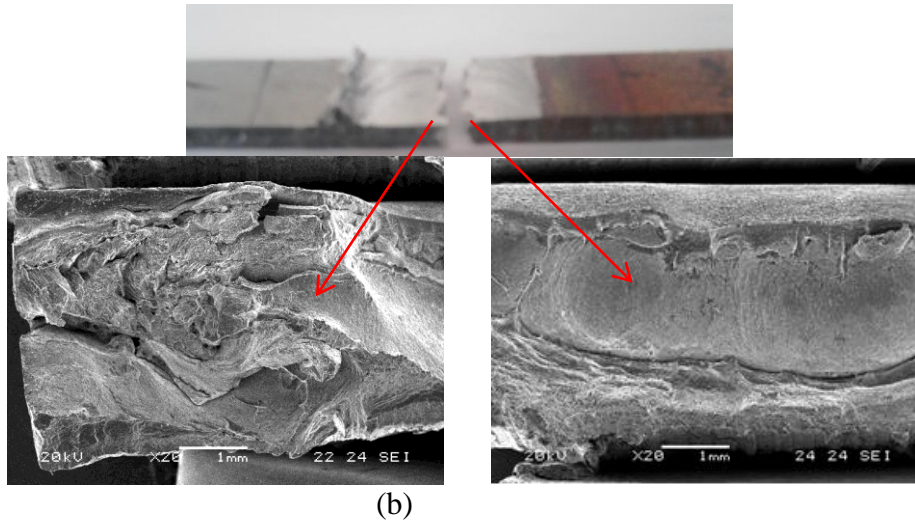
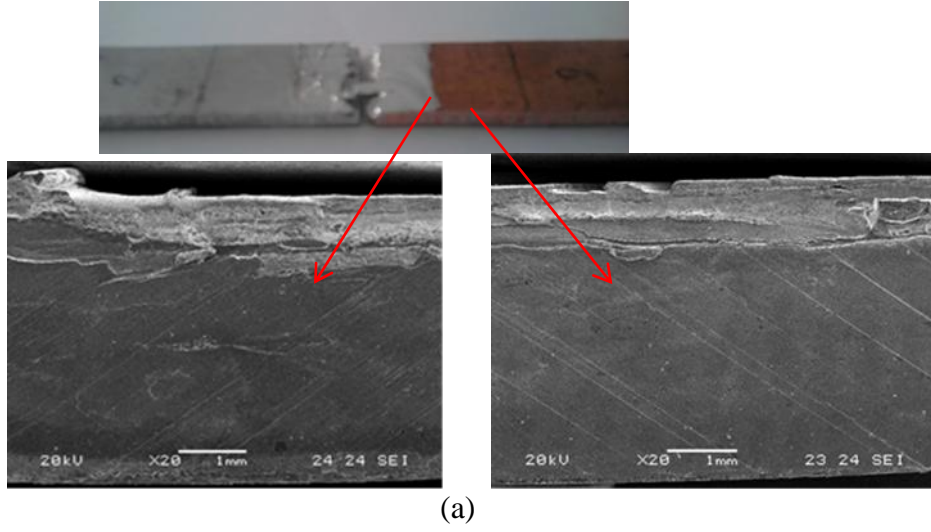
Birleştirmelerin mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla yapılan çekme deneyi sonucunda kopmalar genellikle kaynak bölgesinde ve alüminyumun ısı tesiri altındaki bölgesinde (ITAB) gerçekleşirken kırılma mekanizması genellikle sünek-gevrek olarak gerçekleşmiştir. Dayanım değeri düşük olan numunelerde gevrek kırılma söz konusu olmuştur. Kopmaların literatüre uygun olarak alüminyum tarafında olması, kaynak bölgesinin takım kaydırma nedeni ile alüminyum tarafında oluşması ve Al ana metalinin çekme mukavemetinin Cu ana metalinden düşük olmasına bağlanmıştır [18]. Çekme testleri sonuçları grafik olarak Şekil 7’de, % Uzama değerleri Şekil 8’de verilmiştir. Ana metallerin çekme mukavemeti Al için 111,20 MPa, Cu için 231,38 MPa elde edilmiştir. En büyük çekme mukavemeti 630/50/2 şartlarındaki 9 nolu numunede 98,85 MPa, en düşük çekme mukavemeti ise 630/50/1 şartlarındaki 7 nolu numunede 27,59 MPa değeri elde edilmiştir. Takım konumlarının mekanik değerlere etkisi incelendiğinde; aynı devirde (630 dev/dak) 20 mm/dak takım ilerleme hızında 1,5 mm takım konumunda çekme mukavemetinde artış, 2 mm takım konumunda çok az azalma, 30 mm/dak ve 50 mm/dak takım ilerleme hızlarında takım konumunun artması ile çekme dayanımlarında artışlar gerçekleşmiştir. “0” konumlu yapılan birleştirmelerde az sayıda büyük Cu parçacıkları Al matris ile kaynak bölgesinde karışmakta iken 1-1,5-2 mm takım konumlandırmasına irili ufaklı birçok bakır parçacığın Al matris içerisinde karışması mekanik değerlerin yükselmesini sağlamıştır. Çekme testi sonrası elde edilen kopma yüzeyleri ise Şekil 9’da verilmiştir. Çekme yüzeyleri incelendiğinde çekme dayanımı düşük olan kaynaklı parçalarda Şekil 9 (a) da görüldüğü gibi gevrek kırılma olmuştur. Dayanımı yüksek olan kaynaklı parçalarda ise (Şekil 9 b) sünek-gevrek kırılma gözlenmiştir.



Şekil 7. Çekme testi sonuçları

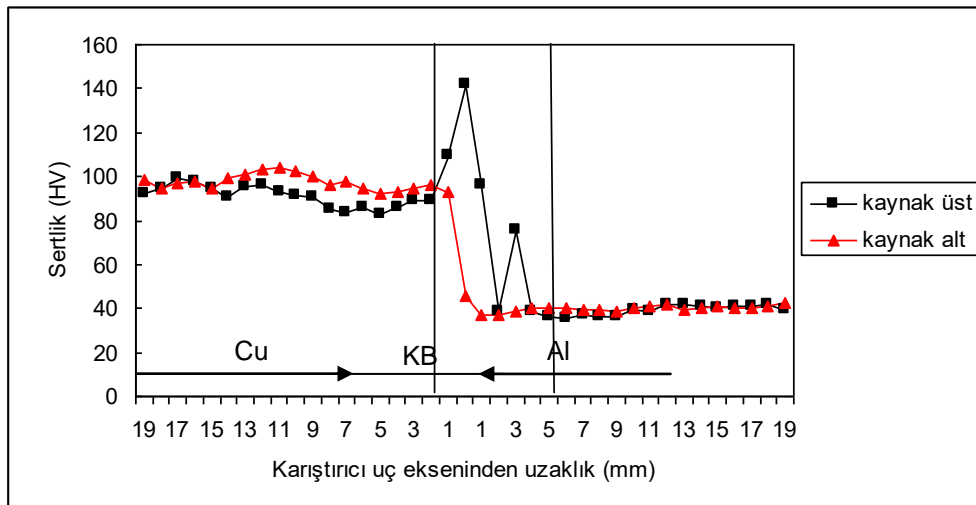


Şekil 8. % Uzama değerleri

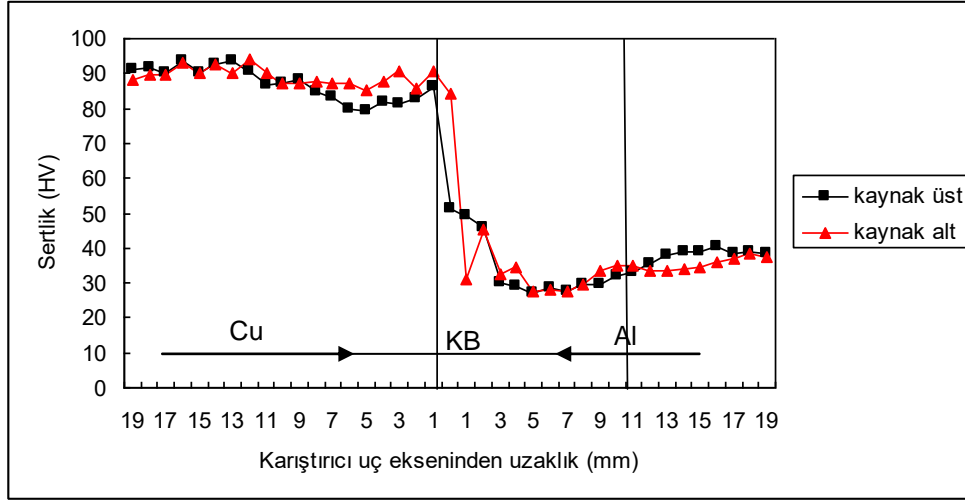


Şekil 9. Çekme testi sonrası yüzey görüntüleri a) 630/50/1, b) 630/50/2

En düşük çekme mukavemetine sahip 630/50/1 parametrelerindeki 7 nolu ve en yüksek çekme mukavemetine sahip 630/50/2 parametrelerindeki 9 nolu numunelerin kaynak alt ve üst bölgelerinin sertlik değerleri incelenmiştir.



Şekil 10. 630/50/1 üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik değişimleri



Şekil 11. 630/50/2 numunenin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik değişimleri

Şekil 10 ve Şekil 11'de kaynaklı numunelerin sertlik değişimleri verilmiştir. Ana metallere mikrosertlik değerleri; Cu için 88 HV, Al için ise 41 HV olarak elde edilmiştir. Şekil 10'da 630/50/1 parametrelerindeki numunenin sertlik değişimi incelendiğinde kaynak bölgesi içinde kaynak üst sertliğinin bakır tarafında en fazla 141 HV, alüminyum tarafında en fazla 36 HV olduğu, bakır tarafın ortalama sertliğinin 91 HV, alüminyum tarafın 39 HV olduğu tespit edilmiştir. Kaynak bölgesindeki sertlik artışları kaynak merkezinin üst kısmındaki iri bakır parçacıkların ve intermetalik bileşenlerin varlığına bağlanmıştır. Şekil 10'da kaynak bölgesinin dar olması yeterli kaynak bölgesinin oluşmaması olarak değerlendirilmiştir. Şekil 11'de 630/50/2 parametrelerindeki numunenin sertlik değişim grafiği incelendiğinde kaynak bölgesi sertliğinin en fazla bakır tarafında 82 HV, alüminyum tarafında en fazla 35 HV olduğu, bakır tarafın ortalama sertliğinin 87 HV, alüminyum tarafın ortalama sertliğinin 37 HV olduğu ortaya çıkmıştır. Sertlik değerlerindeki değişimlerin az olması mikroyapı içinde bakır partiküllerin daha homojen ve küçük parçacıklar şeklinde dağılım göstermesi olarak düşünülmüştür. Kaynak bölgesinin geniş olması ise malzemelerin birbirine tam olarak karışmış bir bölgenin varlığını göstermiştir.

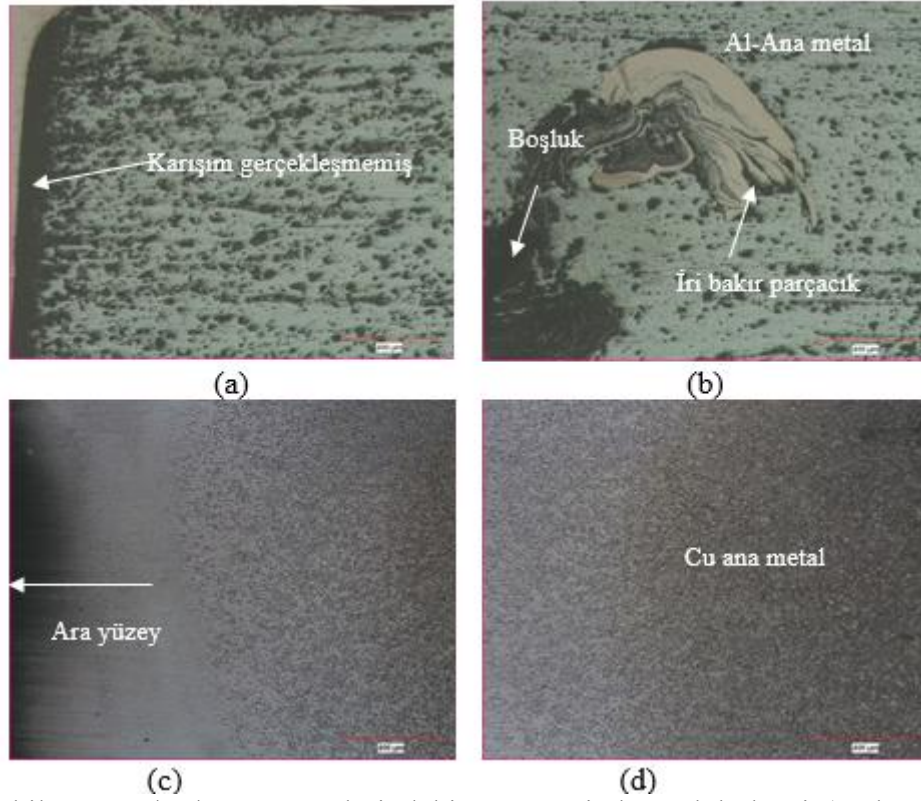
Kaynak bölgelerinin mikroyapı incelemesinde bütün numunelerin kaynak merkezi, alüminyum tarafı ve bakır tarafı ayrıntılı olarak incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, kaynak bölgesinin, karıştırıcı ucun pim kısmının alüminyum tarafına belirli değerlerde (1-1,5-2 mm) kaydırılmasına bağlı olarak alüminyum tarafında olduğu tespit edilmiştir.

Bütün numunelerin mikroyapıları incelenmiş, kıyaslamak amacıyla çekme dayanımı en düşük ve çekme dayanımı en yüksek olan numunelerin mikroyapıları verilmiştir.

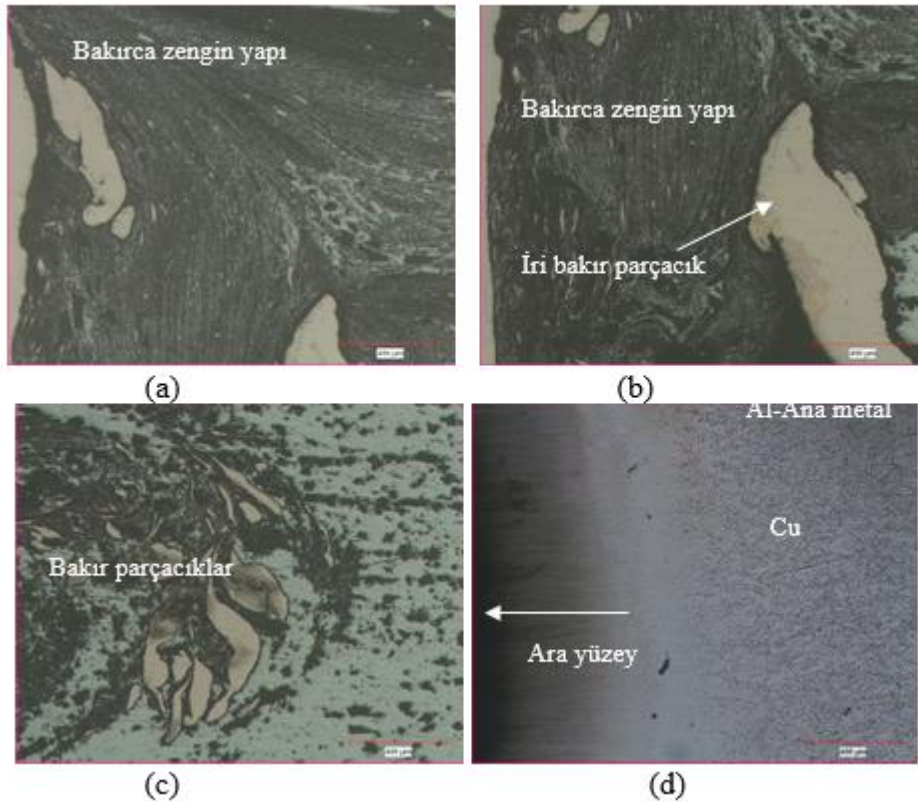
Şekil 12'de 630/50/1 parametrelerindeki 7 nolu numunenin, Şekil 13'de 630/50/2 parametrelerindeki 9 nolu numunenin kaynak bölgelerinin mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Şekil 12'de görüldüğü gibi yapıda karışımın gerçekleşmediği boşlukların olduğu kısımlar tespit edilmiştir. Birleşme bölgesi net olarak görülmemektedir. Al tarafında bakırca zengin yapılar ve irili ufaklı bakır parçacıklardan ziyade büyük bir bakır parçacık bulunmaktadır. Çekme dayanımı düşük olan numuneden farklı olarak Şekil 13'de görüldüğü gibi net bir kaynaklanma bölgesi oluşmuştur. Tam bir karışım bölgesinin oluşması, Al tarafında bakırca zengin yapıların ve bakır parçacıkların varlığı mekanik değerleri arttırmıştır.

Ayrıca kaynaklı bölgelerin SEM görüntüleri incelenmiştir. 630/50/1 parametrelerindeki 7 nolu numunede Şekil 14 (a)'da verildiği gibi karışımın tam olarak gerçekleşmediği, karışımın Al tarafında çok az olduğu, çekme dayanımı yüksek olan 630/50/2 parametrelerindeki 9 nolu

numunede ise Şekil 14 (b)'de Al tarafında karışımın istenen seviyede gerçekleştiğini doğrulanmaktadır.

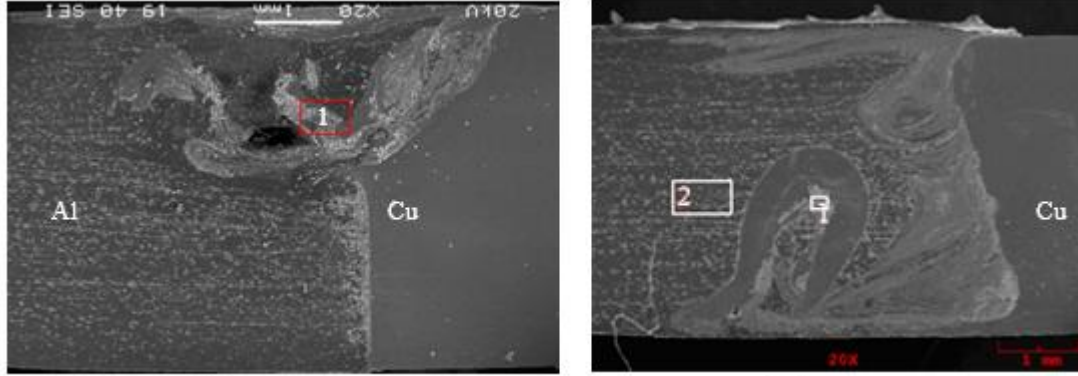


Şekil 12. 630/50/1 parametrelerindeki numunenin kaynak bölgesi a) Al tarafı, b) Al ana metale geçiş, c) Al-Cu Geçiş, d) Cu ana metale geçiş

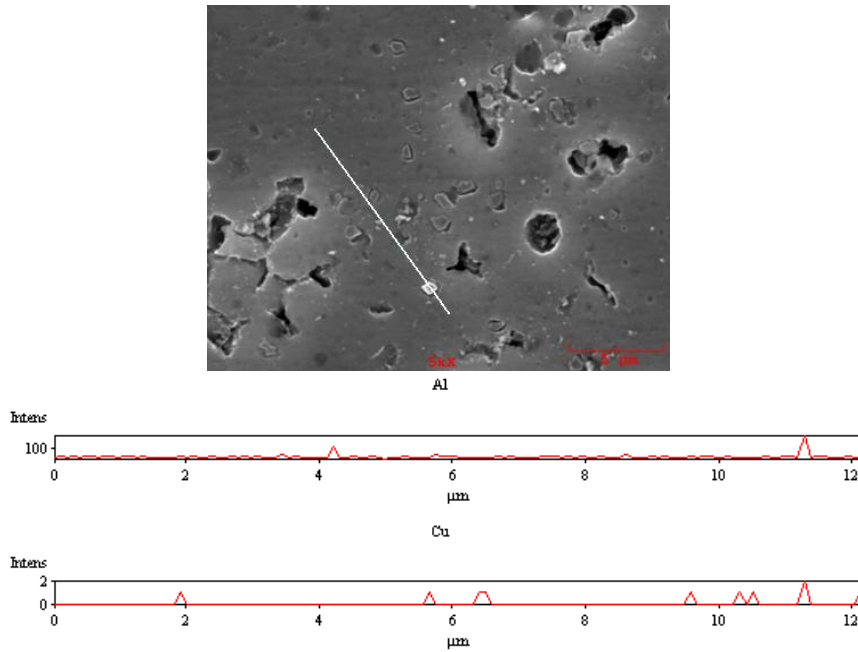


Şekil 13. 630/50/2 parametrelerindeki numunenin kaynak merkezi a) Al tarafı üst bölge b) Al tarafı orta bölge, c) Al ana metale geçiş, d) Cu ana metale geçiş

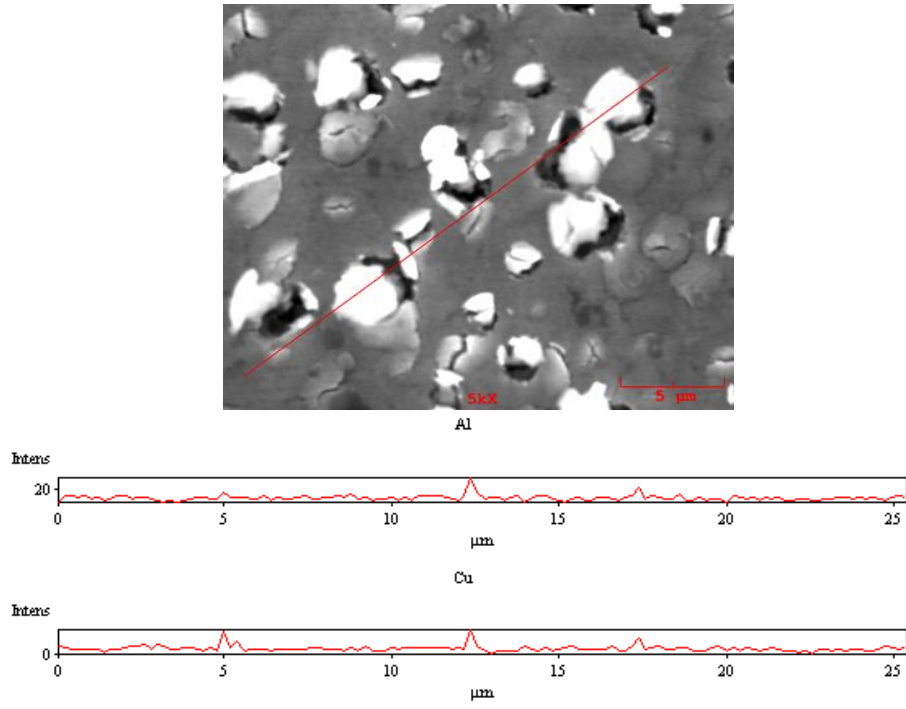
Şekil 15'deki 7 nolu numunenin Şekil 14 (a)' da gösterilen 1 nolu bölgenin EDX çizgisel analizi incelendiğinde alüminyuma göre bakırın daha az olduğu tespit edilmiştir. 9 nolu numunenin Şekil 14 (b)'de gösterilen 1 nolu bölgenin EDX çizgisel analizi incelendiğinde ise hem alüminyum hem de bakırın yoğun olarak varlığı tespit edilmiştir (Şekil 16). 7 ve 9 nolu numunelerin EDX çizgisel analizleri karşılaştırıldığında, çekme dayanımı düşük olan 7 nolu numunede, çekme dayanımı yüksek olan numuneye göre, kaynak bölgesinde bakır miktarının ve malzemelerin birbirine karışımının daha az olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 14. SEM görüntüleri, a) 630/50/1 parametre lerindeki 7 nolu numune, b) 630/50/2 parametrelerindeki 9 nolu numune



Şekil 15. EDX çizgisel analizi (7 nolu numune,1 bölgesi)



Şekil 16. EDX çizgisel analizi (9 nolu numune, 1 bölgesi)

Literatür incelendiğinde, alüminyum ve bakır arasında farklı sıcaklıklarda Al_4Cu_9 , Al_2Cu , $CuAl$, Al_2Cu_3 , $AlCu_4$ gibi intermetalik fazlar oluşmaktadır. Örneğin, $150\text{ }^{\circ}C$ 'de Al_2Cu , $350\text{ }^{\circ}C$ 'de ise Al_4Cu_9 fazları oluşmaktadır. İntermetalik fazların kalınlığı $10\text{ }\mu m$ lik değere ulaştığında bağlantının mukavemeti azalma göstermektedir [25]. Mekanik özelliklerin yüksek olması nedeniyle kaynak bölgesinde oluşabilecek fazları, intermetalik bileşikler tespit etmek amacı ile XRD incelemesi yapılmış ve $CuAl_2$ ve Al_4Cu_9 intermetalik fazlar tespit edilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynak işlemi esnasında kaynak boyunca sıcaklık değişimlerini incelemek amacı ile Şekil 1'de görüldüğü gibi kaynak ekseninden 15 mm uzaklığa kör deliklere 8 adet K tipi termokupl yerleştirilmiş ve kaynak merkezindeki sıcaklık değerleri için karıştırıcı ucun önünden frezeye infrared prometre sabitlenmiştir. Sıcaklık değişimleri incelendiğinde; 1-1,5-2 mm takım konumunda ölçüm yapılan noktalardaki maksimum sıcaklıkların en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri, 630 dev/dak takım dönme hızında ve 20 mm/dak takım ilerleme hızında Cu tarafında $217,8-312,6\text{ }^{\circ}C$, Al tarafında $199,8-323,5\text{ }^{\circ}C$ olduğu, 30 mm/dak takım ilerleme hızında Cu tarafında $151,8-247,6\text{ }^{\circ}C$, Al tarafında $151,4-236,9\text{ }^{\circ}C$ olduğu, 50 mm/dak takım ilerleme hızında Cu tarafında $167,6-267,9\text{ }^{\circ}C$, Al tarafında $174,2-292,8\text{ }^{\circ}C$ olduğu tespit edilmiştir. Kaynak merkezinde ise 630 dev/dak takım dönme hızında sıcaklıklar $338-433\text{ }^{\circ}C$ arasında dağılım göstermiştir. Bu sıcaklık değerleri parametrelerin büyük bir çoğunluğunda $CuAl_2$ ve Al_4Cu_9 fazların oluşumu için yeterli değerlerdedir. Özellikle dayanım değerleri yüksek kaynaklı numunelerde, ısı girdisinin düşük olması nedeni ile intermetalik fazların oluştuğu, ancak kırılganlık yaratacak boyuta ulaşmadığı şeklinde açıklanmıştır.

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, ilerleme kenarına yerleştirilen saf Cu malzeme ile yığılma kenarına yerleştirilen AA1050 malzeme, 630 dev/dak takım dönme hızında, 20, 30, 50 mm/dak takım ilerleme hızlarında, 1-1,5-2 mm takım konumlandırmasında sürtünme karıştırma kaynağı başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. "0" takım konumlandırmasında kaynak kesitinde gözle görülür boşluklar ortaya çıkmış ve çekme dayanım değerleri düşüktür. Takım kaydırması yapılarak daha yüksek mekanik değerler elde edilmiştir.

1. Çekme testi sonuçları incelendiğinde; en yüksek çekme dayanımı 630 dev/dak takım dönme hızında, 50 mm/dak takım ilerleme hızında ve 2 mm takım konumlandırmasında 98,85 MPa olarak elde edilmiş olup Al ana metaline göre (111,20 MPa) %88,89 kaynak performansı elde edilmiştir.
2. 3.Birleştirmelerin sertlikleri incelendiğinde; düşük mekanik özelliklere sahip numunede sertlik değişimleri fazla, kaynak bölgesi daha dar olmuştur. Bu kaynak merkezinin üst kısmındaki iri bakır parçacıkların varlığına ve intermetalik bileşenlere bağlanmıştır. Yüksek mukavemetli numunede sertlik değerleri incelendiğinde, daha homojen bir karışımın olması ile ana malzemeye yakın sertlik değerlerinin olduğu tespit edilmiştir.
3. SEM ve EDX çizgisel analizlerde, 9 nolu numune parametrelerinde karışım bölgesinin olduğu, 7 nolu numune de ise karışım bölgesinin yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Bu durum çekme testleri ve sertlik ölçüm sonuçları ile uyumluluk göstermektedir. Çizgisel analizlerde çekme dayanımı düşük olan numunede bakır içeriğinin, çekme dayanımı yüksek olan numuneye göre daha az olduğu görülmüş ve yeterli karışımın gerçekleşmediği doğrulanmıştır.
4. Kaynak bölgesinde sıcaklığın etkisiyle Al-Cu arasında $CuAl_2$ ve Al_4Cu_9 fazların olduğu tespit edilmiştir. Düşük devirlerde sıcaklıkların çok yüksek olmaması ve bu sıcaklıklarda kalış süresinin az olması nedeniyle intermetalik faz kalınlıklarının 10 μm değerini geçmediği düşünülmüştür. Dayanım değerlerinin yüksek olması bu düşüncüyü doğrulamaktadır.
5. Malzeme çiftinin farklı olduğu birleştirmelerde takım konumlandırmasının mekanik değerleri etkileyen önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir. "0" konumlu birleştirmelere nazaran takım kaydırması (1-1,5-2 mm) mekanik değerleri yükseltmiştir.
6. Farklı malzeme çiftlerinin birleştirmelerinde ilerleme kenarına daha sert metalin, yığma kenarına daha yumuşak metalin yerleştirilmesinin iyi kaynak özellikleri verdiği görülmüştür. Yumuşak metalin ilerleme kenarına taşınmasının daha kolay olduğu tespit edilmiştir.
7. Düşük devirlerde çalışılarak ısı girdisinin azalması ve bu nedenle intermetalik faz kalınlığının artması engellenmiştir. Bu da mekanik özelliklerin iyileşmesini ve kaynaklı parçaların dayanımının artmasını sağlamıştır.

Teşekkür

Bu çalışmayı 2012-49 no'lu Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklediği için Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje birimine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G. TempleSmith, P., Dawes, C.J. (1991). The Welding Institute, TWI, International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8.
- [2] Sarsılmaz, F.,Özdemir, N.(2011). "Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş AA6061/AA7075 Kaynaklı Bağlantıların Yorulma Özelliklerinin Araştırılması", 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, Turkey, (16-18 May)
- [3] Sarsılmaz, F.,Özdemir, N.(2008). "AA1050/AA6061 Alüminyum Alaşım Çiftinin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Karıştırıcı Uç Profillerinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi", Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları,
- [4] Lee, W.B., Jung, S.B. (2004). "The joint properties of copper by friction stir welding" Materials Letters 58: 1041– 1046,
- [5] Sarsılmaz, F.(2008)."Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye,
- [6] Jata, K.V., Semiatin, S.L. (2000)."Continuous Dynamic Recrystallization During

- Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys”, Scripta mater. 43:743-749,
- [7] Bozkurt, Y. (2008). “Sürtünme karıştırma kaynak tekniği ile birleştirilen AA2124/SİCp/25 kompozit levhaların mekanik özellikleri ve mikroyapı karakterizasyonu”, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye,
- [8] Uzun,H., Özbekmez, R. (2008). “Sürtünme Karıştırma Ve Elektrik Ark Kaynak Teknikleri İle Birleştirilen CuZn30 Levhaların Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması” SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi, 12. Cilt, 1. Sayı, s. 9-16,
- [9] Şık, A., Kayabaş, Ö. (2003). “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Yapılan Alüminyumun Kaynağında Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi ,Y.11, S.12, s.30-43,
- [10] Kurt, A., Boz, M., Özdemir, M. (2004). “Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Hızının Birleşebilirliğe Etkisi”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 19, No 2, 191-197,
- [11] Hwang, Y.M., Fan, P.L., Lin, C.H.(2010). “Experimental study on Friction Stir Welding of copper metals”, Journal of Materials Processing Technology ,210: 1667–1672,
- [12] Sidhar H., Martinez, N.Y., Mishra R. S., Silvanus, J. (2016). “Friction stir welding of Al–Mg–Li 1424 alloy” Materials and Design 106: 146–152,
- [13] Abdollah-Zadeh, A., Saeid, T., Sazgari, B.(2008). “Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints”, Journal of Alloys and Compounds ,460: 535–538,
- [14] Zoerama, A.S., Anijdanb, S.H.M., Jafarianc, H.R., Bhattacharjeed, T. (2017). “Welding parameters analysis and microstructural evolution of dissimilar joints in Al/Bronze processed by friction stir welding and their effect on engineering tensile behavior” Materials Science & Engineering A, 687: 288–297,
- [15] Shokria, V., Sadeghib, A., Sadeghia, M.H. (2017). “Effect of friction stir welding parameters on microstructure and mechanical properties of DSS–Cu joints”, Materials Science & Engineering A, 693: 111–120,
- [16] T Saeid, T., Abdollah-zadeh, A., Sazgari, B.(2010). “Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum–copper lap joints made by friction stir welding” Journal of Alloys and Compounds ,490: 652–655,
- [17] Scialpi, A., De Filippis, L.A.C., Cavaliere, P. (2007). “Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy”, Materials and Design,28:1124–1129,
- [18] Barlas, Z., Uzun H. (2010) “Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Cu/Al-1050 alın birleştirmesinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 25, No 4, 857-865,
- [19] Xue, P., Ni, D.R., Wang, D. B., Xiao, L., Ma, Z.Y., (2011). “Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al–Cu joints”, Materials Science and Engineering A ,528: 4683–4689,
- [20] Sun, H., Zhou, Q., Zhu, J., Peng Y. (2017). “Analysis on the Fracture of Al-Cu Dissimilar Materials Friction Stir Welding Lap Joint”, Journal of Materials Engineering and Performance, 26(12): -5715,
- [21] Ouyang, J., Yarrapareddy, E., Kovacevic, R. (2006). “Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper”, Journal of Materials Processing Technology ,172: 110–122,
- [22] Liu, P., Shi, Q., Wang, W., Wang, X., Zhang, Z.(2008). “Microstructure and XRD analysis of FSW joints for copper T2/aluminium 5A06dissimilar materials”, Materials Letters 62: 4106–4108,
- [23] Xue, P., Xiao, B.L., Ni, D.R., Ma, Z.Y.(2010). “Enhanced mechanical properties of friction stir welded dissimilar Al–Cu joint by intermetallic compounds”, Materials

- Science and Engineering A ,527: 5723–5727,
- [24] Genevois, C., Girard, M., Huneau, B., Sauvage, X., Racineux, G. (2011). “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
- [25] Çelik, S. (1996). “Koruyucu Gaz Altında Saf Alüminyum ve Bakırın Difüzyon Kaynağı Şartlarının Belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.