
	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 20.03.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 29.03.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.298889	

SKK ve SKNK yöntemlerinde kullanılan parametrelerin bakır ve pirinç malzemelerin birleştirme özelliklerine olan etkilerinin incelenmesi

Zafer Barlas*¹

ÖZ

Bu çalışmada, literatürde verilen bakır ve pirinç malzemelerin aynı veya farklı bir türdeki metale, sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağıyla (SKNK) yapılan birleştirme çalışmaları üzerine bir derleme gerçekleştirilmiştir. Özellikle takım geometrisi, takım dönme ve ilerleme hızı gibi önemli kaynak değişkenlerinin, bu iki yöntemdeki birleştirme performanslarına, kaynak bölgesinin mikroyapı değişimine, kaynak hataları oluşumuna ve farklı metallerin birleştirilmesinde kaynak kalitesini etkileyen metaller arası fazların mevcudiyetine olan etkileri özetlenmiştir. İncelenen çalışmalar arasında saf bakırın yine saf bakıra, pirinç alaşımının yine aynı alaşıma, saf bakırın pirinç alaşımlarına, saf bakır veya pirinç alaşımlarının saf alüminyum veya çeşitli alüminyum alaşımlarına, pirinç alaşımının çelik malzemeye olan birleştirmeleriyle ilgili elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: bakır, pirinç, alüminyum, SKK, SKNK

A review on effect of process parameters on weld features of copper and brass material in FSW and FSSW methods

ABSTRACT

In this study, a literature survey has been done about similar and dissimilar copper and brass alloys joints by friction stir welding and friction stir spot welding methods. The effects of some important process parameters such as tool geometry, rotation speed and travel speed of tool on joint performances, change in weld microstructure, defect formation and occurrence of intermetallic compounds, which are adversely affect weld quality in dissimilar joint, have been summarized. The results of studies about joining of copper to copper, brass to brass, copper to brass, copper to aluminum or alloy, brass to aluminum or alloy, brass to steel have been reviewed in the present work.

Keywords: copper, brass, aluminum, FSW, FSSW

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Serdivan-Sakarya - barlas@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bakır, kolaylıkla şekil verilebilirliği ve iyi korozyon direnciyle bir arada sahip olduğu mükemmel elektrik ve ısı iletkenlik özellikleri sayesinde, endüstriyel uygulamalar için en önemli mühendislik malzemeleri arasında yer almaktadır. Alaşımlandırmayla iyi mukavemet ve sünekliğin yanı sıra dekoratif ve çekici görünümü diğer önemli özellikleri arasındadır. Pirinç, bakırın, içerisinde %5'den %45'e kadar geniş bir aralıkta çözünebilirliğe sahip olan çinkoyla yaptığı alaşımdır ki çoğunlukla ticari pirinç alaşımları, beklenen özelliklerin sağlanması için düşük miktarlarda Al, Mn, Ni, Pb, Si, Sn gibi diğer elementleri de içermektedir. Tek fazlı pirinç, bakırdan daha iyi soğuk şekillendirilebilirlik, yüksek mukavemet ve süneklikle beraber, daha düşük elektrik ve ısı iletkenliğe sahiptir [1, 2]. Bakır bu üstün özelliklerine karşın, geleneksel ergitme tekniklerinde yüksek ısı iletkenliği sebebiyle nispeten daha yüksek ısı girdisi gerektirmekte ve bunun sonucunda da ergime bölgesinde kaydadeğer biçimde tane irileşmesine, geniş bir ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) oluşumuna ve yüksek kalıntı gerilmelerle birlikte çarpılmalara uğramaktadır [3]. Pirinç malzemelerin ergitme kaynaklarında ise renk değişimi, yüksek sıcaklıkta oksitlenme, nispeten yüksek ısı iletkenliğine bağlı olarak nüfuziyetsizlik, çinkonun düşük sıcaklıkta buharlaşması nedeniyle mekanik özelliklerin düşmesi ile çarpılma gibi bazı zorluklarla karşılaşmaktadır [4].

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile bunun bir türevi olan sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) yöntemleri iş-parçalarında ergime olmaksızın katı fazda birleştirmeye olanak sağlamaktadır. Böylece kaynakla birleştirilecek malzemelerde ergime ve katılaşmayla ortaya çıkabilen bazı problemlerle bu yöntemde karşılaşılmamaktadır. Her iki yöntemde de özel olarak tasarlanmış bir takım kullanılmaktadır. Kendi eksenini etrafında belirli bir hızda dönen ve iki farklı çapa sahip kısımdan oluşan takım, levha yüzeylerinden içeri girerek malzeme yüzeylerine sürtünür. Sürtünme sonucu sıcaklığın artmasıyla, birleştirme için gerekli ısı girdisi açığa çıkarken, aynı zamanda birleştirilecek malzemelerin karışımı da sağlanır. SKK ile alın ve bindirme formundaki birleştirmeler, SKNK ile nokta kaynakları başarıyla yapılabilmektedir. SKK yönteminde takımın geometrisi, dönme hızı, ilerleme hızı (kaynak hızı), açısı, dikey eksende basma kuvveti, dönme yönü, kaynaklanacak iş-parçalarının sabitlendikleri pozisyonlar gibi parametrelerin yanı sıra, SKNK yönteminde özellikle takımın kaynak işlemi esnasında parçalarla ne süre temas halinde kaldığı, kaynak işlemi öncesinde üzerinde düşünülüp, tasarımları yapıp, kontrol edilebilecek önemli değişkenlerdir [5, 6]. Öyle ki her iki yöntemin de başarıyla uygulanabilmesi, bir başka ifadeyle tasarım aşamasında kaynaklı

bağlantıdan elde edilmek istenen mukavemet ve diğer özelliklerin sağlanabilmesinin yolu direkt olarak bu değişkenlerin doğru seçilip uygulanmasından geçmektedir.

Bakır ve alaşımlarının kendi aralarında ve özellikle alüminyuma SKK ve SKNK ile birleştirilmesi ile ilgili çalışma sayısının son zamanlarda artış kaydettiği görülmektedir [7-12]. Bu durumu, bakır ve pirincin ergitme kaynak yöntemlerinde karşılaşılan ve yukarıda belirtilen problemlerin en aza indirilmesinin yanı sıra, özellikle elektrik iletimi kombinasyonu ile alüminyumun daha ucuz ve hafif, aynı zamanda mukavemetli olması sebebiyle bakır/alüminyum birleştirmelerinin yüksek doğru akım hatlarında kullanılması, alüminyum/pirinç ve bakır/pirinç birleştirmelerinin ise soğutma amaçlı ısı transfer sistemleri için iyi bir aday olması teşvik etmektedir [12-14].

Bu çalışmada, bakır ve pirinç malzemelerin benzer veya farklı malzemelerle SKK ve SKNK yöntemleriyle birleştirilmesinde yukarıda ifade edilen bazı önemli kaynak değişkenlerinin mekanik özellikleri doğrudan belirleyen kaynak hataları, mikroyapı değişimi, metaller arası bileşiklerin oluşumu, malzeme akışı/taşınması gibi hususları üzerine etkileri literatürde sunulan çalışmalar ışığında özetlenmektedir.

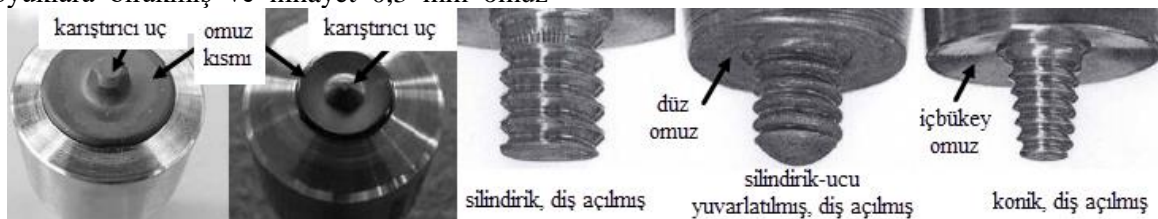
2. SKK / SKNK DEĞİŞKENLERİNİN BAKIR VE PİRİNÇ MALZEMELERİN KAYNAĞINA ETKİLERİ (EFFECTS OF FSW AND FSSW PARAMETERS ON WELDS OF COPPER AND BRASS MATERIALS)

2.1. Takım geometrisi (Tool geometry)

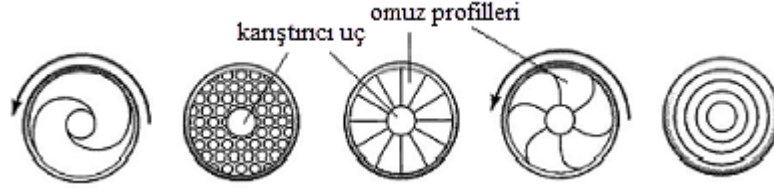
Dikkat edilecek olursa, önceki bölümde SKK ve SKNK yöntemlerinin başarısını etkileyen faktörler olarak vurgulanan değişkenlerin neredeyse tamamı takım ile ilişkilidir. Bu nedenle de değerlendirmeye takım üzerinden başlamak daha doğru olacaktır. Her iki yöntem için de takım denilince akla, detayları Şekil 1'de gösterilen, başlıca iki kısım gelmektedir ki her iki teknik için de bunların neden oldukları etkiler benzerdir. Takımı öncelikle omuz kısmı ve karıştırıcı uç olmak üzere birbirinden ayrı düşünmek ve değerlendirmek gerekmektedir. Omuz kısmının başlıca fonksiyonları arasında, kaynak için gerekli olan sıcaklık artışının yanı sıra ısı girdisinin sağlanması, plastikleşip yumuşamış malzemenin bir nevi dövme işlemine tabi tutulması ve bu malzemenin levha yüzeyinden dışarı kaçmasının önlenmesi sayılabilir. Deneysel çalışmalar, kaynak prosesi sırasında ulaşılan sıcaklığın yaklaşık %87'sinin omuz kısmı ile iş-parçaları arasındaki bu sürtünmeden kaynaklandığını ortaya koymuştur [16]. Hautala vd. [17] takım dönme

hızının artmasıyla beraber daha geniş bir omuz çapı kullanımının saf bakırın SKK mukavemetini arttığını belirtmiştir. Ayrıca farklı şekillerde girinti-çıkıntı, kanal vb. profillere sahip içbükey veya dışbükey geometrilerdeki omuzların (Şekil 2) kullanımıyla, malzeme deformasyonu ve karıştırmanın homojenliğinde bir gelişme sağlanabilmektedir [5]. Galvão vd. [18] yüksek fosforlu bakırın 5083-H111 alüminyum alaşımına SKK ile alın birleştirmesinde içbükey bir omuz yüzey formu kullanılırsa, omuzun alt kısmında yoğun bir malzeme karışımı sebebiyle Cu_9Al_4 ve $CuAl_2$ metaller arası bileşiklerin düzensizce dağıldığı bir kaynak yüzeyinin görüldüğünü bildirmiştir. Fakat yüzeyinde sarmal bir çıkıntıya sahip bir omuz kullanımında ise nispeten önemsiz oranda metaller arası bileşiklerin var olduğu, daha düzgün bir kaynak yüzeyi elde edilmiştir. Sarmal çıkıntılı omuzun, neredeyse tamamen $CuAl_2$ 'den oluşan karışmış bir bölgeye, konik omuzun ise diğerinden daha az oranda metaller arası bileşik içeren ve Cu_9Al_4 'ce zengin bir karışımın olduğu bir kaynak metaline (KM) sebep olduğu da araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir. Benzer şekilde Galvão vd. [19] düz, içbükey ve sarmal çıkıntıya sahip üç farklı takım omuz geometrisinin yanı sıra farklı takım dönme ve ilerleme hızlarının bakırın SKK ile alın kaynağındaki etkilerini incelemiştir. Sarmal çıkıntılı omuza sahip takımla çok daha etkili bir karıştırma sağlanabilirken, düz omuzda hatalı kaynaklar üretilebilmiştir. Ayrıca sarmal çıkıntılı omuzda diğerlerinden daha ince taneli bir KM elde edilmiştir ki bu durum, kaynaktaki daha yüksek sertlik ve mekanik özelliklere neden olmuştur. Düşük takım dönme ve kaynak hızlarında bütün kaynaklarda kök hatasıyla, ilerleme kenarlarında boşluk oluşumu gözlenirken, kaynak hızından bağımsız olarak takım dönme hızının artması sarmal omuzlu takımda hataların yok olmasını sağlamıştır. Teimurnezhad vd. [20] saf bakırın SKK ile alın kaynağında omuz kısmının batma derinliğinin etkisini incelemiştir. Bunun için kaynak başlangıcında omuz ile levha yüzeyleri arasındaki mesafe 0 (sıfır) alınırken, bu değer daha sonra 0,3 mm levhalara doğru kaydırılmıştır. Omuz kısmının levha yüzeylerinden içeri doğru girmesiyle, 0 mm mesafede iken kaynak yüzeyinde oluşan büyük oyuklar yerini KM içerisindeki daha küçük oyuklara bırakmış ve nihayet 0,3 mm omuz

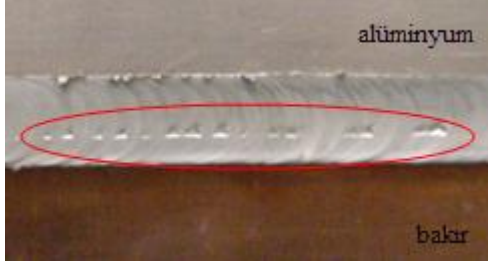
derinliğinde hatasız bir kaynak elde edilebilmiştir. Takımın diğer bir önemli kısmı olan karıştırıcı uca gelince, bu kısmın plastikleşmiş malzemenin karıştırılması ve taşınması açısından önemli olduğu görülmektedir. Burada, ucun çapı ve Şekil 1'de örnekleri gösterilen yüzey özellikleriyle (dış açılmış/açılmamış, silindirik, konik vb.) karışım bölgesinin genişliği, mikroyapı oluşumu ve malzeme akışı belirlenirken; genelde alın birleştirmeler için malzeme kalınlığından 0,1-0,3 mm daha kısa seçilen uç uzunluğu, karışım bölgesindeki plastikleşen malzemenin nüfuziyet derinliğinde etkili olmaktadır. Khodaverdizadeh vd. [21] saf bakırın SKK ile alın birleştirmesinde karıştırıcı uç formunun etkisini incelemek amacıyla, dış açılmış silindirik ve kare kesitli olmak üzere iki farklı uç geometrisi kullanmıştır. Kare kesitli uç kullanılması durumunda KM'de çok daha ince tanelerin (10 μ m'ye 15 μ m) oluştuğu, dolayısıyla sertlik, akma ve çekme mukavemetlerinde ana metale göre azalmaya rağmen, silindirik uca göre daha yüksek mekanik özellikleri getirdiği belirlenmiştir. Karıştırıcı ucun iş-parçası/parçaları yüzeyinden ne kadar derinliğe indiğiyle ifade edilebilen karıştırıcı uç batma derinliği ucun uzunluğuyla, uç uzunluğu ise malzeme kalınlığıyla ilişkilidir. Yetersiz batma derinliği durumunda, omuz kısmı iş-parçaları yüzeylerine temas etmeyecek, böylece yeterli ısı girdisi sağlanamayacağı gibi, karıştırılan malzeme etkin bir şekilde taşıyamayacaktır. Bu durumda da özellikle dikiş yüzeyinde tünel benzeri hataların oluşması kaçınılmaz olacaktır (Şekil 3). Gereğinden fazla batma derinliği ise başta ucun altlık levhaya teması ile hasara uğraması ve aşırı malzeme deformasyonu gibi sorunlara neden olacaktır. Siddharth ve Senthilkumar'a göre [22] saf Cu ile 5083 alüminyum alaşımının SKNK bindirme birleştirmesinde uç batma derinliğinin belirli bir değerin altında olması



Şekil 1. SKK ve SKNK için takım detayları ve bazı uç geometrisi örnekleri (Tool detail and some stirrer pin geometries in FSW and FSSW) [15]



Şekil 2. Çeşitli omuz yüzeyi profilleri (Various shoulder surface profiles) [5]



Şekil 3. Bir alüminyum/bakır birleştirmesinin yüzeyindeki tünel benzeri oyuk hatası (Tunnel-like cavity on the surface of aluminum/copper joint)

durumunda, alttaki bakır levha yeterince plastikleşmemekte; eğer belirli bir değerin üzerinde olursa da kolayca çatlak başlangıcına sebep olan büyük bir anahtar deliği söz konusu olmaktadır. Heideman vd. [23] saf Cu ile 6061-T651 alüminyum sacların SKNK ile bindirme şeklinde birleştirmesinde uç uzunluğundaki artışın dayanımın artmasına neden olduğunu, en uygun takım dönme hızında 2,3 mm uç uzunluğu kullanılıncaya, aynı devirdeki 1,8 mm uzunluğa kıyasla %70 daha yüksek performansa ulaşıldığı görülmüştür. Kısa uç kullanılması durumunda takım dalma derinliğinin artırılması nedeniyle kaynak performansının iki kattan daha fazla olumlu etkilendiği belirtilmiştir. SKNK yönteminde farklı olarak bazı araştırmacılara göre, tamamen veya büyük oranda anahtar deliği şeklinde bir boşluk olmaksızın kaynak kesiti sağlanabilmesinden dolayı uçsuz veya minimum uzunluktaki bir karıştırıcı uca sahip takımlarla daha sağlam kaynaklar yapılabilmektedir. Ayrıca, batma derinliği hususunda üstteki parça kalınlığının yanı sıra, alttaki parçadan da ne kadar malzemenin karışıma uğramasının beklendiği de dikkate alınmalıdır. Tüm bunlardan dolayı, optimum bir çap ve geometride, yüzey profili iyi tasarlanmış omuz ile uygun çap ve uzunluğa sahip bir karıştırıcı uçtan oluşan takımın, başarılı bir birleştirmenin kilidini açan anahtar olduğu rahatlıkla söylenebilir.

2.2. Takım dönme hızı ve takım ilerleme hızı (Tool rotation speed and tool travel speed)

Takım dönme hızının hem SKK hem de SKNK teknikleri için belki de en yaygın olarak üzerinde çalışılan değişken olduğunu söylemek mümkündür. Çünkü sürtünme sonucu açığa çıkan ısıdan tutun da plastik deformasyona uğrayan malzeme miktarı, meydana gelen kuvvetlerin büyüklüğü, malzeme akışı/taşınması, kaynak bölgesini oluşturan mikroyapı bölgelerinin geometrileri, mikroyapıların tane büyüklüğü, takım aşınmasının derecesi, muhtemel

kaynak hatalarının tip ve büyüklükleri ile özellikle farklı metallerin kaynağında görülen çeşitli metaller arası bileşiklerin miktar ve şekillerine kadar geniş bir kapsamda birleştirme özelliklerini belirleyici etkisi vardır [24-26]. Takım dönme hızının artmasıyla daha fazla sürtünme ısısı açığa çıkacağından, kaynak sıcaklıkları da artacaktır ki bu durumda malzemenin yoğun bir şekilde karışmasına neden olur. Ancak takım dönme hızının yanı sıra ısı girdisinin yeterinden fazla olmasıyla KM ve ITAB'da dislokasyon yoğunluğunda artışın yanı sıra, tanelerde irileşme ve mekanik özelliklerde bir azalma görülebilir [26]. Takımın, proses sırasında kaynak hattı boyunca hareket etmesiyle ifade edilebilen, takım ilerleme hızı ya da başka bir deyişle kaynak hızı, özellikle ısı girdisi ve malzeme karışımı/taşınması açısından takım dönme hızıyla benzer etkileri oluşturan diğer önemli parametredir. Yüksek kaynak hızlarında yetersiz malzeme akışı ve ısı girdisinin neden olduğu kaynağın içinde oyuk, yüzeyinde tünel şeklinde boşluklar, kök nüfuziyetsizlikleri ve yüzey bozuklukları görülmektedir [4, 27]. Bununla birlikte, KM'deki sertlikler nispeten daha yüksek kaynak hızlarında yani düşük ısı girdisi şartlarında tanelerin incelmelerinden dolayı artış göstermektedir [25-30]. Genel olarak diğer değişkenler sabit iken, aşırı yüksek veya düşük takım dönme ve ilerleme hızlarının kaynak özelliklerine olumsuz yönde etkilerinin olduğu da bilinmektedir. Bu nedenle, birbirlerinden bağımsız değerlendirilemeyecek olan bu iki faktör arasında uygun bir kombinasyonun sağlanması, kaynağın başarısı açısından çok önemlidir [4]. Örneğin Surekha ve Els-Botes [31] saf bakır levhaların 50-250 mm/dak arasındaki farklı kaynak hızlarında SKK ile alın altına kaynağında, uygun takım dönme hızı kullandığında, kaynak hızındaki artışın mukavemet değerlerini arttırdığını belirtmişlerdir. Moghaddam vd. göre [32] CuZn30 pirinç levhaların SKK ile alın birleştirmesinde takım ilerleme hızının artmasıyla, KM içerisinde ultra ince tanelerden oluşan karışım bantları yoğunluğu artış göstermiş, bu da çekme ve akma mukavemetlerinde bir miktar artışa neden olmuştur.

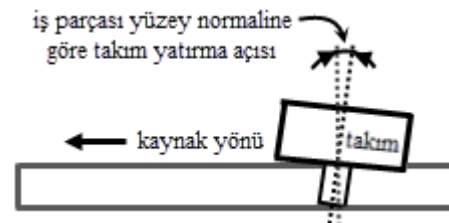
Genel itibariyle, alüminyum malzemenin bakır malzemeye birleştirmelerinde karışım bölgesinde iki farklı mikroyapı bölgesinin varlığı söz konusu olmaktadır. Birincisi bakırca zengin parçacıklarla takviye edilmiş alüminyum matris bölgesi, diğeri de bakır karışım bölgesidir. Takım dönme hızının artması veya ilerleme hızının azalmasıyla çekme testi sırasında çatlak başlangıcına ve ilerlemesine neden olan Al_4Cu_9 , $AlCu$, Al_2Cu gibi metaller arası bileşiklerin

oluşturduğu bölgeler de artmaktadır ki bunlar, Al-Cu sisteminde yaklaşık 300 °C civarında kolaylıkla oluşabilmektedirler [11]. Bununla birlikte, Cu-T2 ile 5A06 alüminyum alaşımının 950-1180 dev/dak takım dönme hızlarında ve 150-235 mm/dak kaynak hızlarında alın birleştirmesinde, en düşük kaynak ve takım dönme hızlarında herhangi bir metaller arası faz oluşmadan, sağlam bir kaynağın yapılabildiği de rapor edilmiştir [33]. Bu iki parametrenin artmasıyla alüminyum matris içerisine sürüklenen bakır miktarında artış gözlenmektedir. Isı girdisinin artışıyla beraber karıştırmanın da artması sonucu artan plastik şekil değişimiyle, iki malzemenin deformasyon kabiliyetlerinin farklı olmasından kaynaklanan, matriste alüminyumca veya bakırca zengin bantlar daha yaygın olarak oluşmaya başlamaktadır. Ayrıca metaller arası bileşiklerin kalınlıkları da bu iki değişkenden etkilenmektedir. Bu alüminyum kompozit yapısı ile bakır veya alüminyumca zengin bantların varlığı karışım bölgesindeki sertlik değerlerini yükseltmektedir. Saf bakırın SKK yöntemiyle alüminyum veya alaşımına alın ve bindirme kaynağıyla ilgili çalışmalarda açıkça görülmektedir ki, çok düşük kaynak hızlarında veya yüksek takım dönme hızlarında, alüminyum levhadaki KM'de nispeten fazla miktarda oluşan bakır parçacıklar ve sert, gevrek Al_4Cu_9 , Al_2Cu , Al_2Cu_3 gibi fazların neden olduğu mikro çatlaklar; yüksek kaynak hızlarında ise makro boşluklar kaynağın sağlamlığını olumsuz etkilemektedir [9, 34-36]. Barlas ve Uzun [12] saf Cu ve CuZn37 pirinç levhaları farklı takım dönme hızlarında SKK ile alın alına birleştirmiştir. Araştırmacılar, takım dönme hızının artmasıyla birleştirmelerin akma, çekme ve uzama değerlerinin arttığını, kök ve yüzey eğme testlerinde de benzer bir eğilimin gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Yüksek takım dönme hızına bağlı olarak ITAB'ların genişliği artsa da, en düşük takım dönme hızında yetersiz ısı ve karıştırma sebebiyle kök nüfuziyetsizliği görülmüştür. Siddharth ve Senthilkumar [22] saf bakırla Al5083 alüminyum alaşımının SKNK ile bindirme şeklinde birleştirmesinde takım dönme hızı ve takım bekleme süresinin belirli değerler üzerinde tutulmasıyla, aşırı ısı girdisi nedeniyle birleştirmenin deforme olup, malzemenin aşırı bir şekilde dışarı taşıdığını belirtmiştir. Eğer bu iki parametre belirli değerlerin altında olursa, bu kez de düşük ısı girdisi ve karışım oranı sebebiyle malzemeler yeterince yumuşamamakta ve tatmin edici bir birleşme ortaya çıkmamaktadır. Heideman vd. [23] saf Cu ile 6061-T651 alüminyum sacları SKNK ile bindirme şeklinde birleştirmesinde karıştırıcı uç uzunluğu, takım batma derinliği, takım dönme hızı ve kaynak süresinin etkilerini değerlendirmiştir. Takım dönme hızının kaynak mukavemeti üzerine en önemli etken olduğu, takım dönme hızının 1000 dev/dak'dan iki katına çıkarılmasıyla mukavemetin %150 arttığı, üç katına çıkarıldığında ise önemli bir değişime neden olmadığı belirlenmiştir [23]. Bunun nedeni olarak, dönme hızına bağlı olarak ulaşılan uygun maksimum

sıcaklıktan sonra sivilaşmanın meydana geldiği ve takımın bir nevi patinaj yapması gösterilmiştir. Kaynak süresinin ise birleştirme performansları üzerine belirleyici bir etkisi gözlenmemiştir. En iyi birleştirmenin mikroyapı incelemelerinde, alttaki bakır levhadan yukarı doğru taşınan çengel şekilli bakır malzemenin, iki levha arasında bir nevi kilitleyici rolü nedeniyle kaynak performansını arttırdığı, bu çengelin ucu ile anahtar deliği arasında kalan alüminyum karışım metali mesafesinin doğru orantılı olarak dayanımı arttırdığı sonucuna varılmıştır. Yukarıda sunulan örnekler ışığında elde edilen sonuçlara ilave olarak, özellikle yüksek hızda üretim yapabilmek yani kaynak hızının artırılması amacıyla, yüksek takım dönme hızları kullanımının takım aşınmasını kolaylaştıracağı da gözden kaçırılmamalıdır. Bu iki parametrenin böyle seçilmesi durumunda geleneksel çeliklerden (sıcak iş, yüksek hız çelikleri vb.) yapılan takımların yetersiz kalabileceği ve dolayısıyla çeşitli karbür, nitrür esaslı malzemelerin takım yapımında uygun olabileceği düşünülmektedir.

2.3. Takım yatırma açısı (Tool tilt angle)

Takımı Şekil 4'de gösterildiği biçimde, kaynak hattına göre ilerleme yönüne ters olacak şekilde, dikey ekseninde birkaç derece yatırmak yani bir takım batma açısı kullanmak, plastikleşen malzemenin uç tarafından daha etkin ve homojen bir şekilde taşınması (özellikle yukarıdan aşağıya, önden arkaya doğru) ve omuzun arka kısmındaki dövme kuvvetini arttırmak açısından yararlı olabilmektedir. Çoğu uygulama için bu açı 1-3° arasında olumlu sonuç verirken, hiç açı uygulamamak (0°) ya da 3°'nin üzerinde uygulamak kaynak bölgesinde çeşitli hatalara neden olabilmektedir. 0° takım açısında özellikle iş-parçaları yüzeylerinden gereksiz malzeme kaldırılması sonucunda aşırı kaynak çapaklarının oluşacağı, aşırı açıda da ısı girdisi ve dövme kuvveti miktarlarının artacağı dikkate alınmalıdır. Mehta vd. [27] saf bakırla AA6061-T651 alüminyum alaşımını iki farklı takım tasarımıyla, üç farklı takım ötelemesiyle, farklı takım ilerleme hızları ve takım açıları kullanarak birleştirmiştir. Sivriltilmiş uç kullanımında kök kısımlarda büyük boşluklarla karşılaşmış ve takıma açı verilmezse, düşük dövme kuvveti nedeniyle malzemelerde uygun bir karışımın meydana gelmediği görülmüştür. Bu durumda KM içerisinde çatlaklar oluşmuştur. Ayrıca 0° takım açısında kaynak çapakları meydana gelmiştir.



Şekil 4. Takım açısının şematik gösterimi (A schematic illustration of tool tilt angle)

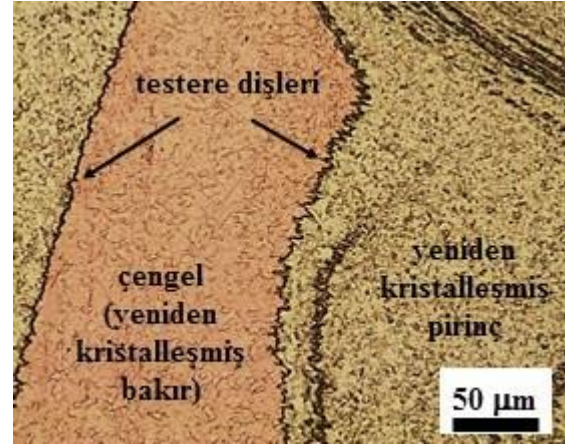
2.4. Takım basma kuvveti (Tool load)

Dikey doğrultuda takım basma kuvveti veya takım dalma kuvveti, takım ile malzeme arasındaki temasın sürdürülebilmesi ve yeterli ısı girdisi ile dövmenin elde edilebilmesi, dolayısıyla karışım bölgesinde tam nüfuziyetin sağlanabilmesi açısından önemlidir. Dövme kuvvetinin bu şekilde artmasıyla ince taneli bir mikroyapıda yüksek sertlik ve mukavemetler elde edilebilmektedir. Ayrıca yetersiz kuvvetler yetersiz birleşmelere, aşırı kuvvetler ise kaynak kesitinde incelmeye neden olmaktadır [37, 38]. Barlas [39] CuZn30 pirinç sacı DP600 çelik saca farklı 3,2-4,8 kN takım basma kuvvetleriyle iki farklı takım bekleme sürelerinde (8 s ve 12 s) SKNK ile birleştirmiştir. Çalışmada takım basma kuvvetinin birleştirme özelliklerini etkileyen başlıca parametre olduğu; takım basma kuvveti ve bekleme süresinin artmasıyla, omuz çevresiyle karıştırıcı uç arasında kalan bölgedeki pirinç/çelik arayüzeyinde iyi bir metalürjik bağlanmanın meydana geldiği, dolayısıyla nokta kaynaklarının kopma yüklerinin arttığı belirlenmiştir. SKNK sırasında 600 °C civarında tepe sıcaklığı kaydedilirken, bu sıcaklığın pirinç malzemede yeniden kristalleşme için yeterli, östenitleme sıcaklığından düşük olduğundan çelik malzemede martenzitik dönüşüm için yetersiz olduğu ifade edilmiştir. Genel olarak pirinç malzemede yeniden kristalleşmeye rağmen, bir yumuşama belirlenirken, pirinç KM'de görülen soğan halkaları yapısının sertliğin artışına katkıda bulunduğu da ifade edilmiştir.

2.5. Takım bekleme süresi (Tool hold time)

SKNK yönteminde, dönmekte olan takımın levha yüzeylerinde maksimum kuvvette kaldığı süre olarak tanımlanabilen takım bekleme süresi, diğer parametrelere benzer şekilde ısı üretimi ve omuzla uç çevresindeki malzemenin plastikleşip yönleneceği ve dolayısıyla kaynağın kesit geometrisi bakımından kaynak kalitesini etkilemektedir. SKNK'da takım ilerlemesi olmadığından, bunun yerini bir bakıma takım bekleme süresinin aldığını söyleyebiliriz [40]. Barlas [8] saf bakır ve CuZn30 pirinç sacların SKNK ile bindirme formundaki birleştirmesinde takım dönme hızı, levha pozisyonu ve takım bekleme süresinin etkilerinin incelemiştir. Pirinç sac üstte konumlandırıldığında, takım dönme hızı ve/veya bekleme süresinin artmasıyla kopma yüklerinin arttığı rapor edilmiştir. Bunun nedeni olarak artan ısı girdisi ve daha yoğun karıştırma sonucu metalürjik bağlanma alanının genişlemesi gösterilmiştir. Bunlardaki artış kaynak bölgesinde ölçülen tepe sıcaklıklarını da arttırmıştır. En yüksek kopma yükünün olduğu birleştirmenin mikroyapı incelemesinde iyi bir metalürjik bağlanmanın yanı sıra Şekil 5'de gösterilen, testere dişleri benzeri girinti çıkıntılara sahip çengel oluşumlarının, kilitleyici etki oluşturup dayanımı arttırdığı ifade edilmiştir. Abbass vd. [41] 2024-T3

alüminyumun saf bakıra SKK ile bindirme birleştirmesinde 800-1250 dev/dak farklı takım dönme hızlarının, 30-90 s dalma süresinin ve tamamen silindirik, konik silindirik, dış açılmış-kanallı silindirik uç geometrilerinin etkilerini değerlendirmiştir. Batma zamanının diğer faktörlerden daha fazla önem taşıdığı, bu sürenin artmasının mekanik özellikleri olumlu etkilediği belirtilmiştir.



Şekil 5. SKNK ile Cu/CuZn30 birleştirmesinde görülen testere dişleri benzeri yapıya sahip çengel (Hook with saw-teethes for Cu/CuZn30 joint in FSSW) [8]

2.6. İş-parçalarının pozisyonları / takım dönme yönü (Position of work-pieces / tool rotation direction)

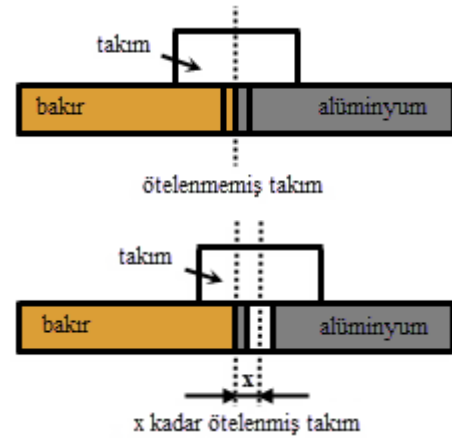
SKK ile alın birleştirmeler için kaynaklanacak malzemeler aynı olduklarında, bunların takım ilerleme/dönme yönüne göre sabitlendikleri konum yani malzeme pozisyonu (takım ilerleme yönüne göre sağ veya sol taraf) çok belirleyici etkilere sahip olmamaktadır. Çünkü kaynak işlemi sırasında hem ötelenen hem de takım arkasına çekilen malzeme aynıdır. Ancak bu durumun önemi, farklı malzemelerin kaynağında değişmekte, birleştirmelerin kalite ve sağlamlıkları diğer değişkenlerde olduğu gibi bundan da etkilenmektedir. Burada nispeten malzemelerin sertlik veya deformasyon kabiliyetleri sabitlenecek tarafın belirlenmesinde önem arz etmektedir. Örneğin nispeten sert olan malzemenin bir taraftan diğerine taşınması aynı şartlar altında diğerine göre daha zor olabilmekte, dolayısıyla homojen olmayan bir malzeme karışımı ve taşınması, boşluk ve tünel benzeri hatalara yol açabilmektedir. SKNK veya SKK'da bindirme formundaki birleştirmeler için malzeme pozisyonu, üstte veya altta olmasıyla, yani omuz kısmıyla temas edip etmemesine göre farklılık arz etmektedir. Burada ise başta malzemelerin ısı iletkenlikleri ile mekanik özellikleri belirleyici olmaktadır. Nispeten düşük ısı iletkenliğe sahip malzemenin üstte konumlandırılmasıyla, kaynak işlemi sırasında aynı şartlarda daha fazla ısı girdisi dolayısıyla daha fazla bir karıştırmanın oluşabileceği görülmektedir. Ayrıca nispeten daha mukavemetli olan

malzemenin altta konumlandırıldığında, yeterli derecede plastik deformasyona uğratılmadığı da görülmektedir [8]. Takımın saat yönünde veya tersi yönde dönmesi ise yine farklı metallerin kaynağında, dış açılmış karıştırıcı uçlar kullanılmasında, malzemenin birinin diğerine doğru taşınması durumunda önem kazanmaktadır. Akbari vd. [42] levha pozisyonlarının 7070 alüminyumun saf bakıra SKK ile bindirme birleştirmesinde etkilerini incelemek için diğer parametreler sabit iken, önce bakırı alüminyum üzerine, ikinci olarak da altına koyarak birleştirmiştir. Nispeten düşük ısıl iletkenliğe sahip alüminyum levhanın üstte olması durumunda, alüminyum ile takım arayüzeyinde nispeten daha fazla ısı girdisi sağlanabilmiş, bu da ince taneli ve hatasız bir kaynak bölgesi oluşumuna neden olmuştur. Ters durumda ise bakırın yüksek ısıl iletkenliği nedeniyle daha düşük ve yetersiz bir ısı girdisi meydana gelmiş ve uygun miktarda bir plastik deformasyona ulaşılmamış ki bunun sonucu olarak kanal benzeri hatalar ve kaynakta zayıflama tespit edilmiştir.

2.7. Takım karıştırıcı ucunun ötelemesi / takım ekseninin konumu (Tool pin offset / position of tool axis)

Farklı malzemelerin SKK yöntemiyle alın kaynağında, birleştirilecek malzemelerin alın altına eşleşen yüzeylerine göre takımın Şekil 6'daki gibi, iş-parçalarından birine doğru ötelenmesi suretiyle kaynağın yapılması da önemli olmaktadır. Takımın bir malzeme tarafına doğru ötelenmediği, bir başka deyişle takım ekseninin alın altına birleşme yüzeylerinde olması durumunda, farklı malzemelerin farklı ısıl iletkenlikleri ve mekanik özellikleri sebebiyle yeterli karışımın oluşmadığı, böylece önemli kaynak hatalarının görüldüğü bilinmektedir. Genel olarak takım ötelemesi öncelikle daha yumuşak ve ısıl iletkenliği düşük malzemeye doğru yapılırken, birçok uygulamada 2 mm'ye kadar ötelemelerin iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Ancak bu öteleme miktarında, takım geometrisi gözden kaçırılmaması gereken önemli bir husustur. Burada omuz çapının ısı girdisini, karıştırıcı ucun çapı ile şeklinin de karıştırılan malzeme ve miktarını etkileyeceği unutulmamalıdır. Çakır ve Çelik'e [10] göre saf 1050 alüminyumla saf bakırın SKK ile alın birleştirmesinde eğer takım eksenini hiç ötelenmez ise oldukça zayıf birleştirmelerle karşılaşmaktadır. En düşük kaynak hızında ve orta seviyedeki takım dönme hızında, takımın 1 mm ötelenmesiyle ise daha yüksek mekanik özelliklere ulaşılmaktadır. Ayrıca kaynak merkezindeki $CuAl_2$ ve Al_4Cu_9 fazların oluşumu nedeniyle sertlik artışının söz konusu olduğu belirtilmiştir. Benzer sertlik artışı Xue vd. [43] tarafından takım ötelemesiyle ilgili çalışmada da rapor edilmiştir. Bununla birlikte, saf bakır ile saf alüminyumun SKK ile alın birleştirmelerinde, nispeten daha sert bakır levhanın ilerleme tarafına konulmasıyla birlikte takımın kesinlikle alüminyuma doğru en az 1,5

mm ötelenmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Böylece iyi bir metalürjik bağlanma elde edilebilirken, tersi durumda ise alüminyum parçada büyük hatalar oluşmaktadır [44, 45].



Şekil 6. Ötelenmemiş ve belirli bir mesafe ötelenmiş takımın örnek birleştirmelerde şematik gösterimleri (A schematic illustration of tool offset)

3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

SKK ve SKNK yöntemlerinde bakır ve pirinç malzemelerin en az birinin bir birleştirmede kullanıldığı uygulamalarda, takımla ilintili olan geometrisi, dönme hızı, ilerleme hızı, basma kuvveti, açısı, ötelenmesinin yanı sıra levha pozisyonları gibi birçok önemli değişken bulunmaktadır. Hem SKK hem de bunun bir türevi olan SKNK yöntemlerine isimlerini veren iki olay "sürtünme", bunun sonucu olarak sıcaklık artışı ve "karıştırma", bunun sonucu olarak da malzeme akışı ve taşınması, bu parametrelerce kontrol edilmektedir. Isı girdisi ve malzeme akışı ise kaynak bölgesindeki metalürjik yapı ve özellikleri ile kaynak hatalarını ve büyüklüklerini belirlemektedir. Bu nedenle, önceki bölümde örnekleri açıklandığı gibi, etkileri açısından farklılıklara sahip olsalar da kaynak işlemleri öncesinde tasarımları yapıлып, nicel değerlerin seçiminde bu faktörleri birbirlerinden ayrı, bağımsız olarak ele almak, istenilen nitelik ve sağlamlıkta birleştirmelerin yapılamamasına neden olacağı sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, makale çalışması kapsamında irdelenen ilgili parametrelerin deneysel sonuçları aşağıdaki gibi verilebilir:

1- Uygun profil ve geometrilerdeki takımların kullanılmasıyla, birleştirme bölgesinde yeterli bir malzeme deformasyonu, homojen bir karıştırma ve nispeten hiç ya da daha az metaller arası bileşik oluşumu sağlanabilmektedir. Bu durum ise mekanik özelliklerde iyileşmeye neden olmaktadır.

2- Takım omuz kısmı ve/veya karıştırıcı uç batma derinliğinin uygunsuzluğu, yetersiz ısı girdisi ve karıştırmaya sebep olacağından, kaynak yüzeyine açık ya da kaynak metali içerisinde tünel benzeri büyük oyuk hataları ve kök nüfuziyetsizlikleri meydana gelecektir.

3- Takım dönme hızının artması ve/veya ilerleme hızının azalması, sürtünme ısısını arttırıp kaynak bölgesindeki sıcaklığın ve malzemelerin karışım oranının artmasıyla sonuçlanacaktır. Isı girdisinin gereğinden fazla olması KM ve ITAB'da dislokasyon yoğunluğunun artmasına, kaba tanelere ve mekanik özelliklerde azalmaya neden olabilir. Ters durumda ise kaynaktaki oyuk, yüzeyinde tünel şeklinde boşluklar, kök nüfuziyetsizlikleri ve yüzey bozuklukları görülmektedir.

4- Genel olarak takıma bir açı verilememesi dövme kuvvetini azaltacak, aynı zamanda iş-parçaları yüzeylerinde aşırı kaynak çapakları oluşturacaktır.

5- Doğru oranda takım basma kuvvetiyle yeterli ısı girdisi ve dövme etkisi sağlanabilir. Böylece ince taneli bir mikroyapı oluşumuyla yüksek sertlik ve mukavemetler elde edilebilir. Yetersiz kuvvetler yetersiz birleşmelere, aşırı uygulanan kuvvetler ise kaynak kesitinde incelmeye neden olmaktadır.

6- SKNK yönteminde takımın malzeme yüzeylerinde takım bekleme süresi artarsa, ısı girdisi artışı ve yoğun bir karıştırma sonucu metalürjik bağlanma alanının genişlemesi söz konusu olabilmektedir.

7- Bindirme ve nokta birleştirmelerinde, ısıl iletkenliği düşük malzemenin üstte konumlandırılmasıyla, daha yüksek ısı girdisi ve daha fazla bir karıştırmanın oluşabileceği görülmektedir. SKNK'da nispeten daha mukavemetli olan malzemenin altta olursa, yeteri derecede plastik deformasyona uğratılmama riski bulunmaktadır.

8- Takım geometrisi de dikkate alınarak, farklı malzemelerin kaynağında, takımın daha yumuşak ve ısıl iletkenliği düşük olan malzemeye doğru yaklaşık 1-3 mm ötelenmesi, kaynak özellikleri açısından iyi sonuçlar verebilmektedir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] A. M. Russell, K. L. Lee, *Structure-Property Relations in Nonferrous Metals*, John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2005, pp. 301-308.
- [2] J. E. Bringas, M. L. Wayman, *Nonferrous Metals*, 4th ed. on CD-ROM, Casti Publishing Inc, Alberta, 2003, pp. 139-158.
- [3] N. Xu, R. Ueji, Y. Morisada, H. Fujii, "Modification of mechanical properties of friction stir welded Cu joint by additional liquid CO₂ cooling," *Materials and Design*, vol. 56, pp. 20-25, 2014.
- [4] Y. F. Sun, N. Xu, H. Fujii, "The microstructure and mechanical properties of friction stir welded Cu-30Zn brass alloys," *Materials Science & Engineering A*, vol. 589, pp. 228-234, 2014.
- [5] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, *Friction Stir Welding and Processing*, ASM International, 2007, pp. 1-368.
- [6] G. M. Xie, H. B. Cui, Z. A. Luo, W. Yu, J. Ma, G. D. Wang, "Effect of Rotation Rate on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded DP780 Steel," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 32, no. 4, pp. 326-332, 2016.
- [7] K. P. Mehta, V. J. Badheka, "A Review on Dissimilar Friction Stir Welding of Copper to Aluminum: Process, Properties, and Variants," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 3, pp. 233-254, 2016.
- [8] Z. Barlas, "Effect of friction stir spot weld parameters on Cu/CuZn30 bimetal joints," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 80, no. 1, pp. 161-170, 2015.
- [9] Z. Barlas, H. Uzun, "Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılmış Cu/Al-1050 Alın Birleştirmesinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 25, no. 4, pp. 857-865, 2010.
- [10] S. Celik, R. Cakir, "Effect of Friction Stir Welding Parameters on the Mechanical and Microstructure Properties of the Al-Cu Butt Joint," *Metals*, vol. 6, pp. 133-147, 2016.
- [11] A. Abdollah-Zadeh, T. Saeid, B. Sazgari, "Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 460, no. 1-2, pp. 535-538, 2008.
- [12] Z. Barlas, H. Uzun, "Microstructure and mechanical properties of friction stir butt-welded dissimilar pure copper/brass alloy plates," *International Journal of Materials Research*, vol. 101, no. 6, pp. 801-807, 2010.
- [13] Z. P. Cai, B. Q. Ai, R. Cao, Q. Lin, J. H. Chen, "Microstructure and properties of aluminum AA6061-T6 to copper (Cu)-T2 joints by cold metal transfer joining technology," *Journal of Materials Research*, vol. 31, no. 18, pp.2876-2887, 2016.
- [14] G. Huang, X. Feng, Y. Shen, Q. Zheng, P. Zhao, "Friction stir brazing of 6061 aluminum alloy and H62 brass: Evaluation of microstructure, mechanical and fracture behavior," *Materials and Design*, vol. 99, pp. 403-411, 2016.
- [15] Z. Barlas, "Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Cu İle CuZn37 Levhaların Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri," Dr. Tezi, Sakarya Üniv. Metal Eğt. A.B.D., Sakarya, Türkiye, 2009.
- [16] D. Lohwasser, Z. Chen, *Friction Stir Welding- from Basics to Applications*, Wood Head Publishing Limited, 2010.
- [17] T. Hautala, T. Tianien, "Friction stir welding of copper," in *Proceedings of the Sixth International Conference on Trends in Welding*

- Research*, Pine Mountain, GA, ASM International, 2003, pp. 324-328.
- [18] I. Galvão, J. C. Oliveira, A. Loureiro, D. M. Rodrigues, "Formation and distribution of brittle structures in friction stir welding of aluminium and copper: Influence of shoulder geometry," *Intermetallics*, vol. 22, pp. 122-128, 2012.
- [19] I. Galvão, R. M. Leal, D. M. Rodrigues, A. Loureiro, "Influence of tool shoulder geometry on properties of friction stir welds in thin copper sheets," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 2, pp. 129-135, 2013.
- [20] J. Teimurnezhad, H. Pashazadeh, A. Masumi, "Effect of shoulder plunge depth on the weld morphology, macrograph and microstructure of copper FSW joints," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 22, pp. 254-259, 2016.
- [21] H. Khodaverdizadeh, A. Heidarzadeh, T. Saeid, "Effect of tool pin profile on microstructure and mechanical properties of friction stir welded pure copper joints," *Materials and Design*, vol. 45, pp. 265-270, 2013.
- [22] S. Siddharth, T. Senthilkumar, "Optimization of Friction Stir Spot Welding Process Parameters of Dissimilar Al 5083 and C 10100 Joints Using Response Surface Methodology," *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, vol. 57, no. 5, pp. 456-466, 2016.
- [23] R. Heideman, C. Johnson, S. Kou, "Metallurgical analysis of Al/Cu friction stir spot welding," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 15, no. 7, pp. 597-604, 2010.
- [24] G. M. Xie, Z. Y. Ma, ve L. Geng, "Development of a fine-grained microstructure and the properties of a nugget zone in friction stir welded pure copper," *Scripta Materialia*, vol. 57, no. 2, pp. 73-76, 2007.
- [25] H. S. Park, T. Kimura, T. Murakami, Y. Nagano, K. Nakata, M. Ushio, "Microstructures and mechanical properties of friction stir welds of 60% Cu-40% Zn copper alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 371, no. 1-2, pp. 160-169, 2004.
- [26] H. Khodaverdizadeh, A. Mahmoudi, A. Heidarzadeh, E. Nazari, "Effect of friction stir welding (FSW) parameters on strain hardening behavior of pure copper joints," *Materials and Design*, vol. 35, pp. 330-334, 2012.
- [27] K. P. Mehta, ve Vishvesh J. Badheka, "Experimental investigation of process parameters on defects generation in copper to AA6061-T651 friction stir welding," *Int'l Journal of Advances in Mechanical & Automobile Eng. (IJAMAE)*, vol. 3, no. 1, pp. 55-58, 2016.
- [28] C. Meran, "The joint properties of brass plates by friction stir welding," *Materials and Design*, vol. 27, no. 9, pp. 719-726, 2006.
- [29] G. Çam, H.T. Serindağ, A. Çakan, S. Mistikoğlu, H. Yavuz, "The effect of weld parameters on friction stir welding of brass plates," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 39, no. 6, pp. 394-399, 2008.
- [30] J. J. Shen, H. J. Liu, F. Cui, "Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper," *Materials and Design*, vol. 31, no. 8, pp. 3937-3942, 2010.
- [31] K. Surekha, A. Els-Botes, "Development of high strength, high conductivity copper by friction stir processing," *Materials and Design*, vol. 32, no. 2, pp. 911-916, 2011.
- [32] M. Sarvghad Moghaddam, R. Parvizi, M. Haddad-Sabzevar, A. Davoodi, "Microstructural and mechanical properties of friction stir welded Cu-30Zn brass alloy at various feed speeds: Influence of stir bands," *Materials and Design*, vol. 32, no. 5, pp. 2749-2755, 2011.
- [33] P. Liu, Q. Shi, W. Wang, X. Wang, Z. Zhang, "Microstructure and XRD analysis of FSW joints for copper T2/aluminium 5A06 dissimilar materials," *Materials Letters*, vol. 62, no. 25, pp. 4106-4108, 2008.
- [34] T. Saeid, A. Abdollah-zadeh, B. Sazgari, "Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joints made by friction stir welding," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 490, no. 1-2, pp. 652-655, 2010.
- [35] S. A. Khodir, M. M. Z. Ahmed, Essam Ahmed, Shaymaa M. R. Mohamed, H. Abdel-Aleem, "Effect of Intermetallic Compound Phases on the Mechanical Properties of the Dissimilar Al/Cu Friction Stir Welded Joints," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 25, no. 11, pp. 4637-4648, 2016.
- [36] V. C. Sinha, S. Kundu, S. Chatterjee, "Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar joints of aluminium alloy and pure copper by friction stir welding," *Perspectives in Science*, vol. 8, pp. 543-546, 2016.
- [37] C. Meran, V. Kovan, "Microstructures and mechanical properties of friction stir welded dissimilar copper/brass joints," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 39, no. 8, pp. 521-530, 2008.
- [38] Y. F. Sun, H. Fujii, "Investigation of the welding parameter dependent microstructure and mechanical properties of friction stir welded pure copper," *Materials Science and Engineering A*, vol. 527, no. 26, pp. 6879-6886, 2010.
- [39] Z. Barlas, "Weldability of CuZn30 brass/DP600 steel couple by friction stir spot welding," *Acta Physica Polonica A*, basılacak.

- [40] Z. Zhang, X. Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu, B. Zou, "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy," *Materials and Design*, vol. 32, no. 8-9, pp. 4461-4470, 2011.
- [41] M.K. Abbass, S. Hussein, A.A. Kudair, "Optimization of Friction Stir Spot Welding Parameters of Dissimilar Welded Joints of Aluminum Alloy (AA2024T3) with Pure Copper Sheets," *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, vol. 4, no. 12, pp. 514-526, 2015.
- [42] M. Akbari, R. Abdi Behnagh, A. Dadvand, "Effect of materials position on friction stir lap welding of Al to Cu," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 17, no. 7, pp. 581-588, 2012.
- [43] P. Xue, B. L. Xiao, D. R. Ni, Z. Y. Ma, "Enhanced mechanical properties of friction stir welded dissimilar Al-Cu joint by intermetallic compounds," *Materials Science and Engineering A*, vol. 527, no. 21-22, pp. 5723-5727, 2010.
- [44] P. K. Sahu, S. Pal, S. K. Pal, R. Jain, "Influence of plate position, tool offset and tool rotational speed on mechanical properties and microstructures of dissimilar Al/Cu friction stir welding joints," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 235, pp. 55-67, 2016.
- [45] P. Xue, D. R. Ni, D. Wang, B. L. Xiao, Z. Y. Ma, "Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints," *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, no. 13-14, pp. 4683-4689, 2011.