



T.C.

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Cu-AI LEVHALARIN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİNDE OPTİMUM KAYNAK PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ**

Gökhan BAŞAR

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATAY

HAZİRAN – 2016



T.C.

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Cu-AI LEVHALARIN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİNDE OPTİMUM KAYNAK PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ**

Gökhan BAŞAR

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HATAY
HAZİRAN-2016**

T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Cu-AI LEVHALARIN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİNDE OPTİMUM KAYNAK PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ

GÖKHAN BAŞAR

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Doç. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU danışmanlığında hazırlanan bu tez **10/06/2016** tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **OYBİRLİĞİ** ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU
Başkan

Prof. Dr. Hakan YAVUZ
Üye

Prof. Dr. Gürel ÇAM
Üye

Kod No: 11

Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ
Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.

Bu çalışma MKÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir.
Proje No: 13261

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

10/06/2016

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

Gökhan BAŞAR

ÖZET

Cu-Al LEVHALARIN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE OPTİMUM KAYNAK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Alüminyum (Al) ve bakır (Cu), yaygın olarak uçak-uzay, otomotiv, kimya, nükleer, elektrik-elektronik ve enerji sektörlerinde kullanılan iki yaygın mühendislik malzemesidir. Farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip saf Cu ve Al-1050 alüminyum alaşımının ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi bazı zorluklara yol açmaktadır, özellikle kaynak bölgesinin mekanik özellikleri üzerine olumsuz etki etmektedir. Bu yüzden bu farklı malzemelerin birleştirilmesinde, katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirilmesi üzerine yapılan deneysel bir çalışmadır.

Bu çalışmada, alüminyum alaşımı (Al-1050) ve ticari saf bakır (Cu) levhalar üç farklı dönme hızında (525, 1025, 1525 dev/dak), üç farklı takım ilerleme hızında (50, 75, 100 mm/dak) ve iki farklı takım konumlandırmasında (0.75-1.5 mm) sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirilmiştir.

Bu birleştirmede taramalı elektron mikroskopunda (SEM) mikroyapı incelemeleri ile X-ışınları difraksiyonu (XRD), çekme testi ve mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri, karışım bölgesinin alüminyumca zengin ve bakırca zengin yapıları içerdiğini göstermiştir. Kaynak bölgesinin XRD analizlerinde, Al_2Cu_3 , Al_4Cu_9 ve $Al_{0.0565}Cu_{0.9434}$ metaller arası bileşiklerin varlığı tespit edilmiştir. Çekme testi sonuçları, en iyi Cu/Al-1050 birleştirmesinin çekme mukavemetinin Cu ana metalinkinden %62, Al-1050 ana metalinkinden ise %14 düşük olduğunu göstermiştir. Mikrosertlik ölçümlerinde ise, karışım bölgesindeki sertliklerin ana metallere göre arttığı görülmüştür.

2016, 76 sayfa

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), Cu/Al alın birleştirmesi, mekanik özellikler, optimum kaynak parametreleri, alüminyum alaşımı (Al-1050), ticari saf bakır (Cu)

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE OPTIMUM WELDING PARAMETERS IN JOINING Cu-Al PLATES BY FRICTION STIR WELDING

Aluminum (Al) and copper (Cu) are two common engineering materials widely used in the aerospace, automotive, chemical, nuclear, electricity-electronics and energy industries. The joining of pure Cu and Al-1050 Al alloy, which possess different physical and chemical properties with the fusion welding methods leads to some difficulties, which particularly has negative effect on the mechanical properties of the weld. Therefore the joining of these different materials with friction stir welding (FSW), which is a solid state welding technique, is experimentally studied in this work.

In this study, 1050 aluminum alloy and commercially pure copper sheets were welded at three different tool rotation speeds (525, 1025, 1525 rev/min), using three different tool travel speeds (50, 75, 100 mm/min) and two different pin positions (0.75, 1.5 mm) by FSW.

Microstructure investigations by scanning electron microscope, X-ray diffraction (XRD), tensile test and microhardness measurements were carried out of these joints. Microstructural inspections revealed that the stir zone of the joint consisted of aluminum-rich and copper-rich structures. Al_2Cu_3 , Al_4Cu_9 and $Al_{0.0565}Cu_{0.9434}$ intermetallic compounds were detected in the weld region by XRD. Tensile test results show that the best tensile strength of Cu/Al-1050 joint is 62% and 14% lower than that of Cu base metal and Al-1050 base metal, respectively. It was observed that hardness's in the stir zone increased when compared to that of base metals.

2016, 76 pages

Key Words: Friction stir welding (FSW), Cu/Al butt joint, mechanical properties, optimum welding parameters, aluminum alloy (Al-1050), commercial pure copper (Cu)

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca büyük bir titizlik ve özveriyle bana yol gösteren ve iyi bir bilimsel ortam hazırlayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU' na her türlü destek ve yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım sırasında değerli görüş, bilgi ve katkılarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Gürel ÇAM, Sayın Yrd. Doç. Dr. Erdoğın KANCA, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali GÜNEN, Sayın Öğr. Gör. Dr. Hüsamettin KUŞ ve Mustafa YALÇIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım süresince ve hayatım boyunca beni destekleyip bugünlere ulaşmamı sağlayan annem Sahriye BAŞAR ve babam Bayram BAŞAR'a, hayatımın her aşamasında bana destek olan ve her türlü fedakarlıkta bulunan çok kıymetli eşim Özlem Şiran BAŞAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Yapılan bu çalışma Mustafa Kemal Üniversitesi Bilimsel Araştırma Komisyonu Başkanlığı tarafından 13261 numaralı yüksek lisans tez projesi desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Mustafa Kemal Üniversitesi Bilimsel Araştırma Komisyonu Başkanlığı'na teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	X
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	15
3.1. Materyal.....	15
3.1.1. Kaynak Yapılacak Malzeme	15
3.1.2. Kaynak Edilecek Levhaların Boyutları	16
3.1.3. Karıştırıcı Uç İmalatı ve Özellikleri.....	16
3.1.4. Birleştirilecek Levhaları Sabitleme Kalıbı.....	18
3.1.5. Kaynak İşleminde Kullanılan Tezgah	18
3.1.6. Deney İçin Belirlenen Kaynak Parametreleri.....	19
3.1.7. Birleştirme Öncesi Hazırlıklar	21
3.2. Yöntem	22
3.2.1. Kaynak İşlemi	22
3.2.2. Çekme Deneyi	23
3.2.3. Mikrosertlik İncelemeleri.....	25
3.2.4. Metalografik İnceleme	27
3.2.5. X-Işınları Karakterizasyonu	28
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	30
4.1. Kaynak Yüzeyi ve Kök Görüntüleri	30
4.2. Kaynak Sonrası Karıştırıcı Uçun Durumu.....	33
4.3. Çekme Deneyi Sonuçları	34
4.4. Takım Dönme Hızının Etkisi.....	41
4.5. Takım İlerleme Hızının Etkisi	44
4.6. Takım Konumlandırmasının Etkisi.....	47
4.7. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	48
4.7.1. 525 dev/dak ile Birleştirilen Numunelerin Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları.....	49
4.7.2. 1025 dev/dak ile Birleştirilen Numunelerin Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları.....	52
4.7.3. 1525 dev/dak ile Birleştirilen Numunelerin Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları.....	57

4.8. Kaynak Bölgesinin SEM İncelemeleri	61
4.9. X-Işını Difraksiyon Sonuçları	68
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	70
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	76



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Al-1050 alüminyum ve saf Cu levhaların SKK ile birleştirilmesinde kullanılan karıştırıcı ucun resmi.	17
Şekil 3.2.	Al ve Cu levhaların SKK yöntemiyle birleştirilmesinde kullanılan sabitleme kalıbı	18
Şekil 3.3.	Kaynak işleminde kullanılan CNC freze tezgahı.....	19
Şekil 3.4.	Kaynak yüzey ve kesit görüntüleri	20
Şekil 3.5.	Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanması	23
Şekil 3.6.	EN 10002-1standardına göre hazırlanmış çekme numunesinin ölçüleri	24
Şekil 3.7.	SKK yöntemiyle birleştirilen Al ve Cu levhalardan talaşlı imalat yöntemiyle elde edilen çekme numuneleri	24
Şekil 3.8.	Kaynaklı levhaların hidrolik şerit testere ile kesilmesi.....	24
Şekil 3.9.	EN 10002-1standardına göre çekme numunelerin freze tezgahında hazırlanması	25
Şekil 3.10.	Çekme testinde kullanılan cihaz	25
Şekil 3.11.	Sıra sertlik ölçüm yönteminin, numune üzerinde uygulandığının şematik olarak gösterimi (ölçüler mm).....	26
Şekil 3.12.	Mikrosertlik test cihazı	26
Şekil 3.13.	Metalografik inceleme için bakalite alınmış numuneler.....	27
Şekil 3.14.	Metalografik inceleme için kullanılan cihazlar a) Bakalite alma cihazı b) Zımparalama ve parlatma cihazı	28
Şekil 3.15.	SEM cihazı.....	28
Şekil 3.16.	XRD cihazı	29
Şekil 4.1.	525 dev/dak dönme hızında elde edilen kaynaklı numunelerin yüzey ve kök görüntüleri	30
Şekil 4.2.	1025 dev/dak dönme hızında elde edilen kaynaklı numunelerin yüzey ve kök görüntüleri	31
Şekil 4.3.	1525 dev/dak dönme hızında elde edilen kaynaklı numunelerin yüzey ve kök görüntüleri	32
Şekil 4.4.	En iyi ve en kötü üç numunenin yüzey ve kesit görüntüleri.....	33
Şekil 4.5.	SKK sonrasında karıştırıcı uç durumu (a) sıfır takım komunu (b) 0.75, 1.5 mm takım konumlandırması	34
Şekil 4.6.	525 dev/dak takım dönme hızındaki numunelerin çekme test sonuçları.....	36
Şekil 4.7.	1025 dev/dak takım dönme hızındaki numunelerin çekme test sonuçları.....	37
Şekil 4.8.	1525 dev/dak takım dönme hızındaki numunelerin çekme test sonuçları.....	37

Şekil 4.9.	525 dev/dak takım dönme hızında çekme testi sonrası yüzey görüntüleri, a) 525/50/0.75 numunesi, b) 525/50/1.5 numunesi, c) 525/100/1.5 numunesi.....	38
Şekil 4.10.	1025 dev/dak takım dönme hızında çekme testi sonrası yüzey görüntüleri, a) 1025/50/0.75 numunesi, b) 1025/75/0.75 numunesi, c) 1025/75/1.5 numunesi.....	38
Şekil 4.11.	1525 dev/dak takım dönme hızında çekme testi sonrası yüzey görüntüleri, a) 1525/100/0.75 numunesi, b) 1525/75/1.5 numunesi, c) 1525/100/1.5 numunesi.....	38
Şekil 4.12.	Çekme deneyi sonrası 525/100/1.5 numunesinin Al tarafı kırılma yüzeyi.....	39
Şekil 4.13.	Çekme deneyi sonrası 525/100/1.5 numunesinin Cu tarafı kırılma yüzeyi.....	39
Şekil 4.14.	Çekme deneyi sonrası 1525/75/0.75 numunesinin Al tarafı kırılma yüzeyi.....	40
Şekil 4.15.	Çekme deneyi sonrası 1525/75/0.75 numunesinin Cu tarafı kırılma yüzeyi.....	40
Şekil 4.16.	(0.75 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştirmenin çekme mukavemet-devir sayısı grafiği.....	42
Şekil 4.17.	(1.5 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştirmenin çekme mukavemet-devir sayısı grafiği.....	42
Şekil 4.18.	(0.75 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştirmenin % uzama-devir sayısı grafiği.....	43
Şekil 4.19.	(1.5 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştirmenin % uzama-devir sayısı grafiği.....	43
Şekil 4.20.	(0.75 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştirmenin % çekme mukavemet-ilerleme hızı grafiği	45
Şekil 4.21.	(1.5 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştirmenin % çekme mukavemet-ilerleme hızı grafiği	46
Şekil 4.22.	(0.75 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştirmenin % uzama-ilerleme hızı grafiği	46
Şekil 4.23.	(1.5 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştirmenin % uzama-ilerleme hızı grafiği	47
Şekil 4.24.	525/50/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	49
Şekil 4.25.	525/75/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	50
Şekil 4.26.	525/100/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	50
Şekil 4.27.	525/50/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği.....	51
Şekil 4.28.	525/75/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği.....	51

Şekil 4.29.	525/100/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	52
Şekil 4.30.	1025/50/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	53
Şekil 4.31.	1025/75/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	54
Şekil 4.32.	1025/100/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	54
Şekil 4.33.	1025/50/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	55
Şekil 4.34.	1025/75/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	55
Şekil 4.35.	1025/100/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	56
Şekil 4.36.	1525/50/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	57
Şekil 4.37.	1525/75/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	58
Şekil 4.38.	1525/100/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	58
Şekil 4.39.	1525/50/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	59
Şekil 4.40.	1525/75/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	59
Şekil 4.41.	1525/100/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği	60
Şekil 4.42.	525/50/1.5 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X18), b) 1 nolu bölgenin 75 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 200 büyütme hali, d) 3 nolu bölgenin 200 büyütme hali, e) 4 nolu bölgenin 200 büyütme hali	62
Şekil 4.43.	525/50/0.75 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X25), b) 1 nolu bölgenin 75 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 75 büyütme hali	63
Şekil 4.44.	525/100/1.5 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X22), b) 1 nolu bölgenin 50 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 200 büyütme hali	64
Şekil 4.45.	1025/100/1.5 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X22), b) 1 nolu bölgenin 75 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 200 büyütme hali	65
Şekil 4.46.	1525/75/1.5 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 nolu bölgenin 100 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 1000 büyütme hali, d) 3 nolu bölgenin 100 büyütme hali, e) 4 nolu bölgenin 250 büyütme hali	66

- Şekil 4.47. 1525/75/0.75 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X22), b) 1 nolu bölgenin 100 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 500 büyütme hali 67
- Şekil 4.48. 525/100/1.5 numunesinin XRD grafiği ve sonuçları 69



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	Al-1050 malzemenin kimyasal içeriği (%ağırlık)	15
Çizelge 3.2.	Saf Cu malzemenin kimyasal içeriği (%ağırlık).....	15
Çizelge 3.3.	Alüminyum ve bakırın mekanik özellikleri.....	16
Çizelge 3.4.	Yüksek hız çeliği (HSS) karıştırıcı uç malzemesinin kimyasal bileşimi	16
Çizelge 3.5.	Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan kaynak parametreleri	22
Çizelge 4.1.	Çekme deneyi sonuçları.....	35
Çizelge 4.2.	Mikrosertlik ölçümleri sonucu elde edilen sertlik değerleri	61



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

MPa	: Basınç (Mega Pascal)
kg	: Ağırlık (Kilogram)
mm	: Uzunluk (Milimetre)
kN	: Kuvvet (Kilo Newton)

KISALTMALAR

SKK	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı
TWI	: The Welding Institute
Al	: Alüminyum
Cu	: Bakır
HV	: Vickers Mikrosertlik
mm/dak	: Milimetre/dakika
dev/dak	: Devir/dakika
HRC	: Rockwell C- Sertlik
CNC	: Bilgisayar Nümerik Kontrol
HSS	: Yüksek Hız Takım Çeliği
TEM	: Geçirimli Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işınları Difraktometresi
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

1. GİRİŞ

İnsanlığın var oluşundan itibaren kendi ihtiyaç ve gereksinimlerini karşılayabilmek için üretimde kaynakla birleştirme yöntemini kullanmış ve istekleri doğrultusunda da devamlı olarak yeni kaynak teknikleri geliştirmiştir. Günümüzde de hala bu yöntem işlevini sürdürmektedir. Çağımızda sürekli yeni malzemeler geliştirilmekte ve geliştirme yöntemlerine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bundan dolayı, son zamanlarda yeni ve daha verimli kaynak yöntemlerinin geliştirilmesi, üzerinde oldukça odaklanılan bir konu haline gelmiştir. Geçmişte yapılan çalışmalara bakıldığında hem birleştirmenin hem de birleştirme yönteminin malzeme yapısını ve özelliklerini etkilemeden uygulanmasının da önemli olduğu üzerinde durulduğu görülmektedir (Anık ve ark., 1993; Messler, 1993; Özarpa, 2005; Kafalı ve Ay, 2014).

Farklı çift malzeme birleşiminin sağladığı pek çok avantajlardan dolayı endüstri uygulamalarındaki önemi git gide artmaktadır. Bunlar sadece arzu edilen ürün özellikleri gibi teknik avantajlar içermez aynı zamanda üretim ekonomisi bakımından da fayda sağlar. Bu yüzden, farklı çift malzemelerin iyi bir birleşme tekniği kaçınılmazdır. Yine de, bu tür malzemeler birbirinden farklı kendilerine özgü kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı geleneksel ergitme kaynağı ile birleşimi oldukça zordur. Özellikle, kaynak bölgesinin mekanik özellikleri üzerine olumsuz etkisi olan sert ve gevrek metaller arası bileşik oluşumu, üstesinden gelinmesi gereken bir başka problem olarak görülmektedir. Böylece, katı hal birleşme metodu oldukça ilgi çekici olmuştur (Barlas ve Uzun, 2010; Xue ve ark., 2010). Katı hal kaynak yöntemlerinde ise, bir ergitme veya ergime durumu söz konusu değildir. Bu kaynak yöntemlerinde genel olarak, kaynak edilen malzemelerin ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta ve belli bir basınç değeri altında, malzemelerin birbiri içine difüze olması sonucu birleşme elde edilir ve bu kaynak yöntemlerinde ilave bir dolgu metali gerekmediğinden kullanılmaz (İpekoğlu, 2011).

Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) 1970'li yıllarda İngiltere'de The Welding Institute (TWI) adlı kurumda geliştirilmiş ve 1990'lı yıllarda patenti alınmış bir katı hal kaynak yöntemidir (Çam, 2001). Bu yöntemin uygulanması sırasında; duman ve ışın olmaması, koruyucu gaz, toz ve ilave tele gereksinim duyulmaması, kaynak ağzı hazırlığı gerekmemesi, tüm pozisyonlarda kaynak yapılabilmesi olanağının bulunması

ve otomasyona da yatkınlığı gibi birçok üstünlüğünün bulunması, yöntemin uygulama alanlarını daha da genişletmektedir (Küleççi ve Şık, 2001).

SKK tekniği özellikle düşük ergime dereceli ve ergitme kaynağı güç olan malzemelerin kaynağı için geliştirilmiş bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu kaynak yöntemi, kaynak esnasında malzemeye düşük ısı girdisi uygulanması sonucu ısının tesiri altındaki bölgede olumsuz iç yapı dönüşümleri gerçekleşmediği için ergitme kaynağı güç olan birçok malzemenin kaynak işlemlerinde kullanılabilir. Ayrıca, bu yöntem çevreye duyarlı ve yüksek enerji verimliliğine sahip bir kaynak tekniğidir (Çam ve Meran, 2009). Son yıllarda geliştirilmiş katı hal birleşme yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), birleşme bölgesinin iç yapısında önemli derecede bir değişikliğe neden olmadan uygulanabilmektedir. Kaynak esnasında malzeme ergime söz konusu olmadığı için özellikle kaynak yapılması güç olan alüminyum alaşımların birleştirilmesinde etkili bir yöntemdir (Braun ve ark., 2000; Thomas ve ark., 2003; Kafalı ve Ay, 2014).

Alüminyum (Al) ve bakır (Cu), iyi elektrik ve ısı iletkenliklerine ilaveten yüksek korozyon dirençleri ve mekanik özellikleri nedeniyle elektrik endüstrisi için önemli metaller arasında yerini almıştır. Fakat, birleştirilecek olan bu malzeme çiftinin kendilerine özgü sahip oldukları kimyasal, mekanik ve ısı özelliklerindeki farklılıklar, geleneksel ergitme kaynak yöntemlerinde kullanılmasında bazı problemlere neden olmaktadır. Genel olarak, ergitme kaynak yöntemlerinde bakır ve alüminyumun birleştirilmesinde en önemli problemler arasında yer alan iş parçalarının çarpılması, kaynak bölgesinde oksitlenme, sıcak çatlama riski, gaz boşlukları oluşumu gibi kaynak problemlerinin SKK yöntemiyle en düşük düzeye indirilmesi öngörülmektedir (Mishra ve Ma, 2005; Barlas ve Uzun, 2010).

Son yıllarda, özellikle alüminyum/çelik (Kimapong ve ark., 2004), alüminyum/magnezyum (Somasekharan ve Murr, 2004), alüminyum/paslanmaz çelik (Uzun ve ark., 2005), bakır/pirinç (Meran ve Kovan, 2008; Barlas ve Uzun, 2008; 2010) gibi metalik malzeme çiftlerinin birleştirilmesinde başarıyla uygulanan SKK yönteminin, bakırın alüminyuma bindirme ve alın kaynağı birleştirmeleri için kullanıldığı bazı çalışmalar da yapılmıştır (Murr ve ark., 1998; Elrefaey ve ark., 2004; Okamura ve Aota, 2004; Ouyang ve ark., 2006; Abdollah-Zadeh ve ark., 2008; Liu ve ark., 2008; Barlas ve Uzun, 2010; Saeid ve ark., 2010).

Alüminyum ve bakırın birleşimi çeşitli uygulama sektörlerinde büyük bir dikkat çekmektedir. Ağırlık tasarrufu ve maliyet azaltması, elde edilen avantajlar arasından en ilgi çeken özelliğdir. Bu malzemelerin birleşimine en çok elektronik, taşımacılık, havacılık ve kimya endüstrilerinde ilgi duyulmuştur. Farklı kimyasal, mekanik ve termal özelliklerinden dolayı farklı malzemelerin ergitme kaynak prosesleri oldukça zorlayıcıdır. Alüminyum ve bakırın ergitme noktaları arasındaki fark yaklaşık 400°C'dir. Bu durum birleştirilen malzemelerin mikro yapısında önemli ölçüde homojen olmama ve tüm kaynak performansını negatif bir şekilde etkilemesiyle sonuçlanabilir. Dahası, alüminyum yüksek sıcaklıkta çok kolay bir şekilde oksitlenir ve bakırın lehimleme veya ergitme kaynağı ile birleşmesinde genellikle kaynak çatlakları belirlenmiştir (Carlone ve ark., 2015). Alüminyum ve bakırın SKK yöntemi ile birleştirilmesinde hem sınırlı sayıda çalışma olması hem de çalışmalarda elde edilen sonuçların farklılıklar göstermesi, bu kaynak yönteminde daha fazla çalışma ihtiyacı duyulduğu düşünülmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, alın altına birleştirilecek malzeme çifti ile takım konumunun "0" olduğu durumda kaynak yüzeyinde birçok çatlak, boşluklar meydana geldiği aynı zamanda birçok geniş bakır parçacıkların Al matristen sert olması nedeniyle plastik deformasyonu ve karıştırma işlemini zorlaştırdığından dolayı birleşme mukavemetinin zayıfladığı tespit edilmiştir. Bu durumu engellemek amacıyla; karıştırıcı takım ucun malzeme çiftleri üzerindeki konumunun değiştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan birleşme bölgesinde oluşan boşluklar ve çatlakların giderildiği ve birleşme dayanımının arttığı gözlenmiştir (Xue ve ark., 2010; 2011; Çakır, 2013).

Yüksek kalitede Al-Cu birleşimini elde edebilmek için ince, düzgün ve sürekli bir intermetalik tabaka olmasını zorunlu kılmaktadır. Bu tabakanın faydalı veya zararlı olup olmadığı dağılımına, oluşumuna ve miktarına güçlü bir şekilde bağlı olduğunu ileri sürülmektedirler (Xue ve ark., 2010; Saeid ve ark., 2010). Şimdiye kadar elde edilen çalışmalarla Al ve Cu' ın birleşme mekanizmasını hala tam olarak anlayamamıştır ve mekanik ve mikroyapı özellikleri arasındaki ilişkinin detaylı anlaşılması hala eksik görülmektedir.

Yapılan bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı ile nispeten sağlam ve kaynak bölgesinde hatasız bir Al/Cu birleştirmenin gerçekleştirilebilmesi hedeflenmiştir. Bu

yöntem ile birleştirmede; karıştırıcı ucun geometrisi, dönme hızı, kaynak hızı, takım konumu gibi parametreler; geçmişte yapılan çalışmalar yardımıyla belirli aralıklar tespit edilmiş olup mikroyapı ve mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. SKK parametreleri ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki de incelenmiştir.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Elektrik elektronik endüstrisinde ve özellikle yüksek doğru akım hatlarında, alüminyum ve bakırın birbirine sağlam bir şekilde birleştirilebilmesi için farklı kaynak yöntemlerinin kullanılabilirliği üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Sürtünme kaynağı (Ochi ve ark., 2004; Lee ve ark., 2005), ultrason kaynağı (Tsujino ve ark., 1988), difüzyon kaynağı (Enjo ve ark., 1977; Ay ve ark., 1999), lazer kaynağı (Pinto ve ark., 2003) gibi kaynak yöntemlerin kullanılması ile ilgili araştırmalar devam etmektedir. Katı hal birleştirme yöntemlerinden biri olan sürtünme karıştırma kaynağının (SKK) alüminyum ve bakırın birleştirilmesinde aday bir birleştirme türü olarak düşünülmektedir. Aynı zamanda alüminyum/çelik, alüminyum/magnezyum, bakır/pirinç, alüminyum/paslanmaz çelik gibi farklı tür malzemelerin birleştirilmesinde SKK başarılı bir şekilde uygulandığı bilinmektedir. Alüminyum ve bakırın sürtünme karıştırma kaynağı konusunda literatürde yapılan çalışmaların yeterli olmaması ve mekanik özelliklerin düşük olması nedeniyle bu çalışmada gerçekleştirilen araştırmanın literatüre bir fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Murr ve ark., (1998), başlangıç niteliğinde yaptıkları çalışmada Cu levhanın Al-6061 levhaya SKK yöntemiyle alın alına kaynağı yapılmıştır. Süreksiz kaynak dikişi ve karışım bölgesinde meydana gelen boşluk ve oyukların oluşmasından dolayı SKK yöntemi ile sağlam hatasız kaynak elde etmenin zorluğunu belirtilmiştir.

Çelik ve Ay, (1999), benzer bir çalışmada alüminyum ve bakır malzeme çiftinin difüzyon kaynağı optimum olarak belirlenen 560°C sıcaklık, 4.5 MPa basınç, 60 dakikalık bekleme süresi ve argon gazı ortamında en yüksek çekme mukavemet değeri 60.80 MPa olarak tespit etmişlerdir. Kaynaklı numuneler çekme testi, mikrosertlik testlerine tabi tutulmuş olup mikroyapı incelemeleri, SEM ve EDX analizlerini yapmışlardır. Mikrosertlik değerlerinde, özellikle birleşme bölgesinin bakır tarafındaki difüzyon bölgesinde ani yükselmelerin olduğu gözlenmiş ve bunun sebebi olarak da artan sıcaklıktan dolayı metaller arası fazların (Al_2Cu , Al_4Cu_9) oluştuğu düşünülmüştür. Çekme testine tabi tutulmuş kaynaklı parçalarda kopmanın gevrek şekilde ve alüminyum tarafında olduğunu tespit etmişlerdir.

Kimapong ve Watanabe, (2004), yaptıkları deneysel çalışmada, 5083 alüminyum alaşımı ile düşük karbonlu çelik sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir.

Kaynaklı birleşmede, uç dönme hızının ve uç konumlandırmasının çekme mukavemeti ve mikroyapısına olan etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, takım konumlandırması çeliğe doğru 0.2 mm olduğunda maksimum çekme mukavemeti elde etmişlerdir. Takımın çeliğe doğru konumu arttıkça, alüminyum alaşımlı matris içerisinde çelik parçacıkların büyük boyutlarda dağılması kaynak bölgesinde boşluk oluşumuna neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Okamura ve Aota (2004), Cu levhanın Al-6061 levhaya SKK yöntemiyle birleştirilmesinde, karıştırıcı uç doğrultusunun levhaların alın altına temas eden yüzeylerine göre olan konumunun etkisini araştırmışlardır. Karıştırıcı uc, Al-6061 levhaya doğru konumlanması sonucunda boşluk şeklinde önemli kaynak hatalarının oluşmadığını ve kaynak kalitesinin arttığını belirtmişlerdir.

Ouyang ve ark., (2006), 6061-T6 alüminyum alaşımı ile bakır levhaların farklı takım dönme hızları ve kaynak hızlarında alın altına birleştirilebilirliği araştırılmış, ancak kaynak bölgesinde tespit edilen Al_2Cu , $AlCu$ ve Al_4Cu_9 metallar arası bileşiklerin sağlam bir birleştirme elde etmeye engel olduğu ifade etmişlerdir. Kaynak bölgesinde çeşitli mikroyapı özelliklerinden dolayı oldukça farklı mikro sertlik seviyelerinde 136-760 HV değerler tespit etmişlerdir.

Fidan (2006), farklı ergime derecelerinden dolayı geleneksel ergitme kaynak yöntemiyle birleştirilemeyen saf alüminyum ve saf bakır, katı hal kaynak yöntemlerinden olan difüzyon kaynağı ile birleştirmiştir. Koruyucu ortam olarak literatürde genellikle belirtilen vakum yerine %99.99 saflıkta olan “argon gazı” kullanmıştır. Saf Al ve saf Cu’ ın optimum birleşme şartlarında (560°C sıcaklık, 4.5 MPa basınç ve 60 dakika kaynak süresi) yapılan difüzyon kaynağın birleşme bölgesinde Al_2Cu , Al_4Cu_9 ve $AlCu$ arafazları tespit etmiştir. Birleşme ara yüzeyinde mikroyapı, SEM, EDS analizleri ve mikro sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Çekme numunesinin kırılma yüzeyinden alınan SEM görüntülerine bakılarak arafazların etkisi ile gevrek kırılmaya maruz kaldığı tespit edilmiştir. EDS analiz sonuçlarına bakıldığında alaşım oranlarına bağlı olarak kırılma yüzeyinde Al_2Cu arafazının oluştuğu belirlenmiştir.

Abdollah-Zadeh ve ark., (2008), yaptıkları çalışmada 1060 alüminyum alaşımı ve saf ticari bakırın sürtünme karıştırma kaynağında mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine yoğunlaşmışlardır. Karıştırıcı uç temperlenmiş takım çeliği olup 3° takım eğim

açısı verilmiştir. Kaynak esnasında pim boyutları, dış geometrisi ve pimin batma derinliği sabit tutulmuştur. Optimum mekanik özellikleri elde edebilmek için sırasıyla; dönme hızı 750, 950, 1180, 1500 dev/dak ve ilerleme hızı 30, 60, 95, 118, 300, 375 mm/dak ile bütün kombinasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Kaynak karışma bölgesinde farklı morfolojilerde ve özelliklerde çeşitli mikroyapılar gözlenmiştir. Arayüzey bölgesinde Al_4Cu_9 , $AlCu$, Al_2Cu ana intermetalik bileşikler tespit edilmiştir. Yüksek dönme hızlarında ve düşük ilerleme hızlarında kaynak bölgesinde hatalar meydana geldiği tespit edilmiştir.

Liu ve ark., (2008), bakır (T2) ve 5A06 alüminyum alaşımı alın alına sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle birleştirmişlerdir. Bu kaynaklı birleştirmelerin mikroyapı, mekanik özellikler ve faz bileşenlerini sırasıyla metalografi, çekme test cihazı ve X-ışınları difraktometresi ile tespit etmişlerdir. Deney parametreleri olarak; ilerleme hızı 150-235 mm/dak ve dönme hızı 950-1180 dev/dak olarak belirlemişlerdir. İlerleme hızı 150 mm/dak olduğunda, daha iyi bir Al-Cu birleşimi gerçekleştiği ve açıkça görülmeyen hatalar elde edildiğini ifade etmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalardan, yüksek kalitede kaynak birleşimi takım dönme hızı 950 dev/dak ve ilerleme hızı 150 mm/dak'da en yüksek çekme mukavemet değeri yaklaşık 296 MPa değerini elde etmişlerdir. Yaptıkları XRD incelemelerinde kaynak bölgesinde yeni bir Cu-Al intermetalik bileşiklerin olmadığını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, kaynak karışım bölgesinin yapısı çoğunlukla bakır alüminyum plastik difüzyonu olduğunu belirtmişlerdir.

Önol (2010), Saf ticari bakır ile 1050 alüminyum alaşımli farklı levhaları bindirme yaparak sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile 80, 106, 130 mm/dak farklı kaynak hızlarında ve sabit 1600 dev/dak takım dönme hızında birleştirmiştir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmiş bölgelerde mekanik testler yardımıyla kaynak hızının mikro yapı ve mekanik özelliklerdeki değişiklikler incelenmiştir. Sonuç olarak en iyi mekanik özellikler yüksek kaynak hızında elde etmiştir.

Barlas ve Uzun, (2010), 3 mm kalınlığında saf bakır (Cu) ve alüminyum (Al-1050) levhaları 515 dev/dak sabit takım dönme hızında ve 12, 30, 50 mm/dak olmak üzere üç farklı kaynak ilerleme hızlarında sürtünme karıştırma kaynağı ile alın alına birleştirilebilirliğini incelemişlerdir. Karıştırıcı uç eksenini birleştirilecek levhaların alın alına temas yüzeyleri normaliyile 3° eğim açısı yapacak şekilde sabitlenmiş olup takım

saat yönünde döndürülmüştür. En düşük kaynak hızında başarılı bir birleştirme elde edilebilirken, kaynak hızının 30, 50 mm/dak artmasıyla oldukça kötü birleştirmeler gerçekleştirilmişlerdir. Yüksek kaynak hızlarında (30 ve 50 mm/dak), kaynak işlemi sırasında ve hemen sonrasında kaynak merkezi boyunca çatlamlar ve ayrılmalar meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Fakat, en düşük kaynak hızında 12 mm/dak herhangi bir çatlama, kırılma vb hatalar görülmediğini belirtmişlerdir. Kaynak bölgesinin XRD incelemelerinde, AlCu, Al₂Cu₃, AlCu₄ ve Al₄Cu₉ metaller arası bileşikler oluşturan intermetalik fazları tespit etmişlerdir. Çekme testine göre en uygun Cu-Al birleştirmesinin çekme mukavemeti (122 MPa) Cu ana metalinkinden %50, Al ana metalinkinden ise %24 düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Mikrosertlik ölçüm sonuçlarında göre karışım bölgesinin sertliklerin ana metallere göre arttığı ve 74-280 HV arasında değiştiğini tespit etmişlerdir.

Saeid ve ark., (2010), 1060 alüminyum alaşımı ve ticari saf bakır bindirme sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Kaynak hızının arayüzey morfolojisi, mikroyapı ve birleşme mukavemetine olan etkisini araştırmışlardır. Karıştırı uç sertleştirilmiş çelikten yapılmış ve birleştirmeler saat yönünde olup 1180 dev/dak dönme hızında sabit tutularak 30-375 mm/dak arasında kaynak hızlarında gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlardan Al/Cu arayüzeyine yakın alüminyumda karanlık bir alanın oluştuğu tespit edilmiştir. Bu bölgede Al₄Cu₉, Al₂Cu gibi intermetalik bileşikler ve mikroçatlaklar belirlenmiştir. Kaynak hızının artmasıyla oluşan çatlak sıklığının azaldığını ifade etmişlerdir. Öte yandan, yüksek kaynak hızlarında 118 ve 190 mm/dak yetersiz ısı girdisi sonucu olarak kaynak bölgesi içinde çukurlar oluştuğu görülmüştür. En yüksek kayma gerilmesi, 95 mm/dak kaynak hızında elde edilmiş olup bu kaynak hızın kaynak bölgesinde çukurlar oluşmadığı ve az miktarda mikroçatlakların meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

Xue ve ark., (2010), alüminyum ve bakır plakalar alüminyum kenarına takım konumlandırması ile başarılı bir şekilde sürtünme karıştırma kaynağı gerçekleştirmişlerdir. İnce, sürekli ve düzgün Al-Cu intermetalik bileşik tabakanın oluşumu ile Al-Cu ara yüzeyinde mükemmel metalürjik bağlanma elde etmişlerdir. İlaveten, pek çok intermetalik bileşenler karmaşık bir yapının oluşmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Çekme testi sonuçlarına göre; kaynaklı numunelerde kırılma alüminyum kenarında ısıdan etkilenen bölgede meydana geldiğini ve Al-Cu ara

yüzeyinde bağlanma mukavemetinin 210 MPa' dan daha büyük değerler elde edildiğini tespit etmişlerdir.

Xue ve ark., (2011), 1060 alüminyum alaşımı ve ticari saf bakır plakaları alın altına sürtünme karıştırma kaynağı yapmışlardır. Kaynak parametrelerinin yüzey morfolojisine, arayüzey mikroyapısına ve mekanik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Karıştırıcı uç olarak ısıl işlem görmüş takım çeliği kullanılmıştır. 20 mm omuz çapı, 6 mm çapında ve 4.8 mm boyunda pime sahip karıştırıcı uç kullanarak birleştirmişlerdir. Kaynaklı birleştirmeler 400, 600, 800, 1000 dev/dak dönme hızlarında ve sabit 100 mm/dak ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi esnasında, değişik pim konum değerleri 0-3 mm arasında seçilmiştir. Sert bakır plaka ilerleme kenarına sabitlendiğinde yüksek pim konumlandırması altında sağlam hatasız birleştirmeler elde edildiği deneysel sonuçlarda ortaya çıkmıştır. İyi çekme mukavemet özellikleri yüksek dönme hızlarında ve uygun 2 ile 2.5 mm pim konumunda elde edilmiştir. Dahası, 600 dev/dak ve 2 mm pim konumunda yapılan birleşme 180° eğme testinde kırılma olmadan eğilmiştir. Al-Cu alın altına birleşme arayüzeyi 400, 600 dev/dak düşük dönme hızlarında ince, düzgün ve sürekli iken 800-1000 dev/dak yüksek dönme hızlarında kalın yığın tabakalı yapı oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Galvao ve ark., (2011), alüminyum ve bakırın birleşmesinde sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin birleşme ara yüzeyinde intermetalik fazların dağılımı ve oluşumu üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Düşük ısı girdisinden dolayı, karışma bölgesi içerisinde Al/Cu ara yüzeyi boyunca çok ince bir intermetalik tabakanın oluştuğunu vurgulamışlardır. Isı girdisinin artması, zengin intermetalik yapı miktarının artmasını ve malzemelerin karışmasını sağladığını tespit etmişlerdir.

Genevois ve ark., (2011), ticari saf bakır ve 1050 alüminyum alaşımı sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Takım dönme hızı 900 dev/dak ve ilerleme hızı 100 mm/dak olarak seçilmiş olup bakır plaka ilerleme kenarına yerleştirerek kaynak işlemini gerçekleştirmişlerdir. Karıştırıcı uç tamamen alüminyum plakada konumlandırılarak özel bir durum seçmişlerdir. Böylesi bir durumda iki malzeme arasında mekanik bir karıştırma olmadığını, fakat sürtünme ısısı Al-Cu ara yüzeyinde termal hareketlilik sonucu difüzyona sebep olduğunu tespit etmişlerdir. Birleştirmede Al-Cu ara yüzeyinde çok ince intermetalik tabakanın varlığı hatasız birleşmenin

oluşumuna neden olduğunu ifade etmişlerdir. XRD incelemelerinde Al_2Cu , Al_4Cu_9 intermetalik fazları tespit etmişlerdir.

Galvao ve ark., (2012), 6082-T6 alüminyum ve DHP bakır (yüksek fosfor içeren oksijensiz bakır) plakalara sürtünme karıştırma kaynağı uygulanmış olup, takım konumlandırmasının morfolojik, yapısal ve mekanik özelliklere olan etkisini araştırmışlardır. Al-Cu birleşme yapısı ve kırılma mekanizmasını tamamen anlamaya çalışmışlardır. Kaynak sırasında, takım konumlandırması ve termomekanik olgu arasında önemli bir ilişki var olduğunu belirtmişlerdir. Takım konumlandırmasının, Al/Cu sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynağın yüzey morfolojisi ve çekme dayanımını derinlemesine etkileyen büyük miktarda zengin intermetalik tabakaların oluşmasını engellemede etkili bir yöntem olduğunu açığa çıkarmışlardır. Takım konumlandırması yapılmadan gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerde, akışkanlaşmış zengin intermetalik yapıların oluşumu ve kaynak mukavemeti üzerinde zararlı bir etkiye sahip olan kaynak bölgesi içerisinde iç ayrılma bölgelerinin oluşmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir. Takım konumlandırması yapılarak uygulanan kaynaklı birleştirmede, intermetalik oluşumların hemen hemen bastırıldığı fakat, kaynak bölgesi ve kaynak bölgesi/bakır ara yüzeyde büyük bakır parçacıkların yakınlarında önemli metalürjik süreksizliklerden dolayı kaynak mukavemeti üzerine zararlı bir etkiye sahip olduğunu da ifade etmişlerdir.

Li ve ark., (2012), saf bakır ile 1350 alüminyum alaşımı sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirmişler ve kaynaklı birleştirmenin mikroyapı ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Bakır kenarının, alüminyum kenarından daha yüksek sertliğe sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda, alüminyum ve bakır arasındaki arayüzeyde intermetalik tabakanın olmadığını ifade etmişlerdir. Kaynaklı birleştirmenin çekme testi sırasında karışık gevrek kırılma tespit etmişlerdir.

Bisadi ve ark., (2013), AA5083 alüminyum alaşımı ile saf bakır plakaları sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirmişlerdir. Kaynaklı numunelerde, dönme ve ilerleme hızının mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada, dönme hızı 600, 825, 1115 ve 1550 dev/dak seçilmiş olup 15, 32 mm/dak kaynak hızı her bir durum için uygulamışlardır. Çok yüksek ve çok düşük kaynak sıcaklıkları birleşme hatalarına neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, intermetalik bileşiklerin birleşmede mekanik özelliklere olan etkisini

araştırmışlardır. En iyi birleşme mukavemeti, dönme hızının 825 dev/dak ve ilerleme hızı ise 32 mm/dak olduğunda elde etmişlerdir.

Çakır (2013), 4 mm kalınlığa sahip AA 1050 alüminyum ile saf bakır levhaları üç farklı takım dönme hızlarında (630, 1330, 2440 dev/dak), üç farklı takım ilerleme hızlarında (20, 30, 50) mm/dak ve üç farklı (1-1.5-2 mm) takım konumlandırmasında alın altına sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmiştir. Kaynak işlemi esnasında; takım dönme yönü saat yönünde, takım eğim açısı 1.5° ve kaynak başlangıcında yeterli ısı oluşması için bekleme süresi 60 saniye olarak seçilmiştir. Karıştırıcı uç olarak 1.3343 yüksek hız takım çeliği malzemesi kullanılmıştır. Çekme, eğme ve sertlik testleri uygulanarak kaynağın mekanik özellikleri tespit edilmiştir. En iyi çekme mukavemeti 20 mm/dak takım ilerleme hızında, 1330 dev/dak takım dönme hızında ve 1 mm takım konumlandırılması ile elde edilmiş olup çekme mukavemeti 99.58 MPa tespit edilmiştir. En düşük dayanım değeri ise 50 mm/dak takım ilerleme hızında, 630 dev/dak takım dönme hızında ve 1 mm takım konumlandırılmasında 27.59 MPa olarak elde edilmiştir. Birleştirmelerin kesit ve kırılma yüzeylerinde yapılan EDX çizgisel ve noktasal analizlerin sonucunda çekme dayanımı düşük olan numunelerde çekme dayanımı yüksek olan numunelere göre kaynak bölgesinde daha az bakır içeriği olduğu ortaya çıkmıştır. X-ışınları difraktometresi (XRD) ile yapılan analizlerde Al_2Cu ve Al_4Cu_9 intermetalik fazlar tespit edilmiştir.

Tan ve ark., (2013), 5A02 alüminyum alaşımı ve saf bakır sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. İyi bir kaynak görünümü ve kabul edilebilir bir birleşme için dönme hızı ve takım konumlandırmasını sabit tutularak ilerleme hızının etkisini incelemişlerdir. Kaynak parametreleri; dönme hızı 1100 dev/dak, takım konumu alüminyum tarafında 0.2 mm, omuzun batma derinliği 0.8 mm ve takım eğim açısı 3° olarak sabit iken ilerleme hızları 20, 40 mm/dak belirlemişlerdir. Kaynak bölgesinde iyi bir Al ve Cu karışımı olduğunu ve büyük miktarda ince bakır parçacıkları, kompozit yapıya benzeyen kaynak bölgesinin üst kısmında dağıldığını tespit etmişlerdir. Alt kısımlarda ise, nano ölçekli arayapılar gözlenmiş ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM) aracılığıyla tanımlamışlardır. Bu arayapılar sırasıyla; Al_4Cu_9 , Al_2Cu_3 , Al_2Cu tabaka yapıları olarak doğrulamışlardır. Bu mikroyapıların oluşumu homojen olmayan sertlik dağılımı ve Al/Cu ara yüzeyinde belirgin bir sertlik artışı gösterdiğini tespit

etmişlerdir. Al ve Cu arasında mükemmel bir metalürjik birleşme iyi çekme ve eğilme mukavemet davranışlarına sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Yusof ve ark., (2013), yaptıkları çalışmada 0.8 mm kalınlığında çok ince AA5052 alüminyum alaşımı ve %99.999 saf bakır sürtünme karıştırma kaynak tekniğini kullanarak başarılı bir şekilde birleştirme gerçekleştirmişlerdir. Farklı kaynak parametreleri kullanılarak kaynaklı birleşme numuneleri çekme testine tabi tutmuşlardır. Çekme testi sonucunda, 2100 dev/dak dönme hızı ve 100 mm/dak kaynak hızında en yüksek mukavemet değeri olan 49.9 MPa elde etmişlerdir. Farklı kaynak parametreleriyle birleştirilen kaynaklı numunelerin mikroyapılarını taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDX analizleriyle tespit etmişlerdir. İlâveten, kaynak bölgesinde her iki malzemenin karışımı ile karmaşık bir akış oluştuğunu ve önemli derecede intermetalik bileşenlerin oluşmadığını gözlemlenmiştir.

Zhang ve ark., (2015), 3 mm kalınlığında ticari saf bakır (%99.9) ve 1060 alüminyum alaşımlı plakalar sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Saf bakır kaynak öncesi yaklaşık 650°C sıcaklıkta 1 saat bekleme süresinde tavllanmış ve sonrasında havada soğutmuşlardır. Sağlam bir kaynak için geçmiş çalışmalarında elde ettikleri optimum kaynak parametresi seçilmiş olup dönme hızı 1050 dev/dak ve ilerleme hızı 30 mm/dak olarak belirlemişlerdir. Karıştırıcı uç silindirik H13 çeliğinden yapılmış olup omuz çapı 12 mm, pim çapı 4.5 mm ve pim boyu 2.8 mm olarak kullanmışlardır. Kaynak işlemi plakaların normal yüzeyi ile 2.5° takım açısı yapacak şekilde ve geleneksel sürtünme karıştırma kaynağının tersine, karıştırıcı pim alüminyum kenarına 1 mm kaydırılarak kaynak işlemini gerçekleştirmişlerdir. Saat yönünün tersi yönde ve alüminyuma göre daha sert olan bakırı ilerleme kenarına yerleştirmişlerdir. Birleşmenin çekme mukavemeti 148 MPa olup, gevrek-sünek karışımı bir mekanizma ile Cu/kaynak bölgesi boyunca kırıldığını gözlemlenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağında aşırı derecede plastik deformasyon içermesi sırasında yüksek dislokasyon yoğunluğundan dolayı kaynak bölgesindeki ortalama sertlik değeri ana metallere göre daha yüksek değerlere ulaştığını ifade etmişlerdir.

Muthu ve Jayabalan, (2015), yaptıkları çalışmada, alüminyum ve bakırın sürtünme karıştırma kaynağını 50, 60, 70, 80, 90 mm/dak farklı takım ilerleme hızlarında gerçekleştirmişlerdir. Tavlama işlemine tabi tutulmuş bakır plakalar takım ilerleme yönünde yerleştirilip karıştırıcı uç Al kenarına 2 mm takım konumlandırması

yapılarak birleştirmişlerdir. Hatasız karışma bölgesi oluşturmak için optimum ısı girdisi aralığı takım ilerleme hızının 70 mm/dak ve 80 mm/dak olduğu sonucuna ulaşmışlardır. İlerleme hızının 80 mm/dak olduğunda difüzyon oranı ve zaman sürecinin azalmasından dolayı intermetalik tabaka kalınlığı 1.9 μm 'dan daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır. Sürekli nano ölçekli ince intermetalik tabakalarda, yüksek çekme mukavemeti (113 MPa) ve kaynak performansı (%70) elde etmişlerdir. X-ışını difraksiyon ve enerji dağılım spektrometresi kullanarak Al_2Cu , AlCu , Al_4Cu_9 intermetalik tabakaları tespit etmişlerdir. Karışma bölgesinde Al malzeme üzerinde ince bakır parçacıklarının dağılması, daha yüksek çekme dayanımı elde edildiğini ifade etmişlerdir.

Singh ve ark., (2015), yaptıkları çalışmada farklı malzeme çifti olan AA 8011-H18 ile %99.65 saflıkta bakır plakalar, sadece takım konumlandırması değişmiş olup; takım dönme hızı, kaynak hızı, takım eğim açısı ve batma derinliği gibi diğer parametreleri sabit tutarak sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Geleneksel olmayan sürtünme karıştırma kaynaklı numunelerin çekme mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklerini test etmişler ve ana malzemeler ile karşılaştırmışlardır. Kaynak parametrelerinin kaynaklı numunelerin mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerine oldukça önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişler ve gözlemleri detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Karıştırıcı uç geometrisi silindirik pim profilinde olması daha iyi kaynak mukavemeti elde edildiğini kanıtlamışlardır.

Carlone ve ark., (2015), yaptıkları çalışmada farklı malzeme çifti olan AA2024-T3 ve Cu10100 birleşme için uygun işlem parametreleri seçilerek ve alüminyum plakasına doğru takım konumlandırması yapılarak sürtünme karıştırma kaynağı ile sağlam dayanımlar elde etmişlerdir. Kaynak mikroyapısını geleneksel optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu sayesinde analiz etmişlerdir. Kaynak dikişinde, geleneksel olmayan SKK ile gerçekleşen bazı tipik özellikler ve kaynak bölgesi olduğunu göstermişlerdir. Kaynak bölgesi, deforme olmuş ve ikiz bakır parçacıkları ile yeniden kristalleşmiş alüminyum matris karışımı içerdiğini gözlemlemişlerdir. İlaveten, soğan halkası ve zengin parçacık bölgesinde, Cu parçacıkların Al matrisi içerisinde dağılmış olduğunu gözlemlemişlerdir. Elementel Analiz (EDS) ile Al_2Cu , AlCu , Al_3Cu_4 gibi farklı kimyasal bileşenlere sahip Al-Cu intermetalik bileşikler olduğunu

açıĝa çıkarmışlardır. Mikroyapıdaki varyasyon, kaynak bölgesinin kesit alanındaki mikrosertlik daĝılımını önemli derecede etkilediğini göstermişlerdir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Kaynak Yapılacak Malzeme

Bu çalışmada deneysel olarak, SKK yöntemi ile birleştirilecek levhalar için 4 mm kalınlıklarda, %99.95 saflıktaki Cu ve Al-1050 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Alüminyum levhanın boyutları 4x1000x2000 mm olup Seydişehir Alüminyum Metal Pazarlama Sanayi ve Tic. Ltd. Şti.'den tedarik edilmiştir. Bakır levha ise, TS EN 1652 Cu ETP R240 standardında ve 4x1000x1000 mm ebatlarında olup Ankara Bronz Alaşımları Mak. İnş. Gıda Tur. Müh. Nak. San. Tic. Ltd. Şti.' den temin edilmiştir. Temin edilen bu malzemeler KOSGEB ADANA HİZMET MÜDÜRLÜĞÜ METAL LABORATUVAR'da kimyasal içerikleri, spektral analiz ile tespit edilmiştir. Saf Cu ve Al-1050 alüminyum alaşımına ait spektral analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2' de verilmektedir. Saf bakır ve Al-1050 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri ise Çizelge 3.3'de belirtilmektedir.

Çizelge 3.1. Al-1050 malzemenin kimyasal içeriği (%ağırlık)

Al	Fe	Ti	Cr	Mg	Cu	Mn	Si
99,49	0.251	0.0262	0.0247	0.00481	0.0255	0.0365	0.124

Çizelge 3.2. Saf Cu malzemenin kimyasal içeriği (%ağırlık)

Cu	S	P	Si	Ni	Al	Zn	Fe
99.98	0.00139	0.00285	0.00135	0.00212	0.00209	0.00295	0.00408

Çizelge 3.3. Alüminyum ve bakırın mekanik özellikleri

Özellikler	Alüminyum	Bakır
Çekme Mukavemeti (MPa)	123.52	268.57
Kopma Mukavemeti (MPa)	70.15	190.26
Uzama (%)	12.52	19.13
Sertlik (HV)	42.5	88.21

3.1.2. Kaynak Edilecek Levhaların Boyutları

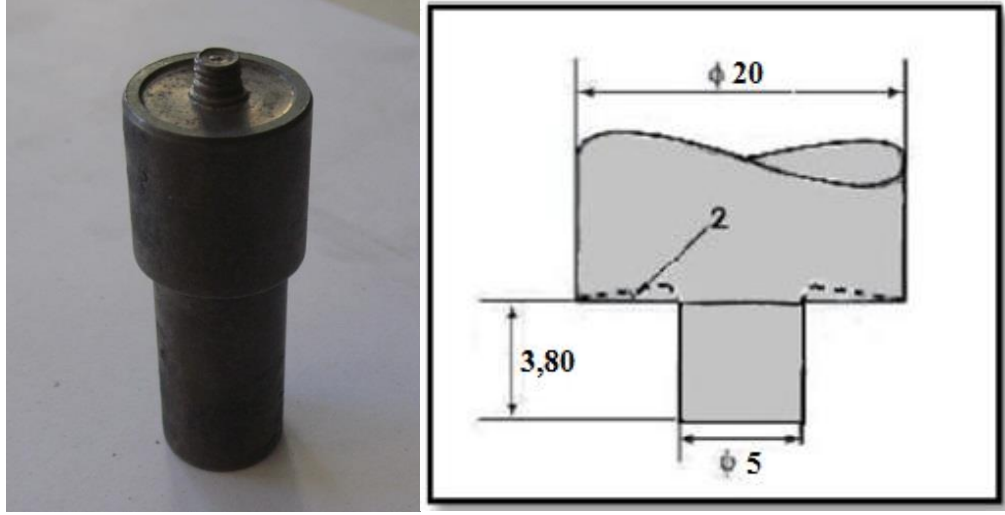
Kaynak işleminden önce, ticari olarak temin edilen levha halindeki saf Cu ve Al alaşımının birleştirilecek kenar yüzeyleri, freze tezgahında 4x120x195 mm ebatlarında, parmak freze çakısıyla işlenmiştir. Birleştirilmek üzere eşleştirilen alın yüzeyler, kir, pas ve oksit tabakasından arındırılmıştır.

3.1.3. Karıştırıcı Uç İmalatı ve Özellikleri

Al ve Cu levhaların SKK yöntemi ile birleştirilmesinde, levha yüzeyleri ile temas halinde olan karıştırıcı uçta sürtünmeden dolayı yüksek sıcaklık değerlerine ulaşabileceğinden, yöntemin uygulanması esnasında aşınma ve sertlik direncini koruyabileceği düşünülen 1.3343 tip yüksek hız takım çeliği (HSS) tercih edilmiştir. Bu çelik tipine ait kimyasal içerik Çizelge 3.4’de verilmiştir. Uç imalatında kullanılan 25 mm çapındaki 1.3343 tip HSS malzemesi Sağlam Metal’den temin edilmiştir. Karıştırıcı uç, Mislina Mühendislik’de CNC tornada işlenmiştir (Şekil 3.1).

Çizelge 3.4. HSS karıştırıcı uç malzemesinin kimyasal bileşimi (Anonim, 2016)

Malzeme	C	Cr	Mo	V	W
1.3343	0,90	4,10	5,00	1,90	6,40



Şekil 3.1. Al-1050 Alüminyum ve saf Cu levhaların SKK ile birleştirilmesinde kullanılan karıştırıcı ucun resmi

Alüminyum ve bakır levhaların SKK yöntemiyle birleştirilmesi sırasında, karıştırıcı uçtan istenilen sertlik ve aşınma direncinin kazandırılması için Çukurova Isıl İşlem San. ve Tic. Ltd. Şti.'de 62 HRC sertlik değerine ulaşılacak şekilde ısıl işlem yaptırılmıştır.

Karıştırıcı uç; pim, omuz kısmı ve sap (gövde) olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Her bir bölümün ölçüsü ve hassasiyeti, kaynak yapılacak malzemenin cinsi ve kalınlığı gibi bazı özelliklere göre belirlenmiştir. Karıştırıcı ucun gerekli karıştırma işlemini gerçekleştirebilmesi için pim üzerine M5 vida dişi açılmıştır. İkincisi omuz kısmı, alın altına birleştirmelerde her iki levhanın üst yüzeyine temas ederek sürtünme alanını genişleterek kaynak için gerekli ısının elde edilmesini sağlar. İlâveten, kaynak sırasında yumuşayan ve takımın dönme hareketinden dolayı yukarı doğru hareket eden malzemelerin hareketlerini kısıtlar ve aynı zamanda kaynak dikişinin kalınlığını belirler. Üçüncü ve son kısmı ise karıştırıcı ucun tezgaha bağlanan kısmıdır. Gövde ya da sap şeklinde de isimlendirilebilir. Kaynak sırasında uca gelen kuvvetlerden dolayı ucun bağlama aparatı içerisine doğru itilmesini önlemek için omuz çapının biraz altına tornalanmıştır. Bu kısmın ölçüleri çok önemli olmamakla birlikte farklı kaynak koşullarında farklı ölçüler seçilebilir.

3.1.4. Birleştirilecek Levhaları Sabitleme Kalıbı

SKK yöntemi ile birleştirilecek levhaların, tezgah tablasına sağlam ve kaynak takımının ilerleme yönüne paralel bir şekilde bağlanması, kaynak kalitesini doğrudan etkileyeceği için oldukça önemlidir. Birleştirme işleminin başlangıcında, dönen karıştırıcı ucun levha yüzeylerinden içeri batması ve omuz kısmının levha yüzeylerine basmasından dolayı levhalar yatay ve dikey eksenlerde harekete maruz kalacaktır. Kaynak sırasında levhaların bu şekilde hareket etmesi durumunda, beklenen kalitede kaynak işlemi gerçekleşmemiş olacaktır. Bu yüzden, Al ve Cu levhalarını SKK yöntemi ile birleştirmede, levhaların hareket etmesini engellemek amacıyla sabitleme kalıbı imal edilmiştir (Şekil 3.2).

Aynı zamanda, birleştirme sırasında karıştırıcı uca gelen kuvvetten dolayı levhalarda olası geometri bozukluklarını önlemek için üst yüzey baskı levhaları delinmiş olup vidalarla sıkıştırılarak sabitlenmiştir.



Şekil 3.2. Al ve Cu levhaların SKK yöntemiyle birleştirilmesinde kullanılan sabitleme kalıbı

3.1.5. Kaynak İşleminde Kullanılan Tezgah

Sürtünme karıştırma kaynak işlemi için İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünün İmalat Atölyesinde bulunan, Şekil 3.3’de verilen CNC freze tezgahı kullanılmıştır. CNC freze tezgahın özellikleri ise şunlardır;

TRIDENT marka, TR-51E model, 20KVA güç kapasitesine sahip ve net ağırlığı 3100 kg'dır.

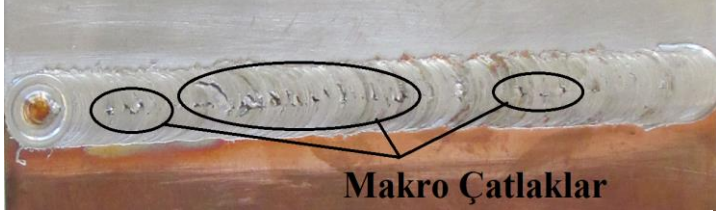
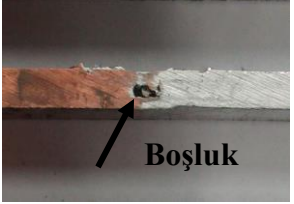

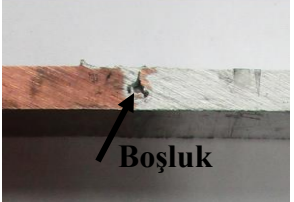


Şekil 3.3. Kaynak işleminde kullanılan CNC freze tezgahı

3.1.6. Deney İçin Belirlenen Kaynak Parametreleri

Optimum kaynak parametrelerin belirlenmesi için değişik takım dönme ve ilerleme hızlarında ön deney çalışmaları yapılmıştır. Bu deneylerde karıştırıcı uç alüminyum ve bakır levhaya 0 (sıfır) olarak konumlandırılmıştır. Yapılan ön deneysel çalışmalarda düşük mukavemet değerleri elde edilmiştir. Kaynak yüzey görüntülerinde çatlak görülürken, içyapıda boşluklar oluşmuştur. Kaynak bölgesinde malzemelerde karışımın gerçekleşmemesi ve boşlukların olması kaynaklı parçaların mukavemet değerlerinin düşük olmasına neden olmuştur. Ön deneysel çalışmalarda sıfır takım konumlandırmasında elde edilen numunelerin görüntüleri Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Şekil 3.4 incelendiğinde, 1025/50/0 ve 1025/75/0 parametrelerinde birleştirilen kaynaklı

numunelerin yüzeylerinde makro çatlaklar ve kesit görüntülerinde ise boşluklar oluştuğu belirlenmiştir.

Numune Kodu	Görünüm	
	Yüzey	Kesit
1025/50/0		
1025/75/0		

Şekil 3.4. Kaynak yüzey ve kesit görüntüleri

Bu kaynak hatalarından dolayı seçilen kaynak parametrelerinin uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu parametrelerde birleştirilen kaynaklı numunelerin çekme mukavemetleri sırasıyla 1025/50/0 numunesinde 30.65 MPa, 1025/75/0 numunesinde ise 38.42 MPa elde edilmiştir. Dolayısıyla makro görüntülerden elde edilen sonuçlar ile çekme testinden elde edilen sonuçlar birbirlerini destekler niteliktedir. Benzer şekilde literatürde yapılan çalışmalarda da kaynak hatalarının çekme mukavemet değerlerini olumsuz yönde etkilediği ifade edilmektedir (Barlas ve Uzun, 2010; Çakır, 2013). Literatürde karıştırıcı ucun bakıra göre daha yumuşak olan alüminyum tarafına konumlandırılmasıyla çekme mukavemet değerlerin göze çarpan bir şekilde arttığı belirtilmiştir. Takım ilerleme yönüne literatüre uygun olarak sert metal olan bakır, takım ilerleme yönünün ters tarafına daha yumuşak olan alüminyum levha yerleştirilmiştir (Xue, 2010; Çakır, 2013). Daha sonra karıştırıcı ucun konumunun değiştirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Ön çalışmalardan sonra takım konumlandırılmasının önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülerek, Çizelge 3.5’de verilen kaynak parametreleri belirlenmiştir.

Literatür araştırmalar sonucunda mikroyapı ve mekanik davranışları üzerinde önemli etkiye sahip olan devir sayısı, ilerleme hızı ve karıştırıcı uç konumlandırılması işlem parametreleri değiştirilerek sũrtũnme karıştırma kaynak bağlantıları elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, ũ farklı takım dũnme hızı (525, 1025, 1525 dev/dak), ũ farklı ilerleme hızı (50,75,100 mm/dak) ve iki farklı takım konumlandırmasında (0.75-1.5 mm) sũrtũnme karıştırma kaynağı (SKK) ile kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tez içerisinde, gerçekleştirilen farklı kaynak parametrelerine bağlı sonuçların ortaya konulmasında karışıklıklara neden olmaması amacıyla, birleştirilen numuneleri tanımlamak için kaynak parametreleri kodlanarak belirtilmiştir. Bu kodlamayı şu Şekilde ifade etmek mũmkũndũr. Takım dũnme hızı/Takım ilerleme hızı/Takım konumlandırması Şeklinde kullanılmıştır.

3.1.7. Birleştirme ncesi Hazırlıklar

SKK yũntemiyle Cu ve Al-1050 levhaların birleştirilmeleri öncesinde bazı n hazırlıklar yapılmıştır. Bu hazırlıkları aşağıdaki Şekilde sıralamak mũmkũndũr.

- Cu ve Al-1050 levhalar hadde yũnũ doğrultusunda giyotin makasta kesilmiştir.
- SKK sırasında Cu ve Al-1050 levhaların alın altına gelecek yũzeyleri, dik freze tezgahında talaş kaldırmak suretiyle dũzeltilmiř, eğe ve zımpara ile çapaklar giderilerek 195x120x4 mm ebatlarına getirilmiştir.
- Cu ve Al-1050 levhaların birleştirilecek yũzeyleri alkol ile temizlendikten sonra levhalar dayama levhası ũzerine yerleştirilmiştir. Karıştırıcı uç eksenini ile kaynak eksenini arasında kaçıklık olmayacak Şekilde ayarlama yapıldıktan sonra, levhalar freze tablasına bağlı sabitleme kalıbına hareket etmeyecek Şekilde sabitlenmiştir.

Yukarıda sıralanan maddeler, SKK öncesinde birleştirilecek levhalar ile kullanılan makine ve donanımın hazır hale getirilmesini içermekte, birleştirilen tũm numuneler için uygulanmış ve birleştirme işlemlerine hazır hale getirilmiştir.

Çizelge 3.5. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan kaynak parametreleri

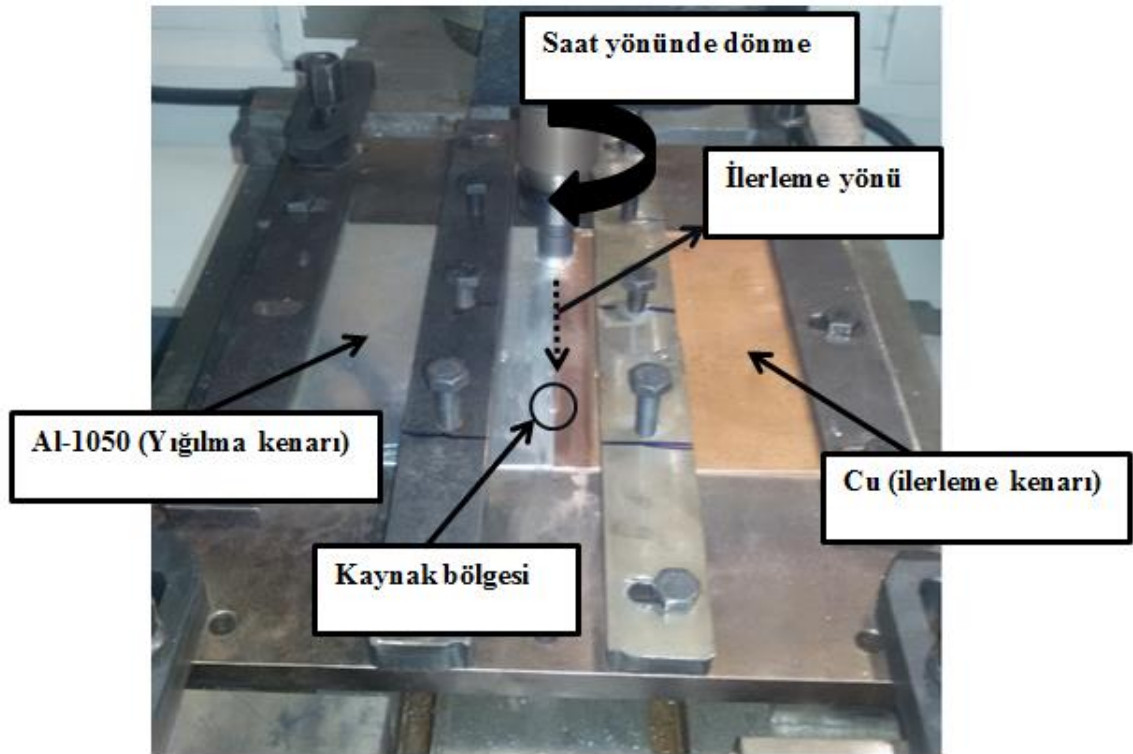
Deney No	Takım Dönme Hızı (dev/dak)	Takım İlerleme Hızı (mm/dak)	Takım Kaydırma (mm)	Numune Kod
1	525	50	0.75	525/50/0.75
2			1.5	525/50/1.5
3		75	0.75	525/75/0.75
4			1.5	525/75/1.5
5		100	0.75	525/100/0.75
6			1.5	525/100/1.5
7	1025	50	0.75	1025/50/0.75
8			1.5	1025/50/1.5
9		75	0.75	1025/75/0.75
10			1.5	1025/75/1.5
11		100	0.75	1025/100/0.75
12			1.5	1025/100/1.5
13	1525	50	0.75	1525/50/0.75
14			1.5	1525/50/1.5
15		75	0.75	1525/75/0.75
16			1.5	1525/75/1.5
17		100	0.75	1525/100/0.75
18			1.5	1525/100/1.5

3.2. Yöntem

3.2.1. Kaynak İşlemi

SKK yöntemi ile birleştirmek için hazırlanan malzeme çifti Al-1050 alüminyum alaşımı ile %99.95 saflıkta bakır levhalar alın altına tezgah tablası üzerine bağlama kalıbı ile sabitlenmiştir (Şekil 3.5). Birleştirilecek levhaların bulunduğu bağlama kalıbı ile karıştırıcı uç aynı ekseninde (paralel olması) için komparatör kullanılarak kontrol edilmiştir. Sonrasında tezgah saat yönünde dönmesi sağlanarak, ucun Z yönünde

parçaya daldırılmasıyla 0.2 mm omuz batma derinliği verilmiştir. Bu konumda yaklaşık 1 dakika beklenerek karıştırıcı ucun omuz bölgesinin levhaları ısıtması sağlanmıştır. Sürtünme sıcaklığı elde edildikten sonra, tezgahın otomatik ilerleme hızında birleşme çizgisi boyunca ilerleme sağlanılarak levhaların bitim noktasına yakın otomatik tabla ilerlemesi durdurulmuş, karıştırıcı uç levhalardan çıkarılıp kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.

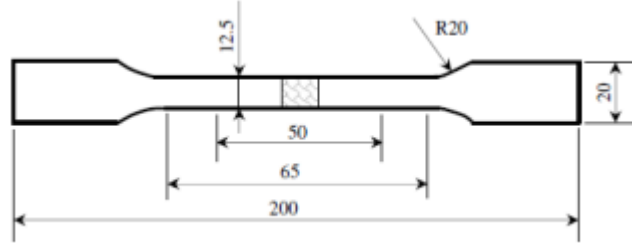


Şekil 3.5. Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanması

3.2.2. Çekme Deneyi

Cu/Al-1050 birleştirmesinin, saf Cu ve Al-1050 ana metallere göre olan kaynak performansının değerlendirilmesi için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme numuneleri kaynak yönüne dik olarak EN 10002-1 standardına uygun hazırlanmıştır. Deneylerin tamamında çekme hızı 2 mm/dk. olarak belirlenmiştir. Şekil 3.6'da çekme numunesinin geometrik detayları, Şekil 3.7'de ise talaşlı imalat yöntemiyle elde edilen çekme numunelerin görüntüleri verilmiştir. Ana metaller ve birleştirmeye ait üç

numunenin ortalamaları çekme testi sonuçları olarak sunulmuştur. Çekme testi 10 kN kapasiteye sahip AGS-J SHIMADZU marka cihazla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.6. EN 10002-1 standardına göre hazırlanmış çekme numunesinin ölçüleri



Şekil 3.7. SKK yöntemiyle birleştirilen Al ve Cu levhalardan talaşlı imalat yöntemiyle elde edilen çekme numuneleri



Şekil 3.8. Kaynaklı levhaların hidrolik şerit testere ile kesilmesi



Şekil 3.9. EN 10002-1standardına göre çekme numunelerin freze tezgahında hazırlanması

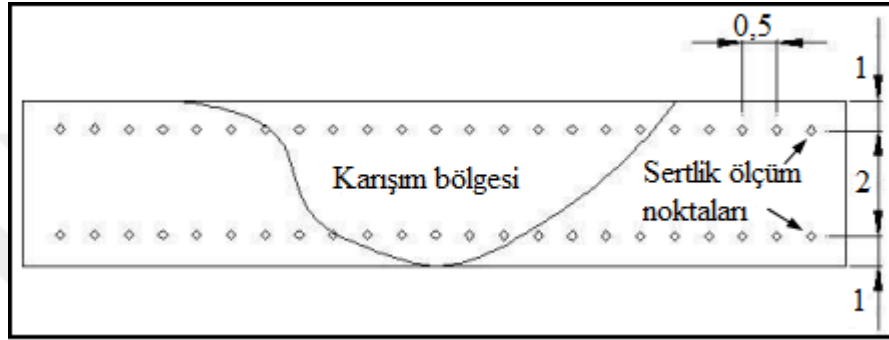


Şekil 3.10. Çekme testinde kullanılan cihaz

3.2.3. Mikrosertlik İncelemeleri

Kaynaklı bağlantıların kaynak bölgesinin sertlik değerlerinin tespiti için, Vickers Mikrosertlik (HV) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, kaynak dikişine dik kesitte alınan numune yüzeyinde iki sıra sertlik alımı şeklinde yapılmıştır. Birinci sıra

sertlik alımı, numune üst yüzeyinden kaynak merkezine doğru 1 mm mesafede, ikinci ise numune alt yüzeyinden yine kaynak merkezine doğru 1 mm mesafede gerçekleştirilmiştir. Kaynağın hem üst hem de alt bölgesinde bu şekilde gerçekleştirilen sertlik ölçümlerinde, her bir ölçüm aralığı 0.5 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.11). Sertlik deneyinin yapıldığı test cihazı Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Sertlik ölçümleri, MICROBUL Low Vickers & Brinell Hardness Tester Load tipi sertlik cihazında 0.5 kg yük ve 30 sn bekleme süresi uygulanarak yapılmıştır.



Şekil 3.11. Sıra sertlik ölçüm yönteminin, numune üzerinde uygulandığının şematik olarak gösterimi (ölçüler mm)



Şekil 3.12. Mikrosertlik test cihazı

3.2.4. Metalografik İnceleme

Al ve Cu levhaların birleştirilmesi sonrasında kaynak bölgelerinde meydana gelen mikroyapısal değişikliklerin belirlenmesinde kullanılacak olan numuneler, kaynak yönüne dik kesitte ve bütün mikroyapı bölgelerini kapsayacak şekilde hazırlanmıştır. Sıcak preste bakalit tozu kullanılarak Şekil 3.13 'deki gibi kalıplanmıştır.



Şekil 3.13. Metalografik inceleme için bakalite alınmış numuneler

Şekil 3.14 (a)'da gösterilen cihazda bakalite alınmış numuneler sırasıyla 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 numaralı zımpara kağıtları ile zımparalanmıştır. 6µm elmas pasta ile ön parlatma, 1µm elmas pasta ile son parlatma yapılmış ve dağlayıcı ile yüzeyler dağlanmıştır. Zımpara ve parlatma işleminde Şekil 3.14 (b)'de gösterilen zımpara-parlatma cihazında iki dakika boyunca 400 devirle çalışılmıştır. Dağlama için bakır tarafı 100 ml saf su, 4 ml doymuş sodyum klorik, 2 g potasyum dikromat ve 5 ml sülfürik asitten oluşan dağlama reaktifi ile, alüminyum tarafı ise keller çözeltisi ile dağlanmıştır. Dağlama sonrası numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemesinde kullanılmıştır. Bakalite alma ve zımpara-parlatma işlemleri İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, SEM incelemeleri ise Mustafa Kemal Üniversitesi Teknoloji Arge Uygulama ve Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14. Metalografik inceleme için kullanılan cihazlar a) Bakalite alma cihazı
b) Zımparalama ve parlatma cihazı



Şekil 3.15. SEM cihazı

3.2.5. X-Işınları Karakterizasyonu

Sürtünme karıştırma kaynağının uygulandığında meydana gelen yüksek ısı ve plastik deformasyondan dolayı, birleştirmelerin kaynak bölgesinde oluşabilecek faz dönüşümleri, metaller arası bileşik oluşumu gibi değişimlerin tespiti için X-ışınları difaktrometresi (XRD) kullanılmıştır. XRD incelemeleri, Mustafa Kemal Üniversitesi

Teknoloji Arge Uygulama ve Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir. XRD cihazının resmi Şekil 3.16’da verilmiştir.















Şekil 3.16. XRD cihazı













4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Kaynak Yüzeyi ve Kök Görüntüleri

Saf Cu ve Al-1050 malzeme çiftinin takım konumlandırmasının sıfır olduğu durumdan takımın alüminyum tarafına belirlenen değerlerde kaydırılması durumunda çekme mukavemet değerlerinde kayda değer bir artış gözlenmiştir. Belirlenen kaynak parametrelerine göre birleştirilen numunelerin kaynak kök ve kesit görüntüleri şekil 4.1’de verilmiştir.

Numune Kodu	Görünüm	
	Yüzey	Kök
525/50/0.75		
525/75/0.75		
525/100/0.75		
525/50/1.5		
525/75/1.5		
525/100/1.5		

Şekil 4.1. 525 dev/dak dönme hızında elde edilen kaynaklı numunelerin yüzey ve kök görüntüleri

Numune Kodu	Görünüm	
	Yüzey	Kök
1025/50/0.75		
1025/75/0.75		
1025/100/0.75		
1025/50/1.5		
1025/75/1.5		
1025/100/1.5		


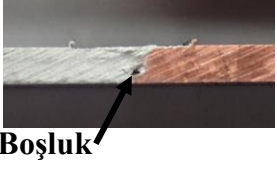

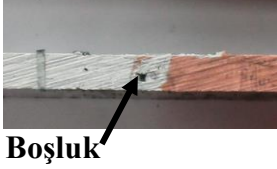
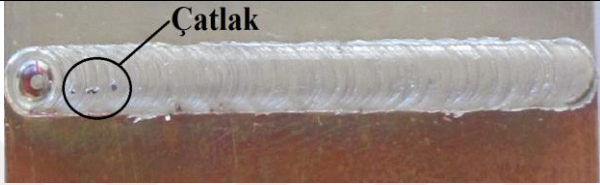







Şekil 4.2. 1025 dev/dak dönme hızında elde edilen kaynaklı numunelerin yüzey ve kök görüntüleri

Kaynak yüzeyleri ve kök görüntüleri incelendiğinde genel olarak kaynakta boşluk, çatlama, çukur ve birleşme yetersizliği gibi kaynak hatalarının oluşmadığı belirlenmiştir. Fakat 1525/50/0.75 ve 1525/75/0.75 numunelerinin kaynaklı yüzeylerinde çatlaklar görülmüştür. Ayrıca kaynaklı numunelerin kaynak kesit görüntüleri de incelenmiş olup, çekme mukavemet değerleri düşük değere sahip olan numunelerin kesit görüntülerinde küçük boşluklar var iken mukavemet değeri yüksek olan numunelerin kesitinde makro düzeyde boşluk görülmemiştir.

Şekil 4.3 incelendiğinde, takım konumunun alüminyum tarafına doğru 0.75'ten 1.5'e artmasıyla kaynaklı numunelerin yüzey ve kesitinde boşluk, çukur, birleşme yetersizliği çatlama ve ayrılma gibi kaynak hatalarının oluşmadığı belirlenmiştir.

Numune Kodu	Görünüm	
	Yüzey	Kök
1525/50/0.75		
1525/75/0.75		
1525/100/0.75		
1525/50/1.5		
1525/75/1.5		
1525/100/1.5		

Şekil 4.3. 1525 dev/dak dönme hızında elde edilen kaynaklı numunelerin yüzey ve kök görüntüleri

Numune Kodu	Görünüm	
	Yüzey	Kesit
525/50/0.75		
1025/100/1.5		
1525/75/0.75		
525/100/1.5		
1025/50/1.5		
1525/75/1.5		

Şekil 4.4. En iyi ve en kötü üç numunenin yüzey ve kesit görüntüleri

4.2. Kaynak Sonrası Karıştırıcı Uçun Durumu

Şekil 4.5’de sürtünme karıştırma kaynak sonrasında karıştırıcı uçun sıfır ve belirli takım konumları sonucunda oluşan görüntüsü verilmiştir. Kaynak sonrasında sıfır takım konumunda karıştırıcı uçun omuz ve pim kısmında alüminyum ve bakırın sıvandığı, belirli takım konumlandırmalarında ise alüminyum tarafına kaydırıldığı için karıştırıcı uçun omuz ve pim kısmına alüminyum sıvandığı tespit edilmiştir. Her birleştirme

işleminde önce karıştırıcı uçtaki sıvanan kısmı temizlenerek yeni birleştirme işlemine başlanmıştır.



Şekil 4.5. SKK sonrasında karıştırıcı uç durumu (a) sıfır takım komunu (b) 0.75,1.5 mm takım konumlandırması

4.3. Çekme Deneyi Sonuçları

Kaynaklı numunelerin çekme testi sonrasında elde edilen çekme mukavemeti, % uzama ve kaynak performans değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Ayrıca çekme test sonuçları grafik olarak da Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Ana malzemelerin çekme mukavemet değerleri Al için 122.50 MPa, Cu için de 278.50 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek çekme mukavemeti 525/100/1.5 numunesinde 105.16 MPa, en düşük çekme mukavemeti ise 1525/75/0.75 numunesinde 50.12 MPa değeri elde edilmiştir. Çekme testi sonucunda kopmaların kaynak bölgesinden gerçekleştiği tespit edilmiştir (Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11). Kaynaklı numunelerin % kaynak performansı belirlenirken çekme mukavemet değeri daha düşük olan alüminyum ana metaline göre belirlenmiştir.

525 dev/dak devir hızında, 100 mm/dak ilerleme hızında ve 1.5 mm takım konumlandırmasında gerçekleştirilen Cu/Al-1050 alın altına yapılan sürtünme karıştırma kaynağında elde edilen çekme mukavemeti (105.16 MPa) ve kaynak performansı % 85.84 olarak belirlenmiştir.

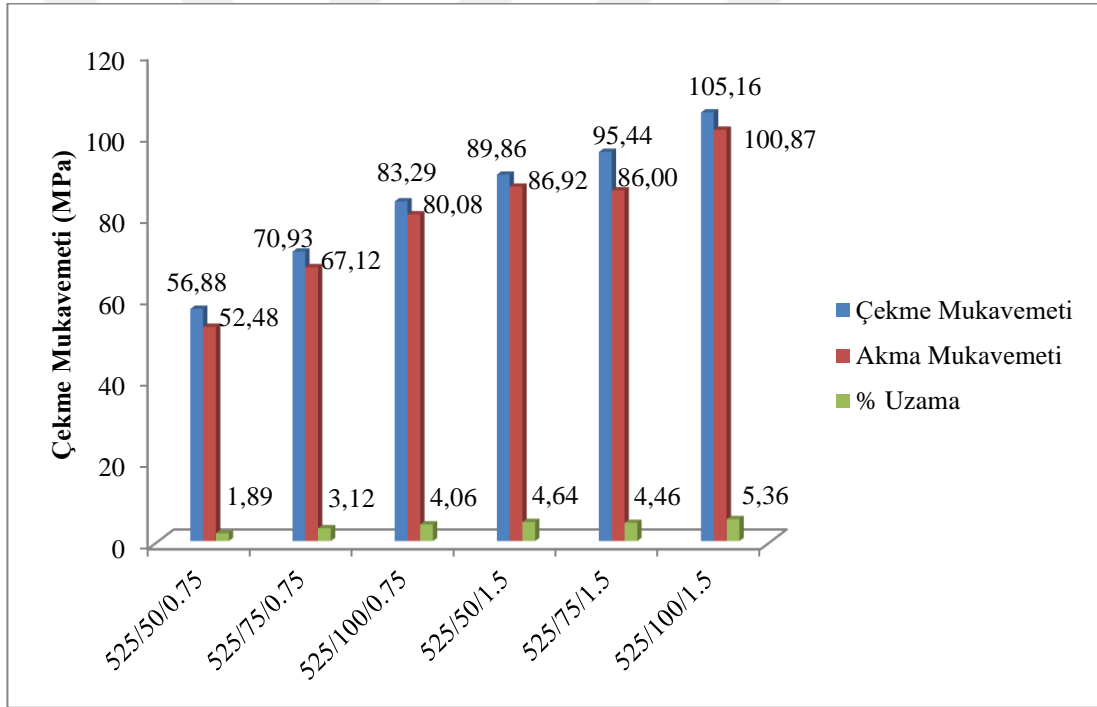
Çizelge 4.1. Çekme deneyi sonuçları

Deney No	Deney numunesi	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	Kaynak Performansı (Al göre %)
	Al	122.5	11.81	-
	Cu	278.50	13.89	-
1	525/50/0.75	56.88	1.89	46.43
2	525/75/0.75	70.93	3.12	57.90
3	525/100/0.75	83.29	4.06	67.99
4	525/50/1.5	89.86	4.64	73.35
5	525/75/1.5	95.44	4.46	77.91
6	525/100/1.5	105.16	5.36	85.84
7	1025/50/0.75	63.30	2.94	51.67
8	1025/75/0.75	75.38	3.42	61.53
9	1025/100/0.75	82.31	4.74	67.19
10	1025/50/1.5	86.34	4.62	70.48
11	1025/75/1.5	67.44	3.54	55.05
12	1025/100/1.5	52.83	2.11	43.12
13	1525/50/0.75	57.89	2.62	47.25
14	1525/75/0.75	50.12	1.54	40.91
15	1525/100/0.75	77.33	4.10	63.12
16	1525/50/1.5	83.03	4.80	67.77
17	1525/75/1.5	99.18	5.08	80.96
18	1525/100/1.5	71.12	3.60	58.05

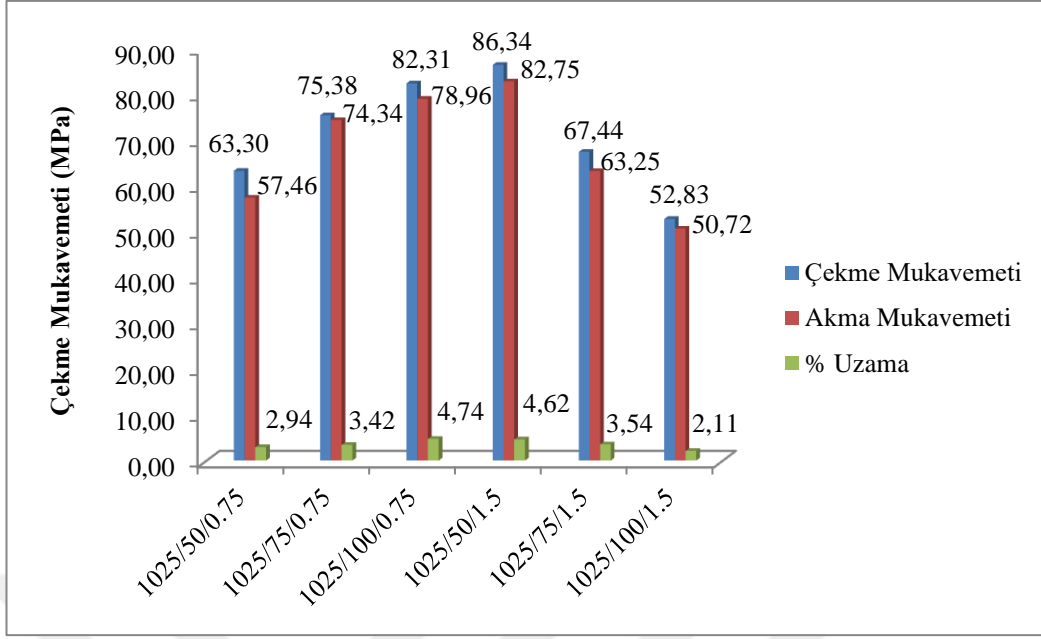
Kaynak Performansı= (Kaynaklı numunenin çekme mukavemeti/Alüminyum ana metalinin çekme mukavemeti) × 100

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde Muthu ve Jayabalan (2015) yaptıkları çalışmada saf Cu/AA1100 malzeme çiftinin takım konumlandırması ile gerçekleştirilen sürtünme karıştırma kaynağında çekme mukavemetini 113 MPa ve kaynak performansını da % 70.62, Çakır ve Çelik (2015) ise saf Cu/Al-1050 sürtünme

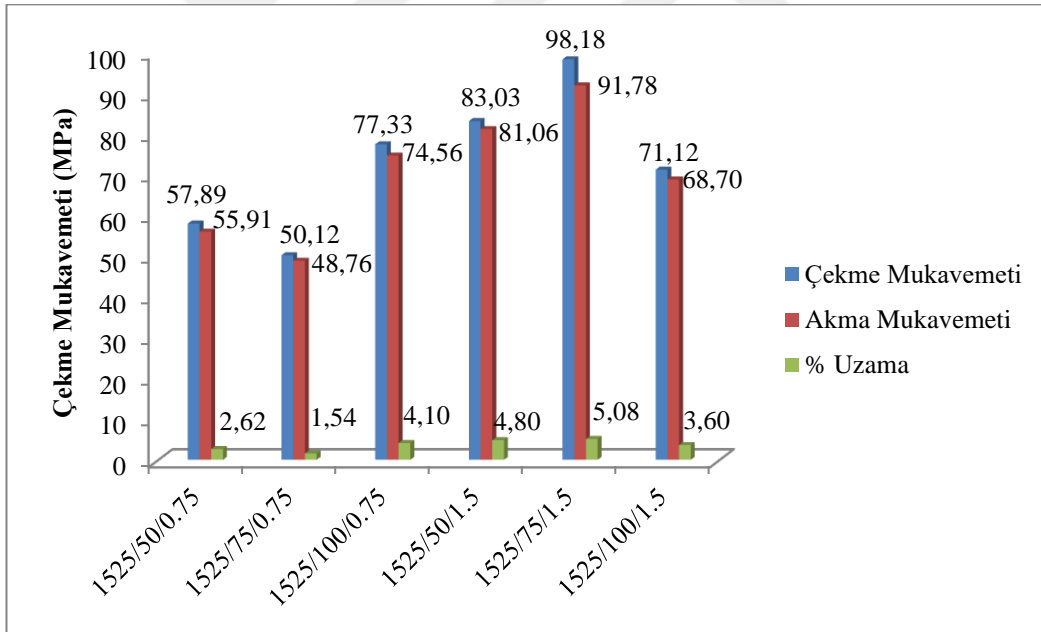
karışma kaynağında elde edilen çekme dayanımı değerini 92.91 MPa ve kaynak performansı da % 83.55 olarak tespit etmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen çekme mukavemeti ve kaynak performansı sonuçlarının literatürden elde edilen sonuçlar ile büyük bir paralellik gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar katı hal birleştirme yöntemlerinden olan sürtünme ve difüzyon kaynak yöntemleri ile mukayese edildiğinde daha yüksek mukavemet değeri elde edilebildiği tespit edilmiştir. Literatürde Lee ve ark. (2005) saf Cu/Al-1050 sürtünme kaynaklı birleştirmesinin çekme dayanımı 87 MPa, difüzyon kaynağı yapılmış iki farklı çalışmada ise sırasıyla Ay ve ark. (1999) 61 MPa ve Enjo ve ark. (1977) 28 MPa değerleri elde edilmiştir. Tsujino ve ark. (1988) ultrason kaynağında ise çekme dayanımı 90 MPa yakın bir değer elde etmişlerdir.



Şekil 4.6. 525 dev/dak takım dönme hızındaki numunelerin çekme test sonuçları



Şekil 4.7. 1025 dev/dak takım dönme hızındaki numunelerin çekme test sonuçları



Şekil 4.8. 1525 dev/dak takım dönme hızındaki numunelerin çekme test sonuçları

Çekme testi sonucunda kopmaların kaynak bölgesinden gerçekleştiği tespit edilmiştir. Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de çekme testi sonucunda elde edilen numunelerin yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.9. 525 dev/dak takım dönme hızında çekme testi sonrası yüzey görüntüleri, (a) 525/50/0.75 numunesi, (b) 525/50/1.5 numunesi, (c) 525/100/1.5 numunesi



Şekil 4.10. 1025 dev/dak takım dönme hızında çekme testi sonrası yüzey görüntüleri, (a) 1025/50/0.75 numunesi, (b) 1025/75/0.75 numunesi, (c) 1025/75/1.5 numunesi

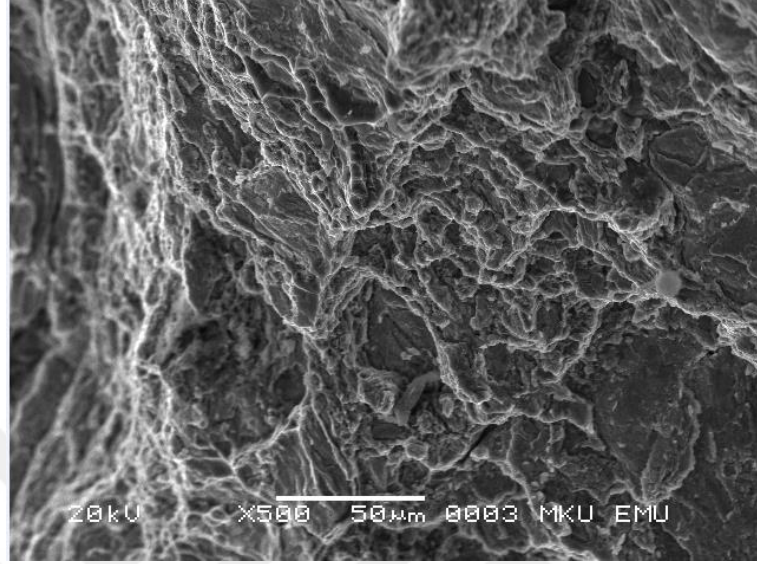


Şekil 4.11. 1525 dev/dak takım dönme hızında çekme testi sonrası yüzey görüntüleri, (a) 1525/100/0.75 numunesi, (b) 1525/75/1.5 numunesi, (c) 1525/100/1.5 numunesi

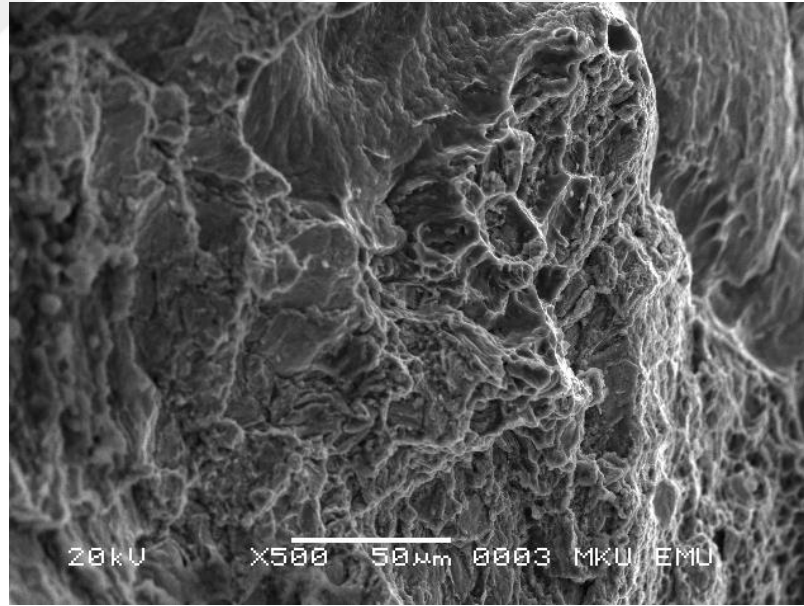
Gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin kaynak performansları (SKK'lı levhanın çekme mukavemeti/Al ana malzemenin çekme mukavemeti x 100) incelendiğinde en yüksek değer %85.84 olarak 525 dev/dak takım dönme hızında, 100 mm/dak ilerleme hızında ve 1.5 mm takım konumlandırmasında elde edilmiş olup en düşük değer ise; 1525 dev/dak takım dönme hızında, 75 mm/dak ilerleme hızında ve 0.75 takım konumlandırmasında %40.91 olarak tespit edilmiştir.

Çekme testinden sonra kırılma mekanizmasına anlayabilmek için kırılan yüzeylerin SEM görüntüleri alınmıştır. Elde edilen SEM görüntülerinden çekme mukavemet değeri yüksek olan 525/100/1.5 numunesinin kopma bölgesi sünek yapıya sahip iken çekme mukavemet değeri düşük olan 1525/75/0.75 numunesinin kopma bölgesi gevrek yapıda olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.12'de çekme mukavemeti 105.16 MPa olan 525/100/1.5 numunesinin alüminyum tarafında kopma yüzeyi çukur

bölgelerden oluşmuştur. Şekil 4.13’de ise bakır tarafın kırılan yüzeyinin SEM görüntüsü bulunmaktadır.

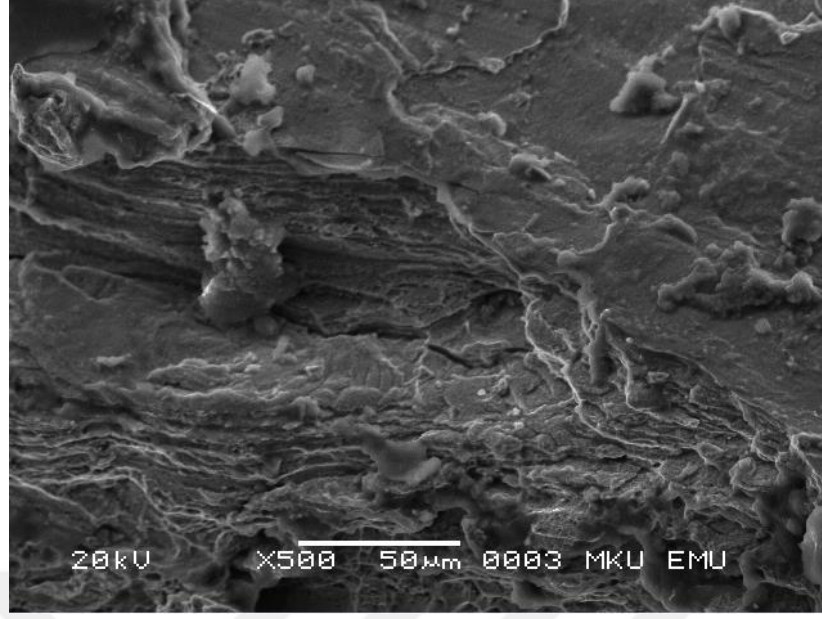


Şekil 4.12. Çekme deneyi sonrası 525/100/1.5 numunesinin Al tarafı kırılma yüzeyi

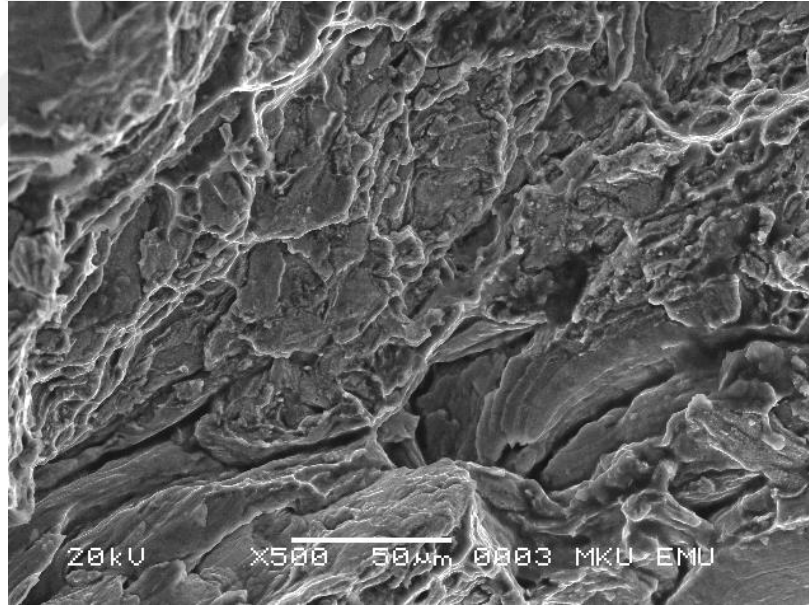


Şekil 4.13. Çekme deneyi sonrası 525/100/1.5 numunesinin Cu tarafı kırılma yüzeyi

Şekil 4.14’de çekme mukavemeti 50.12 MPa olan 1525/75/0.75 numunesinin Al tarafı, Şekil 4.15’de ise bakır tarafının SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntülerinden 1525/75/0.75 numunesinin kırılma yüzeylerinin gevrek bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.14. Çekme deneyi sonrası 1525/75/0.75 numunesinin Al tarafı kırılma yüzeyi



Şekil 4.15. Çekme deneyi sonrası 1525/75/0.75 numunesinin Cu tarafı kırılma yüzeyi

4.4. Takım Dönme Hızının Etkisi

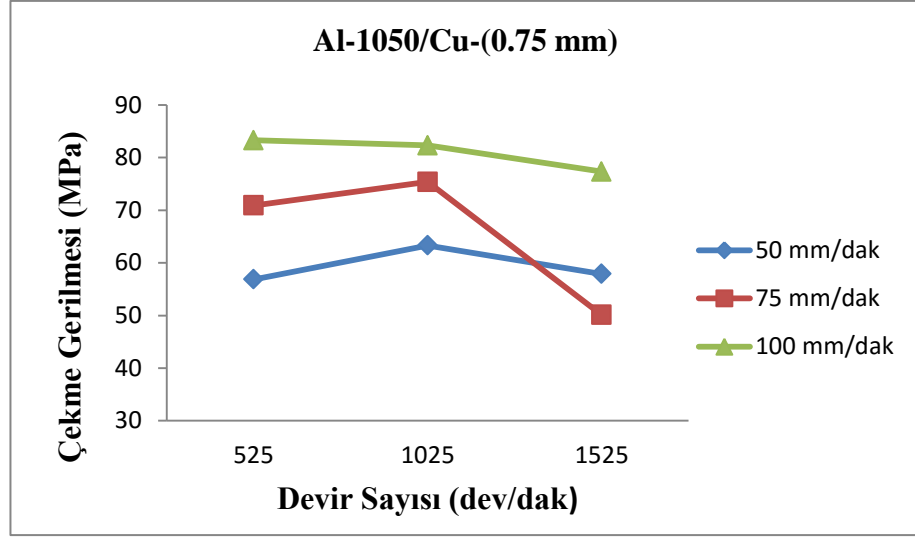
DeneySEL sonuçlara göre kaynak parametreleri incelendiğinde; takım dönme hızının mekanik özellikler üzerinde göze çarpan bir şekilde etki ettiği ortaya çıkmıştır.

Takım dönme hızlarında elde edilen en yüksek ve en düşük çekme mukavemetleri sırasıyla verilmiştir. 525 dev/dak takım dönme hızında en düşük çekme mukavemeti 56.88 MPa, en yüksek çekme mukavemeti 105.16 MPa, 1025 dev/dak takım dönme hızında en düşük çekme mukavemeti 52.83 MPa, en yüksek çekme mukavemeti 86.34 MPa, 1525 dev/dak takım dönme hızında ise en düşük çekme mukavemeti 50.12 MPa, en yüksek çekme mukavemeti 99.18 MPa değeri elde edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında aynı devirde en düşük ve en yüksek çekme mukavemetleri arasındaki fark sırasıyla; 525 dev/dak'da 48.28 MPa, 1025 dev/dak'da 33.51 MPa ve 1525 dev/dak'da ise 49.06 MPa'dır. Elde edilen sonuçlara göre takım dönme hızının çekme mukavemet değerleri üzerine etki ettiği fakat tek başına yeterli olmadığı diğer parametrelerinde önemli olduğunu göstermiştir.

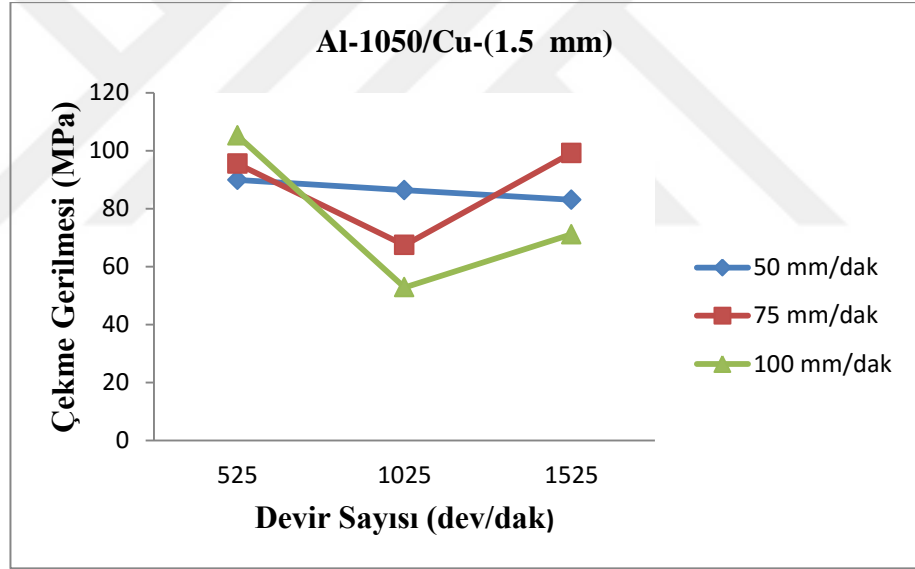
Takım dönme hızına göre sırasıyla % uzama değerlerine bakıldığında; 525 dev/dak'da en yüksek %5.36 uzama, en düşük %1.89 uzama, 1025 dev/dak'da en yüksek %4.74 uzama, en düşük %2.11 uzama, 1525 dev/dak' da ise en yüksek %5.08 uzama, en düşük %1.54 uzama değerleri elde edilmiştir.

Şekil 4.16'da 0.75 takım konumlandırması yapılarak SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleşimin çekme mukavemet-devir sayısı grafiği verilmiştir. Şekil 4.16 incelendiğinde, en iyi çekme mukavemet değerleri üç farklı devir sayısındaki 100 mm/dak ilerleme hızında elde edildiği görülmüştür. Aynı durumda, yüksek ilerleme hızı ve yüksek devirlerde çekme mukavemet değerlerinde önemli düşüş yaptığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.17'de 1.5 mm takım konumlandırması ile SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştirme sonucu elde edilen verilere göre çekme mukavemet-devir sayısı grafiği elde edilmiştir. Şekil 4.17 incelendiğinde, düşük devir sayısında ve üç farklı ilerleme hızlarında (50, 75, 100 mm/dak) elde edilen çekme mukavemet değerlerinde ciddi bir fark oluşmadığı fakat devir sayısının artmasıyla yüksek ilerleme hızlarının çekme mukavemet değerinde önce hızlı bir düşüş olup, daha sonra artmaktadır.



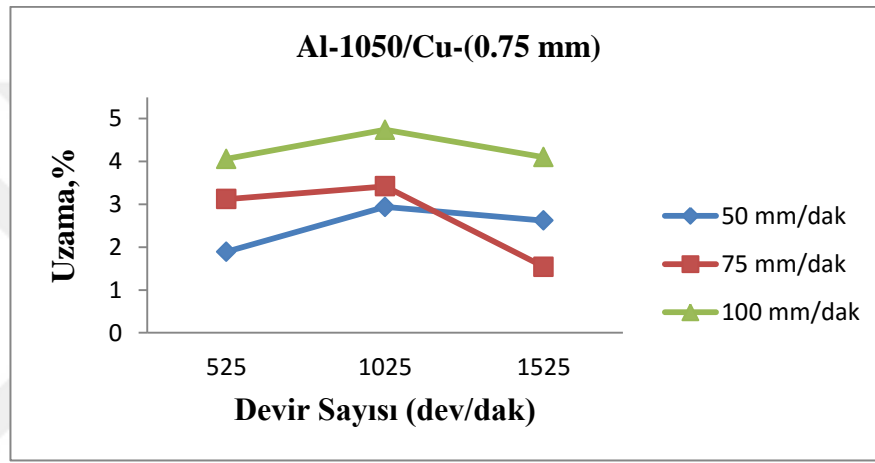
Şekil 4.16. (0.75 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştirmenin çekme mukavemet-devir sayısı grafiği



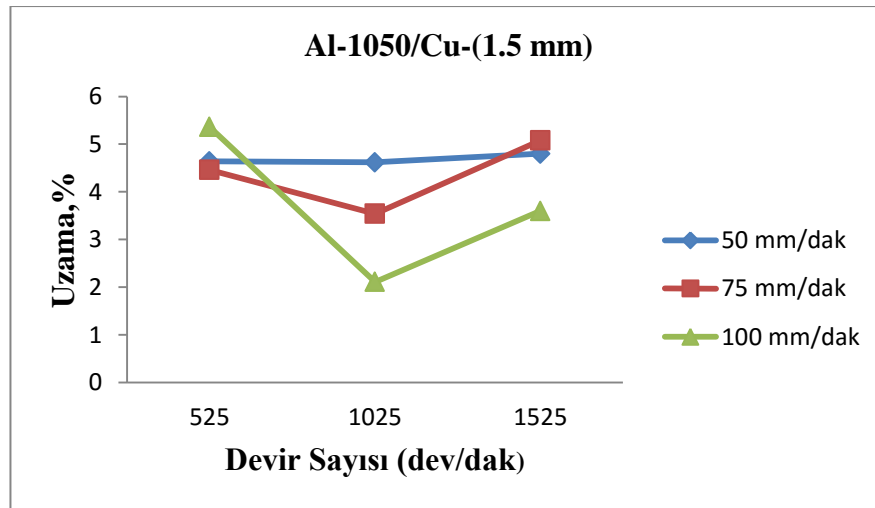
Şekil 4.17. (1.5 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştirmenin çekme mukavemet-devir sayısı grafiği

Şekil 4.18'de 0.75 takım konumlandırması yapılarak SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleşimin % uzama-devir sayısı grafiği verilmiştir. Şekil 4.18 incelendiğinde, en iyi % uzama değerinin 1025 dev/dak devir sayısında yüksek ilerleme hızında (100 mm/dak) elde edildiği görülmüştür. Devir sayısı arttığında ise % uzama değerleri düşerken, en yüksek % uzama değerleri yine yüksek ilerleme hızında (100 mm/dak) olduğu görülmüştür.

Şekil 4.19’da 1.5 takım konumlandırması yapılarak SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleşimin % uzama-devir sayısı grafiği verilmiştir. Şekil 4.19 incelendiğinde, en iyi % uzama değeri düşük devir sayısında (525 dev/dak) ve yüksek ilerleme hızında (100 mm/dak) elde edilmiştir. Devir sayısı artmasıyla, yüksek ilerleme hızının % uzama değeri önce ciddi bir şekilde azalmakta olup daha sonra bir miktar artmaktadır. Düşük devir sayısındaki üç farklı ilerleme hızının % uzama değerleri arasında önemli bir fark olmadığı fakat devir sayısının artmasıyla % uzama değerlerinde arasında belirgin bir fark olduğu görülmüştür.



Şekil 4.18. (0.75 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştiriminin % uzama-devir sayısı grafiği



Şekil 4.19. (1.5 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştiriminin % uzama-devir sayısı grafiği

4.5. Takım İlerleme Hızının Etkisi

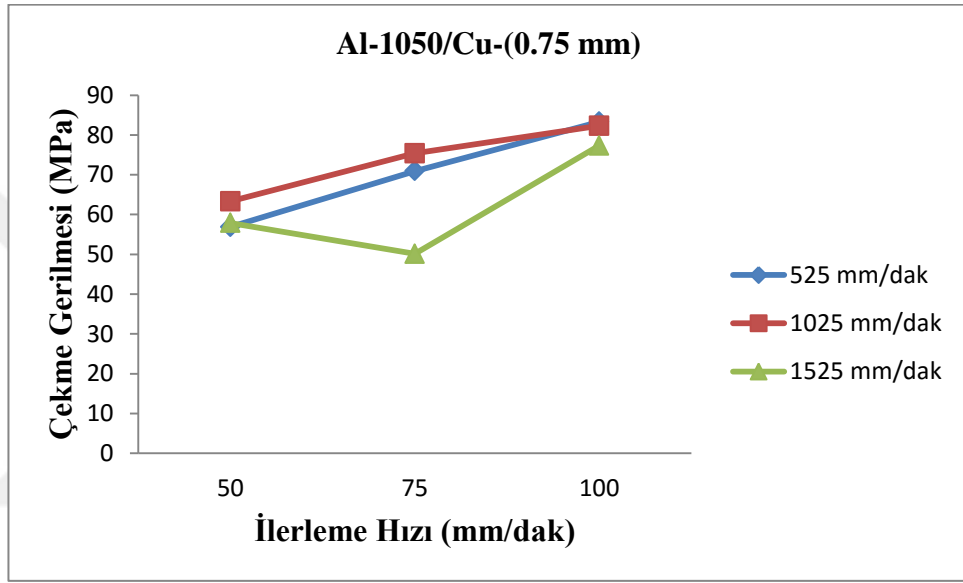
Takım ilerleme hızlarının etkileri incelendiğinde; 525 dev/dak takım dönme hızında ve 50 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemet değeri 73.37 MPa, ortalama %3.26 uzama, ortalama kaynak performansı %59.89 olarak, 75 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemeti 83.18 MPa, ortalama %3.79 uzama, ortalama kaynak performansı %67.90 olarak, 100 mm/dak ilerleme hızında ise ortalama çekme mukavemeti 94.22 MPa, ortalama %4.71 uzama, ortalama kaynak performansı %76.91 olarak elde edilmiştir. 525 dev/dak takım dönme hızında 0.75 ve 1.5 mm takım konumlandırması yapılmış guruplara bakıldığında ilerleme hızının artmasıyla çekme mukavemet değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.

1025 dev/dak takım dönme hızında ve 50 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemet değeri 74.82 MPa, ortalama %3.78 uzama, ortalama kaynak performansı %61.07 olarak, 75 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemeti 71.41 MPa, ortalama %3.48 uzama, ortalama kaynak performansı %58.29 olarak, 100 mm/dak ilerleme hızında ise ortalama çekme mukavemeti 67.57 MPa, ortalama %3.42 uzama, ortalama kaynak performansı %55.15 olarak elde edilmiştir. 1025 dev/dak takım dönme hızında 0.75 mm takım konumlandırması yapılmış guruba bakıldığında ilerleme hızının artmasıyla çekme mukavemet değerlerinde bir artış tespit edilirken, 1.5 mm takım konumlandırması yapılan grupta ise bir azalış tespit edilmiştir.

1525 dev/dak takım dönme hızında 50 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemet değeri 70.46 MPa, ortalama %3.71 uzama, ortalama kaynak performansı %57.51 olarak, 75 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemeti 74.65 MPa, ortalama %3.31 uzama, ortalama kaynak performansı %60.93 olarak, 100 mm/dak ilerleme hızında ise ortalama çekme mukavemeti 74.22 MPa, ortalama %3.85 uzama, ortalama kaynak performansı %60.58 olarak elde edilmiştir. 1525 dev/dak takım dönme hızında 0.75 mm takım konumlandırması yapılan grupta ilerleme hızının artmasıyla önce bir miktar azalma daha sonra artış görülmektedir. Takım konumlandırmasının 1.5 mm olduğu grupta ise ilerleme hızının artmasıyla önce artış daha sonra bir miktar azalma görülmüştür.

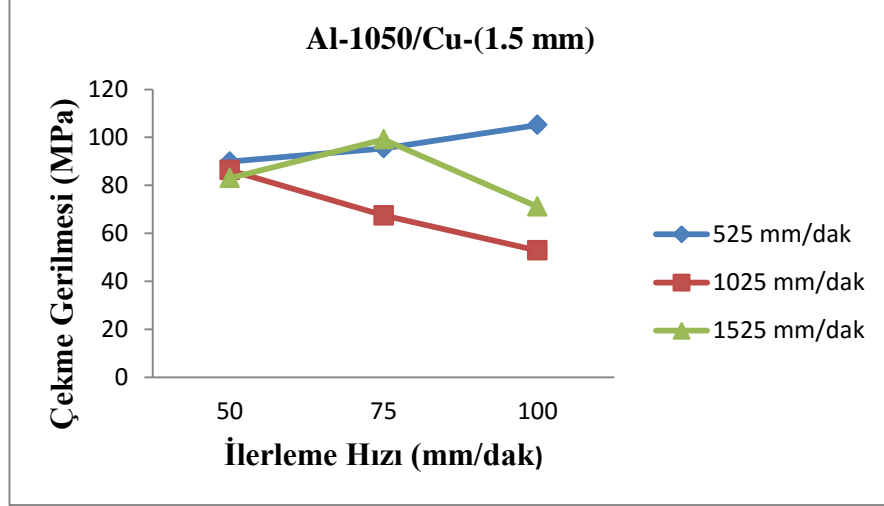
Takım ilerleme hızının etkisine bakıldığında farklı takım dönme hızlarında ve farklı takım konumlandırılmasında farklılıklar göstermiştir. Saf Cu/Al-1050 kaynaklı

birleştirmesinde ısı girdisine bağlı olarak oluşan intermetalik fazların etkili olduğu düşünülmektedir. Literatürde, düşük ve yüksek ısı girdisinin karışımın oluştuğu bölge üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve mekanik değerleri etkilediğini ortaya koymuştur (Xue ve ark., 2010). Cu/Al-1050 malzeme çiftinin 0.75 mm takım konumlandırmasında yapılan kaynaklı numunelerin çekme mukavemet-ilerleme hız grafiği Şekil 4.20’de verilmiştir. Şekil 4.20 incelendiğinde, en iyi çekme mukavemet değerlerinin üç farklı devir sayısında da 100 mm/dak ilerleme hızında elde edildiği görülmüştür.



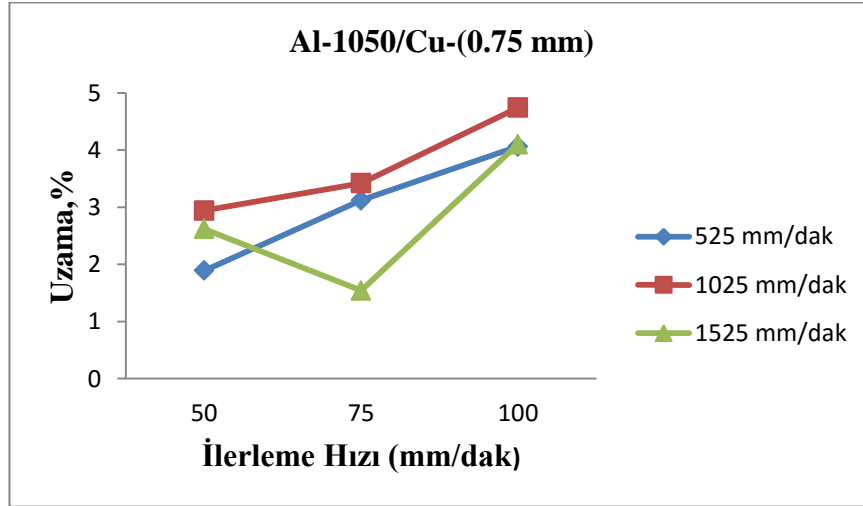
Şekil 4.20. (0.75 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştirmenin % çekme mukavemet-ilerleme hızı grafiği

Cu/Al-1050 malzeme çiftinin 1.5 mm takım konumlandırmasında yapılan kaynaklı numunelerin çekme mukavemet-ilerleme hız grafiği Şekil 4.21’de verilmiştir. Şekil 4.21 incelendiğinde, en iyi % uzama değeri yüksek ilerleme hızında ve düşük devir sayısında iken en düşük % uzama değeri; yüksek ilerleme hızında ve 1025 dev/dak devir sayısında elde edilmiştir. Düşük ilerleme hızlarında elde edilen çekme mukavemet değerleri birbirine çok yakın olup, yüksek ilerleme hızlarında elde edilen çekme mukavemet değerleri arasında belirgin bir farklılık belirlenmiştir. İlerleme hızı arttığında ise yüksek devirlerde çekme mukavemeti önemli düşüş gösterirken aynı ilerleme hızında düşük devirde çekme mukavemetinin arttığı görülmüştür.



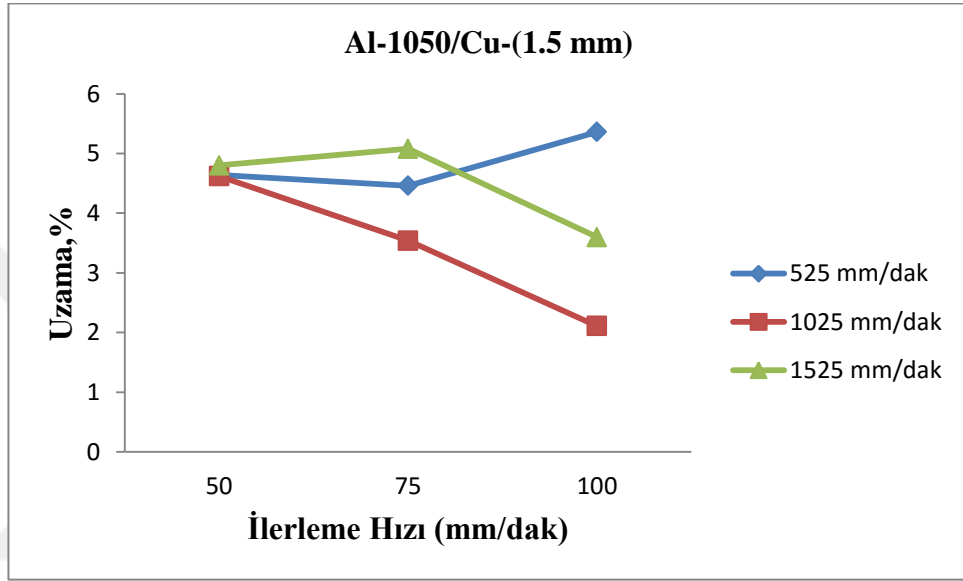
Şekil 4.21. (1.5 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştirmenin % çekme mukavemet-ilerleme hızı grafiği

Şekil 4.22’de 0.75 mm takım konumlandırması yapılarak SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleşiminin % uzama-ilerleme hızı grafiği verilmiştir. Şekil 4.22 incelendiğinde, en iyi % uzama değeri yüksek ilerleme hızında ve 1025 dev/dak devir sayısında iken en düşük % uzama değeri; 75 mm/dak ilerleme hızında ve yüksek devir sayısında elde edilmiştir.



Şekil 4.22. (0.75 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleştirmenin % uzama-ilerleme hızı grafiği

Şekil 4.23’de 1.5 mm takım konumlandırması yapılarak SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleşimin % uzama-ilerleme hızı grafiği verilmiştir. Şekil 4.23 incelendiğinde, en iyi % uzama değeri yüksek ilerleme hızında ve düşük devir sayısında iken en düşük % uzama değeri yüksek ilerleme hızında ve 1025 dev/dak devir sayısında tespit edilmiştir. İlerleme hızı arttığında ise yüksek devirlerde %uzaması önemli düşüş gösterirken aynı ilerleme hızında düşük devirde % uzamasının arttığı görülmüştür.



Şekil 4.23. (1.5 mm) takım konumlandırmasında SKK yapılmış Cu/Al-1050 birleşirmenin % uzama-ilerleme hızı grafiği

4.6. Takım Konumlandırmasının Etkisi

SKK yapılmadan önce karıştırıcı uç, bakıra göre daha yumuşak olan alüminyum tarafına 0-0.75-1.5 mm olarak konumlandırılmıştır. “0” konumlu birleştirmelerin kaynak yüzeylerinde çatlaklar ve kaynak kesitinde ise boşluklar tespit edilmiştir. Bu kaynak hatalarından dolayı çekme mukavemet değerleri takım konumlandırması yapılan kaynaklı birleştirmelere göre daha düşük değerler elde edilmiştir.

Takım konumlandırmasının çekme mukavemet değerleri üzerine etkisi incelendiğinde; 525 dev/dak devir sayısı ve 50, 75, 100 mm/dak ilerleme hızlarının 0.75-1.5 mm takım konumlandırılmasıyla çekme mukavemetlerinde artış gözlenmiştir.

1025 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak ilerleme hızı grubunda takım kaydırmasının artmasıyla çekme mukavemet değerinde artış olurken, 1025 dev/dak devir sayısı ve 75, 100 mm/dak ilerleme hızlarının takım kaydırmasının artmasıyla çekme mukavemet değerlerinde azalma gerçekleşmiştir.

1525 dev/dak devir sayısı ve 50-75 mm/dak ilerleme hızlarının takım kaydırmasının artmasıyla çekme mukavemet değerlerinde artış olup, 1525 dev/dak-100 mm/dak grubunda ise takım kaydırmanın artmasıyla çekme mukavemet değerlerinde azalma gerçekleşmiştir.

Saf Cu ve Al-1050 alüminyum alaşımının SKK ile birleştirme işleminde sıfır takım konumlandırmasında mekanik değerlerin düşük çıkmasının nedenleri sırasıyla; karışımın tam oluşmaması, kaynak yüzeylerinde çatlakların oluşması, kaynak kesitlerinde boşluklar olarak değerlendirilmiştir. Takım konumlandırması (0.75-1.5 mm) uygulanarak yapılan birleştirmelerde mekanik değerlerin daha yüksek olmasının nedeni ise kaynakta meydana gelen intermetalik fazların yoğunluğunun azalması ve daha ince, üniform bir intermetalik ara fazın oluşması olarak düşünülmüştür. “0” takım konumunda gerçekleşen birleştirmelerde kaynak yüzeylerinde çatlak ve kaynak kesitlerinde boşluklar görülürken, 0.75 ve 1.5 takım konumlandırmasında hatasız birleştirmeler elde edilmiştir. “0” konumda gerçekleşen birleştirmelerde birkaç geniş Cu parçacık Al matrisi ile kaynak bölgesinde karışmakta ve birçok çatlak gözlenmekte olup bu da mekanik değerleri düşürmüştür. Literatürde yapılan çalışmalara paralellik göstermektedir (Xue ve ark., 2010; Çakır ve Çelik, 2015).

4.7. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

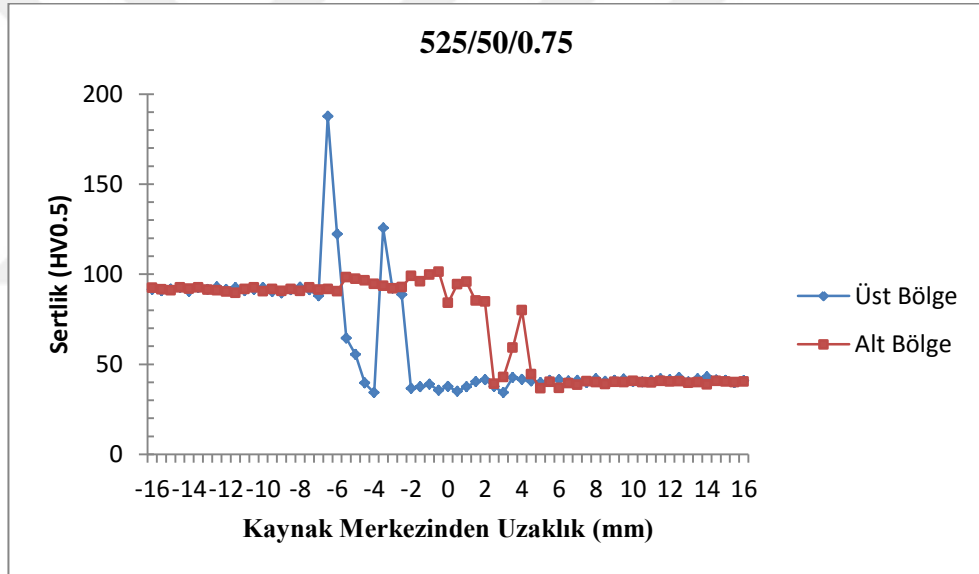
Saf Cu ve Al-1050 alaşımının SKK ile farklı devir sayıları, ilerleme hızları ve takım konumlandırmalarında birleştirilen numunelerin kesit alt ve üst bölgeleri boyunca gerçekleştirilen mikrosertlik ölçüm sonuçları grafikler hazırlanarak incelenmiştir.

Ana metallerin mikrosertlikleri de karşılaştırma yapmak amacıyla ölçümler alınmış ve saf Cu metalinin sertliği 89 HV_{0.5}, Al ana metalinin ise 40 HV_{0.5} olarak tespit edilmiştir.

4.7.1. 525 dev/dak ile Birleştirilen Numunelerin Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

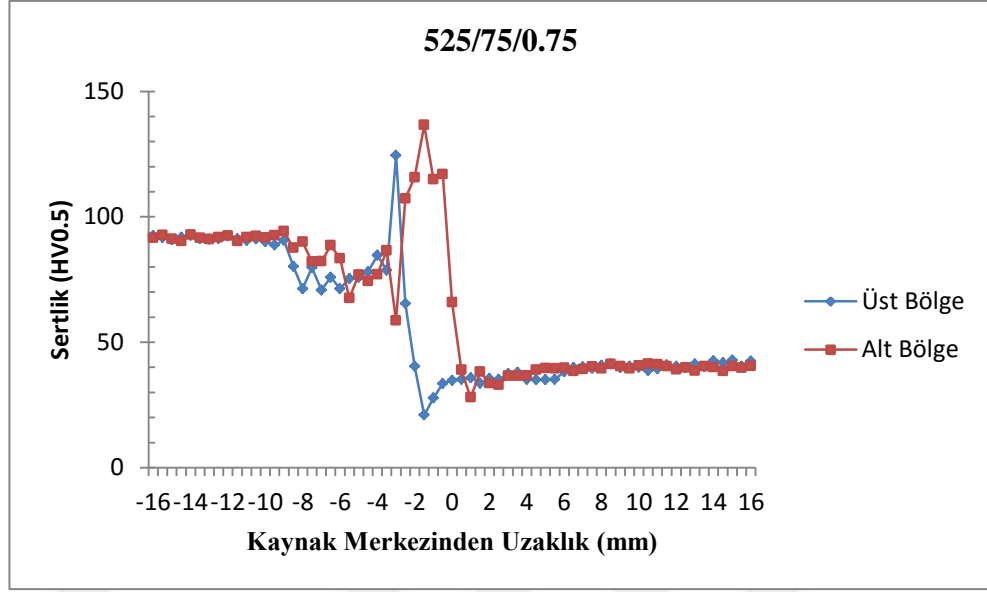
525 dev/dak dönme hızında, 3 farklı ilerleme hızı (50, 75, 100 mm/dak) ve 2 farklı takım konumlandırmasında (0.75-1.5 mm) birleştirilen Cu-Al levhalara ait mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.24-4.29'da verilmiştir.

Şekil 4.24'de 525/50/0.75 numunesi incelendiğinde kaynak bölgesi içinde kaynak üst bölgesi sertliğinin bakır tarafında 187 HV, alüminyum tarafında 40 HV olarak değiştiği, bakır tarafın ortalama sertliği 91 HV, alüminyum tarafın 40 HV olduğu belirlenmiştir. 525/50/0.75 numunesindeki kaynak bölgesindeki sertlik artışları kaynak bölgesinin üst kısmındaki iri bakır parçacıkların varlığına ve intermetalik bileşiklerin varlığına bağlanmaktadır.



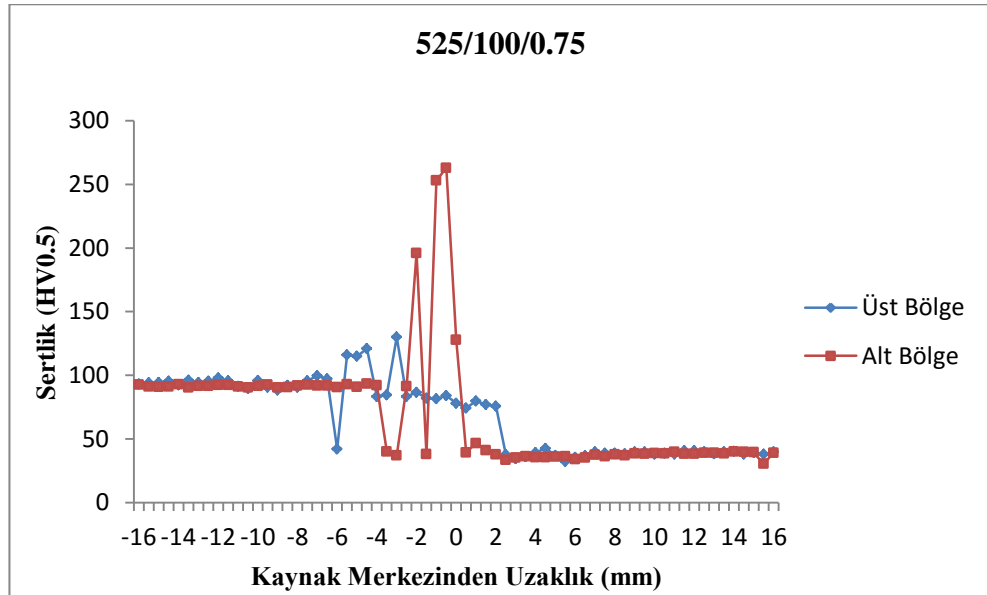
Şekil 4.24. 525/50/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 4.25 incelendiğinde, 525/75/0.75 numunesinin sertliğinin 37-136 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 65 HV olduğu tespit edilmiştir. Al tarafında kaynak alt kısmında sertlik artışının nedeni, karıştırma işlemi sonucunda kaynak bölgesinin kaynak alt kısmında Al tarafında bulunan bakır parçacıklarına bağlanmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda da bakır parçacıkların, Al matrisi içinde sertliği arttırdığı ifade edilmiştir.



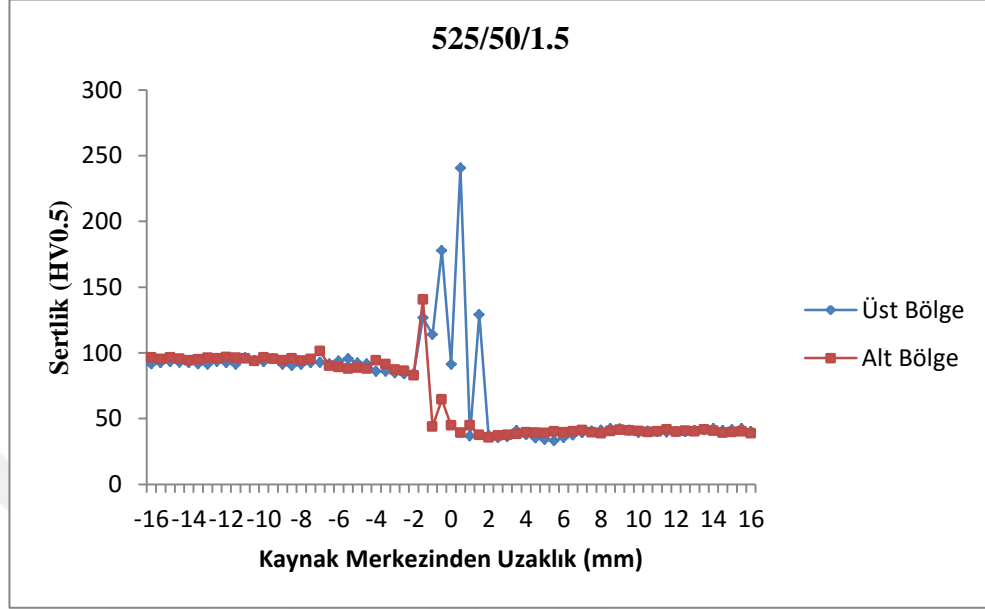
Şekil 4.25. 525/75/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 4.26 incelendiğinde, 525/100/0.75 numunesinin sertliğinin 35-263 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 73 HV olduğu tespit edilmiştir. Kaynak bölgesi daha geniş olup mekanik değerler 525/50/0.75 ve 525/75/0.75 numunelerine göre daha yüksektir.



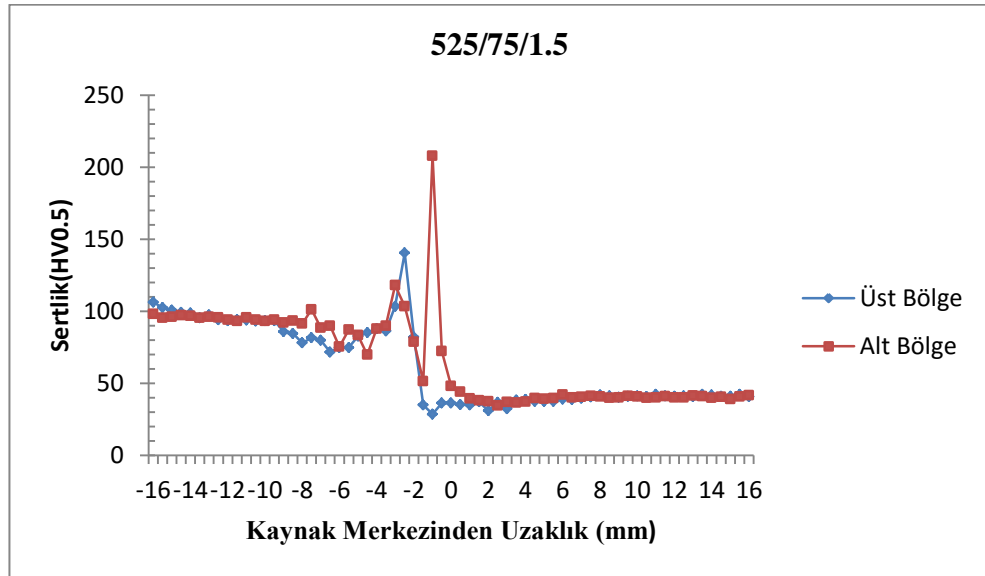
Şekil 4.26. 525/100/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 4.27 incelendiğinde, 525/50/1.5 numunesinin sertliğinin 35-240 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 75 HV olduğu tespit edilmiştir.



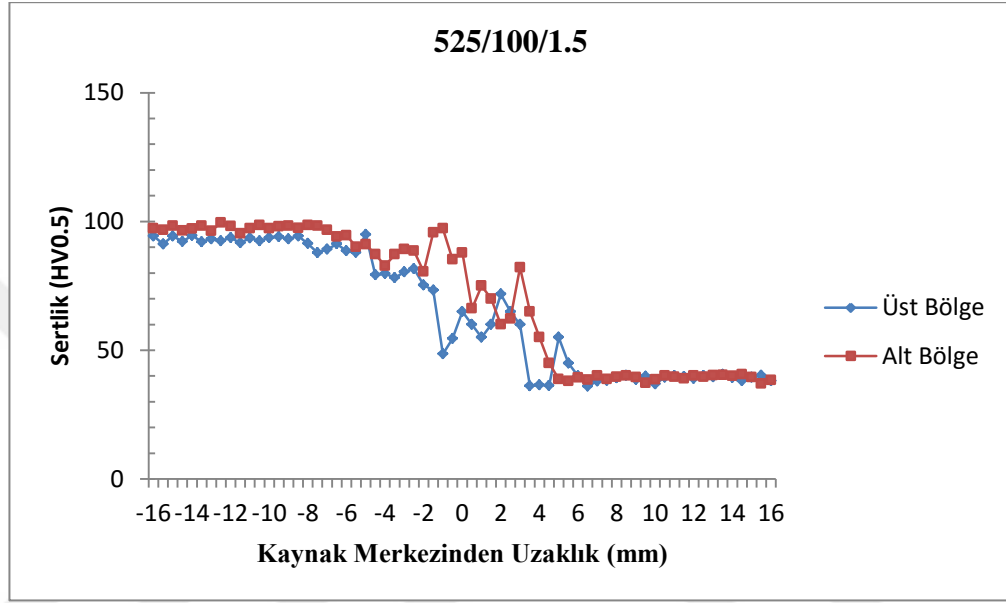
Şekil 4.27. 525/50/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 4.28 incelendiğinde, 525/75/1.5 numunesinin sertliğinin 32-207 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 78 HV olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.28. 525/75/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 4.29 incelendiğinde, 525/100/1.5 numunesinin sertliğinin 39-97 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 81 HV olduğu tespit edilmiştir. Sertlik değerlerindeki dalgalanmaların azalması mikroyapı içindeki bakır partiküllerin daha homojen dağılım göstermesine bağlanmıştır. Kaynak bölgesinin geniş olması kaynak bölgesinin tam olarak karışmasına bağlanmıştır.



Şekil 4.29. 525/100/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

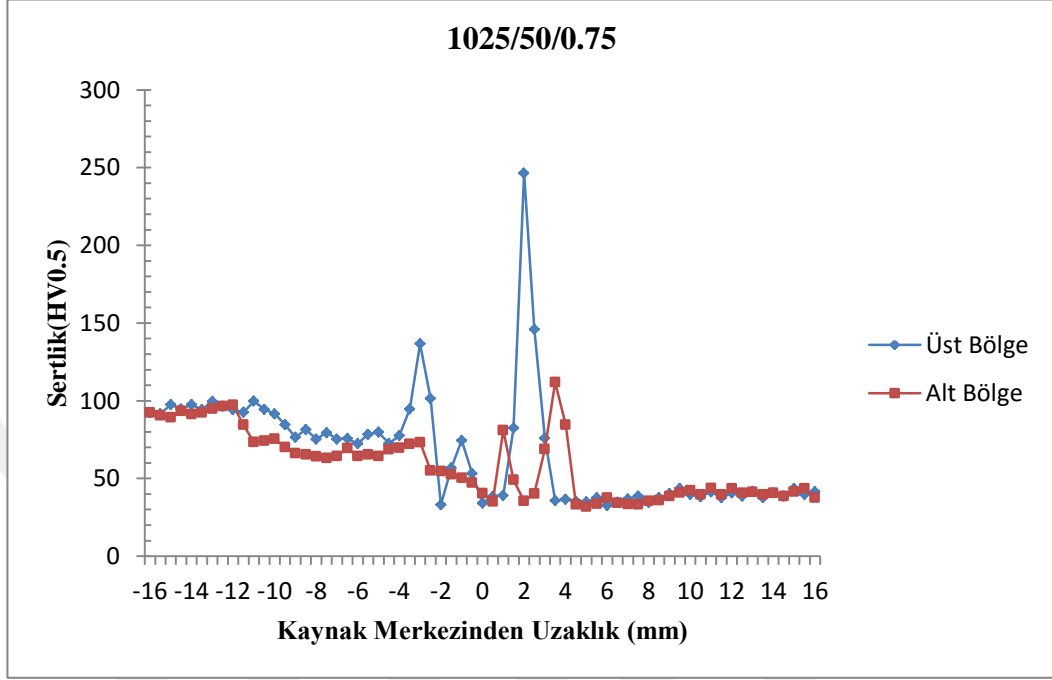
525 dev/dak dönme hızında birleştirilen numunelerin sertlik grafikleri incelendiğinde, ilerleme hızının ve takım konumlandırmasının artmasıyla sertlik değerlerinde artış görülmüştür. Sertlik değerlerindeki artışlar mekanik özelliklerin yükselmesine neden olduğu tespit edilmiştir.

4.7.2. 1025 dev/dak ile Birleştirilen Numunelerin Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

1025 dev/dak dönme hızında, 3 farklı ilerleme hızı (50, 75, 100 mm/dak) ve 2 farklı takım konumlandırmasında (0.75-1.5 mm) birleştirilen Cu-Al levhalara ait mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.30-4.35'da verilmiştir.

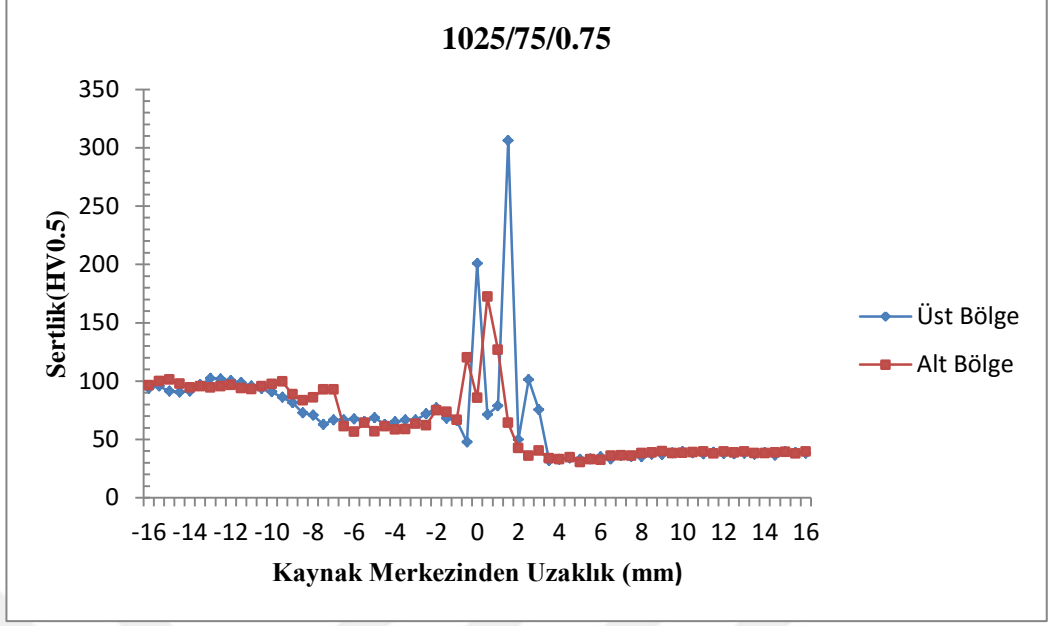
Şekil 4.30'da 1025/50/0.75 numunesinin sertlik grafiği incelendiğinde bakır tarafındaki ortalama sertlik değeri 86 HV, alüminyum tarafında ise ortalama sertlik

değeri 38 HV tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinin sertliğinin 33-246 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğinin 67 HV olduğu belirlenmiştir.



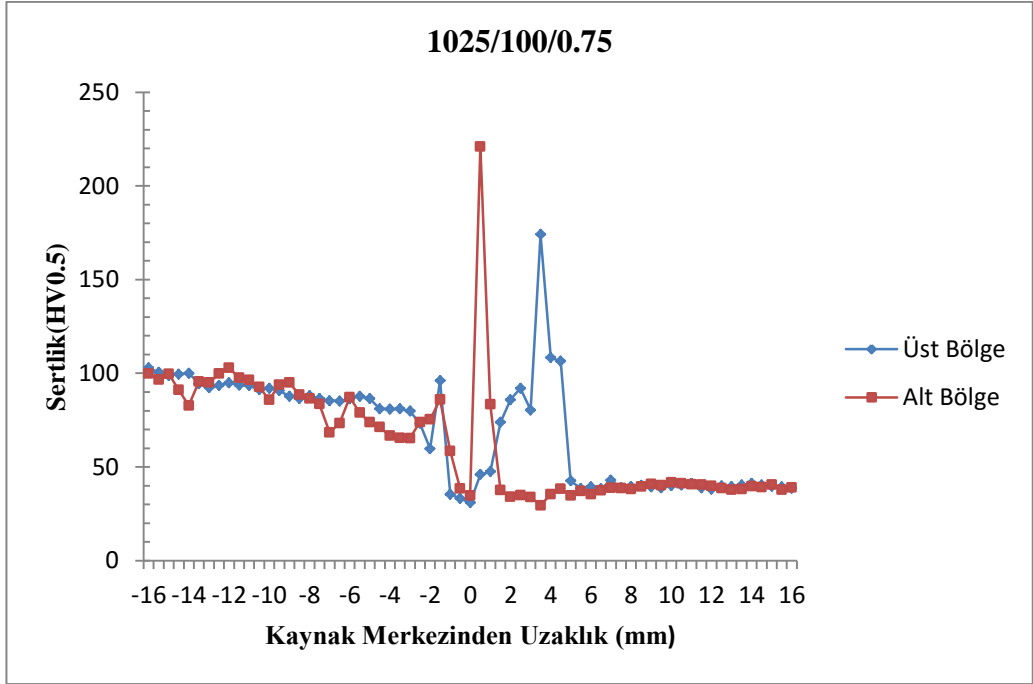
Şekil 4.30. 1025/50/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 4.31 incelendiğinde, 1025/75/0.75 numunesinin sertliğinin 32-306 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 69 HV olduğu tespit edilmiştir. 1025/75/0.75 numunesindeki kaynak bölgesindeki sertlik artışları kaynak bölgesinin üst kısmındaki iri bakır parçacıkların varlığına ve intermetalik bileşiklerin varlığına bağlanmaktadır. Sertlik değerlerindeki dalgalanmalar mikroyapı içindeki bakır partiküllerin heterojen dağılım göstermesine bağlanmıştır.



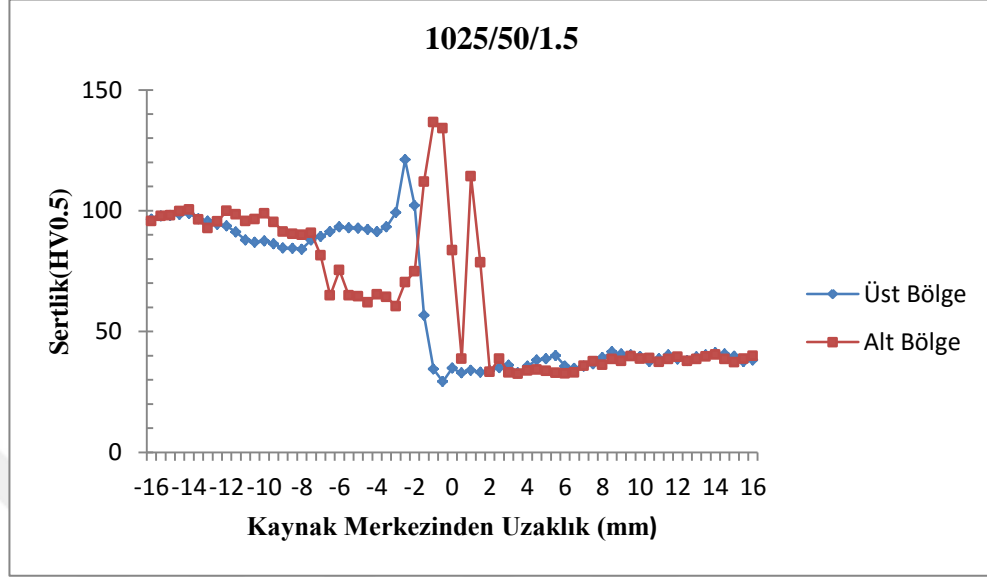
Şekil 4.31. 1025/75/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 4.32 incelendiğinde, 1025/100/0.75 numunesinin sertliğinin 29-221 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 72 HV olduğu tespit edilmiştir.



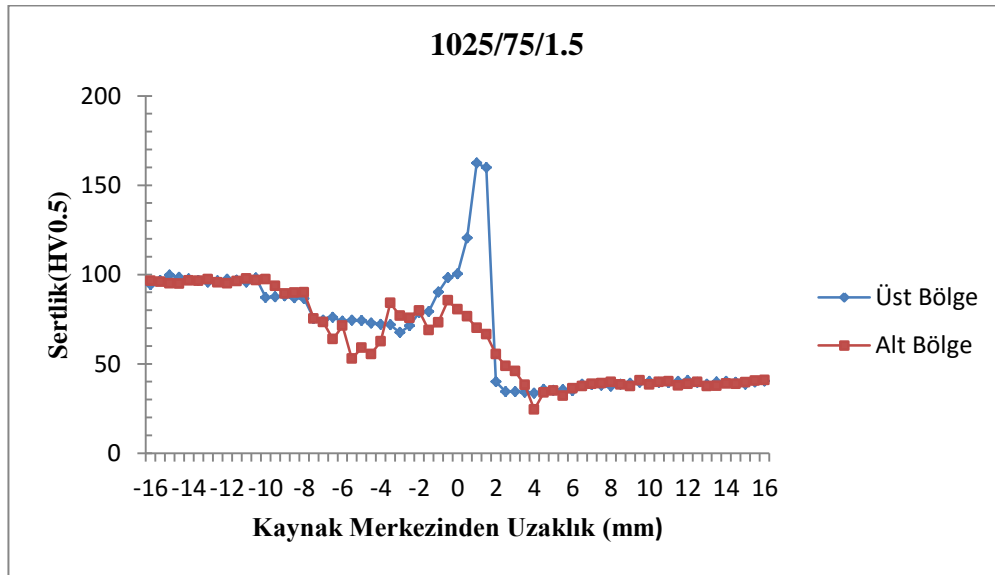
Şekil 4.32. 1025/100/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 4.33 incelendiğinde, 1025/50/1.5 numunesinin sertliğinin 32-136 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 73 HV olduğu tespit edilmiştir.



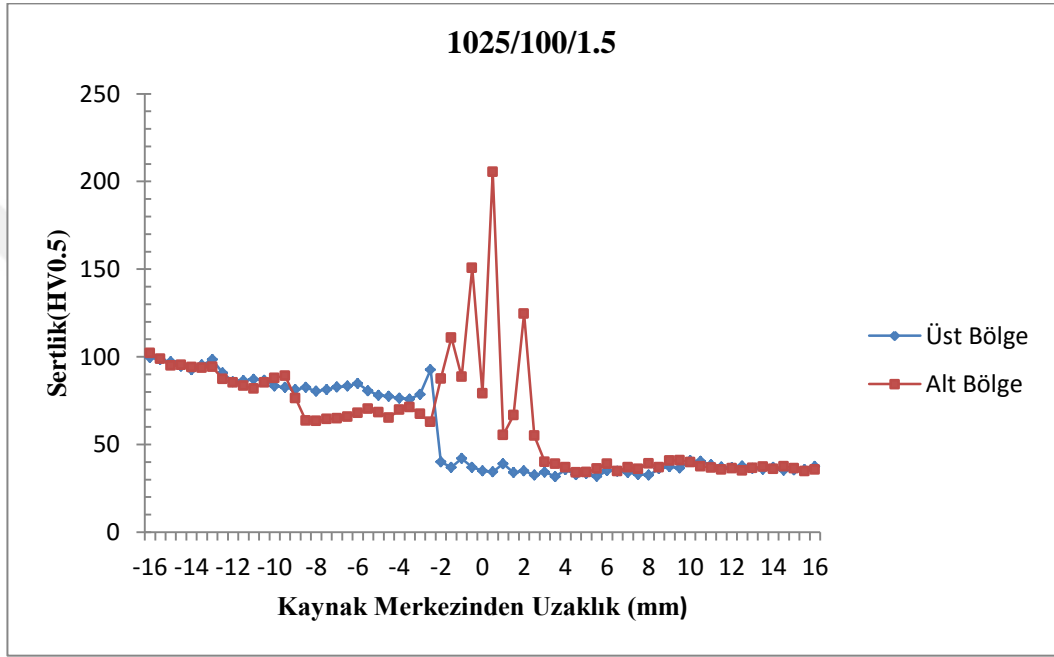
Şekil 4.33. 1025/50/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 4.34 incelendiğinde, 1025/75/1.5 numunesinin sertliğinin 34-159 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 70 HV olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.34. 1025/75/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 4.35 incelendiğinde, 1025/100/1.5 numunesinin sertliğinin 31-205 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 59 HV olduğu tespit edilmiştir. Kaynak üst bölgesinde karışımın yeterince gerçekleşmemesinden dolayı sertlik değerlerinde dalgalanmaların oluşmadığı ve bakır tarafından alüminyum tarafına keskin bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Kaynak alt bölgesinde ise kısmen karışımın gerçekleştiği ve iri bakır parçacıkların varlığına bağlanmıştır.



Şekil 4.35. 1025/100/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

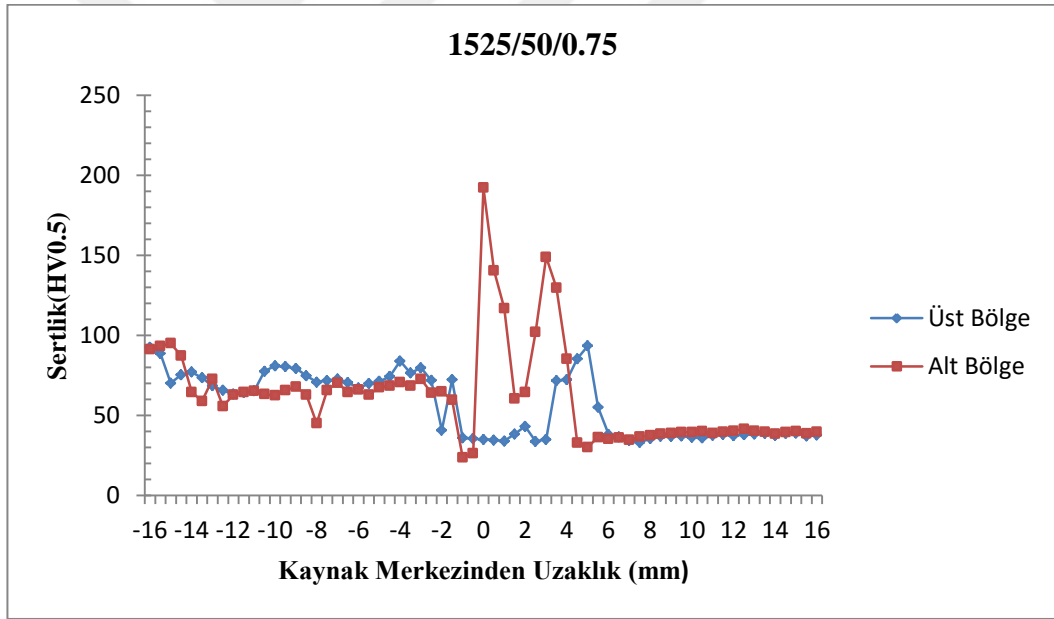
1025 dev/dak dönme hızında birleştirilen numunelerin sertlik grafikleri incelendiğinde, 0.75 mm takım konumlandırmasında ilerleme hızı arttıkça kaynak bölgesinin ortalama mikrosertlik değerlerinde bir artış olup, 1.5 mm takım konumlandırmasında ise ilerleme hızı arttıkça kaynak bölgesinin ortalama mikrosertlik değerlerinde bir azalma tespit edilmiştir. Takım konumunun 0.75 mm'den 1.5 mm'ye kaydırılması sonucu 50, 75 mm/dak ilerleme hızlarında kaynak bölgesinin ortalama mikrosertlik değerleri artmakta olup yüksek ilerleme hızının (100 mm/dak) mikrosertlik değerlerinde bir azalma tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinde ölçülen mikrosertlik ölçüm sonuçları ile çekme test sonuçlarında elde edilen çekme mukavemet değerleri arasında benzer bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. En yüksek mikrosertlik değerine (73 HV) sahip

olan 1025/50/1.5 numunesi aynı zamanda en yüksek çekme mukavemet değerine (86.34 MPa) sahip olduğu tespit edilmiştir.

4.7.3. 1525 dev/dak ile Birleştirilen Numunelerin Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

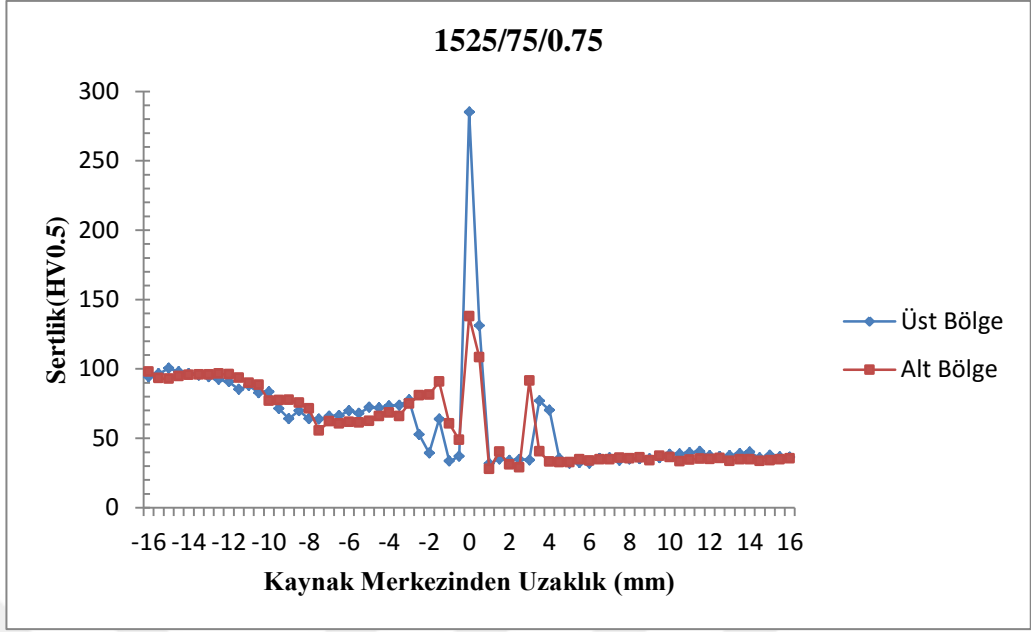
1525 dev/dak dönme hızında, 3 farklı ilerleme hızı (50, 75, 100 mm/dak) ve 2 farklı takım konumlandırmasında (0.75-1.5 mm) birleştirilen Cu-Al levhalara ait mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.36-4.42’da verilmiştir.

Şekil 4.36’da 1525/50/0.75 numunesinin sertlik grafiği incelendiğinde bakır tarafındaki ortalama sertlik değeri 71 HV, alüminyum tarafında ise ortalama sertlik değeri 37 HV tespit edilmiştir. Kaynak bölgesinin sertliğinin 30-148 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğinin 61 HV olduğu belirlenmiştir.

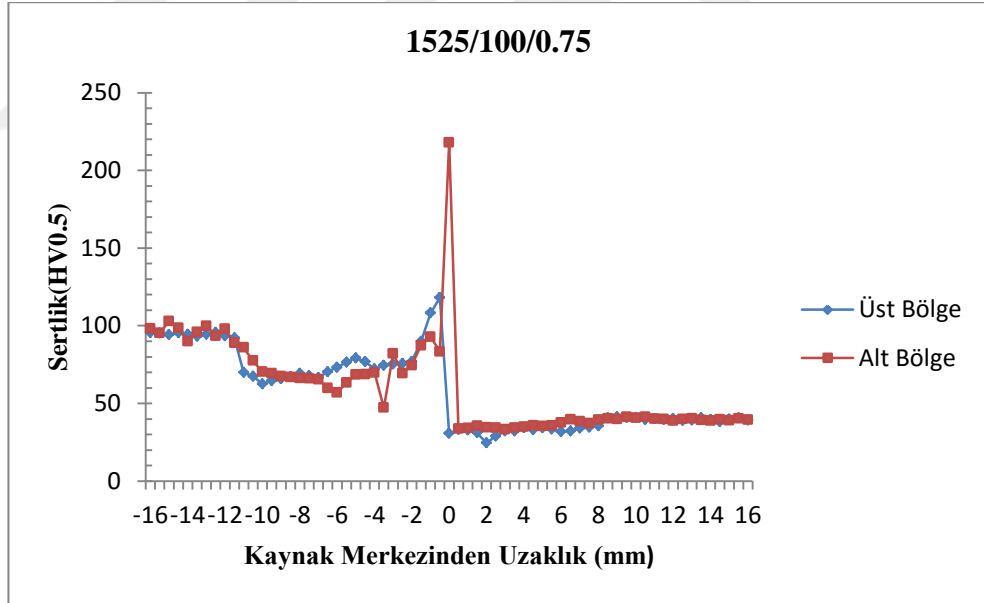


Şekil 4.36. 1525/50/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 4.37 incelendiğinde, 1525/75/0.75 numunesinin sertliğinin 32-285 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 59 HV olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.38 incelendiğinde, 1525/100/0.75 numunesinin sertliğinin 30-217 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 69 HV olduğu tespit edilmiştir.

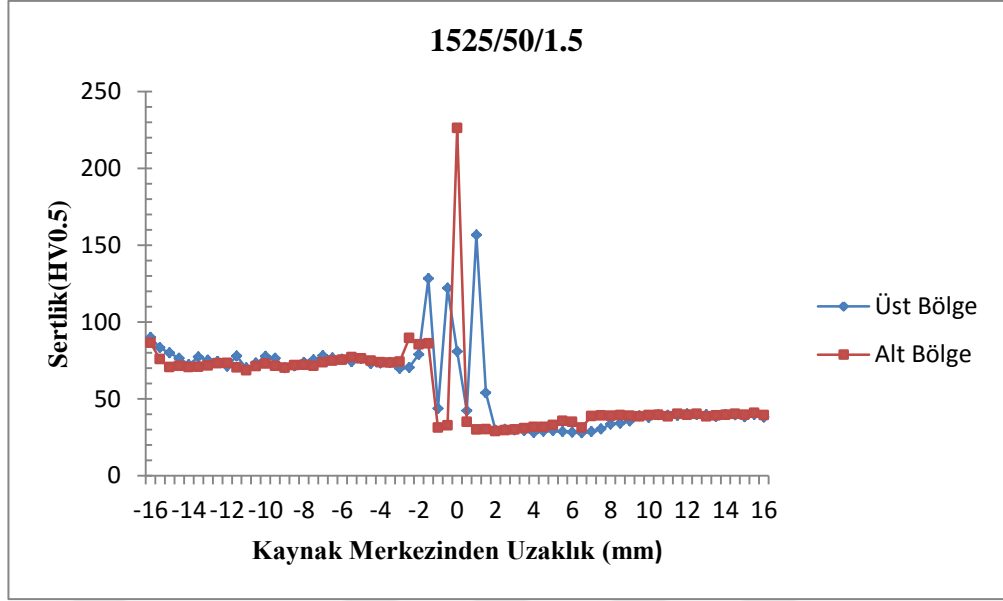


Şekil 4.37. 1525/75/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği



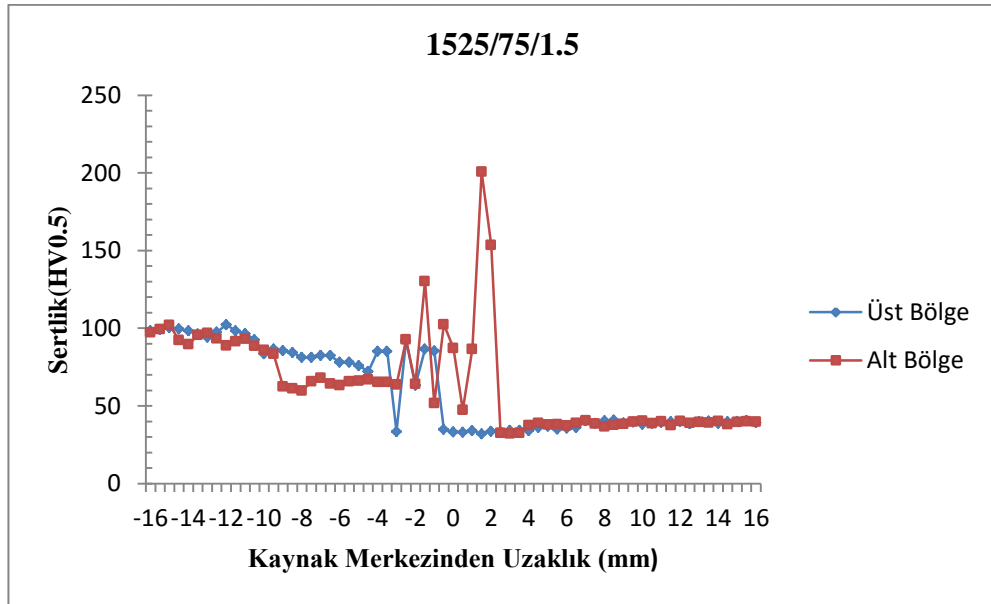
Şekil 4.38. 1525/100/0.75 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 4.39 incelendiğinde, 1525/50/1.5 numunesinin sertliğinin 27-225 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 71 HV olduğu tespit edilmiştir.



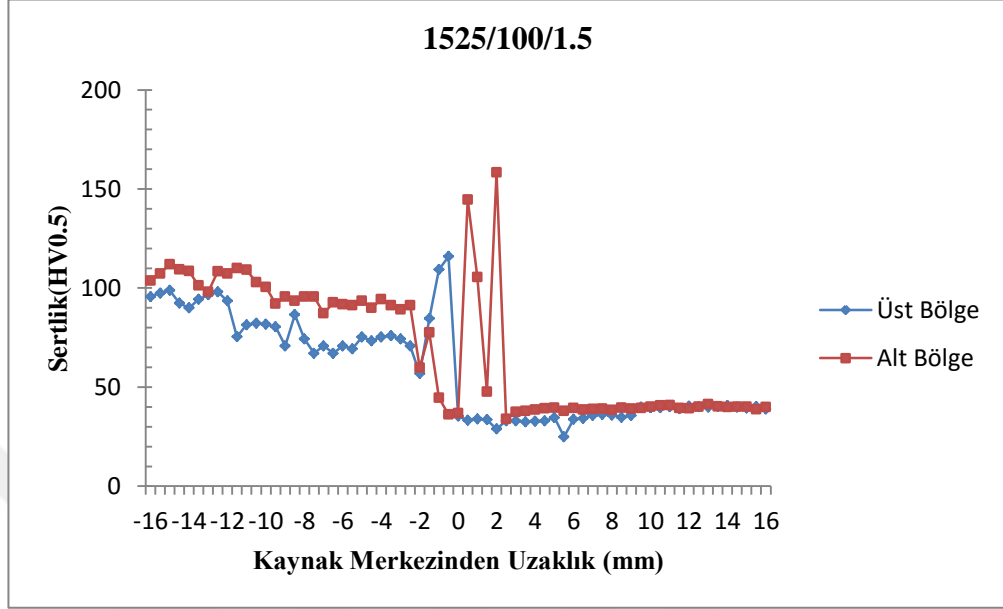
Şekil 4.39. 1525/50/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 4.40 incelendiğinde, 1525/75/1.5 numunesinin sertliğinin 32-200 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 65 HV olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.40. 1525/75/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 4.41 incelendiğinde, 1525/100/1.5 numunesinin sertliğinin 34-158 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 68 HV olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.41. 1525/100/1.5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Mikrosertlik ölçüm sonuçlarına göre en yüksek ortalama sertlik değeri 1525/100/1.5 numunesinde 81 HV değeri elde edilirken, en düşük mikrosertlik değeri ise 1025/100/1.5 ve 1525/75/0.75 numunelerinde 59 HV değeri tespit edilmiştir.

Mikrosertlik ölçümleri sonucu elde edilen sertlik değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

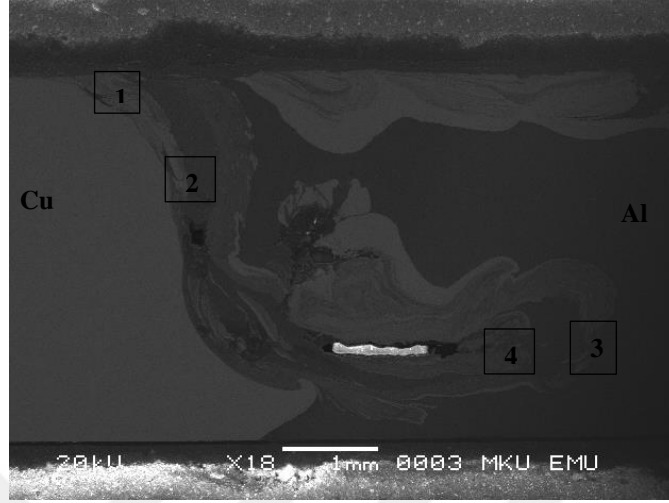
Çizelge 4.2. Mikrosertlik ölçümleri sonucu elde edilen sertlik değerleri

Numune Kodu	Devir Sayısı (dev/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)	Kaynak Bölgesinin Ortalama Sertlik Değeri (HV)
525/50/0.75	525	50	60
525/50/1.5			75
525/75/0.75		75	65
525/75/1.5			78
525/100/0.75		100	73
525/100/1.5			81
1025/50/0.75	1025	50	67
1025/50/1.5			73
1025/75/0.75		75	69
1025/75/1.5			70
1025/100/0.75		100	72
1025/100/1.5			59
1525/50/0.75	1525	50	61
1525/50/1.5			71
1525/75/0.75		75	59
1525/75/1.5			65
1525/100/0.75		100	69
1525/100/1.5			68

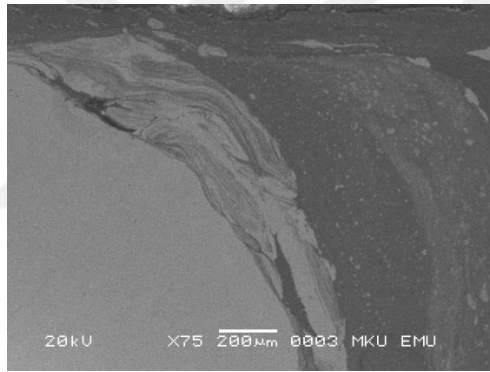
4.8. Kaynak Bölgesinin SEM İncelemeleri

SKK yöntemiyle birleştirilen saf Cu ile Al-1050 alaşımının kaynak işlemi sonucunda oluşan kaynak bölgelerinin SEM görüntüleri alınmıştır. Kaynak bölgesi alüminyum tarafında oluşmuştur. Şekil 4.42 incelendiğinde, 525/50/1.5 numunesi kaynak kesitinin SEM görüntüsünde karışımın gerçekleştiği ve karışımın bakır

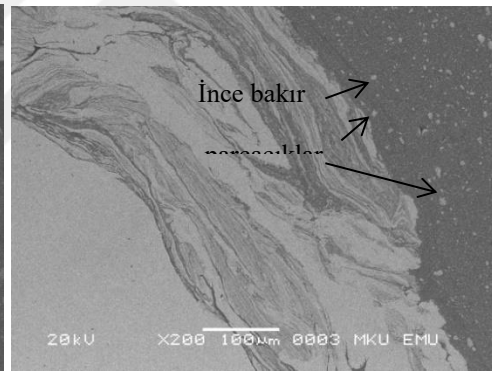
tarafından alüminyum tarafına doğru uzandığı görülmektedir. Yüksek çekme mukavemet değeri 89.86 MPa tespit edilmiştir.



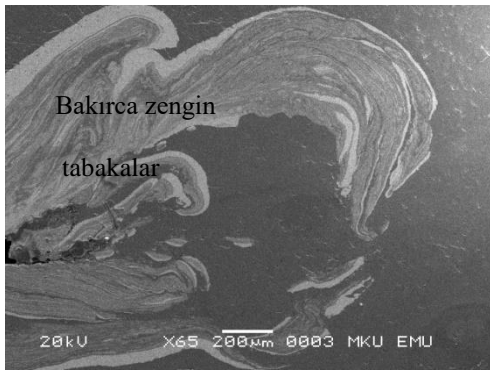
(a)



(b)



(c)



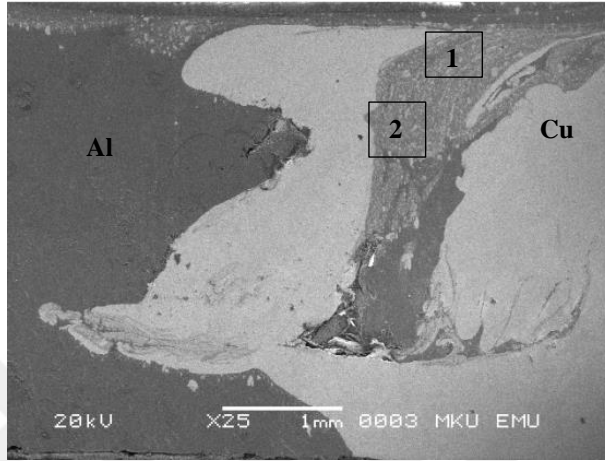
(d)



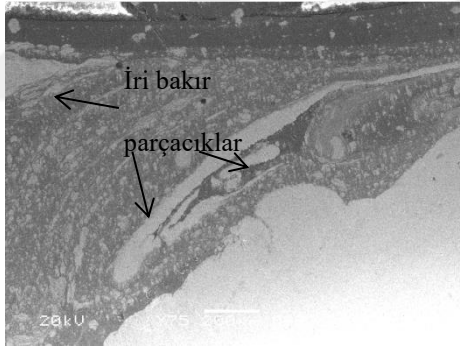
(e)

Şekil 4.42. 525/50/1.5 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X18), b) 1 nolu bölgenin 75 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 200 büyütme hali, d) 3 nolu bölgenin 200 büyütme hali, e) 4 nolu bölgenin 200 büyütme hali

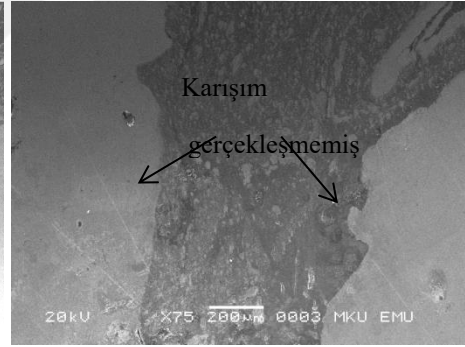
Şekil 4.43 incelendiğinde, 525/50/0.75 numunesi kaynak kesitinin SEM görüntüsünde boşluklu yapının oluşmadığı fakat karışım bölgesinin tam olarak oluşmaması, bakırca zengin parçacıkların olmaması ve bakır parçacıklarının alüminyum matriste bulunmamasından dolayı düşük çekme mukavemet (56.88 MPa) değeri elde edilmiştir.



(a)



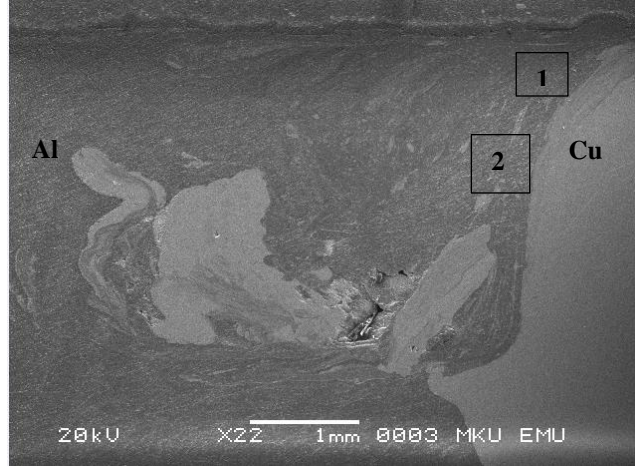
(b)



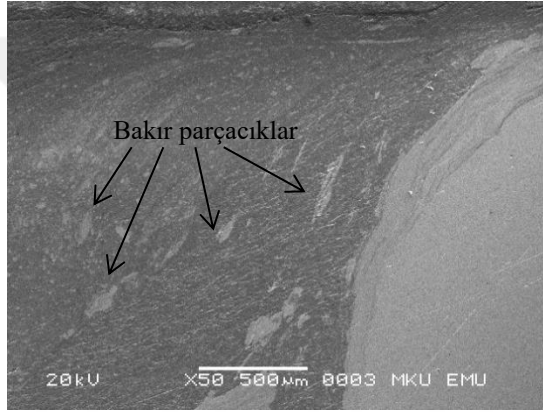
(c)

Şekil 4.43. 525/50/0.75 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X25), b) 1 nolu bölgenin 75 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 75 büyütme hali

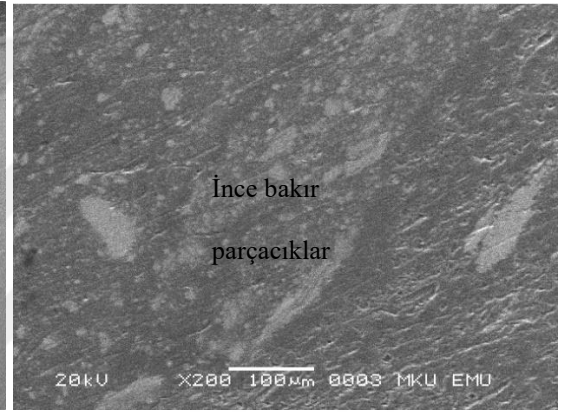
Şekil 4.44 incelendiğinde, 525/100/1.5 numunesinde karışımın gerçekleştiği ve karışımın bakır tarafından alüminyum tarafına doğru uzandığı görülmektedir. Bakır parçacıklarının alüminyum tarafında homojen bir dağılım oluşturduğu açıkça görülmektedir. Alüminyum matrisi içerisinde bulunan ince bakır parçacıkları kaynaklı numunenin çekme mukavemet değerini (105.16 MPa) yükseltmiştir.



(a)



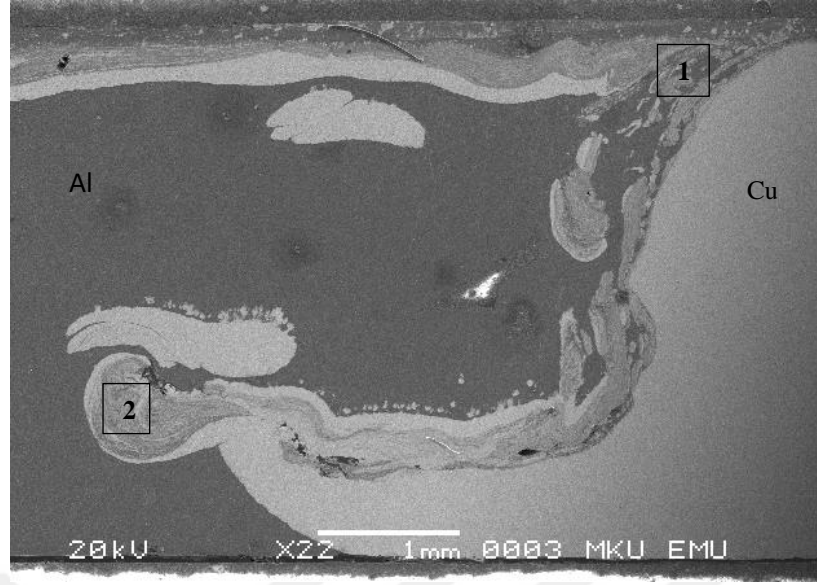
(b)



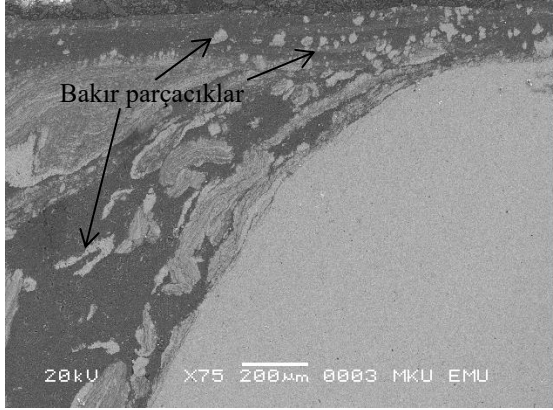
(c)

Şekil 4.44. 525/100/1.5 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X22), b) 1 nolu bölgenin 50 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 200 büyütme hali

Şekil 4.45 incelendiğinde, 1025/100/1.5 numunesinde karıştırıcı ucun dönme hareketi neticesiyle bakır levhadan koparılıp ince taneli alüminyum matris içerisine sürüklenmiş bakırca zengin parçacık ve tabakaların oluşturduğu yapılar mevcuttur. Kaynak bölgesi içerisindeki bakırca zengin parçacık ve tabakalar, farklı boyutlara sahip olmakla birlikte, alüminyum matris içerisinde heterojen bir şekilde dağılmıştır. Kaynak bölgesinde boşluklu yapıların olmasına rağmen yüksek çekme mukavemet değeri (86.34 MPa) elde edilmiştir. Şekil 4.45 (c)'de tabakalı bakırca zengin yapılar ise genellikle birbirini ardınca dizilmiş ve belirgin bir şekilde malzeme akış doğrultusunda yönlendirilmiş yapılar olarak tanımlanmıştır.



(a)



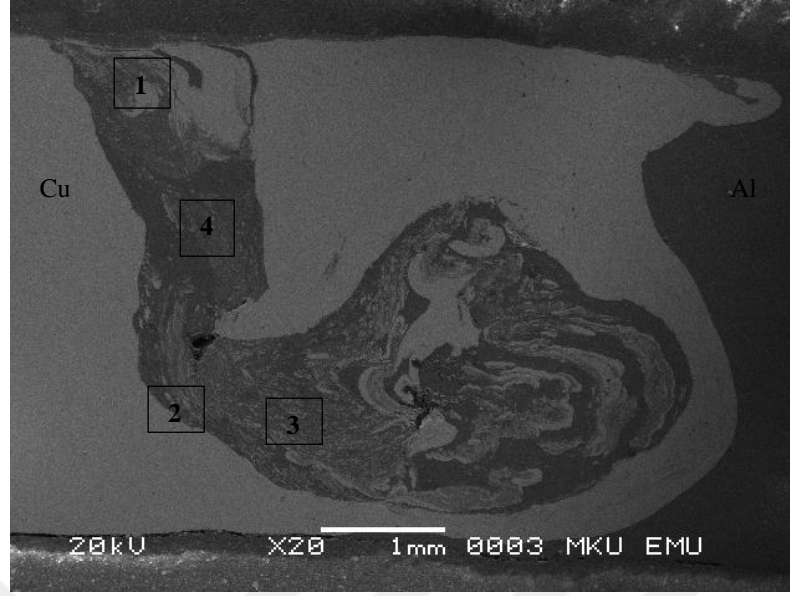
(b)



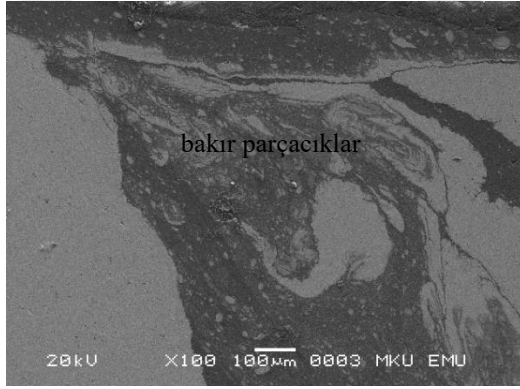
(c)

Şekil 4.45. 1025/100/1.5 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X22), b) 1 nolu bölgenin 75 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 200 büyütme hali

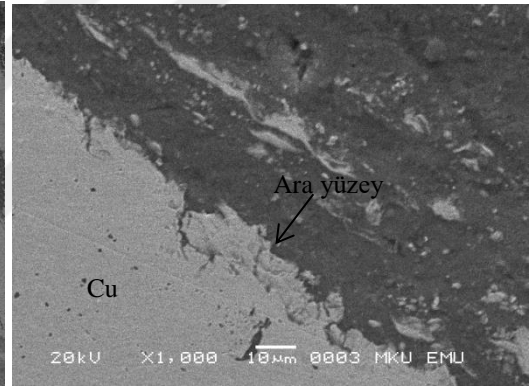
Şekil 4.46 incelendiğinde, 1525/75/1.5 numunesinin kaynak bölgesinde alüminyum ve bakırın birbiri içerisine girmesi sonucu karışımın gerçekleştiği, bakırca zengin tabakaların oluşması ve ince bakır parçacıkların olması çekme mukavemet değerinin yüksek (99.18 MPa) olmasına neden olmuştur.



(a)



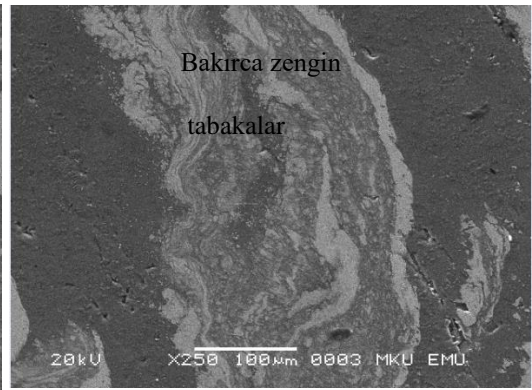
(b)



(c)



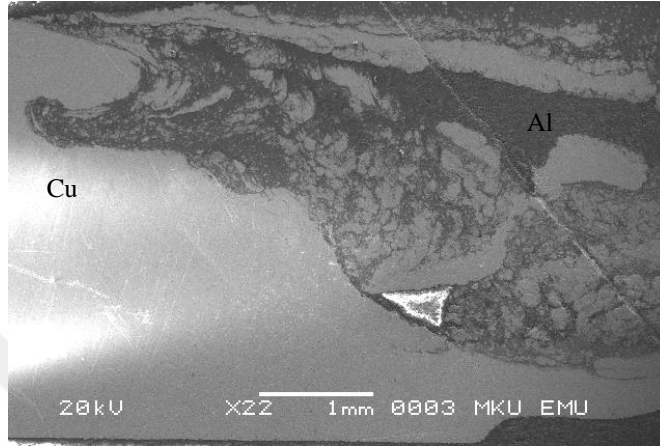
(d)



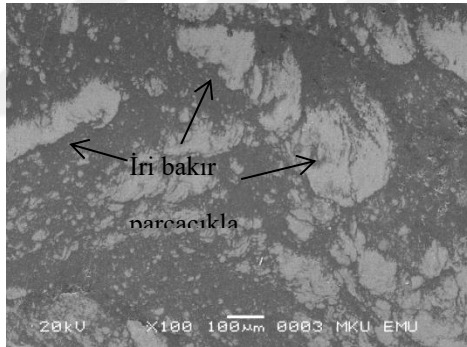
(e)

Şekil 4.46. 1525/75/1.5 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 nolu bölgenin 100 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 1000 büyütme hali, d) 3 nolu bölgenin 100 büyütme hali, e) 4 nolu bölgenin 250 büyütme hali

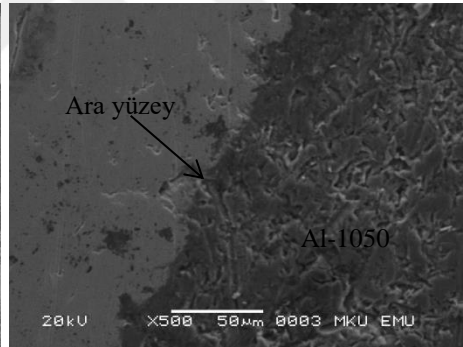
Şekil 4.47 incelendiğinde, 1525/75/0.75 numunesinde dış açılmış karıştırıcı ucun dönme hareketi sonucunda bakır levhadan koparılıp alüminyum matris içerisine sürüklenmiş bakır parçacıkların olmayışı nedeni ile çekme mukavemet değeri (50.12 MPa) düşük çıkmıştır. Ayrıca, kaynak bölgesinde iri bakır parçacıklar heterojen bir şekilde dağılmış ve karışım tam anlamıyla gerçekleşmemiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.47. 1525/75/0.75 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X22), b) 1 nolu bölgenin 100 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 500 büyütme hali

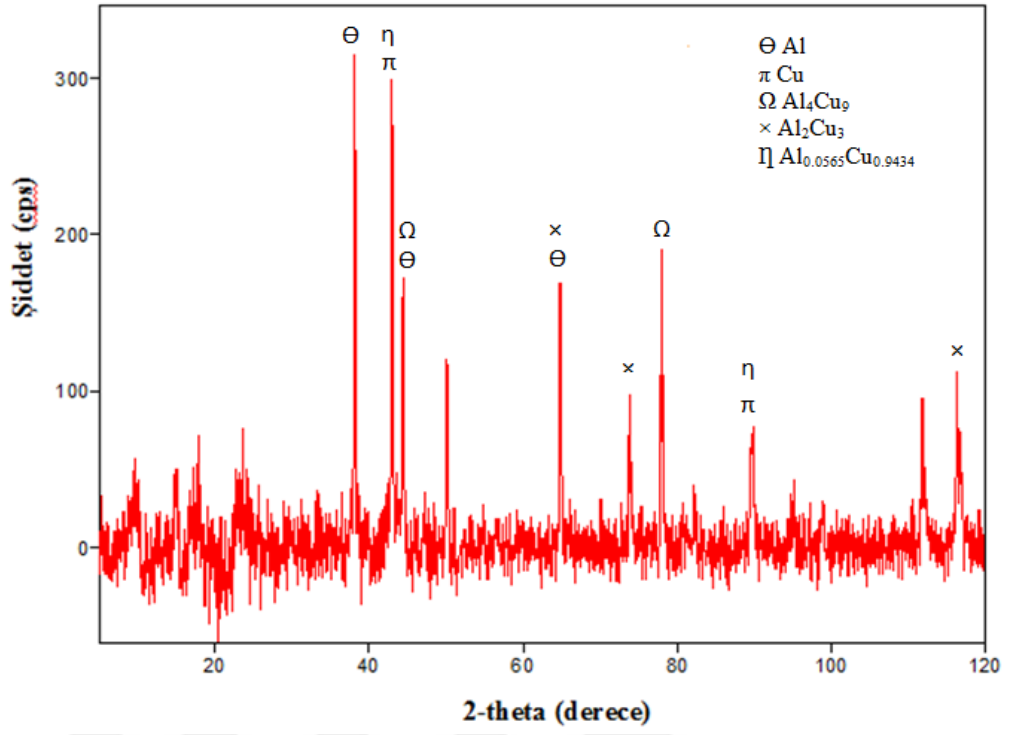
Bakır parçacıklarının alüminyum matrisi içinde homojen ve küçük parçacıklar şeklinde karışımın gerçekleşmesi, Cu/Al-1050 ara yüzeyinde iyi bir bağlanma oluşmasına ve dolayısıyla mekanik özelliklerin artmasını sağlamıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda, (Xue ve ark., 2011; Çakır, 2013) takım konumlandırmasının artmasıyla küçük bakır parçacıkları alüminyum ana malzemeye karışmasının kolaylaştığı ve sağlam bir birleşme meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Sıfır takım konumlandırmasında gerçekleştirilen birleştirmelerde birkaç geniş bakır parçacıklar ile alüminyum matris kaynak bölgesinde karışmakta iken 0.75-1.5 mm takım konumlandırmasında irili ufaklı birçok bakır partikül alüminyum matris içerisinde karışma meydana gelmiş ve çekme mukavemet değerlerinin yükselmesini sağlamıştır (Xue ve ark., 2011; Çakır, 2013; Tan ve ark., 2013).

4.9. X-Işını Difraksiyon Sonuçları

Bakırın alüminyuma SKK ile birleştirilmesiyle ilgili yapılmış önceki çalışmalarda (Enjo ve ark., 1977; Tsujino ve ark., 1988; Ay ve ark., 1999; Elrefaey ve ark., 2004; Ochi ve ark., 2004; Lee ve ark., 2005; Ouyang ve ark., 2006; Abdollah-Zadeh ve ark., 2008; Saeid ve ark., 2010) bakırca zengin metallere arası bileşiklerin mekanik özellikler üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle, SKK yöntemiyle birleştirilen saf Cu ve Al-1050 levhaların kaynak bölgesi içerisinde muhtemel faz değişikliklerinin tespiti için Rigaku marka cihazda, $5^{\circ} < 2\theta < 120^{\circ}$ tarama aralığında, 40 Kv-30 mA ve Cu_K-beta radyasyon ışınımıyla $0.05^{\circ} \text{ mm}^{-1}$ tarama hızında X-Işını Difraksiyon (XRD) analizi yapılmıştır.

Şekil 4.48 incelendiğinde, kaynak bölgesine ait XRD grafiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar Al ve Cu elementleri ile birlikte, literatürde (Ochi ve ark., 2004; Lee ve ark., 2005; Ouyang ve ark., 2006; Abdollah-Zadeh ve ark., 2008; Saeid ve ark., 2010) yapılan çalışmalarda da tespit edilen bakırca zengin Al_2Cu_3 , Al_4Cu_9 ve $\text{Al}_{0.0565}\text{Cu}_{0.9434}$ metallere arası bileşiklerin varlığını ortaya koymuştur.



Şekil 4.48. 525/100/1.5 numunesinin XRD grafiği ve sonuçları

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, saf Cu levha ilerleme tarafına, Al-1050 levha yığılma tarafına yerleştirilerek saat yönünde 525, 1025, 1525 dev/dak dönme hızlarında ve 50, 75, 100 mm/dak ilerleme hızlarında, 0.75-1.5 mm takım konumlandırmalarında sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle alın altına başarılı bir şekilde birleştirilmiştir.

Takım konumlandırmasının 0 olduğu durumda kaynak kesitinde gözle görülür seviyede boşluklar ve kaynak yüzeylerinde çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. Alüminyum tarafına karıştırıcı ucun 0.75-1.5 mm konumlandırılarak yapılan birleştirmeler makro düzeyde incelendiğinde kaynak bölgesinde boşluk, çukur ve birleşme yetersizliklerine rastlanılmamıştır. Bu yüzden 0 takım konumlandırmasında gerçekleştirilen birleştirmelerin mukavemet değerleri 0.75, 1.5 mm takım konumlandırmasında gerçekleştirilen birleştirmelere göre daha düşük çekme mukavemet değerleri elde edilmiştir.

Yapılan parametrik çalışmadan elde edilen çekme testi sonuçları incelendiğinde; en yüksek çekme mukavemeti 525 dev/dak dönme hızında, 100 mm/dak ilerleme hızında ve 1.5 takım konumlandırmasında 105.16 MPa olarak elde edilmiş olup Al ana metaline göre (122.5 MPa) % 85.84 kaynak performansı tespit edilmiştir. En düşük çekme mukavemeti ise; 1525 dev/dak dönme hızında, 75 mm/dak ilerleme hızında ve 0.75 takım konumlandırmasında elde edilmiş olup kaynak performansı % 40.91 olarak tespit edilmiştir.

Farklı malzeme çiftlerinin birleştirilmesinde takım konumlandırmasının mekanik değerleri etkileyen önemli bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır.

Kaynaklı numunelerin sertlikleri incelendiğinde; düşük mekanik özelliklere sahip olan 1525/75/0.75 numunesinin kaynak bölgesindeki ortalama sertlik değeri, daha yüksek mekanik özelliklere sahip olan 525/100/1.5 numunesinin kaynak bölgesindeki ortalama sertliğe göre daha az olduğu ortaya çıkmıştır. Bunun sebebi olarak kaynak bölgesinde görülen sertlik artışları bakırca zengin yapılara ve metaller arası oluşan intermetalik bileşiklere; kaynak bölgesindeki sertliklerdeki dalgalanmalar ise heterojen bir mikroyapıya sahip olmasına bağlanmıştır.

Cu/Al-1050 birleştirmesinin çekme testi sonrası kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri alınmıştır. Çekme mukavemet değeri yüksek olan numunelerin kırılma

yüzeyinde çukurcuklar görülürken, çekme mukavemet değeri düşük olan numunelerin kırılma yüzeyinde düz yüzey görüntüleri belirlenmiştir.

Cu/Al-1050 birleşirmesinin kaynak bölgesinin X-Işınları difraktometresi (XRD) analizlerinde Al_4Cu_9 , Al_2Cu_3 ve $Al_{0.0565}Cu_{0.9434}$ metaller arası bileşiklerin varlığı belirlenmiştir.

Birleşirmenin mikroyapı incelemeleri sonucunda, karışım bölgesinin ince taneli alüminyumca zengin matristen, bakırca zengin yapı ve parçacıklardan oluştuğu tespit edilmiştir.

50 mm/dak ilerleme hızında takım konumlandırmasının artmasıyla çekme mukavemet değerlerinde artış görülürken, takım dönme hızının artmasında ise çok etki etmediği tespit edilmiştir.

75 mm/dak ilerleme hızında takım konumlandırmasının artmasıyla 525, 1525 dev/dak dönme hızlarında çekme mukavemet değerlerinde bir artış olurken 1025 dev/dak dönme hızında ise bir azalma görülmüştür.

100 mm/dak ilerleme hızında takım konumlandırmasının artmasıyla çekme mukavemet değerlerinde bir azalma oluşurken, takım dönme hızının artmasıyla yine çekme mukavemet değerlerinde bir azalma tespit edilmiştir.

1025 dev/dak dönme hızında, 100 mm/dak ilerleme hızında ve 1525 dev/dak dönme hızında, 100 mm/dak ilerleme hızlarında birleştirilen numuneleri incelediğimizde düşük takım konumlandırmalarında daha yüksek dayanımlara ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

Yüksek ilerleme hızında (100 mm/dak), takım dönme hızı ve takım konumlandırmasının artması ile çekme mukavemetlerinde bir azalma tespit edilmiştir. Yüksek ilerleme hızında elde edilen en iyi mekanik özellikler, düşük takım dönme hızı ve yüksek takım konumlandırmasında elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abdollah-Zadeh, A., Saeid, T., and Sazgari, B., 2008. Microstructural and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminum/Copper Lap Joints, **Journal of Alloys and Compounds**, 460, 535-538.
- Anık, S., Anık, E.S. ve Vural, M., 1993. 1000 soruda kaynak teknolojisi el kitabı cilt I, **Birsen Yayınevi**, 630s, İstanbul.
- Anonim, 2016. <http://www.saglammetal.com/tr/sayfa/urun-kategori/18/yuksek-hiz-celigi> Erişim tarihi: 07.05.2016.
- Ay, İ., Çelik, S., Çelik, İ., 1999. Comparison of Properties of Friction and Diffusion Welded Joints Made Between the Pure Aluminium and Copper Bars, **BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, Cilt 1, No 2, 88-102.
- Barlas, Z., Uzun, H., 2008. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Butt Welded Dissimilar Cu/CuZn30 Sheets, **J Achiev Mater Manuf Eng**, Cilt 30, No 2, 182-186.
- Barlas, Z. ve Uzun, H., 2010. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılmış Cu/Al-1050 Alın Birleştirmesinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, Cilt 25, No 4, 857-865.
- Barlas, Z., Uzun, H., 2010. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Butt Welded Dissimilar Pure Copper/Brass Alloy Plates, **Int J Mater Res**, Cilt 101, No 6, 801- 807.
- Bisadi, H., Tavakoli, A., Tour Sangsaraki M., Tour Sangsaraki, K., 2013. The influences of rotational and welding speeds on microstructures and mechanical properties of friction stir welded Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints, **Mater Des** 43 P: 80-88.
- Braun, R., Biallas, G. Donne, C.D. ve Staniek, G., 2000. Characterisation of mechanical properties and corrosion performance of friction stir welded AA6013 sheet, **Materials for Transportation Industry EUROMAT'99**, 1, (Ed: Winkler, P.) 150-155.
- Carlone, P., Astarita, A., Palazzo, G.S., Paradiso, V., Squillace, A., 2015. Microstructural aspects in Al-Cu dissimilar joining by FSW, **Int J Adv Manuf Technol** 79: 1109-1116.
- Çakır, R., 2013. AA1050/Cu Malzeme Çiftinin Birleştirilmesinde Sürtünme Karıştırma Kaynak Parametrelerinin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.
- Çakır, R., Çelik, S., 2015. Alüminyum ve bakırın yüksek devirli sürtünme karıştırma kaynağında takım pozisyonunun etkisi, **Pamukkale Univ Muh Bilim Derg**, 21(8), 352-357.
- Çam, G., 2001. Al-Alaşımları İçin Geliştirilen Yeni Kaynak Yöntemleri, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, **Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı**, 19– 20, S. 267–277, İstanbul, Ekim.
- Çam, G. ve Meran C., 2009, Çeliklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı, **Mühendis ve Makine**, Cilt 50, Sayı 599, Sayfa 24-32.

- Çelik, S. ve Ay, İ., 1999. Koruyucu Gaz Altında Difüzyon Kaynağı ve Uygulaması, **Tr. J. Of Engineering and Environmental Science** 23, 63-70, TÜBİTAK.
- Elrefaey, A., Takahashi, M., Ikeuchi, K., 2004. Microstructure of Aluminum/Copper Lap Joint by Friction Stir Welding and Its Performance, **J High Temp Soc**, Cilt 30, No 5, 286-292.
- Enjo, T., Ikeuchi, K., Akikawa, N., 1977. Diffusion Welding of Copper to Aluminum, **Transactions of the Japan Welding Society**, Cilt 8, No 1, 77- 84.
- Fidan L., 2006. Saf alüminyum ve saf bakırın difüzyon kaynağında arafazların oluşumu ve etkisi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Galvao, I., Oliveira, J.C., Loureiro, A., Rodrigues, D.M., 2011. Formation and distribution of brittle structures in friction stir welding of aluminium and copper: influence of process parameters, **Sci Technol Weld Join** 16(8):681-689.
- Galvao, I., Loureiro, A., Verdera, D., Gesto, D. and Rodrigues, D.M., 2012. Influence of Tool Offsetting on the Structure and Morphology of Dissimilar Aluminum to Copper Friction-Stir Welds, **Metallurgical and Materials Transactions A**, Volume 43A, 5096-5105, December.
- Genevois, C., Girard, M., Huneau, B., Sauvage, X. and Racineux, G., 2011. Interfacial Reaction during Friction Stir Welding of Al and Cu, **Metallurgical and Materials Transactions A**, 2290, Volume 42A, August.
- İpekoğlu, G., 2011. Kaynak Sonrası Isıl İşlemin Sürtünme Karıştırma Kaynaklı AA6061 ve AA7075 Alüminyum Alaşımı Levhalarda İçyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.
- Kafalı, H., Ay, N., 2014. **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi** 18(1), 38-47.
- Kimapong, K., Watanabe, T., 2004. Friction Stir Welding of Aluminium Alloy to Steel, **Weld J**, Cilt 83, No 10, 277-282.
- Kulekçi, M. K., Şık, A., 2003, Sürtünme karıştırma kaynağı ile alüminyum alaşımı levhaların birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların özellikleri, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 7.3 :70–75, Isparta.
- Lee, W.B., Bang, K.S., Jung, S.B., 2005. Effects of Intermetallic Compound on the Electrical and Mechanical Properties of Friction Welded Cu-Al Bimetallic Joints During Annealing, **J Alloy Compd**, Cilt 390, No 1-2, 212-219.
- Li, X-W., Zhang, D-T., Qiu, C., Zhang, W., 2012. Microstructure and mechanical properties of dissimilar pure copper/1350 aluminium alloy butt joints by friction stir welding, **Trans. Nonferrous Met. Soc.**, China, 22;1298-1306.
- Liu, P., Shi, Q., Wan, W., Wang, X. and Zhang, Z., 2008. Microstructure and XRD Analysis of FSW Joints for Copper T2/Aluminium 5A06 Dissimilar Materials, **Materials Letters**, 62, 1406-4108.

- Meran, C., Kovan, V., 2008. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Butt Welded Dissimilar Copper/Brass Joints, **Matwiss u Werkstofftech**, Cilt 39, No 8, 521-530.
- Messler, R.W., 1993. Joining of advanced materials, **Reed Publishing Inc.**, USA.
- Mishra, R.S., Ma, Z.Y., 2005. Friction Stir Welding and Processing, **Mater Sci Eng R**, Cilt 50, No 1-2, 1-78.
- Murr, L.E., Li, Y., Flores, R.D., Trillo, E.A., McClure, J.C., 1998. Intercalation Vortices and Related Microstructural Features in the Friction Stir Welding of Dissimilar Metals, **Mat Res Innovat**, Cilt 2, No 3, 150-163.
- Muthu, M.F.X., Jayabalan, V., 2015. Tool travel speed effects on the microstructure of friction stir welded aluminum-copper joints, **Journal of Materials Processing Technology**, 217, 105-113.
- Ochi, H., Yamamoto, Y., Ogawa, K., Tsujino, R., Sawai, T., 2004. Evaluation of Tensile Strength of Friction-Welded Joints of Aluminium to Copper, **Mater Forum**, Cilt 28, 598-603.
- Okamura, H., and Aota, K., 2004. Joining of Dissimilar Materials with Friction Stir Welding, **Weld J**, Cilt 18, No 11, 852-860.
- Ouyang, J., Yarrapareddy, E. and 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.
- Önol A.T., 2010. Alüminyum ve bakırın bindirme sürtünme karıştırma kaynağında mikroyapı karakterizasyonu ve mekanik özelliklerin belirlenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Özarpa, C., 2005. Al 5754-H22 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.
- Pinto, M.A., Cheung, N., Ierardi, M.C., Garcia, A., 2003. Microstructural and Hardness Investigation of an Aluminum-Copper Alloy Processed by Laser Surface Melting, **Mater Charact**, Cilt 50, No 2-3, 249-253.
- Saeid, T., Abdollah-Zadeh, A., Sazgari, B., 2010. Weldability and Mechanical Properties of Dissimilar Aluminum-Copper Lap Joints Made by Friction Stir Welding, **J Alloy Compd**, Cilt 490, No 1-2, 652-655.
- Singh, S., Khan, Z.A., Siddiquee, A.N., 2015. Study On The Effect Of FSW Process Parameters On Joint Quality Of Dissimilar Materials, **IJREAT International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology**, Volume 3, Issue 2, April-May, 282-298.
- Somasekharan, A.C., Murr L.E., 2004. Microstructures in Friction-Stir Welded Dissimilar Magnesium Alloys and Magnesium Alloys to 6061-T6 Aluminum Alloy, **Mater Charact**, Cilt 52, No 1, 49-64.
- Tan, C.W., Jiang, Z.G., Li, L.Q., Chen, Y.B., Chen, X.Y., 2013. Microstructural evolution and mechanical properties of dissimilar Al-Cu joints produced by friction stir welding, **Materials and Design** 51; 466-473.

- Thomas, W.M., Johnson, K.I. ve Wiesner, C.S., 2003. Friction stir welding-recent developments in tool and process technologies, **Advanced Engineering Materials**, 5, No: 7, 485-490.
- Tsujino, J., Ueoka, T., 1988. Ultrasonic Butt Welding of Aluminum, Anticorrosive Aluminum and Copper Plate Specimens, **Proceeding IEEE 1988 Ultrasonics Symposium**, New York, A.B.D., 493-496.
- Uzun, H., Dalle Donne, C., Argagnotto, A., Ghidini, T., Gambaro, C., 2005. Friction Stir Welding of Dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 Stainless Steel, **Mater Design**, Cilt 26, No 1, 41-46.
- Xue, P., Ni, D.R., Wang, D.B., Xiao, L. And 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.
- 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**, 575, 5723-5727.
- Yusof, F., Firdaus, A., Fadzil, M., Hamdi, M., 2013. Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding, Osaka, Japan, 6-8 November, Pages 219-224.
- Zhang, Q.-Z., Gong, W.-B., Liu, W., 2015. Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al-Cu joints by friction stir welding, **Trans. Nonferrous Met. Soc. China** 25, 1779-1786.

ÖZGEÇMİŞ

Yazar 1989 yılında Tarsus' da doğdu. İlkokul ve Ortaokul Tarsus'ta, Liseyi ise Mersin'de tamamladı. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nü 2008 yılında kazandı ve 2013 yılında "Makine Mühendisi" unvanı ile mezun oldu. Aynı yıl Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. 2014 yılında Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak işe başladı. 2016 yılında İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalından Yüksek Lisans Derecesi ile mezun oldu. Şu anda Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.