

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



AA1050/Cu MALZEME ÇİFTİNİN BİRLEŞTİRİLMESİNDE
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK PARAMETRELERİNİN
MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Recep ÇAKIR

BALIKESİR, MAYIS-2013

KABUL VE ONAY SAYFASI

Recep ÇAKIR tarafından hazırlanan “AA1050/CU MALZEME ÇİFTİNİN BİRLEŞTİRİLMESİNDE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK PARAMETRELERİNİN MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 02/05/2013 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Yrd. Doç. Dr.Sare ÇELİK



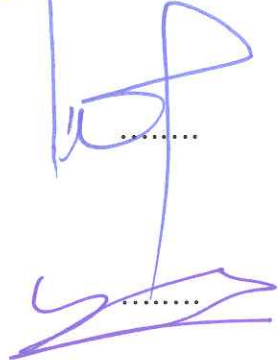
Üye

Prof. Dr.İrfan YÜKLER



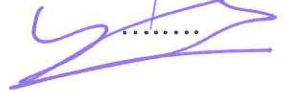
Üye

Prof. Dr.İrfan AY



Üye

Doç. Dr.Yahya BOZKURT



Üye

Yrd. Doç. Dr.Alaaddin TOKTAŞ



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Hilmi NAMLI

.....

Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Rektörlüğüne bağlı Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2012/49 nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

AA1050/Cu MALZEME ÇİFTİNİN BİRLEŞTİRİLMESİNDE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK PARAMETRELERİNİN MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Recep ÇAKIR

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ, FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ,
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. SARE ÇELİK

BALIKESİR, 2013

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yeni bir katı hal birleştirme yöntemidir. Getirdiği yenilikler sebebiyle ergitme kaynak teknikleri ile birleştirilme işleminde zorluklarla karşılaşılabilen alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde ilk defa kullanılan bu teknik, günümüzde farklı malzeme çiftlerinin başarılı bir şekilde birleştirilmesine olanak vermektedir.

Bu çalışmada, alüminyum (AA1050) ve bakır levhalar üç farklı takım dönme hızlarında (630, 1330, 2440 dev/dak), üç farklı takım ilerleme hızlarında (20, 30, 50 mm/dak) ve üç farklı takım konumlandırmasında (1-1,5-2 mm) sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirilmiştir.

Kaynak parametrelerinin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi incelenmiştir. Mekanik özelliklerinin tespitinde çekme, eğme testleri ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Optik mikroskopta mikroyapıları, kaynak bölgeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve elementel analiz (EDS) ile incelenmiştir. Kaynak bölgesinde meydana gelen fazları incelemek için yapılan XRD sonuçlarında intermetalik fazlar tespit edilmiştir. Çekme testi sonuçlarında sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Al-Cu birleştirmesinde, %89,55 kaynak performansı elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER : sürtünme karıştırma kaynağı, sürtünme karıştırma kaynak parametreleri, alüminyum alaşımların sürtünme karıştırma kaynağı, bakır alaşımların sürtünme karıştırma kaynağı, alüminyum bakır levhaların sürtünme karıştırma kaynağı.

ABSTRACT

EFFECTS OF FRICTION STIR WELDING PARAMETERS ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE AA1050/Cu MATERIAL COUPLE

Ph. D. THESIS

Recep ÇAKIR

**BALIKESİR UNIVERSITY, INSTITUTE OF SCIENCE,
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

SUPERVISOR : ASSIST. PROF. DR. SARE ÇELİK

BALIKESİR, 2013

Friction Stir Welding (FSW) is a new solid state joining process. FSW is especially suitable to join Al alloy sheets. This welding technique is also applied to metals other than aluminium alloys.

In this study, 1050 aluminium alloy and commercially pure copper sheets were welded at three different tool rotation speed (630-1330-2440 rev/min), three different tool travel speed (20,30 and 50 mm/min) and three different pin position (1-1,5 and 2 mm) by FSW.

The influence of welding parameters on microstructure and mechanical properties of the joints were investigated. Tensile test, bending test and microhardness measurements were done to determinate the mechanical properties. Microstructure investigations by optical microscope, scanning electron microscope (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) were done in the nugget zone. The XRD results indicated that intermetallic compounds formed in the interfacial region. In the tensile test results, 89.55% weld performance was obtained in the FSW of Al-Cu sheets.

KEYWORDS : friction stir welding, friction stir welding parameters, FSW of aluminium alloys, FSW of copper alloys, FSW of Al-Cu sheets.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER..... | i |
| ABSTRACT, KEY WORDS..... | ii |
| İÇİNDEKİLER..... | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | v |
| TABLO LİSTESİ..... | ix |
| SEMBOL LİSTESİ..... | x |
| ÖNSÖZ..... | xi |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI..... | 3 |
| 2.1 Al-Al Malzeme Çifti İle Yapılan Çalışmalar..... | 3 |
| 2.2 Cu-Cu Malzeme Çifti İle Yapılan Çalışmalar..... | 9 |
| 2.3 Al-Cu Malzeme Çifti İle Yapılan Çalışmalar..... | 11 |
| 2.4 Diğer Malzeme Çiftleri İle Yapılan Çalışmalar..... | 14 |
| 3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ VE KAYNAĞI.. | 17 |
| 3.1 Alüminyumun Özellikleri..... | 17 |
| 3.2 Alüminyum Alaşımının Sınıflandırılması..... | 18 |
| 3.2.1 Döğme Alüminyum Alaşımları..... | 18 |
| 3.2.1.1 1xxx Serisi Alaşımalar..... | 19 |
| 3.2.1.2 2xxx Serisi Alaşımalar..... | 19 |
| 3.2.1.3 3xxx Serisi Alaşımalar..... | 20 |
| 3.2.1.4 4xxx Serisi Alaşımalar..... | 20 |
| 3.2.1.5 5xxx Serisi Alaşımalar..... | 21 |
| 3.2.1.6 6xxx Serisi Alaşımalar..... | 21 |
| 3.2.1.7 7xxx Serisi Alaşımalar..... | 21 |
| 3.2.1.8 8xxx Serisi Alaşımalar..... | 22 |
| 3.2.2 Döküm Alüminyum Alaşımları..... | 22 |
| 3.3 Alüminyum ve Alaşımının Isıl İşlem Özellikleri..... | 23 |
| 3.4 Alüminyum ve Alaşımın Kaynağı..... | 24 |
| 3.4.1 Ergitme Kaynak Yöntemleri..... | 25 |
| 3.4.2 Katı Hal Kaynak Yöntemleri..... | 31 |
| 4. BAKIR VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ VE KAYNAĞI..... | 34 |
| 4.1 Bakır ve Alaşımının Genel Özellikleri..... | 34 |
| 4.2 Bakır ve Alaşımının Sınıflandırılması..... | 35 |
| 4.2.1 Saf Bakır..... | 37 |
| 4.2.2 Yüksek Bakır İçerikli Alaşımalar..... | 37 |
| 4.2.3 Bakır-Çinko Alaşımaları..... | 37 |
| 4.2.4 Bakır-Kalay Alaşımaları..... | 38 |
| 4.2.5 Bakır-Alüminyum Alaşımaları..... | 38 |
| 4.2.6 Bakır-Silisyum Alaşımaları..... | 39 |
| 4.2.7 Bakır-Nikel Alaşımaları..... | 39 |
| 4.2.8 Bakır-Nikel-Çinko Alaşımaları..... | 40 |
| 4.3 Bakır ve Alaşımının Kaynağı..... | 40 |
| 4.3.1 Ark Kaynak Yöntemleri..... | 41 |
| 4.3.2 Diğer Kaynak Yöntemleri..... | 44 |

| | |
|--|------------|
| 5. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI..... | 47 |
| 5.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Tanımı..... | 47 |
| 5.2 Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Uygulanışı..... | 48 |
| 5.3 Kaynak Parametrelerinin SKK Yöntemine Etkisi..... | 51 |
| 5.3.1 Malzemenin Kalınlığı..... | 51 |
| 5.3.2 Karıştırıcı Uç Malzemesi ve Dizaynı..... | 52 |
| 5.3.3 Takım İlerleme Hızı ve Takım Devir Sayısı..... | 53 |
| 5.4 Kaynağın Metalurjik Yapısı..... | 54 |
| 5.4.1 Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge (DKB)..... | 54 |
| 5.4.2 Termomekanik Olarak Etkilenen Bölge (TMEB)..... | 54 |
| 5.4.3 Isı tesiri altındaki bölge (ITAB)..... | 55 |
| 5.4.4 Esas Malzeme..... | 55 |
| 5.5 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantajları Ve Dezavantajları..... | 55 |
| 5.6 Yöntemin Uygulama Alanları..... | 57 |
| 6. YÖNTEM..... | 59 |
| 6.1 Çalışmalarda Kullanılan Malzeme ve Donanımlar..... | 59 |
| 6.1.1 Bakır ve Alüminyum Malzemeler..... | 59 |
| 6.1.2 Karıştırıcı Uç Tasarımı ve İmalatı..... | 60 |
| 6.1.3 Bağlama Kalıbı Tasarımı ve İmalatı..... | 61 |
| 6.1.4 SKK İşleminde Kullanılan Tezgah..... | 62 |
| 6.1.5 Kaynak Bölgesindeki Sıcaklık Değişimlerinin Ölçülmesi..... | 62 |
| 6.2 Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Parçaların Birleştirilmesi..... | 63 |
| 6.3 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi..... | 67 |
| 6.3.1 Çekme Deneyi..... | 67 |
| 6.3.2 Eğme Deneyi..... | 68 |
| 6.3.3 Mikrosertlik Ölçümleri..... | 69 |
| 6.4 Optik ve SEM Mikroyapı İncelemesi..... | 69 |
| 6.5 XRD ve EDX Analizleri..... | 70 |
| 7. BULGULAR..... | 72 |
| 7.1 Kaynak Yüzeyi ve Kök Görüntüleri..... | 72 |
| 7.2 Kaynak Kesit Görüntüleri..... | 73 |
| 7.3 Kaynak Sonrası Karıştırıcı Uç Durumu..... | 74 |
| 7.4 Kaynak Bölgelerindeki Sıcaklık Dağılımları..... | 75 |
| 7.4.1 Kaynak Merkezindeki Sıcaklık Dağılımları..... | 82 |
| 7.5 Birleştirmelerin Mekanik Özellikleri..... | 84 |
| 7.5.1 Çekme Deneyi Sonuçları..... | 84 |
| 7.5.2 Takım Dönme Hızının Etkisi..... | 90 |
| 7.5.3 Takım İlerleme Hızının Etkisi..... | 91 |
| 7.5.4 Takım Konumlandırılmasının Etkisi..... | 92 |
| 7.5.5 Eğme Deneyi Sonuçları..... | 93 |
| 7.6 Mikrosertlik İncelemeleri..... | 94 |
| 7.7 Kaynak Bölgelerinin Mikroyapı İncelemeleri..... | 99 |
| 7.8 SEM İncelemeleri ve EDX Analizi..... | 117 |
| 7.9 X-Işını Difraksiyon Sonuçları..... | 140 |
| 8. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR..... | 143 |
| 9. GENEL SONUÇLAR..... | 147 |
| 10. KAYNAKLAR..... | 151 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 3.1: Alüminyumda alaşım elementlerinin genel bileşimleri..... | 18 |
| Şekil 3.2: Difüzyon kaynağı..... | 31 |
| Şekil 3.3: Sürekli tahrikli sürtünme kaynağının şematik resmi..... | 32 |
| Şekil 4.1: Alaşım elementlerinin etkisi..... | 35 |
| Şekil 5.1: Sürtünme karıştırma kaynağının şematik resmi..... | 49 |
| Şekil 5.2: SKK birinci aşama..... | 50 |
| Şekil 5.3: SKK ikinci aşama..... | 50 |
| Şekil 5.4: SKK üçüncü aşama..... | 51 |
| Şekil 5.5: SKK dördüncü aşama..... | 51 |
| Şekil 5.6: Karıştırıcı uç pim profilleri..... | 53 |
| Şekil 5.7: Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan alüminyum alaşımın mikroyapısı..... | 54 |
| Şekil 6.1: Ana metal mikroyapı görünümü, a) AA1050, b) Cu..... | 60 |
| Şekil 6.2: Karıştırıcı uç..... | 60 |
| Şekil 6.3: Karıştırıcı ucun ölçüleri..... | 61 |
| Şekil 6.4: Bağlama kalıbı tasarımı..... | 61 |
| Şekil 6.5: Bağlama kalıbının, a) Son hali, b) Tabladaki görüntüsü..... | 61 |
| Şekil 6.6: SKK İşleminde Kullanılan Freze Tezgahı..... | 62 |
| Şekil 6.7: a) Sıcaklık veri kaydedici ve K-tipi termokupullar b) Termokupulların yerleşimi..... | 63 |
| Şekil 6.8: Karıştırıcı ucun levhalardaki konumu..... | 64 |
| Şekil 6.9: 0 konumlu kaynak kesit görüntüsü, a) 630 dev/dak, b) 1330 dev/dak, c) 2440 dev/dak..... | 64 |
| Şekil 6.10: Çekme numunesi ölçüleri..... | 67 |
| Şekil 6.11: Levhalardan su jeti kesim yöntem ile çıkarılmış çekme numunesi..... | 67 |
| Şekil 6.12: Çekme-eğme test cihazı..... | 68 |
| Şekil 6.13: Levhalardan su jeti kesim yöntem ile çıkarılmış eğme numunesi..... | 68 |
| Şekil 6.14: Eğme test cihazı..... | 69 |
| Şekil 6.15: Mikrosertlik cihazı..... | 69 |
| Şekil 6.16: SEM Cihazı..... | 70 |
| Şekil 7.1: 630/20/1 numunesi, a) Kaynak yüzeyi, b) Kök görüntüsü..... | 72 |
| Şekil 7.2: 1330/30/1,5 numunesi, a) Kaynak yüzeyi, b) Kök görüntüsü..... | 73 |
| Şekil 7.3: 2440/50/2 numunesi, a) Kaynak yüzeyi, b) Kök görüntüsü..... | 73 |
| Şekil 7.4: 630/20/1,5 numunesinin kaynak kesit görüntüsü..... | 74 |
| Şekil 7.5: 1330/30/2 numunesinin kaynak kesit görüntüsü..... | 74 |
| Şekil 7.6: 2440/50/1 numunesinin kaynak kesit görüntüsü..... | 74 |
| Şekil 7.7: Kaynak sonrası karıştırıcı uç durumu..... | 75 |
| Şekil 7.8: Termokupulların yerleşimi..... | 75 |
| Şekil 7.9: 630/50/2 numunesine ait sıcaklık grafiği..... | 76 |
| Şekil 7.10: 1330/20/1 numunesine ait sıcaklık grafiği..... | 78 |
| Şekil 7.11: 2440/30/1,5 numunesine ait sıcaklık grafiği..... | 80 |
| Şekil 7.12: 630 takım dönme hızına ait numunelerin çekme testi sonuçları..... | 86 |
| Şekil 7.13: 1330 takım dönme hızına ait numunelerin çekme testi sonuçları..... | 86 |
| Şekil 7.14: 2440 takım dönme hızına ait numunelerin çekme testi sonuçları..... | 86 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 7.15: 630 dev/dak takım dönme hızında çekme testi sonrası yüzey görüntüleri, a) 630/20/1 numunesi, b) 630/30/1 numunesi, c) 630/50/1 numunesi..... | 87 |
| Şekil 7.16: 1330 dev/dak takım dönme hızında çekme testi sonrası yüzey görüntüleri, a) 1330/20/1,5 numunesi, b) 1330/30/1,5 numunesi, c) 1330/50/1,5 numunesi..... | 87 |
| Şekil 7.17: 2440 dev/dak takım dönme hızında çekme testi sonrası yüzey görüntüleri, a) 2440/20/2 numunesi, b) 2440/30/2 numunesi, c) 2440/50/2 numunesi..... | 87 |
| Şekil 7.18: Çekme deneyi sonrası 1330/20/1 numunesinin Al tarafının kırılma yüzeyi..... | 88 |
| Şekil 7.19: Çekme deneyi sonrası 1330/20/1 numunesinin Cu tarafının kırılma yüzeyi..... | 88 |
| Şekil 7.20: Çekme deneyi sonrası 1330/30/1,5 numunesinin Al tarafının kırılma yüzeyi..... | 89 |
| Şekil 7.21: Çekme deneyi sonrası 1330/30/1,5 numunesinin Cu tarafının kırılma yüzeyi..... | 89 |
| Şekil 7.22: Test öncesi eğme deneyi numuneleri..... | 94 |
| Şekil 7.23: Test sonrası eğme deneyi numuneleri..... | 94 |
| Şekil 7.24: 630/50/1 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği..... | 95 |
| Şekil 7.25: 630/50/2 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği..... | 96 |
| Şekil 7.26: 1330/20/1 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği..... | 96 |
| Şekil 7.27: 1330/30/1,5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği..... | 97 |
| Şekil 7.28: 2440/30/1 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği..... | 98 |
| Şekil 7.29: 2440/50/2 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği..... | 98 |
| Şekil 7.30: 630/20/2 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c) Alt bölge, d) Ana metale geçiş..... | 100 |
| Şekil 7.31: 630/20/2 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Ana metale geçiş..... | 100 |
| Şekil 7.32: 630/30/2 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c) Alt bölge, d) Ana metale geçiş..... | 101 |
| Şekil 7.33: 630/30/2 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Ana metale geçiş..... | 101 |
| Şekil 7.34: 630/30/2 numunesinde bakır parçacıkların boyutu..... | 102 |
| Şekil 7.35: 630/50/1,5 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c) Alt bölge, d) Ana metale geçiş..... | 102 |
| Şekil 7.36: 630/50/1,5 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Ana metale geçiş..... | 103 |
| Şekil 7.37: 630/50/2 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c) Alt bölge, d) Ana metale geçiş..... | 103 |
| Şekil 7.38: 630/50/2 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Ana metale geçiş..... | 104 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 7.39: 1330/20/1 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Ana metale geçiş..... | 106 |
| Şekil 7.40: 1330/20/1 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Ana metale geçiş..... | 106 |
| Şekil 7.41: 1330/30/1,5 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Ana metale geçiş..... | 107 |
| Şekil 7.42: 1330/30/1,5 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Ana metale geçiş..... | 107 |
| Şekil 7.43: 1330/30/2 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Ana metale geçiş, e) Bakır parçacıkların boyutu..... | 108 |
| Şekil 7.44: 1330/30/2 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Ana metale geçiş..... | 109 |
| Şekil 7.45: 1330/50/1 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Ana metale geçiş..... | 109 |
| Şekil 7.46 : 1330/50/1 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Ana metale geçiş..... | 110 |
| Şekil 7.47: 2440/20/1,5 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Ana metale geçiş..... | 112 |
| Şekil 7.48: 2440/20/1,5 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Ana metale geçiş..... | 112 |
| Şekil 7.49: 2440/30/1 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Ana metale geçiş..... | 113 |
| Şekil 7.50: 2440/30/1 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Ana metale geçiş..... | 113 |
| Şekil 7.51: 2440/50/1 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Ana metale geçiş..... | 114 |
| Şekil 7.52: 2440/50/1 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Ana metale geçiş..... | 114 |
| Şekil 7.53: 2440/50/2 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Ana metale geçiş..... | 115 |
| Şekil 7.54: 2440/50/2 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Ana metale geçiş..... | 115 |
| Şekil 7.55: Ana metallerin SEM görüntüsü a) Al, b) Cu..... | 115 |
| Şekil 7.56: 630/20/2 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b)1 bölgesinin çizgisel analizi..... | 118 |
| Şekil 7.57: 630/30/2 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 nolu bölgenin 1000 büyütme hali, c) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d)1 noktasının noktasal analizi..... | 119 |
| Şekil 7.58: 630/50/1,5 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 nolu bölgenin 1000 büyütme hali, c) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d)1 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 120 |
| Şekil 7.59: 630/50/1,5 numunesinin 1 noktasının noktasal analizi..... | 121 |
| Şekil 7.60: 630/50/2 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20) b) 1 nolu bölgenin 1000 büyütme hali, c) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d)1 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 122 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 7.61: 1330/20/1 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 nolu bölgenin 1000 büyütme hali, c) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d) 2 nolu bölgenin 1000 büyütme hali..... | 124 |
| Şekil 7.62: Şekil 7.61 a)'daki 1 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 125 |
| Şekil 7.63: 1330/20/1 numunesinin 1 noktasının noktasal analizi..... | 125 |
| Şekil 7.64: Şekil 7.61 a)'deki 2 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 126 |
| | |
| Şekil 7.65: 1330/30/1,5 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20) b) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, c) 1 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 127 |
| Şekil 7.66: 1330/30/2 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, c) 1 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 128 |
| Şekil 7.67: 1330/50/1 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d) 1 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 129 |
| Şekil 7.68: Şekil 7.67 a) 'daki 2 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 130 |
| Şekil 7.69: 2440/20/1,5 numunesinin 2440/20/1,5 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20) b) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d) 1 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 132 |
| Şekil 7.70: Şekil 7.69 a)'daki 2 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 133 |
| | |
| Şekil 7.71: 2440/30/1 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X22), b) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d) 1 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 134 |
| Şekil 7.72: Şekil 7.71 a)'daki 2 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 135 |
| Şekil 7.73: 2440/50/1 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X22), b) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d) 1 nolu bölgenin çizgisel..... | 136 |
| Şekil 7.74: Şekil 7.73 a)'daki 2 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 137 |
| Şekil 7.75: 2440/50/2 1 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X22), b) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d) 1 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 138 |
| Şekil 7.76: Şekil 7.75 a) 'daki 2 nolu bölgenin çizgisel analizi..... | 139 |
| Şekil 7.77: 1330/20/1 numunesinin XRD analiz sonucu..... | 141 |
| Şekil 7.78: Al-Cu faz diyagramı..... | 142 |

TABLO LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Tablo 2.1: Kaynak parametreleri..... | 4 |
| Tablo 3.1: Döğme alüminyum ve alaşımlarının sınıflandırılması..... | 19 |
| Tablo 3.2: Yaşlandırılmayan alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler..... | 23 |
| Tablo 3.3: Yaşlandırılabilen alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler..... | 24 |
| Tablo 4.1: Bazı bakır ve alaşımları için birleştirme yöntemlerinin uygulanabilirliği; M=Mükemmel, İ=İyi, V=Vasat, TE=Tavsiye Edilmez..... | 41 |
| Tablo 6.1: AA1050 levha malzemenin kimyasal içeriği (%ağırlık)..... | 59 |
| Tablo 6.2: Saf bakır levha malzemenin kimyasal içeriği (%ağırlık)..... | 59 |
| Tablo 6.3: Alüminyum ve bakırın mekanik özellikleri..... | 59 |
| Tablo 6.4: Deney parametreleri..... | 65 |
| Tablo 7.1: 630 dev/dak takım dönme hızına ait sıcaklık değerleri..... | 77 |
| Tablo 7.2: 1330 dev/dak takım dönme hızına ait sıcaklık değerleri..... | 79 |
| Tablo 7.3: 2440 dev/dak takım dönme hızına ait sıcaklık değerleri..... | 81 |
| Tablo 7.4: Kaynak merkezinde ölçülen sıcaklıklar..... | 83 |
| Tablo 7.5: Çekme deneyi sonuçları..... | 85 |

SEMBOL LİSTESİ

| | |
|----------------|---|
| SKK | : Sürtünme Karıştırma Kaynağı |
| mm/dak | : milimetre/dakika |
| MPa | : Mega pascal |
| SEM | : Scanning electron microscope (taramalı elektron mikroskobu) |
| EDS | : Electron Dispersive Spectroscopy (Elementel Analiz) |
| XRD | : X-Ray Diffraction (X-Işınları Difraktometresi-Faz analiz) |
| dev/dak | : Revolutions per minute (dev/dak) |
| AS | : Advancing side (Takım ilerleme yönü) |
| RS | : Retreating side (Takım ilerleme yönü tersi) |
| TMEB | : Termomekanik olarak etkilenen bölge |
| ITAB | : Isı tesiri altındaki bölge |
| SZ | : Stirred zone (Kaynak bölgesi) |

ÖNSÖZ

Öncelikle beni bu zamanlara getiren aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında fikir sahibi olan tez danışmanım, sıkıntılı zamanlarımda destekleyici tutum içerisinde çözüm üreten, her zaman yakın ilgisini gösterme nezaketi gösteren ve örnek alacağım Sayın Yrd.Doç.Dr.Sare ÇELİK Hocama, bana verdiği desteklerden ve gösterdiği güven dolayısıyla sonsuz teşekkürler.

Değerli katkıları ve yoğunlukları arasında zaman ayırmaları nedeniyle Sayın Prof. Dr. İrfan YÜKLER, ilgisini ve desteklerini esirgemeyen Makine Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. İrfan AY, Sayın Doç.Dr.Yahya BOZKURT ve Sayın Yrd.Doç.Dr.Alaaddin TOKTAŞ hocalarıma teşekkürü borç bilirim.

Atölye imkânlarından yararlanmamı sağlayan K.K.Astsubay Meslek Yüksek Okulu Öğretim Başkanı Sayın Faruk ATEŞ'e, Sayın Ramazan NAZAR'a, Sayın Abdullah TOPÇU'ya, Sayın Himmet GÜNDÜZ'e, Makine Bölüm Başkanı Sayın Şenol GÜNER'e teşekkürü borç bilirim.

Deneysel çalışmalarda katkı sağlayan Makine Öğretim Görevlisi Mehmet Tuncay KAYA'ya, teknisyenler Ender KARAŞLIOĞULLARI, Yücel ŞAHİN ve Ramazan GÜNEŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Mikroyapı çalışmalarında imkan sağlayan Selen KÖMÜRCÜ'ye, incelemelere yardımcı olan İsmail ALTINÇEKİÇ'e, dağlayıcıları hazırlayan Ayla ASLANPAY'a teşekkürlerimi sunarım. SEM ve XRD incelemeleri için yardımcı olan Sakarya Üniversitesi Endüstriyel Hizmetlerde çalışan Uzman Fuat KAYIŞ'a teşekkürler.

Çalışma arkadaşlarım Hasan SORGUNLU'ya, Alpaslan ATMANLI'ya, Bilal AKIN'a, Sadrettin DENİZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca her zaman desteğini veren değerli eşim Yadikar'a, dünya tatlısı kızlarım Bahar ve Yağmur prenseslerime sonsuz teşekkürler.

1. GİRİŞ

Bir katı hal birleştirme yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı, ergitme kaynak yöntemleri ile güç olan malzemelerin birleştirme işlemleri için kısa kaynak süresi, farklı malzemelerin birleştirilebilmesi, minimum yüzey hazırlama ve otomasyon kolaylığı gibi kendine özgü avantajlarından dolayı iyi bir birleştirme yöntemidir. Yöntemin uygulanması sırasında duman ve ışın oluşmaması, koruyucu gaz, toz ve ilave tele gereksinim duyulmaması, birleştirilecek parçalarda kaynak ağzı hazırlığı gerekmemesi, tüm pozisyonlarda kaynak yapılabilmesi ve otomasyona yatkınlığı gibi özellikleri, sürtünme karıştırma kaynağını konvansiyonel ergitme kaynağına göre avantajlı kılmaktadır. Yöntem uçak, uzay, gemi, otomotiv sektöründe, gıda depolama elemanları ve radyoaktif atık madde taşıyıcılarının üretiminde kullanılan 2000, 5000, 6000, 7000 ve 8000 serisi Al alaşımlarının yanı sıra Cu-alaşımlarının, Ti-alaşımlarının ve bazı çelik alaşımlarının birleştirilmesinde uygulama alanı bulmaktadır [1].

İlk defa 1991 yılında TWI Kaynak Enstitüsü tarafından geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemi, geleneksel ergitme kaynağı yöntemleriyle birleştirilmesi güç olan veya mümkün olmayan alüminyum alaşımlarının kaynağında başarıyla uygulanabilmektedir. Başlangıçta bu yöntem, özellikle demir dışı metaller üzerinde uygulanmasına karşın, günümüzde demir esaslı bazı malzemelerin kaynağı için de kullanılmaya başlamıştır. Özellikle alüminyum alaşımlarında diğer kaynak tekniklerine göre daha iyi mekanik özellikler elde edilebilmesi ve minimum sürede kaliteli birleştirmelerin gerçekleştirilmesi gibi avantajlarından dolayı, bu yöntem günümüzde önemli kaynak işlemleri arasına girmiştir [2].

Bakır (Cu) ve alüminyum (Al), iyi elektrik ve ısı iletkenliklerinin yanı sıra yüksek korozyon dirençleri ve mekanik özellikleri nedeniyle elektrik endüstrisi için önemli metaller arasında yer almaktadır. Son yıllarda, özellikle yüksek doğru-akım dağıtım hatlarında, bu iki metalin birbirine sağlam bir şekilde birleştirilebilmesi için farklı kaynak yöntemlerinin uygulanabilirliği araştırma konusu olmaktadır. Sürtünme kaynağı, ultrason kaynağı, difüzyon kaynağı ve lazer kaynağı gibi yöntemler, bakırın alüminyuma birleştirilmesi için incelenmekte olmasına rağmen, günümüzde diğer

kaynak yöntemlerinin kullanılmasıyla ilgili çalışmalar da devam etmektedir. Bir katı-hal birleştirme yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağının, bu amaca yönelik aday birleştirme tekniklerinden biri olduğu düşünülmektedir. Genel olarak ergitme kaynak yöntemlerinde bakır ve alüminyumun birleştirilmesinde en önemli problemler arasında yer alan iş parçalarının çarpılması, kaynak bölgesinde oksitlenme, sıcak çatlama riski, gaz boşlukları oluşumu gibi kaynak problemlerinin SKK yöntemiyle en düşük düzeye indirilmesi öngörülmektedir. Son zamanlarda, özellikle alüminyum/çelik, alüminyum/magnezyum, alüminyum/paslanmaz çelik, bakır/pirinç gibi metalik malzeme çiftlerinin birleştirilmesinde başarıyla uygulanan SKK yönteminin, bakırın alüminyuma bindirme ve alın kaynağı birleştirmeleri için kullanıldığı bazı çalışmaların da yapıldığı görülmektedir. Bakır ve alüminyumun alın birleştirmeleriyle ilgili deneysel çalışma sayısı oldukça sınırlı ve elde edilen sonuçlar ise farklılıklar arz etmektedir. Dolayısıyla kullanılan SKK parametrelerinin detaylı olarak sunulduğu ve özellikle farklı alaşımlardaki Al ve Cu malzemeleriyle ilgili deneysel çalışma sonuçlarının mikroyapı ve mekanik özellikler açısından değerlendirildiği farklı çalışmalara ihtiyaç duyulduğu düşünülmektedir [3].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, elde edilen birleştirmelerde yapıda ortaya çıkan boşluklar ve dayanım değerlerinin düşük olması nedeniyle bu çalışmada karıştırıcı ucun malzeme çiftleri üzerinde konumunun değiştirilmesi düşünülerek de çalışmalar yapılmıştır.

Yine; SKK yöntemi ile yapılan birleştirmelerde; karıştırıcı ucun dönme hızı (devir sayısı), konumu, geometrisi ve kaynak ilerleme hızı gibi parametreler, ilgili literatür ışığında belirli aralıklarda tespit edilmiş olup mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda optimum işlem parametreleri seçilerek birleşme kalitesi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Enerji santralleri, dağıtım hatları, elektronik endüstrisi ve elektrik iletiminde Al-Cu geçiş parçalarında birçok kullanım alanı söz konusu olan bakır-alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı konusunda literatürde yapılan çalışma sayısının az olması ve mekanik değerlerin düşük olması nedeniyle bu çalışmada yapılan kaynak incelemesinin literatüre bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Deneysel çalışmalara ışık tutması amacıyla aşağıda verilen literatür çalışması yapılmıştır.

2.1 Al-Al Malzeme Çifti İle Yapılan Çalışmalar

Scialpi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, farklı omuz geometrilerinin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi araştırılmıştır. 1,5 mm kalınlığında 6082 T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Takım dönme hızı 1810 dev/dak, ilerleme hızı 460 mm/dak olup 2° eğim açısı ve 0,1 mm omuz batma derinliği verilmiştir. Üç farklı omuz (yuvarlatılmış, yuvarlatılmış-boşluklu, yuvarlatılmış-burgulu) yapısına sahip karıştırıcı uç kullanılarak optik mikroskop, sertlik, eğme ve çekme testleri yapılmıştır. İnce levhalar için en iyi birleştirmeyi yuvarlatılmış-boşluklu yapıya sahip karıştırıcı ucun sağladığı tespit edilmiştir. Enine çekme testleri üç farklı omuz geometrisi için önemli bir fark olmaksızın iyi bir mukavemet göstermiştir. Boyuna çekme testleri ise büyük bir fark gözlenmiştir. 460 mm/dak ve 1810 dev/dak değerlerinde yuvarlatılmış-boşluklu omuz yapısına sahip karıştırıcı uç en iyi takım olarak belirlenmiştir [4].

Elangovan ve Balasubramanian yapmış oldukları çalışmada, AA6061 alüminyum alaşımını kullanarak takım pim profilinin ve omuz çapının kaynak bölgesi oluşumunda etkisini araştırmışlardır. Kaynak kalitesini, kaynak parametrelerinden karıştırıcı uç dönme hızı, ilerleme hızı, eksenel yükler ve uç pim profilinin önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Kaynak birleşmelerinde üç farklı omuz çaplı beş farklı uç profili (düz silindirik, vidalı silindirik, konik silindirik, kare, üçgen) kullanılmıştır. Yapılan incelemelerde kare uç diğer uç profillerine göre daha iyi mekaniksel özellikler ve hatasız metalürjik yapı ortaya çıkarmıştır [5].

Cavaliere ve arkadaşları tarafından AA6056 malzemesinin SKK işleminde kaynak parametrelerinin birleşme yerlerinin mekanik ve mikroyapı özelliklere etkisinin araştırıldığı çalışmada, 500-800-1000 dev/dak dönme hızlarında, 40-56-80 mm/dak ilerleme hız değerlerinde farklı numuneler elde edilmiştir. Karıştırıcı uç pim çapı 6 mm, uzunluğu 3,9 mm, omuz çapı 14 mm alınmış ve 3° açı verilmiştir

Yorulma testleri yapılmıştır. 56 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynaklı numune düşük çevrim rejiminde en iyi özellikleri göstermiştir. Kaynak yapılan metale ve karıştırıcı uca gelen kuvvetler kaydedilmiştir. Mekanik değerler dönme hızının ve ilerleme hızının artmasıyla azalma göstermiştir. En yüksek çekme mukavemeti değerine yüksek dönme hızı (800 ve 1000 dev/dak) ve yüksek ilerleme hızı (80 mm/dak) değerlerinde elde edilmiştir [6].

Balasubramanian, SKK işleminde dönme hızı, ilerleme hızı, eksenel kuvvetlerin kaynak kalitesinin belirlenmesinde büyük bir rol oynadığını ifade etmiştir. SKK kaynak parametreleriyle ana malzeme arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. SKK işlemi için beş farklı alüminyum alaşımı (AA1050, AA6061, AA2024, AA7039 ve AA7075) farklı işlem parametreleri kullanılarak kaynağı yapılmıştır. Karıştırıcı uç çapı 18 mm, pim çapı 6 mm, pim uzunluğu 5,7 mm, vida adımı 1 mm olup temperlenmiş yüksek karbonlu çelik kullanılmıştır. Kullanılan malzemelere göre seçilen dönme hızları, ilerleme hızları ve eksenel yük Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Kaynak parametreleri [7]

| Alaşım | Takım Dönme Hızı (dev/dak) | Takım İlerleme Hızı (mm/dak) | Eksenel Yük (kN) |
|--------|-------------------------------|---------------------------------|------------------|
| AA1050 | 700,800,900,1000,1100 | 22, 45, 75, 100, 135 | 8 |
| AA6061 | 900,1000,1100,1200,1300 | | |
| AA2024 | 1000,1100,1200,1300,1400 | | |
| AA7039 | 1100,1200,1300,1400,1500 | | |
| AA7075 | 1300,1400,1500,1600,1700 | | |

Akma mukavemeti, süneklik ve sertlik alüminyum alaşımlarda SKK işlemi için kaynak kalitesini belirlemede önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir. Alüminyum alaşımların ana metal özelliklerinden yola çıkılarak ortaya konulan ampirik ifadeler SKK işlemi parametrelerinin belirlenmesinde etkin olarak kullanılmıştır [7].

Sarsılmaz ve arkadaşları tarafından yapılan SKK işleminde AA6061 ve AA7075 alüminyum alaşım plakaları birleştirilmesinde sabit devir ve ilerleme hızlarında farklı omuz genişliklerinin etkisi incelenmiştir. Kaynak esnasındaki sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Karıştırıcı uç K100 çeliğinden yapılarak 2,5°

takım eğim açısı kullanılmıştır. Dönme hızı 1120 dev/dak, ilerleme hızı 250 mm/dak alınmıştır. Yüzey sıcaklık ölçümlerinde geniş çaplı omuzda malzemedeki yüzey sıcaklığı arttığı bulunmuştur. Üç farklı omuz genişliğinin (16-20-24 mm) kaynaklı birleştirmelerin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre en yüksek mukavemet 16 mm omuz genişliğine sahip karıştırıcı uçta elde edilmiştir. Azalan omuz genişliğiyle birlikte mikrosertlik değerlerinde artış tespit edilmiştir [8].

Sarsılmaz ve Özdemir, AA1050 ve AA6061 alüminyum alaşımını SKK yöntemiyle birleştirerek farklı karıştırıcı uç geometrilerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Karıştırıcı uç K100 çeliğinden yapılmış olup vida, üçgen ve koni profilli karıştırıcı uç çalışmalarda kullanılmıştır. Takım eğim açısı $2,5^{\circ}$ alınmıştır. Dönme hızı 1120 dev/dak, ilerleme hızı 250 mm/dak alınmıştır. 1120 dev/dak ve 250 mm/dak ilerleme hız değerlerinde birleştirilen kaynaklı bağlantılara uygulanan çekme testleri sonunda, vida profiline sahip karıştırıcı uçla birleştirilen numunede en iyi sonuç elde edilmiştir. Vida profilli karıştırıcı ucu, üçgen ve koni profilli karıştırıcı uç takip etmiştir. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde vida ve üçgen profilli karıştırıcı ile yapılan numunelerde lokal sünek kırılma, koni profilli karıştırıcı ile yapılan numunede gevrek kırılma gözlenmiştir [9].

Hasçalık yaptığı çalışmada, AA5251 alüminyum alaşımını farklı geometrilere sahip karıştırıcı uçlar kullanarak sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle birleştirip mekanik özelliklerini araştırmıştır. Deneylerde takım dönme hızı 1000 dev/dak ve ilerleme hızı 200 mm/dak olarak sabit tutulmuştur. Beş farklı karıştırıcı uç profilli (kare kesitli, üçgen kesitli, kare piramit, üçgen piramit ve koni) kullanılarak uç profillerinin; kaynak sertliği, mikroyapısı ve birleşmenin mekanik özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Karıştırıcı uç malzemesi olarak D5 yüksek karbonlu takım çeliği kullanılmıştır. Numunelerin kaynak bölgeleri mikroyapıları optik mikroskopla incelenmiş, çekme deneyleri ve mikrosertlik incelemeleri yapılmıştır. En mukavemetli birleşmenin kare piramit kesitli uçta, en mukavemetsiz birleşmenin ise koni kesitli uçta gerçekleştiği ve bütün geometrilerde numunelerin çekme dayanımı esas malzemenin altında olduğu ortaya çıkarılmıştır [10].

Özdemir ve arkadaşları, AA1030 alüminyum levhaları SKK yöntemi ile birleştirerek karıştırıcı uç profilinin ve ilerleme hızının etkisini araştırmışlardır.

Karıştırıcı uç olarak vida ve üçgen profile sahip uçları, takım dönme hızı 900, 1120, 1400 dev/dak değerlerini ve ilerleme hızı olarak 125, 160 ve 200 mm/dak değerlerini kullanmışlardır. Mikroyapı değerlendirmelerine göre karıştırıcı uç profilinin ve ilerleme hızının mikroyapı üzerinde etkili olduğu ortaya çıkarılmıştır. Mikrosertlik incelemesinde esas malzemeden kaynak meteline sertlikte düşüş olduğu gözlenmiştir. Bu düşüşün yüksek ilerleme hızlarında daha az olduğu görülmüştür. Üçgen profilli uç ile yapılan kaynakların birleşme bölgesindeki sertlik değerleri, vida profilli uç kullanılarak yapılan birleşme bölgelerine göre yüksek olduğu tespit edilmiştir [11].

Cebeci ve Şahin, AA1050 ve AA5754 levhaları SKK yöntemi ile birleştirerek mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemiştir. Kaynak hızı, karıştırıcı uç dönme hızı ve karıştırıcı uç açısını sabit olarak almışlardır. Malzemeler birbirlerine aynı ve farklı alaşım çifti olarak kaynak yapılmıştır. Karıştırıcı uç, sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş ve uç konik bir profil olarak ve 3 adet yarım daire kanal açılarak tasarlanmıştır. Takım dönme hızı 1250 dev/dak, ilerleme hızı ise 160 mm/dak alınmıştır. AA1050 malzemenin tek ve çift taraflı kaynağın çekme mukavemeti sonuçları aynı olup ana malzemeye göre bir miktar düşüş olduğu tespit edilmiştir. AA5754 malzeme ise tek taraflı kaynağın çekme mukavemeti yarı yarıya düştüğü, çift taraflı kaynaktan sonra ana malzemeye yaklaşıldığı bulunmuştur [12].

Heidarzadeh ve arkadaşları, AA 6061-T4 alüminyumun SKK işleminde matematiksel bir model geliştirerek çekme özelliklerini %95 güvenilirlik seviyesinde elde etmişlerdir. Kaynak parametreleri olarak takım dönme hızı, takım ilerleme hızı ve eksenel yükler seçilmiştir. Maksimum çekme dayanımı 920 dev/dak takım dönme hızı, 78 mm/dak takım ilerleme hızı ve 7,2 kN eksenel yükte elde edilmiştir. Maksimum uzama ise 1300 dev/dak takım dönme hızı, 60 mm/dak takım ilerleme hızı ve 8 kN eksenel yükte elde edilmiştir. Maksimum çekme dayanımı takım dönme hızının artması, ilerleme hızı ve takım eksenel yükün maksimum değerine çıkması ile artış gösterdiği ve sonra azaldığı değerlendirilmiştir [13].

Şık ve Kayabaş, AA1050 levhaları SKK yöntemiyle birleştirerek mekanik özelliklerini incelemiştir. Al levhalar değişik dönme hızları ve ilerleme hızlarında tek taraflı ve çift taraflı kaynakları yapılmıştır. Karıştırıcı uç dönme hızı ve ilerleme

hızı değişken olarak alınmıştır. Karıştırıcı uç malzemesi 2344 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiştir. İlerleme hızı sabit tutulduğunda, karıştırıcı uç dönme hızı artışı, malzemeye ısı girdisini arttırdığı ve malzemede sertlik ve çekme dayanımında düşüşler olduğu görülmüştür. Artan karıştırıcı uç dönme hızında; kaynak ilerleme hızı da artırılarak malzemedeki giren ısı miktarı azaltılmış, malzemenin mekanik özelliklerinde bir artış olduğu belirlenmiştir [14].

Kurt ve arkadaşları, Al malzemeleri SKK yöntemi ile 800 dev/dak dönme hızı ve 6,25-10-16 ve 20 mm/dak ilerleme hızlarında birleştirerek birleşme bölgesinin özelliklerini incelemişlerdir. Karıştırıcı uç AISI1050 çelikten ve helisel şekilde imal edilmiştir. Kaynak ilerleme hızı arttıkça sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Çekme testlerine göre numunelerin kaynak dikişinin dışından koptuğu bu bölgenin de toparlanma bölgesi ile ITAB arasındaki noktaya denk geldiği belirtilmiştir [15].

Sarsılmaz ve Özdemir, AA6061 ve AA7075 malzemeleri SKK yöntemi ile birleştirerek yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Karıştırıcı uçlar, vida ve üçgen olmak üzere K100 çeliğinden imal edilmiştir. Dönme hızı 1120,1400 dev/dak, ilerleme hızları ise 160, 200, 250 mm/dak değerleri alınmıştır. Vidalı ucun üçgen profildeki uca göre daha iyi mukavemet değerleri verdiği belirlenmiştir. Devir sayıları bakımından üçgen ve vidalı uç kullanılarak her iki devirde yapılan kaynaklarda kaynak bağlantılarının yorulma ömrü üzerinde önemli bir etkisi gözlenmemiştir [16].

A. Toktaş ve G. Toktaş, karıştırıcı uç yüksekliği ayarlanabilir bir takım AA6063 levhaları birleştirmişlerdir. Karıştırıcı uç omuz kısmı DIN 1.2714 sıcak iş çeliğinden, uç kısmı ise HSS-E hava çeliğinden, M6 kılavuzdan yapılmıştır. 800, 1120, ve 1600 dev/dak takım dönme değerleri, 200 ve 315 mm/dak ilerleme hız değerleri olarak seçilmiştir. Deneyler sonucunda takım tasarımına ve parametrelere bağlı olumsuz bir durum bulunmadığı, çekme özellikleri ve sertlik değişimleri esas metale çok yakın olduğu tespit edilmiştir [17].

Kwon ve arkadaşları, AA5052 alaşımı levhaları SKK yöntemi ile dönme hızı 500 ile 3000 dev/dak arasında değişen değerlerde, ilerleme hızı ise 100 mm/dak sabit değerde birleştirmişlerdir. Karıştırıcı uç saat yönünde döndürülmüştür. Bütün dönme hızlarında hatasız kaynaklar elde edilmiştir. Özellikle 1000, 2000 ve 3000 dev/dak

değerlerinde çok düzgün yüzey morfolojileri elde edilmiştir. 500, 1000 ve 2000 dev/dak değerlerinde kaynak bölgesinde soğan halkaları açıkça gözlenmiştir. Soğan halka yapılarının dönme hızı arttıkça genişlediği tespit edilmiştir. Karıştırılan bölgenin tane büyüklüğü ana metalden daha küçük olduğu, dönme hızının azalmasıyla azaldığı belirtilmiştir. Yüzey morfolojisi, dönme hızı arttıkça daha düzgünleşmiştir [18].

Çakır ve arkadaşları, SKK yönteminde kullanılacak alüminyum malzemeleri 370 MPa presleme basıncında alüminyum tozlardan imal etmişlerdir. Karıştırıcı uç dönme hızları 700-900-1100-1400 dev/dak, ilerleme hızı ise 6 mm/dak değerleri alınmıştır. Karıştırıcı uç Ç1050 malzemedan yapılmıştır. SKK işleminden sonra yapılan incelemelerde, ana metalden kaynaklı bölgeye sertlik değerinin arttığı tespit edilmiştir. Numunelerin mekanik ve metalografik özellikleri öncelikle kaynak bölgesinde ve ısı etkisi altındaki bölgede değişmiştir. Numunelere uygulanan çapraz kırılma testlerinde numuneler kaynak dikişinin hemen yanındaki ITAB bölgesinden kırılmıştır. 900 dev/dak dönme hızında ve 6 mm/dak ilerleme hızında SKK yöntemi ile birleştirilmiş numunelerde mekanik ve metalürjik olarak en iyi birleşme sağlanmıştır [19].

Sharma ve arkadaşları, AA7039 (T6) malzemeyi değişen ilerleme ve dönme hızlarında SKK yöntemi ile birleştirerek kaynak parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Mekanik özellikler takım ilerleme hızının azalmasıyla, dönme hızının artmasıyla artış göstermiştir. Yüksek ısı girişi ile kopmalar ilerleme yönünde ısı tesiri altında kalan bölgeden (ITAB) olduğu, düşük ısı giriş şartlarında ise kopmaların ilerleme yönünde kaynak bölgesinde zikzak çizgisi boyunca meydana geldiği tespit edilmiştir. Takım dönme hızının artması ve ilerleme hızının azalmasıyla zikzak çizgisi oluşumunun azalma eğiliminde olduğu belirtilmiştir. İlerleme hızının artmasıyla çekme mukaveti, % uzama özellikleri azalmıştır. İlerleme hızının artması ve takım dönme hızının azalmasıyla minimum sertliğin ısı tesiri altındaki bölgeden kaynak bölgesine kaydığı tespit edilmiştir [20].

2.2 Cu-Cu Malzeme Çifti İle Yapılan Çalışmalar

Lee ve Jung yaptıkları çalışmada, bakırın SKK yöntemi ile birleştirilmesinin uygulanabilirliğini göstermişlerdir. Bakır plaka 61 mm/dak ilerleme hızında ve 1250 dev/dak takım dönme hızında karıştırıcı uç olarak da takım çeliği kullanılarak kaynağı yapılmıştır. Karıştırıcı uca 3° açı verilerek saat yönünde dönme sağlanmıştır. Karıştırılan bölge ana malzemeye karşılaştırıldığında iyi bir tane yapısı gözlenmiştir. Isı tesiri altında kalan bölgede ana malzemeye göre tavlamanın etkisiyle daha iri tane yapısı tespit edilmiştir. Düşük kaynak hızında takım dönme hızı 1250 dev/dak değerinde optimum kaynak işlemi sağlanmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılan bakır numunelerin enine çekme mukavemeti ana malzemenin %87 değerine ulaşmıştır [21].

Hwang ve arkadaşları, saf bakırın (C11000) termal özelliklerini SKK işleminde deneysel olarak araştırmışlardır. İş parçasında K tipi termokupl kullanılarak farklı bölgelerde sıcaklıklar kaydedilmiştir. Başarılı bir SKK işlemi için 460°C ve 530°C arasında sıcaklıklar uygun olarak tespit edilmiştir. Karıştırıcı uç SKH9 yüksek hız çeliğinden yapılmıştır. Takım eğim açısı 1° alınmıştır. İki çeşit kaynak koşulu seçilmiştir. 800 dev/dak dönme hızı ve 30 mm/dak ilerleme hızı birinci koşulu, 900 dev/dak dönme hızı ve 50 mm/dak ilerleme hızı ikinci koşulu oluşturmuştur. Sıcaklık ilerleme bölgesinde, yığılma bölgesinden daha yüksek tespit edilmiştir [22].

Sun ve Fujii, ticari bakırın SKK işleminde karıştırılan bölgede yükün 1500 daN değerine artmasıyla ortalama tane büyüklüğü $3,8 \mu\text{m}$ olan mikroyapı elde edilmiştir. Yüksek yük değerlerinde dislokasyon oluşumu ilerlemiştir. Düşük değerde yüklemelerde azalan dönme hızına nazaran, yük değerlerinin artışıyla birleşmelerin mekanik özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiştir. Karıştırıcı uç malzemesi WC tabanlı alaşım alınmıştır. Bakırın oksidasyonunu önlemek için argon gazı kullanılmıştır. 650 mm/dak kaynak hızında 1000 daN'da dönme hızının azalmasıyla karıştırılan bölgede ortalama tane büyüklüğü $9,8 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir. Dönme hızının azalmasıyla yük değerinin artırılması mikroyapı üzerinde etkisinin çok büyük olduğu bulunmuştur [23].

Shen ve arkadaşları, bakır plakaların 600 dev/dak düşük dönme hızında SKK işleminin yapıldığı çalışmalarında kaynak hızının birleşme yerlerinin mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. SKK işlemi 600 dev/dak sabit dönme hızında 25-50-100-150 ve 200 mm/dak kaynak hızlarında yapılmıştır. Kaynak hızının artmasıyla kaynak bölgesindeki tane büyüklüğünün önce arttığı sonra düştüğü, termomekanik olarak etkilenen bölgenin darlaştığı ve iki bölgedeki sınırın belirginleştiği, ısı tesiri altındaki bölgenin ise hemen hemen değişmediği gözlenmiştir. Birleşme yerlerinin çekme mukavemeti ve uzama davranışlarının önce artış gösterdiği, kaynak hızının artmasıyla çekme mukavemeti ve uzama değerlerinin azalma gösterdiği, fakat kaynak hızının 25-150 mm/dak arasındaki değerlerde ise çok az etkilendiği bulunmuştur. Hatasız birleşmeler düşük kaynak hızlarında elde edilmiştir [24].

Xie ve arkadaşları, saf bakırın hatasız olarak düşük ısı girdilerinin sağlandığı 400-800 dev/dak dönme hızı ve 50 mm/dak ilerleme hızında SKK yapmışlardır. Dönme hızının 800 dev/dak değerinden 400 dev/dak değerine düşmesiyle kaynak bölgesinde tane büyüklüğü, 9 μm 'den 3,5 μm değerine azaldığı tespit edilmiştir [25].

Surekha ve Els-Botes, bakırın SKK işleminde yüksek mukavemet ve yüksek iletkenliği sağlamayı amaçlamışlardır. 50 ile 250 mm/dak değişen ilerleme hızlarında ve sabit dönme hızında (300 dev/dak) iyi bir tane yapısı elde etmişlerdir. İlerleme hızının 50 ile 250 mm/dak artışıyla kaynak ana bölgesindeki tane yapısı 9 μm 'den 3 μm azaldığı, sertlik 102'den 114 HV değerine artış gösterdiği tespit edilmiştir. Kaynak ana bölgesindeki tane büyüklüğünün azalmasıyla, akma mukavemeti, mikrosertlik ve çekme mukavemeti artış gösterdiği elde edilmiştir. Oda sıcaklığında ölçülen elektriksel özdirenç, ana malzeme ile numunelerin özdirençleri karşılaştırıldığında bir değişiklik olmadığını göstermiştir. Elektriksel özellikler etkilenmeden SKK yöntemi ile bakırın yüzey mukavemet özelliklerinde iyileşme sağlanmıştır [26].

Sakthivel ve Mukhopadhyay, bakır levhaların SKK ile birleştirilebilirliğini çalışmışlardır. 1000 dev/dak dönme hızı ve 30 mm/dak ilerleme hızında sürtünme karıştırma kaynağı yaparak mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemiştir. Kaynak bölgesinin iyi bir eş taneli yapıda olduğu, sertlik değerinin de ana metalden

yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Termomekanik olarak etkilenen bölgenin uzamış tanelerden oluştuğu, ısı tesiri altında kalan bölgede kaba taneli yapı ve bu nedenle de en düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. SKK yapılmış bakır birleşmeler ana malzeme ile karşılaştırıldığında %85 kaynak verimi elde edilmiştir [27].

Xue ve arkadaşları, saf bakır plakaların hatasız sürtünme karıştırma kaynağını düşük ısı giriş şartlarında sağlamışlardır. Birleşme yerlerinin mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Çok düşük ısı girişi şartlarında termomekanik etkilenen bölge fark edilebilir olup, yüksek ısı giriş şartlarında TMEB yeniden kristalleşmiş tane yapısına sahip olduğu gözlenmiştir. Isı tesiri altında kalan bölgenin tane yapısı (ITAB) ana metal ile karşılaştırıldığında biraz kaba yapıda olduğu belirtilmiştir. Karışma bölgesinin (SZ) sertliği ısı girişinin artmasıyla artmış, en düşük sertlik kaynağın başarısız olduğu ITAB bölgesinde elde edilmiştir [28].

2.3 Al-Cu Malzeme Çifti İle Yapılan Çalışmalar

Saeid ve arkadaşları, 1060 alüminyum alaşımı ve ticari saf bakır sürtünme karıştırma bindirme kaynağı ile birleştirerek kaynak hızının arayüzey morfolojisi, mikroyapı ve birleşme mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. SKK karıştırıcı uç sertleştirilmiş çelik olup, birleştirmeler saat yönünde 1180 dev/dak dönme hızında ve 30,60,95,118,190,300,375 mm/dak kaynak hızında yapılmıştır. Karıştırıcı uca plaka yönünde 3° açı verilmiştir. Kaynak bölgesinde Al_4Cu_9 ve Al_2Cu ve bir miktar mikroçatlaklardan oluşan intermetalik fazlar tespit edilmiştir. Kaynak hızının artmasıyla mikro çatlakların sıklığı azalmıştır. 118 ve 190 mm/dak yüksek kaynak hızlarında yetersiz ısı girdisinin sonucu olarak çukurlar oluştuğu bulunmuştur. Çekme test sonuçlarına göre maksimum kopma gerilmesi 95 mm/dak kaynak hızında ortaya çıkmıştır. Bu kaynak hızında kaynakta çukurlar oluşmamış ve birkaç mikroçatlak gözlenmiştir. 300 ve 375 mm/dak oldukça yüksek kaynak hızlarıyla yapılan çalışmalarda çok zayıf metalik bağlanma elde edilmiştir [29].

Xue ve arkadaşları, 1060 alüminyum ve bakırın SKK kaynağında kaynak parametrelerinin yüzey morfolojisine, arayüzey mikroyapısına ve mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Kaynaklar saate ters yönde 400-1000 dev/dak dönme hızında ve 100 mm/dak ilerleme hızında yapılmıştır. Pim konum değerleri 0

mm ile 3 mm arasında birkaç değerde seğilmiştir. Yüksek dönme hızlarında ve 2-2,5 mm pim konumunda iyi çekme özellikleri elde edilmiş, 2 mm pim konumu değeri ve 600 dev/dak dönme hızında 180° eğme testlerinde kırılma oluşmadığı tespit edilmiştir. Al-Cu 400,600 dev/dak düşük dönme hızlarında arayüzey ince, üniform ve sürekli bir yapıda iken; 800,1000 dev/dak yüksek dönme hızlarında arayüzey gelişmekte ve kalın bir fazda oluşmaktadır. Al-Cu kaynaklarında yeterli karışım yüksek dönme hızlarında ve zayıf pim konumu değerlerinde (2-2,5 mm) elde edilmiş ve iyi çekme özellikleriyle sonuçlanmıştır [30].

Abdollah-Zadeh ve arkadaşları, 1060 alüminyum alaşımı ve saf bakırın SKK bindirme kaynağında mikroyapı ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Dönme hızları 750-1500 dev/dak ve ilerleme hızı 30-375 mm/dak aralığında seçilmiştir. Kaynak bölgesinde farklı morfolojilerde ve özelliklerde birçok mikroyapılar gözlenmiştir. Arayüzey bölgede Al_4Cu_9 , AlCu ve Al_2Cu tespit edilmiştir. Karıştıracı uç temperlenmiş takım çeliği olup 3° eğim açısı verilmiştir. Kaynak bölgesi ve alüminyumun ana metali arasında termomekanik etkilenen bölge ve ısıl etkilenen bölge gözlenmiştir. Oldukça düşük dönme hızları ya da oldukça yüksek ilerleme hızlarında hatalı birleşmeler meydana geldiği bulunmuştur [31].

Ouyang ve arkadaşları, SKK yöntemi ile alüminyum alaşımının (6061) bakırla kaynağında mikroyapı değişikliği ve sıcaklık dağılımını üzerinde yaptıkları çalışmada, mekanik olarak karışan bölgede $CuAl_2$, CuAl ve Cu_9Al_4 gibi intermetalik bileşikler tespit etmişlerdir. Dönme hızı 151-1400 dev/dak, ilerleme hızı 57-330 mm/dak değerleri alınmıştır. Vida geometrisi ve batma derinliği sabit olarak seçilmiştir. Sıcaklıklar K tipi ısıl ölçerler ile farklı pozisyonlarda (8-25 mm) alüminyum plaka tarafındaki küçük delikler (2,5 mm çaplı) vasıtasıyla ölçülmüştür. Direkt olarak 6061 alüminyum alaşımının SKK yöntemiyle bakırla kaynağı, kaynak bölgesinde oluşan kırılğan intermetalik fazlardan dolayı zor olduğu ortaya çıkarılmıştır [32].

Liu ve arkadaşları, bakır (T2) ve alüminyum alaşımını (5A06) SKK yöntemi ile kaynak yaptıktan sonra mikroyapı, mekaniksel özellikler ve faz oluşumlarını incelemişlerdir. Karıştıracı uç dönme hızı 950-1180 dev/dak, ilerleme hızı 150-235 mm/dak seçilmiştir. Çalışmalarda takım dönme hızının 950 dev/dak ve ilerleme hızının 150 mm/dak değerlerinde olduğu zaman, yüksek kalitede kaynaklı

birleşmeler elde etmişlerdir. Kaynaklı birleşmede kaynak bölgesinin alüminyum tarafında bakır ve alüminyumun karışmış yapı özellikleri oluşturduğu tespit edilmiştir. Kaynak ana bölgesinde yeni bir bakır-alüminyum intermetalik bileşik tespit edilmemiştir. Bu sonuç bakır ve alüminyum kaynak bölgesinin plastik olarak karıştığını göstermiştir [33].

Barlas ve Uzun, saf bakır (Cu) ve alüminyum (AA1050) levhaların, 515 dev/dak sabit takım devir hızında ve farklı kaynak hızlarında sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilebilirliklerini inceledikleri çalışmada 12 dev/dak kaynak hızında başarılı bir Cu/AA1050 birleştirmesi elde edilebilirken, kaynak hızının 30 ve 50 mm/dak değerine artmasıyla oldukça zayıf birleştirmeler gerçekleştirmişlerdir. Takım saat yönünde döndürülmüştür. Yüksek kaynak hızlarının uygulandığı (30 ve 50 mm/dak) Cu/AA1050 birleştirmelerinde, kaynak işlemi sırasında ve hemen sonrasında, kaynak merkezi boyunca çatlama ve ayrılmalar meydana geldiği, kaynak hızının 12 mm/dak değerinde birleştirmelerde herhangi bir çatlama, kırılma vb. hatalar görülmediği belirtilmiştir. XRD incelemelerinde $AlCu$, Al_2Cu_3 , $AlCu_4$ ve Al_4Cu_9 intermetalik fazlar tespit edilmiştir [3].

Genevois ve arkadaşları, bakır ve AA1050 malzeme çiftinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirildiği çalışmada, karıştırıcı uç alüminyum plaka tarafında tutularak deneyleri yapmışlardır. Bu durumda iki malzeme arasında mekanik olarak bir karışma olmadığı, sürtünme ısı sonucu bakır/alüminyum ara yüzeyinde büyük miktarda termal hareketlilik sonucu difüzyon sağlandığı belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak hatasız birleşme sağlanarak, bakır/alüminyum arayüzeyinde çok ince intermetalik bir tabaka meydana geldiği tespit edilmiştir. Al_2Cu ve Al_4Cu_9 fazları tespit edilmiştir [34].

Xue ve arkadaşları, AA1060 serisi alüminyum ve ticari saf bakır levhaları, karıştırıcı ucun alüminyum tarafına kaydırılması ile sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış ve ince, sürekli, düzgün bir Al-Cu intermetalik tabakanın oluşumuyla Al-Cu arayüzeyinde çok iyi metalürjik bağlanma sağlamışlardır. Kaynak bölgesinde birçok intermetalik fazların oluşmasıyla kompozit bir yapı sağlanmıştır. Çekme testleri sonucu, sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış numunelerin alüminyum tarafındaki ısı tesiri altında kalan bölgede koptuğu tespit edilmiştir [35].

2.4 Diğer Malzeme Çiftleri İle Yapılan Çalışmalar

Uzun ve Özbekmez, SKK ve elektrik ark kaynak yöntemi kullanarak CuZn30 alaşımı levhaları birleştirerek karıştırıcı ucun ilerleme hızı sabit tutulup dönme hızının birleştirme özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Elektrik ark kaynak yöntemi ile birleştirilen levhaların mukavemet değerleri, SKK tekniği ile birleştirilenlerden daha düşük çıktığı bulunmuştur. Bu durumun elektrik ark kaynak işlemi sırasında çinkonun belirli bir miktarının buharlaşması olarak belirtilmiştir. CuZn30 alaşımı levhaların seri üretimi için sürtünme karıştırma kaynak tekniğinin kullanılması, tamir bakım amaçlı birleştirmeler için ise elektrik ark tekniğinin kullanılması önerilmiştir [36].

Bilici ve Yükler, polietilen levhaların sürtünme karıştırma kaynağında kaynak parametrelerinin ve takım özelliklerinin mukavemet üzerindeki etkisini çalışmışlardır. Birleştirmelerde, farklı omuz geometrileri, farklı pim uzunlukları, pim açıları ve iç bükeylik açılara sahip 6 farklı takım pim profillerini (silindirik, konik, vidalı silindirik, üçgen, kare ve hegzagonal) kullanmışlardır. Oda sıcaklığında yapılan çalışmalarda, kuvvetler ve kaynak bölgesinin sıcaklık ölçümü de yapılmıştır. Takım dönme hızı, takım batma derinliği ve bekleme süresi kaynak parametreleri olarak belirlenmiştir. Takım pim profilinin birleştirme mukavemetleri üzerinde çok önemli olduğu ve en iyi sonucun 15° pim açısına sahip konik silindirik pimde elde edildiği bulunmuştur. En düşük mukavemet ise düz silindirik pimde elde edilmiştir [37].

Forcellese ve arkadaşları, ince levha şeklindeki AZ31 magnezyum alaşımının SKK yöntemiyle birleştirilmesinde takım geometrisi ve büyüklüğünün işlem parametrelerine etkisini araştırmışlardır. Pimli ve pimsiz olarak farklı omuz çaplarında karıştırıcı uç tasarlamışlardır. 2000 ile 3000 dev/dak değişen dönme hızları ve 30 ile 70 mm/dak değişen ilerleme hızlarında ve 2° eğim açısında kaynaklar yapılmıştır. 8 mm omuz çapına sahip pimli takım, pimsiz takıma göre daha yüksek çekme mukavemeti ve süneklik değeri elde etmişlerdir. Omuz çapının artmasıyla (19 mm) birleşmelerin süneklik ve mukavemeti üzerine etkisi daha etkili olduğu ve pimli takımın işlem parametrelerinden etkilendiği tespit edilmiştir. Pimli ve pimsiz SKK işlemlerinde farklı metal akışlarının olduğu belirlenmiştir. Pimsiz takımlarda daha homojen bir mikroyapı elde edilmiştir [38].

Bilgin ve Meran, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliği SKK işleminde takım dönme hızı ve ilerleme hızının etkisini araştırmışlardır. Takım dönme hızı 560-1400 dev/dak değerleri aralığında, ilerleme hızlarını da 80-200 mm/dak değerleri aralığında seçmişlerdir. Kuvvet 3,5 kN ve açı 0° olarak sabit tutulmuştur. Takım malzemesi olarak üçgen profilli K100 malzemesi kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümlerinde takım dönme hızındaki artışla sıcaklığın arttığı tespit edilmiştir. Tersine olarak ilerleme hızı arttığında ise sıcaklığın düştüğü bulunmuştur. Çentik darbe enerjisi takım dönme hızının artışıyla azaldığı, takım ilerleme hızının artmasıyla arttığı elde edilmiştir. En iyi mekanik dayanımlar kuvvet 3,5 kN ve takım açısı 0° sabit tutularak, takım dönme hızı 1120 dev/dak değerinde ve ilerleme hızı 125 mm/dak değerinde elde edilmiştir [39].

Bozkurt ve arkadaşları, AA2124/SiCp/25 kompozit levhaları yüksek hız çeliğinden imal edilen karıştırıcı uç kullanarak karışım bölgesinde oluşabilecek fazları araştırmışlardır. Takım aşınması üzerine 40 mm/dak ve 100 mm/dak değerlerini seçerek düşük ve yüksek takım ilerleme hızlarını kullanmışlardır. Takım dönme hızı 900 dev/dak, takım eğim açısı 2° ve takım dönme yönü saat yönünde alınmıştır. Sabit takım dönme hızında, takım ilerleme hızının 40 mm/dak değerinden 100 mm/dak değerine arttırılması ile karıştırıcı ucun uç kısmında %10, kök kısmında ise %5'lik aşınma kaybı olduğu belirlenmiştir. Yüksek ilerleme hızlarında yapılan çekme mukavemet değeri düşük ilerlemede yapılan kaynağa göre daha düşük çıktığı tespit edilmiştir [40].

Park ve arkadaşları, %60 Cu-%40 Zn alaşımı (60/40 pirinç) malzemenin sürtünme karıştırma kaynağında birleştirmelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Bütün kaynaklarda 3°'lik takım eğim açısı kullanılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde kaynak bölgesinde bir takım deformasyonlu tane yapısı ile birlikte oldukça iyi tane yapısı ve termomekanik olarak etkilenen bölgede uzamış tane yapısı gözlenmiştir. Karıştırılan bölgenin içindeki sertlik değerleri bütün kaynak koşullarında ana metalden yüksek olup, ısı girişinin azalmasıyla artış göstermiştir. Aynı bölgenin mukavemet değerleri ise sertlik değerlerinin değişimi ile uyumluluk göstermiştir [41].

Xie ve arkadaşları, pirinç malzemeyi (62/38), sürtünme karıştırma kaynağı ile 400-600-800-1000 dev/dak takım dönme hızında ve sabit takım ilerleme hızında

(100 mm/dak) başarılı bir şekilde birleştirmişlerdir. Kaynak bölgesinin kısmen ve tamamen yeniden kristalleşmiş bölgelerden oluştuğu belirtilmiştir. Dönme hızının artmasıyla yeniden kristalleşmeyen bölge yapılarının oranının azaldığı, rekristalizasyon yapılarının boyutunun arttığı gözlenmiştir. Kaynak bölgesinin sertlik değerleri ana metalden yüksek çıkmıştır. Dönme hızının artmasının çekme ve akma mukavemetleri üzerinde kayda değer bir etki yapmasa da uzamayı attırmıştır. Çekme ve akma mukavemetleri ana metalin sırasıyla %99 ve %80 değerlerine ulaştığı belirtilmiştir. Kopmaların en düşük sertliğe sahip ısı tesiri altında kalan bölgeden olduğu tespit edilmiştir [42].

Esmaceli ve arkadaşları, sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin alüminyum 1050/pirinç (%70Cu-%30Zn) malzeme çiftinin kaynağında mekanik ve metalürjik özelliklere etkisini incelemiştir. Çalışılacak parametreler olarak takım dönme hızı, takım kaydırma değerleri, takım ilerleme hızı ve takım batma derinliği olarak belirlenmiştir. Takım dönme hızı 200-450-650-900 dev/dak, eğim açısı 1,5° ve takım kaydırma değeri alüminyum tarafına 0-1-1,6-1,8 mm alınmıştır. İlerleme bölgesinde pirinç malzeme, yığılma bölgesine alüminyum malzeme yerleştirilmiştir. Ana metal alüminyumun %80 değerinde olarak çekme mukavemeti elde edilmiştir. Düşük takım dönme hızlarında intermetalik fazın oluşmadığı, hızın artmasıyla fazın kalınlaştığı belirtilmiştir. Sağlam birleştirmelerin kaynak bölgesinde alüminyumun intermetalik ve pirinç partiküllerinden meydana gelen kompozit bir yapı oluşturduğu ifade edilmiştir [43].

Çam ve arkadaşları, %90 Cu-%10 Zn ve %70 Cu-%30 Zn pirinç malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı uygulanabilirliğini araştırmışlardır. 1600 dev/dak takım dönme hızında 160-210 ve 260 mm/dak takım ilerleme hızlarında kaynak işlemi yapılmıştır. Her iki malzeme için takım ilerleme hızının birleştirmeye etkisi incelenmiştir. En yüksek performans 210 mm/dak takım ilerleme hızında elde edilmiştir. 90/10 pirinç malzemenin kaynağı ana malzeme gibi mekanik özellikler sergilemiştir. Mukavemet ve elastikiyet performansları açısından en iyi kombinasyon 1600 dev/dak takım dönme hızında ve 210 mm/dak takım ilerleme hızında elde edilmiştir [44].

3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ VE KAYNAĞI

3.1 Alüminyumun Özellikleri

Alüminyum, oksijen ve silisyumdan sonra dünya kabuğunda en yaygın bulunan elementtir. Saf alüminyum nispeten yumuşak ve zayıf olup endüstriyel uygulamalarda bu yüzden alaşımlandırılmış halde kullanılır.

Alüminyumun elektriksel iletkenliği %61, yüksek saflıkta (%99,99) alüminyumun ise yaklaşık %65'dir. Düşük özgül ağırlığı nedeniyle alüminyumun iletkenliği, tavlanmış bakırınkinin %201'ine varmaktadır. İlave elementler bu iletkenliği azaltır.

Isıl iletkenliği de göreceli yüksek olup, bakırın ısıl iletkenliğinin %61'i kadardır. Bu da element ilavesiyle düşer.

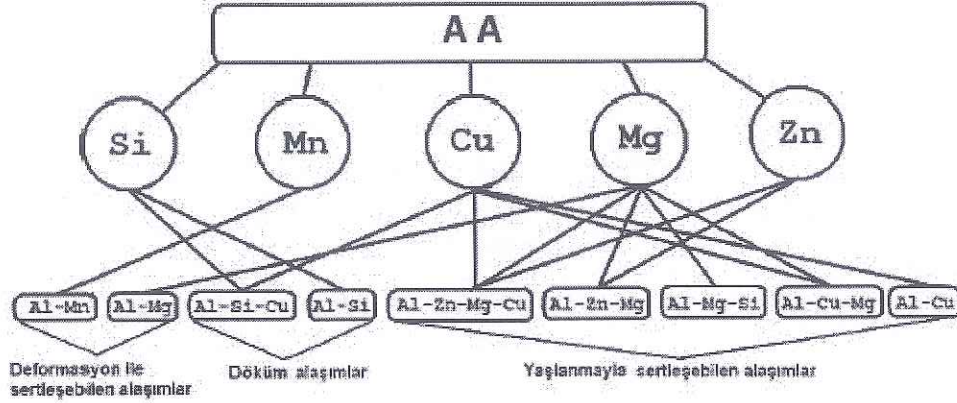
Alüminyum, herhangi başka metale göre daha yüksek ışık yansıtma ve ısı yayımı kabiliyetine sahiptir. Yüksek saflıkta alüminyum levha %80'den fazla ışık yansıtma özelliği vardır. Ultraviyole ışığını yansıtma kabiliyeti nedeniyle güneş ışınlarının tahribatına karşı koruyucu olarak alüminyum boyaları kullanılmaktadır.

Alüminyum alaşımları, bileşimlerine göre yaklaşık 450-650°C arasında ergimeye ve 93 °C gibi düşük bir sıcaklıkta yumuşayıp zayıflamaya başlar. Diğer yandan da bazı bileşimler yaklaşık 200 °C'ye kadar mukavemetlerini oldukça iyi korurlar.

Mukavemetle sertlik ve de elastikiyet modülü, artan sıcaklıklarla azalır. Sıcaklık arttıkça kopma uzaması da artar ve bu, neredeyse sifıra düştüğü ergime noktasına kadar devam eder. Mekanik özellikler, ısı sıfırın altına indiğinde genellikle iyileşir. -195 °C'ye kadar sıcaklıklarla yapılmış deneyler, mukavemet ve uzamanın, sıcaklık düştükçe arttığını göstermiştir. Bütün hallerde, sıcaklık -195 °C'ye kadar indiğinde, elastikiyet modülü yükselir [45].

3.2 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları temel üretim yöntemlerine göre, dövme ve döküm alaşımları olmak üzere ikiye ayrılır. Dövme ve döküm alaşımları da element bileşimlerine göre alt sınıflara ayrılmaktadır. Şekil 3.1’de alüminyum alaşımlarının genel bileşimleri verilmiştir.



Şekil 3.1: Alüminyumda alaşım elementlerinin genel bileşimleri [2]

3.2.1 Dövme Alüminyum Alaşımları

Bu alaşımlar, isimlendirilmesinden de anlaşılacağı gibi; dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi plastik şekil verme yöntemleriyle üretilmektedirler. Dört rakamlı sayısal simgenin ilk rakamı, hangi temel alaşım elementini içeren alüminyum alaşımı olduğunu belirtir. 1XXX dizisi saf alüminyum (% 99,00) gösterir. Son iki rakam % 99 değerinin noktadan sonraki rakamlarını belirtir. Soldan ikinci rakam ise, özel olarak denetlenen katkı elementlerin sayısını belirtir ve 1’den 9’a kadar değişebilir. 2XXX’den 8XXX’e kadar olan alüminyum alaşımlarında ilk rakam alaşım türünü, ikinci rakam değişimleri simgeler, son iki rakamın özel bir anlamı yoktur. Alaşımı dizideki diğer alaşımlardan ayıran sıra numarası gibi kullanılır. Tablo 3.1’de çeşitli alüminyum serileri, ısıl işlem durumları ve oluşturdukları alaşım grupları verilmiştir. Genellikle dövme alüminyum alaşımların sınıflandırılması alaşım elementlerinin katkılarına göre yapılırken, aynı zamanda ısıl işlem uygulanabilirliği (yaşlandırma) açısından da bu alaşımlar ele alınmaktadır.

Tablo 3.1: Döğme alüminyum ve alaşımlarının sınıflandırılması [2]

| | | |
|---|------|-------------------|
| Alaşımsız alüminyum | 1XXX | Yaşlandırılabilir |
| Alüminyum bakır alaşımı | 2XXX | Yaşlandırılabilir |
| Alüminyum mangan alaşımı | 3XXX | Yaşlandırılabilir |
| Alüminyum silisyum alaşımı | 4XXX | Yaşlandırılmaz |
| Alüminyum magnezyum alaşımı | 5XXX | Yaşlandırılmaz |
| Alüminyum-silisyum-magnezyum alaşımı | 6XXX | Yaşlandırılabilir |
| Alüminyum çinko alaşımı | 7XXX | Yaşlandırılabilir |
| Alüminyum ve diğer elementler (lityum vs.) | 8XXX | Yaşlandırılabilir |
| Boş | 9XXX | |

Alüminyum alaşımlarının üretiminde en fazla kullanılan metaller bakır, silisyum, mangan, magnezyum ve çinkodur. Bu metaller, arzu edilen nitelikteki ürünü imal edebilmek için alüminyum alaşımına, tek veya bileşik halde ilave edilebilirler [2].

3.2.1.1 1xxx Serisi Alaşımlar

% 99 veya daha yüksek saflıktaki alüminyum özellikle elektrik ve kimyasal alanda geniş bir kullanıma sahiptir. Bu çeşit alüminyum mükemmel korozyon direnci, yüksek termal ve elektriksel özellikler, düşük mekanik özellikler ile mükemmel bir şekillendirme kabiliyetine sahiptir. Deformasyon sertleşmesi ile orta derecede mukavemet artışı sağlanabilir. Demir ve silisyum çoğunlukta olan empuritelerdir. Bu gruptaki alüminyumun uygulama alanları kimyasal ekipmanlar, reflektörler, ısı değiştirgeçleri, elektriksel iletkenler ve kapasitörler, paketleme folyoları, mimari uygulamalar ve dekoratif şekillerdir.

3.2.1.2 2xxx Serisi Alaşımlar

Bu grup alüminyum alaşımlarında bakır temel alaşım elemanıdır. Optimum özellikler için bu alaşımlara çökeltme ısıl işlemi uygulanır.

2XXX grubu alaşımlar 6zellikle y6ksek mukavemet/ağırlık oranlarının gerekli olduğu parçalar ve yapılar için uygundur. Çoğunlukla araç ve uçak tekerlerinde, araçların süspansiyon parçalarında, uçak gövdelerinde ve 150°C'ye kadar olan sıcaklıklarda dayanım gerektiren parçalarda kullanılmaktadır. Bu alaşımların kaynaklanabilirliği kısıtlıdır, ancak bu gruptaki bazı alaşımlar üstün işlenebilirlik özelliğine sahiptirler.

3.2.1.3 3xxx Serisi Alaşımlar

Bu grubun ana alaşım elemanı mangandır. Bu alaşımlara genellikle ısı işlem uygulanamaz. Bu alaşımlar katı eriyik sertleşmesi ile mukavemet kazanmışlardır. 1XXX grubundaki alaşımlardan yaklaşık %20 daha fazla mekanik dayanıma sahiptirler. Alüminyuma sadece sınırlı bir yüzde oranında (yaklaşık % 1,5'a kadar) mangan efektif olarak ilave edilir. Bununla birlikte, bu gruptaki üç cins alaşım (3003, 3004 ve 3105) iyi işlenebilirlik gerektiren orta mukavemet uygulamalarında genel amaçlar için kullanılırlar. Bu gruptaki alaşımlar, mutfak gereçleri, ısı değiştirgeçleri, depolama tankları, mobilya, anayol işaretleri, çatı ve kenar kaplamalar ve diğer mimari uygulamalarda kullanılırlar.

3.2.1.4 4xxx Serisi Alaşımlar

Bu grubun ana alaşım elemanı silisyumdur. Silisyum alüminyuma yeterli miktarlarda (% 12'ye kadar) ilave edilerek alaşımı gevrekleştirmeden ergime sıcaklığının azalmasına neden olur. Bu nedenle, alüminyum-silisyum alaşımları alüminyum birleştirmede esas metalin ergime sıcaklığından daha düşük ergime aralıklarında sert lehim alaşımı olarak ve kaynak telinde kullanılırlar. Bu gruptaki alaşımların çoğuna ısı işlem uygulanamaz. Fark edilir miktarlarda Si içeren alaşımlar anodik oksitlemeden sonra koyu gri renge dönüşür. 4032 alaşımı düşük ısı genleşme katsayısı ve yüksek aşınma direncine sahiptir, bu nedenle bu alaşım döğme motor pistonlarının üretimine uygundur.

3.2.1.5 5xxx Serisi Alaşımlar

Bu grubun ana alaşım elemanı alüminyumda çok etkili ve geniş oranda kullanılan magnezyumdur. Magnezyum ana alaşım elemanı olarak veya mangan ile birlikte kullanıldığında ortaya çıkan alaşım orta veya yüksek dayanımlı ve yaşlanma ile sertleşmeyen alaşımdır. Magnezyum mangandan daha etkili bir katı eriyik sertleştiricidir. % 0,8 civarında magnezyum ilavesi ile elde edilen sertlik değeri yaklaşık % 1,25 mangan ilavesi ile sağlanabilir. Bu gruptaki Al alaşımları iyi kaynak özelliklerinin yanında deniz ortamında iyi bir korozyon direncine sahiptirler. Bununla birlikte, gerilmeli korozyon çatlamasını engellemek için yüksek magnezyumlu alaşımlarda müsaade edilen güvenli işlem sıcaklıklarında (yaklaşık % 3,5 üzerinde magnezyum içeren alaşımlarda 65°C'nin üzerindeki işlem sıcaklıklarında) ve soğuk deformasyon miktarında belirli kısıtlamalar yapılmalıdır. Bu seri alaşımlar, mimari uygulamalarda, dekoratif ve süsleme amaçlı uygulamalarda, gemilerde ve ev aletlerinde kullanılmaktadırlar.

3.2.1.6 6xxx Serisi Alaşımlar

Bu alaşımlar, iç yapılarında magnezyum silikat (Mg_2Si) oluşturacak oranlarda Mg ve Si içeren ısıl işlem uygulanabilen alaşımlardır. 2XXX ve 7XXX serisi alaşımları kadar dayanıklı olmasalar da, 6XXX serisi alaşımlar şekillendirilebilen, kaynaklanabilir, işlenebilir ve korozyon dirençli orta dayanımlı alaşımlardır. Isıl işlem uygulanabilen bu gruptaki alaşımlara çözeltiye alma işleminden sonra yapay yaşlandırma işlemi (T6 işlemi) uygulandığında alaşımların dayanımları önemli ölçüde arttırılabilir. Mimari uygulamalar, ulaşım endüstrisi, köprüler ve kaynaklı yapılar bu alaşımların uygulama alanlarıdır.

3.2.1.7 7xxx Serisi Alaşımlar

% 1–8 arasındaki çinko 7XXX grubundaki Al alaşımlarında önemli bir alaşım elemanıdır. Magnezyum ile beraber kullanıldığında yüksek dayanımlı yaşlanabilir alaşımlar elde edilir. Çoğunlukla bakır ve krom gibi diğer elementler de küçük

miktarlarda ilave edilir. 7XXX alaşımları uçak gövde yapılarında, yüksek gerilme altında çalışan parçalarda kullanılmaktadır [46].

3.2.1.8 8xxx Serisi Alaşımlar

Son yıllarda özellikle uzay ve uçak sanayisi için düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli malzemeye duyulan talep, Al-Li alaşımlarını ön plana çıkarmıştır. Al-Li alaşımları düşük yoğunluğun yanında, yüksek elastisite modülü, yüksek yorulma direnci, düşük ve yüksek sıcaklıklarda tokluk özellikleri ile dikkat çekmektedir. Lityumun alüminyum alaşımlarına ilavesinin başlıca nedeni, yoğunluğun azalması ve buna karşın elastiklik modülündeki artışın sağlanmasıdır. Alüminyuma her % 1 Li ilavesinde alaşımın yoğunluğu % 3 azalırken elastiklik modülü ise % 6 oranında artmaktadır. Geleneksel olarak % (1,0-2,0) arasında lityum içeren alaşımlar ısıl işleme tabi tutulabilir. Hızlı katılaşma yöntemi ile % 4 kadar Li ilave edilebilir, bu da yüksek mukavemete ve daha düşük ağırlığa neden olabilir. Lityum içeren alüminyum alaşımlarının diğer geleneksel alüminyum alaşımlarına göre üç dört kat daha yüksek olan üretim maliyetleri nedeniyle; aktif kullanım açısından bu alaşımlar, hem ekonomik hem de teknolojik açıdan geliştirilmeye çalışılmaktadır [2].

3.2.2 Döküm Alüminyum Alaşımları

Bu alaşımların en nemlilerinde, Al-Si faz diyagramındaki ötektik noktanın bileşimi esas alınmıştır. Ötektik Alüminyum-Silisyum alaşımları dayanım özelliklerinin iyi olması yanında, üstün döküm özelliklerine de sahiptirler.

Ötektik Alüminyum-Silisyum-Magnezyum alaşımlarına kelme sertleşmesi uygulanabilir. Alüminyum- Silisyum-Bakır alaşımları da kelme sertleşmesi gösterirler. Böylece 0,2 sınırı 200 N/mm^2 'ye kadar ulaşabilir. İçten yanmalı kuvvet makinaları için geliştirilen alüminyum piston alaşımlarından bazıları ötektik üstü bileşimdedir [47].

3.3 Alüminyum ve Alaşımlarının Isıl İşlem Özellikleri

Katı durumdaki bir metal veya alaşımda yapı ve özelliklerin düzeltilmesi amacıyla yapılan kontrollü ısıtma ve soğutma işlemlerinin tümüne ısıtma işlemi adı verilmektedir. Alüminyum alaşımlarının ısıtma işlemi genellikle çökeltme (yaşlanma) ile alaşımların mukavemet ve sertliğini yükseltmeyi amaçlar. Çökeltme işlemi uygulanarak mukavemet ve sertliği artırılabilen alüminyum dövme ve Al-döküm alaşımları sertleştirilir, diğer Al-alaşımları ise sertleştirilmeyen olarak bilinir. Isıtma işlemi uygulanamayan serilere en iyi örnek; 1xxx, 3xxx ve 5xxx serileri verilebilir. Isıtma işlemi uygulanamayan alaşımlar öncelikle soğuk işlem veya katı eriyikle sertleştirilirler. Her iki işlem grubunda da malzemenin yumuşatılması için ısı kullanılır. Özellikle 2000 serisi ve 7000 serisi alüminyum alaşımlarının yüksek mekanik özellikleri ısıtma ya da termomekanik işlemlerle kazandırılmaktadır. Tablo 3.2 ve 3.3’de yaşlandırılmayan ve yaşlandırılabilir alüminyum alaşımlara uygulanan ısıtma işlemleri verilmiştir.

Tablo 3.2: Yaşlandırılmayan alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıtma işlemleri [2]

| Sembol | Açıklaması |
|--------|---|
| F | Üretim-ürünlerde hiçbir özel ısıtma kontrol veya sertleştirme koşulları kullanılmayan şekillendirme sistemi |
| O | Tavlama-uygulanan tav, en düşük mukavemet koşullarını, süneklik ve boyutsal kararlılığı sağlamak için uygulanır. |
| H | Şekil değiştirme sertleştirme-soğuk şekillendirme ile üretilen ürünlere uygulanır. Şekil değiştirme sertleşmesini, mukavemeti bir miktar düşüren ek ısıtma işlemi uygulanması takip eder. H’yi genelde iki veya daha çok sayı takip eder. |
| W | Çözültü alma ısıtma işlemi-kararlı olmayan alaşımlara yalnızca çözültü alma tavlamasından sonra oda sıcaklığında kendiliğinden yaşlanmayı sağlayan tav uygulanır. |
| T | Isıtma işlemi-F.O.H’den daha kararlı tav sağlamak içindir. Ürünlere tav uygulaması bazen sabit sertlik derecesi sağlamak için şekil değiştirme sertleştirmeyle birlikte uygulanır. |

H harfinden sonraki ilk rakam temel işlemi tanımlamaktadır.

H1 - Sadece şekil değiştirme sertleştirme

H2 - Şekil değiştirme sertleştirme ve yapay yeniden kristalleştirme

H3 - Şekil değiştirme sertleştirme ve yapı dengeleme

H4 - Şekil değiştirme sertleştirme ve parlatma veya boyama

H harfinden sonraki ikinci harf şekil değiştirme sertliğinin derecesini tanımlamaktadır.

Hx2 - Dörtte bir

Hx4 - Yarım sert

Hx6 - Üç-çeyrek sert

Hx8 - Tam sert

Hx9 - Çok sert

Tablo 3.3: Yaşlandırılabilen alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler [2]

| Sembol | Açıklaması |
|--------|---|
| T1 | Ekstrüzyon gibi yüksek sıcaklıkta şekil verilmiş parçalar soğutulduktan sonraki doğal yaşlandırma |
| T2 | Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve ardından doğal yaşlandırma |
| T3 | Çözeltiye alma ısı işlemi, soğuk şekillendirme ve doğal yaşlandırma |
| T4 | Çözeltiye alma ısı işlemi ve doğal yaşlandırma |
| T5 | Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra yapay yaşlandırma |
| T6 | Çözeltiye alma ısı işlemi ve yapay yaşlandırma |
| T7 | Çözeltiye alma ısı işlemi ve stabilizasyon (aşırı yaşlandırma) |
| T8 | Çözeltiye alma ısı işlemi, soğuk şekillendirme ve yapay yaşlandırma |
| T9 | Çözeltiye alma ısı işlemi, yapay yaşlandırma ve soğuk şekillendirme |
| T10 | Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve sonra yapay yaşlandırma |

3.4 Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynağı

İmalat tekniğinde amaç, yalnızca malzemelerin birleştirilmesiyle parça elde edilmesi değildir. Aynı zamanda yapılan parçanın çalışma şartlarında bozulmaması ve görevini yerine getirmesi gerekir. Bu sebepten, kaynaklı bağlantılardan da bazı esasları yerine getirmesi istenir. Söz konusu esaslar kaynaklanan malzemenin “kaynak kabiliyeti” olarak değerlendirilir. Alüminyum ve alaşımlarının kaynak

edilebilirliği; uygun kaynak metodu, birleştirme şekli ve dolgu metalinin belirlenmesine bağlıdır.

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına ergitme kaynak yöntemleri ile kaynak yapılabilir. Çeliklere kıyasla alüminyum malzemeleri kaynak yaparken, malzemeye has bazı özellikler dikkate alınmalıdır. Alüminyum malzemeler, yapısal çeliklere göre daha yüksek termik iletkenliğe sahip olduğundan kaynak nüfuziyeti daha düşük ve kaynak banyosunun gazlardan arınması daha geç olur. Sonuç olarak, kaynak dikişinde yetersiz ergime ve gözenekler oluşabilir. İş parçasını öntavlama yaparak ve kalın kesitli malzemeleri kaynak esnasında da tavlayarak, bu tür kaynak hataları önlenabilir.

Döğme alüminyum alaşımlarından ısıl işlem yapılamayan 1xxx, 3xxx ve 5xxx serileri, gaz korumalı ark işlemleri ile en kolay kaynatılabilen grupta yer almaktadırlar. Isıl işlem yapılabilen 2xxx ve 4xxx serisi alaşımlar özel ark kaynak teknikleri ile kaynatılabilirler. Yüksek mukavemetli ısıl işlem uygulanabilen 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının 7075 ve 7178 serileri kaynağı problem oluşturmaktadır. Bu alaşımlarda, ısının tesiri altındaki bölgede (ITAB) sertlik, kaynatılan ana metale göre daha fazladır ve kaynak edildiklerinde, sıcak çatlama meydana gelme olasılığı yüksektir. Bu nedenle kaynakları tavsiye edilmez. Buna karşılık 7005 ve 7039 alaşımları kaynak için özel olarak geliştirilmişlerdir ve kaynak kabiliyetleri iyidir [48].

Aşağıda alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynak yöntemleri verilmiştir.

3.4.1 Ergitme Kaynak Yöntemleri

Örtülü elektrot elektrik ark kaynak yöntemi ile bütün alüminyum türleri ile ısıl işlem yoluyla sertleşmeyen alaşımları kaynak etmek mümkündür. Alüminyum, özellikle yüksek sıcaklıklarda kuvvetli oksijen emme eğilimi gösterir. Her ne kadar yüzeyde oluşan oksit tabakası faydalıysa da kaynak işlemi sırasında büyük problemler çıkarır. Bunun nedeni, yüzeyde oluşan oksidin ergime derecesinin

(2100°C), alüminyumun ergime derecesinden (667 °C) çok fazla olmasıdır. Kaynak sırasında yüzeydeki oksidin ergimesi için fazla ısı gerekir. Oksidin ergimesi iş parçasının bir anda eriyerek çökmesine neden olur. Bu sorunu gidermek için, kaynak yapılacak alüminyum parçasının yüzeyindeki oluşan oksit tabakasının giderilmesi gerekir. Alüminyum alaşımlarının çekme gerilmelerinin yüksek olması ve birleştirilecek parçaların sabitlenmediği takdirde kaynak metalinde sıcak çatlaklar oluşmasına neden olur. Öntavlama yaparak, birleşme yerinin tasarımını değiştirerek ve daha uygun elektrot seçilerek çatlaklar en aza indirilir. Alüminyum parçalar zorunlu olmadıkça puntalanmaz ve tek pasoda kaynak çekilmesi tercih edilir. Çünkü alüminyumun sıcaklık karşısında hemen oksitlenmesi, puntalama ve birden fazla dikiş çekilmesiyle birlikte her defasında temizleme işlemi gerektirecektir. Bundan dolayı alüminyum parçalar ağırlıklarla, çeşitli sabitleme elemanlarıyla sabitlenir. Alüminyum puntalama ve dikişten sonra elektrot ucunda oluşan krater elektrotun ucunu kapatır ve arkin oluşmasını engeller. Bu yüzden elektrot ucundaki krater yan keskiyle açılır. Alüminyum elektrotu kaplayan örtü çok inatçı, yani ergimesi güç olduğundan kaynak dikişinin içerisine girer ve kaynak metalinin soğumasıyla dikiş içerisinde cüruf kalıntısı meydana getirir. Meydana gelen bu cüruf kaynak metalinin dayanımını düşürerek çatlmasına neden olur. Bu nedenle daha yüksek hızda kaynak yapılmalıdır [48].

Alüminyum ve alaşımlarının gaz kaynağı en eski birleştirme yöntemlerinden birisidir ve her tür hafif metale uygulanabilir. Bu yöntemde, oksitlenmiş alevi ısıyı bölgesel olarak yoğunlaştırabildiği için hidrojen-oksijen alevinden daha az çarpımalara yol açar. Oksitlenmiş alevinin en sıcak noktasında 3200°C'lik sıcaklık elde edildiği için, yöntem kalın parçaların birleştirilmesinde kullanılabilir. Hidrojen-oksijen alevi de ince parçaların kaynağında kullanılabilir (2000°C). Hidrojen-oksijen alevi Al-Mg alaşımlarında gözenekliliğe yol açar. Magnezyum alaşımlarında, ergime akışını engelleyen oksitlenme meydana gelir. Hafif metallerin kaynağında hafif, yani karbürleyici alevle çalışır. Kesinlikle oksitleyici alevden kaçınılmalıdır. Alüminyum ve alaşımlarının gaz eritme kaynağı 0,75 mm'ye kadar parçaların kaynağında rahatlıkla kullanılmaktadır. Daha kalın parçaların bu kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde önemli problemler oluşturmaktadır. Örneğin alüminyum ısı iletme

kabiliyeti yüksek olduğundan kaynak esnasında malzemede önemli derecede çarpılmalar oluşabilmektedir [45].

TIG kaynak yöntemi; ergitme esaslı buna karşın dolgu oranı düşük bir kaynak yöntemi olmasına karşın ısı girdisi yerel olduğundan ısı iletimi yüksek olan alüminyum ve alaşımlarının kaynağında çarpılmaları en aza indirdiği için tercih edilen bir gaz altı kaynak yöntemidir. TIG kaynağında, doğru ya da alternatif akım kullanılabilir. Fakat alüminyum ve magnezyum alaşımlarının kaynağında alternatif akım kullanılması gerekir. Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında sac kalınlığının 16 mm'yi aştığı durumlarda, 150 °C' lik bir öntavlama faydalı olur. Ark önce başka bir parça üzerinde tutuşturulduktan sonra, esas kaynak edilecek parçalar üzerine getirilmelidir. Parçalarda meydana gelebilecek çarpılmaları azaltmak için parçaların kaynaktan önce tespiti ya da aksi yönlerde tertiplenmesi gerekir. Alüminyumun TIG kaynağı DADK (doğru akım düz kutup (elektrot -)), DATK (doğru akım ters kutup (elektrot +)) veya alternatif akım (AA) ile yapılabilir. Genellikle DATK çok ince saclar için, DADK göreceli kalın kesitler ve otomatik üfleç ilerlemesi ve kontrolleri için, AA'da ince sac ve hafif levhalar için kullanılır. DADK' ta akım, elektrottan iş parçasına gider; ark ısısı yoğunlaşması % 70 iş parçasında, % 30 elektrotta olur. Bu yoğunlaşmanın etkileri, daha küçük elektrotlarla daha yüksek akım şiddetleri kullanma olanağı; ark ısısının ana metal içine dar ve derin nüfuziyeti olabilmesi şeklinde belirir. Ark sabit olur. Ark ve/veya gazın hiçbir temizleme etkisi olmaz; bununla birlikte DADK' la helyum kullanarak memnuniyet verici kaynaklar yapılabilir (akım şiddeti azami 600A). Otomatik DADK TIG kaynağında bazen argon kullanılır [49]. Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında koruyucu gaz olarak içerisinde oksijen ve karbondioksit bulunduran karışım gazları kesinlikle kullanılmamalıdır. Bunun temel nedeni oksijen ve karbondioksitin sıvı alüminyumu hızlı bir şekilde okside etmesidir [50].

Alüminyum ve alaşımlarının MIG kaynağı 1948 yılında A.B.D.'de geliştirilmiştir. Bu yöntemde kaynak arkı, helyum ve argon gibi soy bir koruma altında gerçekleşir [51]. Bu teknik her kalınlıktaki alüminyum ve alaşımları için uygulanabilir olmasına rağmen genellikle 3 mm'den daha kalın alüminyum ve alaşımlarının kaynağında tercih edilen bir kaynak yöntemidir. Çünkü MIG

kaynağında kaynak hızı ve ergime gücü diğer gazaltı kaynak yöntemi olan TIG (tungsten inert gaz) kaynağına göre daha yüksek olduğu için çok ince levhalar ancak darbeli akım yöntemi uygulanarak kaynak yapılır. Alüminyum ve alaşımları 550–660 °C arasındaki sıcaklık aralığında ergimelerine rağmen ısıl iletkenliklerinin çok yüksek olması nedeni ile kaynak için gerekli ısı girdisi eş kalınlıktaki çeliğin kaynağından daha fazla olmak zorundadır. Doğru akım, ters kutuplama (elektrot pozitif kutupta) ile yapılan kaynakta, banyo üzerinde yüzen oksit tabakası parçalanır ve ancak bu kutuplama ile kaynak gerçekleştirilebilir. Alüminyum ve alaşımlarının MIG kaynağında, malzemenin kalınlığı göz önüne alınmaksızın sprej ark ile kaynak yapmak daima tercih edilir. Sprej arkın yüksek ısı girdisine karşın alüminyumun yüksek ısıl iletkenliği dolayısı ile kaynak banyosu oldukça çabuk katılaştığından her pozisyonda kaynak yapmak mümkün hale gelmektedir. Yalnız burada oksit tabakasının giderilebilmesi için sola kaynak yöntemi seçilmeli ve dikey pozisyonundaki kaynaklar aşağıdan yukarıya doğru yapılmalıdır. Böylece hem kaynak edilecek bölgelerdeki oksit tabakaları temizlenmiş olur hem de kaynak ağızları iyi bir şekilde ergiyerek uygun bir şekilde kaynak yapılmış olur. Sağa kaynak yöntemi uygulandığında ve dik kaynaklarda yukarıdan aşağıya doğru kaynak yapıldığında gözenekli, kötü görünümlü ve yetersiz ergimeden dolayı tam kaynamamış bölgeler meydana gelir. Kaynak dikişi düz veya dar zikzaklarla çekilmelidir. Geniş zikzaklar kaynak dikişinin aşırı oksitlenmesine neden olduğundan kullanılmamalıdır. İnce alüminyum levhaların gerek yarı otomatik gerekse de mekanize edilmiş MIG kaynağında genellikle Argon gazı kullanılır. Kalın alüminyum levhaların otomatik kaynağında ise daha sıcak bir kaynak banyosu ve daha iyi nüfuziyet elde etmek için Helyum gazı veya Helyum-Argon gaz karışımı kullanılır. Alüminyum alaşımlarının ısıl iletkenliğinin yüksek olması özellikle kalın parçalarda kaynak bölgesinin şiddetli soğumasına neden olur. Bu bakımdan kalın ve bilhassa döküm alüminyum parçalara kaynak öncesi öntav uygulamak gerekir. Genellikle 15 mm'den daha kalın parçalara uygulanan öntav sıcaklığı 200 °C' yi geçmemelidir. Döğme alüminyum alaşımlarında genel olarak öntav yerine daha yüksek akım şiddeti ve ark gerilimi ile daha yüksek ısı girdisi sağlanır. Soğuk şekil değiştirme veya ısıl işlem ile sertleştirilmiş alüminyum parçaların kaynak bölgesinde, sonradan kazanılmış olan bu sertlikte bir azalma görülür, bu bakımdan ısıl işlem ile sertleştirilmiş alüminyum alaşımlarına kaynak öncesi, bir çözeltiye alma tavı uygulanır ve kaynak sonrası tekrar ısıl işlem uygulanarak sertleştirilir. Kaynağa

başlamadan önce, yüzeydeki alüminyum-oksit tabakası kaynak bölgesinden frezeleme yoluyla veya paslanmaz çelik fırça ile fırçalayarak tamamen temizlenmelidir. Kaynak ağzı yüzeyleri ve kaynağa yakın bölgeler (kaynak ağzının en az 50 mm yakını) temiz, yağsız ve kuru olmalıdır. Alüminyum malzemelerin kaynağında kullanılan el aletleri yalnız bu malzemeler için kullanılmalıdır. MIG yöntemi ile 4 mm'den büyük kesit kalınlığına sahip malzemeleri alın kaynağını veya köşe kaynağını tek pasoda yapmak mümkündür. Yüksek kaynak akımı ve güçlü bir nüfuziyet nedeniyle 6 mm'ye kadar kalınlığa sahip malzemelerde kaynak banyosunu desteklemek için kaynak altlığı kullanılır [52].

Alüminyumun plazma arkı ile kaynağında, kare dalgalı alternatif akım veren akım üreteçleri kullanılarak yüzeydeki oksit filmi kırılarak kaliteli kaynak dikişleri gerçekleştirilir. Alüminyumun plazma ark kaynağı oluk, yatay ve aşağıdan yukarıya dik pozisyonda uygulanabilir. Genellikle asal gaz grubundan argon, plazma gazı olarak kullanılır. Koruyucu gaz, daha dıştan iş parçası ile üfleç arasına, plazmayı çepeçevre saracak şekilde verilir. Bu gaz genelde argon ve moleküler bir gaz (H_2 veya N_2) karışımıdır. Oluşan plazma iş parçasında derin nüfuziyet oluşturmaktadır. Tek pasoda herhangi bir dolgu metali kullanmadan, 8 mm'ye kadar kaynatmak mümkün olur. En çok kullanılan pozisyon oluk pozisyonu olmasına karşın, aşağıdan yukarıya doğru dik pozisyonda kaynak uygulamasında kaynak banyosu daha rahat kontrol edilir. Silindirik depolama tanklarının yapımında parçayı döndüren durum ayarlayıcısı (pozisyoner) kullanılarak oluk pozisyonunda kaynak yapılır. Ancak, gerektiği durumlarda örneğin, 4-5 mm kalınlığındaki alüminyum saclardan üretilen taşıyıcı kasalarda dik pozisyonda kaynak tercih edilir. Son yıllarda, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının plazma ark kaynağı daha derin nüfuziyet, daha az kaynak ağzı hazırlığı, daha az açılmalı çarpılmaya neden olacak ısı girdisi ve az sayıda paso ile kaynak ağzının doldurulabilmesi gibi üstünlüklerinden dolayı TIG kaynağına göre daha çok kullanılır konuma gelmiştir. Alüminyumun kaynağında, plazma gazı ve koruyucu gaz olarak kullanılan en ekonomik gaz argondur. Ar + % 30 He karışım gazı koruyucu gaz olarak da daha düşük akım şiddetlerinde kullanılır ve bu gaz torç memesi (nozül) ve tungsten elektrodun kullanım ömrü açısından daha iyi sonuçlar vermektedir. % 30'dan fazla He içeren gaz karışımları özellikle 5 mm'den ince kalınlıklarda oluk pozisyonunda iş parçasına daha çok ısı girdisi sağlar ve aşırı nüfuziyete neden olabildikleri gibi yetersiz ergimeye de yol açabilirler. Özellikle, %

30'dan fazla He içeren gaz karışımları ergitme tekniği kullanılarak 8 mm kalınlığındaki alüminyum parçaların aşağıdan yukarıya dik pozisyonda kaynağında çok iyi sonuçlar verirler [2].

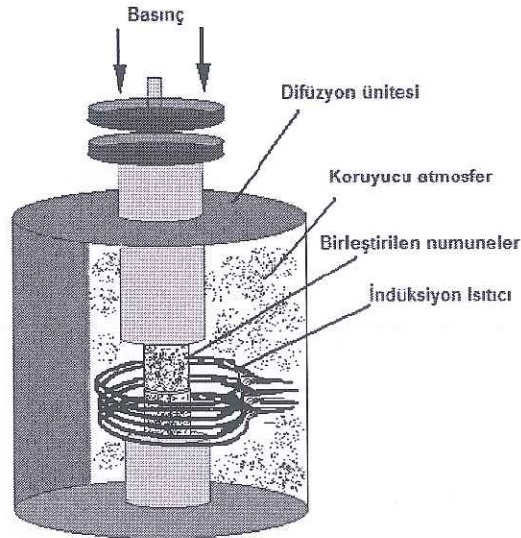
Lazer Kaynağı, lazer ışınının birkaç mikron mertebesinde iyi odaklanabilme kabiliyetinden dolayı tungsten (3400°C) gibi yüksek sıcaklıklarda ergiyen metalleri rahatlıkla ergitebilmektedir. Lazer Kaynağı, çok dar bir kaynak bölgesi oluşturduğu için birçok avantajı da beraberinde getirmektedir. Lazer ışının dar bir alana nüfuz etmesi, dar bir kaynak bölgesinin oluşmasına neden olur. Pratikte alüminyum alaşımlarının yüksek ısı iletme özelliğinden dolayı alüminyum alaşımlarının kaynağında önemli yer tutmaktadır. Ancak alüminyumun ışığı iyi yansıtması özelliği alüminyum alaşımlarının lazer kaynağında karşılaşılan en büyük güçlüklerden biridir [53].

Elektron ışını ile kaynakta gerekli ısı, elektron ışınlarından sağlanmaktadır. Elektron ışını ile temin edilen ısının veya gücün yoğunluğu, klasik kaynak usullerinden yüksektir. Elektrik ark kaynağında yüzeye bırakılan ısı, yarım daire şeklinde bir bölgeye yayılırken; elektron ışının yüksek ısı yoğunluğu sebebiyle, parçanın derinliklerine nüfuz eden kanal şeklinde bir ısı dağılımı ortaya çıkar.

Al alaşımlarının çoğu elektron ışın kaynağı ile kaynak edilebilir. Ancak 6061, 2004 ve 7075 gibi ısı işlem ile sertleştirilen bazı alaşımlarda çatlama rastlanabilir. Belli bir ısı girişi ile kaynak edilebilen kalınlıklar geniş ölçüde değişir. Böylece belli bir makine 5083 alaşımından 130 mm, 2219 alaşımdan ise sadece 50 mm kalınlığı kaynak edebilir. Küt alın birleştirmesi 150 mm kalınlığa kadar kullanılmıştır. Kalın kesitlerin tek pasoda kaynağında bütün kalınlık genişliğince aynı kaynak genişliğini tutmak uygun olur. Böylece iyi bir kök ergimesi ve minimum kusur sağlanmış olur [48].

3.4.2 Katı Hal Kaynak Yöntemleri

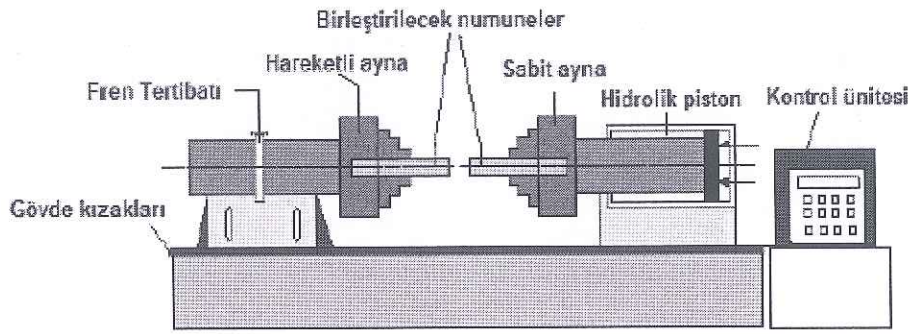
Difüzyon kaynağı, birleştirmek üzere eşlenmiş iki yüzeyin, malzemelerin ergime sıcaklıkları altındaki bir sıcaklıkta, malzemelerde tespit edilebilir plastik akmaya sebep olmayan bir basınç altında, katı hal difüzyonu yoluyla malzemeler arasında metalurjik bir bağ oluncaya kadar, malzemelerin özelliklerini önemli ölçüde etkilemeyecek bir süre tutulmasıyla uygulanan kaynak yöntemi olarak tarif edilir. Difüzyon kaynağı, EC, 2EC, 1100, 1170, 6063, 6061, 2219, 7075 alaşımları da dahil bir çok Al alaşımlarına rahatlıkla uygulanabilir. En yüksek kaynak mukavemeti ve bağlantı kolaylığı Ag, Cu, Ag-28 Cu ve Al folyo gibi ara tabaka veya difüzyon yardımcısının kaynak birleştirmesinde kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Difüzyon kaynağında ara tabaka kullanılmayan difüzyon kaynaklarının çoğu 450-500 °C arasında ve 4 saate kadar çıkan sürelerde yapılır. İlave metalle, süre-sıcaklık gereksinimleri ciddi ölçüde azalır [53]. Şekil 3.2’de difüzyon kaynağı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.2: Difüzyon kaynağı [48]

Sürtünme kaynağı; biri sabit, diğeri hareketli iki silindirik parçanın, alın yüzeylerinin aksenal basınç yardımıyla birbirlerine sürtünmesi sonucu ortaya çıkan sürtünme ısısı altında yapılan bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu kaynak yönteminde

kullanılan en önemli parametreler; devir sayısı, sürtünme süresi, sürtünme basıncı, yığıma süresi ve yığıma basıncı olarak sıralanabilir. Normal olarak kaynak edilemez diye bilinen, bazı yüksek mukavemetli ısıl işlem ile sertleştirilen alüminyum alaşımları, sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirler. Mukavemette bir kayıp olmadığı gibi kaynak bölgesi tamamen sünek olur. Bu yöntemde malzemelerin ergimesi için gerekli olan enerji kullanımına ihtiyaç olmadığından maliyetten ve işçilikten tasarruf sağlanır. Şekil 3.3’de sürtünme kaynak yönteminin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.3: Sürekli tahrikli sürtünme kaynağının şematik resmi [2]

Sürtünme kaynağında, birleşme bölgesinde meydana gelen mikroyapısal değişiklik dört bölge ayırt edilerek incelenir. Bunlar; birleşme ara yüzeyindeki temas alanı, tamamen deformasyona uğramış bölge, kısmen deformasyona uğramış bölge ve deformasyona uğramamış bölge olarak tanımlanır. Sürtünme kaynağında bir ergime bölgesinin olmayışı, ısının tesiri altındaki bölgenin darlığı ve kaynağın çevresinde plastik olarak deforme olmuş malzemenin varlığı en belirgin özelliklerini teşkil eder [2].

Ultrasonik kaynakta birleştirilecek parçalar, hareketli ultrasonik frekansla titreşen sonotrot ile sabit duran bir altlık arasına konur ve az bir kuvvetle bastırılır. Sonotrot tarafından oluşturulan ultrasonik titreşimler, yüzeye paralel olarak üstteki parçaya iletilir ve temas yüzeylerinde yani alt ve üst kaynak yerinde izafi bir harekete neden olur. Ultrasonik dikiş kaynağında bindirilen saclar dönen tekerlek şeklindeki sonotrotlar tarafından senkronize çalıştırılan altlık makaralarına bastırılır. Tekerlek şeklindeki sonotrotların levha titreşimleri üstteki iş parçasına iletir. Ultrasonik

kaynak, bir pres (basınç) kaynağı yöntemidir. Kısmen veya tamamen mekanik hale sokulabilir. Kaynak işleminden sonra dikişlerin tekrar işlenmesine gerek yoktur. Ultrasonik kaynak yöntemi; alüminyum ve alaşımları, bakır ve alaşımları, plastik malzemeler, cam ve beton gibi malzemenin kaynağında kullanılmaktadır. Ayrıca alüminyum ile seramik veya camın kaynağı gibi farklı malzemelerin birleştirilmesinde başarı ile tatbik edilebilmektedir. Alt tabakanın yani alttaki parçanın kalınlığının bir sınırı yoktur. Üstteki parçada ise, sonotrotlar tarafından oluşturulan titreşimlerin, üst parçaya girişleri sırasında sönümlenmelerine dikkat edilmesi gerekir [54]. Tüm alüminyum alaşımları ultrasonik kaynakla kaynaklanabilir fakat kaynaklanabilirliğin derecesi alaşım ve temper durumuna göre değişir. Alüminyum alaşımları diğer metallerle bu proses ile birleştirilebilir. Ultrasonik kaynak direnç kaynağının gerektirdiğinden daha az yüzey hazırlama gerektirir. Alüminyumun yağ giderilmesi normal olarak uygundur. Uniform bir kaynak elde etmek için ısıl işlem alaşımları ve yüksek oranda magnezyum içeren alaşımların kaynaktan önce yüzey oksitlerinin giderilmesi gerekmektedir [48].

Direnç kaynağı; iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda, basıncın tatbikiyle yapılan bir kaynak usulüdür. Malzemedan geçen elektrik akımının meydana getirdiği ısının dışında, herhangi bir ısı tatbik edilmemektedir. Isı, kaynak edilecek kısımlarda meydana gelir ve basınç kaynak makinesindeki elektrodlar veya çeneler vasıtasıyla uygulanır. Elektrik direnç kaynağı için gerekli alçak gerilim ve yüksek akım şiddetindeki elektrik gücü, kaynak transformatörlerinden sağlanır. Basınç ise, hidrolik veya mekanik donanımlarla temin edilir [54].

Bazı alüminyum alaşımlarının direnç kaynağı diğerlerine göre daha kolaydır. Genelde diğer kaynak işlemleriyle kaynatılabilen döküm alaşımları direnç kaynağı ile de kaynak edilebilir. Sürekli döküm ve kum döküm alaşımları başarıyla nokta kaynağı yapılabilirken kalıp dökümlerin bu metotla birleştirilmeleri zordur. Genellikle yüksek mukavemetli 2024 ve 7075 alaşımları kolaylıkla kaynak edilebilirlerse de daha düşük mukavemetli alaşımlara nazaran çatlak ve gözenekliliğe daha fazla meyillidirler. Kaynak metalinde çekme çatlakları az çok tamamen bakır ve çinko içeren alaşımlara (2024 ve 7075 gibi) özgüdür [2].

4. BAKIR VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ VE KAYNAĞI

4.1 Bakır ve Alaşımlarının Genel Özellikleri

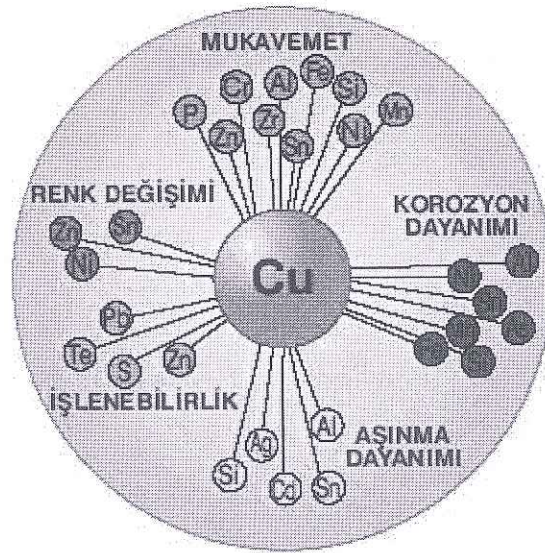
Bakır, insanlar tarafından kullanılan ilk metal, çağlar boyunca kullanım açısından da demirden sonra ikinci metaldir. Tarih öncesi dönemde bulunmuştur ve yaklaşık M.Ö.4000'den, hatta daha önceden başlayarak kullanıldığı düşünülmektedir. Bakır-kalay bronzunun M.Ö. 2400 yılından bu yana kullanıldığı bilinmektedir. Bakır çinko alaşımı olan pirincin ise Roma İmparatorluğundan önce kullanılmaya başlandığı tahmin edilmektedir [55].

Bakır ve birçok bakır alaşımı, yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapıya sahiptir. Saf bakırın ergime sıcaklığı 1084°C olup, oldukça yumuşak ve şekillendirilebilirlik özelliği iyi olan bir metaldir. Saf bakırın çekme mukavemeti 221-455 MPa, akma mukavemeti ise 69-365 MPa arasında değişmektedir. Yoğunluğu ise 8,968 g/cm³ olup, alüminyumun yoğunluğundan yaklaşık 3 kat daha fazladır. Saf bakırın elektrik iletkenliği, gümüşün elektrik iletkenliğinden çok az düşük olmasına rağmen, elektrik iletkenliği ve ısıl iletkenliği (398 W/mK) alüminyumdan yaklaşık 1,5 kat daha fazladır. Bakırın elektrik iletkenliği, mühendislik metal ve alaşımı malzemelerin elektrik iletkenliklerinin karşılaştırılmasında %100 olarak kabul edilerek standart referans olarak belirlenmiştir. Bakır ve alaşımları genellikle manyetik özelliğe sahip değildir. Bakır ve alaşımları sahip oldukları mükemmel elektrik ve ısıl iletkenlikleri, üstün korozyon dirençleri, üretiminin kolaylığı ve iyi sayılabilecek mukavemet özellikleri ve yorulma direnci özellikleri nedeniyle birçok endüstriyel uygulama alanında geniş bir şekilde kullanılmaktadırlar. Kıvılcım direnci, metal-metal aşınma direnci, düşük geçirgenlik özelliği ve kendine has güzel bir renge sahip olması diğer önemli özellikleri olarak sıralanabilir. Saf bakır elektrik ve elektronik endüstrisinde kablo ve tel yapımında, bağlantı parçalarında ve elektrik akımı geçmesinin istendiği diğer birçok yerde sıklıkla kullanılmaktadır.

Bakır ve alaşımları içme suyuna, tuzlu suya, alkali çözeltilere ve birçok organik kimyasallara karşı sahip olduğu çok iyi korozyon direnci nedeniyle su boruları, vana bağlantıları, ısı eşanjörleri, kimyasal ekipmanlar ve kaymalı yatak yapımında ideal malzemeler olarak kullanılmaktadırlar. Ancak bakır, sülfür ve amonyum bileşikleri ile reaksiyona girebilmektedir. Özellikle amonyum hidroksit çözeltileri, bakır ve alaşımlarıyla hızlı bir şekilde reaksiyona girerek şiddetli bir korozyona neden olmaktadır [56].

4.2 Bakır ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Saf bakıra ilave edilebilen elementler; alüminyum, arsenik, berilyum, kadmiyum, krom, kobalt, demir, kurşun, manganez, nikel, oksijen, fosfor, silisyum, gümüş, kükürt, tellür, kalay, çinko ve zirkonyumdur. Bu alaşım elementlerinin saf bakıra olan etkileri ise Şekil 4.1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Alaşım elementlerinin etkisi [55]

Bakır Geliştirme Derneğine göre (CDA), bakır ve alaşımları aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır.

Döğme Bakır ve Alaşımları

Soğuk ve sıcak durumda, haddeleme veya döğme yoluyla talaşsız olarak biçimlendirilirler. Çubuklar, saclar, borular, teller ve profiller bu gruptaki bakır ve alaşımlardan üretilir.

- Saf bakır
- Bakır çinko alaşımları (pirinçler)
- Bakır çinko kurşun alaşımları (kurşunlu pirinçler)
- Bakır çinko kalay alaşımları (kalay bronzları)
- Fosfor bronzları
- Bakır alüminyum alaşımları (alüminyum bronzları)
- Bakır silisyum alaşımları (silisyum bronzları)
- Bakır nikel ve bakır nikel çinko alaşımları (nikel gümüşü)

Döküm Bakır ve Alaşımları

Uygun döküm niteliklerine sahiptir. Bu alaşımlar döküm parçalar için kullanılır.

- Döküm bakırı
- Değişik türde döküm pirinçleri
- Döküm manganez bronz alaşımları
- Döküm bakır çinko silisyum alaşımları
- Döküm bakır kalay alaşımları
- Döküm bakır kalay kurşun alaşımları
- Döküm bakır alüminyum alaşımları
- Döküm bakır nikel ve bakır nikel çinko alaşımları [57].

4.2.1 Saf Bakır

Saf bakırlar en az %99,3 oranında Cu elementi içermektedir. Oksijensiz bakır, elektrolitik bakır, ateşte rafine edilmiş bakır ve deokside edilmiş fosfor bakır gibi farklı tipleri mevcuttur [56].

4.2.2 Yüksek Bakır İçerikli Alaşımlar

En fazla %5'e kadar alaşım elementi içeren bakır alaşımları olup, kolay işlenebilir bakır ve çökelti-sertleşmeli bakır olmak üzere iki farklı tipi mevcuttur.

Kolay işlenebilir bakırlar, kurşun, tellür ve selenyum içermektedir. Bakırın bu elementleri katı-çözelti olarak çözebilirliği düşüktür. Tellür ve selenyum matris içerisinde uzamış sert elemanlar olarak bulunurlarken, kurşun matris boyunca ince ve ayrık partiküller şeklinde dağılmaktadır. Bu inklüzyonlar bakırın süneklik değerlerini düşürmekte, işlenebilirlik özelliğini ise arttırmaktadır. Ergitme kaynak yöntemleri bu bakır tipleri için tavsiye edilmemektedir. Çünkü bu bakır alaşımları, sıcak-kırılmalara ve çatlamalara karşı hassastırlar. Kolay işlenebilir bakırlar, lehimleme ve sert lehimleme ile birleştirilebilirler.

Çökelti-sertleşmeli bakırlar düşük miktarlarda berilyum, krom veya zirkonyum ilavesi sonucu ısı ilemele çökeltme sertleşmesinin sağlandığı, böylece bakırın mekanik özelliklerinin artırıldığı alaşımlardır. Bu alaşımlara ergitme kaynak yöntemlerinin veya sert lehimlemenin uygulanmasıyla, aşırı yaşlanma sonucu mekanik özelliklerde bozulmalar meydana gelmektedir [56].

4.2.3 Bakır-Çinko Alaşımları

Çinkonun (Zn) başlıca alaşım elementi olduğu alaşımlar genellikle "pirinç" olarak adlandırılmaktadır. Çinko dışındaki diğer alaşım elementleri ise pirinçlerin belirli mekanik ve korozyon özelliklerini geliştirmek amacıyla ilave edilmektedir. Mangan, kalay, demir, silisyum, nikel, kurşun ve alüminyum elementleri ya tek olarak ya da birlikte, nadiren %4'ü geçecek oranda pirinçlere ilave edilmektedirler.

Alüminyum pirinçleri ve kalay pirinçleri gibi bazı özel pirinçler, ikinci alaşım elementi ile adlandırılmaktadır.

Pirinçler dövme ve döküm yöntemleriyle elde edilebilmektedirler. Ancak, döküm yoluyla üretilen pirinçler genellikle, dövme pirinçler kadar homojen bir yapıya sahip olmamaktadırlar. Bakıra çinko ilavesiyle ergime sıcaklığı, yoğunluk, elektrik iletkenliği, ısı iletkenlik ve elastik modülü azalmaktadır. Bununla birlikte, çinko ilavesiyle mukavemet, sertlik, süneklik ve ısı genleşme özellikleri ise artmaktadır. Pirincin sıcak-ışlem özellikleri, %20'ye kadar artan çinko içeriğiyle birlikte azalma eğilimi göstermektedir.

Pirincin rengi, artan çinko içeriğiyle birlikte kırmızımsı görünümünden sarıya doğru değişim göstermektedir. Dolayısıyla, birleştirme sonrası yüzey görünümün önemli olduğu uygulamalar için ilave metal seçiminde, pirinç malzemenin rengiyle olan uyumluluğa dikkat edilmesi gerekmektedir [56].

4.2.4 Bakır-Kalay Alaşimleri

%1-10 arasında değişen oranlarda kalay içermektedirler. Ayrıca bu alaşım, "fosfor bronz" olarak da bilinmektedirler, çünkü döküm sırasında deoksidan element olarak %0,03-0,04 arasında fosfor ilave edilmektedir. Fosfor bronzları, dövme ve döküm alaşimleri şeklinde elde edilebilirler. Döküm bakır-kalay alaşimleri dövme alaşımına benzemekle birlikte, çinko veya nikel ilave edilmekte ve %20'ye kadar yüksek miktarlarda kalay içermektedir. Ayrıca kurşunlu bakır-kalay alaşimleri da mevcuttur [56].

4.2.5 Bakır-Alüminyum Alaşimleri

%3-5 arasında alüminyum içeren bu bakır alaşımına, "alüminyum bronzları" denilmektedir. Ayrıca değişik miktarlarda demir, nikel, mangan ve silisyum elementleri de içerebilmektedir. Metalurjik yapısına ve ısı işleme karşı gösterdiği tepkiye göre iki farklı alüminyum bronzu tipi vardır. Birincisi, %7'den az alüminyum içeren tek fazlı alaşım olup, bunlar ısı işleme sertleştirilemezler. İkincisi ise, çift fazlı bakır-alüminyum alaşımıdır. Her iki tipteki alaşımın da

elektrik ve ısı iletkenlikleri düşük olup, kaynak kabiliyetleri iyidir. Alüminyum bronzlarındaki alüminyum içeriği %8'in altında olduğunda, sıcak-kırılma eğilimleri artmakta, kaynaktaki gerilmelerin yüksek olması durumunda da ITAB'da çatlamlar meydana gelebilmektedir. Alüminyum bronzları yaygın olarak pompa, vana, diğer su bağlantı elemanları ve denizcilik uygulamalarında kullanılmaktadır [56].

4.2.6 Bakır-Silisyum Alaşımları

Silisyum bronzu, bakıra mekanik özelliklerin geliştirilmesi için % 1-3 Si ilavesi ile gerçekleştirilen bir alaşımdır. Bu alaşımların tane sınırlarında birikintileri düşük ergime derecelerine sahiptirler (700° C - 825° C). Bundan dolayı bu sıcaklık değerleri arasında ve gerilim altında ancak mikroskop ile görülebilen tane sınırlarında mikro çatlaklar meydana gelmesine sebep olurlar. Kimyasal cihaz parçaları yapımında kullanılırlar [57].

4.2.7 Bakır-Nikel Alaşımları

Bakır ve nikel atomları kübik yüzey merkezli olduğundan katı ve sıvı halde her oranda birbirleri içinde sürekli çözünerek sürekli katı çözelti oluştururlar. Bakır nikel alaşımları geniş bir aralıkta (%4-45) Ni-içerebilirler. % 0,5 demir ilavesi korozyon direncini azaltır. Yüksek sıcaklıklarda mukavemet özellikleri ve korozyon dirençleri çok iyidir. Özellikle yüksek hız ve sıcaklık aralıklarını da kapsayacak şekilde her türlü su, temiz su, akar su, deniz suyu, endüstriyel atık sular işleyen veya yönlendiren sistemlerde öncelikli kullanılır (yapıya bir miktar Mn (\leq %3,5) ve Fe (\leq % 1,5) katmak sureti ile korozyon ve erozyon davranışları iyileştirilebilir. Ayrıca, buhar kazanları tesisatlarında, kimyasal tesislerde, gemi boru malzemelerinde ve deniz suyundan tatlı su üretim üniteleri, vb. yerlerde öncelikle kullanılır. % 25'ten fazla nikel içeren (CuNi25) alaşımlar madeni para üretiminde kullanılır. Yüksek nikelli alaşımlara Mn ilavesiyle elektrik direnç malzemesi teller üretilir. Çok az Si deoksidasyon amacıyla kullanılır. Bu alaşımlar özellikle 0°C'nin altında yüksek mukavemetlidir. Sıcaklık ölçümünde termoelement malzemesi olarak CuNi44 (konstantan) çifti, elektrik direncinin sıcaklıktan bağımsız sayılabilmesi ile, hassas direnç malzemesi olarak yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Söz gelimi sıcaklığa bağlı "direnç değişimi" bilinen başka bir malzemenin davranışı karşılaştırılarak

ortam sıcaklığı ölçülebilir. Bakır ve demire karşı ısı potansiyel farkı (mV) maksimuma ulaşan Cu/Ni alaşımının, Cu/Ni44 olmasından yararlanır [57].

4.2.8 Bakır-Nikel-Çinko Alaşımları

CuNiZn alaşımları (%45-67 Cu; %4,5-45 Zn; % 10-26 Ni; % 0-2,5 Pb içerirler. Gümüş görünümünde, fakat gümüşe göre çok daha ucuz malzeme olarak, optik ve saat sanayiinde ve müzik aletleri yapımında, tıbbi cihaz ve aletlerin üretiminde, süs eşyaları, ev ve mutfak eşyaları üretiminde tercihen kullanılırlar. Nikelin etkisiyle gümüşe benzer bir renk alan bu malzemelerin kararmaya dayanıklılığı prinçten daha iyidir. Kurşun katılmamış olanları zayıf akım röle yayları, gümüş kaplı çatal-bıçak takımları yapımında kullanılır. Kurşun katılmış olanları ise, optik aletler ve pergel yapımında kullanılır. Prinçler ve nikel gümüşü gerilme korozyonuna karşı düşük dirence sahiptirler. Buldukları ortamda örneğin yanma gazlarından gelebilecek çok az miktarda amonyak ve nem olması durumunda dış gerilmelerin belirli bir düzeye erişmesi sonucunda pirinç ve nikel gümüşü çatlayarak hasara uğrar [57].

4.3 Bakır ve Alaşımlarının Kaynağı

Bakır ve alaşımları ark kaynak yöntemleri, sert lehimleme, lehimleme, katı-hal birleştirme vb gibi yöntemlerle birleştirilebilmektedir [56].

4.3.1 Ark Kaynak Yöntemleri

Bakır ve alaşımları Tablo 4.1'de verildiği gibi ark kaynak yöntemleri ile birleştirilebilmektedir. Genellikle koruyucu gaz atmosferi altında gerçekleştirilen ark kaynak yöntemleri, bakır ve alaşımlarının birleştirilmesi için tercih edilmekle birlikte, elektrik ark kaynağı yöntemi kritik özelliğe sahip olmayan uygulamalar için kullanılmaktadır [56].

Tablo 4.1: Bazı bakır ve laşımları için birleştirme yöntemlerinin uygulanabilirliği; M=Mükemmel, İ=İyi, V=Vasat, TE=Tavsiye Edilmez [56]

| Alaşım | Oksi-asetilen | Elektrik ark | MIG | TIG | Direnç | Kat-hal | Sert lehim. | Lehimleme | Elektron ışıın |
|------------------------|---------------|--------------|-----|-----|--------|---------|-------------|-----------|----------------|
| Elektrolitik bakır | TE | TE | V | V | TE | İ | M | İ | TE |
| Oksijensiz bakır | V | TE | İ | İ | TE | M | M | M | İ |
| Deokside edilmiş bakır | İ | TE | M | M | TE | M | M | M | İ |
| Berilyum-bakır | TE | V | İ | İ | V | V | İ | İ | V |
| Kovan pirinci | V | TE | V | V | İ | İ | M | M | - |
| Kurşunlu pirinçler | TE | TE | TE | TE | TE | TE | M | İ | - |
| Fosfor bronzu | V | V | İ | İ | İ | İ | M | M | - |
| Bakır-nikel (%30) | V | V | İ | İ | İ | İ | M | M | V |
| Nikel gümüşü | İ | TE | İ | İ | V | İ | M | M | - |
| Alüminyum bronzu | TE | İ | M | M | İ | İ | V | TE | İ |
| Silisyum bronzları | İ | V | M | M | İ | İ | M | İ | İ |

TIG kaynak yöntemi, oksijeni giderilmiş bakırda, silis bronzunda, bakır-nikel alaşımlarında, alüminyum bronzunda, yüksek kaliteli ve yoğun kaynak dikişleri ile elektrolitik bakır ve oksijeni giderilmiş bakırın, kızıl pirinç ve Muntz metali ve fosfor bronzunun kaynağında da orta kaliteli kaynak dikişleri verir. Kaynağı yapılacak malzemeye göre koruyucu gaz olarak argon, helyum veya asal gazların karışımı kullanılır. Kalın parçalarda iyi performans elde edebilmek ve kök açıklığına tam nüfuziyet sağlamak için 60°'den 90°'ye kadar genişliği olan kaynak ağzına ihtiyaç vardır. Bakırı kaynak yaparken kaynağın performans ihtiyacı, seçilecek kaynak telinin özelliklerini belirler. Silis bronzları, TIG yöntemiyle kaynak yapılabilir. ERCuSi-A kaynak teli ile iyi kalitede kaynaklar elde edilir. Alternatif akım kullanılabilir de doğru akımda elektrodun negatif kutupta olması tercih edilir. Bakır-nikel alaşımları ve alüminyum bronzları, TIG yöntemiyle kaynak yapılabilir. Bakır-nikel alaşımlarında ERCuNi ilave metalleri, koruyucu gaz olarak argon kullanıldığında, iyi kalitede kaynak metalleri verir ve ön ısıtma da gerektirmez. TIG

yöntemi, alüminyum bronzlarında mükemmel kalitede kaynaklar verdiği için, ısrarla tavsiye edilir. İnce kesitli malzemeler, ilave metal kullanmadan da kaynak edilebilir. Levhaların birleştirmelerinde ERCuAl-A2 kaynak teli seçilir ve döküm parçalarının tmirinde de ERCuAl-B kaynak teli önerilir. Ön ısıtma yalnızca büyük parçalarda gerekir. Pek çok uygulamada da doğru akım elektrod negatif kutupta kullanılabilmesine rağmen, alternatif akım çoğunlukla yüksek kalitede kaynaklar verir. Koruyucu gaz olarak argon tercih edilir. Normal şartlarda, kaynak sonrası çekileme veya ısıl işlem gibi hiç bir özel kaynak tekniği gerekmez [58].

Gazaltı kaynağı ana metalin kompozisyonuna uygun teller ve helyum, argon veya karışımlarının kullanılması ile yarı otomatik veya tam otomatik yapılabilir. Örtülü elektrod yöntemiyle oluşan kaynak metalinde yüksek mekanik mukavemet veren fosfor bronzları hariç diğer bronzlarda ve pirinçlerde gazaltı kaynağı ile kaliteli kaynak metalleri elde edilir. Gazaltı kaynağı ile oksijeni giderilmiş bakırın birleştirilmesinde de kaliteli kaynaklar elde edilebilir. Gazaltı kaynağı, elektrolitik ve oksijensiz bakırın kaynağında da kullanılabilir, burada kaynaklar zayıf kaliteden orta kaliteye yükseltilebilir. ERCu ve ERCuSi telleri iyi bir kaynak öncesi hazırlık yapıldığında farklı kalitelere oksijeni giderilmiş bakırın kaynağında kaliteli kaynak dikişlerini temin ederler. 1,3 mm veya daha yüksek kalınlıklarda 90°'lik açı kullanılmalıdır ve 6,35 mm'den daha kalın parçalarda 205°C'lik ön ısıtma önerilir. Tavlama sonrasında çekileme, kaynak metali tane boyutunu inceltir. Gazaltı yöntemi, silis bronzlarının kaynağında tercih edilir. ERCuSi teli argon veya argon-helyum karışımı ile kullanıldığında gazaltı yöntemi daha iyi sonuç verir. Ön ısıtma gerekmez ve hızlı kaynak yaparken parçanın fazla ısınmasından kaçınılmalıdır. Dakikada 20 cm'lik hızla kaynak yapılırken küçük bir kaynak banyosu korunmalıdır. Çok pasolu kaynaklarda kaynak dikişinde oluşturulan oksit filmi tel fırça ile temizlenmelidir. Fosfor bronzları sıcak kırılmandır ve silis bronzlarından daha yüksek termik iletkenliğe sahiptir. Kaynak yaparken ilerleme hızı yüksek ve kaynak banyosu küçük olmalıdır. Sonuç olarak, fosfor bronzlarının kaynağında geniş kaynak ağzı kullanılıyor ise yüksek akımlara ihtiyaç vardır. Gazaltı kaynağı, bakır-nikel alaşımlarının kaynağında uygulanabilen tüm yöntemlere göre daha iyi bir sonuç verir. ERCuSi teli ile hem argon hem de argon-helyum karışım gazı kullanılabilir. İnce malzemeler için kaynak ağzı açmadan alın altına ve kalın levhalarda da 60°'lik tek veya çift V kaynak ağzı açarak kaynak yapılabilir. Yatay pozisyon tercih edilse

farklı pozisyonlarda da kaynak yapılabilir. Gazaltı kaynağı ile alüminyum-bronzunda yüksek kaliteli birleştirmeler elde edilir. Yatay pozisyonda, en yüksekde kalite kaynak dikişi temin edilir fakat, diğer pozisyonlarda da kaynak yapmak olasıdır. Büyük parçalar hariç ön ısıtma gerekmez. Yatay kaynak dikişleri ve küçük-orta zigzaglı dikişler tercih edilir [58].

Bakırın elektrik ark kaynak kalitesi, gaz korumalı yöntemlerdeki kadar iyi olmamaktadır. Elektrik ark kaynak yönteminde en iyi sonuçlar, deokside bakırların kaynağında elde edilmektedir. Yöntem, deokside edilmiş ve ateşte rafine edilmiş bakırlarda da kullanılabilir. Ancak kaynaklı birleştirmelerin porozite ve oksit inklüzyonları içerebildiği görülmektedir. Düşük karbonlu çeliklerin elektrik ark kaynağı uygulamalarıyla karşılaştırıldığında, bakır ve alaşımlarında daha geniş kök açıklığı, daha geniş kaynak ağzı açıları, daha yüksek ön-tav sıcaklığı, daha yüksek pasolar arası geçiş sıcaklığı ve daha yüksek kaynak akımları kullanılmaktadır. Elektrot çapı, ana metalin kalınlığı kadar seçilmelidir. Kaynak işlemi, dolgu metalinin metal akışını sağlamak için, doğru akımda ve elektrot pozitif kutupta yapılmalıdır. Birleştirmede salınımsız veya salınım hareketli kaynak teknikleri kullanılabilir. Bakır ve alaşımlarının elektrik ark kaynağıyla uygulamaları genellikle düz kaynak pozisyonlarıyla sınırlıdır. 3,3 mm'den daha kalın parçaların düz pozisyonda kaynağında, 260°C veya üzeri ön-tav sıcaklığı uygulanmaktadır. Farklı geometrilerdeki pozisyonların kaynakları ise genellikle fosfor bronzları ve bakır-nikel alaşımların birleştirilmesiyle sınırlıdır [56].

Bakır ve alaşımları, ERCu dolgu metali kullanılarak plazma ark kaynak yöntemiyle birleştirilebilmektedir. Ar, He veya her ikisinin karışımı gazlar, parça kalınlığına bağlı olarak bu yöntemde kullanılabilir. Plazma ark kaynağı, TIG yöntemine göre iki önemli üstünlüğe sahiptir: (1) Tungsten elektrot gizli ve tamamen koruma altındadır. Bu durumda pirinçler, fosfor ve alüminyum bronzları gibi düşük ergime sıcaklıklarına sahip elementlerden oluşan alaşımların kaynağında, elektrotun kirlenmesi önemli şekilde azalmış olmaktadır. (2) Daha yüksek ark enerjisi sayesinde, ITAB genişlemesinin önüne geçilmiş olunur. Plazma ark kaynak yönteminde, dolgu metali seçimi ve kaynak pozisyonları genel olarak TIG kaynak yöntemindekilere benzer şekildedir [56].

Tozaltı ark kaynak yönteminde, 13 mm'den daha kalın kesitli bakır-nikel alaşımlarında oldukça parlak sonuçlar alınabilmektedir. TIG yöntemindekine benzer şekilde, V ve U kaynak ağızlarına sahip bağlantı tasarımları tatmin edici sonuçlar vermektedir. Bakır-nikel alaşımları için standart dekapanlar kullanılabilir. Kaynak şartları büyük ölçüde kullanılan dekapanı bağli olarak değişmektedir. Bunun yanı sıra, çok pasolu kaynaklarda, kaynak dikişleri geçişleri sırasında tam bir ergimenin sağlanması için özel bir dikkat gerekmektedir [56].

4.3.2 Diğer Kaynak Yöntemleri

Oksi-asetilen kaynak yöntemiyle oksijeni alınmış ve oksijensiz bakırlar, birleştirilebilmektedirler. Ancak bu yöntem, daha çok küçük ve kritik önemi olmayan tamir kaynaklarında kullanılmaktadır. Oksi-asetilen alevinin ark kaynak yöntemlerine göre nispeten düşük ısı girdisi nedeniyle, kaynak hızları da düşük olmaktadır. ErCu veya ERCuSi ilave dolgu metalleri ve uygun bir dekapan, bakırın oksi-asetilen kaynağında kullanılabilir. Standart bir dekapan kullanımında, ilave metal ve birleştirme yüzeyleri dekapan ile kaplanmalıdır. Dekapan ile birleştirme yapılırken nötr alev, dekapan olmadan yapılanlarda ise biraz daha fazla oksitleyici alev kullanılmalıdır. 3,3 mm'den kalın ve ısıl iletkenliği yüksek bakır parçalarda iyi bir birleştirme için ön-tav ve yardımcı bir ısıtma tavsiye edilmektedir. Düz pozisyonlarda birleştirme yaparken genellikle, sağa doğru kaynak tekniği tercih edilmelidir. Sağa doğru kaynak tekniği ile sola doğru kaynağa göre daha geniş bir kaynak elde edilebileceği gibi, oksit oluşum tehlikesi de daha az olmaktadır. Ergimiş kaynak banyosunun kontrolü önemli ölçüde, kaynak hattının yaklaşık 10-15° açıyla yatırılıp, kaynağın yukarı doğru yapılmasıyla sağlanmaktadır [56].

Elektron ışın kaynağı uygulanmasında ark kaynaklarına göre daha az güçlükler ortaya çıkarmaktadır. Özellikle ince kesitli bakır alaşımları, vakumsuz ortamda bu yöntemle başarıyla birleştirilebilmektedir. Besleyici tel donanımı ile kaynağa ilave metal sağlanarak da birleştirmeler gerçekleştirilebilmektedir. Oksijensiz ve ateşte rafine edilmiş bakır gibi deokside edilmemiş bakırların elektron ışın kaynağında, ergimiş metal kaynak bölgesinden dışarı atılarak sıçrıntı oluşumuna ve pürüzlü kaynak yüzeylerine neden olabilmektedir. Bu durum, genellikle yüzeysel paso uygulanmasıyla giderilebilmektedir. Vakum ortamı muhtemel hidrojen

gevrekliği riskini azaltsa da, kök boşlukları ve poroziteler meydana gelebilmektedir. Genellikle, inko içermeyen bakır alaşımlarının elektron ışın kaynağında, herhangi bir problemle karşılaşmadan birleştirmeler yapılabilir [56].

Lazer kaynağı uygulaması bakır ve alaşımlarının birleştirilmesinde oldukça sınırlıdır. Başlıca problem, bakır ve alaşımlarının yüksek ısıl iletkenliği ve lazer ışınını yansıtmasıdır. CO₂ lazerin kızılötesi uzun dalga ışın enerjisinin yaklaşık %99'u bakır tarafından yansıtılmaktadır. Daha kısa dalga boyundaki lazer uygulamalarıyla, bazı bakır alaşımları başarılı bir Şekilde birleştirilebilmektedir. Bakır, dalga boyu 1,06 μm olan Nd:YAG ışığını daha fazla miktarda emebilmekte, böylece başarılı birleştirmeler elde edilebilmektedir. Lazer kaynağının sahip olduğu yüksek soğuma hızı nedeniyle meydana gelen yüksek katılaşma gerilmeleri, bakır alaşımlarını çatlamalara karşı daha hassas hale getirebilmektedir [56].

Nokta kaynağında, bakırın yüksek ısıl ve elektriksel iletkenliği nedeniyle ince levhalara sınırlandırılmıştır. Nokta kaynağı ile birleştirilebilecek bakırın azami kalınlığı 1 mm'dir. Mümkün olduğu kadar kısa sürede uygulanacak yüksek akım Őiddetlerine gerek vardır. Bakır alaşımlarından adi elektrodlar bakıra yapıştığından bunların uçları Cu-W veya molibdenden olacaktır. Bu uçların Őekli hayli önemli olup uzmanlar, akımı bir noktada odaklandırmak için yuvarlatılmış küçük uçları kullanmaktadır. Elektrod uçlarının, kaynak basıncı uygulandığında metali delmek eğilimi dolayısıyla sadece yoğurulmuş veya yan-sert metal üzerinde çalışılabilir. Kaynaktan sonra meydana gelen Şekil bozulmaları, aynı zamanda birleşmeyi pekiştirecek olan bir soğukta ekilemeyle giderilebilir. Bir nokta kaynağı yapıldığında buna yakın bir ikincisini yapmak zordur bunun nedeni akım, ona kolay bir yol arzeden ilk noktadan geçme eğiliminde olur. Bu itibarla noktalar arasındaki mesafe, çaplarının beş ilâ altı katı olacaktır. Aynı nedenlerden bakırda dikiş kaynağı çok sınırlı ölçüde kullanılır. Araya band halinde sert lehim alaşımları koyarak iletkenlik azaltılıp dirençle iyi birleştirmeler elde edilebilir [45].

Yakma alın kaynak yöntemi ile bakır ve alaşımlarının birleştirilmelerinde çok iyi sonuçlar alınabilmektedir. Ancak dğme basıncı, baskı hızı, akım yoğunluğu, birleştirme hızı gibi parametrelerin doğru bir Şekilde ayarlanması gerekmektedir. Kurşunlu bakır alaşımları yakma alın kaynağı ile kaynak edilebilmekte olup, tam bir birleştirmenin meydana gelmesi ise alaşımın içeriğine bağlı olmaktadır. %1'e kadar

kurşun içeriğine sahip olan alaşımlar için genellikle herhangi bir problem ortaya çıkmamaktadır. Bakır ve alaşımların nispeten düşük ergime sıcaklıkları ve dar bir aralıkta sahip oldukları plastik sınır sebebiyle, yüzeyler temas ettiğinde minimum basınç altında hızlı bir döğme işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir [56].

Difüzyon kaynak yönteminde iki parça katı halde, temas yüzeyinin her iki tarafından karşılıklı bir atom difüzyonu ile birleştirilir. Bu difüzyon vakumda, uygun bir süre tutulan ısı ve basınç uygulamasıyla gerçekleşir. Parçalar plastik duruma gelmediklerinden şekil bozulmaları yok gibidir. Difüzyonla kaynak, sıvı fazda bir ilâve metal bulunmamasıyla da sert lehimlemeden farkeder. Bu yöntem eş ya da farklı metalleri, ana metallere göre değişik bir ince ara metal tabakasıyla veya bunsuz, kaynak etme olanağını sağlar. Ara metal, örneğin berilyum, difüzyon olayını hızlandırıcı ve kırılma bileşimlerinin oluşmasını önleyici rol oynar. Ara tabaka, çok ince bir sacın araya konması, bir elektrolitik yığılma ya da pülverizasyonla elde edilir. Metallerden birinin bakır olduğu bazı metal veya alaşım birleşimleri, difüzyonla kaynak edilebilirler. Aynı yöntemle bakır bir madeni seramiğe kaynak edilebilir. Birleştirilecek iki metalin bağlantısında rekristalizasyon önemli bir rol oynadığından metallerin rekristalizasyon sıcaklığının biraz üstüne, ergime noktasının % 70 ile 80'ine çıkartılır. Uygulanan basınç daima çok az olup birkaç N/mm^2 mertebesinde. İşlemin süresi, yöntemin üçüncü önemli parametresi olup 30 dakikaya varabilir. Bakır bakırla $800-850^{\circ}C$ 'ta, 15-20 dak tutulan $5-7 N/mm^2$ basınçla kaynak edilir [45].

Sürtünme kaynak yönteminde iki parça, birinin öbürü üzerinde sürtmesiyle temas yüzeylerinde meydana gelen ısıdan faydalanarak birleştirilir. Klasik sistemde parçalardan en az birine hızlı dönel hareket verilir, öbür parça henüz sabittir. Deney tarafından saptanan hıza varıldığında, sabit parça ekseninde ilerler ve dönmekte olan parçaya yaslanır. Yüzey arasında meydana gelen ısı, temas halindeki yüzeyleri yumuşatır ve bir kabarcığın oluşmasını başlatır. Dönel hareket durdurulduktan sonra, kaynak kuvveti (basıncı) sabit tutulur ve hatta bazen artırılır ve bir döğme etkisi elde edilir [45].

5. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

5.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Tanımı

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), 1991 yılında İngiltere'deki Kaynak Enstitüsü (TWI) tarafından bulunmuştur [59].

SKK yöntemi katı hal kaynak yöntemlerindedir. SKK yönteminde kaynak işlemini gerçekleştiren ve özel olarak hazırlanmış bir takım bulunur. Isı, takım ve iş parçası arasındaki sürtünme ve iş parçasının plastik deformasyonu ile sağlanır [60].

SKK geliştirilmeye devam edilen birleştirme yöntemidir. SKK tekniği geniş uygulama alanlarına sahip olup farklı geometrilere kaynak imkânı sağlayan bir yöntemdir [61].

Başlangıçta bu yöntemin, özellikle demir dışı metaller üzerinde uygulanmasına karşın, günümüzde demir esaslı bazı malzemelerin kaynağı için de kullanılmaya başlamıştır. Özellikle alüminyum alaşımlarında diğer kaynak tekniklerine göre daha iyi mekanik özellikler elde edilebilmesi ve minimum sürede yüksek kaliteli birleştirmelerin gerçekleştirilmesi gibi avantajlarından dolayı, bu yöntem günümüzde önemli kaynak işlemleri arasına girmiştir [2,62].

Yöntemin uygulanması sırasında duman ve ışın oluşmaması, koruyucu gaz, toz ve ilave elektrot teline ihtiyaç duyulmaması, kaynak ağzı hazırlığının gerekmemesi, fazla bir ısılık gerektirmemesi, otomasyona uyumluluğu diğer kaynak yöntemlerine nazaran düşük kalıntı gerilme, yüksek mukavemet, çarpılmanın daha az olması gibi daha birçok üstünlüğün bulunması, SKK yönteminin uygulama alanlarını daha da genişletmektedir [2,63].

Günümüzde uçak, tren, roket, otomobil, gemi ve helikopter gibi araçların imalatında alüminyum alaşımlar büyük oranda kullanılmaktadır. Ancak alüminyum ve alaşımlarının ergitme kaynak teknikleri ile kaynağı hem problemlidir hem de zordur. Bu amaçla sürtünme karıştırma kaynağı, alüminyum alaşımlarının problemsiz ve kolay bir şekilde birleştirilmesi amacıyla geliştirilmiş ve endüstrideki uygulamalarına

başlanmış bir birleştirme tekniğidir [61]. Bütün alüminyum alaşımları pratik olarak sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilir. Sürtünme karıştırma kaynağında malzemeler ergitme sıcaklığına ulaşmadan birleştirme işlemi yapılmaktadır [64].

Bu kaynak yöntemi özellikle 1 mm'den az ve 35 mm'den kalın olan ve kaynak edilmesi problemler meydana getiren alüminyum alaşımlarına uygulanmış ve çok iyi mekanik özellikler elde edildiği araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Bugüne kadar İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde (TWI) alüminyum ve alüminyum alaşımları için bu kaynak yöntemi uygulanmış ve oluşturulan birleştirmeler üzerinde birçok araştırma yapılmıştır [61]. Özellikle 2000-6000-7000 serisi gibi yaşlandırılmış kaynak yapılamayan alüminyum alaşımlarına uygulanabilmesi önemli bir avantaj olarak ortaya çıkmıştır [65].

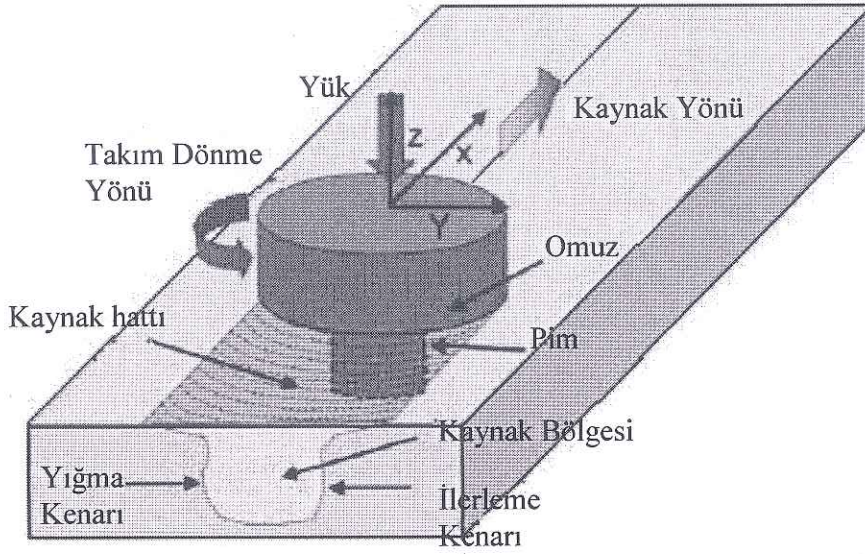
Son zamanlarda, özellikle alüminyum/çelik, alüminyum/magnezyum, alüminyum/paslanmaz çelik, bakır/pirinç gibi metalik malzeme çiftlerinin birleştirilmesinde başarıyla uygulanan SKK yönteminin, bakırın alüminyuma bindirme ve alın kaynağı birleştirmeleri için kullanıldığı bazı çalışmalar yapılmıştır [3].

5.2 Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Uygulanışı

Sürtünen eleman ile kaynak yöntemi, sürtünme kaynağından türetilmiştir. Kaynak edilen parçalar ergimezler bu yüzden yöntem katı hal kaynağı olarak adlandırılır [66].

Sürtünme karıştırma kaynağında, karıştırıcı aparatın iş parçasına dalması ve sürtünmesi sonucunda bölgesel olarak ısı girdisi oluşmaktadır. Şekil 5.1'de sürtünme karıştırma kaynak işleminin şematik resmi verilmiştir. Sürtünme karıştırma aparatı ile iş parçası arasında oluşan sürtünmeden dolayı kaynak bölgesindeki malzeme yumuşamakta ve plastik şekil değişimi gerçekleşmektedir. Karıştırıcı aparatın iki temel fonksiyonu vardır, birincisi karıştırıcı ucun iş parçasına sürtünmesi ile birleşme için gerekli ısı girdisinin sağlanması, ikincisi ise yumuşayan malzemenin birleştirme bölgesinde karıştırılarak plastik deformasyonunun sağlanmasıdır. Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı iki farklı şekilde olabilir. Kaynakla birleştirilecek

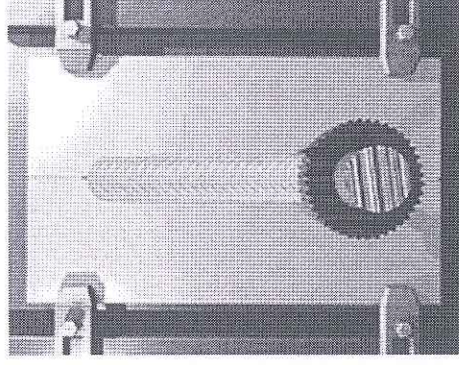
olan parçaların hareketi söz konusu olabileceği gibi, takımın dönme ve ilerleme hareketi de mümkün olabilir. Karıştırıcı uç yapılacak iş parçasına daldırılarak kaynak yapılacak uzunluk boyunca ilerletilir. Pim malzemeye temas ettiğinde sürtünme kaynağındaki duruma benzer durum oluşarak temas noktasında ısı, sürtünmenin etkisi ile hızla artar ve malzemenin plastik şekil değişimine neden olur. Karıştırılan malzeme, hidrostatik basınç altında soğuyarak katılaşıyor ve birleşme olayı gerçekleşir [1].



Şekil 5.1: Sürtünme karıştırma kaynağının şematik resmi [67]

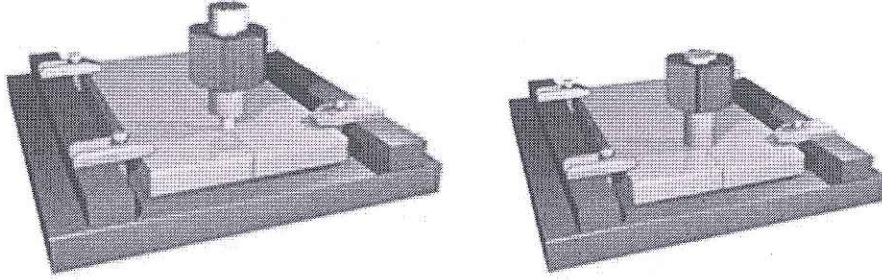
Yöntemin, örnek bir alın kaynağı için uygulanışını dört ana aşamada özetlemek mümkündür:

1. SKK ile birleştirilecek levhalar, bir dayama levhasının üzerine yerleştirildikten sonra, uygun bağlama aparatları yardımıyla sıkı bir şekilde sabitlenir. Birleştirilecek levhaların sabitlenmesinin amacı, karıştırıcı ucunun levha yüzeylerinden içeri girmesi sırasında meydana gelen aksel kuvvetlerin, levha pozisyonları ve konumlarını bozmasını önlemektir. Daha sonra, kaynak bölgesinde birleştirme için gerekli ısı girdisi ve karıştırmayı sağlayan, özel olarak tasarlanmış karıştırıcı uç ve omuz kısmından oluşan bir takım, SKK makinesinin (freze, robot vs) takım tutucusuna Şekil 5.2'de verildiği gibi monte edilir [56,68].



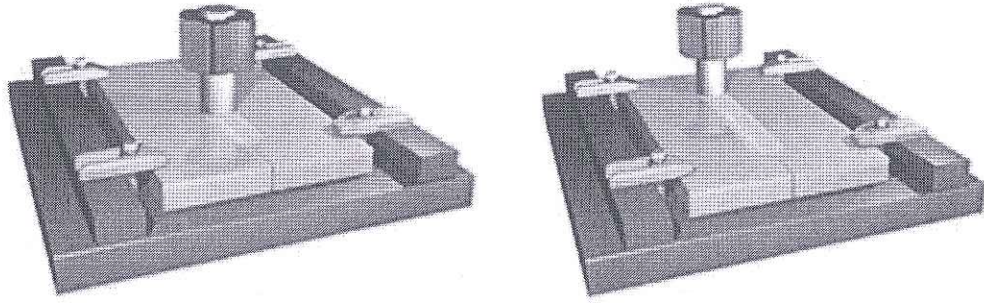
Şekil 5.2: SKK birinci aşama [68]

2. Saat yönü veya tersi yönde, belirli bir devirde döndürülen takımın karıştırıcı ucu, Şekil 5.3'deki gibi birbirlerine bitişik halde sabitlenen levhaların altına birleşme yüzeylerinden içeriye doğru batırılır. Bu batırma işlemi, karıştırıcı uç tamamen malzemelerin içerisine girinceye ve omuz kısmı levha yüzeylerine temas edinceye kadar devam eder. Genellikle, omuz kısmının da bir miktar levha yüzeylerinden içeri girmesi, etkin bir birleştirme için tercih edilir [56,68].



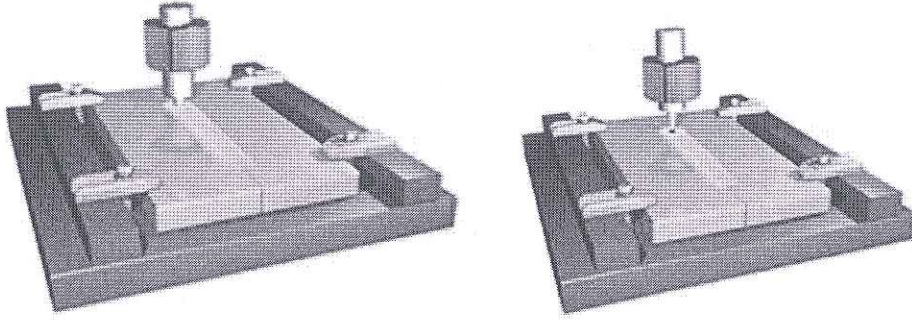
Şekil 5.3: SKK ikinci aşama [68]

3. Dönmekte olan takıma veya levhaların sabitlendiği makinenin tablasına, birleştirmenin istendiği kaynak hattı doğrultusunda Şekil 5.4'de gösterildiği gibi belirlenen kaynak hızında ilerleme hareketi verilerek kaynak işlemine başlanır [56,68].



Şekil 5.4: SKK üçüncü aşama [68]

4. İstenilen uzunlukta kaynak işlemi gerçekleştirildikten sonra, takım levha yüzeylerinden dışarı doğru çekilerek çıkarılır ve birleştirme işlemine son verilir. Takım karıştırıcı ucunun levhalardan çıktığı kaynak dikişi sonunda Şekil 5.5’de verildiği gibi bir delik meydana gelmektedir [56,68].



Şekil 5.5: SKK dördüncü aşama [68]

5.3 Kaynak Parametrelerinin SKK Yöntemine Etkisi

SKK’da etkin olan parametreler; malzeme kalınlığı, karıştırıcı uç malzemesi ve dizaynı, takım ilerleme hızı ve takım devir sayısı, kaynak pozisyonu ve birleştirme geometrileridir [69].

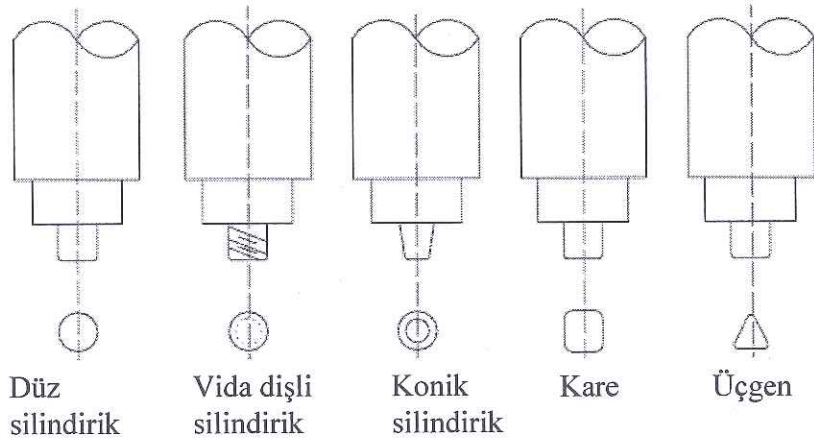
5.3.1 Malzemenin Kalınlığı

Bu kaynak yöntemi ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirme işlemi pimin eğik konumda levhalara daldırılması ile yapılabilmektedir. Bu kaynak yöntemi, büyük uzunluktaki kaynakların ergime olmaksızın yapılmasını sağlamaktadır. Bu ergitme kaynakları ile karşılaştırıldığında önemli bazı metalürjik

avantajlar sağlar. İlk olarak; ergime olmaması katılaşma çatlaklarının oluşmamasını sağlar. İkinci olarak ergitme kaynağı ile birleştirilemeyen farklı ve uyumsuz alaşımlar başarıyla birleştirilebilir. Üçüncü olarak, karıştırma ve döğme hareketi ergime kaynağı ile elde edilebilenden daha iyi özelliklere sahip ince taneli yapı üretir. Son olarak düşük kaynama noktasına sahip alaşım elementleri kaynak sırasında buharlaşma yoluyla kaybolmazlar. Diğer avantajları; düşük distorsiyon, kenar hazırlanmasına ihtiyaç duyulmaması, porozitelerin daha az olması, koruyucu gaz ve dolgu metali gibi kaynak sırasında kullanılan malzemelere ihtiyaç duyulmaması ve oksit içeren yüzeylerin birleştirilebilir olmasıdır [69].

5.3.2 Karıştırıcı Uç Malzemesi ve Dizaynı

Bu kaynak yönteminde, yüksek sıcaklıklarda aşınma direncine sahip malzemelerden üretilen, değişik tasarımlarda ve tükenmeyen döner takımlar kullanılır. Bu konudaki gelişmeler hızla devam etmektedir. SKK kaynak yöntemi ilk olarak geliştirildiğinde kullanılan batıcı uçlar; yüzeyine helisel diş açılmış, uzunluğu kaynak edilecek levha kalınlığından biraz kısa silindirik pimlerdi. Fakat son yıllarda sürtünmeden açığa çıkan ısı ile akıcı kıvama gelen malzemenin kaynak bölgesinde kalmasını geliştirmek için çok değişik pim dizaynları geliştirilmiştir. Şekil 5.6'da değişik pim profilleri verilmiştir. Kaynağı zor veya daha kalın malzemelerde, plastik şekil değiştiren kısmın, karıştırıcı uç kısım etrafındaki akışı, göz önünde tutulması gereken önemli bir noktadır. Eğer oldukça geniş çapta karıştırıcı uç kısımlar gerekli ise çok geniş hacimli malzeme hareketi olacaktır. Takımlar, plastik şekil değiştirebilen malzemenin, karıştırıcı uç kısım etrafındaki akışını artıracak şekilde geliştirilmelidir. Kullanılan karıştırıcı uç kısım profilleri, sürtünme karıştırma kaynak yönteminin kalitesini artırmak için vidaya benzer yivli veya sarmal yivli, mikser veya pervane şekilli olarak geliştirilmiştir. Mikser tip içi boş karıştırıcı uç kısma sahip takım, plastik şekil değiştiren malzemenin, karıştırıcı uç kısmın içinden geçmesine olanak sağlar. Benzer çaptaki dolu takımlar ile karşılaştırıldığında, daha az miktarda malzeme yer değiştirir [69].



Şekil 5.6: Karıştırıcı uç pim profilleri [5]

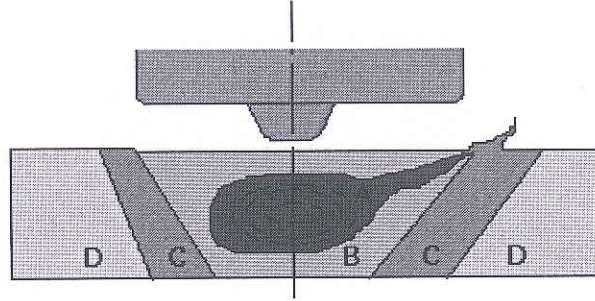
Takım malzemesi olarak en yaygın kullanılan malzemelerin başında; alaşımli takım çelikleri, yüksek hız çelikleri, nikel-kobalt alaşımlarının yüksek tokluğa ve sertliğe sahip olanları ile sert metal karbürler gelmektedir. Ayrıca, diğer malzemelere oranla daha düşük mukavemet ve tokluğun yeterli olduğu uygulamalarda (alüminyum alaşımlarının bazı türleri için) uç maliyetinin düşük olması istenen uygulamalarda, ısıl işlem çelikleri de (AISI 4140, ISO 683/II Type 3, DIN 42CrMo4; AISI 4340, ISO 683/VIII Type 4, DIN 40NiCrMo6 v.b.) yaygın olarak kullanılmaktadır [69].

5.3.3 Takım İlerleme Hızı ve Takım Devir Sayısı

Sürtünme karıştırma kaynağında iki parametre çok önemlidir. Bunlar saat yönünde veya saat yönünün tersi yönde takımın devir sayısı (dev/dak) ve kaynak hattı boyunca takımın ilerleme hızıdır (V, mm/dak). Takımın dönmesi, dönen pim etrafındaki malzemenin karışmasına sebep olur, takımın dönmesi karışan malzemeyi pimin önünden arkasına taşır ve kaynak işlemi sonlanır. Yüksek kaynak hızlarında asıl problem yeterli birleşmenin olmadığı soğuk kaynaklanmadır. Takımın yüksek devir sayılarında sürtünmenin fazla olması sebebiyle yüksek ısılar üretilir ve malzemenin daha kuvvetli karışmasına sebep olur. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynaklanma hızının değişmesi malzeme sertliğini de değiştirmektedir. Artan kaynak ilerleme hızlarında sertlik değerleri de artmaktadır. Bunun nedeni yüksek kaynak hızlarında malzemeye aktarılan ısı girdisinin azalmasıdır [69].

5.4 Kaynağın Metalurjik Yapısı

Sürtünme karıştırma kaynağı, ergime derecesinin altında birleştirmeler üreten bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu yöntemde ısı tesiri altındaki bölge, ergitme kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında yüksek sıcaklık oluşmadığından, oldukça dardır. Kaynak dikişinden esas metale doğru bu bölgeler dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB), termomekanik olarak etkilenen bölge (TMEB), ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve esas malzemenin oluşmaktadır. Şekil 5.7’de sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan alüminyum alaşımının mikroyapısındaki farklı bölgeler görülmektedir [2].



A: Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB), B: Termomekanik olarak etkilenen bölge (TMEB), C: Isı tesiri altındaki bölge (ITAB), D: Esas malzeme.

Şekil 5.7: Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan alüminyum alaşımının mikroyapısı [2]

5.4.1 Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge (DKB)

Yoğun plastik deformasyonun olduğu ve yüksek sürtünme sıcaklıklarının meydana geldiği bu bölgede dinamik yeniden kristalleşme gerçekleştiğinden “dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgesi” veya “kaynak merkezi” olarak adlandırılmıştır. Bu bölgede dislokasyon yoğunluğu daha düşüktür ve ince yönlenmiş tanelerden oluşmaktadır [2].

5.4.2 Termomekanik Etkilenen Bölge (TMEB)

Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge ile ısı tesiri altındaki bölge arasında, yüksek deformasyon ve sıcaklığa maruz kalan bölgeyi temsil etmektedir. Ana metalin tanelerinin kaynak merkezinden bu bölgeye ekstrüze edilmesiyle, yoğun

bir döğme olayı meydana gelmektedir. Karıştırma esnasında oluşan ısı, bu bölgenin mikroyapı ve mekanik özelliklerini değıştirmiştir. Bunun sonucunda deformasyona uğrayan taneler uzamış ve yassılaşmış taneler haline gelmiştir [2].

5.4.3 Isı tesiri altındaki bölge (ITAB)

Kaynak metaline daha yakın, ısıdan etkilenmeyen ana metale komşu olan bölgedir. Bu bölgedeki malzeme karıştırma esnasında meydana gelen ısıdan etkilenir ve malzemenin yapı ve özelliklerinde kısmi değışimler ortaya çıkar. Bu bölgede plastik deformasyon meydana gelmez [2].

5.4.4 Esas Malzeme

Bu bölgede, malzeme mikroyapı özelliklerinde herhangi bir değışme veya dönüşüm meydana gelmemektedir. Bu bölge kaynak metalinden oldukça uzakta olduğundan ve çok düşük sıcaklıklara maruz kaldığından karıştırma esnasında oluşan yüksek ısıdan ve plastik deformasyondan etkilenmemektedir [2].

5.5 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları

Sürtünme karıştırma kaynağında ısı girdisinin düşük olması temel avantajlarından biridir. Yapılan araştırmalarda sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzemelerde, kaynak bölgesindeki maksimum sıcaklığın malzemenin ergime sıcaklığının %20 altında olduğu görülmüştür. İdeal kaynak için, karıştırıcı uç etrafında malzemenin plastik Şekil değışimini ve akışını sağılayacak yeterli sıcaklığın oluşması gerekmektedir.

Malzemedен bağımsız olarak, sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan birleştirmelerde, konvansiyonel ve alternatif kaynaklı birleştirmelere göre birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağının avantajları, proses, enerji tüketimi, metalurjik ve çevresel etki olmak üzere dört ana grupta toplanmıştır [1].

Proses ;

- Kaynak bölgesinde yüzey temizliğine ve kaynak ağzı açılmasına gereksinim duyulmaması,
- İş parçasında deformasyon kaynaklı çarpılmaların ergitme kaynağına göre daha az olması,
- Boyutsal kararlılık ve tekrar edilebilme özelliği [1].

Enerji tüketimi ;

- Kaynak sırasında harcanan enerji girdisinin konvansiyonel kaynak yöntemlerine göre daha düşük olması,
- SKK ile 50 mm kalınlığa kadar tek pasoda kaynağın mümkün olması,
- Diğer kaynak yöntemlerinde birçok pasoda işlemin sürmesi, kaynağın zorluğu ve yavaş olması [1,68],
- Tren, uçak, uzay aracı, otomotiv ve gemi inşasında alüminyum gibi hafif metallerin SKK ile birleştirilmesiyle yakıt tüketiminin azalması [1].

Metalurjik ;

- Bir katı faz prosesi olması,
- Kaynak sonrasında alaşım elementlerinin korunması,
- Birleştirme bölgesinde yeniden kristalleşmeden dolayı ince taneli yapının oluşması,
- Metalurjik özelliklerin birleştirme bölgesinde çok iyi olması, bazı durumlarda ana metalin dayanımının %90'ını seviyesine ulaşılabilmesi [1,68].

Çevresel etki ;

- Koruyucu gaz ve ilave kaynak metaline gereksinim duyulmaması,
- Kaynak öncesinde yağ çözücü solventlere gereksinim duyulmaması,
- Proses sırasında sağlığa zararlı gazların ortaya çıkmaması.

Sürtünme karıştırma kaynağının endüstriyel olarak farklı sektörlerde kullanım alanı bulmasına rağmen bazı sınırlamaları mevcuttur. Sürtünme karıştırma kaynağının dezavantajları şu şekilde özetlenebilir [1],

- Kaynak işleminden sonra takım işparçasından çıktığında delik bırakmaktadır [70].
- İş parçasının ileri geri hareketini sağlayacak ekipmanlara gereksinim duyulmaktadır [1].
- Birleştirme bölgesinde %100 nufuziyet isteniyor ise, parçalar ters çevrilip arka taraftanda kaynatılmalıdır [1].
- İnce parçaların (<1,25mm) sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi etkili değildir [1].
- İş parçaları tablaya bağlandığından dolayı ekipmanların taşınması zordur [47].
- Her malzemenin kaynağı mümkün değildir. Yalnızca mukavemeti düşük ve özellikle düşük ergime dereceli malzemelerin kaynağına uygundur [71].
- İş parçaları torka, ısınmaya ve birleştirme esnasındaki eksenel basınca dayanıklı olmalıdır [72].
- Kaynak öncesi yüzey hazırlama işlemine özen gösterilmesi gerekmektedir [73].

5.6 Yöntemin Uygulama Alanları

SKK yönteminin başarı ile uygulanabildiği endüstriyel uygulamaları aşağıda verilen şekilde özetlenebilir;

Motor ve şasi yataklarının üretimi, jant üretimi, kamyon iskeleti üretimi, zırh kaplı araçların üretimi, yakıt tankı üretimi, karavan üretimi, otobüs üretimi, alüminyum profillerden meydana gelen otomobil üretiminde uygulanmaktadır.

Yüksek hızlı tren üretimi, metro taşımacılığı ve tramvay üretimi, vagon şasisi ve karoser üretimi, yük vagonları ve tank üretimi, konteynır iskeletleri üretiminde kullanılmaktadır.

Gemi omurgası üretimi, güverte panellerinin birleştirilmesi, gemi bölmeleri üretimi, kamara yapımı, helikopter platformlarının yapımında, yelkenli gemi, direk ve zincir üretiminde, soğutma bölmelerinin üretiminde kullanılmaktadır.

Uçak gövdesi, kanat ve kuyruk kısmı üretimi, yakıt tankları üretimi, uzay araçları kriyojenik yakıt tankları üretimi, askeri uçakların dış atık tankları üretimi, askeri ve araştırma amaçlı roket üretimi, MIG kaynaklarının tamirinde kullanılmaktadır.

Alüminyum köprü yapımı, alüminyum boru hatlarının birleştirilmesi, bina ön yüz panellerinin birleştirilmesi, pencere iskeletlerinin birleştirilmesi, klima ve ısı eşanjörü üretimi, enerji santrallerinde ve kimya endüstrisinde Al reaktörleri kurulumunda kullanılmaktadır.

Elektrik motoru gövdesi, elektrik iletim bağlantıları, elektronik sargıları, gıda ve mutfak ekipmanları, beyaz eşya üretimi, soğutma panelleri üretimi, gaz tankları ve silindirleri üretimi, un değirmenlerinde bakır ve alüminyum bobin bağlantılarında kullanılmaktadır [56].

Alüminyum/çelik, alüminyum/magnezyum, alüminyum/paslanmaz çelik, bakır/pirinç, bakır/alüminyum gibi metalik malzeme çiftlerinin birlikte kullanıldığı yerlerde bu malzeme çiftlerinin birleştirilmesinde kullanılmaktadır [3].

6. YÖNTEM

6.1 Çalışmalarda Kullanılan Malzeme ve Donanımlar

6.1.1 Bakır ve Alüminyum Malzemeler

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirme işlemi için enerji santralleri, dağıtım hatları, elektronik endüstrisi ve elektrik iletiminde Al-Cu geçiş parçalarında birçok kullanım alanı bulunan 4 mm kalınlıkta Alüminyum 1050 ve %99,99 saflıkta elektrolitik bakır levhalar kullanılmıştır. Alüminyum ve bakır malzemeler 100x150 mm ölçülerinde temin edilmiştir. Birleştirme yüzeyleri freze ile düzeltilmiştir. Tablo 6.1’de deneylerde kullanılan alüminyum malzemenin, Tablo 6.2’de bakır malzemenin kimyasal içeriği, Tablo 6.3’de alüminyum ve bakırın mekanik özellikleri, Şekil 6.1’de ana metallerin mikroyapıları verilmiştir.

Tablo 6.1: AA1050 levha malzemenin kimyasal içeriği (%ağırlık)

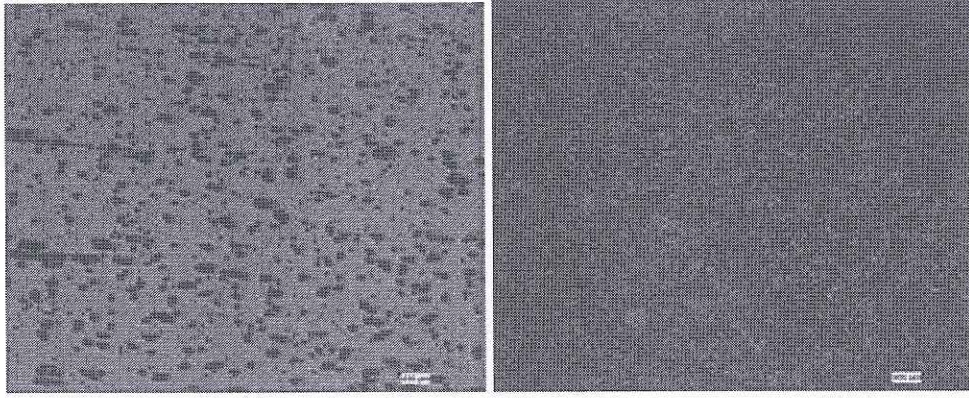
| Al | Fe | Ti | Zn | Mg | Cr | Mn | Ni | Si | Pb |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 99,756 | 0,207 | 0,017 | 0,007 | 0,006 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | <0,001 |

Tablo 6.2: Saf bakır levha malzemenin kimyasal içeriği (%ağırlık)

| Cu | Al | Si | Ni | Fe | Zn | Sn |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 99,99 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,001 |

Tablo 6.3: Alüminyum ve bakırın mekanik özellikleri

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



(a)

(b)

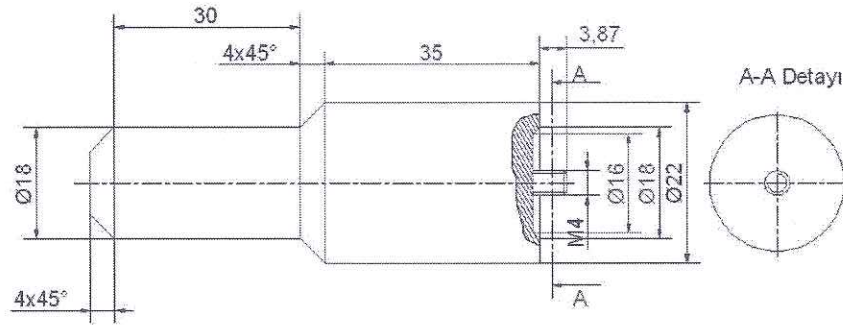
Şekil 6.1: Ana metal mikroyapı görünümü, a) AA1050, b) Cu

6.1.2 Karıştırıcı Uç Tasarımı ve İmalatı

Birleştirme sırasında parçalarla temas halinde olan karıştırıcı uçta yüksek sıcaklıklar oluşacağından, işlem sırasında aşınma ve sertlik direncini koruyabileceği düşünülerek takım malzemesi (1.3343 tip) yüksek hız çeliği seçilmiştir. Üretimi yapılan karıştırıcı uca ısıtılma işlemi uygulanmış ve 62 HRC sertlik değeri kazandırılmıştır. Karıştırıcı ucun resmi Şekil 6.2’de, ölçüleri ise Şekil 6.3’de verilmiştir.



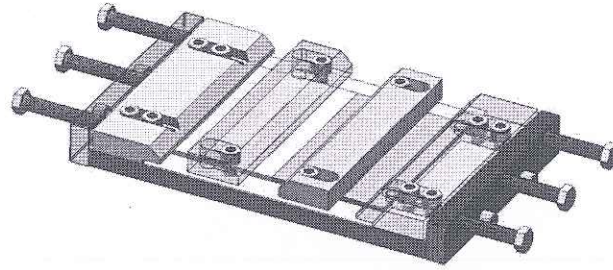
Şekil 6.2: Karıştırıcı uç



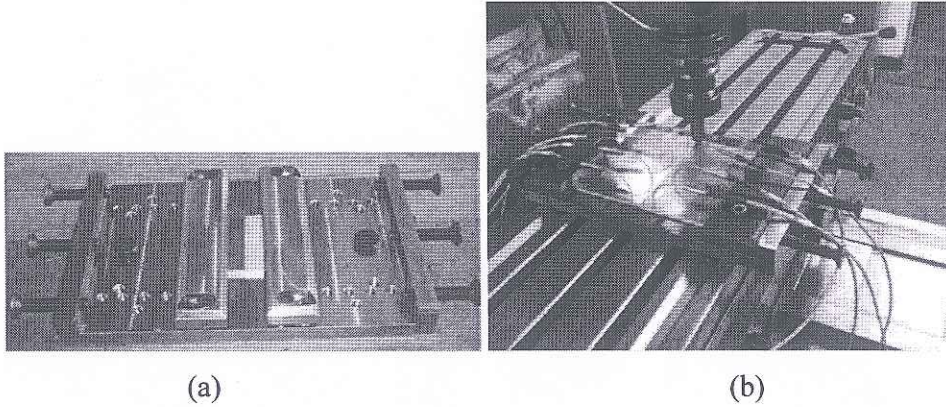
Şekil 6.3: Karıştırıcı ucun ölçüleri

6.1.3 Bağlama Kalıbı Tasarımı ve İmalatı

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin başarılı bir şekilde yapılması için levhaların alın altına ayrılmayacak şekilde bağlanması gerekmektedir. Ayrıca birleştirme esnasında karıştırıcı ucun pim kısmı malzemelere batırılması ve omuz kısmında gerekli ısının oluşması için temas etmesi nedeniyle levhalar birbirinden ayrılmaya zorlanacaktır. Bu hareketlerin önlenmesi amacı ile Şekil 6.4’de verilen bağlama kalıbı tasarlanmıştır. Şekil 6.5’de kalıbın son hali verilmiştir. Bağlama kalıbı dövülmüş Ck 45 çeliğinden imal edilmiştir.



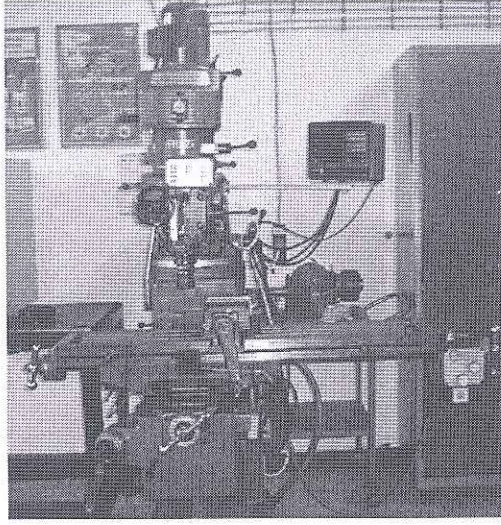
Şekil 6.4: Bağlama kalıbı tasarımı



Şekil 6.5: Bağlama kalıbının, a) Son hali, b) Tabladaki görüntüsü.

6.1.4 SKK İşleminde Kullanılan Tezgah

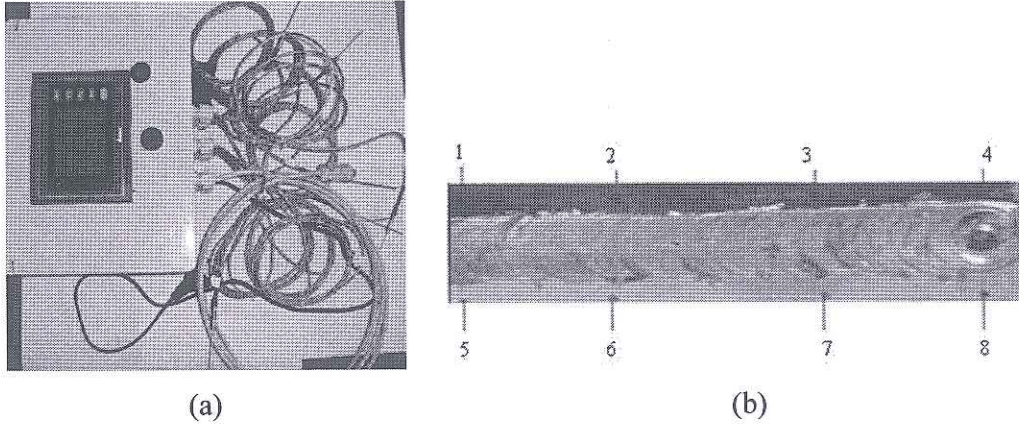
Birleştirme işlemlerinde dikey freze tezgahı kullanılmıştır. Şekil 6.6'da SKK kaynak işleminde kullanılan freze tezgahı verilmiştir. Devir sayısı (karıştırıcı ucun dönme hızı) dev/dak cinsinden kayış sistemiyle ayarlanmakta olup, ilerleme hızı (kaynak hızı) mm/dak cinsinden tabladan otomatik olarak verilmektedir.



Şekil 6.6: SKK İşleminde Kullanılan Freze Tezgahı

6.1.5 Kaynak Bölgesindeki Sıcaklık Değişimlerinin Ölçülmesi

Kaynak işlemi esnasında karıştırıcı ucun omuz kısmının malzemelere belirlenen değerde temas etmesi ve dönmesi nedeniyle sürtünmeden kaynaklanan ısının ölçülmesi amacıyla Şekil 6.7 a'da verilen 8 çıkışlı K-tipi termokupullar kullanılmıştır. Şekil 6.7 b'de gösterildiği gibi termokupulların 4 tanesi bakır tarafına, kalan 4 tanesi de alüminyum tarafına yerleştirilmiştir.



Şekil 6.7 : a) Sıcaklık veri kaydedici ve K-tipi termokupullar b) Termokupulların yerleşimi

6.2 Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Parçaların Birleştirilmesi

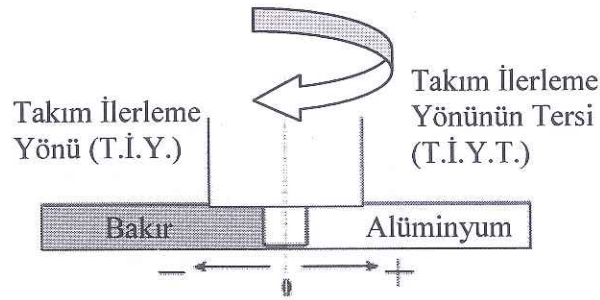
SKK yöntemi ile parçalar birleştirilmeden önce kaynak öncesi hazırlıklar yapılmıştır. Bu hazırlıklar aşağıda sıralanmıştır:

- Parçaların tüm yüzeyleri freze tezgahında işlenerek düzeltilmiş ve çapakları alınmıştır.
- Levhalarda sıcaklık dağılımını tespit etmek amacıyla 2 mm çapında ve 2,5 mm derinlikte kör delikler açılmıştır.
- Üretilen karıştırıcı uç freze miline bağlanmış ve $1,5^\circ$ takım eğim açısı verilmiştir.
- Termokupul uçları deliklere yerleştirilmiştir.
- Bağlama kalıbının karıştırıcı uç ile aynı ekseninde olmasını sağlamak için, bağlama kalıbı komparatör ile bağlanmıştır. Parçalar alın altına getirilerek baskı plakaları ile sağlam bir şekilde sabitlenmiştir.

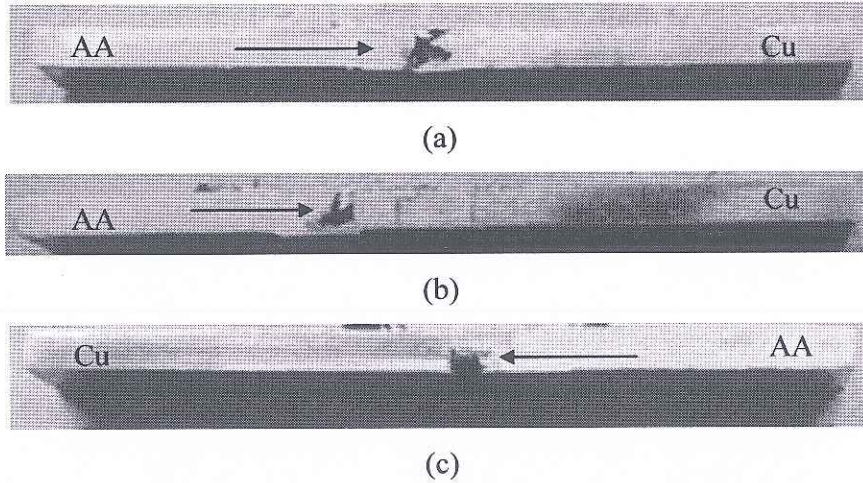
Deney parametrelerinin belirlenmesinde birçok ön deneyler yapılmıştır. Birleştirme işleminde sabit tutulan parametreler ise şunlardır:

- Takım dönme yönü : Saat yönü
- Takım eğim açısı : $1,5^\circ$
- Kaynak başlangıcında bekleme süresi : 60 saniye

Takım dönme ve ilerleme hızlarının birçok parametresinde deneyler yapılmıştır. Yapılan birleştirmelerin hepsinde çekme mukavemeti (28,34-33,98-37,64-46,20 MPa) düşük değerlerde çıkmıştır. Bu deneylerde karıştırıcı uç Şekil 6.8'de gösterildiği gibi alüminyum ve bakır levhaya 0 (sıfır) olarak konumlandırılmıştır. Şekil 6.9'da 630-1330-2440 dev/dak takım dönme hızında ve 20 mm/dak takım ilerleme hızında 0 konumlu kaynak kesitleri verilmiştir. Kaynak esnasında oluşan boşluklar açıkça görülmektedir.



Şekil 6.8: Karıştırıcı ucun levhalardaki konumu [30]



Şekil 6.9: 0 konumlu kaynak kesit görüntüsü, a) 630 dev/dak, b) 1330 dev/dak, c) 2440 dev/dak

Yapılan çalışmalarda ilerleme kenarına bakır ve alüminyum farklı yerleştirilerek de deneyler yapılmıştır. Kaynak yüzey görünümünde sorun olmamakla birlikte içyapıda boşluklar oluşmuştur. Boşluklar da beraberinde çekme mukavemetlerinin düşmesine neden olmuştur. Sol ve sağ vidalı karıştırıcı uçlar

kullanılarak deneyler tekrarlandığında çekme mukavemetlerinde (30,09-25,26-21,24 MPa) yine istenilen değerlerde olmamıştır. Numunelerin çift taraflı kaynağı yapıldığında da kayda değer bir değişiklik (31,63-32,90 MPa) elde edilmemiştir. Sonuç olarak karıştırıcı ucun konumunun değiştirilmesi ile çalışmalar yapılmıştır. Karıştırıcı ucun bakıra nazaran daha yumuşak olan alüminyum tarafına konumlandırılmasıyla ciddi oranda değerler artmaya başlamıştır. Takım ilerleme yönüne literatüre uygun olarak sert metal olan bakır, takım ilerleme yönünün ters tarafına daha yumuşak olan alüminyum levha yerleştirilmiştir [30]. Alüminyum tarafına 2,5 mm karıştırıcı ucun kaydırılması ile yapılan kaynakta 75,10-79,43 MPa çekme değerleri elde edilerek %100 oranında artışlar sağlanmıştır. Aynı deney bakır tarafına karıştırıcı ucun 2,5 mm kaydırılarak tekrarlandığında çekme değerlerinde (10,90-21,60 MPa) artış elde edilmemiştir. Deney parametrelerinin optimizasyon işleminden sonra takım konumlandırılmasının önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülerek, Tablo 6.4’de verilen deney parametreleri belirlenmiştir.

Tablo 6.4: Deney parametreleri

| Takım dönme hızı (dev/dak) | Takım ilerleme hızı (mm/dak) | Takım konumu (Al tarafına mm) | Takım eğim açısı |
|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 630 | 20 | 1 | 1,5° |
| 630 | 20 | 1,5 | |
| 630 | 20 | 2 | |
| 630 | 30 | 1 | |
| 630 | 30 | 1,5 | |
| 630 | 30 | 2 | |
| 630 | 50 | 1 | |
| 630 | 50 | 1,5 | |
| 630 | 50 | 2 | |
| 1330 | 20 | 1 | |
| 1330 | 20 | 1,5 | |
| 1330 | 20 | 2 | |
| 1330 | 30 | 1 | |
| 1330 | 30 | 1,5 | |
| 1330 | 30 | 2 | |

Tablo 6.4: Deney parametreleri (devam)

| Takım dönme hızı (dev/dak) | Takım ilerleme hızı (mm/dak) | Takım konumu (Al tarafına mm) | Takım eğim açısı |
|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 1330 | 50 | 1 | 1,5° |
| 1330 | 50 | 1,5 | |
| 1330 | 50 | 2 | |
| 2440 | 20 | 1 | |
| 2440 | 20 | 1,5 | |
| 2440 | 20 | 2 | |
| 2440 | 30 | 1 | |
| 2440 | 30 | 1,5 | |
| 2440 | 30 | 2 | |
| 2440 | 50 | 1 | |
| 2440 | 50 | 1,5 | |
| 2440 | 50 | 2 | |

Deney parametreleri belirlendikten sonra;

- Takım dönme hızı ve ilerleme hızı ayarlanmış, takımın sabitlenen levhalara 3,87 mm batırılması sağlanmış ve 0,10 mm omuz batma derinliği verilerek 60 sn beklenilerek levhaların ısınması sağlanmıştır.
- Freze tablası takımın ilerleme hızında hareket ettirilerek, sürtünme ısı ve takım dönme hareketi ile plastikleşen Cu ve Al levhaların birleştirilmesi sağlanmıştır.
- Kaynak bitimine yakın otomatik tabla ilerlemesi durdurulmuş, karıştırıcı uç levhalardan çıkarılıp, kaynak tamamlanmıştır.

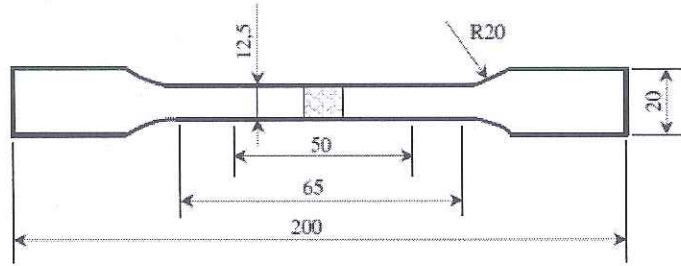
Bundan sonraki bölümlerde numunlerin kodlanmasında önce takım dönme hızı, sonra takım ilerleme hızı ve son olarak da takım konumlandırması kullanılmıştır. Örneğin 2440 dev/dak takım dönme hızında, 30 mm/dak takım ilerleme hızında ve 1,5 mm takım konumunda SKK işlemi yapılan numunenin kodlanması 2440/30/1,5 olarak yapılmıştır.

6.3 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

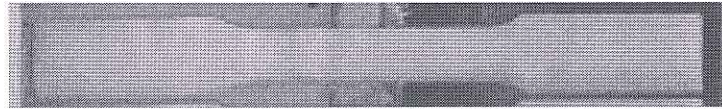
Deneysel parametrelerin birleştirmenin mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesi amacıyla çekme, eğme ve sertlik deneyleri yapılmıştır.

6.3.1 Çekme Deneyi

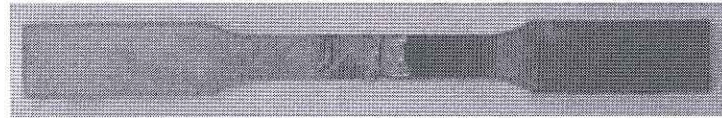
Başarıyla kaynaklanmış Al-Cu parçaların çekme mukavemetini tespit etmek amacıyla deney numuneleri Şekil 6.10'da verilen ölçülerde TS 138 EN 10002-1 standardına göre hazırlanmıştır. Çekme numuneleri kaynak yönüne dik alınmıştır. Deneylerin tamamında çene hızı 2 mm/dak olarak belirlenmiştir. Çekme numunesi Şekil 6.11'de gösterildiği gibi levhadan su jeti kesim yöntemiyle çıkarılmıştır.



Şekil 6.10: Çekme numunesi ölçüleri



(a)

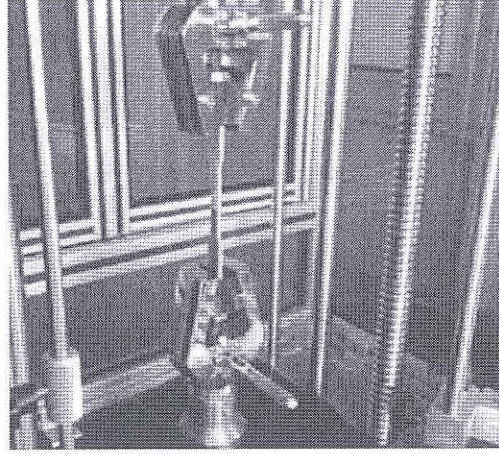


(b)

Şekil 6.11: Levhalardan su jeti kesim yöntem ile çıkarılmış çekme numunesi;

a) Kesme sonrası SKK'lı levha, b) Nihai çekme numunesi

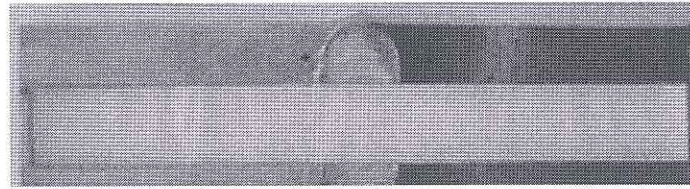
Numunelerin Alşa marka universal Şekil 6.12'de gösterildiği gibi çekme test cihazında oda sıcaklığında çekme deneyleri yapılmıştır. Her parametre için 3 adet çekme testi yapılmış ve ortalaması alınmıştır.



Şekil 6.12: Çekme-eğme test cihazı

6.3.2 Eğme Deneyi

Numunelerin eğme mukavemetlerini tespit etmek amacıyla üç noktadan eğme deneyleri yapılmıştır. Her deney için 2 adet eğme numunesi alınarak ortalaması çıkarılmıştır. TS 6067 standardına göre hazırlanan numuneler Şekil 6.13’de gösterildiği gibi su jeti kesim yöntem ile levhalardan çıkarılmıştır.



(a)

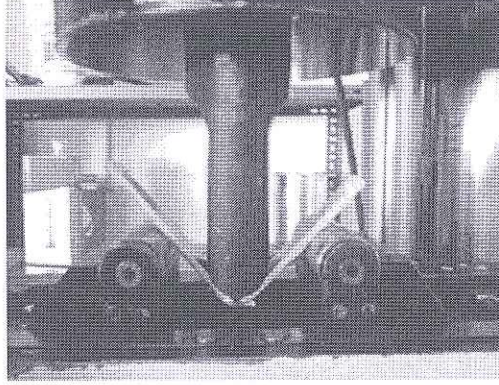


(b)

Şekil 6.13: Levhalardan su jeti kesim yöntem ile çıkarılmış eğme numunesi

a) Kesme sonrası SKK’lı levha, b) Nihai eğme numunesi

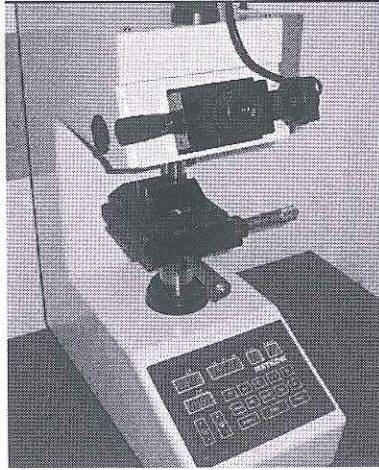
Eğme deneyleri Şekil 6.14’de verilen Alşa markalı cihazda, numuneler U şeklini alıncaya veya çatlama, kırılma olana kadar yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.14: Eğme test cihazı

6.3.3 Mikrosertlik Ölçümleri

Mikrosertlik ölçümleri Şekil 6.15’de verilen Vickers mikrosertlik cihazında yapılmıştır. Numunelerin kaynak kesitinin üst ve alt yüzeyinden iki sıra sertlik ölçümü yapılmıştır. İlk ölçüm üst yüzeyden 1 mm aşağıda 0.5 mm aralıklı olacak şekilde, ikinci ölçüm alt yüzeyden 1 mm yukarıda 0.5 mm aralıklı olacak şekilde yapılmıştır. Ölçümler 500 gram yük ve 30 saniye bekleme süresinde gerçekleştirilmiştir.



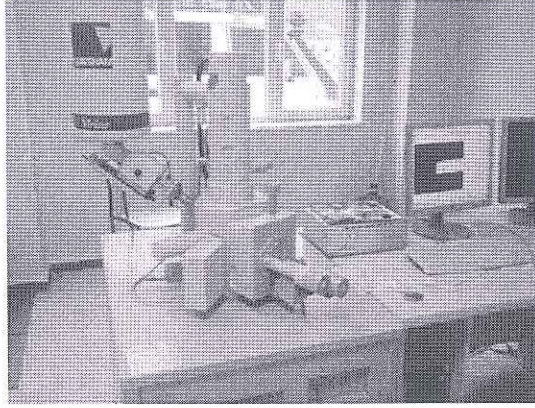
Şekil 6.15: Mikrosertlik cihazı

6.4 Optik ve SEM Mikroyapı İncelemesi

Birleştirme sonrası kaynak bölgelerinde meydana gelen mikroyapı değişikliklerini tespit etmek amacı ile kaynak yönüne dik kesitte dekopaj testere ile

numune çıkarılıp, çapakları alınmıştır. Numuneler optik inceleme öncesi 220-500-800-1000-1200 nolu zımparalar ile zımparalanmıştır. 3 µm elmas pasta ile ön parlatma, 1 µm elmas pasta ile son parlatması yapılmış ve dağlayıcı ile yüzeyler dağlanmıştır. 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 dağlanmış ve Nikon eclipse MA100 optik mikroskopta 50X-400 µm büyütmede incelenmiştir. Optik mikroskopta kullanılan numuneler aynı zamanda Scanning electron microscope (SEM) ve mikrosertlik incelemelerinde kullanılmıştır.

Ana malzemelerin ve karışım bölgesinin SEM görüntüleri Şekil 6.16'da verilen SEM cihazı ile çekilmiştir.



Şekil 6.16: SEM Cihazı

6.5 EDX ve XRD Analizleri

Kaynak bölgesinde karışımın oluşup oluşmadığını, malzemelerin birbirine girişinin tam olup olmadığının tespiti için EDX analizleri yapılmıştır.

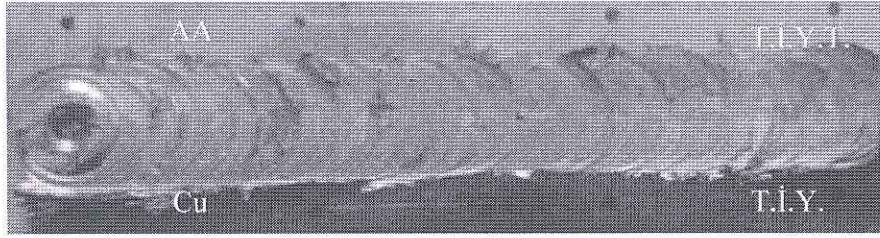
X-ışınları Difraktometresi (XRD), kristalin bileşiklerin kalitatif olarak tanınmasında pratik bir yöntemdir. XRD tekniği, bir kristal düzleminin birim hücre boyutlarıyla birlikte kristalin atom düzlemleri arasındaki uzaklığı belirleyebilen bir tekniktir. X ışınının içinden geçtiği madde elektronları arasındaki etkileşme neticesinde saçılma oluşur. Eğer x-ışınları bir kristaldeki düzenli ortam tarafından saçılırsa, saçılmayı yapan merkezler arasındaki uzaklık x-ışınının dalga boyu ile aynı

mertebeden olduğu için saçılan ışınlar olumlu ya da olumsuz girişim yaparlar. Bu durumda kırınım meydana gelir [61]. Bu kırınımlar sayesinde oluşabilecek fazlar belirlenmiştir.

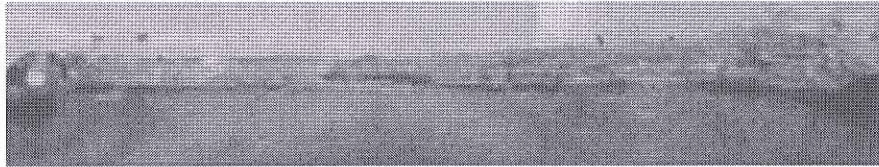
7. BULGULAR

7.1 Kaynak Yüzeyi ve Kök Görüntüleri

Cu-Al malzeme çiftinin takımın 0 konumunda yeterli dayanıma ulaşamamıştır. Daha sonra takımın Al tarafına belirlenen değerlerde (1-1,5-2 mm) kaydırılması ile SKK başarıyla gerçekleştirilmiştir. Kaynak yüzeyleri ve kök görüntüleri incelendiğinde genelde kaynakta boşluk, çukur, birleşme yetersizliği gibi kaynak hatalarına rastlanılmamıştır. Örnek olarak bazı numunelerin kaynak yüzeyleri ve kök görüntüleri Şekil 7.1-3'de verilmiştir.

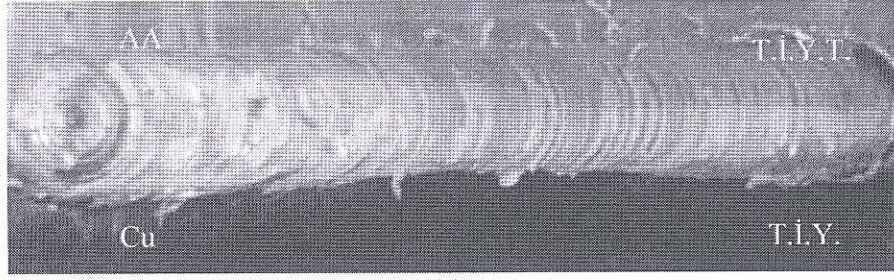


(a)



(b)

Şekil 7.1: 630/20/1 numunesi, a) Kaynak yüzeyi, b) Kök görüntüsü



(a)

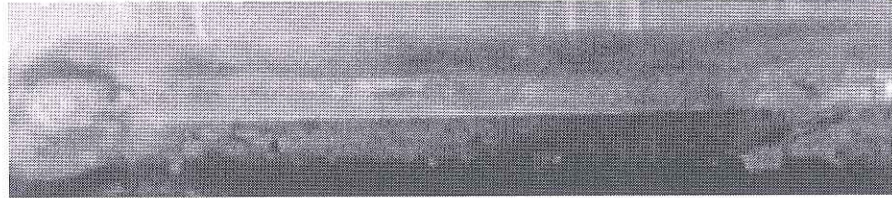


(b)

Şekil 7.2: 1330/30/1,5 numunesi, a) Kaynak yüzeyi, b) Kök görüntüsü



(a)

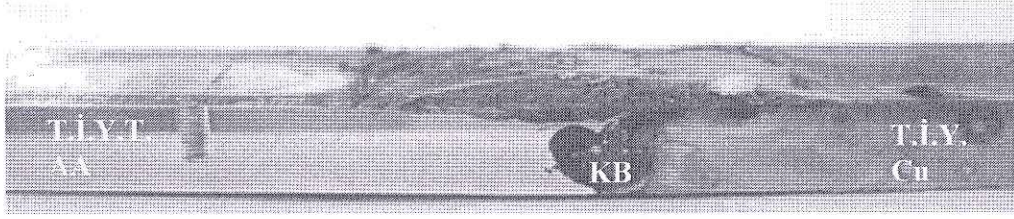


(b)

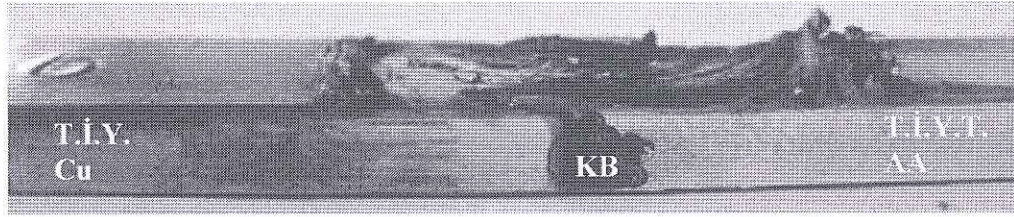
Şekil 7.3: 2440/50/2 numunesi, a) Kaynak yüzeyi, b) Kök görüntüsü

7.2 Kaynak Kesit Görüntüleri

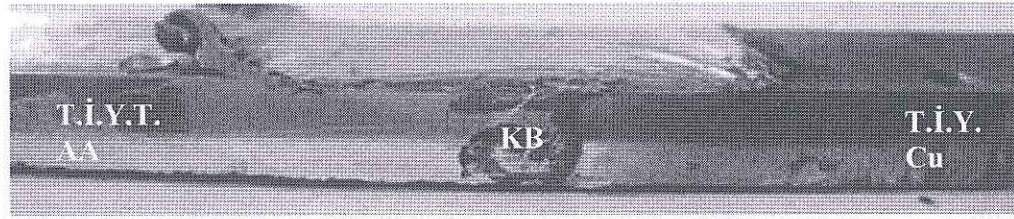
SKK kaynak işlemi sonrası, 27 adet numunenin kaynak esnasında meydana gelen kaynak kesit görüntüleri incelenmiştir. Örnek olarak Şekil 7.4-6'da birleştirilen levhalardan kaynak yönüne dik doğrultuda alınan kesitlerdeki görüntüler verilmiştir.



Şekil 7.4: 630/20/1,5 numunesinin kaynak kesit görüntüsü



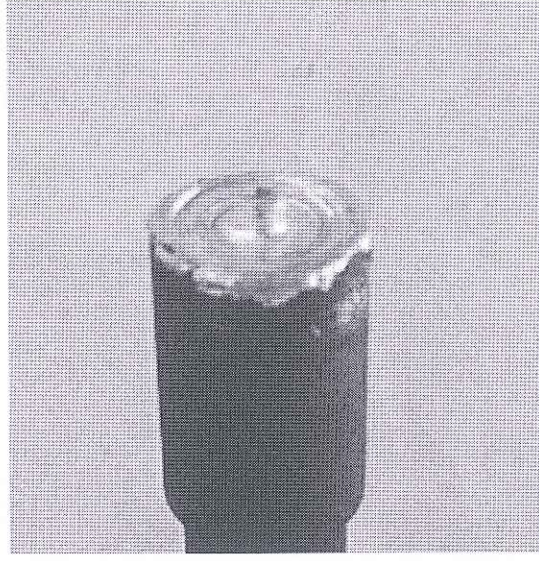
Şekil 7.5: 1330/30/2 numunesinin kaynak kesit görüntüsü



Şekil 7.6: 2440/50/1 numunesinin kaynak kesit görüntüsü

7.3 Kaynak Sonrası Karıştırıcı Uç Durumu

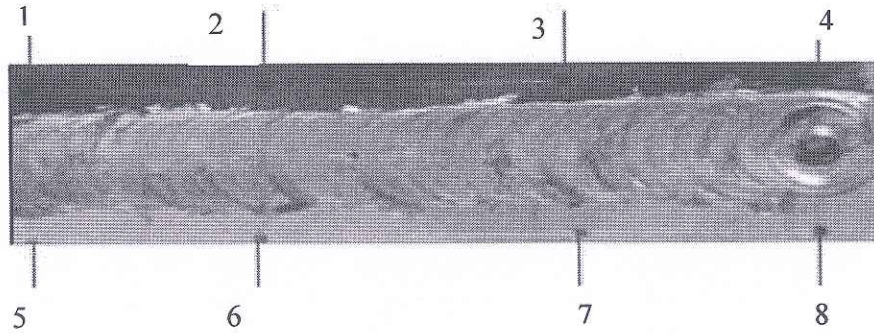
Şekil 7.7'de sürtünme karıştırma kaynak sonrası karıştırıcı ucun görüntüsü verilmiştir. Kaynak sonrası karıştırıcı ucun omuz ve pim kısmında alüminyumun sıvandığı tespit edilmiştir. Her birleştirme işleminden önce karıştırıcı uçtaki sıvanan alüminyum temizlenerek yeni birleştirme işlemine başlanmıştır.



Şekil 7.7: Kaynak sonrası karıştırıcı uç durumu

7.4 Kaynak Bölgelerindeki Sıcaklık Dağılımları

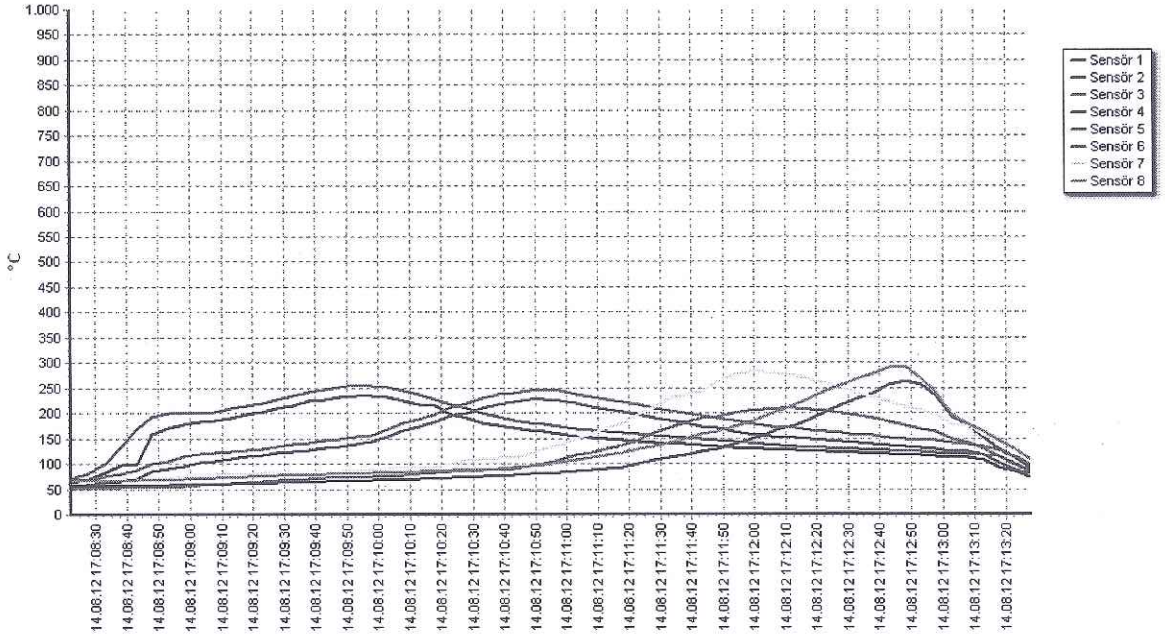
Kaynak işlemi esnasında levhalardaki sıcaklıklar 8 çıkışlı K-tipi termokupullar kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 7.8’de verildiği gibi 1,2,3,4 numaralı sensörler ile bakır tarafından 5,6,7,8 numaralı sensörler ile alüminyum tarafından ölçüm alınmıştır. Ayrıca kaynak ekseninde karıştırıcı ucun önünden lazer pirometre ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 7.8: Termokupulların yerleşimi

Kaynak bölgelerindeki sıcaklık değişimlerini tespit edebilmek için termokupullar kaynak ekseninden 15 mm uzaklığa kör deliklere yerleştirilmiştir. Bütün birleştirmelerin sıcaklıkları kaydedilmiştir. Örnek olarak Şekil 7.9-11’de

numunelerin sıcaklık grafikleri verilmiştir. Tablo 7.1-3'de verildiği gibi her takım dönme hızına ait maksimum, minimum sıcaklıklar alınmıştır.

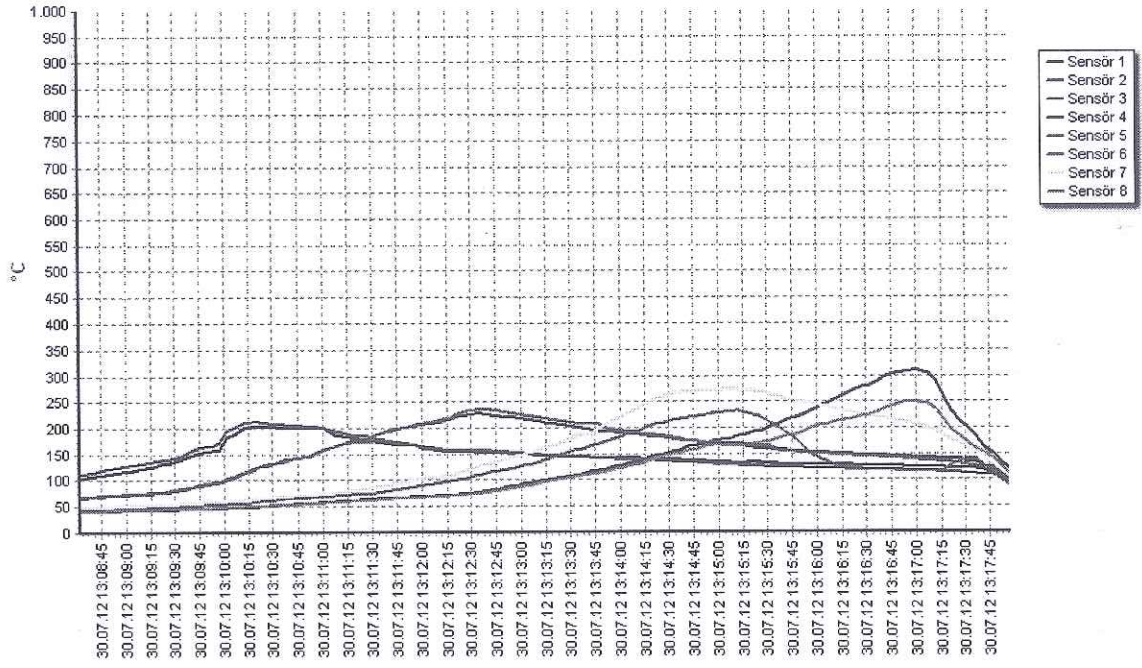


Şekil 7.9: 630/50/2 numunesine ait sıcaklık grafiği

Tablo 7.1: 630 dev/dak takım dönme hızına ait sıcaklık değerleri

| İlerleme mm/dak | Konum mm | Sıcaklık °C Nu. | Cu | | | | Al | | | |
|--------------------|-------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 20 | 1 | Maksimum sıcaklık | 244,4 | 239,5 | 246,1 | 293,2 | 221,9 | 221,2 | 229,2 | 290 |
| | | Minimum sıcaklık | 110,4 | 118 | 94,8 | 78,6 | 110,1 | 119,7 | 91,1 | 82,3 |
| | 1,5 | Maksimum sıcaklık | 222,2 | 246 | 237,8 | 229,1 | 199,8 | 220 | 232,4 | 226,7 |
| | | Minimum sıcaklık | 109,9 | 90,5 | 72,4 | 72,2 | 105,8 | 90,1 | 77,8 | 76,1 |
| | 2 | Maksimum sıcaklık | 217,8 | 225,2 | 261 | 312,6 | 217,4 | 211,8 | 291,3 | 323,5 |
| | | Minimum sıcaklık | 63,9 | 65,7 | 65 | 65 | 72,4 | 71,7 | 72,3 | 74,8 |
| 30 | 1 | Maksimum sıcaklık | 171,9 | 151,8 | 203,6 | 230,1 | 196,5 | 236,9 | 230,1 | 223,1 |
| | | Minimum sıcaklık | 59,3 | 54,4 | 54,7 | 55,9 | 66,3 | 61 | 64,4 | 62,5 |
| | 1,5 | Maksimum sıcaklık | 177,1 | 196,2 | 173,9 | 247,6 | 188,7 | 198,9 | 184,2 | 222,5 |
| | | Minimum sıcaklık | 67,7 | 60,4 | 56,5 | 58,3 | 75,2 | 66,7 | 65,2 | 66,8 |
| | 2 | Maksimum sıcaklık | 159,7 | 199,9 | 173,7 | 204,9 | 151,4 | 203,3 | 229,1 | 227,3 |
| | | Minimum sıcaklık | 45,6 | 43,9 | 42,4 | 42,6 | 46,5 | 51,7 | 56,6 | 51,6 |
| 50 | 1 | Maksimum sıcaklık | 233,4 | 188 | 167,6 | 267,9 | 230,7 | 174,2 | 184,3 | 257,9 |
| | | Minimum sıcaklık | 51,4 | 49,6 | 46,7 | 48,9 | 54,9 | 56,4 | 60,3 | 57,6 |
| | 1,5 | Maksimum sıcaklık | 177,8 | 206,5 | 212,6 | 235,6 | 182 | 228 | 232,4 | 250,7 |
| | | Minimum sıcaklık | 56,4 | 54,6 | 51,8 | 52,3 | 59,4 | 62,1 | 63,4 | 62,2 |
| | 2 | Maksimum sıcaklık | 235,9 | 227,6 | 209,7 | 265 | 256 | 245,4 | 282,3 | 292,8 |
| | | Minimum sıcaklık | 63,4 | 57 | 52,2 | 56,1 | 70 | 67,7 | 66,9 | 66,9 |

Sıcaklık değişimleri incelendiğinde; 1-1,5-2 takım konumunda ölçüm yapılan noktalardaki maksimum sıcaklıkların en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri, 630 dev/dak takım dönme hızında ve 20 mm/dak takım ilerleme hızında Cu tarafında 217,8-312,6 °C, Al tarafında 199,8- 323,5 °C olduğu, 30 mm/dak takım ilerleme hızında Cu tarafında 151,8-247,6 °C, Al tarafında 151,4-236,9 °C olduğu, 50 mm/dak takım ilerleme hızında Cu tarafında 167,6-267,9 °C, Al tarafında 174,2-292,8 °C olduğu tespit edilmiştir.

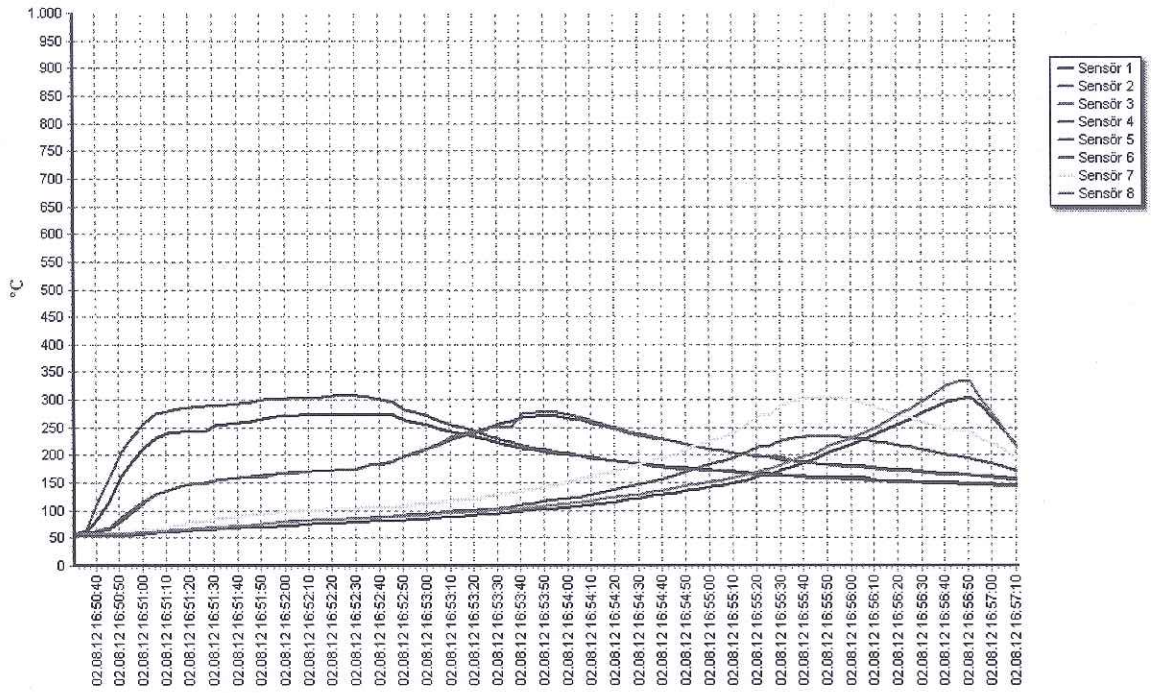


Şekil 7.10: 1330/20/1 numunesine ait sıcaklık grafiği

Tablo 7.2: 1330 dev/dak takım dönme hızına ait sıcaklık değerleri

| İlerleme mm/dak | Konum mm | Sıcaklık °C Nu. | Cu | | | | Al | | | |
|--------------------|-------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 20 | 1 | Maksimum sıcaklık | 204,8 | 226,8 | 225,9 | 308,9 | 212,3 | 236,2 | 274,5 | 247,5 |
| | | Minimum sıcaklık | 111,4 | 69,7 | 45,5 | 41,1 | 110 | 70,6 | 49 | 42,1 |
| | 1,5 | Maksimum sıcaklık | 213,2 | 224,2 | 247,9 | 297,5 | 193 | 199 | 235,8 | 304,1 |
| | | Minimum sıcaklık | 100 | 78,1 | 59,7 | 57,2 | 103,4 | 72,6 | 61 | 58,4 |
| | 2 | Maksimum sıcaklık | 273,5 | 259,4 | 258,8 | 317,3 | 251,7 | 281,7 | 303,2 | 351,7 |
| | | Minimum sıcaklık | 27,6 | 27,7 | 28,1 | 28 | 28,3 | 29,3 | 30,3 | 29,5 |
| 30 | 1 | Maksimum sıcaklık | 268,2 | 233 | 246,2 | 294,1 | 266,5 | 219,4 | 237,9 | 238,5 |
| | | Minimum sıcaklık | 99,1 | 66,7 | 56,8 | 57 | 118,1 | 68,3 | 58,7 | 56,2 |
| | 1,5 | Maksimum sıcaklık | 258,4 | 210,7 | 211,3 | 223,3 | 271,3 | 263,1 | 239,2 | 259,2 |
| | | Minimum sıcaklık | 55,3 | 43,8 | 38,8 | 38,2 | 73,2 | 48,5 | 42,6 | 42,5 |
| | 2 | Maksimum sıcaklık | 260,4 | 236,9 | 233,5 | 258,1 | 272,3 | 243 | 287,6 | 299,1 |
| | | Minimum sıcaklık | 124,9 | 80,8 | 49,8 | 46,3 | 123,2 | 87,7 | 56 | 53,2 |
| 50 | 1 | Maksimum sıcaklık | 289 | 268,1 | 239,2 | 281,5 | 284,8 | 273,4 | 300,7 | 297 |
| | | Minimum sıcaklık | 79,7 | 64,5 | 44,7 | 48,1 | 99 | 53,5 | 54,3 | 52,5 |
| | 1,5 | Maksimum sıcaklık | 281,5 | 278,8 | 244,1 | 262,5 | 308,1 | 290,2 | 315,1 | 338,1 |
| | | Minimum sıcaklık | 60,6 | 52,8 | 46,3 | 45,8 | 95,6 | 55,2 | 51 | 51,3 |
| | 2 | Maksimum sıcaklık | 320,6 | 279 | 250,6 | 300,7 | 335,6 | 318,2 | 352,9 | 329,7 |
| | | Minimum sıcaklık | 39,9 | 42,8 | 44,2 | 43,2 | 72 | 80,3 | 64,3 | 62,1 |

Sıcaklık değişimleri incelendiğinde; 1-1,5-2 takım konumunda ölçüm yapılan noktalardaki maksimum sıcaklıkların en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri, 1330 dev/dak takım dönme hızında ve 20 mm/dak takım ilerleme hızında Cu tarafında 204,8-317,3 °C, Al tarafında 193-351,7 °C olduğu, 30 mm/dak takım ilerleme hızında Cu tarafında 210,7-294,1 °C, Al tarafında 219,4-299,1 °C olduğu, 50 mm/dak takım ilerleme hızında Cu tarafında 239,2-320,6 °C, Al tarafında 273,4-352,9 °C olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.11: 2440/30/1,5 numunesine ait sıcaklık grafiği

Tablo 7.3: 2440 dev/dak takım dönme hızına ait sıcaklık değerleri

| İlerleme mm/dak | Konum mm | Sıcaklık °C Nu. | Cu | | | | Al | | | |
|--------------------|-------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 20 | 1 | Maksimum sıcaklık | 287,9 | 311,2 | 280,4 | 313,8 | 295,6 | 288,1 | 275 | 316 |
| | | Minumum sıcaklık | 153,5 | 97,8 | 54,7 | 56,1 | 154,3 | 100,9 | 56,9 | 57,4 |
| | 1,5 | Maksimum sıcaklık | 332 | 299 | 289 | 345,4 | 338,6 | 313,9 | 356,4 | 374,1 |
| | | Minumum sıcaklık | 118,6 | 76,3 | 68 | 67,5 | 152,4 | 84,7 | 71,6 | 72 |
| | 2 | Maksimum sıcaklık | 342,7 | 334,8 | 344,7 | 392,6 | 326,9 | 313,4 | 373,7 | 371 |
| | | Minumum sıcaklık | 140,1 | 99,4 | 87 | 90,2 | 158,7 | 106 | 90,8 | 92,2 |
| 30 | 1 | Maksimum sıcaklık | 229,9 | 242 | 207,4 | 289,2 | 238,5 | 238 | 235,3 | 302,8 |
| | | Minumum sıcaklık | 74 | 61,5 | 49,8 | 47,6 | 70,7 | 58,9 | 50,7 | 48,1 |
| | 1,5 | Maksimum sıcaklık | 273,1 | 270,8 | 234,8 | 304,2 | 308,6 | 278,2 | 305,9 | 332,6 |
| | | Minumum sıcaklık | 87,6 | 62,1 | 53,2 | 56,3 | 119,3 | 63,6 | 58 | 58,4 |
| | 2 | Maksimum sıcaklık | 295,5 | 274,6 | 266,8 | 314,4 | 324,4 | 293,5 | 310,1 | 307,4 |
| | | Minumum sıcaklık | 27,9 | 28 | 28,3 | 28,5 | 29,1 | 29,3 | 30,4 | 29,5 |
| 50 | 1 | Maksimum sıcaklık | 293,1 | 249,8 | 242,9 | 293,5 | 318,9 | 280,5 | 302 | 314,1 |
| | | Minumum sıcaklık | 48,6 | 37 | 34 | 34,3 | 68,8 | 41 | 37,8 | 37,9 |
| | 1,5 | Maksimum sıcaklık | 329,2 | 280,8 | 253,3 | 281,3 | 345,7 | 317,6 | 326,9 | 330,3 |
| | | Minumum sıcaklık | 86,4 | 59,9 | 50,3 | 52,9 | 112,4 | 63,4 | 57,9 | 57,9 |
| | 2 | Maksimum sıcaklık | 322,3 | 310,8 | 278,8 | 326 | 380,4 | 335,6 | 340,5 | 323 |
| | | Minumum sıcaklık | 77,3 | 64,4 | 54,8 | 55,4 | 134 | 66,2 | 60,1 | 60,1 |

Sıcaklık değişimleri incelendiğinde; 1-1,5-2 mm takım konumunda ölçüm yapılan noktalardaki maksimum sıcaklıkların en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri, 2440 dev/dak takım dönme hızında ve 20 mm/dak takım ilerleme hızında Cu tarafında 280,4- 392,6 °C, Al tarafında 275- 374,1 °C olduğu, 30 mm/dak takım ilerleme hızında Cu tarafında 207,4- 314,4 °C, Al tarafında 235,3-332,6 °C olduğu, 50 mm/dak takım ilerleme hızında Cu tarafında 242,9- 329,2 °C, Al tarafında 280,5- 380,4 °C olduğu tespit edilmiştir.

630, 1330 ve 2440 dev/dak takım dönme hızlarında sıcaklık değişimleri karşılaştırıldığında; ölçüm yapılan noktalardaki maksimum sıcaklıkların ortalamasının 1-1,5-2 mm takım konumu da dikkate alındığında takım dönme hızı arttıkça sürtünme sonucu meydana gelen ısı artışı nedeniyle Al ve Cu tarafındaki sıcaklıkların arttığı ortaya çıkmıştır. Aynı takım dönme hızında 1-1,5-2 mm takım konumu dikkate alındığında ilerleme hızlarındaki artış ile ölçüm yapılan noktalardaki maksimum sıcaklıkların ortalamasının, 20 mm/dak değerinden 30 mm/dak değerine artmasıyla düşüşler olduğu ancak sıcaklık değerlerinin ilerleme hızının 50 mm/dak olduğu deneylerde ise artışlar olduğu tespit edilmiştir. Bunun da takım ilerleme hızının yüksek olması nedeniyle malzemedeki ısı dağılımını engellemesi olarak düşünülmüştür.

7.4.1 Kaynak Merkezindeki Sıcaklık Dağılımları

Bakır ve alüminyum levhaların yüzeylerindeki sıcaklıklar ile birlikte kaynak merkezindeki sıcaklıklar freze başlığına sabitlenen infrared pirometre ile karıştırıcı ucun önünden ölçülmüştür. Kaynak merkezinden alınan sıcaklıklar Tablo 7.4'de verilmiştir. Sıcaklıklar incelendiğinde sıcaklıklar kaynak başlangıcından kaynak sonuna artışlar göstermiştir. Genel olarak sıcaklıklar 300-461 °C arasında değişmiştir. 630 dev/dak takım dönme hızında sıcaklıklar 338-433 °C arasında, 1330 dev/dak takım dönme hızında sıcaklıklar 367-431 °C arasında, 2440 dev/dak takım dönme hızında sıcaklıklar 405-461°C arasında dağılım göstermiştir. Ölçülen maksimum sıcaklık 2440/50/2 numunesinde kaynak sonunda 461 °C olarak tespit edilmiştir. Maksimum sıcaklığa bu numunede ulaşılmasının sebebi yüksek takım dönme hızından dolayı ısınmanın fazla olmasına bağlanmaktadır. Karıştırıcı ucun birleştirme

işleminde malzeme içindeki piminde sıcaklık değerlerin kaynak ekseninde ölçülen sıcaklık değerinden fazla olduğu düşünülmektedir.

Tablo 7.4: Kaynak merkezinde ölçülen sıcaklıklar

| Numune | Kaynak Başlangıç (°C) | Kaynak Ortası (°C) | Kaynak Sonu (°C) |
|-------------|--------------------------|--------------------|---------------------|
| 630/20/1 | 358 | 371 | 408 |
| 630/20/1,5 | 334 | 378 | 346 |
| 630/20/2 | 337 | 382 | 433 |
| 630/30/1 | 306 | 337 | 340 |
| 630/30/1,5 | 307 | 321 | 350 |
| 630/30/2 | 305 | 330 | 338 |
| 630/50/1 | 350 | 313 | 377 |
| 630/50/1,5 | 300 | 350 | 359 |
| 630/50/2 | 365 | 370 | 393 |
| 1330/20/1 | 300 | 389 | 402 |
| 1330/20/1,5 | 324 | 356 | 397 |
| 1330/20/2 | 370 | 390 | 414 |
| 1330/30/1 | 345 | 370 | 404 |
| 1330/30/1,5 | 355 | 347 | 367 |
| 1330/30/2 | 326 | 360 | 399 |
| 1330/50/1 | 395 | 422 | 421 |
| 1330/50/1,5 | 410 | 413 | 418 |
| 1330/50/2 | 427 | 428 | 431 |
| 2440/20/1 | 384 | 434 | 451 |
| 2440/20/1,5 | 424 | 437 | 455 |
| 2440/20/2 | 430 | 435 | 460 |
| 2440/30/1 | 312 | 352 | 405 |
| 2440/30/1,5 | 358 | 421 | 443 |
| 2440/30/2 | 401 | 414 | 434 |
| 2440/50/1 | 403 | 395 | 417 |
| 2440/50/1,5 | 446 | 436 | 452 |
| 2440/50/2 | 453 | 455 | 461 |

7.5 Birleştirmelerin Mekanik Özellikleri

Birleştirme işlemlerinden sonra mekanik özellikleri tespit etmek amacıyla çekme, eğme, sertlik ölçümü testleri yapılmıştır. Her parametre için 3 adet test yapılmış ve ortalaması alınmıştır.

7.5.1 Çekme Deneyi Sonuçları

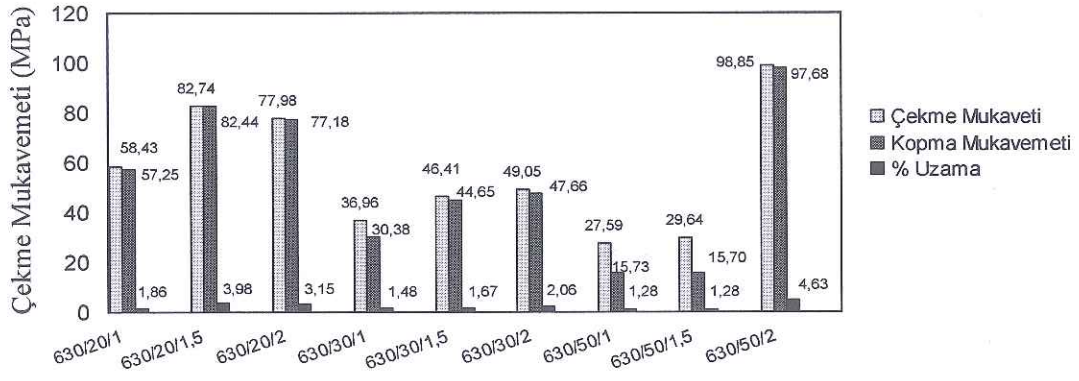
Kaynaklı numunelerde yapılan çekme testleri sonuçları Tablo 7.5'de, takım dönme hızına bağlı olarak çekme testinin sonuçları grafik olarak da Şekil 7.12-13-14'de verilmiştir. Ana metallerin çekme mukavemeti Al için 111,20 MPa, Cu için 231,38 MPa elde edilmiştir. En büyük çekme mukavemeti (1330/20/1) numunesinde 99,58 MPa, en düşük çekme mukavemeti (630/50/1) numunesinde 27,59 MPa değeri elde edilmiştir. Düşük dayanımlı numunelerin parametreleri incelendiğinde düşük takım dönme hızından dolayı ısı girdilerinin düşük olduğu bu nedenle birleştirme için yeterli sıcaklık sağlanmadığı düşünölmüştür. Deneyler esnasında ölçölen sıcaklık değerleri incelendiğinde bu yaklaşımı doğrulamıştır. Alüminyum ve bakırın diğer kaynak yöntemleri ile yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde örneğin alüminyum ve bakırın sürtünme kaynağında çekme dayanımından (92 MPa) yüksek çıkmıştır [74]. Yapılan diğer bir çalışmada alüminyum ve bakırın difüzyon kaynağında elde edilen en yüksek çekme dayanımından (60,80 MPa) yüksek elde edilmiştir [75]. Alüminyum ve bakırın difüzyon kaynağı ile ilgili diğer bir çalışmada en yüksek çekme dayanımından (62,10 MPa) yüksek çıkmıştır [76]. Çekme deneyi sonucunda numunelerin kopma yüzeyleri incelendiğinde genellikle karışım bölgesinde ve alüminyumun ısı tesiri altındaki bölgesinde gerçekteşirken gevrek kırılma gerçekteşmiştir. Şekil 7.15-16-17'de çekme testi sonrası kopan yüzeyler verilmiştir.

Tablo 7.5: Çekme deneyi sonuçları

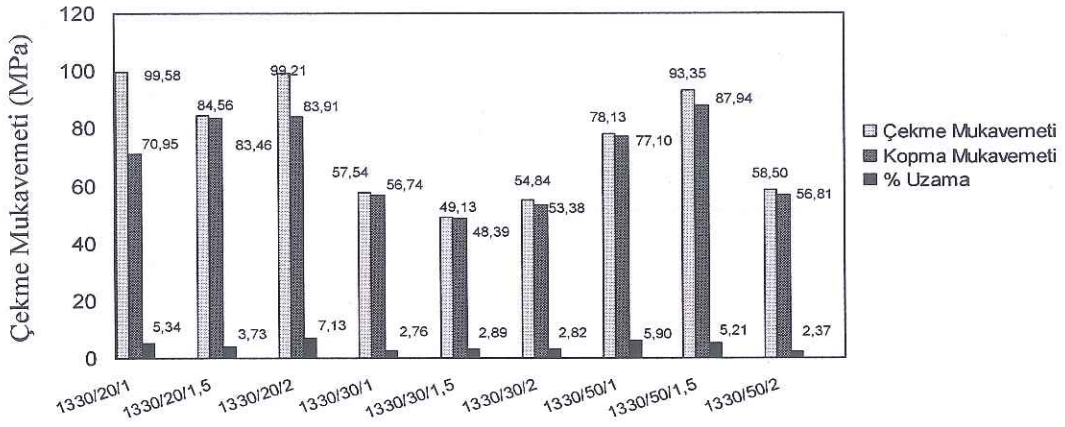
| Deney Nu. | Deney numunesi | Çekme Mukavemeti (MPa) | % Uzama | Kaynak Performansı (Al. göre %) | Kopma Bölgesi |
|-----------|----------------|------------------------|---------|---------------------------------|---------------|
| | Al | 111,20 | 14,98 | - | - |
| | Cu | 231,38 | 41,03 | - | - |
| 1 | 630/20/1 | 58,43 | 1,86 | 52,44 | Al-ITAB |
| 2 | 630/20/1,5 | 82,74 | 3,98 | 74,41 | Al-ITAB |
| 3 | 630/20/2 | 77,98 | 3,15 | 70,13 | KB |
| 4 | 630/30/1 | 36,96 | 1,48 | 33,24 | Al-ITAB |
| 5 | 630/30/1,5 | 46,41 | 1,67 | 41,74 | Al-ITAB |
| 6 | 630/30/2 | 49,05 | 2,06 | 44,11 | KB |
| 7 | 630/50/1 | 27,59 | 1,28 | 24,81 | Al-ITAB |
| 8 | 630/50/1,5 | 29,64 | 1,28 | 26,65 | KB |
| 9 | 630/50/2 | 98,85 | 4,63 | 88,89 | KB |
| 10 | 1330/20/1 | 99,58 | 5,34 | 89,55 | Al-ITAB |
| 11 | 1330/20/1,5 | 84,56 | 3,73 | 76,04 | KB |
| 12 | 1330/20/2 | 99,21 | 7,13 | 89,22 | Al-ITAB |
| 13 | 1330/30/1 | 57,54 | 2,76 | 51,74 | KB |
| 14 | 1330/30/1,5 | 49,13 | 2,89 | 44,18 | KB |
| 15 | 1330/30/2 | 54,84 | 2,82 | 49,32 | Al-ITAB |
| 16 | 1330/50/1 | 78,13 | 5,90 | 70,26 | KB |
| 17 | 1330/50/1,5 | 93,35 | 5,21 | 83,95 | KB |
| 18 | 1330/50/2 | 58,50 | 2,37 | 52,61 | KB |
| 19 | 2440/20/1 | 45,24 | 1,80 | 40,68 | Al-ITAB |
| 20 | 2440/20/1,5 | 46,93 | 1,48 | 42,20 | Al-ITAB |
| 21 | 2440/20/2 | 74,03 | 2,90 | 66,57 | KB |
| 22 | 2440/30/1 | 92,91 | 4,82 | 83,55 | KB |
| 23 | 2440/30/1,5 | 90,50 | 3,60 | 81,38 | KB |
| 24 | 2440/30/2 | 84,20 | 3,92 | 75,72 | KB |
| 25 | 2440/50/1 | 77,24 | 3,53 | 69,46 | Al-ITAB |
| 26 | 2440/50/1,5 | 92,26 | 4,75 | 82,97 | KB |
| 27 | 2440/50/2 | 39,31 | 1,41 | 35,35 | KB |

Al-ITAB : Alüminyum tarafında ısı etkisi altında kalan bölge,

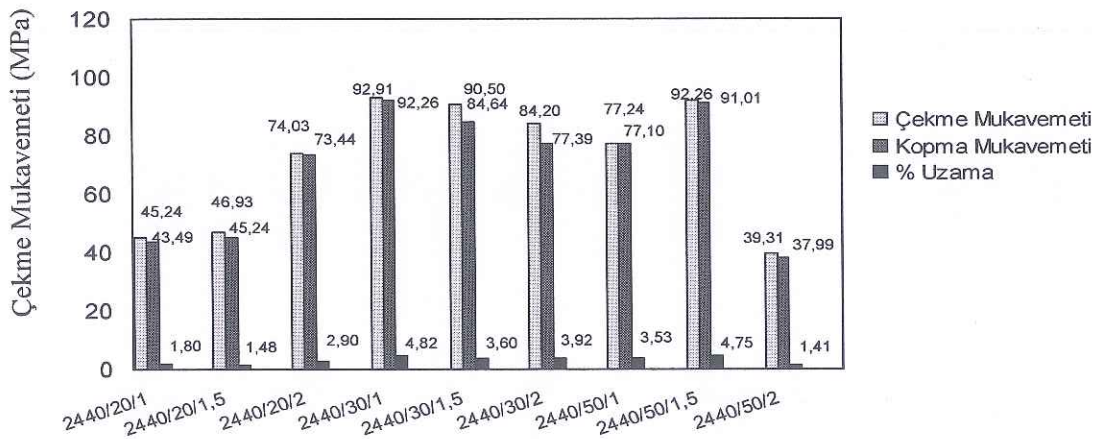
KM : Kaynak merkezi.



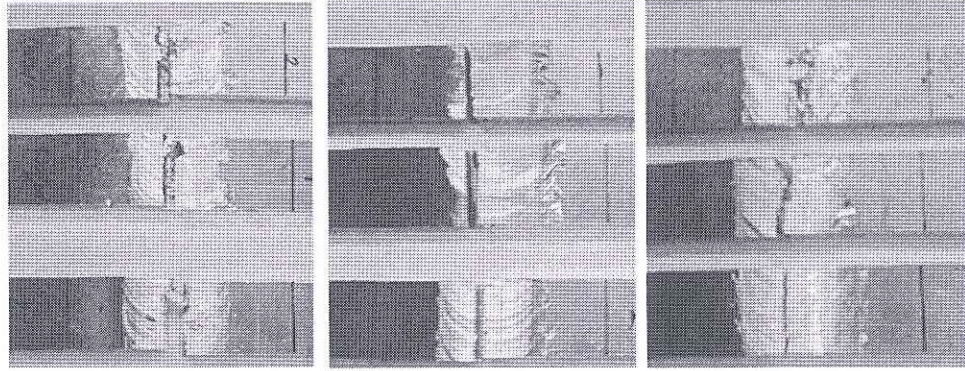
Şekil 7.12: 630 takım dönme hızına ait numunelerin çekme testi sonuçları



Şekil 7.13: 1330 takım dönme hızına ait numunelerin çekme testi sonuçları



Şekil 7.14: 2440 takım dönme hızına ait numunelerin çekme testi sonuçları

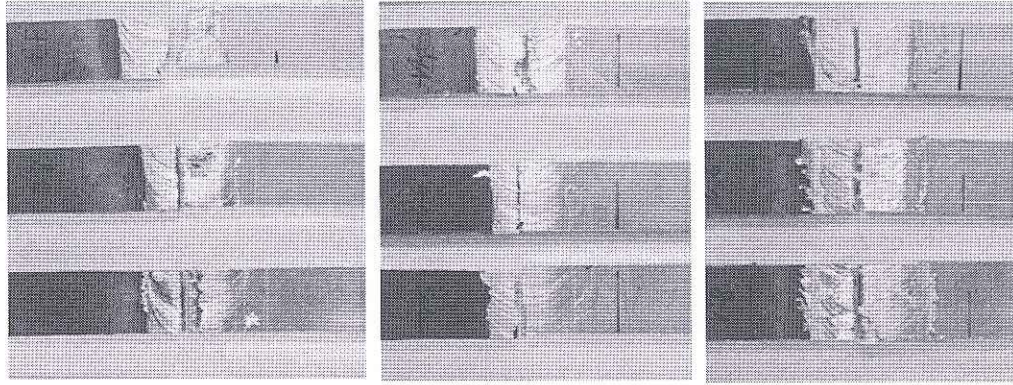


(a)

(b)

(c)

Şekil 7.15: 630 dev/dak takım dönme hızında çekme testi sonrası yüzey görüntüleri, a) 630/20/1 numunesi, b) 630/30/1 numunesi, c) 630/50/1 numunesi

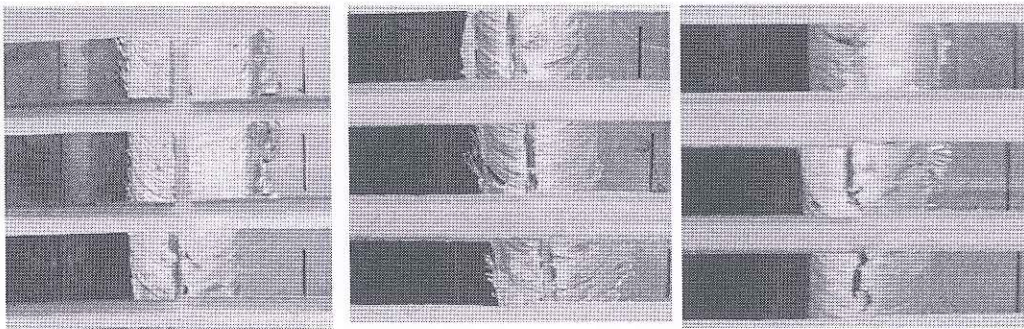


(a)

(b)

(c)

Şekil 7.16: 1330 dev/dak takım dönme hızında çekme testi sonrası yüzey görüntüleri, a) 1330/20/1,5 numunesi, b) 1330/30/1,5 numunesi, c) 1330/50/1,5 numunesi



(a)

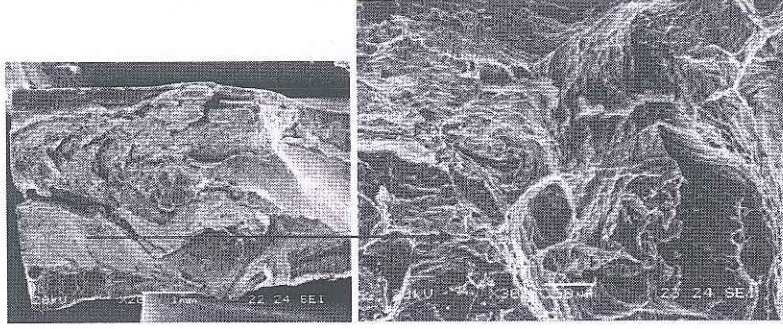
(b)

(c)

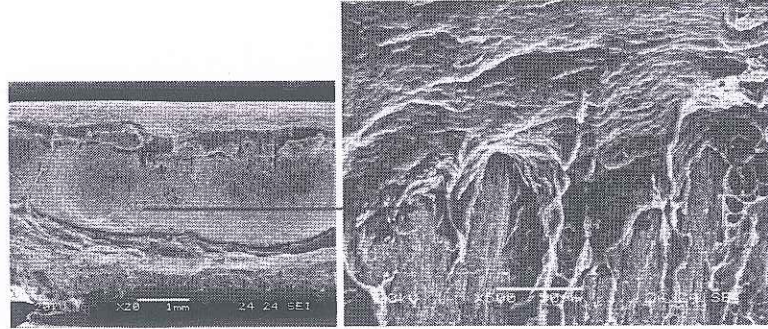
Şekil 7.17: 2440 dev/dak takım dönme hızında çekme testi sonrası yüzey görüntüleri, a) 2440/20/2 numunesi, b) 2440/30/2 numunesi, c) 2440/50/2 numunesi

Yapılan birleştirmelerin kaynak performansları (SKK'lı levhanın çekme mukavemeti/ Al ana metalin çekme mukavemeti x 100) incelendiğinde en yüksek değer % 89.55 olarak 1330 dev/dak takım dönme hızında, 20 mm/dak ilerleme hızında ve 1 mm takım konumlandırılmasında elde edilmiştir. En düşük değer ise 630 dev/dak takım dönme hızında, 50 mm/dak ilerleme hızında ve 1 mm takım konumlandırılmasında % 24,81 olarak elde edilmiştir.

Çekme testinden sonra kırılan yüzeylerinin SEM görüntüleri alınmıştır. Mekanik özellikleri yüksek olan numunelerin kopma bölgelerinin sünek yapıda, düşük mekanik özelliklere sahip numunelerin kopma yüzeyleri gevrek yapıda olduğu tespit edilmiştir. Şekil 7.18'de çekme mukavemeti 99,58 MPa olan 1330/20/1 numunesinin alüminyum tarafında görüldüğü gibi kopma yüzeyi çukur bölgelerden oluşmuştur. Şekil 7.19'da bakır tarafın kırılan yüzeyinin SEM görüntüsü verilmiştir.

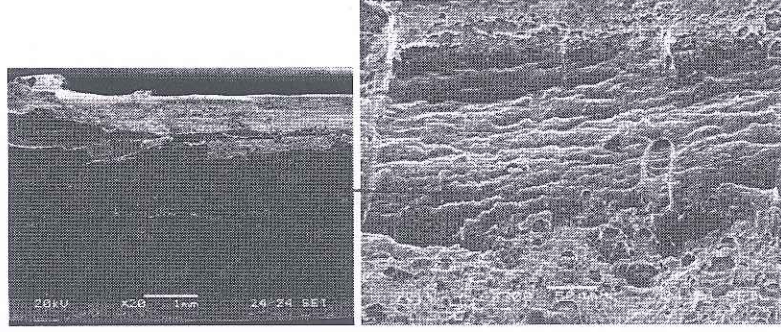


Şekil 7.18: Çekme deneyi sonrası 1330/20/1 numunesinin Al tarafının kırılma yüzeyi

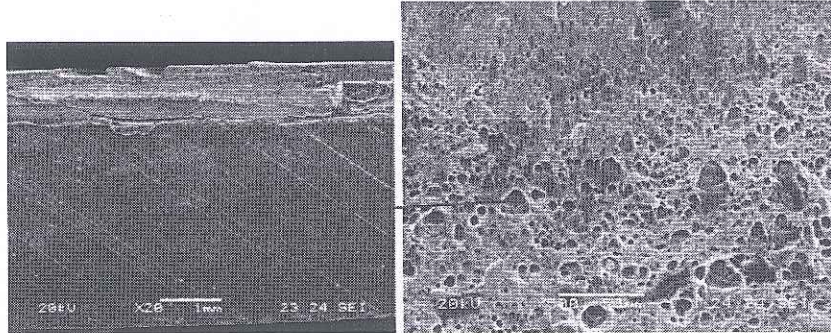


Şekil 7.19: Çekme deneyi sonrası 1330/20/1 numunesinin Cu tarafının kırılma yüzeyi

Şekil 7.20'de çekme mukavemeti 49,13 MPa olan 1330/30/1,5 numunesinin alüminyum tarafı, Şekil 7.21'de bakır tarafının SEM görüntüsü verilmiştir. 1330/30/1,5 numunesinin kırılma yüzeylerinin gevrek bir yapıda olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.20: Çekme deneyi sonrası 1330/30/1,5 numunesinin Al tarafının kırılma yüzeyi



Şekil 7.21: Çekme deneyi sonrası 1330/30/1,5 numunesinin Cu tarafının kırılma yüzeyi

Çekme testi sonrası numunelerin kopma yüzeyleri incelendiğinde kopmaların kaynak merkezi ve alüminyumun ısı tesiri altındaki bölgeden gerçekleştiği görülmüştür. Dayanımı yüksek olan numuneler (1330/20/1) değerlendirildiğinde; kopma bölgesinin Al-ITAB ve uzama değerinin %5,34 olduğu, dayanımı düşük olan numuneler (1330/30/1,5) değerlendirildiğinde; kopma bölgesinin KB ve uzama değerinin %2,89 olduğu ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla sünek ve gevrek yapı % uzama değerleriyle uyumlu çıkmıştır. Yapılan diğer bir çalışmada da ifade edildiği gibi,

kırılma yüzeylerindeki çukur ve düz yüzey görünüşleri, hem sünek hem de gevrek kırılma mekanizmasının gerçekleştiği görülmüştür [3].

7.5.2. Takım Dönme Hızının Etkisi

DeneySEL veriler incelendiğinde; takım dönme hızının mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

630 dev/dak takım dönme hızında en düşük çekme mukavemeti 27,59 MPa, en yüksek çekme mukavemeti 98,85 MPa, 1330 dev/dak takım dönme hızında en düşük çekme mukavemeti 49,13 MPa, en yüksek çekme mukavemeti 99,58 MPa, 2440 dev/dak takım dönme hızında en düşük çekme mukavemeti 39,31 MPa, en yüksek çekme mukavemeti 92,91 MPa elde edilmiştir. Aynı devirde minimum ve maksimum dayanımlar arasında büyük fark olduğu, bu da diğer parametrelerinde önemini göstermiştir.

% uzama değerlerinin ortalaması incelendiğinde; 630 dev/dak takım dönme hızında %2,37 uzama, 1330 dev/dak takım dönme hızında %4,24 uzama, 2440 dev/dak takım dönme hızında %3,13 uzama değeri ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla ortalama % uzama değerleri bakımından yüksek değerden düşük değere sırasıyla, 1330-2440-630 dev/dak takım dönme hızı gelmektedir. 630 dev/dak takım dönme hızında en yüksek %4,63 uzama, en düşük %1,28 uzama, 1330 dev/dak takım dönme hızında en yüksek %7,13 uzama, en düşük %2,37 uzama, 2440 dev/dak takım dönme hızında en yüksek %4,82 uzama, en düşük %1,41 uzama değerleri elde edilmiştir.

Karıştırıcı ucun yoğun karıştırma hareketiyle beraber takım dönme hızının etkisi ile takım omuz kısmının sürtünme sonucu ürettiği sıcaklık artışı intermetalik bileşenlerin oluşmasına neden olmuştur. 630-1330-2440 dev/dak takım dönme hızları karşılaştırıldığında yüksek dayanımların 1330 dev/dak takım dönme hızında meydana geldiği tespit edilmiştir. 1330 dev/dak takım dönme hızında Al-Cu birleştirilmesinde ideal sıcaklıkların meydana geldiği ve ince, üniform bir intermetalik ara fazın oluştuğu düşünülmektedir. SKK işleminde ince, üniform bir ara fazın mekanik dayanımları arttırdığı yapılan diğer çalışmalarda da vurgulanmıştır [30,35].

7.5.3. Takım İlerleme Hızının Etkisi

Takım ilerleme hızlarının etkileri incelendiğinde; 630 dev/dak takım dönme hızında 20 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemeti 73,05 MPa, ortalama % 3 uzama, ortalama kaynak performansı % 65,69 olarak, 30 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemeti 44,14 MPa, ortalama % 1,73 uzama, ortalama kaynak performansı % 36,69 olarak, 50 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemeti 52,03 MPa, ortalama % 2,40 uzama, ortalama kaynak performansı % 46,79 olarak elde edilmiştir. 630 dev/dak takım dönme hızında takım ilerlemenin mekanik özelliklere etkisi incelendiğinde 20 mm/dak takım ilerleme hızında bütün değerler en yüksek iken, 30 mm/dak takım ilerleme hızında değerlerde düşmeler gerçekleşmiş ve 50 mm/dak takım ilerlemesinde ise kendi içinde tekrar yükselmiştir.

1330 dev/dak takım dönme hızında 20 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemeti 94,45 MPa, ortalama % 5,40 uzama, ortalama kaynak performansı % 84,94 olarak, 30 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemeti 53,84 MPa, ortalama % 2,82 uzama, ortalama kaynak performansı % 48,41 olarak, 50 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemeti 76,66 MPa, ortalama % 4,49 uzama, ortalama kaynak performansı % 68,94 olarak elde edilmiştir. 1330 dev/dak takım dönme hızında da 630 dev/dak takım dönme hızında olduğu gibi, 20 mm/dak takım ilerleme hızında bütün değerler en yüksek iken, 30 mm/dak takım ilerleme hızında değerlerde düşmeler gerçekleşmiş ve 50 mm/dak takım ilerlemesinde ise 20 mm/dak takım ilerlemesi kadar olmasa da tekrar yükselmiştir.

2440 dev/dak takım dönme hızında 20 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemeti 55,40 MPa, ortalama % 2,06 uzama, ortalama kaynak performansı % 49,82 olarak, 30 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemeti 89,20 MPa, ortalama % 4,11 uzama, ortalama kaynak performansı % 80,22 olarak, 50 mm/dak ilerleme hızında ortalama çekme mukavemeti 69,60 MPa, ortalama % 3,23 uzama, ortalama kaynak performansı % 62,59 olarak elde edilmiştir. 2440 dev/dak takım dönme hızında takım ilerlemenin mekanik özelliklere etkisi incelendiğinde, 30 mm/dak takım ilerleme hızında bütün değerler en yüksek iken, 20 mm/dak takım ilerleme hızında değerlerde düşmeler gerçekleşmiş ve 50 mm/dak

takım ilerlemesinde ise 30 mm/dak takım ilerlemesi kadar olmasa da tekrar yükselmiştir.

Takım ilerleme hızının etkisi genel olarak incelendiğinde farklı takım dönme hızlarında ve farklı takım konumlandırılmasında değişiklik göstermiştir. Bunda Al-Cu birleşmesinde ısı girdisine bağlı olarak meydana gelen intermetalik fazların etkili olduğu düşünülmektedir. Yapılan diğer bir çalışmada, düşük ve yüksek ısı girdisinin karışım üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve mekanik dayanımları etkilediği belirtilmiştir [30].

7.5.4 Takım Konumlandırılmasının Etkisi

Karıştırıcı uç alüminyum tarafına 0-1-1,5 ve 2 mm olarak konumlandırılmıştır. “0” konumlu birleştirmelerde yapıda boşluklar olduğundan mekanik değerler düşük çıkmıştır.

Takım konumlandırılmasının mekanik değerler etkisi incelendiğinde; 630 dev/dak-20 mm/dak grubunda 1-1,5-2 takım konumlandırılmasında çekme mukavemetlerinde önce artış sonra azalma gözlenmiştir. 630 dev/dak-30 mm/dak ve 630 dev/dak-50 mm/dak grubunda takım kaydırmasının artmasıyla çekme mukavemetlerinde artışlar gerçekleşmiştir. 1330 dev/dak-20 mm/dak grubunda takım kaydırmasının artmasıyla çekme mukavemetlerinde önce azalma sonra artış, 1330 dev/dak-30 mm/dak grubunda çekme mukavemetlerinde önce azalma sonra artış, 1330 dev/dak-50 mm/dak grubunda çekme mukavemetlerinde önce artış sonra azalma gerçekleşmiştir. 2440 dev/dak-20 mm/dak grubunda takım kaydırmasının artmasıyla çekme mukavemetlerinde artışlar, 2440 dev/dak-30 mm/dak grubunda çekme mukavemetlerinde azalmalar, 2440 dev/dak-50 mm/dak grubunda çekme mukavemetlerinde önce artış sonra azalma gerçekleşmiştir.

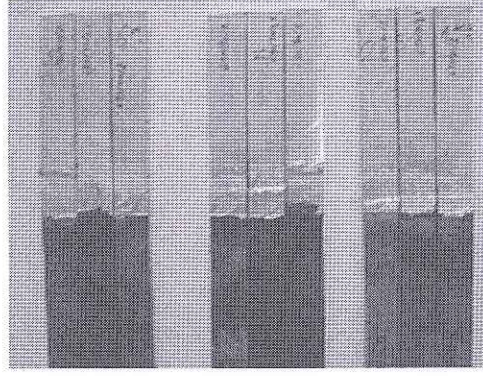
% uzama değerleri incelendiğinde; 630 dev/dak-20 mm/dak grubunda 1-1.5-2 takım konumlandırılmasında önce artış sonra biraz azalma, 630 dev/dak-30 mm/dak ve 630 dev/dak-50 mm/dak grubunda takım kaydırmanın artmasıyla % uzama değerlerinde artışlar gerçekleşmiştir. 1330 dev/dak-20 mm/dak grubunda önce azalma sonra artış, 1330 dev/dak-30 mm/dak grubunda önce yükselme sonra biraz

azalma, 1330 dev/dak-50 mm/dak grubunda azalmalar gerçekleşmiştir. 2440 dev/dak-20 mm/dak grubunda önce azalma sonra artma, 2440 dev/dak-30 mm/dak grubunda önce azalma sonra artış, 2440 dev/dak-50 mm/dak grubunda önce yükselme sonra azalma gerçekleşmiştir.

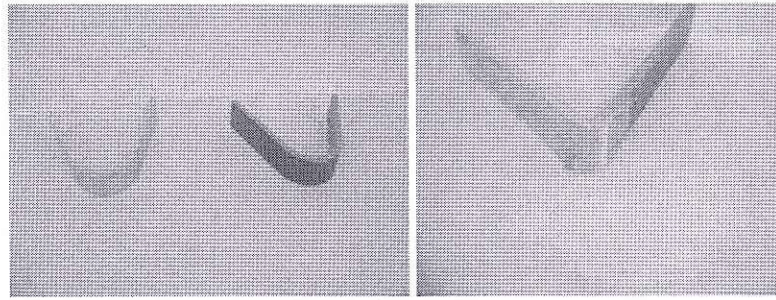
“0” konumlu yapılan birleştirmelerde mekanik değerlerin düşük çıkmasının nedeni karışımın tam oluşmaması, boşlukların meydana gelmesi, 1-1,5 ve 2 mm takım konumlandırılması ile yapılan birleştirmelerde mekanik değerlerin yükselmesinin ise ortaya çıkan intermetalik fazların yoğunluğunun azalması ve daha ince, üniform bir intermetalik ara fazın oluşması olarak değerlendirilmektedir. “0” konumlu yapılan birleştirmelerde kaynak yüzeyinde birçok çatlak ve boşluk görülürken, 1-1,5 ve 2 mm takım konumlandırılmasında hatasız birleştirmeler elde edilmiştir. “0” konumlu yapılan birleştirmelerde birkaç geniş Cu parçacık Al matris ile kaynak bölgesinde karışmakta ve birçok çatlak gözlenmekte olup bu da mekanik değerleri düşürmektedir. Bu sonuç literatürde yapılan çalışma ile uyum göstermiştir [30].

7.5.5 Eğme Deneyi Sonuçları

Kaynaklı birleştirmelerden 20x100 mm ölçülerinde çıkartılan numunelerinin kaynak yüzeyi eğme deneyleri yapılmıştır. Ana malzemelerin de eğme deneyleri yapılmıştır. Eğme deneyi numunede kopma bölgelerinin tesbiti amacı ile numunede kopma oluncaya kadar uygulanmıştır. Şekil 7.22’de 630 dev/dak takım dönme hızında elde edilen numunelerin eğme deneyi öncesi görüntüleri verilmiştir. Eğme deneyleri sonucunda kopmalar kaynak bölgesinden ve ITAB’da gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar da çekme deneyinde kopmaların karışım bölgesinde ve ITAB’da gerçekleşmesi ile uygunluk göstermiştir. Kaynak kök kısmının eğme deneyleri 630-1330-2440 dev/dak takım dönme hızlarında en iyi çekme mukavemetine sahip numuneler ile en düşük çekme mukavemetine sahip numuneler için yapılmıştır. Kaynak kök kısmı eğme deneyinde 1330/20/1 numunesinde deney sonrası herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Şekil 7.23’de eğme deneyi sonrası numunelerin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.22: Test öncesi eğme deneyi numuneleri



Şekil 7.23: Test sonrası eğme deneyi numuneleri a) Ana malzemelerin, b) Kaynaklı numunenin görüntüleri

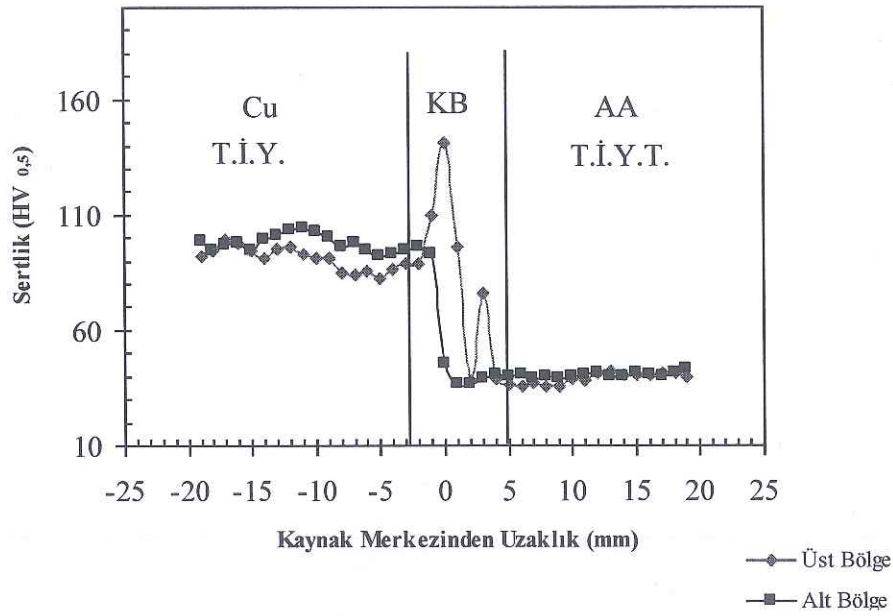
7.6 Mikrosertlik İncelemesi

Değişik takım dönme hızı, takım ilerleme hızı ve takım konumlandırmasında yapılan birleştirmelerin sertlik değişimlerini tespit etmek amacı ile her takım dönme hızına ait en yüksek ve en düşük çekme mukavemetine sahip numunelerin kaynak alt ve kaynak üst bölgelerinin mikrosertlik değerleri alınmıştır. 630 dev/dak takım dönme hızına ait 630/50/1 ve 630/50/2 şartlarındaki numuneler, 1330 dev/dak takım dönme hızına ait 1330/20/1 ve 1330/30/1,5 şartlarındaki numuneler, 2440 dev/dak takım dönme hızına ait 2440/30/1 ve 2440/50/2 şartlarındaki numunelerin kaynak alt ve üst bölgelerinin sertlikleri incelenmiştir.

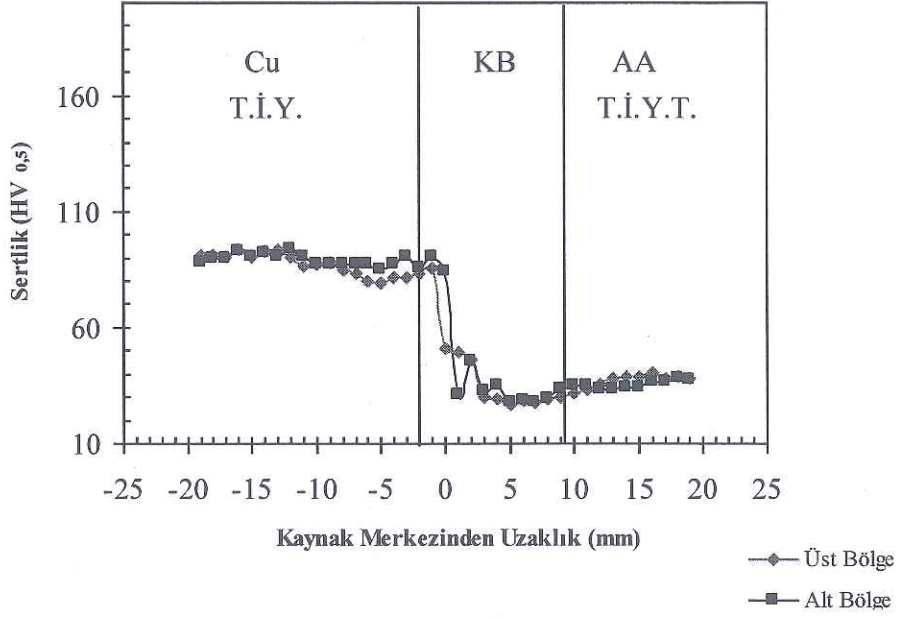
Ana metallerin mikrosertlikleri de kıyaslamak amacıyla alınmıştır. Cu ana metalinin sertliği 88 HV_{0,5}, Al ana metalinin ise 41 HV_{0,5} olarak elde edilmiştir.

Birleştirmelerin sertlik değişim değerleri Şekil 7.24-29'da verilmiştir. Kaynak bölgesinde sertlik artışları yapı içinde dağılmış bakır parçacıklara, oluşan sertliği yüksek olan intermetalik bileşenlere bağlanılmıştır. Cu/AA SKK yapılmış diğer çalışmalarda da kaynak bölgesinde sertlik artışlarının, intermetalik fazlardan ve oluşan yapılardan kaynaklandığı bildirilmiştir [3,31,35,77].

Şekil 7.24'de 630/50/1 numunesi incelendiğinde kaynak bölgesi içinde kaynak üst bölgesi sertliğinin bakır tarafında 141 HV, alüminyum tarafında 36 HV olarak değiştiği, bakır tarafın ortalama sertliğinin 91 HV, alüminyum tarafın 39 HV olduğu tespit edilmiştir. 630/50/1 numunesindeki kaynak bölgesindeki sertlik artışları kaynak bölgesinin üst kısmındaki iri bakır parçacıkların varlığına ve intermetalik bileşenlerin varlığına bağlanmaktadır.

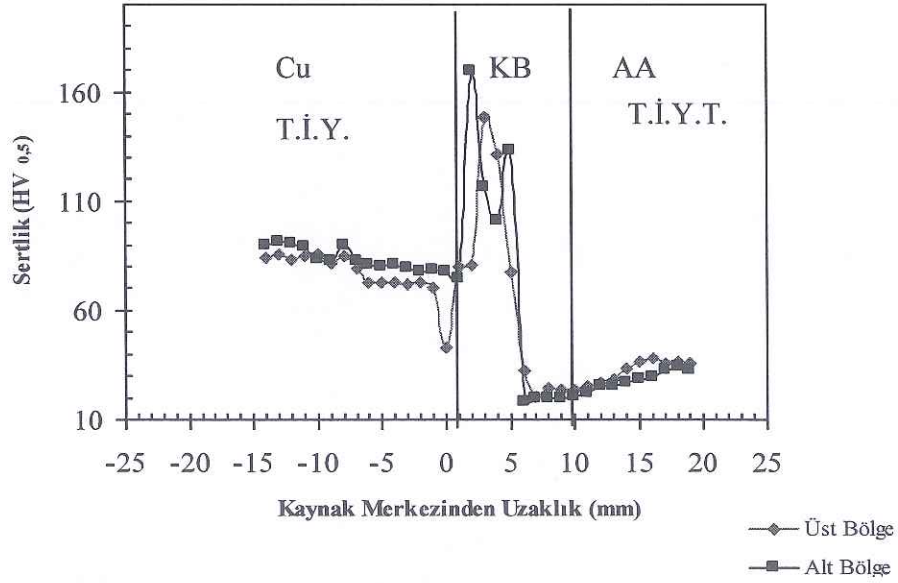


Şekil 7.24: 630/50/1 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği



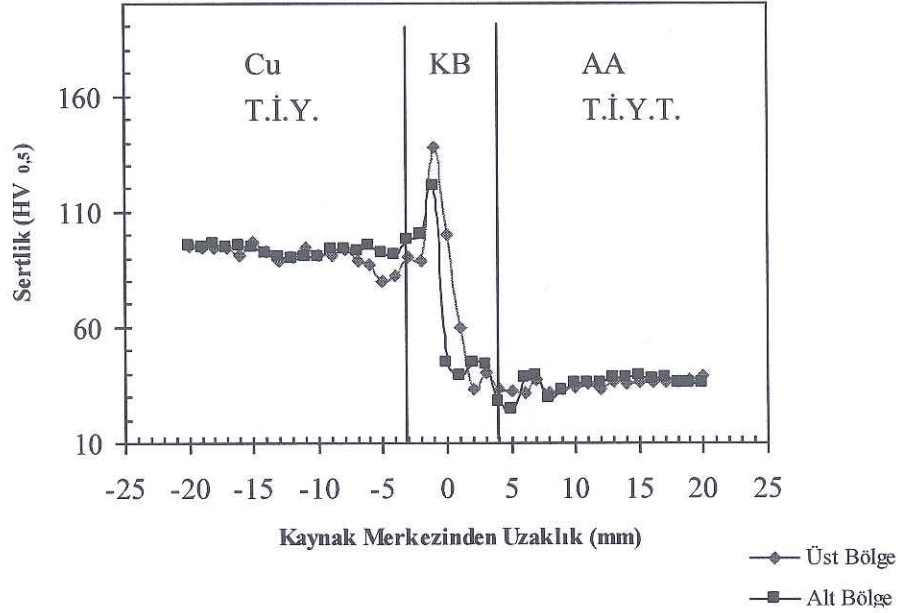
Şekil 7.25: 630/50/2 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 7.25'de 630/50/2 numunesinin sertlik grafiği incelendiğinde kaynak bölgesi sertliğinin bakır tarafında 82 HV, alüminyum tarafında 35 HV arasında değiştiği, bakır tarafın ortalama sertliğinin 87 HV, alüminyum tarafın ortalama sertliğinin 37 HV olduğu ortaya çıkmıştır. Sertlik değerlerindeki dalgalanmaların azalması mikroyapı içinde bakır partiküllerin daha homojen dağılım göstermesine bağlanmıştır. Kaynak bölgesinin geniş olması kaynak bölgesinin tam olarak oluşmasına bağlanmıştır.



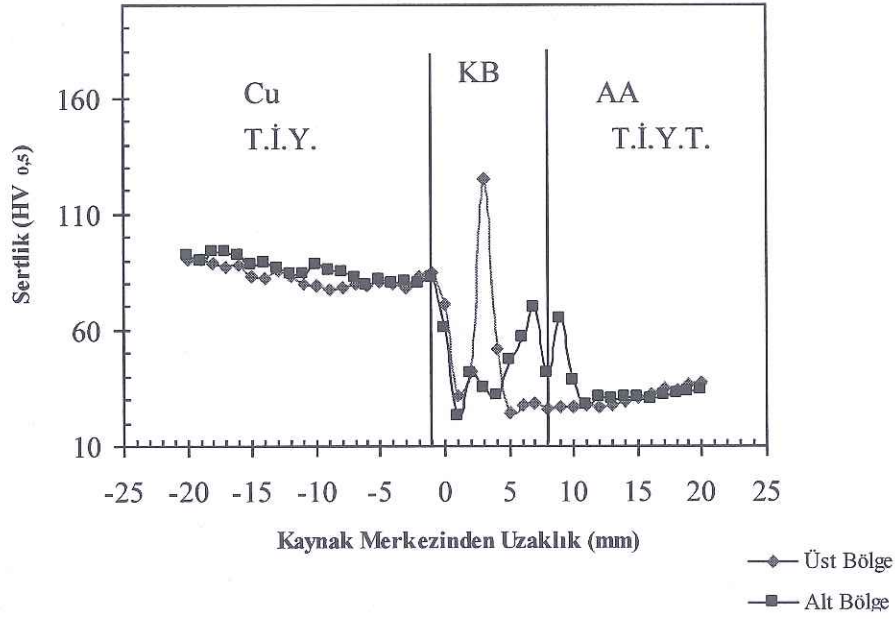
Şekil 7.26: 1330/20/1 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 7.26 incelendiğinde; 1330/20/1 numunesinin KB sertliğinin 32-148 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğinin 76 HV olduğu tespit edilmiştir. Kaynak bölgesi 1330/30/1,5 numunesine göre daha geniş olup mekanik değerleri de daha yüksektir.



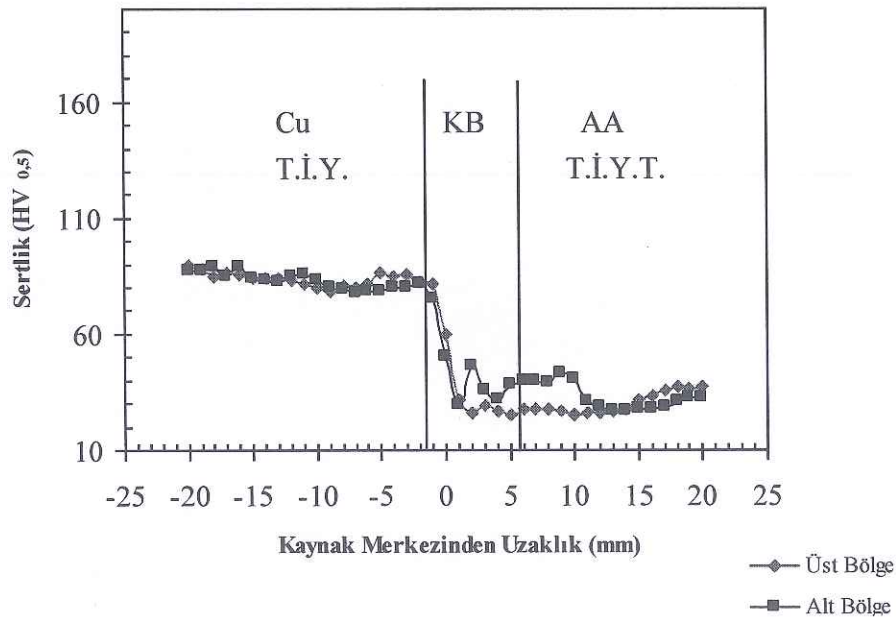
Şekil 7.27:1330/30/1,5 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 7.27 incelendiğinde; 1330/30/1,5 numunesinde sertliğin 33-138 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 74 HV olduğu ortaya çıkmıştır. Al tarafında kaynak alt kısmında sertlik artışının nedeni, karıştırmanın etkisiyle kaynak bölgesinde kaynak alt kısmında Al tarafında yer alan bakır parçacıklara bağlanmıştır. Yapılan literatür araştırmasında bakır parçacıkların, fazların Al matris içinde sertliği arttırdığı ifade edilmiştir [3,31,35,77].



Şekil 7.28:2440/30/1 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 7.28’de 2440/30/1 numunesinin sertlik grafiği incelendiğinde KB’nin sertlik değerlerinin 24-124 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 64 HV olduğu ortaya çıkmıştır. Kaynak bölgesi daha geniş olup mekanik değerler 2440/50/2 numunesine göre daha yüksektir.



Şekil 7.29: 2440/50/2 numunesinin üst ve alt bölgelerinden ölçülen mikrosertlik grafiği

Şekil 7.29'de 2440/50/2 numunesinin sertlik grafiği incelendiğinde KB'nin sertliğinin 25-81 HV arasında dağılım gösterdiği, ortalama sertliğin 38 HV olduğu ortaya çıkmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde kaynak bölgesinde görülen sertlik artışları, bakırca zengin yapılara ve metaller arası oluşan intermetalik fazlara (CuAl_2 , Al_4Cu_9) bağlanırken, kaynak bölgesindeki sertliklerdeki dalgalanmalar ise mikroyapının heterojen olmasına bağlanmıştır. Bu sonuç literatür ile uyum göstermiştir [3,31,35,77].

Malzemelerin karışımlarının tam olduğu kaynak şartlarında kaynak bölgesinin daha geniş olduğu görülmüştür.

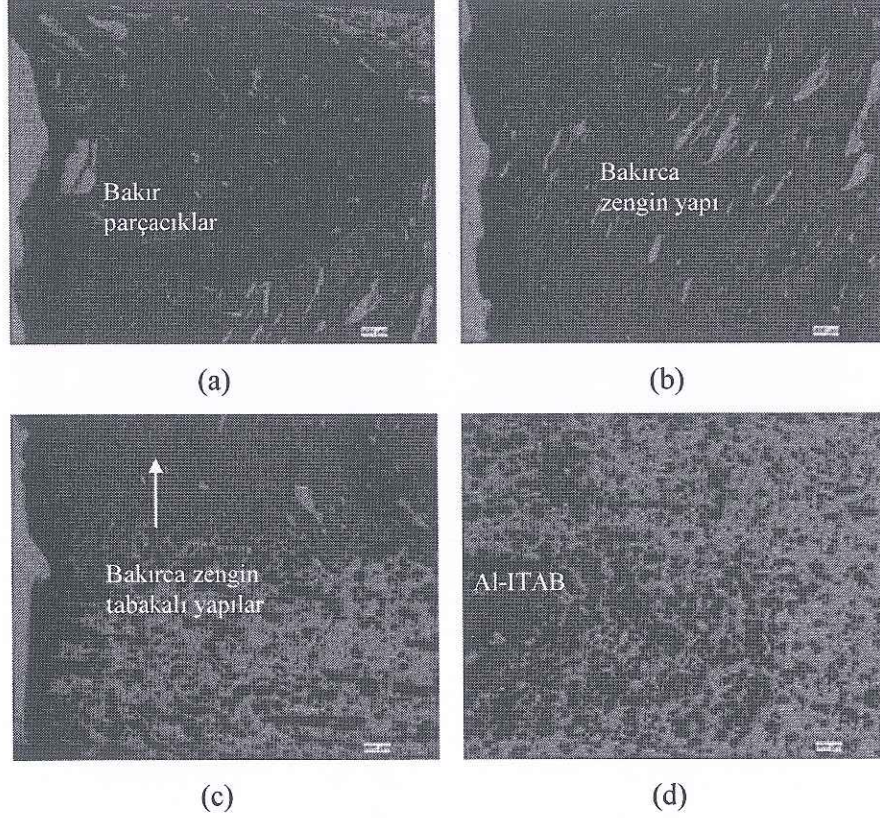
7.7 Kaynak Bölgelerinin Mikroyapı İncelemesi

Kaynak bölgelerinin mikroyapı incelemesinde karışım bölgesi, alüminyum tarafındaki ve bakır tarafındaki ITAB ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yapılan incelemelerde karışım bölgesinin alüminyum tarafında olduğu tespit edilmiştir. Bunda karıştırıcı ucun pim kısmının alüminyum tarafına belirli değerlerde (1-1,5-2 mm) kaydırılmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

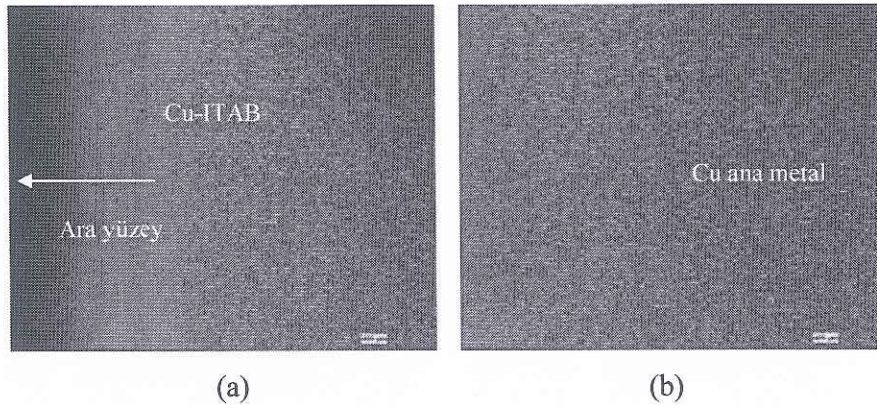
Farklı parametreler ile elde edilen bütün deney numunelerinin kaynak bölgesinin mikroyapıları kaynak merkezinden ana metallere doğru mekanik değerler üzerinde etkili olacağı düşünülen ayrıntılar dikkate alınarak incelenmiştir. Şekil 7.30-54'de mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Bakır parçacıklarının mekanik değerleri etkilediği düşünülerek mikroyapı incelemesinde bakır parçacıklarının tane boyutu ölçülmüştür. Al matris içindeki bakır parçacıklar, ince parçacık şeklinde, iri parçacıklar ise ince parçacıklara göre çok daha büyük ve düzensiz olarak dağılmışlardır. Bu durum yapılan diğer bir çalışmada da belirtilmiştir [3].

Aynı cins malzemelerin SKK yöntemi ile birleştirildikten sonra kaynak kesiti incelendiğinde; sırasıyla ana metale doğru kaynak bölgesi (KB), termomekanik olarak etkilen bölge (TMEB), ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve ana malzeme ayrımı yapılmaktadır. Ancak farklı malzemelerde bu bölgeleri tanımlamak güçleşmektedir. Hatta farklı malzemelerin SKK işleminde, farklı malzeme

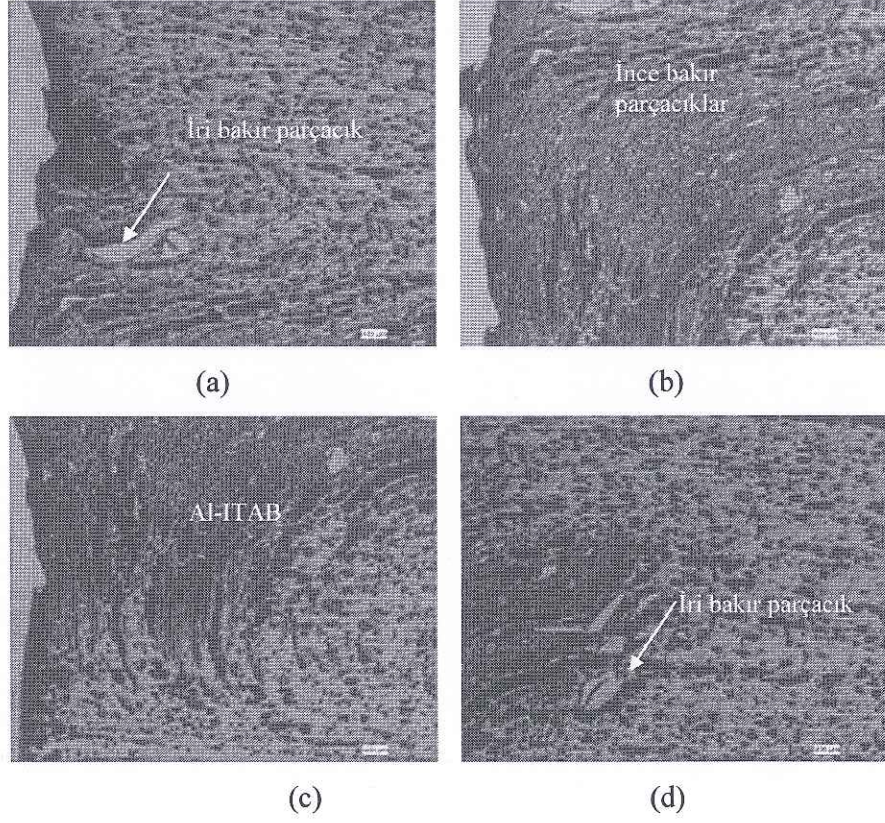
karişimlarından dolayı kaynak bölgesinde klasik olarak görülen soğan halka görünümüleri ortaya çıkmamaktadır. Kaynak bölgesi heterojen bir özellik göstermiştir. Bunun nedeni de SKK işlemindeki kariştırma mekanizması ve sürtünme sonucu ortaya çıkan ısı olduğu değerlendirilmiştir. Yapılan lietratür araştırması da bunu desteklemiştir [77].



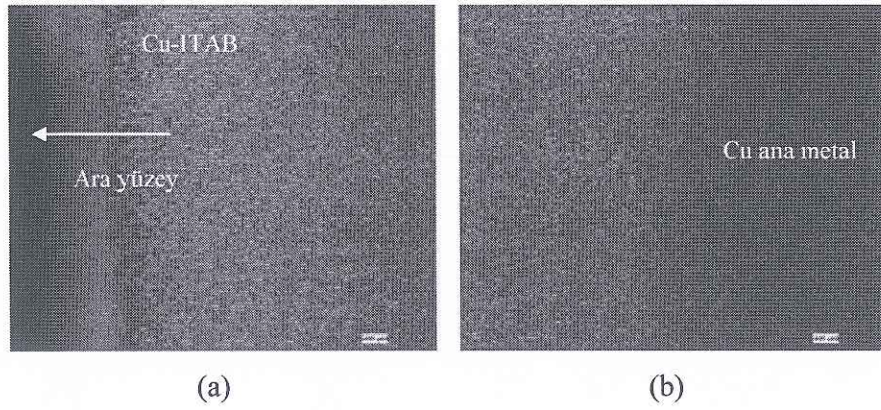
Şekil 7.30: 630/20/2 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Al ana metale geçiş



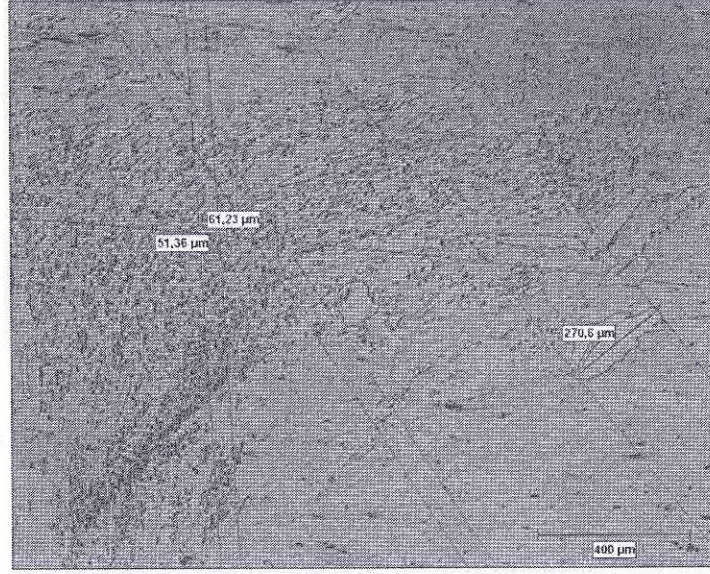
Şekil 7.31: 630/20/2 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Cu ana metale geçiş



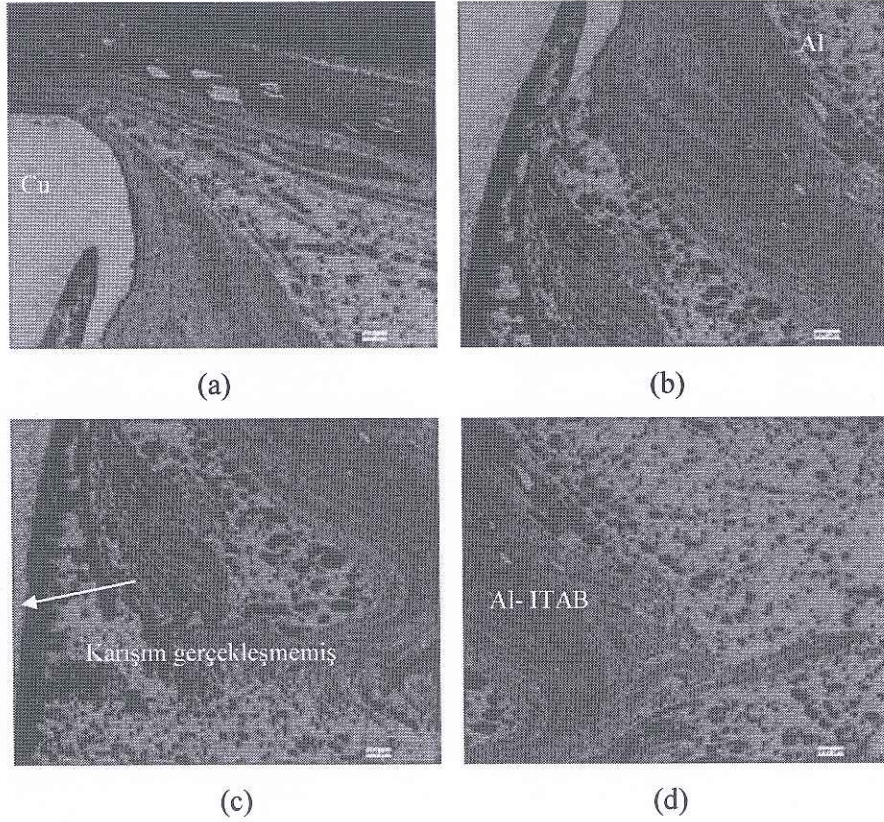
Şekil 7.32: 630/30/2 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Al ana metale geçiş



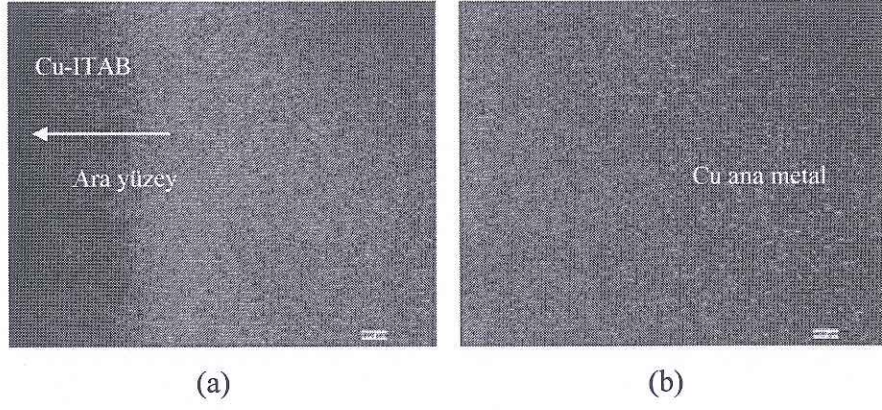
Şekil 7.33: 630/30/2 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Cu ana metale geçiş



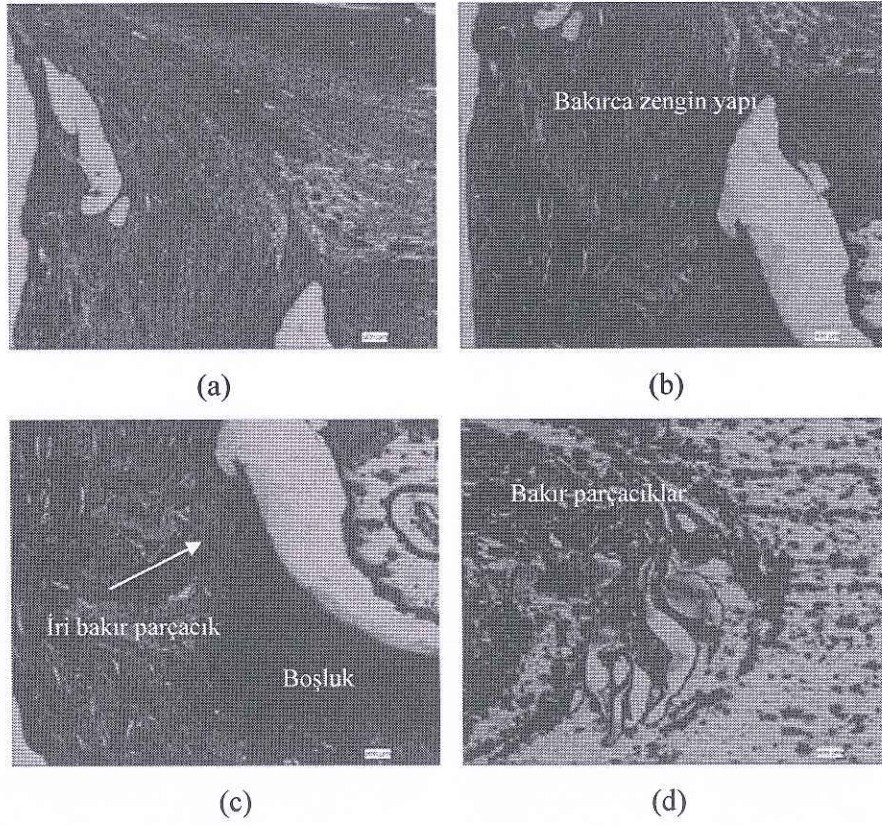
Şekil 7.34: 630/30/2 numunesinde bakır parçacıkların boyutu



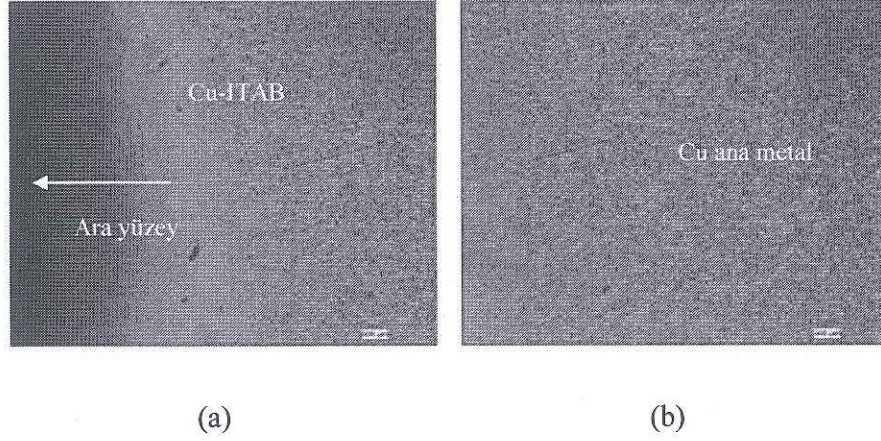
Şekil 7.35: 630/50/1,5 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c) Alt bölge, d) Al ana metale geçiş



Şekil 7.36: 630/50/1,5 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Cu ana metale geçiş



Şekil 7.37: 630/50/2 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c) Alt bölge, d) Al ana metale geçiş



Şekil 7.38: 630/50/2 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Cu ana metale geçiş

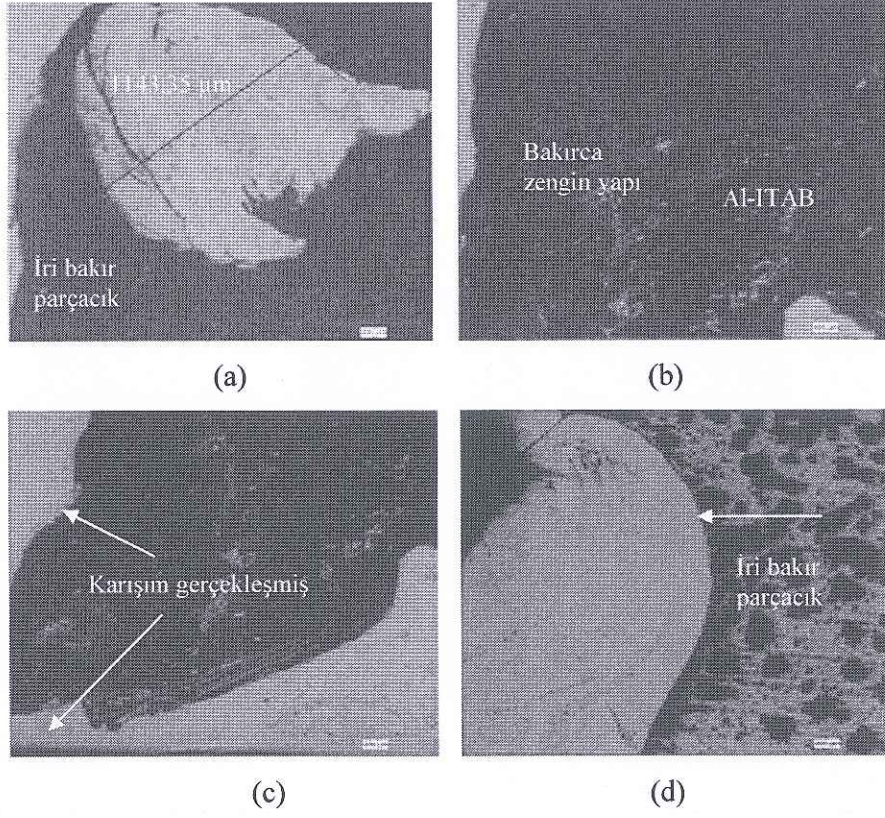
Şekil 7.30'da 630/20/2 numunesinin alüminyum tarafında bakırca zengin yapılar ve ITAB'ın varlığı görülmektedir. Bu yapılar mekanik özellikleri olumlu etkilemiştir. Şekil 7.31'de bakır tarafındaki değişimin Al tarafında olduğu gibi çok fazla olmadığı, ısı tesiri altında kalan bölgenin oluştuğu görülmüştür. Ana metalede bitişik fakat kaynak merkezine de yakın olan ITAB'ın mikroyapı ve mekanik özellikleri ısı ile değiştiği fakat herhangi bir plastik deformasyona maruz kalmadığı yapılan çalışmalarla da ortaya konulmuştur [78]. Şekil 7.32'de görüldüğü gibi 630/30/2 numunesinde Al tarafında ince bakır parçacıklar ve birkaç iri parçacık tespit edilmiştir. Şekil 7.33'de bakır tarafındaki değişim, Şekil 7.31'e benzer şekilde bakır tarafındaki değişimin Al tarafında olduğu gibi çok fazla olmadığı, ısı tesiri altında kalan bölgenin oluştuğu görülmüştür. Şekil 7.34'de Al matriste karışan bakır parçacıkların boyutu ölçülmüştür. İnce bakır parçacıklar 51,36 μm -61,23 μm boyutunda, iri bakır parçacık 270,6 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 7.35'de verildiği üzere 630/50/1,5 numunesinde karışımın gerçekleşmediği ve bakırca zengin tabakaların varlığı tespit edilememiştir. Şekil 7.36'da bakır tarafındaki değişim Şekil 7.31-33'e benzer davranış göstermiştir. Şekil 7.37'de verildiği gibi 630/50/2 numunesinde Al tarafında bakırca zengin yapıların ve bakır parçacıkların varlığı boşluğa rağmen mekanik değerleri arttırmıştır. Şekil 7.38'de bakır tarafındaki değişim Şekil 7.31-33-36'ya benzer davranış göstermiştir.

Alüminyum matris içinde bakır parçacıkların homojen ve küçük parçacıklar şeklinde karışması Al-Cu birleşmesinde ara yüzeyde iyi bir bağlanma meydana

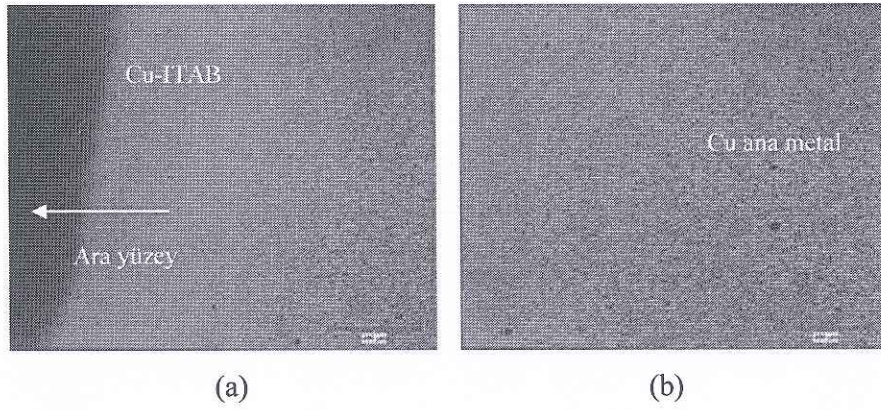
getirmekte olup mekanik değerlerin artmasını sağlamıştır. Yapılan diğer bir çalışmada, takım konumunun arttırılması ile küçük bakır parçacıkların alüminyum ana malzemeye karışmasının kolay olduğu ve iyi bir bağlanmanın meydana geldiği ifade edilmiştir [30].

“0” konumlu yapılan birleştirmelerde birkaç geniş Cu parçacık Al matris ile kaynak bölgesinde karışmakta iken 1-1,5-2 mm takım konumlandırmasına irili ufaklı birçok bakır partikül Al matris içerisinde karışmış ve çekme dayanımlarının yükselmesini sağlamıştır. Bu durum literatür ile uyum göstermiştir. Takım konumunun “0” olduğu durumda kaynak yüzeyinde birçok çatlak meydana geldiği, birçok geniş bakır parçacıkların Al matristen sert olması nedeniyle deformasyonun ve karıştırmanın zorlaştığı ve bağlanmanın zayıfladığı belirtilmiştir [30].

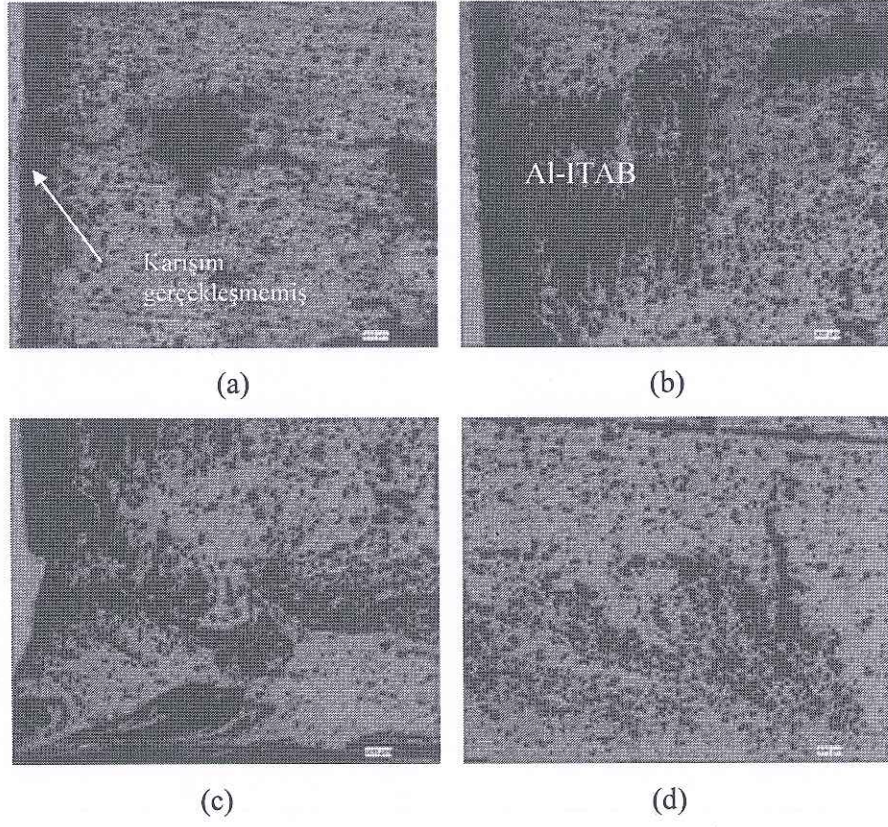
Genel olarak, 630 dev/dak takım dönme hızında yapılan birleştirmelerin çekme dayanımlarının diğer (1330-2440 dev/dak) takım dönme hızlarında elde edilen çekme dayanımlarından düşük çıkması elde edilen ısı girdisinin az olması ve Al-Cu arasındaki karışımı tam sağlayamaması olarak değerlendirilmiştir. Düşük takım dönme hızında düşük ısı girdisi sonucu karışımın sağlanamaması nendi ile çekme dayanımlarının düşük çıktığı literatürde yapılan bir çalışmada ifade edilmiştir [30].



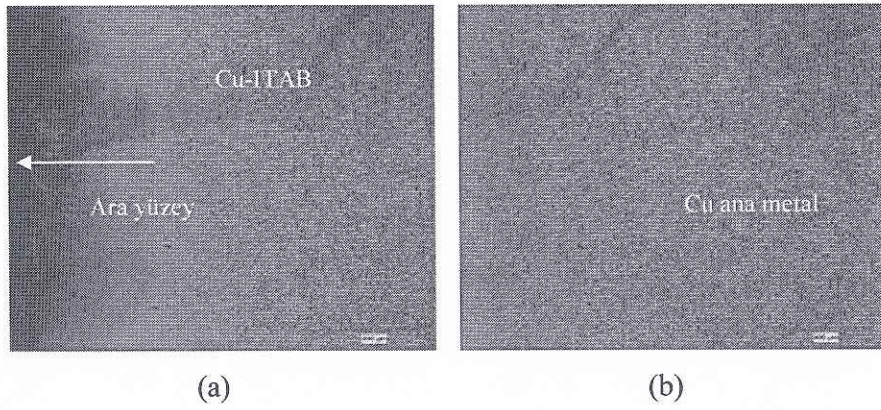
Şekil 7.39: 1330/20/1 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Al ana metale geçiş



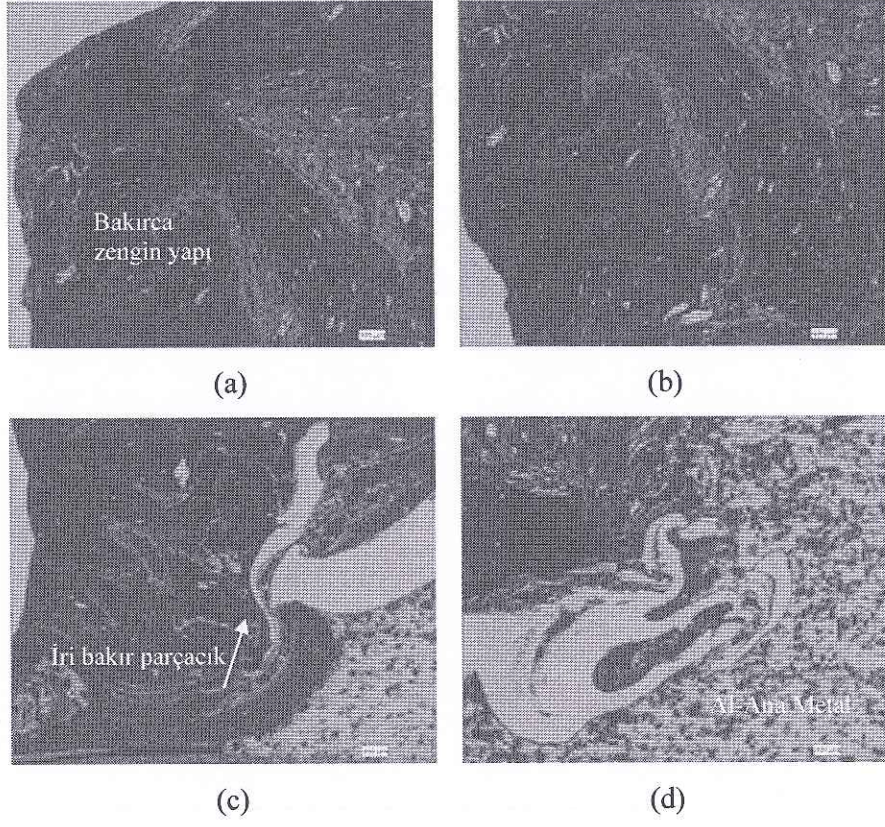
Şekil 7.40: 1330/20/1 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Cu ana metale geçiş



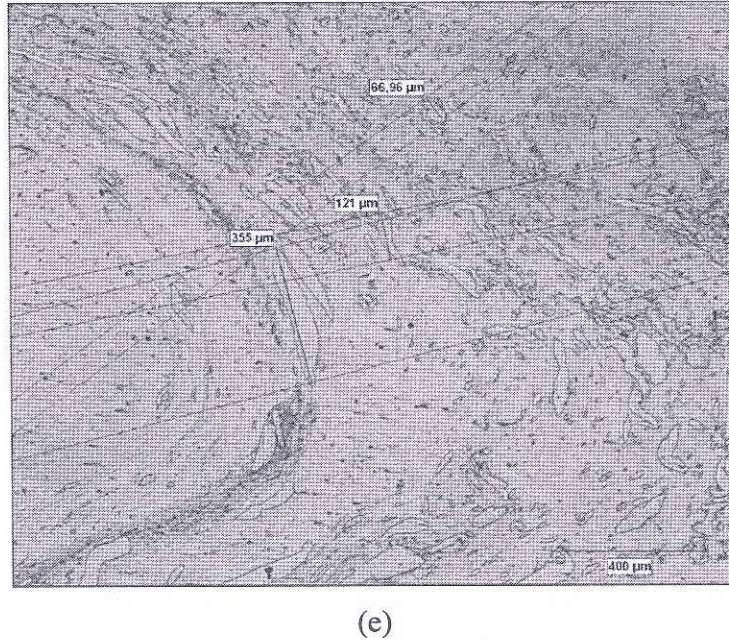
Şekil 7.41: 1330/30/1,5 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Al ana metale geçiş



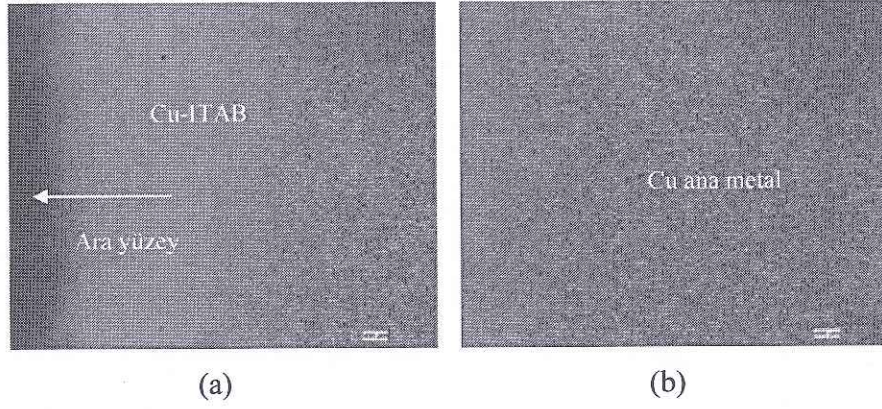
Şekil 7.42: 1330/30/1,5 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Cu ana metale geçiş



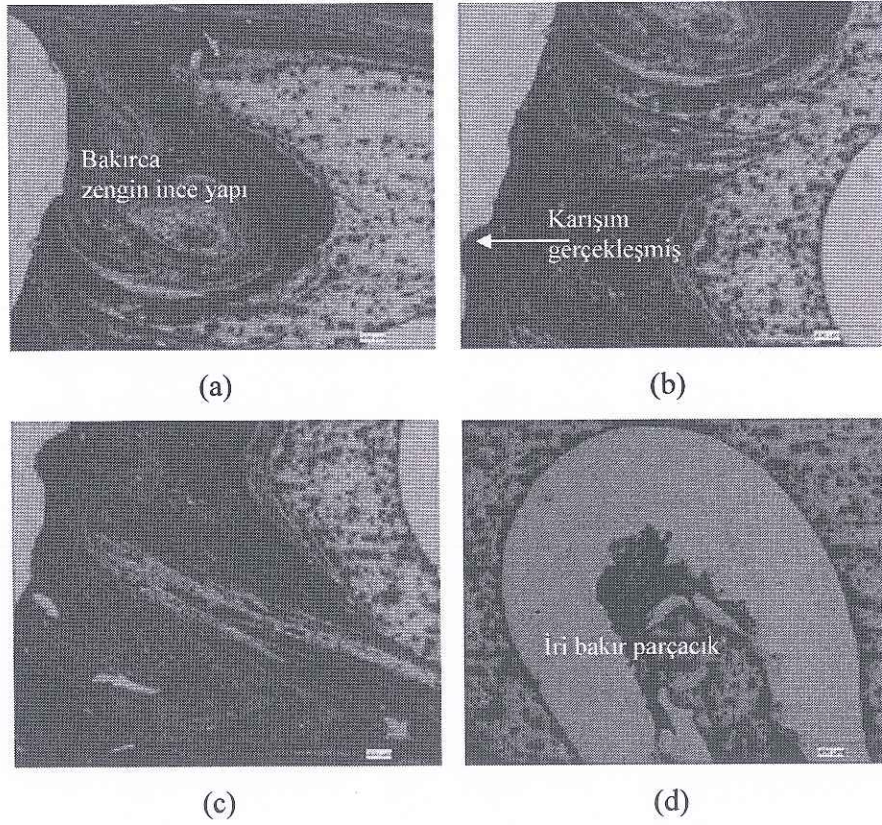
Şekil 7.43: 1330/30/2 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Al ana metale geçiş,



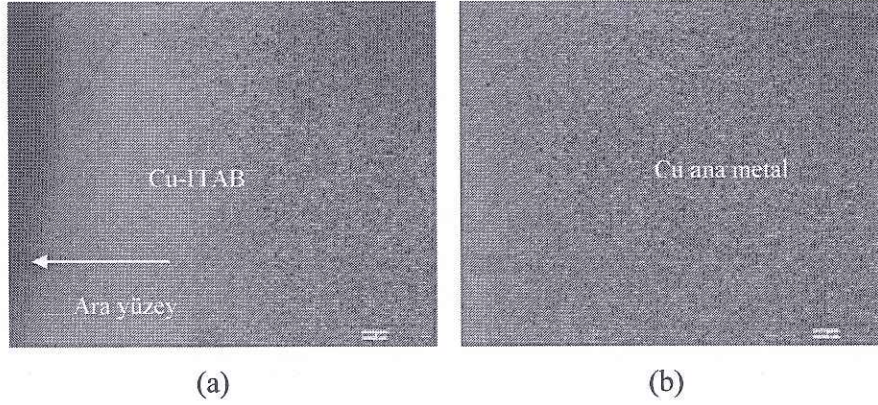
Şekil 7.43: 1330/30/2 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı e) Bakır parçacıkların boyutu



Şekil 7.44: 1330/30/2 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Cu ana metale geçiş



Şekil 7.45: 1330/50/1 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c) Alt bölge, d) Al ana metale geçiş

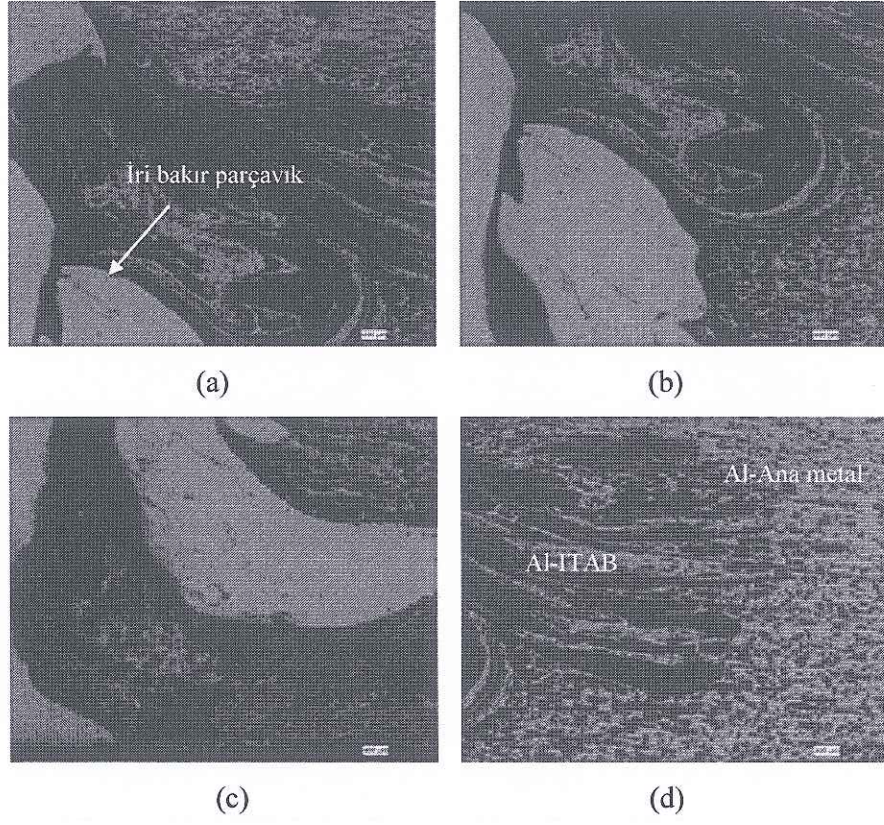


Şekil 7.46 : 1330/50/1 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Cu ana metale geçiş

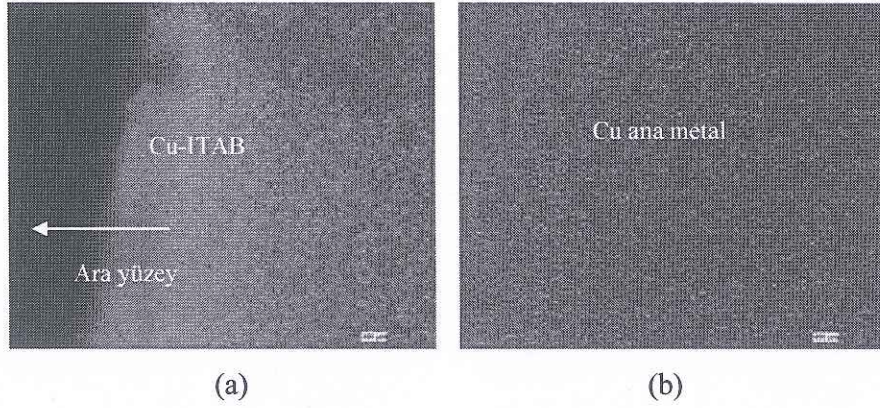
Al içindeki bakır parçacıkların homojen dağılımı ve birkaç iri parçacıklar Şekil 7.39'da görüleceği üzere 1330/20/1 numunesinde mekanik değerleri arttırmıştır. Karışım bölgesi diğer numunelerde olduğu gibi alüminyum tarafında gerçekleşmiştir. Şekil 7.40'da bakır tarafında arayüzey, Cu-ITAB ve ana metal görülmektedir. Bakır tarafında alüminyum tarafındaki gibi çok fazla değişiklik olmamıştır. Şekil 7.41 incelendiğinde 1330/30/1,5 numunesinde karışımın gerçekleştiği alüminyum tarafında bakır parçacıkların eksikliğinden dolayı mekanik değerler zayıflamıştır. Şekil 7.42'de bakır tarafındaki değişim Şekil 7.40'a benzer davranış göstermiştir. Şekil 7.43 incelendiğinde 1330/30/2 numunesinde karışımın gerçekleştiği alüminyum tarafında çok küçük bakır parçacıkların ve birkaç iri bakır parçacıkların varlığı nedeniyle mekanik değerler biraz yükselmiştir. Şekil 7.43 e'de 1330/30/2 şartlarındaki numunede alüminyum matris içindeki bakır parçacıkların boyutu ölçülmüştür. İnce bakır parçacıklar 66,96 μm -121 μm boyutunda, iri bakır parçacık 355 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 7.44'de bakır tarafındaki değişim Şekil 7.40-42'ye benzer davranış göstermiştir. Şekil 7.45 incelendiğinde 1330/50/1 numunesinde çok ince bakır parçacıkların ve iri bakır parçacıkların Al içindeki varlığı nedeniyle mekanik değerler yükselmiştir. Şekil 7.46'da bakır tarafındaki değişim Şekil 7.40-42-44'e benzer davranış göstermiştir.

630-1330 dev/dak takım dönme hızlarında elde edilen birleştirmeler karşılaştırıldığında yüksek dayanımların 1330 dev/dak takım dönme hızında meydana geldiği tespit edilmiştir. 1330 dev/dak takım dönme hızında Al-Cu

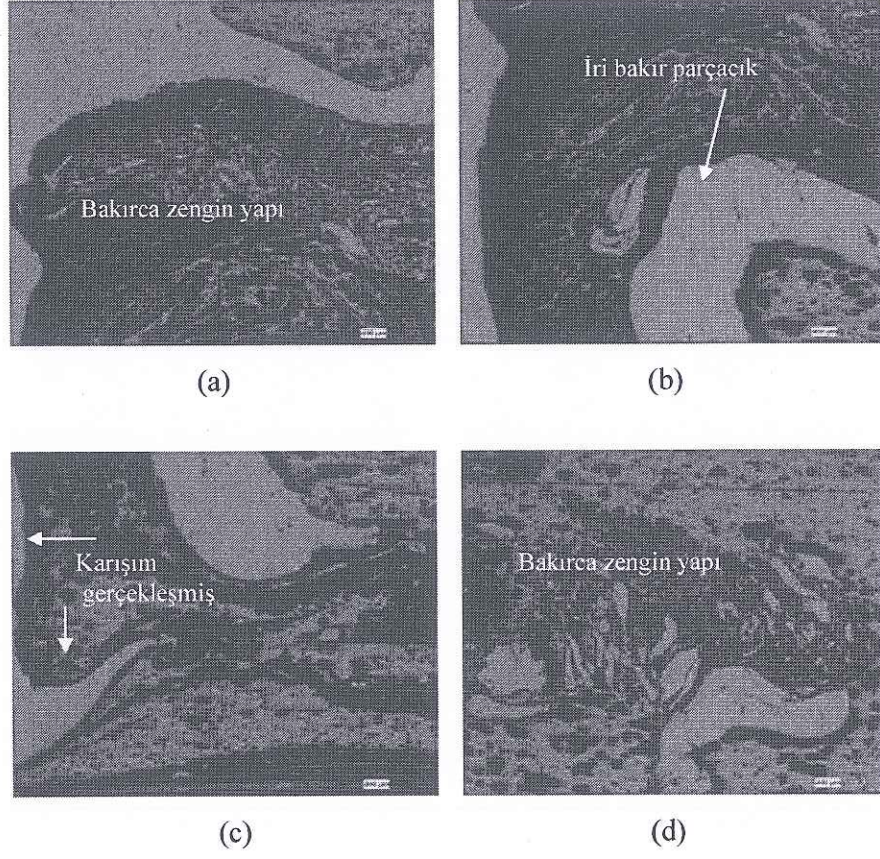
birleştirilmesinde ideal sıcaklıkların oluştuğu bununda Al ana malzeme ile karıştırıcı ucun dönme hareketi ile Cu malzemeden tařıdđđ bakır parçacıkların, karışımın kolaylařtıđđ ve Al-Cu ara yüzeyinde iyi bir bağlanma meydana geldiđđ değerlendirilmiştir. Takım dönme hızının 630 dev/dak'dan 1330 dev/dak'ya artmasıyla, ısı girdisinin arttıđđ ve iyi bir bağlanmanın meydana geldiđđ yapılan diğer bir çalışmada ortaya konulmuştur [30].



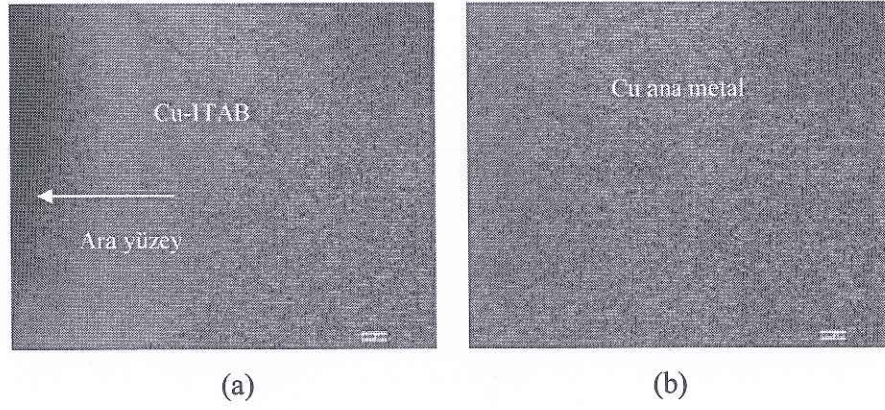
Şekil 7.47: 2440/20/1,5 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Al ana metale geçiş



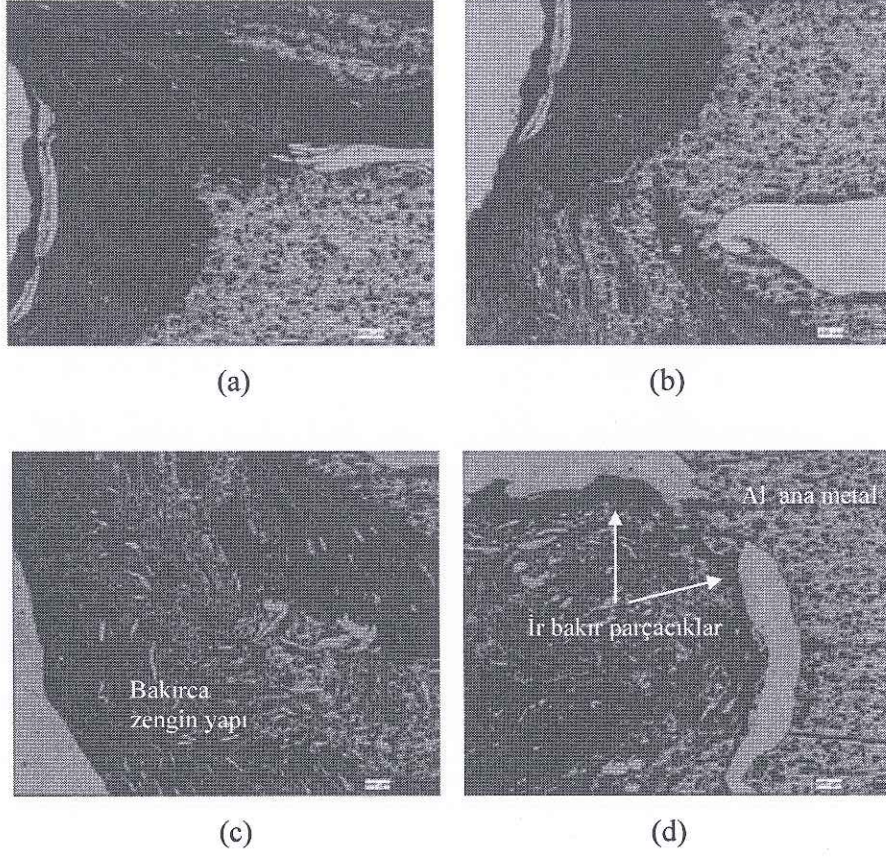
Şekil 7.48: 2440/20/1,5 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Cu ana metale geçiş



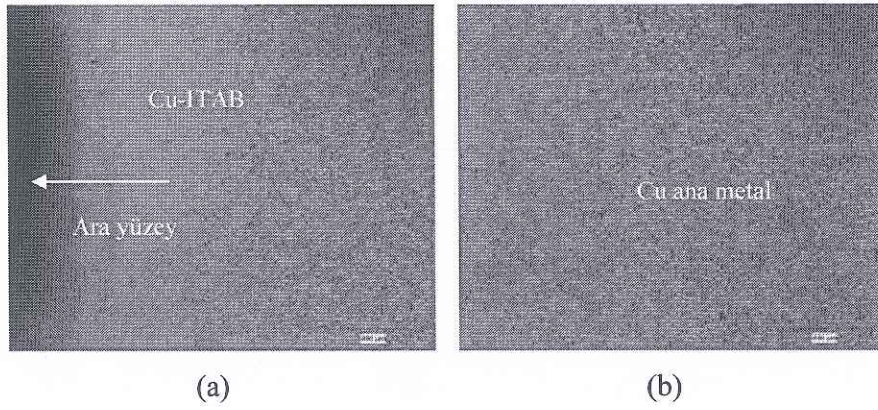
Şekil 7.49: 2440/30/1 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Al ana metale geçiş



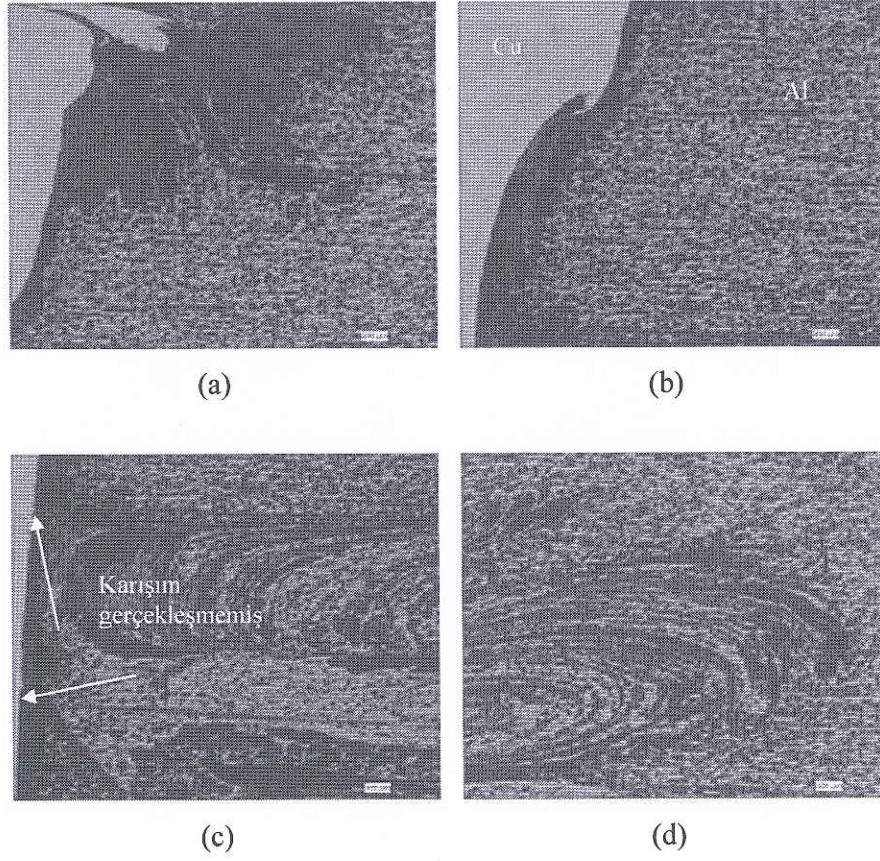
Şekil 7.50: 2440/30/1 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Cu ana metale geçiş



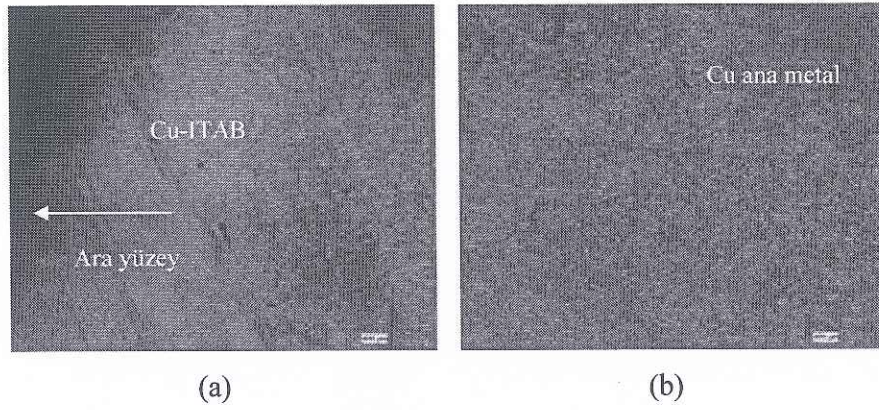
Şekil 7.51: 2440/50/1 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c) Alt bölge, d) Al ana metale geçiş



Şekil 7.52: 2440/50/1 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Cu ana metale geçiş



Şekil 7.53: 2440/50/2 numunesinin kaynak merkezi Al tarafı a) Üst bölge b) Orta bölge, c)Alt bölge, d) Al ana metale geçiş



Şekil 7.54: 2440/50/2 numunesinin kaynak merkezi Cu tarafı a) Geçiş, b) Cu ana metale geçiş

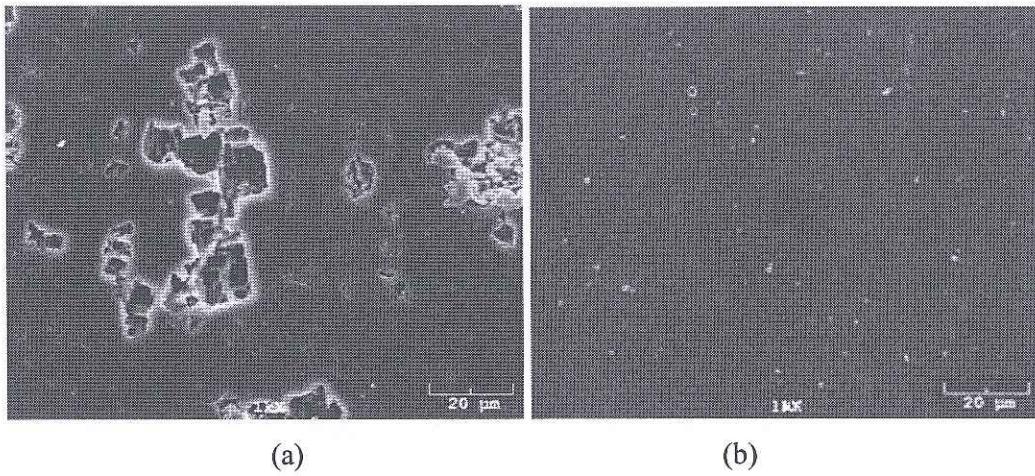
Şekil 7.47’de görüleceği üzere 2440/20/1,5 numunesinde dış açılmış karıştırıcı ucun dönme hareketi neticesiyle bakır levhadan koparılıp alüminyum matris içerisine sürüklenmiş bakır parçacıkların olmayışı nedeniyle mekanik değerler istenen seviyede çıkmamıştır. Alüminyum tarafında Al-Cu karışımı değil sadece iri bakır parçacık görülmektedir. Şekil 7.48’de bakır tarafındaki ara yüzey, Cu-ITAB ve Cu ana metal görülmektedir. Bakır tarafında, alüminyum tarafındaki gibi çok fazla değişiklik olmamıştır. Şekil 7.49’daki mikroyapı görüntüleri incelendiğinde 2440/30/1 numunesinde alüminyum matris içine gömülmüş bakır parçacıkların varlığı, yapıda boşlukların olmayışı ve karışımın oluşması mekanik değerleri oldukça yükseltmiştir. Şekil 7.50’de bakır tarafında değişim Şekil 7.48’e benzer davranış göstermiştir. Şekil 7.51 incelendiğinde 2440/50/1 numunesinde alüminyum matris tarafında bakır parçacıklarla karışımın gerçekleşmesi mekanik değerleri olumlu etkilemiştir. Şekil 7.52’de bakır tarafında değişim Şekil 7.48-50’ye benzer davranış göstermiştir. Şekil 7.53’de görüleceği üzere 2440/50/2 numunesinde alüminyum matris içinde bakır parçacıkların olmayışı nedeniyle mekanik değerlerde düşmeler gerçekleşmiştir. Şekil 7.54’de bakır tarafında değişim Şekil 7.48-50-52’ye benzer davranış göstermiştir.

2440 dev/dak takım dönme hızında elde edilen mekanik değerler, 1330 dev/dak takım dönme hızında elde edilen mekanik değerlerden çok az düşük olup bunun da oluşan ısı girdisinin artması ve Al-Cu kaynak bölgesinde meydana gelen intermetalik bileşenlerin daha fazla oluşmasının ancak kırılma oluşturacak değere ulaşmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Kalın intermetalik fazın mekanik dayanımları düşürdüğü diğer çalışmalarda da ortaya konulmuştur [30,35,76].

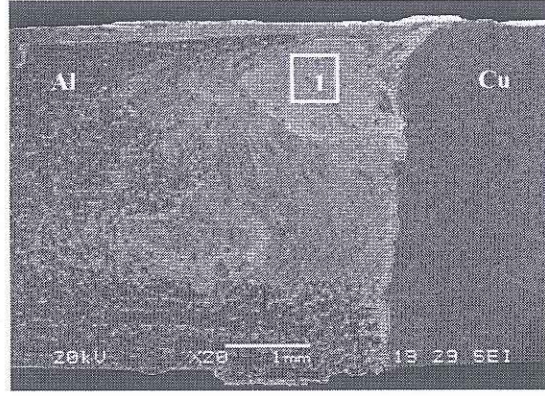
7.8 SEM İncelemeleri ve EDX Analizi

Ana malzemelerin ve kaynak bölgesinin SEM görüntüleri alınmıştır. Ayrıca EDX noktasal ve çizgisel analizler yapılmıştır. Kaynak bölgesi alüminyum tarafında oluşmuştur. Kaynak bölgesi içindeki bakır içeriğinin fazla olduğu yerler çizgisel analizlerde oklarla gösterilmiştir.

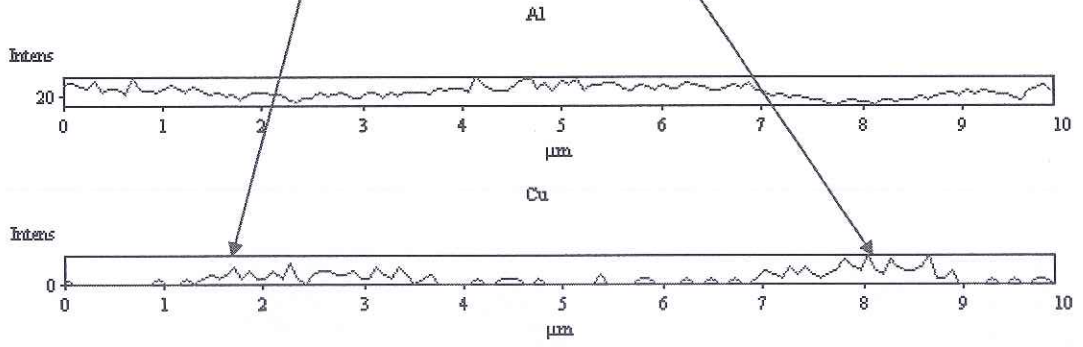
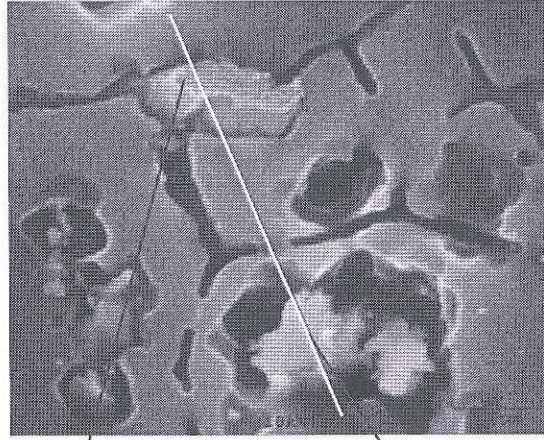
Şekil 7.55 (a)'da alüminyum ana metalinin, Şekil 7.55 (b)'de bakır ana metalinin SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 7.55: Ana metallerin SEM görüntüsü a) Al, b) Cu

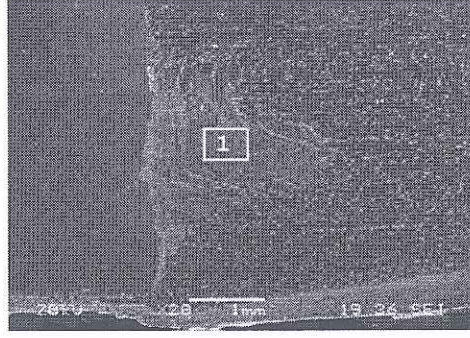


(a)

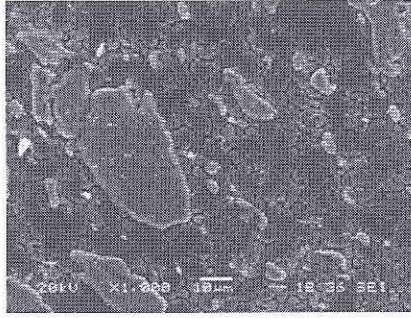


(b)

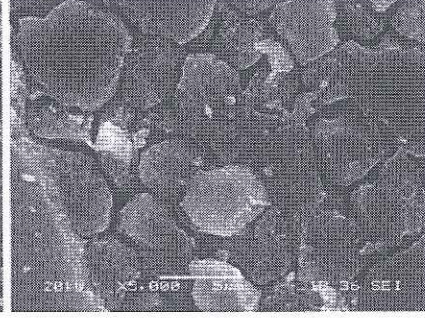
Şekil 7.56: 630/20/2 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 bölgesinin çizgisel analizi



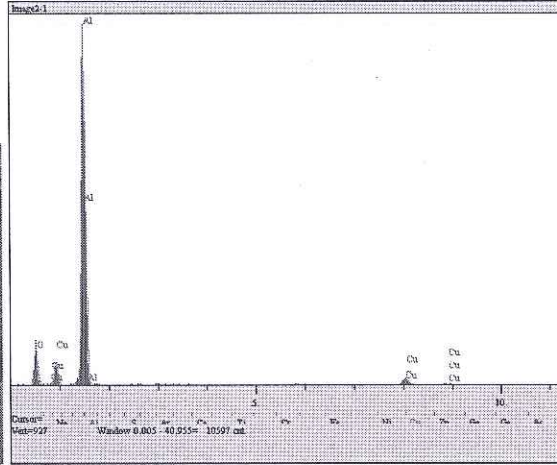
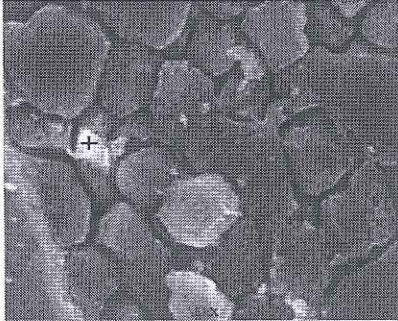
(a)



(b)



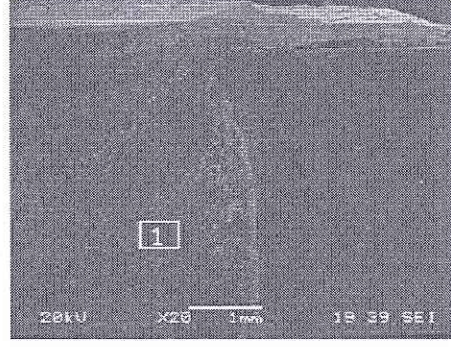
(c)



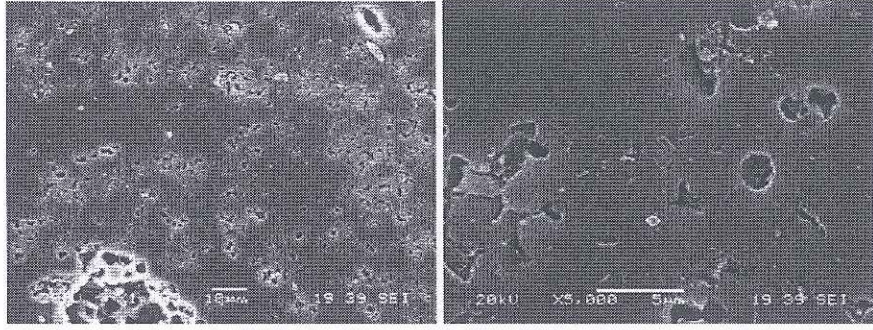
| Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc | Units | |
|------|------|--------------------|----------------|---------|-------|-------|
| O | Ka | 52,65 | 4,589 | 19,744 | wt. % | |
| Al | Ka | 780,96 | 17,673 | 71,762 | wt. % | |
| Cu | Ka | 24,59 | 3,136 | 8,494 | wt. % | |
| | | | | 100,000 | wt. % | Total |

(d)

Şekil 7.57: 630/30/2 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 nolu bölgenin 1000 büyütme hali, c) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d) 1 noktasının noktasal analizi

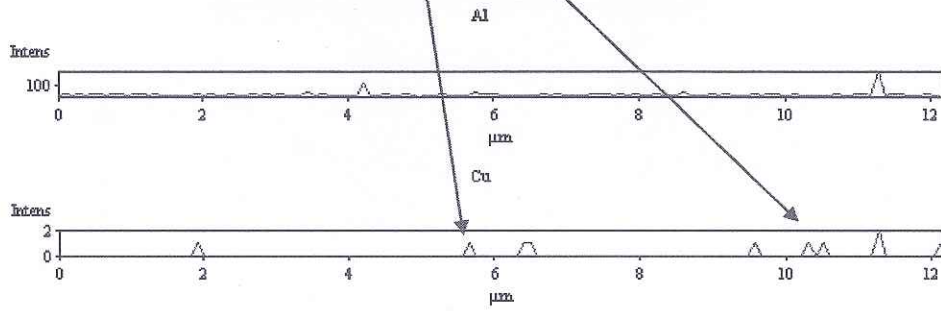
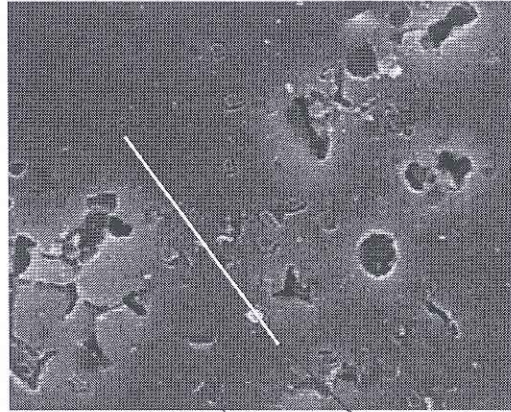


(a)



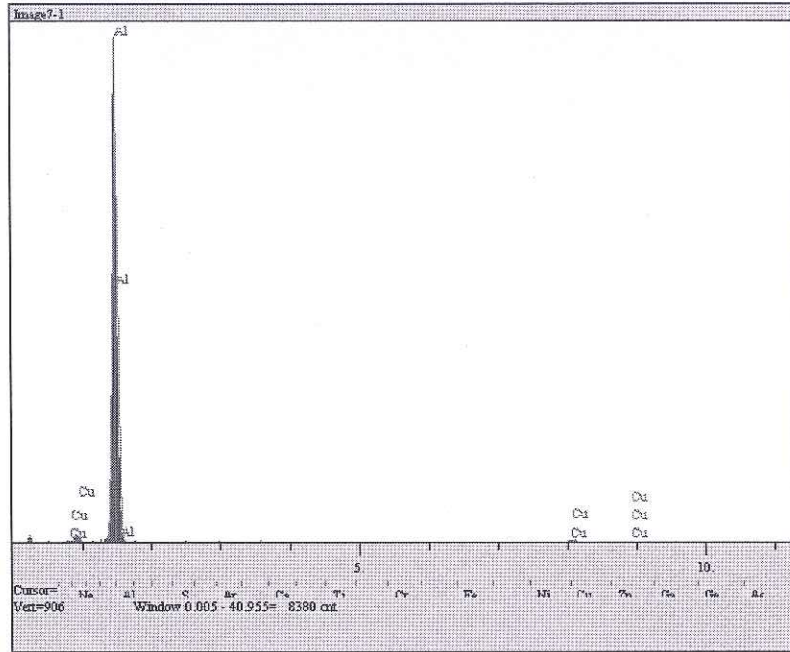
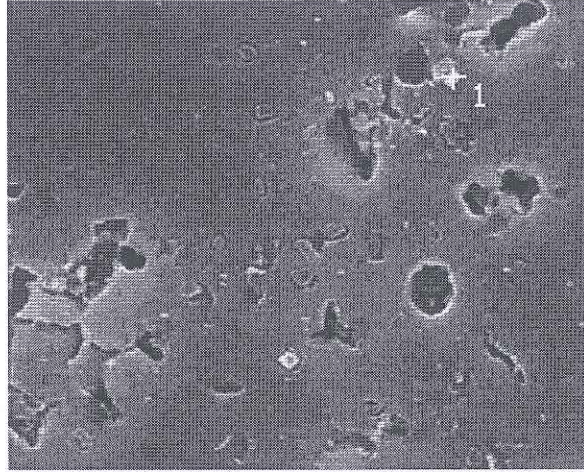
(b)

(c)



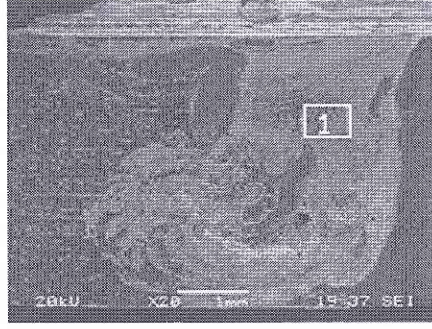
(d)

Şekil 7.58: 630/50/1,5 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 nolu bölgenin 1000 büyütme hali, c) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d) 1 nolu bölgenin çizgisel analizi

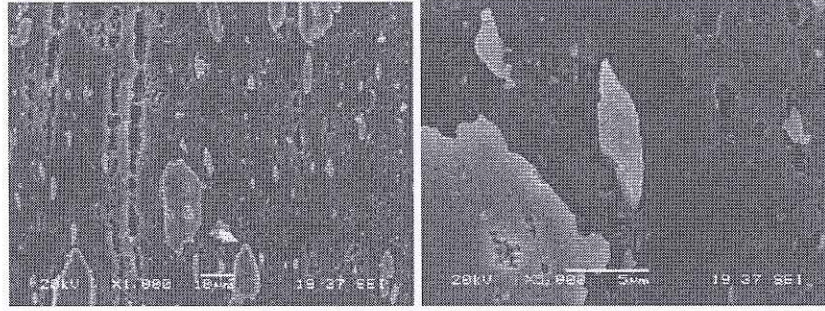


| El. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Conc | Units | |
|-----|------|--------------------|----------------|---------|-------|-------|
| Al | Ka | 711,63 | 16,871 | 96,922 | wt. % | |
| Cu | Ka | 4,82 | 1,389 | 3,079 | wt. % | |
| | | | | 100,000 | wt. % | Total |

Şekil 7.59: 630/50/1,5 numunesinin 1 noktasının noktasal analizi

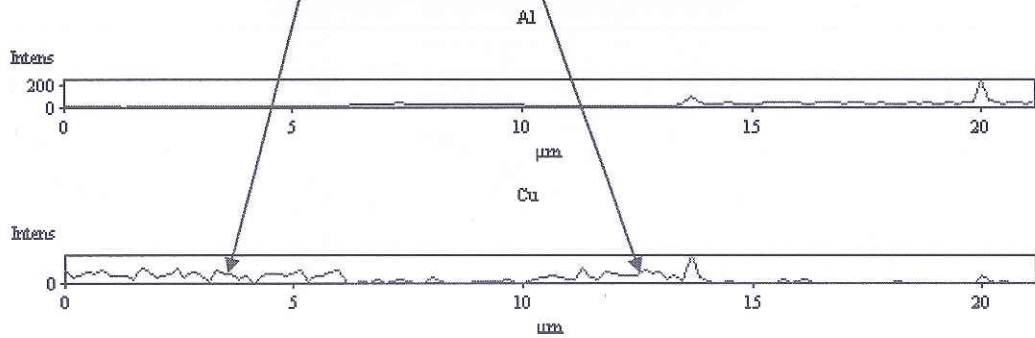
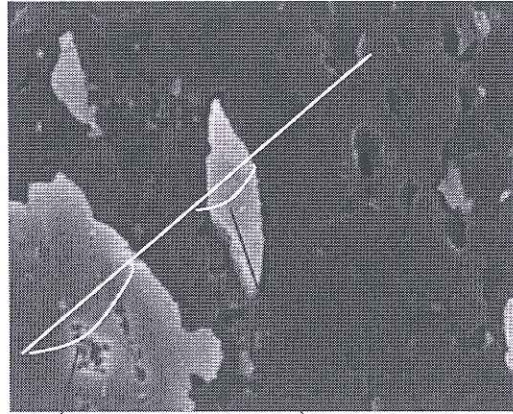


(a)



(b)

(c)

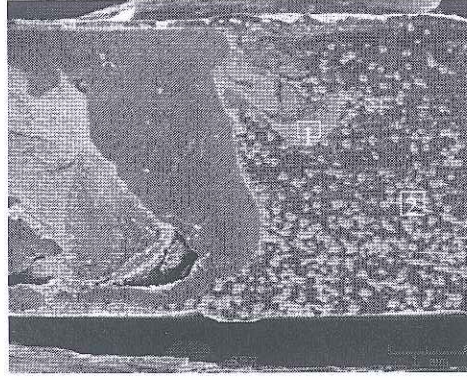


(d)

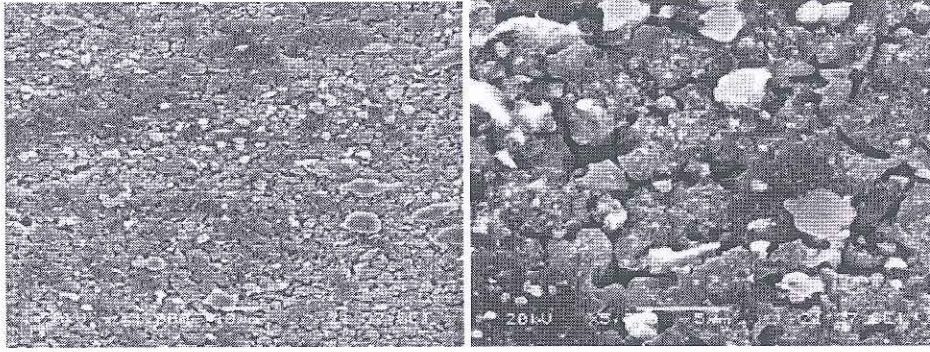
Şekil 7.60: 630/50/2 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 nolu bölgenin 1000 büyütme hali, c) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d) 1 nolu bölgenin çizgisel analizi

Şekil 7.56 incelendiğinde 630/20/2 numunesinde kaynak kesitinde yapıda boşlukların olmayışı mekanik değerleri (çekme mukavemeti 77,98 MPa) olumlu etkilemiştir. Şekil 7.57 (a) incelendiğinde 630/30/2 numunesinin kaynak kesitinin SEM görüntüsünde boşluk olmadığı ancak karışım bölgesinin de tam olarak oluşmaması sebebiyle mekanik değerler (çekme mukavemeti 49,05 MPa) istenen seviyede değildir. Şekil 7.58 (a) incelendiğinde 630/50/1,5 kaynak kesitinin SEM görüntüsünde karışımın gerçekleşmediği görülmektedir. Mekanik değerler (çekme mukavemeti 29,64 MPa) çok düşüktür. Şekil 7.60 (a) incelendiğinde 630/50/2 kaynak kesitinin SEM görüntüsünde karışımın tam anlamıyla gerçekleştiği, karışımın bakır taraftan alüminyuma uzandığı görülmektedir. Çekme mukavemeti (98,85 MPa) oldukça yüksek değerdedir.

630 dev/dak takım dönme hızında yapılan birleştirmelerin çekme dayanımlarının diğer (1330-2440 dev/dak) takım dönme hızlarında elde edilen dayanımlardan düşük çıkması elde edilen ısı girişinin az olması ve Al-Cu arasındaki reaksiyonu sağlayamaması olarak değerlendirilmiştir. Kaynak ekseninde ölçülen sıcaklıklar değerlendirildiğinde 1330 ve 2440 dev/dak takım dönme hızlarında elde edilen sıcaklıklardan düşük çıkmıştır. Bu da mekanik değerleri düşük olan numunelerde Al-Cu arasında iyi bir bağlanma meydana getirmemiştir. 630/20/2 ve 630/50/2 numunelerinde kaynak ekseninde ölçülen sıcaklıkların ortalaması (sırasıyla 384-376 °C) diğer numunelerden (630/30/2-630/50/1.5) ölçülen sıcaklıklardan (324-336 °C) yüksektir. Görüldüğü gibi ısı girdisinin artması Al-Cu arasında yeterli karışımı meydana getirmiş ve mekanik değerler yükselmiştir. Bunun yanında intermetalik bileşenlerin diğer takım dönme hızlarına göre daha az oluştuğu düşünülmektedir. Alüminyum ve bakır arasında sıcaklık artışıyla beraber intermetalik fazlar oluştuğu ve ara fazın kalınlığının arttığı diğer çalışmalarda ortaya konulmuştur [3,29,32,34,35,76].

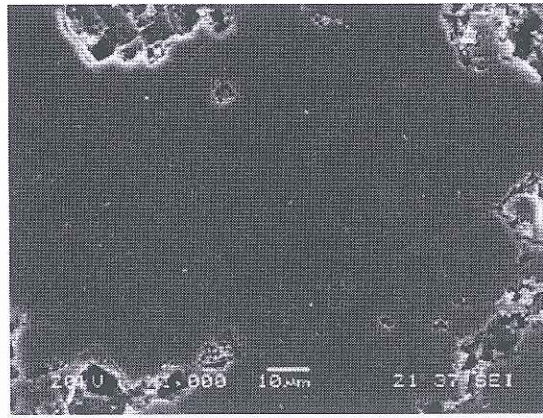


(a)



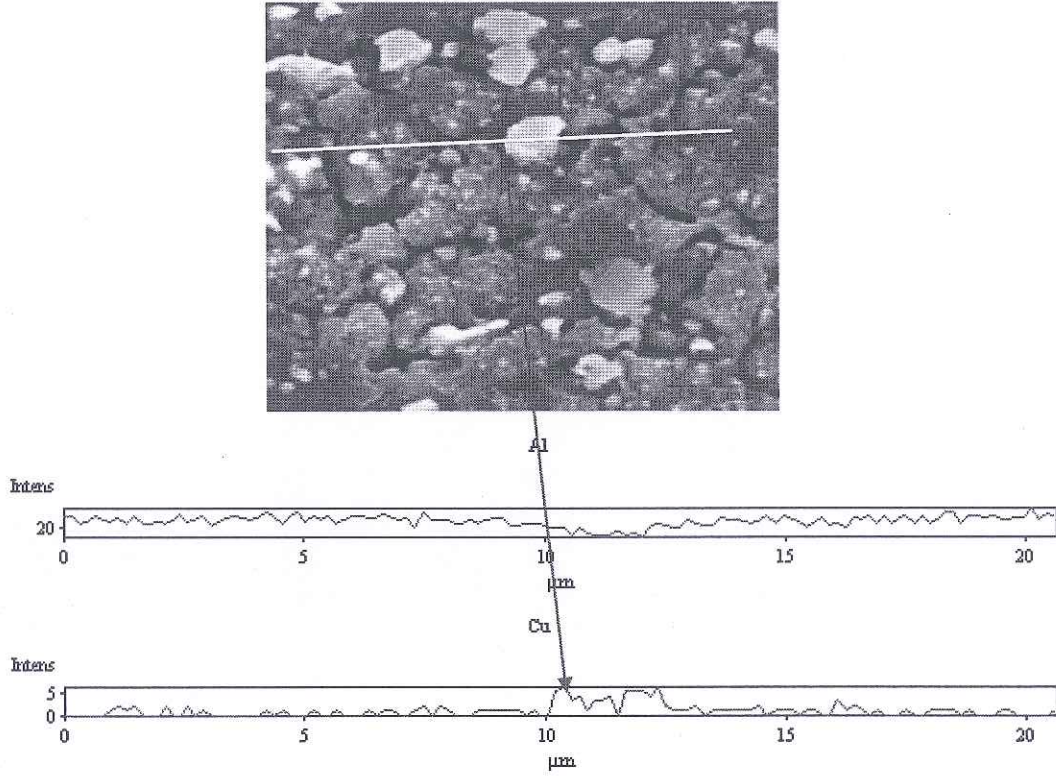
(b)

(c)

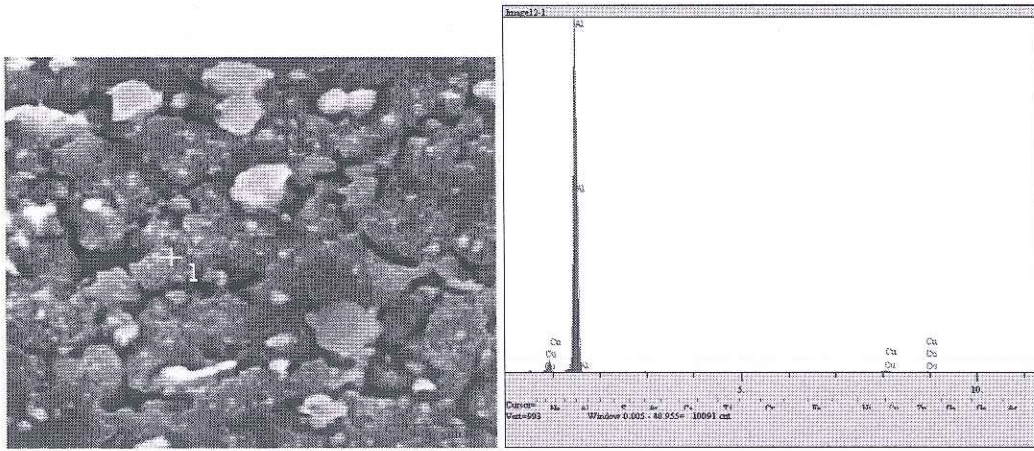


(d)

Şekil 7.61: 1330/20/1 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 nolu bölgenin 1000 büyütme hali, c) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d) 2 nolu bölgenin 1000 büyütme hali

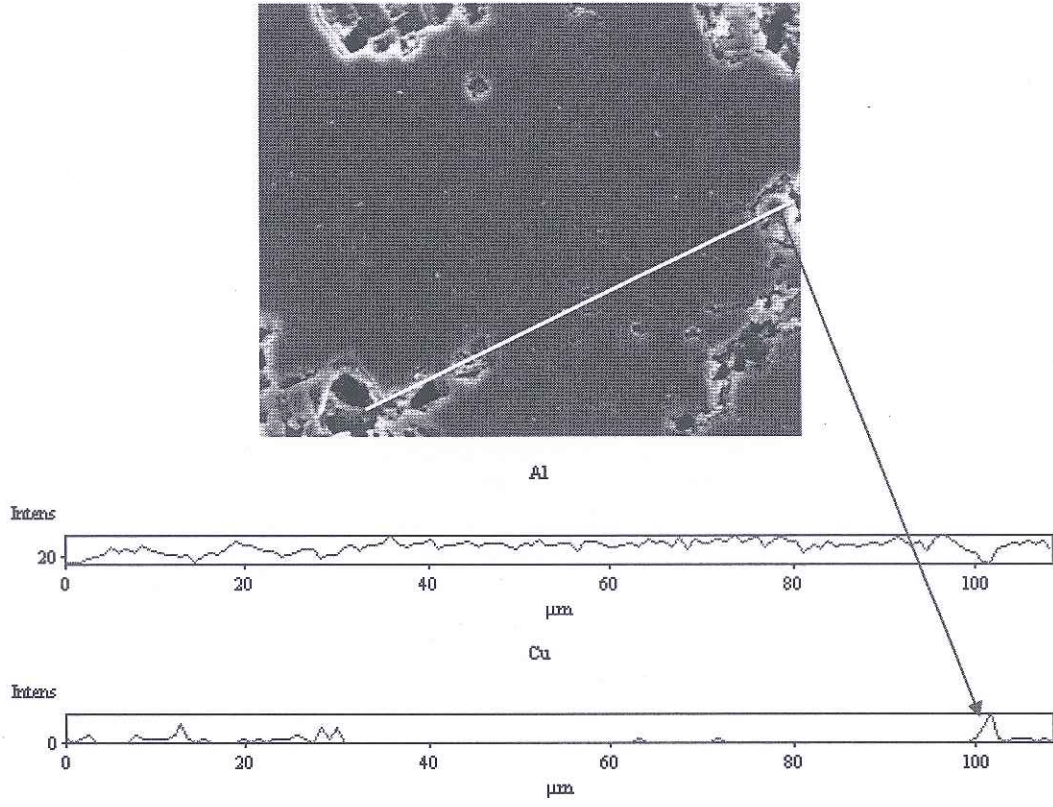


Şekil 7.62: Şekil 7.61 a)'daki 1 nolu bölgenin çizgisel analizi

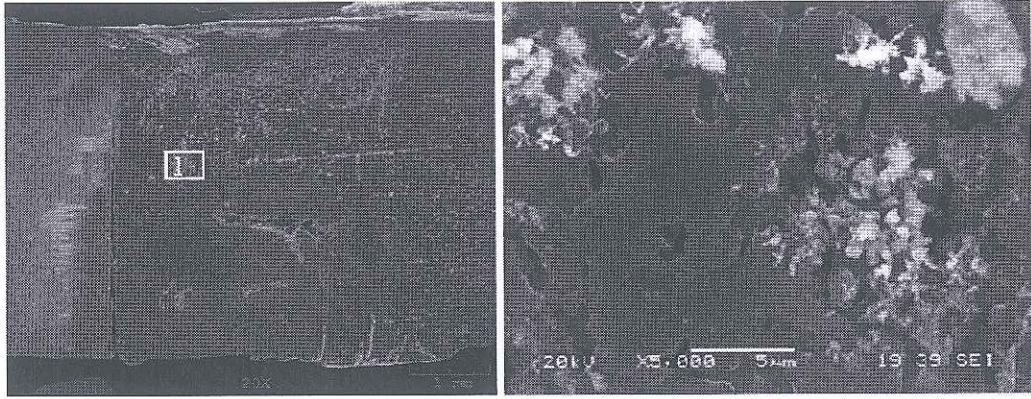


| Elt. | Line | Intensity (c/s) | Error 2-sig | Atomic % | Conc | Units | |
|------|------|--------------------|----------------|-------------|---------|-------|-------|
| Al | Ka | 845,91 | 18,394 | 97,870 | 95,125 | wt.% | |
| Cu | Ka | 9,61 | 1,961 | 2,130 | 4,875 | wt.% | |
| | | | | 100,000 | 100,000 | wt.% | Total |

Şekil 7.63: 1330/20/1 numunesinin 1 noktasının noktasal analizi

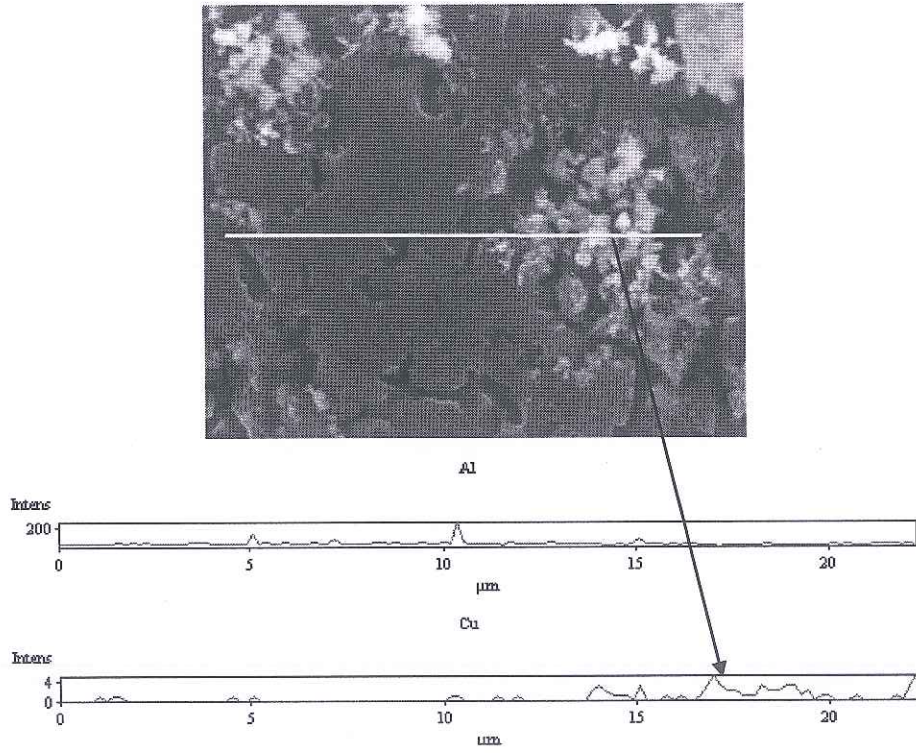


Şekil 7.64: Şekil 7.61 a)'deki 2 nolu bölgesinin çizgisel analizi



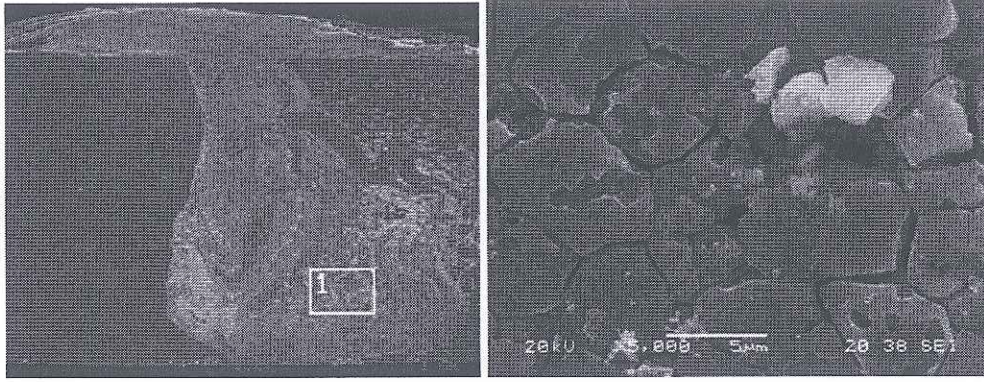
(a)

(b)



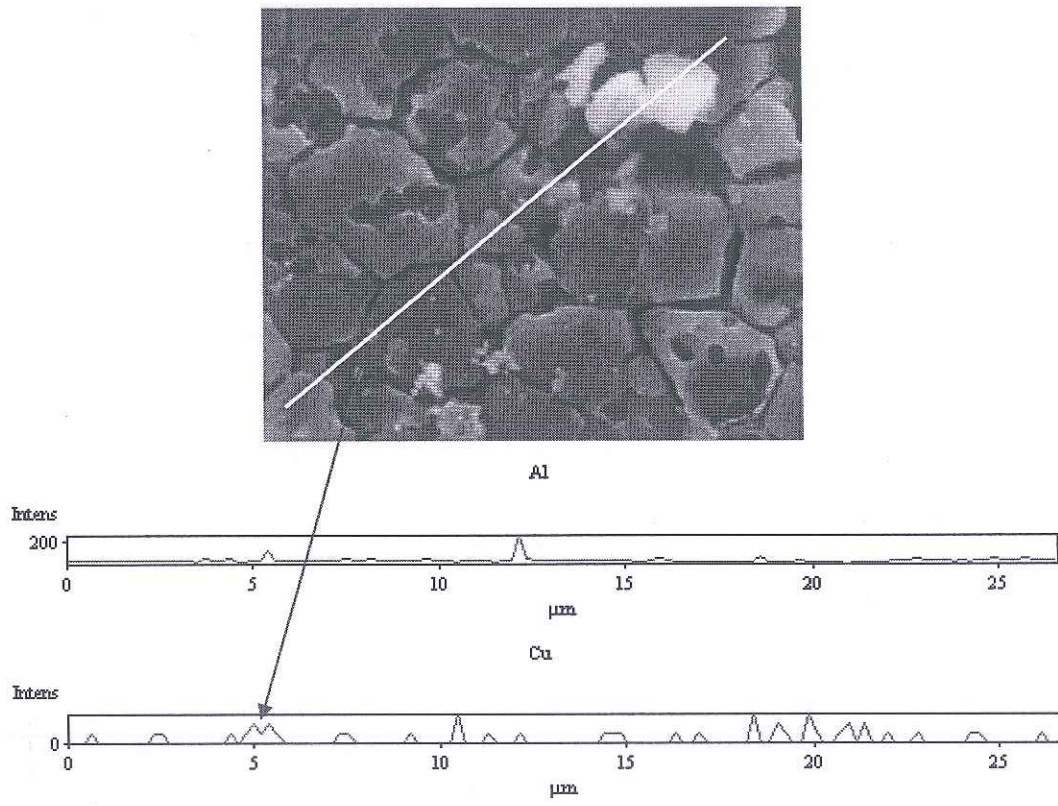
(c)

Şekil 7.65: 1330/30/1,5 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, c) 1 nolu bölgenin çizgisel analizi



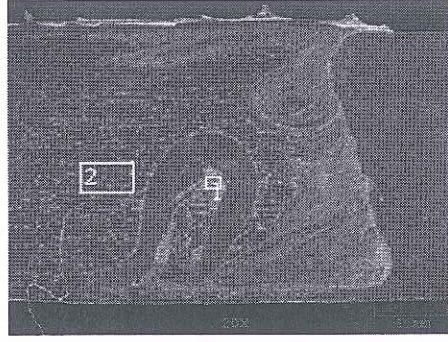
(a)

(b)

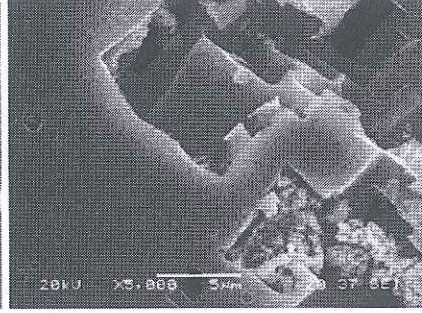
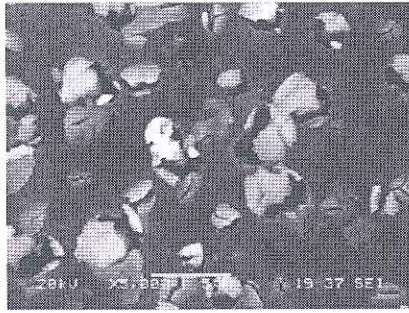


(c)

Şekil 7.66: 1330/30/2 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme halini, c) 1 nolu bölgenin çizgisel analizi

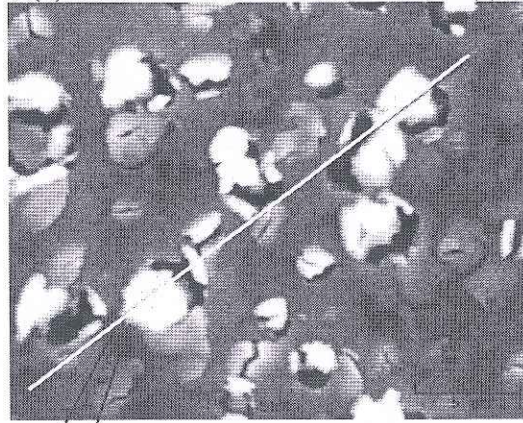


(a)

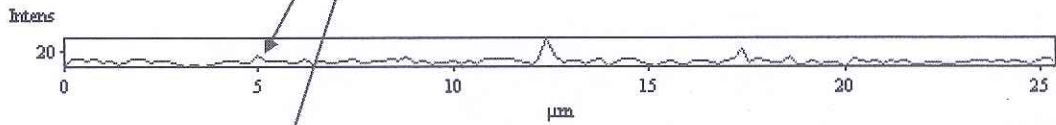


(b)

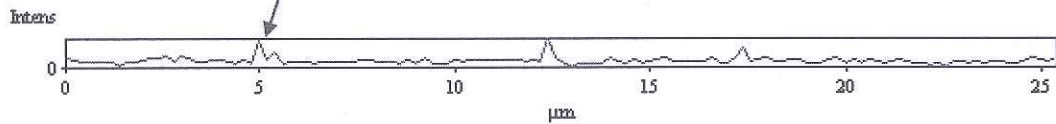
(c)



Al

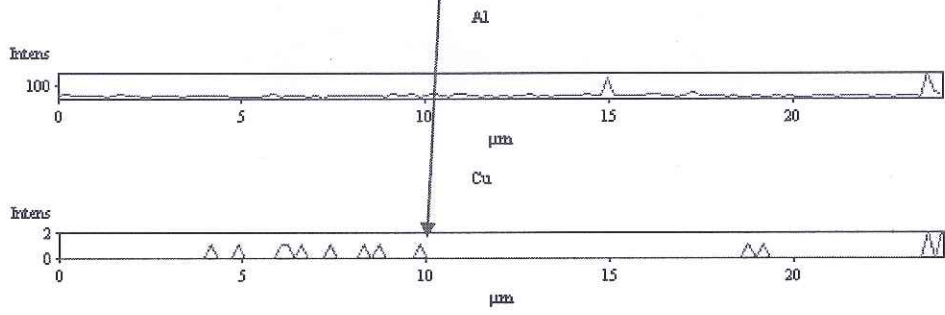
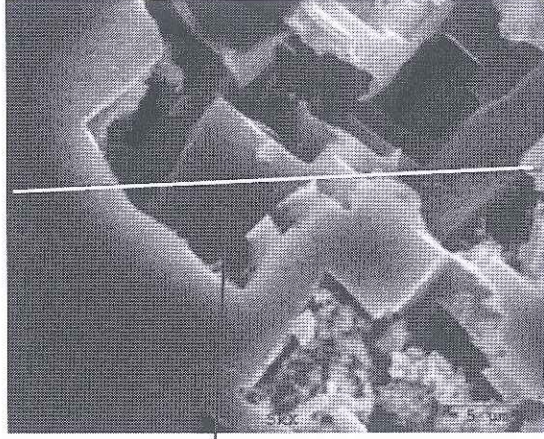


Cu



(d)

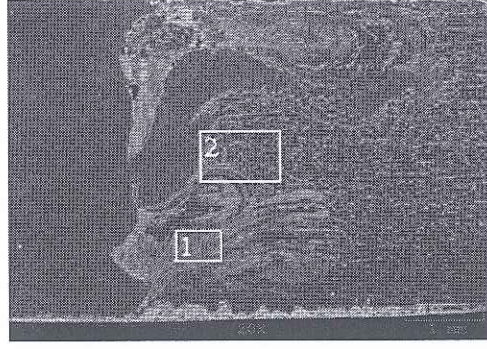
Şekil 7.67: 1330/50/1 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X20), b) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, c) 2 bölgesinin 5000 büyütme hali, d) 1 nolu bölgenin çizgisel analizi



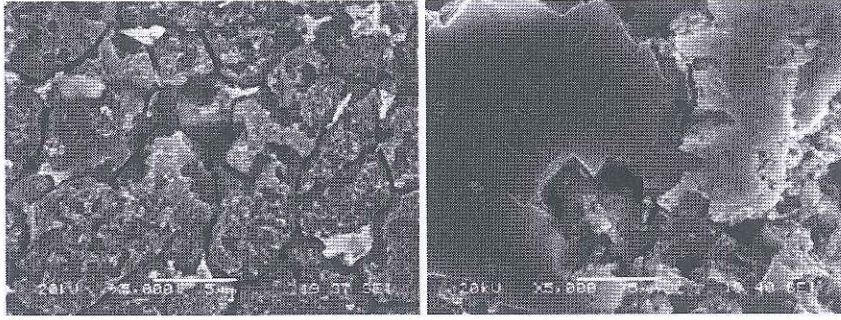
Şekil 7.68: Şekil 7.67 a) 'daki 2 nolu bölgenin çizgisel analizi

Şekil 7.61 (a) incelendiğinde 1330/20/1 kaynak kesitinin SEM görüntüsünde karışımın net olarak oluşması, bakır ile alüminyum kısmının birbiri içine girmesi mekanik değerleri yapıdaki boşluklara rağmen (çekme mukavemeti 99,58 MPa) oldukça yükseltmiştir. Şekil 7.65 (a) incelendiğinde 1330/30/1,5 numunesinde karışımın gerçekleşmemesi çekme mukavemetlerini (49,13 MPa) düşürmüştür. Şekil 7.66 (a) incelendiğinde 1330/30/2 numunesinde karışımın gerçekleşmesi çekme mukavemetini (54,84 MPa) biraz yükseltmiştir. Şekil 7.67 (a) kaynak kesitinin SEM görüntüsü incelendiğinde 1330/50/1 karışımın gerçekleşmesi mekanik değerleri (çekme mukavemeti 78,13 MPa) arttırmıştır.

1330 dev/dak takım dönme hızında yapılan birleştirmelerin çekme dayanımlarının diğer (630-2440 dev/dak) takım dönme hızlarında elde edilen dayanımlardan yüksek çıkması, elde edilen ısı girdisinin uygun olmasına ve Al-Cu arasındaki yeterli reaksiyonu sağlamasına dayandırılmıştır. 1330/20/1 ve 1330/50/1 numunlerinde kaynak ekseninde ölçülen sıcaklıkların ortalaması (sırasıyla 363-412 °C) diğer numunelerden (1330/30/1.5-1330/30/2) ölçülen sıcaklıklardan (356-361 °C) yüksek olup Al-Cu arasında yeterli karışımı meydana getirmiş ve mekanik değerler yükselmiştir. 1330 dev/dak takım dönme hızında Al-Cu birleştirilmesinde ideal sıcaklıkların meydana geldiği ve ince, üniform intermetalik fazların oluştuğu düşünülmektedir. Başarılı bir Al-Cu birleştirmesinde Al-Cu arasında ince, üniform intermetalik fazların meydana gelmesi gerektiği yapılan diğer çalışmalarda ortaya konulmuştur [30,35].

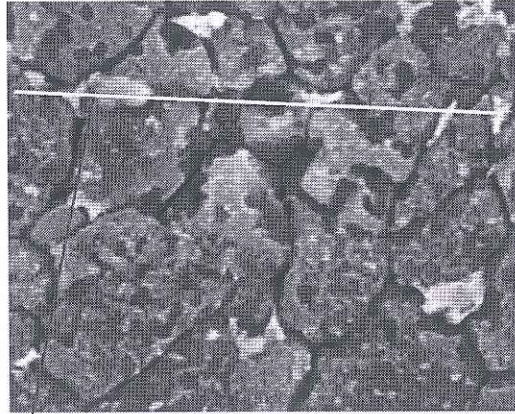


(a)

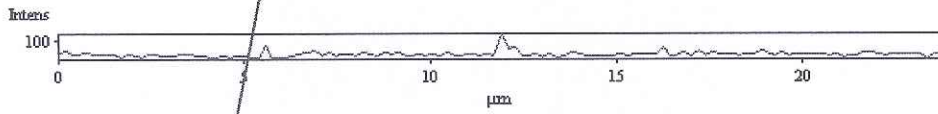


(b)

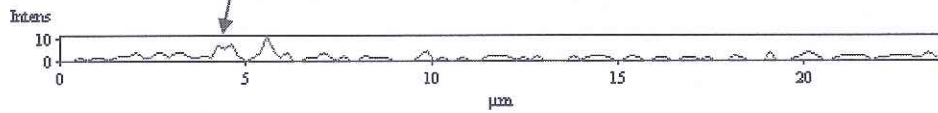
(c)



Al



Cu

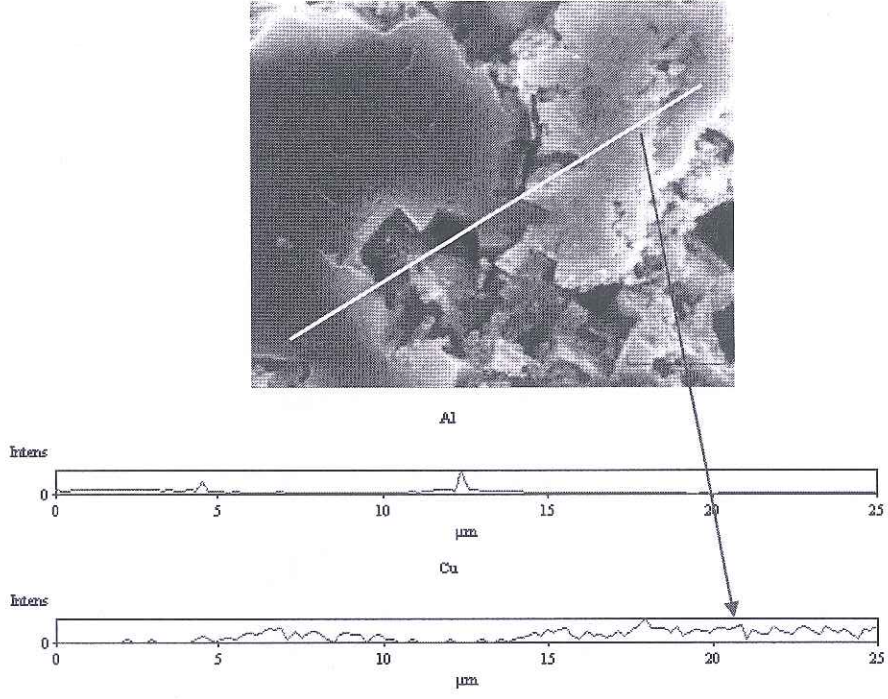


(d)

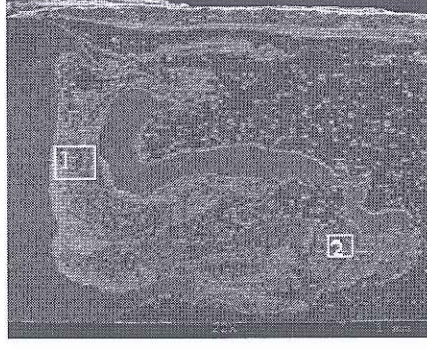
Şekil 7.69: 2440/20/1,5 numunesinin SEM görünümleri, a) Karışım bölgesi (X20) b)

1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d) 1

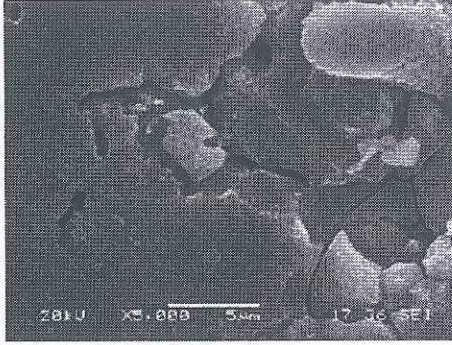
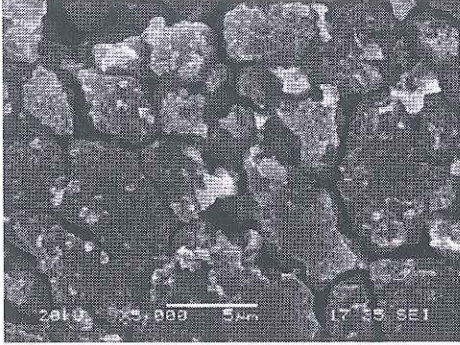
nolu bölgenin çizgisel analizi



Şekil 7.70: Şekil 7.69 a)'daki 2 nolu bölgenin çizgisel analizi

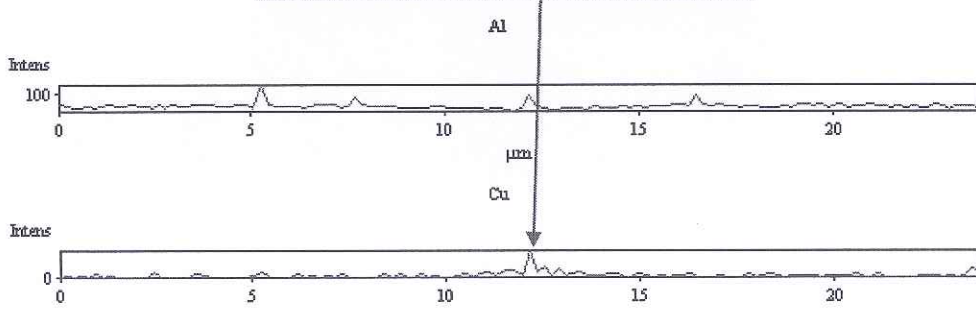
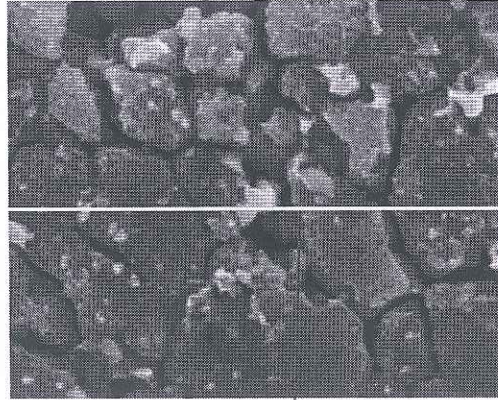


(a)



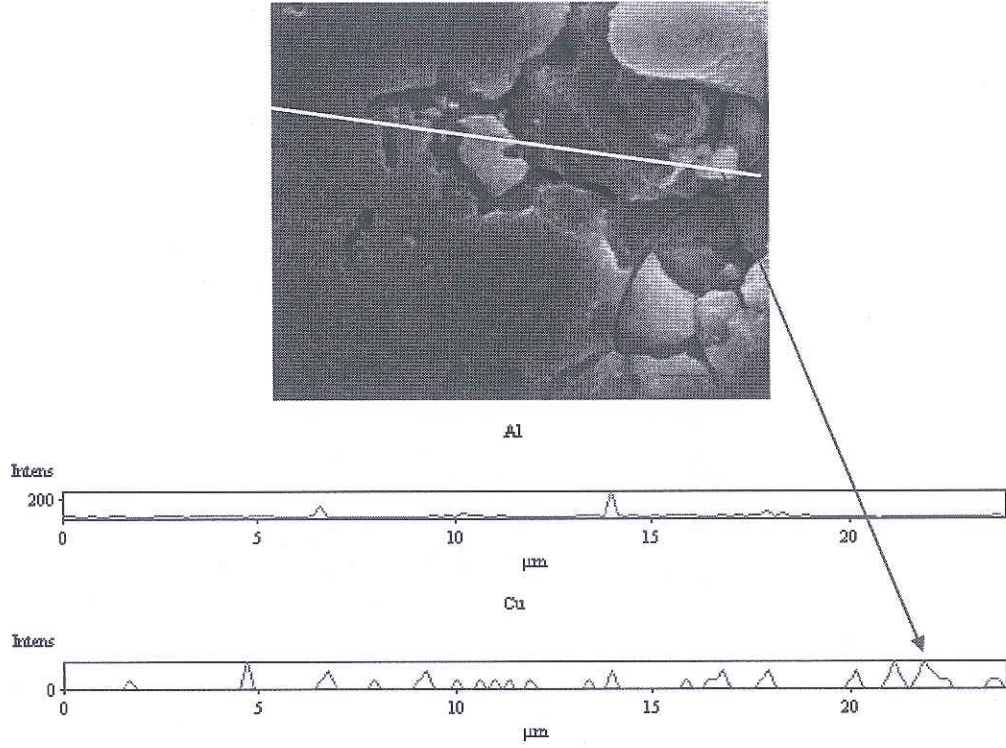
(b)

(c)

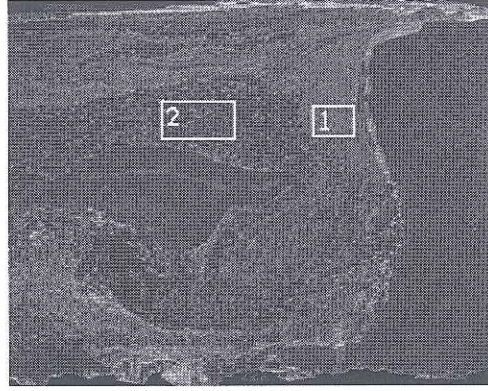


(d)

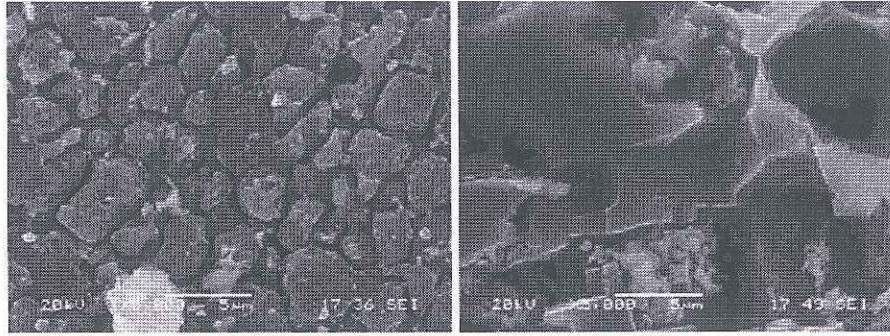
Şekil 7.71: 2440/30/1 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X22) b) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d) 1 nolu bölgenin çizgisel analizi



Şekil 7.72: Şekil 7.71 a)'daki 2 nolu bölgenin çizgisel analizi

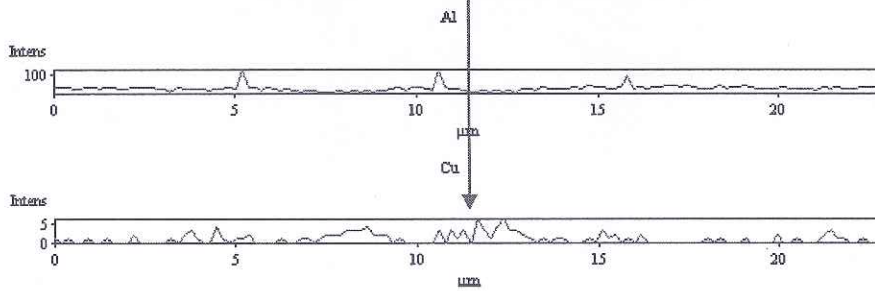
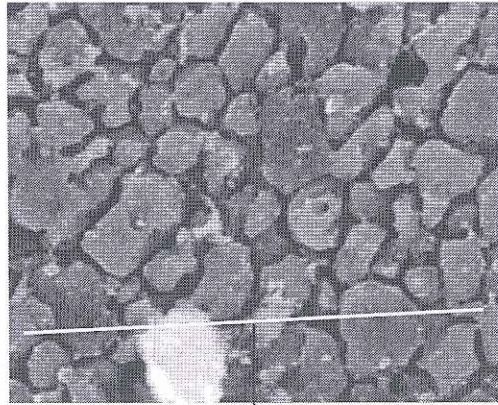


(a)



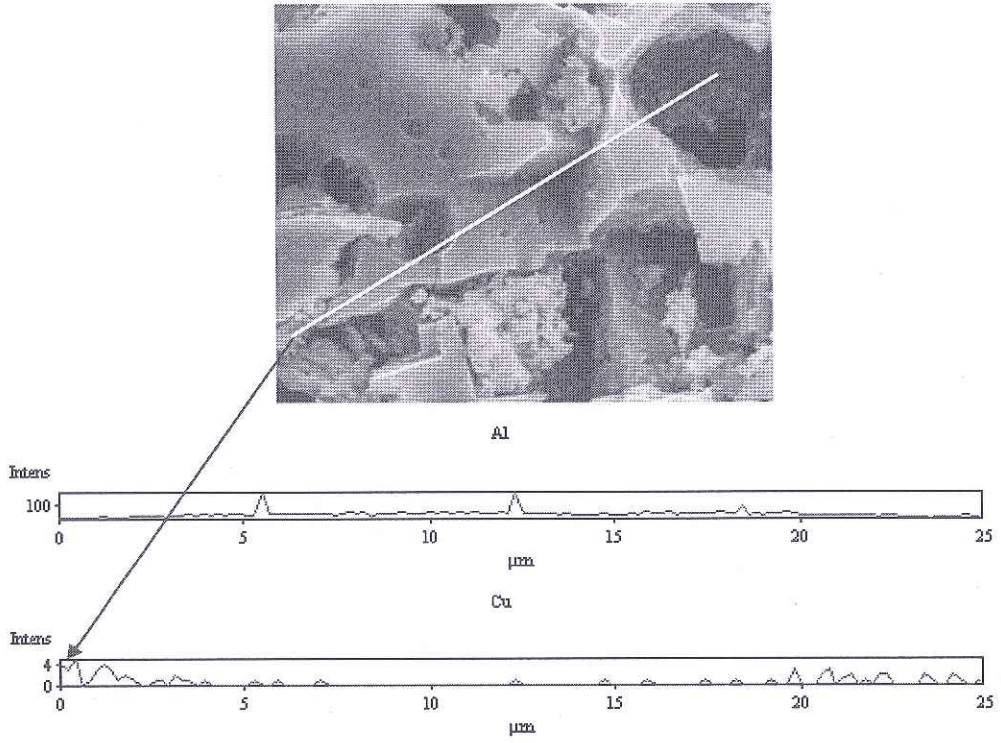
(b)

(c)

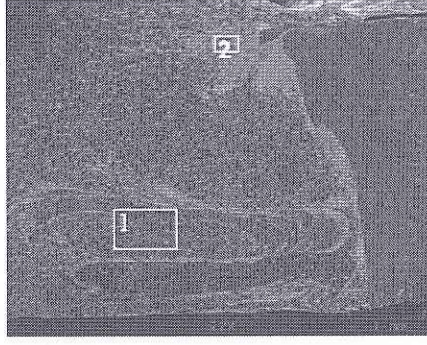


(d)

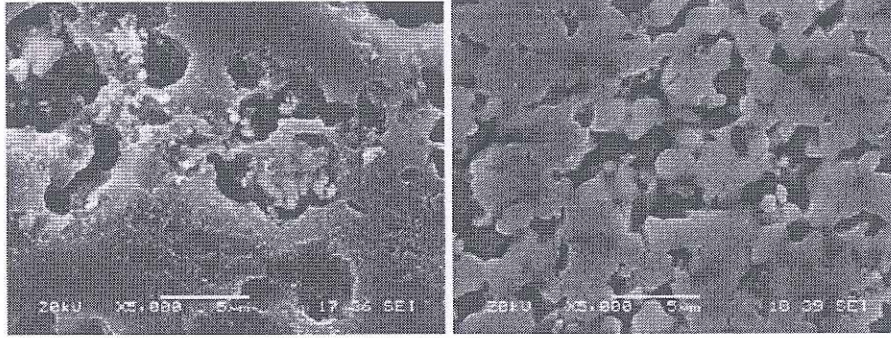
Şekil 7.73: 2440/50/1 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X22) b) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d) 1 nolu bölgenin çizgisel analizi



Şekil 7.74: Şekil 7.73 a)'daki 2 nolu bölgenin çizgisel analizi

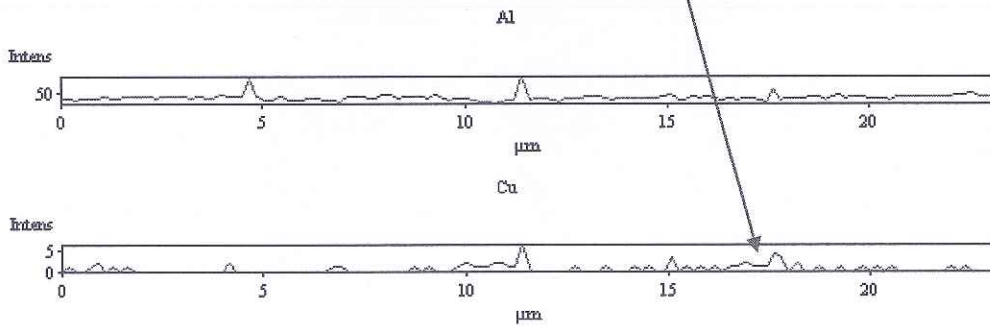
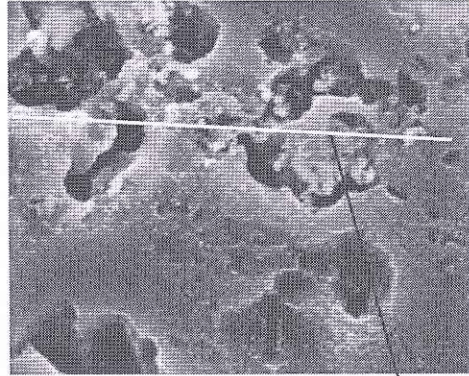


(a)



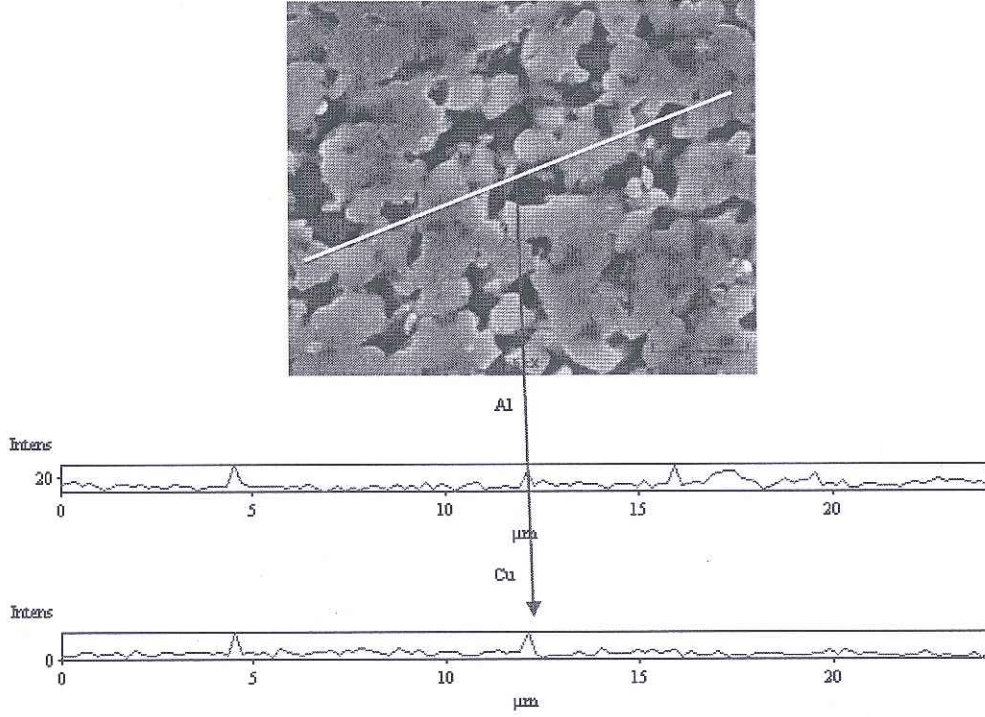
(b)

(c)



(d)

Şekil 7.75: 2440/50/2 numunesinin SEM görüntüleri, a) Karışım bölgesi (X22) b) 1 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, c) 2 nolu bölgenin 5000 büyütme hali, d) 1 nolu bölgenin çizgisel analizi



Şekil 7.76: Şekil 7.75 a)'daki 2 nolu bölgenin çizgisel analizi

Şekil 7.69'de 2440/20/1,5 numunesinin optik mikroyapı incelemesi de dikkate alındığında bakırca zengin parçacıklarının olmayışı nedeniyle çekme mukavemeti (46,93 MPa) istenen seviyede çıkmamıştır. Şekil 7.69 (a) kaynak kesiti incelendiğinde sadece iri bakır parçanın Al malzeme içine taşındığı görülmektedir. Şekil 7.71 (a) incelendiğinde 2440/30/1 numunesinde karışım bölgesinin tam oluşması mekanik değerleri (çekme mukavemeti 92,91 MPa) oldukça yükseltmiştir. Şekil 7.73 (a) incelendiğinde 2440/50/1 karışım bölgesinin varlığı sayesinde mekanik değerler (çekme mukavemeti 77,24 MPa) iyi seviyededir. Şekil 7.75 (a) incelendiğinde 2440/50/2 numunesinde kaynak kesitinde bakır parçacıkların alüminyum matriste olmayışı nedeniyle mekanik değerler (çekme mukavemeti 39,31 MPa) azalmıştır. Aynı durum optik mikroskop görüntülerinde de ortaya çıkmıştır.

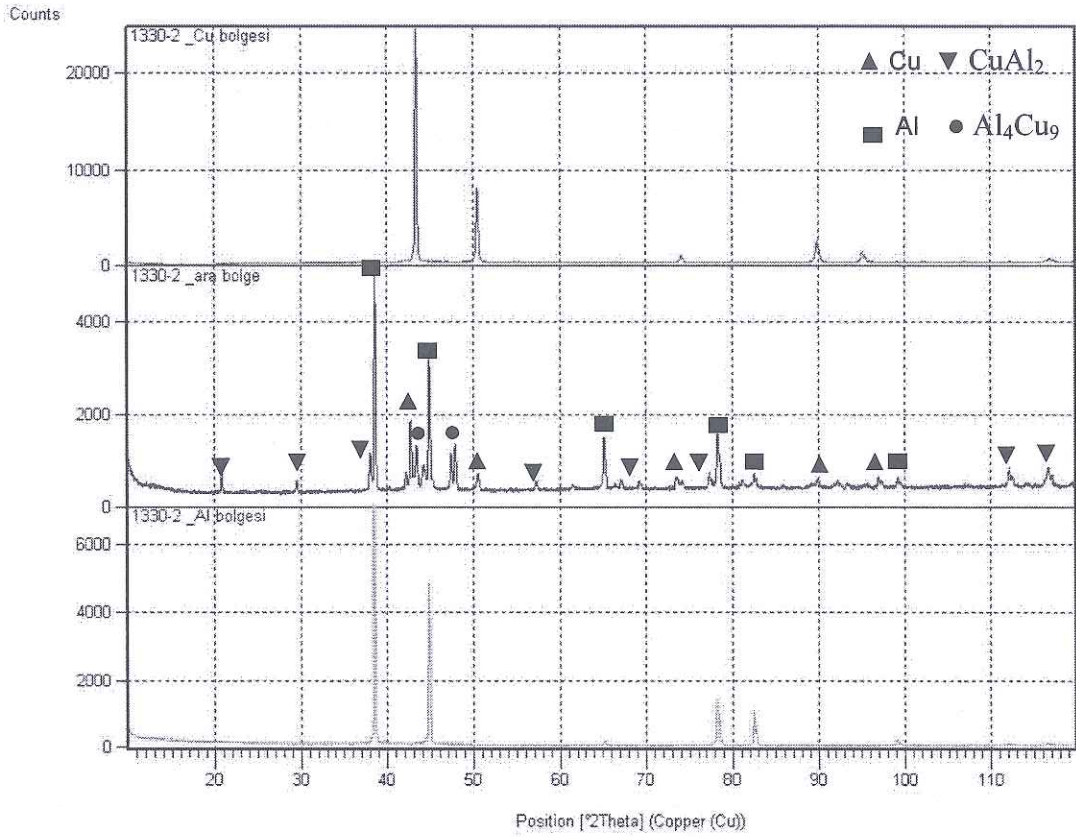
2440 dev/dak takım dönme hızında elde edilen mekanik değerler, 1330 dev/dak takım dönme hızında elde edilen mekanik değerlerden çok az düşük olup bunun da oluşan ısı girdisinin artması ve Al-Cu kaynak bölgesinde meydana gelen intermetalik bileşenlerin daha fazla oluşmasının bir miktar kırılma dayanımı artırarak

dayanımın düşmesine neden olduğu düşünülmektedir. İntermetalik bileşenler sert ve kırılğan özellikte olması Al-Cu arasında birleşmeyi zayıflatmaktadır. Bu durum literatürde yapılan çalışmalarla uyum göstermiştir [30,35,76]. 2440/30/1 ve 2440/50/1 numunlerinde kaynak ekseninde ölçülen sıcaklıkların ortalaması (sırasıyla 356-405 °C) diğer numunelerden (2440/20/1.5-2440/50/2) ölçülen sıcaklıklardan (438-456 °C) düşük olup Al-Cu arasında yeterli reaksiyonu meydana getirmiş ve dayanım değerleri yükselmiştir.

Kaynaklı parçalarda çizgisel ve noktasal yapılan EDX analizleri mikroyapı ve mekanik özellikler ile uyum göstermiş ve sonuçları doğrulamıştır.

7.9. X-Işını Difraksiyon Sonuçları

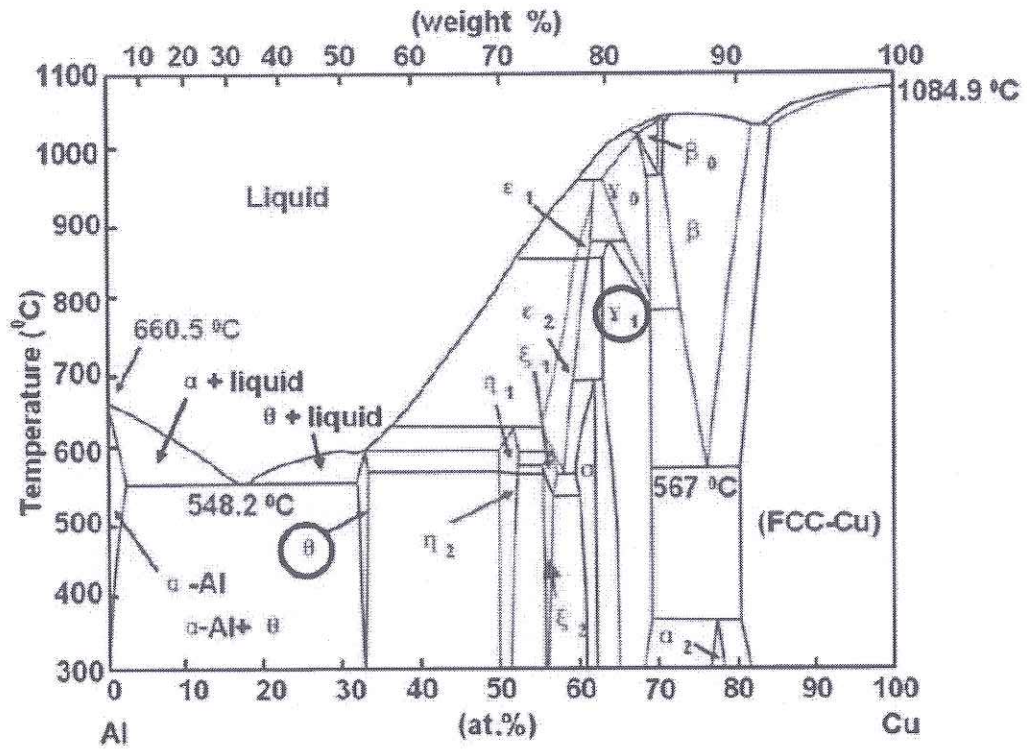
Birleştirmelerin kaynak bölgesinde oluşabilecek fazları, metaller arası bileşikleri tespit etmek amacı ile X-Işınları difraktometresi (XRD) kullanılmıştır. 1330/20/1 numunesinin üç farklı bölgesinden PANalytical X'Pert Pro MPD model XRD cihazı ile Cu X-Işını tüpü ($\lambda=1.5405$ Angstrom) kullanılarak noktasal faz analizi yapılmış ve sonuçlar Şekil 7.77'de verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde ara bölgede CuAl_2 (θ) ve Al_4Cu_9 (γ) intermetalik fazlar tespit edilmiştir[79]. Şekil 7.78'de alüminyum ve bakır arasında oluşan fazlar faz diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 7.77: 1330/20/1 numunesinin XRD analiz sonucu [79]

Alüminyum ve bakırın Şekil 7.78’de verilen faz diyagramını incelendiğinde ötektik sıcaklığın 548°C olduğu görülmektedir. Alüminyum ve bakır arasında sıcaklık artışıyla beraber Al_4Cu_9 , Al_2Cu , CuAl , Al_2Cu_3 , AlCu_4 gibi intermetalik fazlar oluşmaktadır [3,29,32,34,35]. 150°C ’de Al_2Cu , 350°C ’de ilave bir tabaka olan Al_4Cu_9 oluşur. 400°C ’de Al-Cu’nun ara tabakası Al_4Cu_9 ile Al_2Cu arasında bir yapıdır. Bu ara katman çok yüksek sertliğe sahiptir. $10\ \mu\text{m}$ kalınlığa eriştiği zaman bağlantının mukavemeti keskin bir şekilde azalır [76]. Sert, gevrek ve kırılğan özellikte olan intermetalik fazlar dayanım değerlerini düşürmektedir.

Kaynak bölgesinde sertlik artışı olmasına rağmen çekme dayanım değerlerinin artması (özellikle $1330\ \text{dev/dak}$ takım dönme hızında), oluşan intermetalik fazların gevreklik oluşturacak kalınlığa ulaşmadığını göstermektedir.



Şekil 7.78: Al-Cu faz diyagramı [77]

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Al-Cu malzeme çiftinin kaynaklanmasında takımın “0” konumunda kaynak kesitinde boşluklar oluştuğundan düşük çekme dayanımları (28,34-33,98-37,64-46,20 MPa) elde edilmiştir. Alüminyum ve bakırın SKK ile yapılmış olan az sayıdaki çalışmalar ile karşılaştırılıp değerlendirildiğinde; örneğin Cu-AA1050 SKK “0” konumlu alın birleştirmesinde düşük kaynak hızında (12 mm/dak) makro boyutta boşluk ve çatlaklar görülmez iken yüksek kaynak hızında (30-50 mm/dak) kaynak merkezi boyunca çatlaklar ve ayrılmalar meydana geldiği ve düşük dayanımların elde edildiği belirtilmiştir [3]. Diğer bir çalışmada, takım konumu “0” olduğunda kaynak yüzeyinde birçok çatlak görüldüğü, 50 MPa altında çekme dayanımları elde edildiği ifade edilmiştir [30].

Yapılan ön deneylerde karıştırıcı ucun bakıra nazaran daha yumuşak olan alüminyum tarafına konumlandırılmasıyla dayanımlar artmıştır. Karıştırıcı ucun Al tarafına belirlenen değerlerde (1-1,5-2 mm) kaydırılması ile 630-1330-2440 dev/dak takım dönme hızı ve 20-30-50 mm/dak takım ilerleme hızlarında SKK başarıyla gerçekleştirilmiştir. Kaynak yüzeyleri ve kök görüntüleri makro düzeyde incelendiğinde genelde kaynakta boşluk, çukur, birleşme yetersizliği gibi kaynak hatalarına rastlanılmamıştır. Kaynak kesitleri mikro düzeyde incelendiğinde çekme dayanımları düşük numunelerde boşlukların olduğu ortaya çıkmıştır. Diğer çalışmalar ile değerlendirildiğinde; örneğin Cu-AA1060 SKK ile yapılan çalışmada çekme dayanımı (en yüksek çekme dayanımı 110 MPa) mukayese edildiğinde yakın değerler (99,58 MPa) elde edilmiştir [30]. Kaynak performansı değerlendirildiğinde, Cu-AA1050 SKK yapılmış alın birleştirmesine göre (AA1050 ana metaline göre %24 düşük) yüksek kaynak performansı (AA1050 ana metaline göre %10,45 düşük) elde edilmiştir [3]. Cu T2/AA5A06 SKK yapılan çalışmada elde edilen % 93,33 kaynak performansına yakın değer (%89,55) elde edilmiştir [33]. AA1060/Cu ile yapılan çalışmada elde edilen kaynak performansına (%91,66) yakın değer (%89,55)

elde edilmiştir [35]. Cu/ AA5A02 SKK yapılan diğer bir çalışmada elde edilen kaynak performansından (%75,6) yüksek değer elde edilmiştir [77].

Kaynak bölgelerindeki sıcaklık değişimlerini tespit edebilmek için kaynak ekseninden 15 mm uzaklığa kaynak dikişi boyunca yerleştirilen 8 çıkışlı termokupl kullanılmıştır. Bütün birleştirmelerin sıcaklıkları grafik olarak alınmıştır. 630, 1330 ve 2440 dev/dak takım dönme hızlarında dönme hızı arttıkça sürtünme sonucu meydana gelen ısı artışı nedeniyle Al ve Cu tarafındaki maksimum sıcaklıkların ortalamasının 1-1,5-2 mm takım konumu da dikkate alındığında arttığı ortaya çıkmıştır. Bakır ve alüminyum levhalarda, kaynak merkezinde karıştırıcı ucun önünden infrared pirometre ile sıcaklıklar ölçülmüştür. Sıcaklık değişimleri incelendiğinde, kaynak başlangıcından kaynak sonuna doğru artışlar göstermiştir. Ölçülen maksimum sıcaklık kaynak sonunda 461 °C olarak tespit edilmiştir. AA6061-T6/Cu SKK yapılan çalışmada kaynak ekseninden ölçülen maksimum sıcaklığa göre (580 °C) daha düşüktür [32].

Birleştirme işlemlerinden sonra mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla çekme, eğme, sertlik ölçümü testleri yapılmıştır. Her parametre için 3 adet test yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Düşük dayanımlı numunelerin parametreleri incelendiğinde düşük takım dönme hızından dolayı ısı girdilerinin düşük olduğu bu nedenle kaynaklanma için yeterli sıcaklık sağlanmadığı değerlendirilmiştir. AA1060/Cu SKK yapılan bir çalışmada; düşük takım dönme hızında düşük ısı girdisi nedeniyle alüminyum ve bakır arasındaki yetersiz karışım sonucu düşük çekme dayanımı elde edildiği ortaya konulmuştur [30].

Çekme deneyi sonucunda numunelerin kopma yüzeyleri incelendiğinde genellikle karışım bölgesinde ve alüminyumun ısı tesiri altındaki bölgesinde gerçekleşirken gevrek kırılma gerçekleşmiştir. Yapılan diğer çalışmalarda da kopmaların karışım bölgesinde ve alüminyumun ısı tesiri altındaki bölgesinde olduğu ifade edilmiştir [3,35,77].

630-1330-2440 dev/dak takım dönme hızları karşılaştırıldığında, yüksek dayanımların 1330 dev/dak takım dönme hızında meydana geldiği tespit edilmiştir. 1330 dev/dak takım dönme hızında Al-Cu birleştirilmesinde ideal sıcaklıkların

meydana gelmesinden dolayı iyi bir karışım bölgesinin ve ince, üniform intermetalik fazların oluştuğu düşünülmektedir. Yapılan diğer bir çalışmada takım dönme hızının artması ile yeterli ısı girdisi sonucu Al-Cu arasında bağlanmanın sağlandığı ve yüksek dayanımların elde edildiği ifade edilmiştir [30].

Yüksek dayanımlı bir Al-Cu birleştirmesinde Al-Cu arasında ince, üniform intermetalik fazların meydana gelmesi gerektiği değerlendirilmiştir. Bu durum diğer çalışmalarda da ortaya konulmuştur. Al-Cu SKK yapılan birleştirmelerde intermetalik fazların ince ve üniform dağılımında olması gerektiği buna karşın kalın intermetalik fazların mekanik dayanımları düşürdüğü ifade edilmiştir [30,35].

Mikrosertlik incelemelerinde kaynak bölgesinde görülen sertlik artışları, bakırca zengin yapılara ve metaller arası oluşan intermetalik fazlara bağlanırken, kaynak bölgesindeki sertliklerdeki dalgalanmalar ise mikroyapının kaynak bölgesinde alüminyum ve bakırın kompozit bir yapı oluşturmasına bağlanmıştır. Cu/AA SKK yapılmış diğer çalışmalarda da kaynak bölgesinde sertlik artışlarının, intermetalik fazlardan ve oluşan yapılardan kaynaklandığı bildirilmiştir [3,31,35,77]. Malzemelerin karışımlarının tam olarak gerçekleştiği kaynak parametrelerinde kaynak bölgesinin daha geniş olduğu görülmüştür. Çekme dayanımları yüksek numunelerde yine kaynak bölgesinin geniş olduğu birleştirmelerdir.

Kaynak bölgelerinin mikroyapı incelemesinde kaynak merkezi, alüminyum tarafındaki ve bakır tarafındaki ITAB ayrıntılı olarak incelenmiştir. Karışım merkezi alüminyum tarafında oluşmuştur. 630 dev/dak takım dönme hızında yapılan birleştirmelerin çekme dayanımlarının diğer (1330-2440 dev/dak) takım dönme hızlarında elde edilen çekme dayanımlarından düşük çıkması elde edilen ısı girdisinin az olması ve Al-Cu arasındaki karışımı tam sağlayamaması olarak değerlendirilmiştir. 630-1330dev/dak takım dönme hızlarında elde edilen birleştirmeler karşılaştırıldığında yüksek dayanımların 1330 dev/dak takım dönme hızında meydana geldiği tespit edilmiştir. 1330 dev/dak takım dönme hızında Al-Cu birleştirilmesinde ideal sıcaklıkların oluştuğu bununda Al ana malzeme ile karıştırıcı ucun dönme hareketi ile Cu malzemeden taşıdığı bakır parçacıkların karışımın kolaylaştığı ve Al-Cu ara yüzeyinde iyi bir bağlanma meydana geldiği değerlendirilmiştir. 2440 dev/dak takım dönme hızında elde edilen mekanik değerler

1330 dev/dak takım dönme hızında elde edilen mekanik değerlerden çok az düşük olup bunun da oluşan ısı girdisinin artması ve Al-Cu kaynak bölgesinde meydana gelen intermetalik fazların kırılma kuvveti düşürülecek değere ulaşmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Kalın intermetalik fazın mekanik dayanımları düşürdüğü diğer çalışmalarda ortaya konulmuştur [30,35,76].

Kaynaklı parçalarda SEM incelemeleri, çizgisel ve noktasal yapılan EDX analizlerinde çekme dayanımı yüksek olan numunelerde kaynak bölgesinin tam olarak oluştuğu ve bakır içeriğinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Yapılan incelemeler, mikroyapı ve mekanik özellikler ile uyum göstermiş ve sonuçları doğrulamıştır.

Birleştirmelerin kaynak bölgesinde oluşabilecek fazları, metaller arası bileşikler tespit etmek amacıyla X-Işınlı difraktometresi (XRD) ile yapılan faz analizinde, kaynak bölgesinde CuAl_2 ve Al_4Cu_9 intermetalik fazlar tespit edilmiştir. Alüminyum ve bakır arasında, Al_4Cu_9 , Al_2Cu , CuAl , Al_2Cu_3 , AlCu_4 gibi intermetalik fazlar oluştuğu diğer çalışmalarda ortaya konulmuştur [3,29,30,31,32,34,35,77]. Başarılı bir Al-Cu birleştirmesinde Al-Cu arasında ince, üniform intermetalik fazların meydana gelmesi gerektiği değerlendirilmiştir.

9. GENEL SONUÇLAR

Sonuçlar

1. Saf bakır ve 1050 Alüminyum malzemelerin SKK yöntemi ile birleştirilebilirliği incelenmiş, silindirik pimli takımla farklı parametrelerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

2. "0" konumlu yapılan birleştirmelerde kaynak kesitinde boşluklar oluşmuştur. Alüminyum tarafına karıştırıcı ucun 1-1,5-2 mm konumlandırılarak yapılan birleştirmelerde kaynak yüzeyleri makro düzeyde incelendiğinde boşluk, çukur, birleşme yetersizliği gibi kaynak hataları tespit edilmemiştir.

3. Kaynak kesit yüzeyleri incelendiğinde makro düzeyde kaynak hatalarına rastlanılmamıştır. Mikro düzeyde çekme dayanımları düşük numunelerde boşluklar görülmüştür.

4. Birleşme yüzeylerinden 15 mm uzaklıkta alüminyum ve bakır tarafından sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Kaynak merkezinde karıştırıcı ucun önünden sıcaklık tespitleri yapılmıştır. Genel olarak sıcaklıklar 300-461 °C arasında değişmektedir. Ölçülen maksimum sıcaklık (2440/50/2 numunesinde) yüksek devir, ilerleme ve takım kaydırmada 461 °C olarak tespit edilmiştir.

5. Birleştirmelerin mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla çekme, eğme testleri ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Birleştirmelerin kaynak performansları (SKK'lı levhanın çekme mukavemeti/ Al ana metalin çekme mukavemeti x 100) incelendiğinde en yüksek değer % 89,55 olarak 1330 dev/dak takım dönme hızında 20 mm/dak takım ilerleme hızında ve 1 mm takım konumlandırılmasında elde edilmiştir. En düşük değer ise 630 dev/dak takım dönme hızında 50 mm/dak takım ilerleme hızında ve 1 mm takım konumlandırılmasında % 24,81 olarak elde edilmiştir. Çekme deneyi sonucunda kopmalar genellikle karışım bölgesinde ve

alüminyumun ısı tesiri altındaki bölgesinde gerçekleşirken kırılma mekanizması gevrek tarzda gerçekleşmiştir.

6. Çekme testinden sonra kırılan yüzeylerinin SEM görüntüleri çekilmiştir. Mekanik özellikleri yüksek olan numunelerin kopma bölgelerinin çukur yapıda, düşük mekanik özelliklere sahip numunelerin kopma yüzeyleri daha düz bir yapıda olduğu tespit edilmiştir.

7. Eğme deneyleri sonucunda, yüksek dayanımlı numunede kırılmanın olmadığı, düşük dayanımlı numunede ise kopmanın karışım bölgesinde gerçekleştiği ortaya çıkmıştır.

8. Kaynak bölgesindeki sertlik artışlarının kaynak merkezindeki bakır parçacıklarından ve intermetalik fazlardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Karıştırmanın etkisi ile ilerleme bölgesindeki bakırdan kopan parçacıklar yığıma kenarında alüminyum matris içine taşınmıştır. Kaynak bölgesi de alüminyum tarafında olduğundan alüminyum matris içindeki bakır parçacıklar sertlik artışlarını sağlamıştır. İri bakır parçacıkların taşınması bu bölgede sertliği daha da arttırmıştır. Çekme dayanımları yüksek numunelerde kaynak bölgesinin geniş olduğu tespit edilmiştir.

9. Mikroyapı incelemelerinde karışım merkezinin alüminyum tarafında olduğu tespit edilmiştir. Bunda karıştırıcı ucun pim kısmının alüminyum tarafına belirli değerlerde (1-1,5-2 mm) kaydırılmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Belirli bir birleşme bölgesinin olduğu numunelerin mekanik değerlerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.

10. Birleştirmelerin kesit ve kırılma yüzeylerinde yapılan EDX çizgisel ve noktasal analizlerinde alüminyumca zengin, bakırca zengin yapıların varlığı tespit edilmiştir. Çekme dayanımı düşük olan numunelerde kaynak bölgesinde bakır içeriğinin, çekme dayanımı yüksek olan numunelere göre daha az olduğu ortaya çıkmıştır.

11. X-Işınları difraktometresi (XRD) ile yapılan faz analizlerinde CuAl_2 ve Al_4Cu_9 gibi intermetalik fazlar tespit edilmiştir. Mekanik değerleri düşük olan numunelerde, intermetalik fazların kırılma ve dayanım düşürücü kalınlığa ulaştığı düşünülmüştür.

Öneriler

Çalışmalarda pimli, silindirik takım kullanılmıştır. Değişik geometrilere sahip takımlar kullanılarak birleştirmelerin özelliklerine etkisi incelenebilir. Karıştırıcı ucun aşınması üzerine çalışmalar yapılabilir. Eksenel yüklerin birleştirmeler üzerindeki etkisi incelenebilir. Farklı takım eğim açılarında çalışmalar yapılabilir. Karışım bölgesindeki bakır parçacık boyutunun optimize edilmesi ile ilgili çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Sayer, S., "AA 6063 (AlMgSi0.5) tipi Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin, Bağlantının Dayanımı ve Mikroyapı Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması", Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2007).

[2] Sarsılmaz, F., "Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş AA7075/AA6061 Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2008).

[3] Barlas, Z. ve Uzun, H., "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, (2010).

[4] Scialpi, A., De Filippis, L.A.C. and Cavaliere, P., "Influence of Shoulder Geometry on Microstructure And Mechanical Properties of Friction Stir Welded 6082 Aluminium Alloy", *Materials and Design*, 28, 1124-1129, (2007).

[5] Elangovan, K. and Balasubramanian, V., "Influences of Tool Pin Profile and Tool Shoulder Diameter on the Formation of Friction Stir Processing Zone in AA6061 Aluminium Alloy" *Materials and Design*, 29, 362-373, (2008).

[6] Cavaliere, P., Campanile, G., Panella, F. and Squillace, A., "Effect of Welding Parameters on Mechanical and Microstructural Properties of AA6056 Joints Produced by Friction Stir Welding", *Journal of Materials Processing Technology*, 180, 263-270, (2006).

[7] Balasubramanian, V., "Relationship Between Base Metal Properties and Friction Stir Welding Process Parameters", *Materials Science and Engineering A*, 480, 397-403, (2008).

[8] Sarsılmaz, F., Özdemir, N. ve Özel, S., "Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen AA6061/AA7075 Çiftinde Karıştırıcı Uç Omuz Genişliğinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi", *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi*, Cilt 7, Sayı:1, (2008).

[9] Sarsılmaz, F. ve Özdemir, N., "AA1050/AA6061 Alüminyum Alaşım Çiftinin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Karıştırıcı Uç Profillerinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi", *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, (2008).

[10] Hasçalık, A., Çaydaş, U., Ünal, E. ve Karaca, F., “AA 5251 Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilebilirliğine Uç Geometrisinin Etkisi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (4), 1-7, (2007).

[11] Özdemir, N., Büyükarlan, S. ve Sarsılmaz, F., “Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş AA1030 Alüminyum Alaşımında Karıştırıcı Uç Profili ve İlerleme Hızının Arayüzey Mikroyapı Değişimi Üzerine Etkisi”, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 19 (3), 407-415, (2007).

[12] Cebeci, T. ve Şahin, S., “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen AA1050 ve AA5754-H111 Alüminyum Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *CBÜ Soma MYO Teknik Bilimler Dergisi*, Cilt:2, Sayı:14, (2010).

[13] Heidarzadeh, A., Khodaverdizadeh, H., Mahmoudi, A. and Nazari, E., “Tensile Behavior of Friction Stir Welded AA6061-T4 Aluminum Alloy Joints”, *Materials and Design*, 37 166–173, (2012).

[14] Şık, A. ve Kayabaş, Ö., “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Yapılan Alüminyumun Kaynağında Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi*, Y.11, S.12, s.30-43, (2003).

[15] Kurt, A., Boz, M. ve Özdemir, M., “Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Hızının Birleşebilirliğe Etkisi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 19, No 2, 191-197, (2004).

[16] Sarsılmaz, F. ve Özdemir, N., “Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş AA6061/AA7075 Kaynaklı Bağlantıların Yorulma Özelliklerinin Araştırılması”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Turkey, (16-18 May 2011).

[17] Toktaş, A. ve Toktaş, G., “Sürtünme Karıştırma Kaynak (SKK) Yöntemi için Takım Tasarımı ve Kaynak Uygulaması”, *2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, (11-12 Kasım 2010).

[18] Kwon, Y.J., Shim, S.B. and Park, D.H., “Friction Stir Welding of 5052 Aluminum Alloy Plates”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19, s23-s27, (2009).

[19] Çakır, M., Kurt, A. ve Ateş, H., “Toz Metal Al Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Devir Sayısının Kaynaklanabilirliğine Etkisi”, *Mühendis ve Makina*, Cilt:49, Sayı:580, (2008).

- [20] Sharma, C., Dwivedi, D.K. and Kumar, P., "Effect of Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joints of AA7039 Aluminum Alloy" *Materials and Design* ,36, 379–390, (2012).
- [21] Lee, W.B. and Jung, S.B., "The Joint Properties of Copper by Friction Stir Welding" *Materials Letters* 58, 1041– 1046, (2004).
- [22] Hwang, Y.M., Fan, P.L. and Lin, C.H., "Experimental Study on Friction Stir Welding of Copper Metals", *Journal of Materials Processing Technology* ,210, 1667–1672, (2010).
- [23] Sun, Y.F. and Fujii, H., "Investigation of the Welding Parameter Dependent Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Pure Copper", *Materials Science and Engineering A* ,527, 6879–6886, (2010).
- [24] Shen, J.J., Liu,H.J. and Cui, F., "Effect of Welding Speed on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Copper", *Materials and Design* ,31, 3937–3942, (2010).
- [25] Xie, G.M., Ma, Z.Y. and Geng, L., "Development of a Fine-Grained Microstructure and the Properties of a Nugget Zone in Friction Stir Welded Pure Copper", *Scripta Materialia* ,57, 73–76, (2007).
- [26] Surekha, K. and Els-Botes, A., "Development of High Strength, High Conductivity Copper by Friction Stir Processing", *Materials and Design*,32, 911–916, (2011).
- [27] Sakthivel, T. and Mukhopadhyay, J., "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Copper", *J Mater Sci* 42:8126–8129 DOI 10.1007/s10853-007-1666-y, (2007).
- [28] Xue, P., Xie, G.M., Xiao, B.L., Ma, Z.Y. and Geng, L., "Effect of Heat Input Conditions on Microstructure and Mechanical Properties of Friction-Stir-Welded Pure Copper", DOI: 10.1007/s11661-010-0254-y, *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International* ,(2010).
- [29] Saeid, T., Abdollah-zadeh, A. and Sazgari, B., "Weldability and Mechanical Properties of Dissimilar Aluminum–Copper Lap Joints Made by Friction Stir Welding" *Journal of Alloys and Compounds* ,490, 652–655, (2010).
- [30] Xue, P., Ni, D.R., Wang, D. B., Xiao, L. and Ma, Z.Y., "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, (2011).

[31] Abdollah-Zadeh, A., Saeid, T. and Sazgari, B., “Microstructural and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminum/Copper Lap Joints”, *Journal of Alloys and Compounds* ,460, 535–538, (2008).

[32] Ouyang, J., Yarrapareddy, E. and Kovacevic, R., “Microstructural Evolution in the Friction Stir Welded 6061 Aluminum Alloy (T6-temper condition) to Copper”, *Journal of Materials Processing Technology* ,172, 110–122, (2006).

[33] Liu, P., Shi, Q., Wang, W., Wang, X. and Zhang, Z., “Microstructure and XRD Analysis of FSW Joints for Copper T2/Aluminium 5A06 Dissimilar Materials”, *Materials Letters* ,62, 4106–4108, (2008).

[34] Genevois, C., Girard, M., Huneau, B., Sauvage, X. and Racineux, G., “Interfacial Reaction During Friction Stir Welding of Al and Cu”, DOI: 10.1007/s11661-011-0660-9 ,*The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International* , (2011).

[35] Xue, P., Xiao, B.L., Ni, D.R. and Ma, Z.Y., “Enhanced Mechanical Properties of Friction Stir Welded Dissimilar Al–Cu Joint by Intermetallic Compounds”, *Materials Science and Engineering A* ,527, 5723–5727, (2010).

[36] Uzun, H. ve Özbekmez, R., “Sürtünme Karıştırma ve Elektrik Ark Kaynak Teknikleri ile Birleştirilen CuZn30 Levhaların Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması” *SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi*, 12. Cilt, 1. Sayı, s. 9-16, (2008).

[37] Bilici, M.K. ve Yükler, A.İ., “Influence of Tool Geometry and Process Parameters on Macrostructure and Static Strength in Friction Stir Spot Welded Polyethylene Sheets” *Materials and Design* ,33, 145–152, (2012).

[38] Forcellese, A., Gabrielli, F. and Simoncini, M., “Mechanical Properties and Microstructure of Joints in AZ31 Thin Sheets Obtained by Friction Stir Welding Using “Pin” and “Pinless” Tool Configurations”, *Materials and Design* ,34, 219–229, (2012).

[39] Bilgin, M.B. and Meran, C., “The Effect of Tool Rotational and Traverse Speed on Friction Stir Weldability of AISI 430 Ferritic Stainless Steels” *Materials and Design* ,33, 376–383, (2012).

[40] Bozkurt, Y., Uzun, H. ve Salman, S., “Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen AA2124/SiCp/25 Kompozit Levhaların Mekanik Özelliklerine Takım Aşınmasının Etkisi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* ,Cilt 26, No 1, 139-149, (2011).

[41] Park, H.S., Kimura, T., Murakami, T., Nagano, Y., Nakata, K. and Ushio, M., "Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Welds of 60% Cu-40% Zn Copper Alloy", *Materials Science and Engineering A*, 371, 160-169, (2004).

[42] Xie, G. M., Ma, Z. Y. and Geng, L., "Effects of Friction Stir Welding Parameters on Microstructures", *Materials Transactions*, Vol. 49, No. 7, pp. 1698 to 1701, (2008).

[43] Esmaeili, A., Givi, M.K.B. and Rajani, H.R.Z., "A Metallurgical and Mechanical Study on Dissimilar Friction Stir Welding of Aluminum 1050 to Brass (CuZn30)" *Materials Science and Engineering A*, 528, 7093- 7102, (2011).

[44] Çam, G., Serindağ, H. T., Çakan, A., Mistikoglu, S. and Yavuz, H., "The Effect Of Weld Parameters on Friction Stir Welding of Brass Plates", DOI: 10.1002/mawe.200800314, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 39, No. 6, (2008).

[45] Oğuz, B., "Demirdışı Metaller Kaynağı", *Oerlikon*, İstanbul, (1990).

[46] Toktaş, A., "Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin AA 6063 Alüminyum Alaşımına Uygulanması ve Kaynak Parametrelerinin Malzeme İç Yapısı ile Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi", Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2006).

[47] Aydın, H., "Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş Yaşlandırılabilir Alüminyum Alaşımının Mekanik Özelliklerinin ve Korozyon Davranışlarının İncelenmesi", Doktora Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, (2008).

[48] Ağca, E., "Doğrusal Olmayan Takım Yoluyla Alüminyum Alaşımlı Sac Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi ve Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İrdelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2010).

[49] Eker, İ., "Değişik Kimyasal Kompozisyondaki Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynak (Friction Stir Welding) Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mersin, (2008).

[50] Odabaş, C., "Alüminyum ve Alaşımının Kaynağı", *Askaynak*, (2007).

[51] Tatlı, Z. ve Köse, C., "AA 5754 Alüminyum Alaşımının Robot (MIG) Kaynağı ile Birleştirilmesi ve Mikroyapısının İncelenmesi", *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Turkey, (16-18 May 2011).

[52] Doğan, S., “AA 5754 –H22 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında İşlem Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2006).

[53] Büyükarşan, S., “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş Alüminyum Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2006).

[54] Anık, S., “Kaynak Tekniğı El Kitabı”, *Gedik Holding*, İstanbul, (1991).

[55] Koçak, H., “Bakır Alaşımaları El Kitabı”, III.Baskı, *Sağlam Metal*, (2006).

[56] Barlas, Z., “Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Cu ile CuZn37 Levhaların Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2009).

[57] Akdoğan, A., “Bakır ve Bakır Alaşımaları”, *Ders Notları*, (2008).

[58] Cavcar, M., “Bakır ve Bakır Alaşımalarının Kaynağı”, *Oerlikon Kaynak Elektroları ve Sanayi A.Ş.*, (1996).

[59] Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., TempleSmith, P. and Dawes, C.J., The Welding Institute, TWI, International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8., (1991).

[60] Eren, T., “AA 6063-T6 Borularının Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, (2005).

[61] Bozkurt, Y., “Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğı ile Birleştirilen AA2124/SiCp/25 Kompozit Levhaların Mekanik Özellikleri ve Mikroyapı Karakterizasyonu”, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2008).

[62] Cederqvist, L. and Reynolds, A. P., “Factors Affecting the Properties of Friction Stir Welded Aluminum Lap Joints”, *Mechanical Engineering Department at the University of South Carolina*, Columbia, S.C.

[63] Bisadi, H., Tavakoli, A., Sangsaraki, M.T., and Sangsaraki, K.T., “The Influences of Rotational and Welding Speeds on Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al5083 and Commercially Pure Copper Sheets Lap Joints” *Materials and Design*, 43, 80–88, (2013).

[64] <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=205&pageid=2144416864> (12.01.2013).

[65] Yokoyama, T., Nakai, K., Komatsubara, Y., "Constitutive Modeling of Mechanical Behavior of Friction Stir Welded AA2024-T3 Butt Joints under In-plane Tension and Through-thickness Compression", *Okayama University of Science*, Okayama 700-0005, Japan.

[66] Özkan, S., "Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Parçalarda Haddeme (Burnishing) ile Yüzeylerin İşlenmesi, Haddemenin Yüzey Pürüzlülüğü ve Sertleşmeye Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2006).

[67] Denquin, A., "Metallurgy and Friction Stir Welding", *Department of Metallic Structures and Materials*, Onera, Chatillon, France.

[68] http://www.ntefsw.com/fsw_advantages.htm (12.01.2013).

[69] Yalçın, E.D., "AA7075 ve AA5754 Alüminyum Alaşımların Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, (2010).

[70] Kumbhar, N. T. and Bhanumurthy, K., "Friction Stir Welding of Al 6061 Alloy", *Asian J. Exp. Sci.*, Vol. 22, No. 2, 63-74, (2008).

[71] Güçlüer, S., "Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Alın Kaynağı Yapılmış Al-5086 H32 Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay, (2007).

[72] Kaptan, K., "Sürtünme Karıştırma Kaynağı Birleştirmelerinde Farklı Karıştırıcı Uç Formlarının Birleştirme Kalitesine Etkilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2008).

[73] Çakır, M., "Toz Metal Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Kaynaklanabilirliği", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2007).

[74] Otmanbölük, A.N., Ay, İ. ve Çelik, İ., "Alüminyum ve Bakır Çubukların Sürtünme Kaynağı", Bilim Günleri, *Makine Mühendisleri Odası*, Denizli Şubesi (5-6-7 Mayıs 1999).

[75] Çelik, S. ve Ay, İ., "Koruyucu Gaz Altında Difüzyon Kaynağı ve Uygulaması", *Tr.J.of Engineering and Environmental Science*, 23, 63-70. ©TÜBİTAK (1999).

[76] Çelik, S., “Koruyucu Gaz Altında Saf Alüminyum ve Bakırın Difüzyon Kaynağı Şartlarının Belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (1996).

[77] C.W. Tan, Z.G. Jiang, L.Q. Li, Y.B. Chen, X.Y. Chen, “Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Dissimilar Al-Cu Joints Produced by Friction Stir Welding”, *Materials and Design*, PII: S0261-3069(13)00379-8, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.056>, (2013).

[78] Xu, S., “Microstructure Analysis and Solid Mechanics Modeling of Friction Stir Welding”, PhD Thesis, *Department of Mechanical Engineering College of Engineering & Information Technology*, University of South Carolina, (2003).

[79] Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü, “Noktasal Faz (Mineraloji) Analizi”, Rapor No :20684700-181.06.03-356/2403, Rapor Tarihi: 08 Mart 2013, Gebze, Kocaeli, (2013).