

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ PARAMETRELERİNİN
DÖKÜM ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNE
OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yüksel ÖZDERİN

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ ve MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Zafer BARLAS

Mayıs 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ PAREMETRELERİNİN
DÖKÜM ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNE
OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yüksel ÖZDERİN

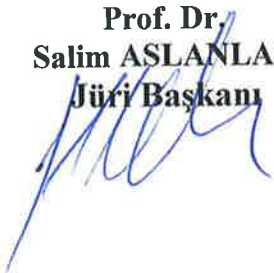
Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ ve MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 23.05.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Salim ASLANLAR
Jüri Başkanı

Doç. Dr.
Yahya BOZKURT
Üye

Doç. Dr.
Zafer BARLAS
Üye



BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Yüksel ÖZDERİN

05.05.2017

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, eleştirilerini esirgemeyen araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Zafer BARLAS'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazımı sürecinde yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Fatih ÖZEN ve Arş. Gör. Volkan ONAR'a teşekkür ederim. Tez çalışmam sürecinde motivasyonumu kaybettiğim anlarda desteğini esirgemeyen ve bana yol gösteren değerli ablam Uzm. Dr. Sevgin ÖZDERİN'e ve eğitim öğretim hayatım boyunca benden hiçbir şekilde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam, annem, dedem, anaannem başta olmak üzere tüm sevdiklerime teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2015-50-01-055) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY	xv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
ALUMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ İLE KAYNAK KABİLİYETLERİ.....	4
2.1. Alüminyumun Tarihçesi	4
2.2. Alüminyumun Genel Özellikleri	5
2.3. Alüminyum Alaşımaları ve Sınıflandırılması	6
2.3.1. Dövme alüminyum alaşımlar	6
2.3.1.1. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları (1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx serisi alaşımlar)	7
2.3.1.2. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları (2xxx, 6xxx, 7xxx,8xxx).....	8
2.4. Alüminyum Alaşımalarında Isıl İşlem Uygulamaları	9
2.5. Alüminyum Döküm Alaşımları	10
2.5.1. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	11
2.6. Alüminyum Bakır Alaşımları	12

2.7. Çökeltme Sertleşmesi	13
BÖLÜM 3.	
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ.....	16
3.1. SKK'ya Giriş.....	16
3.2. SKK Yönteminin Çalışma Prensipleri.....	16
3.3. SKK Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları.....	17
3.4. SKK Yönteminde Kullanılan Takımlar	19
3.5. Takım Malzemeleri.....	21
3.6. SKK Parametreleri	23
3.7. Takım Kuvvetleri.....	24
3.8. Kaynak Geometrileri ve Pozisyonları	24
3.9. Kaynak Bölgesindeki Mikroyapı Değişimi.....	26
3.9.1. Kaynak Bölgesinde Malzeme Akışı	27
3.10. SKK Yönteminin Endüstriyel Uygulama Alanları	29
3.10.1. SKK'nın denizcilik alanındaki kullanımı.....	29
3.10.2. Havacılık endüstrisinde uygulama alanları	30
3.10.3. Uçak ve uzay endüstrisinde uygulama alanları.....	31
BÖLÜM 4.	
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SKK İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİ.....	33
4.1. Alüminyum ve Bakır Alaşımlarının SKK ile Birleştirilebilirliği	33
4.2. Diğer Alüminyum Alaşımların SKK ile Birleştirilebilirliği.....	40
BÖLÜM 5.	
MATERYAL VE YÖNTEM.....	48
5.1. Alüminyum Bakır Alaşımlarının Dökümü	48
5.1.1. Döküm işlemleri.....	48
5.1.2. Malzemelerin levha halinde SKK'ya hazırlanması.....	49
5.2. SKK Yöntemiyle Birleştirmede Kullanılan Malzeme ve Donanımlar	50
5.2.1. Karıştırıcı takım özellikleri	50

5.2.2. Birleştirilecek levhaları sabitleme kalıbı.....	51
5.2.3. Dikey freze tezgâhı.....	53
5.2.4. Termokupul	53
5.3. SKK Yöntemi ile Al/Cu Alaşımların Levhalar Halinde Birleştirilmesi.....	54
5.3.1. Ön hazırlıklar.....	54
5.3.2. Kullanılan SKK parametreleri.....	55

BÖLÜM 6.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	58
6.1. Çekme Deneyi	58
6.2. Eğme Deneyi	61
6.3. Metalografik İnceleme	64
6.4. SEM Görüntülemesi-EDS Analizi	65
6.5. X-Işınları Karakterizasyonu	66
6.6. Mikrosertlik Ölçümleri.....	66

BÖLÜM 7.

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	68
7.1. Kaynak Dikiş Görüntüleri	68
7.2. SKK Sonrası Takım Durumu	69
7.3. Kaynak Sıcaklık Dağılımı	70
7.4. Takım Kuvvetleri.....	71
7.5. Birleştirmelerin Mekanik Özellikleri	71
7.6. Çekme Deneyi Sonuçları.....	72
7.7. Eğme Deneyi Sonuçları.....	75
7.8. Kaynak Bölgelerinin Makroyapı Karakterizasyonu.....	78
7.9. Kaynak Bölgelerinin Mikroyapı Karakterizasyonu	83
7.10. Farklı Takım Dönme Hızlarında %Cu Alaşım Elementi Aynı Olan Numunelerin SKK İle Birleştirilmesi	85
7.11. Aynı Takım Dönme Hızlarında Farklı %Cu Alaşım Elementi İçeren Numunelerin SKK İle Birleştirilmesi	90

7.12. SEM-EDS Sonuçları	96
7.13. X-Işını Difraksiyon Sonuçları	110
7.14. Mikro Sertlik Sonuçları	114
7.14.1. ITAB Al/4.5-4.5Cu	115
7.14.2. KM Al/4.5-4.5Cu	115
7.14.3. TMEB Al/4.5-4.5Cu	115
7.14.4. ITAB Al/4.5-2Cu	117
7.14.5. KM Al/4.5-2Cu	118
7.14.6. TMEB Al/4.5-2Cu	118
7.14.7. ITAB Al/2-2Cu	119
7.14.8. KM Al/2-2Cu	120
7.14.9. TMEB Al/2-2Cu	120
BÖLÜM 8.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	122
8.1. Sonuçlar	122
8.2. Öneriler	124
KAYNAKLAR	125
ÖZGEÇMİŞ	131

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Δl	Numunedeki Uzama Miktarı (mm)
A0	Numunekesit Alanı (mm ²)
AISI	Amercan Iron and Steel Institute
BM	Baz Malzeme
CNC	Bilgisayarlı Kontrollü Tezgahlar
D	Numune Genişliği (mm)
DKB	Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
F	Maksimum Yük (N)
H	Numune Kalınlığı (mm)
HSS	Yüksek Hız Çeliği
HV	Vickers Mikrosertlik
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
İK	İlerleme Kenarı
KB	Karıştırma Bölgesi
KM	Kaynak Merkezi
L	Mesnetler Arası Mesafe (mm)
l ₀	Numunenin İlk Ölçü Boyu
l ₀	Numunenin İlk Ölçü Boyu (mm)
MIG	Metal İner Gaz
OM	Optik Mikroskop
Rpm	Devir/Dakika
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SKNK	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı
TIG	Tungsten İner Gaz

TMEB	Termo-Mekanik Olarak Etkilenmiş Bölge
TWI	The Welding Institute
XRD	X-ışını difraksiyon analizi
YK	Yığıma kenarı
σ_e	Eğme Mukavemeti (Mpa)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Isıl işlem durumlarına göre dövme alaşımları.....	6
Şekil 2.2.	Isıl işlem durumlarına göre döküm alaşımları.....	11
Şekil 2.3.	Al-Cu alaşımları denge diyagramı	13
Şekil 2.4.	Çökelme sertleşmesi için uygulanan işlemler [6]	14
Şekil 2.5.	Çökelme sertleşmesi gösteren bir alaşımın çekme dayanımına yaşlanma sıcaklık ve sürenin etkisi [5].....	15
Şekil 3.1.	SKK yönteminin çalışma prensibi [8].....	16
Şekil 3.2.	SKK takım tipleri ve uc kesit çeşitleri	19
Şekil 3.3.	Sürtünme karıştırma ucunun kesit içerisinde gösterimi	22
Şekil 3.4.	Takımın dönme devrinin sıcaklık üzerine olan etkisi	23
Şekil 3.5.	Sürtünme karıştırma kaynağı alın ve bindirme kaynağı örnekleri	25
Şekil 3.6.	Sürtünme karıştırma kaynağının boru kaynaklarında uygulaması	25
Şekil 3.7.	Yeniden kristalleşmenin kolay olmadığı durumlarda (örneğin Al-alaşımları), sürtünme karıştırma kaynağı sonrası oluşan kaynak bölgesinin şematik gösterimi : (A) Baz Malzeme, (B) ITAB, (C) TMEB, (D) DKB (KB bu durumda B ve C bölgelerinden oluşur).	26
Şekil 3.8.	Yeniden kristalleşmenin kolay olduğu durumlarda (örneğin saf Ti), sürtünme karıştırma kaynağı sonrası oluşan kaynak bölgesinin şematik gösterimi : (A) Esas metal, (B) ITAB, (C) DKB (KB bu durumda sadece C bölgesinden ibarettir).	26
Şekil 3.9.	Alüminyum alaşımlarında SKK sonrası oluşan kaynak bölgeleri	26
Şekil 3.10.	SKK yönteminin uygulanabildiği kaynak geometrileri örnekleri; (a) küt alın birleştirme, (b) bindirme birleştirmesi, (c) köke birleştirme ve (d) çift taraflı birleştirme	27
Şekil 3.11.	SKK'da pim etrafında oluşan plastik akışın iki boyutlu basitleştirilmiş gösterimi.....	28

Şekil 3.12. Plastik akış ve takım ucun hareketine bağlı olarak oluşan akış karakteristiği: (a) dönme hareketi, (b) ilerleme hareketi.....	29
Şekil 3.13. Alüminyum panel ekstrüzyonları birleştirilmesi ve birleştirilmiş alüminyum panelleri.....	30
Şekil 3.14. SKK ile imal edilen Airbus A340-600 ve A380 modellerinde kanat kaburgaları [19].....	31
Şekil 3.15. SKK ile imal edilen Eclipse 500 modeli kanat montajı	31
Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan kalıp ve dökülen blok.....	49
Şekil 5.2. Testerede kesilen numunelerin CNC de işlenmesi.....	50
Şekil 5.3. Alüminyum alaşımlı levhaların SKK ile birleştirilmesinde kullanılan takım.....	51
Şekil 5.4. Alüminyum ve alaşımlı levhaların SKK yöntemiyle birleştirmesinde kullanılan sabitleme kalıp levhası (1ve2) Al/Cu levhaları(3), Tutucu baskı kolları(4), Sabit kalıp(5)	52
Şekil 5.5. Al/Cu alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinde kullanılan sabitleme kalıbı(1), Yük hücresi(2).....	52
Şekil 5.6. Alüminyum levhaların birleştirilmelerinde kullanılan dikey kalıpcı freze tezgahı	53
Şekil 5.7. SKK sırasındaki sıcaklıkların ölçümünde kullanılan sıcaklık veri kaydedici ve K-tipi termokupullar	54
Şekil 6.1. Çekme deney numunesinin geometrik detayları (ölçüler mm)	59
Şekil 6.2. Birleştirilen Al-Cu alaşımı levhalardan çekme ve eğme numunelerinin yerleşim düzeni	60
Şekil 6.3. SKK yöntemiyle birleştirilen 1200/%4.5-4.5alaşımlı levha	60
Şekil 6.4. Çekme-eğme deney cihazı	62
Şekil 6.5. Üç-nokta eğme deney düzeneği	63
Şekil 6.6. Birleştirilen Al alaşımlı levhalardan elde edilen üç-nokta eğme deneyi numunesi	63
Şekil 6.7. Eğme deneyi sonucu oluşan α açılarının gösterilişi (a-yüzey eğme, (b)-kök eğme	63
Şekil 6.8. Nikon SMZ 800, optik mikroskop	65
Şekil 6.9. Nikon Eclipse L150A marka mikroskop.....	65

Şekil 6.10. Sertlik ölçüm yönteminin, numune üzerinde uygulanışının şematik olarak gösterimi (ölçüler mm).....	67
Şekil 7.1. SKK yöntemi ile birleştirilmiş Al-Cu levhaların genel yüzey görünümü.....	68
Şekil 7.2. SKK sonrası takım görüntüsü	69
Şekil 7.3. Kaynak metali sıcaklığı.....	70
Şekil 7.4. ITAB sıcaklığı.....	70
Şekil 7.5. Takım dönüş hızının farklı numunelerde takım kuvetine etkisi.....	72
Şekil 7.6. %2Cu ana metal çekme numuneleri.....	72
Şekil 7.7. 4.5Cu ana metal çekme numuneleri	72
Şekil 7.8. 800/%2-2Cu ,çekme deneyi sonrası kökten kopma	73
Şekil 7.9. 1200/%2-2Cu Çekme deneyi sonrası, ana metalde meydana gelen kırılma örneğinin yüzey görünümü	73
Şekil 7.10. 800/%4.5- 4.5Cu, çekme deneyi sonrası kök de görülen kırılmanın görüntüsü.....	73
Şekil 7.11. 1000/%4,5-4,5 Cu İçerikli yüzey çekme numuneleri.....	74
Şekil 7.12. 1200/%4.5-4.5Cu, Çekme deneyi sonrası ana metalde meydana gelen kırılma örneğinin yüzey görünümü	74
Şekil 7.13. 800/%4,5-2Cu, çekme deneyi sonrası yüzey görüntüsü	74
Şekil 7.14. 1000/%4.5-2 Cu kök çekme numuneleri.....	74
Şekil 7.15. 1200/%4,5- 2Cu içerikli yüzey çekme numuneleri.....	74
Şekil 7.16. Çekme deney sonuçları	75
Şekil 7.17. %2Cu-%2 Cu içerikli yüzey, kök eğme numuneleri.....	77
Şekil 7.18. %4.5Cu-%4.5 Cu içerikli yüzey, kök eğme numuneleri.....	78
Şekil 7.19. %4.5Cu-%2 Cu içerikli yüzey, kök eğme numuneleri.....	78
Şekil 7.20. %2Cu ana malzeme	79
Şekil 7.21. %4.5Cu ana malzeme	79
Şekil 7.22. 800/2-2Cu numunesi KM makro görüntüsü.....	81
Şekil 7.23. 1000/2-2Cu numunesi KM makro görüntüsü.....	81
Şekil 7.24. 1200/%2-2 numunesi KM makro görüntüsü.....	81
Şekil 7.25. 800/%4,5-4,5Cu numunesi KM makro görüntüsü	82
Şekil 7.26. 1000/%4,5-4,5Cu numunesi KM makro görüntüsü	82

Şekil 7.27. 1200/%4,5-4,5Cu numunesi KM makro görüntüsü	82
Şekil 7.28. 800/%4,5-2Cu numunesi KM makro görüntüsü	82
Şekil 7.29. 1000/%4,5-2Cu numunesi KM makro görüntüsü	83
Şekil 7.30. 1200/%4.5-2Cu numunesi KM makro görüntüsü	83
Şekil 7.31. %4,5-%2 Cu içeren alüminyum esas metalinin EDS analizi konumu .	96
Şekil 7.32. %4,5 Cu içeren alüminyum esas metalinin EDS analizi konumları	97
Şekil 7.33. %4,5 Cu içeren alüminyum esas metalinin EDS analizi sonuçları	98
Şekil 7.34. %2 Cu içeren alüminyum esas metalinin EDS analizi konumları	99
Şekil 7.35. %2 Cu içeren alüminyum esas metalinin EDS analizi sonuçları	99
Şekil 7.36. SEM görüntüleri için örnek konum şablonu	100
Şekil 7.37. Çizgisel EDS sonuçları için örnek konum şablonu	100
Şekil 7.38. 1200/2-2 numunesi için sem görüntüleri (A, B, C, D, E, F simgeleri şekil 7.36'daki konumlarıdır)	101
Şekil 7.39. Şekil 7.37'de gösterilen I-III nolu konumların 1200/2-2 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları	101
Şekil 7.40. Şekil 7.37'de gösterilen II nolu konumunun 1200/2-2 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları	102
Şekil 7.41. Şekil 7.37'de gösterilen IV nolu konumunun 1200/2-2 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları	103
Şekil 7.42. 1200/4,5-2 numunesi için sem görüntüleri (A, B, C, D, E, F simgeleri şekil 7.36'daki konumlarıdır)	104
Şekil 7.43. Şekil 7.37'de gösterilen I-III nolu konumların 1200/4,5-2 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları	104
Şekil 7.44. Şekil 7.37'de gösterilen II nolu konumun 1200/4,5-2 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları	105
Şekil 7.45. Şekil 7.37'de gösterilen IV nolu konumun 1200/4,5-2 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları	106
Şekil 7.46. 1200/4,5-4,5 numunesi için sem görüntüleri (A, B, C, D, E, F simge- leri şekil 7.36'daki konumlarıdır)	107
Şekil 7.47. Şekil 7.37'de gösterilen I-III nolu konumların 1200/4,5-4,5 numu- nesi için çizgisel EDS analiz sonuçları	107

Şekil 7.48. Şekil 7.37’de gösterilen II nolu konumun 1200/4,5-4,5 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları	108
Şekil 7.49. Şekil 7.37’de gösterilen IV nolu konumun 1200/4,5-4,5 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları	109
Şekil 7.50. 1200/4,5-4,5 Çekme numunesi kırılmış yüzey SEM görüntüsü	110
Şekil 7.51. 1200/4,5-2 Çekme numunesi kırılmış yüzey SEM görüntüsü	110
Şekil 7.52. %2Cu Ana malzeme	111
Şekil 7.53. %4.5Cu Ana malzeme	112
Şekil 7.54. %4.5-%2Cu kodlu numune	113
Şekil 7.55. %4.5-%4,5Cu kodlu malzeme	113
Şekil 7.56. %2-%2Cu kodlu malzeme	114
Şekil 7.57. Al/%4.5-4.5Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı	116
Şekil 7.58. Al/%4.5-4.5Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı	116
Şekil 7.59. Al/%4.5-4.5Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı	117
Şekil 7.60. Al/%4.5-2Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı	118
Şekil 7.61. Al/%4.5-2Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı	119
Şekil 7.62. Al/%4.5-2Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı	119
Şekil 7.63. Al/%2-2Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı	120
Şekil 7.64. Al/%2-2Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı	121
Şekil 7.65. Al/%2-2Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı	121

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Saf alüminyumun özellikleri	5
Tablo 2.2. Alüminyum serileri içinde bulunan ana elementler	7
Tablo 2.3. Alüminyum döküm serileri içinde bulunan ana elementler	12
Tablo 3.1. TWI tarafından tasarlanmış, farklı geometri ve özelliklere sahip takımlar.....	20
Tablo 3.2. SKK yöntemiyle birleştirmelerde kullanılabilen çeşitli takım malzemeleri ve bu takımların maksimum çalışma sıcaklıkları	22
Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan alüminyum alaşımları	48
Tablo 5.2. Al/Cu levhaların birleştirmeleri için kullanılan SKK parametreleri ...	56
Tablo 7.1. Eğme deneyi sonucunda oluşan Kopma Açılırları (α).....	76
Tablo 7.2. Eğme Numunesi yüzey eğme mukavemeti	77
Tablo 7.3. 800/32/%2-2, 1000/32/2-2 ve 1200/32/%2-2 kodlu numunelerin ITAB(a), TMEB(b) ve KM (c)'nin mikroyapı görüntüleri.....	86
Tablo 7.4. 800/32/%4.5-4.5, 1000/32/%4.5-4.5 ve 1200/32/%4.5-4.5 kodlu numunelerin ITAB(a), TMEB(b) ve KM (c)'nin mikroyapı görüntüleri	87
Tablo 7.5. 800/32/%4.5-2, 1000/32/%4.5-2 ve 1200/32/%4.5-2 kodlu numunelerin ITAB(a), TMEB(b) ve KM (c)'nin mikroyapı görüntüleri.....	89
Tablo 7.6. 800/32/%2-2, 800/32/%4.5-2 ve 800/32/%4.5-2 kodlu numunelerin ITAB(a), TMEB(b) ve KM (c)'nin mikroyapı görüntüleri.....	91
Tablo 7.7. 1000/2-2Cu, 1000/32/%4.5-2 ve 1000/32/%4.5-2 kodlu numunelerin ITAB(a), TMEB(b) ve KM (c)'nin mikroyapı görüntüleri.....	92
Tablo 7.8. 1200/2-2Cu, 1200/4,5-4,5Cu 1200/4,5-2Cu kodlu numunelerin ITAB(a), TMEB(b) ve KM (c)'nin mikroyapı görüntüleri.....	95

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma kaynağı, Al-Cu, mikroyapı, mekanik özellikler

Bu çalışmada Al/Cu levhalar 32mm/dakika sabit kaynak hızında, 800, 1000, 1200, devir/dakika takım dönme hızlarında SKK yöntemiyle alın-alına birleştirilmiştir. Ayrıca farklı oranlarda bakır içeren alüminyum alaşımlarında deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Böylece takım dönme hızının birleştirme özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, birleştirmelerin kaynak bölgelerindeki sıcaklık dağılımları ölçülmüş, mikroyapı karakterizasyonları yapılmış, sertlik ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Çalışmalar sonucunda, kaynak bölgelerinde Al/Cu-ITAB, Al/Cu-TMEB ve Al/Cu-KM mikroyapıları incelenmiştir. KM'lerin Al/Cu malzemenin karışımından meydana geldiği ve bu bölgedeki Al/Cu'da tane inceliği olduğu görülmüştür. Takım dönme hızının KM ve ITAB'lardaki tane büyüklüğüne sistematik bir etkisi olduğu gözlemlenmemiştir. Takım dönme hızının artmasıyla KM'lerdeki sıcaklığın arttığı, fakat Al/Cu malzemelerin ergime sıcaklıklarına ulaşmadığı tespit edilmiştir. XRD incelemelerinin sonucunda, sıcaklık artışı ve karıştırıcı ucun karıştırma hareketi kaynak bölgelerinde Al₂Cu metaller arası bileşiklerin oluşumuna neden olmuştur. Sertlik ölçümlerinde, ITAB'lardaki sertliklerin Al/Cu ana metallere göre azaldığı görülmüştür.

Yapılan sürtünme karıştırma kaynağı yapılan malzemelerin eğme ve çekme testleri uygulanmıştır. En yüksek eğme mukavemeti bakır oranı en düşük olan alaşımda görülmüştür. Çekme deneyinde ise %4,5/%2 bakır oranına sahip alüminyum alaşım çiftlerinde olduğu görülmüştür.

INVESTIGATION EFFECT OF FRICTION STIR WELDING PARAMETERS ON JOINABILITY OF ALUMINUM CASTING ALLOYS

SUMMARY

Keywords: Friction stir welding, Al-Cu, Microstructural observation, mechanical properties

In this work, Al-Cu plates have been joined by friction stir welding with 32mm/min federate and 800, 1000, 1200 rpm spindle speeds. Also, Al alloys with different Cu content have been used as test material. Thus, effect of rotating of tool on joints have been investigated. With this aim, temperature distribution of weld joints, hardness, microstructural characterization and mechanical properties have been investigated.

In the tests, weld zones which includes Al/Cu-Heat Affected Zones (HAZ), Al-Cu Thermomechanical affected zones (TMEB), and Al/Cu Weld center have been observed. It is observed that weld center zones compromise of Al/Cu mixtures and grain refinement have been occurred. Rotation of the tool is significant factor affecting grain size in HAZ and weld metal has been monitored. Furthermore, it is observed that rotation of tool has not systematically influenced HAZ and weld metal grain size. As increase in rotation of tool, there have been a rise in temperature at weld metal, still this temperature cannot achieved to melting temperature. In XRD investigations, rise in temperature and stirring of the tool give rise to intermetallic Al_2Cu in weld zones. Hardness measurements indicated that hardness of HAZ have lower hardness than base material

In this work, tensile tests and bending tests measurements have been executed. The maximum bending strength have been obtained in specimens which posses least Cu content. In tensile results, the maximum tensile strength have been obtained in %4.5-2 Cu added Al alloys.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde de teknolojinin gelişmesiyle çelikten sonra en çok kullanılan metal olan alüminyum alaşımları, uçak, otomotiv, uzay ve eşya gibi birçok endüstride kullanım alanı bulmuştur.

Alüminyum alaşımlarının çeliğe göre daha düşük özgül ağırlığa sahip olması ve üretim yöntemlerinin geliştirilerek daha yüksek miktarlarda ve çok daha ucuz olarak elde edilmesiyle kullanımı hızla yaygınlaşmıştır.

Bakır, alüminyum içerisine katıldığında sertlik, dayanım, işlenebilme özelliğinin yanında yaşlandırılabilirlik özelliği de katmaktadır. Alüminyum ve alaşımları demir çelik ile kıyaslandığında kimya, elektrik, tıp, uçak, inşaat, otomotiv de her geçen gün kullanımı ve önemi artmaktadır.

Geleneksel kaynak yöntemleri ile alüminyumun birleştirilmesinde ortaya çıkan yüksek ısı girdisi nedeniyle oluşan porozite oluşumu, katılma çatlama, istenmeyen üçüncül faz oluşumu, tane büyümesi ve gevrekleşmesi gibi mikroyapısal problemler ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, konvansiyonel ergitme kaynaklarına kıyasla Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) daha iyi mekanik performans daha düşük kalıntı ve daha düşük kaynak hatası oluşumu gibi avantajları vardır. Bu nedenle SKK esnasında geleneksel yöntemlerde ortaya çıkan kusurların asgari düzeyde olmasından ötürü, hafif ve farklı malzemelerin birleştirilebilme uygulamalarında ilgi odağı olmuştur [1].

SKK yöntemiyle, düz plakaların yüksek kapasiteyle birleştirme imkanı sunmaktadır. Hafif metallerin, alüminyum esaslı metal matrisli malzemelerin ve farklı metallerin birleştirilmesi bu yöntemle yapılması uygundur. Ayrıca, sürtünme

karıştırma kaynağı metal matrisli ve/veya metal ya da metal alaşımlarının birleştirilebilirliği son zamanlarda önemli bir konu haline gelmiştir [1].

SKK malzeme çiftlerinin tekrar ergitilemediği tekrar dökülemediği bir yöntemdir. SKK birleştirme prosesi takım parametreleri ve malzeme çifti üzerindeki birleşim mukavemeti, tane büyüklüğü ve birleşim bölgesi sertliği üzerinde çok büyük bir rol oynar.

Alüminyum alaşımların kaynağı tasarımcılar ve teknolojistler tarafından karşılaşılan büyük bir zorluktur. Alüminyum alaşımı özellikleri ısı işleme uğratılabilen ergitme kaynağı tekniğiyle birleştirilmesi çok zordur. Çünkü porozite ve çatlak gibi kusurların kaynak havuzunun katılaşması esnasında oluşur. Ayrıca, konvansiyonel teknikler sık sık birleşim mukavemetini yüksek derecede düşürmesine neden olur. Çünkü faz dönüşümü ve alaşım yumuşamasından dolayı konvansiyonel teknikler önemli derecede malzeme mukavemetini düşürür [2].

Alüminyum ve alaşımlarının kullanımının artması kaynak uygulamalarında yeni teknikler geliştirilmesine neden olmuştur. Örneğin uçak, uzay, gemi, otomotiv gibi alanlarda, gıda depolama elemanları ve radyoaktif atık madde taşıyıcılarının üretiminde kullanılan 2000, 5000, 6000, 7000 ve 8000 alüminyum alaşımlarının kaynağında, SKK kullanılmaktadır [3].

SKK kaynağının uygulanması esnasında, koruyucu gaz, toz ve ilave tele ihtiyaç olmaması, kaynak ağızı hazırlamaya ihtiyaç olmaması, tüm pozisyonlarda kaynak edilebiliyor olması ve otomasyona da olan yatkınlığı gibi daha birçok avantajlarının bulunması, yöntemin uygulama alanlarını arttırmaktadır [4].

SKK kaynağı yapılırken çevreye zararlı gaz çıkışı olmadığı için bu kaynak yöntemi çevre dostu olup yeşil teknolojiye uygundur. Alüminyum, ergime sıcaklığı ve sertliğinin düşük olması nedeniyle diğer kaynak yöntemleriyle kaynak yapılması güç olan bir malzemedir. Bu metalin oksijenle teması esnasında hava ortamında ergitme kaynakları ile kaynağı zordur [5].

Alüminyum bakır alaşımları (2XXX) yüksek sıcaklıklarda sahip oldukları yüksek mukavemet ve sertlikten dolayı endüstride valf gövdesi, silindir kapağı, dişli, piston gibi parçaların imalatında oldukça yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Al-Cu döküm alaşımı malzemelerin güvenilir bir şekilde birleştirilmesi için yeni yöntem ve/veya yaklaşımlara ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu açıdan, hadde ve dövme ürünü bakır içeren alüminyum alaşımlarının (2XX.X serisi) birleştirilmesinde başarıyla uygulanan ve literatürde çok sayıda deneysel çalışma eksikliğinin bulunması SKK'nın, Al-Cu döküm levhaların birleştirilebilmesi için de iyi bir alternatif yöntem olabileceğine inanılmaktadır.

BÖLÜM 2. ALUMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ İLE KAYNAK KABİLİYETLERİ

2.1. Alüminyumun Tarihçesi

Alüminyum, tarih boyunca ve teknik özelliklerinin getirdiği avantajlarından dolayı günümüzde kullanımı artmaya başlamıştır. Alüminyum ve alaşımlarının demir-çelik ile kıyas edilmesinin sebebi son zamanlarda elektrik, kimya, tıp, uçak, inşaat ve otomotiv alanlarında hızlı bir şekilde kullanılması sonucu alüminyumun önemini her geçen gün artmasıdır.

Sir Humphrey Davy tarafından 1807 yılında alüminada oksijene bağlı bir metalin varlığını öngörmüştür. Ancak yapılan çalışmalarda Alüminanın elektroliz edilmesi sonucunda demir-alüminyum alaşımı elde edilmiş ve sadece saf alüminyum elde edilememiştir. 1820 yıllarının başlarında M.Pierre Berthier Fransa'nın Les Baux kasabasında boksit cevherini keşfetmiştir. Alüminyumunu susuz alüminyum klorürden kalsiyum amalgamı redükleyerek ilk metalik alüminyumunu 1825 yılında Danimarkalı fizikçi Christian Oersted tarafından üretilmiştir. 1855 yılında, Deville tarafından ilk olarak üretilen alüminyum bir fuarda sergilenmiştir. Fransa'da Paul T. Héroult ve Amerika'da Charles Martin Hall birbirlerinden bağımsız olarak kriyolitte çözülmüş alüminanın elektrolitik parçalanması ile ilgili patent başvurusu yapmıştır. Günümüz teknolojisinde cevherden alüminyum üreten tesisler bu patent esaslarına göre üretim yapmaktadırlar. İlk elektroliz tesisi 1887-1988 yıllarında Héroult İsviçre firması Metallurgischen Gesellschaft tarafından kurmuştur. 1887 – 1892 tarihleri arasında K.J.Bayer alüminyum üretimi için Bayer prosesini oluşturmuş ve ilk patenti almıştır. Alüminyum boksit cevherlerinden üretiminin seri ve yüksek miktarlarda üretimi mümkün olduktan sonra alüminyum hızla endüstride kullanılmaya başlanmıştır [4].

2.2. Alüminyumun Genel Özellikleri

Alüminyum, % 99-99,5-99,8-99,99 safiyet derecelerinde üretilir; %99,99 saflıktaki alüminyum yüksek nitelikte saf alüminyum olarak adlandırılır ve fiziksel ve mekanik özellikler diğerlerine göre fark edilecek bir biçimde ortaya çıkar. %99,99 saflıktaki alüminyum yumuşaktır, kolay işlenebilir, ısı ve elektrik iletimi iyidir, ışığı yansıtma kabiliyeti iyidir ve korozyona karşı mukavemeti çok yüksektir. Alüminyum diğer metal malzemelere göre daha yüksek ışık yansıtma ve ısı yayılımı kabiliyetine sahiptir. Yüksek saflıkta alüminyum levha %80'den daha fazla ışık yansıtabilir. Ultraviyole ışınını yansıttığından dolayı güneş ışınlarının tahribatına karşı koruyucu olarak alüminyum boya kullanılmaktadır.

Bu özellikleri ile saf alüminyum, teknik malzeme olarak, özellikle korozyona dayanımı ve yüzey kalitesi yüksek olması gereken parçaların üretiminde (oto farları ve yansıtıcılar, kimya ve gıda endüstrisinde kullanılan çeşitli kutular, kaplar ve ince yapraklar (folyo: 4/20 µm), elektronik sanayinde özel iletkenler gibi) öncelikle kullanılır.

Tablo 2.1. Saf alüminyumun özellikleri [6]

Kimyasal sembol	Al	Isıl Genleşme Katsayısı	23,8x10 ⁻⁶ /°C
Atom numarası	13	Elektrik Direnci	2,699 mikro Ohm.cm
Atom ağırlığı	26,98	Çekme Mukavemeti	4-9 kPa/mm ²
Kafes yapısı	YMK	Akma Mukavemeti	1-3 kPa/mm ²
yoğunluğu (20°C)	2,6989gr/cm ³	Elastik Modül	6500-7200 N/mm ²
(660 °C'de sıvı)	2,37gr/cm ³	Sıvılaştırken Hacim Büyümesi	6,50%
Kaynama sıcaklığı	2300°C	Katılıştırken Kendini Çekme	%1,7-1,8
Ergime sıcaklığı	660,24°C	Kopma Uzaması	30-50%
Ergime ısısı	94,6 cal/gr	Sertlik	15-30 HB30
Özgül ısısı	0,2259 cal/g°C	%Doğada Bulunabilirlik	7,9

2.3. Alüminyum Alaşımları ve Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri alaşım elementlerine ve mikroyapısına bağlı olarak farklılık gösterir. Günümüzde alüminyum ve alüminyum alaşımları, artırılmış mukavemet özellikleri, hafiflikleri, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, korozyona karşı dirençleri nedeniyle gıda, kimya, otomotiv ve gemi inşa endüstrileri, taşıt, makine ve cihaz yapımı ile mimari alanda, inşaat, havacılık ve uzay endüstrilerinde geniş kullanım alanına sahiptirler ve birçok özellikleri nedeniyle mühendis ve tasarımcılar için tercih edilen endüstriyel malzemeler konumuna gelmişlerdir Alüminyumun yapısına katılan önemli alaşım elementleri bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur. Alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

2.3.1. Dövme alüminyum alaşımlar

Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon kabiliyeti iyi olup kolayca şekil alabilirler. Alüminyum dövme ve döküm alaşımlarının çoğuna ısı işlem uygulanabilmektedir. Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma şu şekildedir:



Şekil 2.1. Isıl işlem durumlarına göre dövme alaşımları [7]

Tablo 2.2. Alüminyum serileri içinde bulunan ana elementler [7]

Alaşıım elementleri	İsim
Al içeriđi >%99	1XXX
Bakır	2XXX
Mangan	3XXX
Silisyum	4XXX
Magnezyum	5XXX
Silisyum	6XXX
Çinko	7XXX
Diğer	8XXX

2.3.1.1. Isıl işlemlenemeyen alüminyum alaşıımları (1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx serisi alaşıımlar)

1xxx serisi alaşıımlar minimum %99,0 alüminyum, empürite olarak da silisyum ve demir içerirler. Bu alaşıımlar yüksek oranda haddelenerek levha veya folyo haline getirilerek kullanılırlar. 1100 alaşıımlarının tavllanmış durumda çekme mukavemeti 90 MPa'dır.

3xxx serisi alaşıımlarının en önemli alaşıımı 3003'tür. Bu alaşıım 1100 alaşıımına % 1,25 mangan ilavesi ile oluşturulur. 3003 alaşıımının tavllanmış durumda çekme dayanımı 110 MPa'dır. Bu serinin alaşıımları iyi işlenebilirliğin gerektirdiği yerlerde kullanılabilen genel amaçlı alaşıımlardır.

4xxx serisi alaşıımların ana alaşıım elementi olan silikon (4032, 4043, 4145, 4643 vs.), belirli oranlarda (%12'ye kadar) eklenerek, erime oranını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sebeple, alüminyum-silikon alaşıımları, erimesi ana metalin erimesinden daha düşük seviyede olan kaynak teli ve pirinç alaşıımlarında, alüminyuma katılarak kullanılmaktadır. Bu alüminyum alaşıımları, kayda değer miktarda kömür grisi renginde silikon içerdiğinden dolayı, mimari uygulamalarda talep edilmekte ve anot oksit kaplamasında kullanılmaktadır.

5xxx serisi alaşıımlarının ana alaşıım elementi olan magnezyum katı eriyik mukavemetlenmesi sağlar ve miktarı %5'e kadar çıkabilir. Bu serinin endüstride

kullanılan en önemli alaşımı 5052'dir. Bu alaşım %52,5 Mg, %0,2 Cr içerir ve tavllanmış durumdaki çekme dayanımı 193 Mpa'dır.

2.3.1.2. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları (2xxx, 6xxx, 7xxx, 8xxx)

2xxx serisi alaşımlarının birçoğuna bakırın yanında magnezyum ve düşük miktarda diğer elementler eklenir. 2xxx serisi alaşımları birim ağırlık dayanımının yüksek olması gereken uçak sanayi gibi alanlarda kullanılır. Bu alaşımlar katı eriyik mukavemetlenmesi ve çökelti sertleşmesiyle dayanım kazanırlar. Endüstriyel uygulama alanı bulabilmiş en önemli alaşım 2024 alaşımıdır. 2024-T6 alaşımı %4,5 bakır, %1,5 magnezyum ve %0,6 mangan bulundurur ve çekme dayanımı 442 MPa'dır.

6xxx serisi alaşımlarının Mg₂Si intermetalik bileşikleri, çökelti sertleştirilmesi ile dayanım artışı sağlar. En yaygın kullanılan alaşım 6061 alaşımıdır ve bu alaşım %1 magnezyum, %0,6 silisyum %0,3 bakır içerir. 6061 alaşımının çekme mukavemeti 290 MPa'dır. Bu seri, otomotiv sektöründe genel amaçlı yapı elemanı olarak kullanılır.

7xxx serisi alaşımlar, temel çökelti MgZn₂ intermetalik bileşiğinden oluşur. Çinkonun ve magnezyumun alüminyum içerisinde yüksek çözünürlüğü yüksek yoğunluklu çözeltilerin oluşmasını, bu da dayanımın oldukça yükselmesini sağlar. Bu serinin en önemli alaşımı 7075 tir. Bu çalışmada incelenecek olan alaşım da 7075'tir. Bu alaşım %5,6 çinko, %2,5 magnezyum, %1,6 bakır, %0,25 krom ihtiva eder. 7075-T6 alaşımının çekme dayanımı 504 MPa'dır. Bu seri yüksek dayanımın gerekli olduğu yerlerde kullanılır [6].

8xxx serisi alaşımların esas alaşım elementi lityum olup, kalay eklentisinde yapılabilmektedir. Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanan bu malzeme, iyi yorulma direnci ve iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Fakat diğer Al alaşımları ile karşılaştırıldığında üretim maliyetleri yüksektir [7].

2.4. Alüminyum Alaşımlarında Isıl İşlem Uygulamaları

Alüminyum alaşımlarına yapılan ısıl işlemler değişik şekillerde uygulanabilir ve uygulanan işlem TX sembolleri ile alaşım numarasının yanına yazılır. Bu işlemler şu şekilde ifade edilmektedir:

- O: Tavlanmış, F: Üretildiği gibi, H: Sertleştirilmiş, T: Isıl işleme tabi tutulmuş
- T1: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.
- T2: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.
- T3: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.
- T4: Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.
- T5: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve suni yaşlandırma yapılmış
- T6: Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve suni yaşlandırma yapılmış.
- T7: Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve aşırı yaşlandırma yapılmış.
- T8: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış.
- T9: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, suni yaşlandırma yapılmış ve soğuk şekillendirilmiş.
- T10: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış [7].

Al-Alaşımlarının özellikle yaşlandırma sertleştirmesine tabi tutulmuş türlerinin ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmelerinde karşılaşılan bir başka sorun kaynak dikişinde sertleştirici çökeltilerin çözünmesi ve tane sınırı segregasyonu sonucu ve ITAB'de aşırı yaşlanma sonucu sertlik ve mukavemetin düşmesidir. Bu durum kaynak yapılan baz malzeme ile kaynak bölgesinde mekanik uyumsuzluğa neden olmakta ve kaynak bölgesinde mukavemet düşüşü olarak bilinmektedir. Al-Li

alaşimleri ve AA7075 gibi bazı Al-alaşimleri ergitme kaynak yöntemi ile kaynak edilememektedirler [8].

ITAB'de sıcaklığın ergime sıcaklığına eriştiği kısımlarında sertleştirici partiküllerin tamamen çözünmesi söz konusudur. Sertleştirici partiküllerin sırasıyla Mg_2Si ve $MgZn_2$ olduğu 6xxx ve 7xxx alaşım sistemlerinde, bu çökeltiler soğuma sırasında çözülmüş halde aynen kalır ve bu bölgede mukavemetin çok düşük kalmasına sebep olurlar. Kaynak sonrası oda sıcaklığında yapılan doğal yaşlandırma ile 3 gün sonunda, özellikle yüksek mukavemetli 7xxx serisi alaşımlarda söz konusu mukavemet kaybının yaklaşık yarısı kadarının geri kazanımı sağlanabilir. Sertleştirici partiküllerin $CuAl_2$ olduğu 2xxx alaşım sisteminde ise, soğuma sırasında sertleştirici partiküllerinin tane sınırlarında tekrar çökmesi ve çökmenin olmadığı bölgelerin (precipitate free zone, PFZ) varlığı söz konusudur [8].

2.5. Alüminyum Döküm Alaşimleri

Alüminyum gümüş renkte sünek bir metaldir. Alüminyum genel özellikleri içerisinde iyi işlenebilirlik, iyi yüzey kalitesi, düşük özgül ağırlık, mükemmel dökülebilirlik, düşük gaz çözünürlüğü özelliklerine sahiptir. Kalıp tasarımında, alüminyumdaki katılaşma esnasında %3,5 ile %8,5 arasındaki hacimsel çekme oranı göz önünde bulundurulmalıdır. Alüminyum döküm alaşımlarının dövme alaşımlarına göre mekanik özellikleri çok daha iyi olmasıyla birlikte grup içerisinde yer alan alaşımlarının bazıları ısıtılma tabii tutularak mekanik özellikleri artırılabilir.

Alüminyum alaşımların dökülebilirlik özellikleri akışkanlığın, sıcak yırtılma eğiliminin ve hacimsel çekme özelliklerinin değerlendirilebildiği özel numune kalıpları kullanılarak belirlenmektedir.

Mekanik özellikler ise, genellikle en iyi ısıtılma uygulanabilen ötektik kompozisyonları içeren alaşımlardan elde edilmektedir. Ayrıca döküm alaşımlarının mekanik özellikleri ergitme ve döküm pratiklerinin sıkı kontrolü, empürite

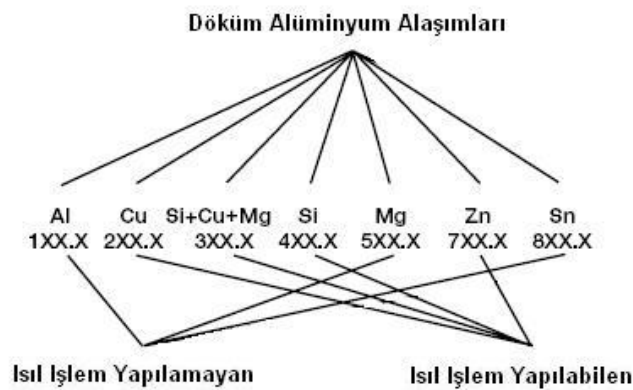
seviyesinin kontrolü, tane boyutu kontrolü - inceltme, ötektik modifikasyon ile çok daha iyi karakterize edilmektedir.

Kullanım alanı olarak bakıldığında ise genel kullanım amacıyla üretilen alüminyum döküm parçalarında alaşım seçimi işlenebilirlik, korozyon direnci, sertlik ve mekanik değerler gibi karakteristiklere göre yapılmaktadır [9].

Alüminyum alaşımların pres döküm, kum kalıba döküm ve sabit kalıp içerisine döküm yöntemiyle üretilirler. Bu alaşımlar işlenebilme özelliklerinin yanı sıra fiziksel özellikleri oldukça iyidir. Bu alaşım türü kaynak edilebilme özelliği yanında korozyon ve mukavemet özellikleri yüksek olup bu döküm alaşımlarında ısıtım işlem yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta direnci arttırmak için (%1-%4) arasında bakır katılır ve oluşan $CuAl_2$ çökeltme fazı oluşur. $MgZn_2$ çökeltisi içinde aynı oranda çinko elementi malzemeye ilave edilir. Alüminyum alaşımlarına tane küçültücü olarak titanyum, bor ilave edilir [9].

2.5.1. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

Alüminyum döküm ve döküm alaşımları için kullanılan simgeleme dizgesi de işlenik alüminyum alaşımlarıninkine benzerdir. Bunlarda da dört rakamlı bir sayı simge ile ifade edilir; Dördüncü rakam üçüncüsünden bir nokta ile ayrılmıştır. Tüm döküm alaşımları için simgelerle ve ısıtım işlem uygulanabilme durumlarına göre Şekil 2.2.'de gösterilmiştir. Alüminyum alaşımlarının içerdikleri alaşımlar ve Tablo 2.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Isıl işlem durumlarına göre döküm alaşımları

Tablo 2.3. Alüminyum döküm serileri içinde bulunan ana elementler [7]

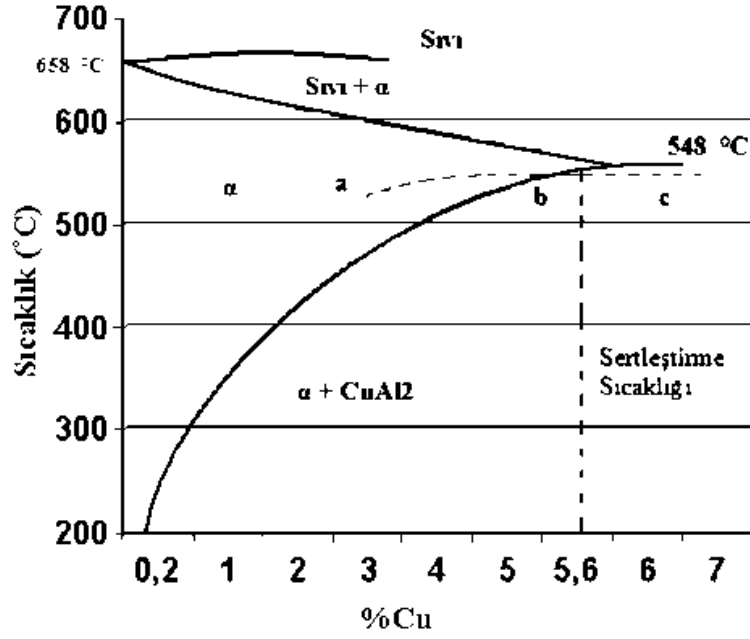
Seri	Katılan alaşım elementleri
1xx.x	Al, en az %99
2xx.x	Al-Cu
3xx.x	Al-Si-Cu, Al-Si-Mg, Al-Si-Cu-Mg
4xx.x	Al-Si-Cu, Al-Si-Mg, Al-Si-Cu-Mg
5xx.x	Al-Mg
6xx.x	Al-Zn
7xx.x	Al-Sn
8xx.x	Diğer Elementler
9xx.x	Kullanılmayan Seri

2.6. Alüminyum Bakır Alaşımları

Alüminyumda alaşım elementi olarak kullanılan bakır %3-12 oranında ilave edilir. Alaşımlara sertlik özelliği katan elementlerin başında gelir. Isıl işleme uğramış ya da uğramamış iken alaşımın çekme mukavemeti değerini artırır. Dövme alaşımlarında %3-5 arasında katılır. %5'den fazla kullanılırsa mekanik işleme zorluğunun ortaya çıkar. Bu da alaşımın elektrik iletkenliğini ve korozyona karşı direncini düşürür.

Şekil 2.3.'de görüleceği gibi; bakır, alüminyumla birlikte 548°C'de %33 bakır içeren bir ötektiğin bulunduğu bir denge diyagramını meydana getirir. Ötektik sıcaklığında bakırın a- fazında çözünürlüğü %5.65'iken. a- fazının çözünürlük sınırı 250°C ye kadar bilinmektedir. Daha aşağı sıcaklıklarda çözünürlük sınırı tam olarak tahmin edilememektedir. Yüksek sıcaklıkta bakırın alüminyum içindeki çözünürlüğü artarken, hızlı bir su vermeyle yarı dengeli olan bir α - fazı meydana gelir. Bu faz içerisinde CuAl_2 'nin çökeldiği görülür. Bakır alüminat çok sert bir madde olup katı ergiyikten zamanla oda sıcaklığında ayrışır. Bu olay yaşanma sertleşmesinin esasını oluştururken sertlik ve mukavemet değerini artırır. Çökelenin oluşup bitmesiyle alüminyum-bakır alaşımlarının korozyon direnci düşmüş olur [2].

Sıcaklığın artması bakırın alüminyum içindeki çözünürlüğünü artırır. Bundan dolayı bakır içeren alüminyum alaşımları ısıl işleme çökeltme sertleşmesi ile sertleştirilebilmektedir. Çökeltme için gerekli zaman, alaşımın bileşimine ve sıcaklığına bağlı olup çökeltmenin mekanik özelliklerine yapacağı etki, çökelen faz miktarına, boyutlarına ve dağılımına bağlıdır [9].



Şekil 2.3. Al-Cu alaşımları denge diyagramı [2]

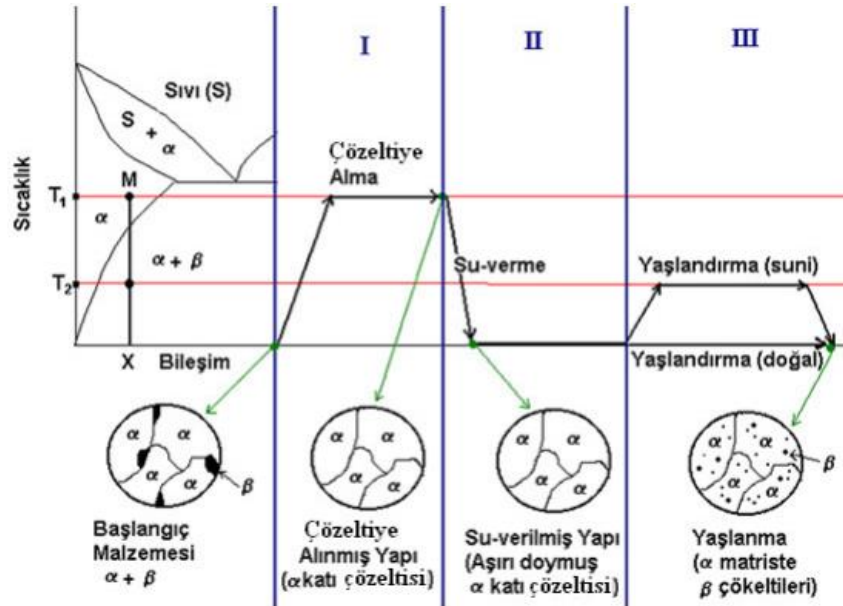
2.7. Çökeltme Sertleşmesi

Çökeltme sertleşmesi genel bir ifadeyle birbirleri içerisinde sınırlı çözünürlüğe sahip (tek faz bölgesi içeren) alaşımlara uygulanan bir sertleştirme işlemidir. Bu işlem, ikinci fazın bir matris içinde katı çözültiden çökmesi sonucu alaşımın mukavemet değerinin artmasına olanak sağlar. Çökeltme sertleşmesi, demir dışı malzemelerde özellikle alüminyum esaslı alaşımlar diğer malzemelere göre daha geniş bir kullanım alanına imkan olanağı tanımaktadır.

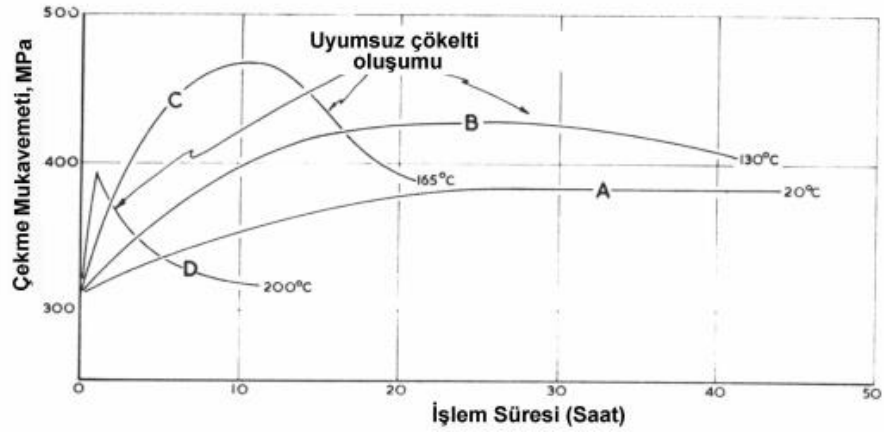
İlk kez 1906 yılında Alman metalurjist Dr. Alfred Wilm tarafından az miktarda magnezyum, silisyum ve bakır içeren alüminyum alaşımında gözlenmiştir. Bu alaşım 500°C'ye ısıtılmış ve daha sonra suda soğutulmuştur. Su verilmiş parça oda sıcaklığında birkaç gün bekletildiğinde sertliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Bir haftalık bir süre sonunda ise alaşımın mukavemeti maksimum bir değere ulaştığı gözlemlenmiştir. Alaşımın maruz kaldığı bu etkiye yaşlanma olarak isimlendirilir. Su verilmiş parçanın 180°C'ye kadar ısıtılmasıyla yaşlanma prosesinin hızı artırılmıştır. Su verme işleminden sonra nispeten yüksek sıcaklıklarda yapılan bu işleme suni yaşlanma olarak adlandırılır. Gerek yaşlanma (suni yaşlanma) gerekse suni yaşlanma terimleri daha sonra çökeltme sertleşmesi adı altında birleştirilmiştir. Çökeltme

sertleşmesi, hareket edebilen dislokasyonların yolu üzerinde küçük ve sert partiküllerin oluşmasının sağlanmasıyla gerçekleştirilir [2].

Alüminyum-bakır alaşımları, içerdiği bakırın alüminyum içindeki çözünebilirliğinin artan sıcaklıkla büyük oranda değişmesiyle ısıtılma yöntemiyle sertleşebilir alaşımlardır. Alüminyumda, 548°C'de ağırlıkça %5,65 bakır oda sıcaklığında çözünürken bu oran %0,20'dir. Bu alaşımların ısıtılma dayanımının artırılması genelde 3 basamakta gerçekleşir. Şekil 2.4'te bu aşamalar gösterilmektedir. Şekil 2.4'ten de görüleceği üzere, birinci basamakta alaşımın solidus sıcaklığının hemen üstünde bir sıcaklıkta (α bölgesi) tutularak bir katı çözeltinin oluşması sağlanır. Bu işlemde sırayla su verme veya başka bir yöntemle hızlı soğuma takip eder. Bu işlemlerden sonra oda sıcaklığında aşırı doymuş bir katı çözelti oluşur. Son basamakta ise yaşlandırma işlemi yapılır. Yaşlandırma işleminin sıcaklığı da genellikle 130-190°C arasındaki sıcaklıkta gerçekleşir.



Şekil 2.4. Çökelme sertleşmesi için uygulanan işlemler [10]



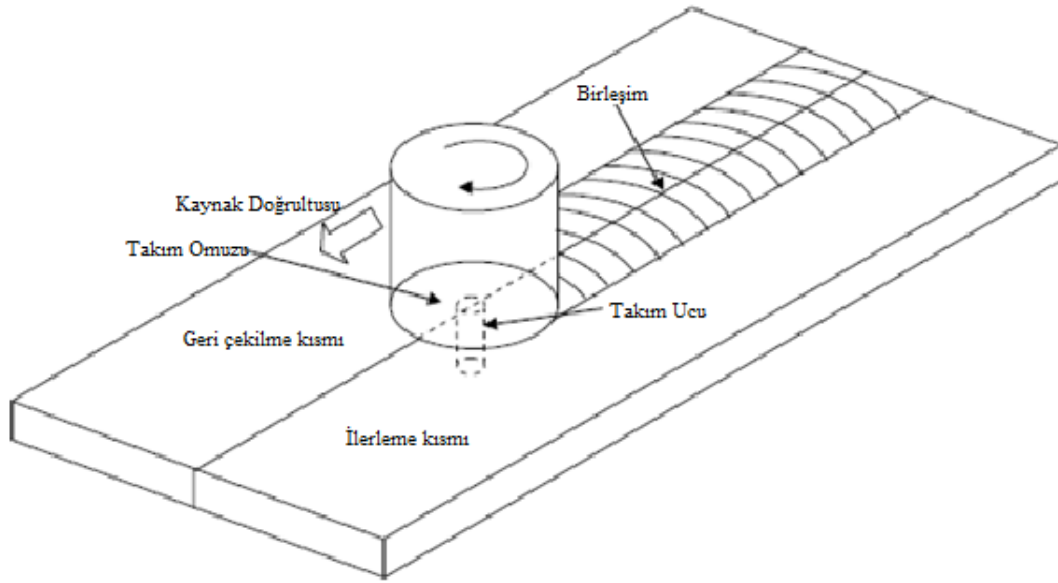
Şekil 2.5. Çökeltme sertleşmesi gösteren bir alaşımın çekme dayanımına yaşlanma sıcaklık ve sürenin etkisi [11]

Şekil 2.5.'de ise çökeltme sertleşmesi gösteren tipik bir alaşımında su verme işleminden sonra ısıl işlemler esnasında sıcaklık ve sürenin mukavemet üzerine etkileri görülür. Sıcaklık arttıkça işlem süresinin kısılması gerektiği açıktır. Eğer aynı sıcaklıkta gereğinden fazla ısıl işleme tabi tutulursa mukavemet değeri üzerine ters etki bulunmaktadır.

BÖLÜM 3. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ

3.1. SKK'ya Giriş

SKK, The Welding Institute (TWI) (İNGİLTERE) tarafından geliştirilerek 1991 yılında patenti alınmıştır. Bu katı hal kaynak metodunda karıştırıcı ve tükenmeyen bir takım plaka alın çiftleri arasında hareket ettirilerek metal çiftlerinin birleşmesi sağlanır [12]. Şekil 3.1.'de bu yöntemin uygulanması gösterilmiştir.



Şekil 3.1. SKK yönteminin çalışma prensibi [13]

3.2. SKK Yönteminin Çalışma Prensibi

SKK tekniği sıcak karışım kaynağı olarak da tanımlanabilen bir katı hal kaynağıdır. Karıştırıcı ucun kendi etrafında dönerek malzeme içinde oluşturduğu sürtünme kuvveti nedeniyle oluşturduğu sürtünme ısısından dolayı yumuşayan malzemenin ergime sıcaklığı altında birleşmesini sağlamaktadır [14].

SKK yönteminin uygulanışı 4 ana aşamada gerçekleşir;

1. Yaklaşma aşaması
2. Karıştırma aşaması
3. Kaynak aşaması
4. Çıkış veya uzaklaşma aşaması

Birinci aşamada takımın malzemeye yaklaşır ve dalar. Dalış esnasında malzeme içine işlemesi için gereken ısıyı oluşturur. İkinci aşamada kaynak sıcaklığına ulaşması için gereken ısıyı oluşturur. Bu aşamada malzeme ve takım arasında sürekli bir basınç oluşturacak kuvvet bulunur. Bu kuvvet sürtünme ve karıştırma için gerekli mekanik sürtünme enerjisini oluşturur. Bu işlem malzemenin elastik modülünün düşmesine kadar sürer. Bu esnada üçüncü aşama olan kaynak aşamasının başladığını gösterir. Üçüncü aşamada termal ısınma ve mekanik deformasyonun bir arada olduğu kompleks bir işlem olan termomekanik süreç oluşur. Bu süreç esnasında difüzyon olamayacak kadar sıcaklık olduğundan malzeme çiftlerinde tamamıyla bir difüzyon olmaz. Dördüncü aşamada ise karıştırıcı uç dikey hareket ile parça içinden çıkar [15].

3.3. SKK Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Ergitme kaynaklarında kaynak havuzunun katılaşması esnasında oluşan çatlaklar kaynak poroziteleri, tane yönelmeleri, sıcak çatlama üçüncül faz oluşumu ve düşük kaynak mukavemeti ve itab oluşumundan dolayı ana metalin etkilenmesi, yumuşaması gibi problemlerle karşılaşmaktadır [2] [16].

SKK da ergitmeli kaynak yöntemindeki sıcaklıklara ulaşılmadığı için ergitmeli kaynak yöntemlerinde bahsedilen kusurlar oluşmaz. Ortaya çıkan sıcaklıklara örnek verecek olursak Benavides ve arkadaşlarının [12] yapmış olduğu çalışmada ergitme sıcaklığının %80'i kadar (480°C) bir sıcaklık maksimum karşılaşılan sıcaklık olmuştur.

SKK kaynağını maliyet açısından incelersek; kalifiye eleman gerektirmez, hazırlık için zaman ve ekipman çok düşüktür ve atılan kaynağın başarısı çok yüksektir. Eşit ve tekrarlanabilen kaynak elde edilir. Bu nedenle maliyeti düşüktür.

Alüminyum alaşımlarının ergitme kaynağında görülen çatlak ve porozitenin oluşması SKK kaynağında element kaybı olmadan bütün alüminyum alaşımlarına bu kaynak yöntemi uygulanabilir. Bu kaynak yöntemindeki birleştirmede ergimenin olmaması ve katılaşma ve soğumadan kaynaklanan çarpılma, ergitme kaynak yöntemine göre çok azdır. Alüminyum alaşımlarının kaynağı diğer kaynak yöntemlerine kıyasla kaynak edilen malzemelerin mekanik özelliklerinden daha iyi ve çevreye zararlı gaz çıkışı olmaz. Bu kaynak yönteminde bir ark oluşumu meydana gelmemesi sebebiyle elektromanyetik radyasyon tehlikesi yoktur. SKK kaynağında gerekli olan enerji metal inert gaz (MIG) kaynağından fazla iken lazer kaynağından daha azdır [14].

Ayrıca, koruyucu gaz ve ilave kaynak metaline ihtiyaç olmaması, kaynak sırasında ortama zararlı gaz çıkışı olmaması ve kaynak öncesinde yağ çözücü solventlere ihtiyaç olamaması gibi avantajları da vardır.

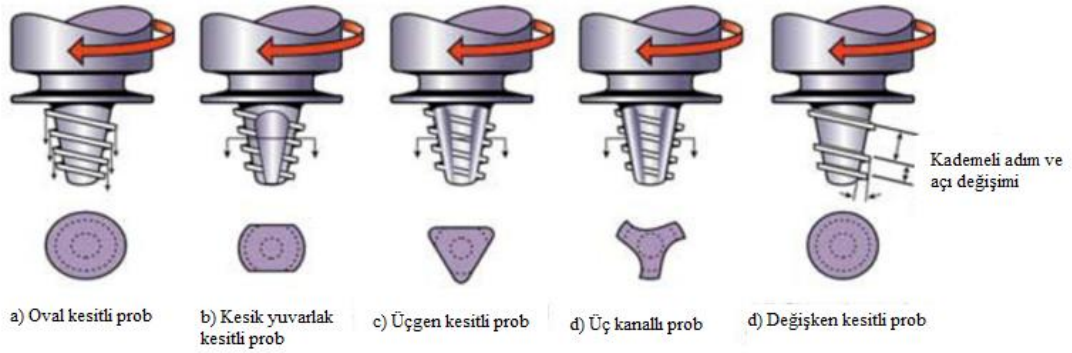
Yapılan bir çalışmada, konvansiyonel TIG kaynağı ve SKK yöntemi ile AA 2024-T3 tipi alüminyum alaşımı birleştirilerek, kaynak bölgelerinin mikro yapıları araştırılarak TIG ergitme kaynağında kaynak sırasındaki ısı girdisi SKK'na göre daha fazla olduğundan TIG kaynağında ITAB bölgesinin SKK'na göre kaynak kesitindeki tane yapısının daha iri ve geniş olduğu gözlemlenmiştir [17].

Yukarıda sıralanan avantajlarının yanı sıra, SKK yöntemi diğer kaynak yöntemlerine göre bazı dezavantajlara sahiptir. Bunlar aşağıda şöyle sıralanmaktadır;

1,25 mm'den düşük kalınlıklardaki ince parçaların birleştirilmesi zordur. Sürekli birleştirmelerde, iş parçalarının ileri-geri hareketini sağlayacak donanımlara gerek duyulmaktadır. Dolgu amaçlı uygulamalar için kullanımı uygun değildir. Ortalama kaynak hızı, bazen ergitme kaynak yöntemlerine göre daha yavaş olabilmektedir [18].




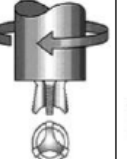
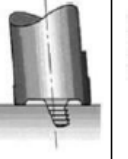

3.4. SKK Yönteminde Kullanılan Takımlar

Takımın dizaynı ısı oluşumu, plastik akış, harcanan güç ve kaynak edilen birleşimin uniformluğunu etkilemektedir. Takım omuzu ısının büyük bir kısmını oluşturur ve iş parçasından plastik bir şekilde akarak çıkan mazlemenin dışarı çıkmasını engeller. Son yıllarda farklı özelliklere sahip yeni takım tasarımları ortaya çıkarılmıştır. TWI da dizayn edilen bazı takımlar Şekil 3.2. ve Tablo 3.1.'de gösterilmektedir. Whorl ve MX-Triflute uçlar silindirik uçlu takımlardan daha küçük uçlara sahiptir. Whorl tasarımlarındaki açılı hızın düşey bir biçimde hareket etmesini sağlayarak plastik akışın kolaylaşmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.2. SKK takım tipleri ve uc kesit çeşitleri [19]

Tablo 3.1. TWI tarafından tasarlanmış, farklı geometri ve özelliklere sahip takımlar [18]

	Takım Tasarımı					
	Silindirik	Whorl™	MX Triflute™	Flared Triflute™	A-Skew™	Re-Stir™
						
Karıştırıcı uç şeklinin özellikleri	Diş açılmış, silindirik	Diş açılmış, konik	Diş açılmış, konik, üç kanallı	Diş açılmış, üç kanallı, alt kısmı geniş	Diş açılmış, silindirik, çarpık	Diş açılmış, konik
Karıştırıcı uç hacminin, silindirik uç hacmine oranı	1	0,4	0,3	0,3	1	0,4
Döndürdüğü alan hacminin uç hacmine oranı	1,1	1,8	2,6	2,6	Karıştırıcı uç açısına bağlı	1,8
Terse dönebilme	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Evet
Uygulama	Alın kaynağı	Alın kaynağı	Alın kaynağı	Bindirme kaynağı	Bindirme kaynağı	Minimum asimetriye sahip kaynak bölgesi için

MX-Triflute takımları ise malzeme ile takım arasındaki alanı artırarak sıcaklığın artırılmasını sağlar böylece malzeme yumuşamasını daha kolay artırarak daha kolay bir şekilde plastik akışın olmasını sağlar. Bunun sonucunda ayrıca, daha fazla karıştırma olduğundan takımın ilerleme hareket kuvveti ve kaynak için gerekli dönme torku azaltılmış olur [15,20].

Silindirik kesite sahip olmasına rağmen, Whorl ve Triflute tasarımları bindirme kaynakları için uygun değildir. Bindirme kaynağında, üst tabakanın aşırı kalınlaşması ile üst üste olan bindirme arasındaki yapışkan oksit tabakası kaynak bölgesi içinde kalır.

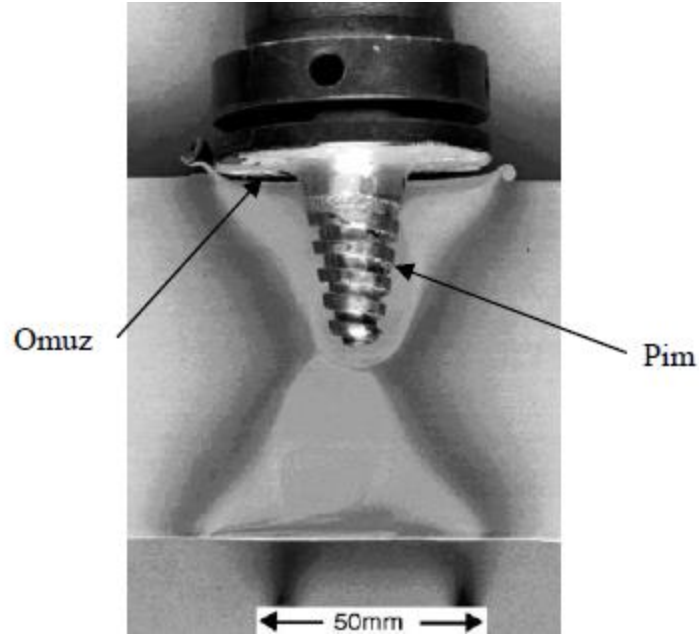
Flared-Triflute tasarımı ise MX-triflute ye benzer bir tasarıma sahiptir. A-Skrew ise açılı ve diş açılmış bir tasarıma sahiptir. Ancak uç eksenini spindle eksenine göre eğimlidir. Flared-Triflute ve A-Skrew takım tasarımları bindirmeli kaynaklarda pim uçlu takıma göre nispeten daha fazla alana etki ettiğinden dolayı daha büyük kaynak alanı oluşturur. Böylece daha başarılı birleşimler elde edilir [13].

3.5. Takım Malzemeleri

SKK'da kaynak bölgesinin mikro yapısına ve mekanik mukavemetine etki eden en önemli parametrelerden biri, karıştırıcı ucun yapısı ve tasarımıdır.

Takım malzemesinin doğru seçilmesi yüksek önem arzeder. Yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin SKK ile birleştirilmesi esnasında takım malzemesinin fiziksel ve kimyasal aşınmalara karşı direncinin yüksek olması gerekmektedir [5].

Takım malzemesinin seçiminde kaynak yapılacak malzemenin tipi ve ergime sıcaklığı dikkate alınmalıdır. SKK ile birleştirilecek malzemenin yüksek ergime sıcaklığında birleşme esnasında takım malzemesinin yüksek sıcaklıklara dayanması ve yeterli mukavemete sahip olmasının yanında fiziksel ve kimyasal aşınmalara da direnç göstermelidir. Takımın ilerleme hızı da takım malzemesi seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlardan biridir. Bu kaynak yönteminin birçok üstün özellikleri farklı alaşımlarda ve malzemelerde bu yöntemin kullanılmasına olanak sağlamıştır. Isıl işlem görmüş 6XXX ve 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının yanı sıra 304 paslanmaz çelikler ve titanyum alaşımların kaynağında, alaşımsız veya düşük alaşımlı çelik malzemelerden üretilen takımlardan yeterli verim alınamamıştır. Bu sebepten dolayı bu tür malzemelerin kaynak yapılabilmesi için üstün mekanik özelliklere sahip takım malzemelerin üretimi için çalışmalara başlanmıştır ve iyi sonuçlar elde edilmeye başlanmıştır [18]. SKK kaynağının uygulanmasında takım kısımları ve malzeme uygulamaları Şekil 3.3. ve Tablo 3.2.'de gösterilmiştir.



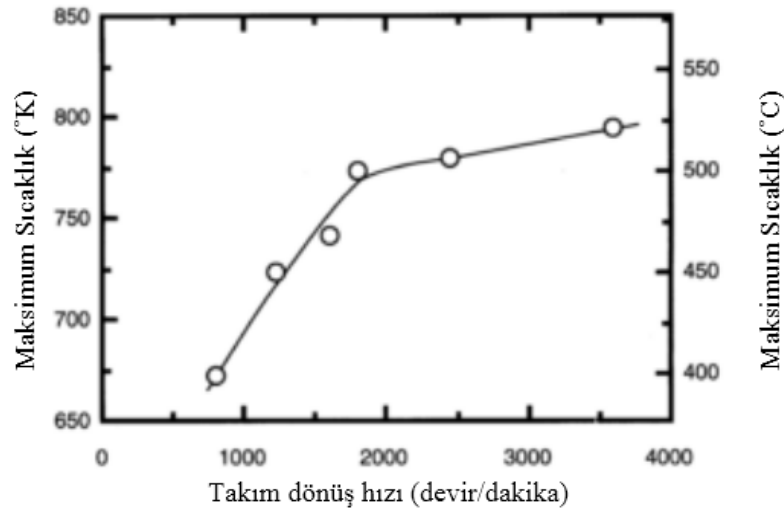
Şekil 3.3. Sürtünme karıştırma ucunun kesit içerisinde gösterimi [19]

Tablo 3.2. SKK yöntemiyle birleştirmelerde kullanılabilen çeşitli takım malzemeleri ve bu takımların maksimum çalışma sıcaklıkları [21]

Takım malzemesi	Maksimum çalışma sıcaklığı (°C)
H-13 (%0,32-0,45 C + %4,75-5,5 Cr + %0,2-0,5 Mn + %1,1-1,75 Mo + %0,8-1,2 Si + %0,8-1,2 V)	~538
Ferro-TiC SK (%35 TiC + %5,2 Cr + %4,1 Mo + %0,6 Ni + kalan Fe)	~593
MP-159 (%19 Cr + %25,5 Ni + %7 Mo + %35,7 Co + %3 Ti)	~593
Stellite 6B (%3 Ni + %2 Si + %3 Fe + %2 Mn + %28-32 Cr + %1,5 Mo + %3,5-5,5 W + %0,9-1,4 C + kalan Co)	~871
Ferro-TiC HT-6A (%43 TiC + %12,8 Cr + %0,7 Al + %0,7 Ti + kalan Ni ve Fe)	~982
MAR-M-246 (%0,15 C + %9 Cr + %10 Co + %2,5 Mo + %10 W + %1,5 Ta + %1,5 Ti + %5,5 Al + kalan Ni)	~1038
Mo-TZM (%0,5 Ti + %0,08 Zr + %0,02 C + kalan Mo)	~1315
Renyum	~1982
Tungsten	~1982

3.6. SKK Parametreleri

SKK tekniğinde kaynak hızı, takımın dönüş hızı, uygulanan dikey kuvvet, takım ekseninin açısı ve takım tasarımı bu tekniği kontrol eden bağımsız olan parametrelerdir. Isı üretim oranı, ısı graduanı alanı, soğuma oranı, x yönündeki kuvvet, tork ve harcanan güç faktörleri ise bağımlı parametrelerdir. Ancak, takım devir hızı ve ilerleme hızı en önemli olan parametrelerdir. Yüksek takım devri ile daha fazla dönüşten dolayı daha fazla sürtünme ısı elde edilir. Böylece daha fazla karıştırma işlemi yapılır. Yani, takımın dönüş hızı oluşan ısıyı kontrol eden ana faktördür. Şekil 3.4.'de takım dönme hızının oluşan ısı üzerine etkisini göstermektedir. Takım açısının iyi ayarlanması ile de karıştırıcı vidalı ucun yukarı çıkardığı malzemeyi takım omuzunun tutmasını ve karıştırılan malzemenin en üst ucundan en alt ucuna etkili bir şekilde gitmesini sağlar. Ayrıca, takım ucunda bulunan pimmsn batma derinliği ile takımın omuz kısmının pürüzsüzlüğü iyi kaynakların elde edilmesi için önem arzeder. Pimin malzeme içine girme miktarı pimin boyuyla ilişkilidir [22].



Şekil 3.4. Takımın dönme devrinin sıcaklık üzerine olan etkisi

SKK esnasında tork uygulanan yatay kuvvet, takım tasarımı, takımın eksen açısı, lokal kayma gerilmelerine, takım ile malzeme arasındaki sürtünme katsayısına ve takımın malzeme içine batma miktarına bağlıdır. Ölçülen tork değeri, diğer

parametreler sabit tutulduğunda plastik akma esnasındaki gerilmeler ve takım ile malzeme arasındaki kaymanın derecesi hakkında bilgi verir [13].

Termo Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB) takım omuzu ve plakaların ön yüzeyleri arasında oluşan sürtünme ve takımın malzeme ile oluşturduğu plastik deformasyon sonucu oluşur [23].

3.7. Takım Kuvvetleri

SKK kaynak işlemi esnasında kaynak takımı üzerine bazı kuvvetler etki eder.

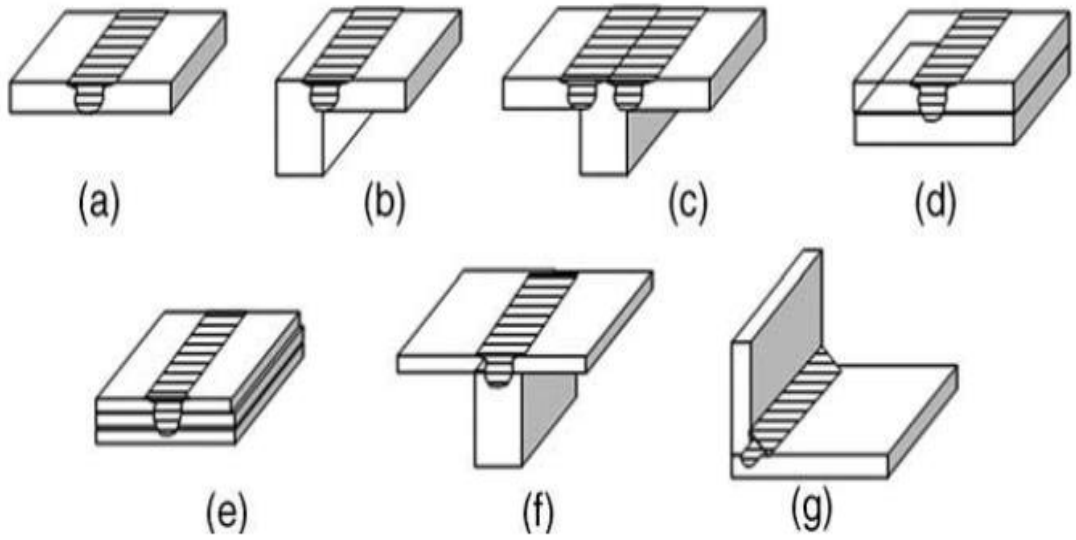
- Takım pozisyonunu parça yüzeyinde veya altında tutmak için aşağı dikey yönlü bir kuvvet uygulanır. Bu durum SKK makinelerinde yük kontrollüdür fakat birçok durumda bu yön önceden ayarlanmıştır.
- İlerleme kuvveti takımın hareketine göre pozitif olarak etkiler. Bu kuvvet malzemenin, hareketle ilerleyen takımın karşısında gösterdiği dirençtir. Takım çevresindeki malzemenin sıcaklığı artırılırsa bu kuvvet azaltılabilir.
- Yanal kuvvet ilerleyen takım yönüne dik yönde etki ve ilerleyen kaynağa yanına doğru pozitif tanımlanır.
- Takımı döndürmek için, değeri alt tarafa yönlü kuvvete ve sürtünme katsayısına ve/veya çevre bölgedeki malzeme akma dayanımına bağlı bir tork gerekir.

Takımın ve ona bağlı makine aparatının kırılmasına, aşınmasına ve yırtılmasını önlemek için kaynak döngüsünü, takım üstüne gelen kuvvetleri mümkün olduğunca azaltarak ve ani değişiklikleri önlemek gerekmektedir.

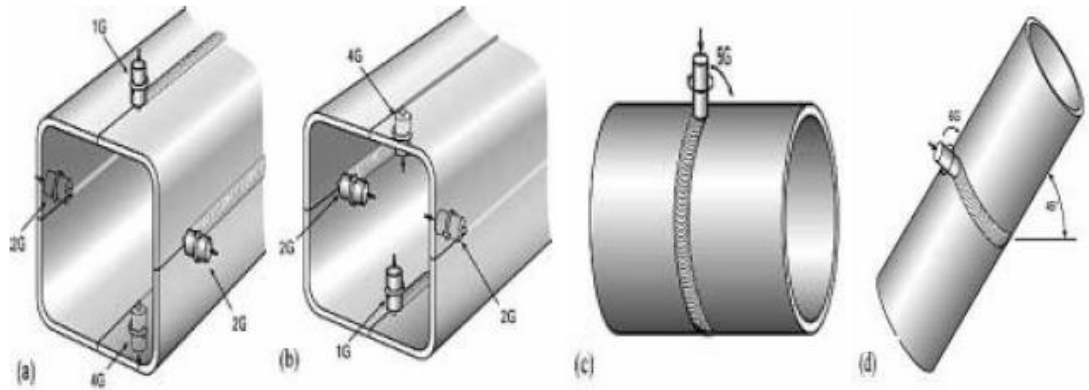
3.8. Kaynak Geometrileri ve Pozisyonları

SKK için en kullanışlı ve en uygun kaynak pozisyonu alın altına ve bindirmeli pozisyonlardır. Şekil 3.4.'da eşik kalınlığa sahip malzemelerin bir altlık görevi yapan plaka üzerine parçaların alın altına birleştirmek suretiyle kaynak şeklini

göstermektedir. Ardından, malzemeler klempler ile konumlanan bölge içine sıkıştırılarak kaynak esnasında oluşan kuvvetlerden etkilenerek ayrılmasını önler. Takımın ilk aşamada malzemenin içine dalarken yüksek kuvvetler ve torklar oluşur. Bu nedenle, parçaların sıkı bir şekilde konumlanması önem arzeder. Şekil 3.4.'te gösterilen ana tekniklerden başka bir pozisyon ile de SKK tekniğini uygulamak mümkündür.



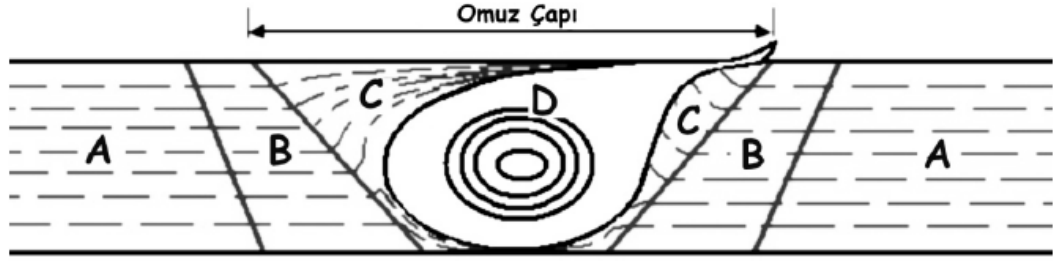
Şekil 3.5. Sürtünme karıştırma kaynağı alın ve bindirme kaynağı örnekleri [19]



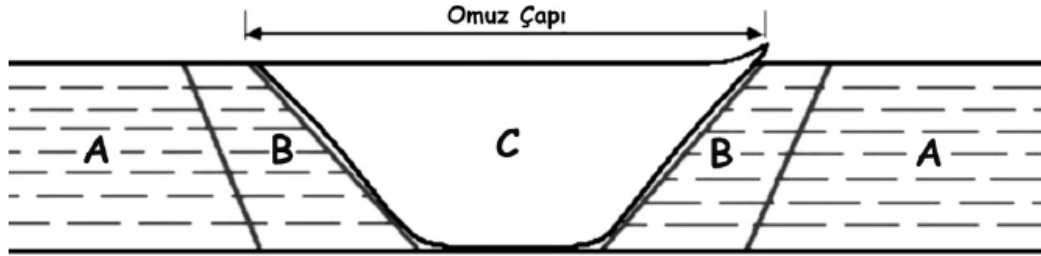
Şekil 3.6. Sürtünme karıştırma kaynağının boru kaynaklarında uygulaması [24]

Ayrıca, SKK yöntemiyle küt alın, farklı kalınlıklara sahip levhaların alın, bindirme, dirsek, iç ve dış köşe ile çift taraflı kaynakları gerçekleştirilebilir. SKK yöntemi yatay, dikey, aşağıdan yukarıya kaynak pozisyonlarında kullanılabilir.

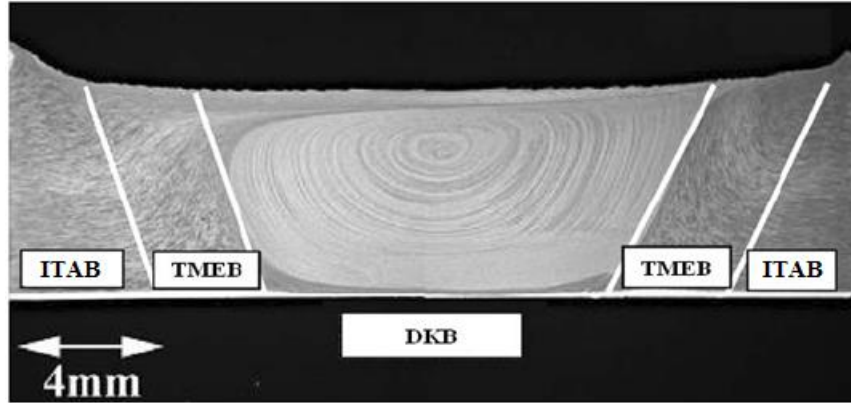
3.9. Kaynak Bölgesindeki Mikroyapı Değişimi



Şekil 3.7. Yeniden kristalleşmenin kolay olmadığı durumlarda (örneğin Al-alaşımları), sürtünme karıştırma kaynağı sonrası oluşan kaynak bölgesinin şematik gösterimi : (A) Baz Malzeme, (B) ITAB, (C) TMEB, (D) DKB (KB bu durumda B ve C bölgelerinden oluşur). [19]



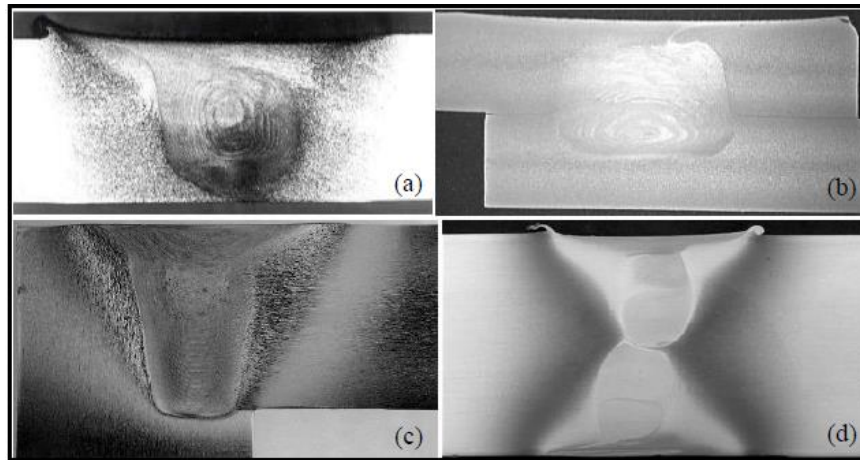
Şekil 3.8. Yeniden kristalleşmenin kolay olduğu durumlarda (örneğin saf Ti), sürtünme karıştırma kaynağı sonrası oluşan kaynak bölgesinin şematik gösterimi : (A) Esas metal, (B) ITAB, (C) DKB (KB bu durumda sadece C bölgesinden ibarettir). [19]



Şekil 3.9. Alüminyum alaşımlarında SKK sonrası oluşan kaynak bölgeleri [19]

Kaynak bölgesi, baz malzeme (BM), ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve karıştırma bölgesi (KB) olmak üzere üç farklı bölgeden oluşur. ITAB'de sadece ısı etkisi görülür ve yaşlandırma sertleştirilmesi olmuş Alüminyum alaşımlarında bu bölgede de ısının etkisi ile aşırı yaşlanma ve yaşlanmanın etkisiyle baz malzemeye göre bir sertlik kaybı meydana gelmektedir. KB'de ise ısı tesiri ve plastik deformasyon

meydana gelir. Bu bölgede de ITAB'da görüldüğü gibi, çökelme sertleştirmesine uğramış Alüminyum alaşımlarında ve bu bölgede oluşan ısının etkisi ile aşırı yaşlanma ve/veya partiküllerin çözünmesi ile baz malzemeye göre sertlik kaybı görülür. Yeniden kristalleşmenin zor olduğu durumlarda (örneğin Al-alaşımlarında) KB, dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) ve termomekanik olarak etkilenen bölge (TMEB) olmak üzere iki ayrı bölgeden oluşur. DKB'deki soğan halkasına benzeyen geometrik şekiller bu malzemelerin kaynak kesitinde ki özelliklerindedir. Yeniden kristalleşmenin kolay gerçekleştiği zamanlarda (örneğin saf titanyum) KB'nin tamamıyla yeniden kristalleşme görülür ve bu bölge DKB'den oluşur. Bu tür malzemelerin kaynak kesitinde normal şartlar altında iken, yeniden kristalleşmenin kolay olmayacağı durumlarda malzemelerde olduğu gibi DKB'deki soğan halkaları meydana gelmez. Fakat ısı girdisi az olursa bu soğan halkaları oluşabilir [24]. DKB, kaynak bölgesinin en belirgin kısmı olup plastik deformasyonun en yoğun şekilde görüldüğü, yeniden kristalleşmiş ve ince taneli bölgedir [25].

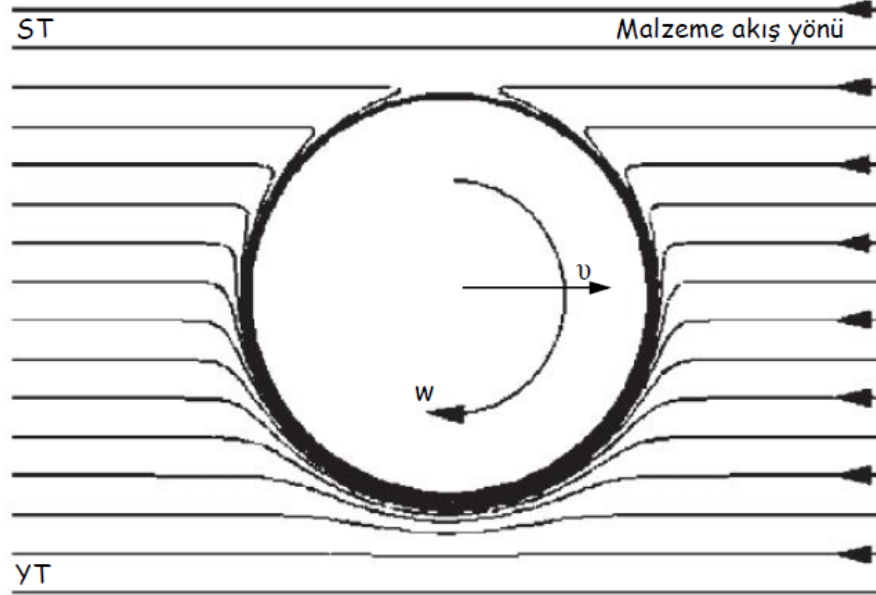


Şekil 3.10. SKK yönteminin uygulanabildiği kaynak geometrileri örnekleri; (a) küt alın birleştirme, (b) bindirme birleştirme, (c) köke birleştirme ve (d) çift taraflı birleştirme [18]

3.9.1. Kaynak bölgesinde malzeme akışı

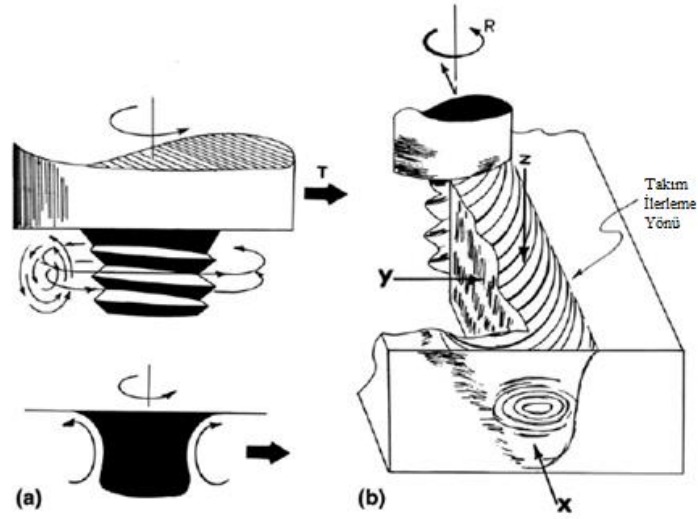
SKK'da kaynak bölgesinde bulunan malzemenin pimin eksenine etrafındaki plastik akış, viskoz akışkanın dönen bir silindir etrafındaki akışıyla aynıdır. Mükemmel bir kaynak elde edebilmek için, dönen pim sayesinde kaynağın yığılma tarafından yeteri kadar malzemenin taşınması ve batıcı ucun arkasındaki ilerleme yönünün

doldurulması gereklidir. SKK'da prensib olarak plastik akış iki boyutlu ve batıcı ucun süpürme tarafı, çember merkezinin üst tarafı ve takım dönme yönü ve ilerleme yönü oklarla gösterilmiştir. Akış doğrultusu malzeme akış çizgileri üzerinde oklarla gösterilmiştir [25].



Şekil 3.11. SKK'da pim etrafında oluşan plastik akışın iki boyutlu basitleştirilmiş gösterimi [25]

Genellikle batıcı ucun dönme hızı ve ilerleme hızı kaynak bölgesinde girdaplara sebep olan bir türbülans meydana getirir. Batıcı ucun kendi etrafında dönme ve kaynak hattı doğrultusu ilerleme hareketinin meydana getirdiği plastik akış kaynaklı olan bu girdaplar, SKK'da "soğan halkaları" olarak adlandırılır Şekil 3.12.'de bu oluşumlar şematik olarak gösterilmiştir. Batıcı ucun hareketinden (dönme ve ilerleme) kaynaklı görülen akış çizgileri kaynak bölgesinde oluşan soğan halkaları ve bu bölgedeki plastik akışa bağlı olarak meydana gelen sistematik yapısal özelliklerin görüldüğü kaynak kesiti görülebilir [26].



Şekil 3.12. Plastik akış ve takım ucuna hareketine bağlı olarak oluşan akış karakteristiği: (a) dönme hareketi, (b) ilerleme hareketi [26]

3.10. SKK Yönteminin Endüstriyel Uygulama Alanları

SKK Yönteminin uygulama alanları aşağıdaki gibidir.

- Havacılık
- Demiryolu
- Otomotiv
- Denizcilik
- Uzay

3.10.1. SKK'nın denizcilik alanındaki kullanımı

SKK yöntemi balıkçı teknelerin derin dondurucularını oluklu alüminyum panellerinin kaynaklanması ile kullanılmaya başlanmıştır. SKK yönteminin uygulama üzerindeki avantajları sert panellerin en az çökme ve yüksek verimlilikle, en ekonomik şekilde birleştirilebilirliğidir.

SKK yönteminin kullanıldığı yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panelleri bu kaynak yöntemi ile birleştirilmektedir. Bu yöntem diğer ergitme kaynaklarına göre avantajı ısı girdisinin az olması panel üzerindeki çökme ve

kalıntı gerilmelerinin en az düzeyde olmasına imkan sağlar. Hydro Marine Aluminum firması son üç yılda 70 kilometre uzunluğunda alüminyum ekstrüzyon panelini sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirmiştir [27, 28]. Şekil 3.13'te bu birleştirmelerin endüstrideki uygulamalardan örnekler gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Alüminyum panel ekstrüzyonları birleştirilmesi ve birleştirilmiş alüminyum panelleri

- Güverte, kenar, perde ve zemin panelleri
- Alüminyum ekstrüzyon profiller
- Gövde ve üst yapı
- Helikopter iniş platformu
- Yüzer yapılar
- Denizcilik ve taşımacılık yapıları
- Yelkenliler için direk ve yüzer bariyer
- Soğutma tesisleri

3.10.2. Havacılık endüstrisinde uygulama alanları

SKK yönteminin 2000'li yılların başından itibaren havacılık endüstrisine girmesiyle ile havacılık endüstrisinde hızlı gelişmeler yaşanmıştır. Perçinli birleştirmelerin yerine kaynaklı birleştirmeler uygulanmaya başlamıştır. Uygulamalarda plazma ark kaynağının yerini SKK yöntemi kullanılmaya başlanmıştır.

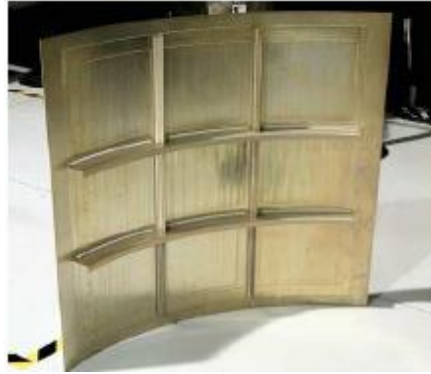
- Kanatlar, uçak gövdeleri ve kuyruk takımlarında
- Yakıt depoları soğutma ünitelerinde
- Askeri ve araştırma roketlerinde
- Uçuş yakıt depolarında

- Askeri uçaklar için harici yakıt tanklarında
- Hatalı MIG kaynaklarının tamirinde geniş kullanım alanı bulmuştur.

Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Eclipse 500 tipi uçaklarda kullanılması ile birlikte 100.000 saatlik uçuş anında 7000 \$ yakıt tasarrufu sağlanacağı hesaplanmıştır. Perçinli birleştirme yerine üst üste bindirme şeklinde yapılan ve yüksek mukavemetin elde edildiğinden kullanıldığı kısımlarda ağırlık düşüşünü meydana geldiği ve bu sayede yakıt tüketimin minimum seviyede olmasına imkan sağlamıştır [29, 30].



Şekil 3.14. SKK ile imal edilen Airbus A340-600 ve A380 modellerinde kanat kaburgaları [28].



Şekil 3.15. SKK ile imal edilen Eclipse 500 modeli kanat montajı [28].

3.10.3. Uçak ve uzay endüstrisinde uygulama alanları

1993 yıllarında araştırmalar sonunda uzay gemisi dış tanklarında kullanılan Al-2219 yerine daha hafif (tank başına 3402 kg ağırlık düşüşü) Al-Li 2195 alaşımı tercih edilmiştir. İlerleyen yıllarda bu alaşımın kaynaklı birleştirmelerinde tamir zorluğu ve

düşük mukavemet özelliklerinden dolayı başka kaynak yöntemlerine yönelinilmiş ve çalışmalar sonunda SKK kaynağı bu birleştirmelerde kullanılmıştır [27].

- Yakıt tanklarının üretiminde
- MIG kaynaklarının tamiri
- Askeri ve araştırma amaçlı roket üretimi
- Askeri araçların dış atık tankları üretimi
- Uçak kanat ve gövdelerinde

BÖLÜM 4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SKK İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİ

4.1. Alüminyum ve Bakır Alaşımlarının SKK ile Birleştirilebilirliği

Venkata ve arkadaşları %3,56 bakır içeren AA2219 alüminyum bakır alaşımının SKK ile birleştirilebilirliğinin mikroyapı ve çukurcuk korozyonu üzerinde olan etkisi farklı takım profilleriyle incelemişlerdir. Çalışmada, üçgen profile sahip takım ile yapılan deneylerde tane büyüklüğünün konik profile göre daha ince olduğu gözlemlenmiştir. Tane büyüklüğü ve çökelmelerin kaynak esnasında dağılmasının sertlik ve korozyon üzerine olan etkisinin büyük olduğu saptanmıştır. Ayrıca, AA2219 un üçgen profile sahip takım ile birleştirilen metallerde konik profile sahip takıma göre daha fazla çukurcuk korozyonu direnci olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise SKK esnasında sertleşme etkisi yapan bakır çökelmelerinin malzemenin plastik akışı esnasında morfoloji içinde daha fazla dağılmasına bağlanmıştır. Üçgen profile sahip takım ile üretilen daha yüksek sıcaklıktan dolayı çökelmelerin kaynak bölgesi içinde çözülmesine de neden olmaktadır. Üretilen bu ısı nedeniyle ITAB ve TMEB'daki tanelerin büyüme eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir [31].

Liu ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada %3,5 bakır ve %0,72 Lityum içeren 2060-T8 Al-Cu-Li alaşımının SKK ile birleştirilme esnasındaki takım devrinin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine olan etkilerini incelemiştir. Deneylerde, takımların devirleri arttıkça TMEB ve geriçekilme bölgesinin kaynak bölgesine doğru giderek artan bir şekilde uzadığı saptanmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda, kaynak bölgesinin mikrosertliği ana metalden çok daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek çekme dayanımı ise 800 devirde 480Mpa olarak elde edilmiştir. Ancak, tüm deneylerde maksimum uzama %2,8 ile sınırlı kalmıştır [32].

Wang ve arkadaşları %4,1 Bakır içeren 2024 Alüminyum alaşımının SKK ile birleştirilmesinin korozif çevrenin yorulma ve çatlak ilerleme davranışı üzerine olan etkisinin incelemiştir. Çalışmada korozif ortama maruz bırakılan 2024 Alüminyum SKK birleştirmelerinin yorulma ömürleri üzerine büyük etkisi olduğu görülmüştür. Korozif ortama maruz kalan birleştirmeler ile kaynak yapıldığı gibi yorulma testine tabi tutulan numunelere kıyasla yaklaşık yarı ömre sahip oldukları saptanmıştır. Korozif ortamdaki çatlak ilerleme oranları ise esas metale kıyasla yüksek olduğu gözlemlenmiştir [33].

Barlas ve Çolak'ın yapmış oldukları çalışmada %2 ve %8 Cu içeren farklı alüminyum döküm malzemelerin, SKK yönteminin esinlendiği ve çok daha önceden kullanılmaya başlanılan sürtünme kaynağıyla birleştirilebilirliğini incelemiştir. Araştırmacılar, %2 Cu içerikli alüminyum ana metalden %12, %8 Cu içerikli ana metalden ise %26 oranında düşük mukavemete sahip birleştirmeler elde edilebildiğini belirtmişlerdir [34].

Chen ve arkadaşları %4,2 Bakır içeren çok ince kalınlığa sahip (1,4 mm) 2A97 Alüminyum alaşımının SKK ile birleştirilme esnasındaki devir hızlarının mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine olan etkilerini incelemiştir. Kaynak bölgesi ve TMEB bölgesindeki tanelerin esas metale kıyasla önemli derecede düştüğü saptanmıştır. Ayrıca Birleşimlerdeki tanelerin devir aartıkça daha da büyüğü gözlemlenmiştir. TMEB ve kaynak bölgesinde tanelerin yeniden oluştuğu görülmüştür. Çekme mukavemetleri ise 800 devirde en yüksek değeri almış ve ardından azalma eğilimine girmiştir. Tüm ayrılmalar kaynak bölgesinin ortasından gerçekleşmiştir [35].

Sinhmar ve arkadaşları %4,8 bakıra sahip AA2014 Alüminyum alaşımının SKK ile birleştirilmesinin 931 devirdeki mekanik özellikleri, mikroyapıları ve korozyon dayanımının üzerine olan etkilerini incelemiştir. Birleştirmelerde hem normal hem de su ile soğutma yapılarak etkileri incelenmiştir. Çalışmada, küçük çökelmelere sahip küçük taneler soğutma suyu ile soğutulmuş deneylerde elde edilmiştir. Kaynak bölgesinin mikrosertlikleri esas metale yakın olduğu görülmüştür. Ancak ITAB

bölgesindeki mikrosertliklerde bir düşüş gözlemlenmiştir. ITAB bölgesindeki sertlikler su soğutma uygulaması yapılmış deneylerde soğutma yapılmamışa göre daha fazla olduğu görülmüştür. Çekme mukavemetleri ise esas metale göre düşüktür. Ancak, su soğutma uygulaması yapılan deneylerde diğerlerine göre daha yüksek çekme mukavemeti sergilediği görülmüştür. Esas metal korozyona karşı hassastır çünkü sürekli bir zincir şeklinde olan çökelmelerin alüminyum ile galvanik çift oluşturmaktadır. Ancak bu çökelmelerin süresiz bölgelerinde daha az galvanik çift olduğu için korozyona karşı daha fazla dirençli olduğu görülmüştür [36].

Aydın ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada 2024 Al alaşımlarının farklı ısıtma işlemi uygulayarak SKK kaynağını uygulamışlardır. Bu malzemelere çekme mukavemeti özelliklerini incelemiştir. Bu çalışma sonunda çekme mukavemetlerinin malzemeye uygulanan çökelme sertleşmesi süreleri artık çekme mukavemetlerinde de artış gözlemlenmiştir ve en düşük çekme mukavemeti 2024- W iken en yüksek çekme mukavemeti 2024-T6 da elde edilmiştir (190 derecede 10 saat yaşlandırma)kaynaklı malzemelerin çekme mukavemet deneyinde uygulanan tüm malzemelerin esas metalinden düşük çıkmıştır. Ancak 2024-O birleşimiesas metale yaklaşık eşit çıkmıştır. Kopma uzamaları ise kaynaklı numunelerin bütün kaynak uygulanmamış esas metallerden çok daha düşük çıkmıştır [2].

Kaçar ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada SKNK yöntemi kullanılarak, levha halindeki 5754 kalite alüminyum malzeme çifti bakır ara tabaka kullanarak (Al-Cu-Al) 1000 ve 1600 dev/dak takım dönme hızında 3 ve 5 saniye karıştırma zamanı kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirmelerin kaynak kabiliyetini belirlemek için mekanik özellik ve mikroyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ara tabaka kullanılmadan birleştirilen aynı cins malzeme çiftinden elde edilen bulgularla mukayese edilmiştir. Bakır ara tabaka kullanılarak SKNK yöntemiyle elde edilen birleştirmelerin mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu bulunmuştur. Çalışmada kullanılan alüminyum malzeme çifti 2 x 40 x 100 mm ebatlarında kesilerek kaynaklı birleştirme için hazır hale getirilmiştir. Bakır ara levha ise 0,5 x 40 x 40 mm ebatlarında kesilerek birleştirme için hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numunelerinin yüzeyleri yağ, kir ve pisliklerden arındırılmıştır. Birleştirme için hazırlanan

numuneler araya bakır tabaka gelecek şekilde üst üste bindirilerek freze alt tablasına tutturulmak için geliştirilen kalıp içerisine yerleştirilmiştir. SKNK yöntemiyle birleştirilen Al-Cu-Al numunelerin çekme makaslama yükü taşıma kapasiteleri artan uç devir sayısı ve karıştırma süresiyle arttığı tespit edilmiştir. En düşük çekme makaslama yükü taşıma kapasitesi 1000 dev/dak. 3 saniye karıştırma süresi ile elde edilirken, en yüksek ise 1600 dev/dak. 3 saniye karıştırma süresi ile elde edilmiştir. Metalografik incelemeler neticesinde karıştırıcı ucun etrafındaki yarı katı-sıvı haldeki akıcı metalde çok yüksek oranda plastik deformasyon olduğu tespit edilmiştir [37].

Rao ve arkadaşları sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen AA2219 serisi Al-Cu alaşımında, takım geometrisinin birleştirmelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine olan etkisini incelemişler, konik karıştırıcı ucla üçgen uca göre daha iyi birleştirmeler gerçekleştirilebildiğini tespit edilmiştir [38].

D. Trimble ve arkadaşları sürtünme karıştırma kaynak ile birleştirilen AA2024-T3 alaşımının takım geometrisinin, takım ilerleme ve dönme hızının kaynak karakterizasyonu üzerine etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada kombinasyonu mümkün olan en yüksek kaynak hızlarında kaliteli sürtünme karıştırma kaynaklarının üretimi için etkin kaynak parametrelerini belirlemek amacıyla AA2024-T3 plakalarının elde edilmesi; SKK işlemi sırasında deney parçası ve iş parçası malzemenin yumuşatılması için ve aynı zamanda kaynak birleştirme için gerekli olan ısı için bir ön ısıtma sağlamak için aşağı doğru dövme işlemi ile elde edilmiştir. Sonuçlar etkili parametreleri ve takım kullanılarak 355 mm / dk'lık bir yüksek kaynak hızı iyi bir kaynak kalitesine ulaşmak mümkün olduğunu göstermektedir. Bu hızda üretilen Kaynaklar nispeten iyi süneklik (% 8.5 kopma uzaması) ve nispeten yok denebilecek kadar iç ya da yüzey kusurlarının azlığı ile ana malzeme bunun % 93.9 arasında bir gerilme mukavemeti elde edilebildiğini göstermektedir. Kaynak hızı; kaynak kuvvetine ve takım geometrisi ile sınırlandırılmaktadır. Bu nedenle, kalıp tasarımları daha iyi yüksek kaynak hızına neden olabilir [39].

Biallas G ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada Al 2024-T3 ve Al 6013-T6 alaşımlarını kullanarak yapmış oldukları SKK'lı birleştirmeler sonucunda; Boylamasına kalıntı gerilmelerin karıştırıcı uç çapından, takım dönme hızından ve ilerleme hızından bağımsız olarak, her zaman enlemesine gerilmelerden daha büyük olduğunu, hem boylamasına hem de enlemesine kalıntı gerilmelerin kaynak boyunca "M" şekline benzer bir dağılım gösterdiğini, maksimum çekme gerilmelerinin kaynak merkezine yaklaşık 10 mm uzaklıktaki, ITAB'da olduğunu, küçük basma kalıntı gerilmeleri ise ITAB'a bitişik kaynak dikişinde olduğunu, kaynak boyunca kalıntı gerilme dağılımının kaynağın üst kısmında ve kök kısmında benzer olduğunu, büyük çaplı takım kullanımı, "M" şeklindeki kalıntı gerilme dağılımını genişlettiğini, kaynak hızının ve takım dönme hızının azalmasıyla çekme kalıntı gerilmelerinin büyüklüğünü de azalttığını, 30x80 mm ve 60x80 mm ebatlarında küçük numunelerin kullanılması durumunda, boylamasına maksimum çekme kalıntı gerilmeleri, kaynak metalinin akma mukavemetinin %30-60'ı oranında ve ana metalin akma mukavemetinin %20-50'si oranında olmuştur. Açık bir şekilde, SKK birleştirmelerinde kalıntı gerilme değerleri kayda değer bir şekilde ergitme kaynaklarındakinden daha düşüktür [40].

Squillace ve arkadaşları AA 2024-T3 alüminyum alaşımının konvansiyonel TIG kaynağı ve SKK ile birleştirilerek, kaynak bölgesinin mikro yapıları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonunda TIG ergitme kaynağında kaynak esnasında ısı girdisinin SKK kaynağına göre daha fazla olduğu tespit edilmiş. Böylece TIG kaynağının ITAB bölgesi SKK'ya göre fazla olduğundan ve kaynak bölgesinde tane yapılarının daha büyük olduğu gözlemlenmiştir [17].

Şık ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada AA2024 alüminyum alaşımının 4 mm kalınlığındaki levhaları kaynak ederek mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Bunun için öncelikle pim 2344 sıcak iş takım çeliğinden yapılmıştır. Frezeye bağlanan kısım çapı 20 mm, omuz ölçüsü 20 mm ve boyu 100 mm'dir. Karıştırıcı uç (pim) malzemesi, ergitme derecesi alüminyum malzemesinin yaklaşık üç katı olan 2344 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiştir. İstenilen ölçülere getirilen pimin vida uçları M4 paftası ile çekilerek helisel diş açılmıştır. Kaynak esnasında Pim kaynak işlemi

sırasında kaynak omzu, kaynak edilecek malzeme yüzeyine yaklaşık olarak 1 mm kadar batması sağlanmıştır. Yapılan çalışma sonucundakaynak bölgesinden alınan vicker sertlik sonucu 1500 dev/dak-200 mm/ dak'da en düşük sertlik değeri ise 2500 dev/dak-120 mm/dak'da görülmüştür. Sürtünme karıştırma kaynağında alınan sertlik değeri esas metalden kaynak bölgesine doğru alınmış ve bu bölgeye doğru sertlik artışının meydana geldiği görülmüştür. Kaynak bölgesinde sertlik değerinin yüksek çıkmasının nedeni tekrar kristalleşme ve küçük tane boyutundan olduğu anlaşılmıştır [41].

Talwar ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada 2024-T3 alüminyum alaşımı levhalarına SKK kaynağı sonrası herhangi başka bir işlem uygulanmamış olan malzemelerin çekme mukavemetlerinin değeri ana metale göre %73 akma mukavemet değeri ise %91 civarlarında olduğu tespit edilmiştir. Uzaması ise %10 olarak hesaplanmıştır. SKK kaynağı yapılmış birleştirmelerin kök kısımlarında 0,5 mm derinliğinde bir talaş kaldırma işleminden sonra çekme mukavemetinin %88'e, sünekliliğinin ise %41'e çıktığı ve akma mukavemeti değerinde ise herhangi bir değişikliğinin olmadığı tespit edilmiştir [42].

Kumagai ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada 2024-T51 alüminyum alaşım malzemelere ekstrüzyon uygulanmış daha sonra çözeltiye alma ve gerdirme işleminden sonra T351 doğal yaşlandırma yapılmıştır. Bu işleminden sonra silindirik bir karıştırıcı uç ile 800 dev/dak takım dönme hızında ve 125 mm/dak kaynak hızında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Kaynaklı bağlantılara 96 saat lik bir doğal yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Çekme deney sonuçları ana metale göre birleştirmeler karşılaştırıldığında %83 akma mukavemeti ise %79 uzamanın ise %10 olduğu tespit edilmiştir [43].

Colligan ve arkadaşları 2195-T8P4 alüminyum alaşımı levhaları, 200 ve 230 dev/dak takım dönme hızlarında, 30-94 mm/dak arasında değişen kaynak hızlarında birleştirip, alaşım malzemelerine çekme deneyleri uygulamışlardır. Kaynaklı bölgelerin çekme mukavemetleri ise kaynak hızının belli bir değere kadar artmasıyla orantılı bir şekilde artmış kaynaklı kısımlar ana metale göre çekme değerleri %58-

%66 arasında değişmiştir. Kaynak yapılan kısımların akma mukavemetleri kaynak hızıyla doğru orantılı bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir [44].

Strangwood ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada 2014-T6 alüminyum alaşımı levhaları 80-117 mm/dak aralığında farklı kaynak hızlarında SKK ile birleştirme işlemini gerçekleştirdikten sonra kaynak edilen malzemeleri 160°C da yaklaşık 80 saat a yakın bir sürede yalandırma işlemine tabi tuttuktan sonra KM de sertlik değerinin arttığını gözlemlenmiştir. Yaşlandırılan malzemelerin sürelerinin artırılmasıyla ve birleştirilmesi sonucunda sertlik değerinin azaldığı tespit edilmiştir. SKK sonrası yapılan birleştirmeler sonunda ITAB da sertlik değerinin en düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir [45].

Bosquet ve arkadaşları AA2024 –T3 malzemelerinin SKK ile birleştirilmesinin mikro yapı mikro sertlik ve korozyon hassasiyetini incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda TMEB ile itab arasındaki bölgenin korozyona karşı en hassas yer olduğu saptanmıştır. Aynı zamanda bu bölge yüksek mikro sertlik göstermiştir [46].

Uzun yapmış olduğu çalışmada %25 SiC takviyeli 2124 alüminyum alaşım matrisli levhaları 120 mm/dak kaynak hızında ve 800 devir/dak takım dönme hızında alın alına kaynak işlemini gerçekleştirmiştir. Bu işlemde sonra kaynak bölgesinin mikro yapı incelemesi yapmış ve ana malzeme, ITAB, TMEB, KM yapılarından oluştuğunu gözlemlenmiştir. SiC partiküllerin ince ve iri taneli yapıya sahip olup tam homajen bir yapı olmasada ana metal de ve kaynak kısmında dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir. KM de bazı iri taneli SiC yapıları gözlemlenmiş ve bu partiküllerin bulunduğu kısımlarda çatlaklıklar gözlemlenmiştir. Sertlik değerlerine bakıldığında ana malzemenin 250 HV iken kaynak bölgesinin 240 HV olduğu tespit edilmiştir [47].

Schneider ve Nunes 8 mm kalınlığındaki 2195-T81 alüminyum alaşımı levhaları, 200 dev/dak takım dönme hızında ve 152 mm/dak kaynak hızında, SKK yöntemiyle alın alına birleştirmiştir. Kaynak metalinin mikroyapı incelemelerinde, eş-eksenli bantlardan meydana gelen soğan halkaların olduğu görülmüştür. Araştırmacılara göre

bu yapı, yığıma kenarından daha çok ilerleme kenarında daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir [48].

4.2. Diğer Alüminyum Alaşımların SKK ile Birleştirilebilirliği

Elangovan ve Balasman AA6061 Al alaşımlarının farklı takım ucu profili ve farklı takım omuzu çaplarına sahip takımları ile SKK yapmıştır. Bu çalışma sonucunda kare uçlu profile sahip takım omuz çapına bağlı olmaksızın kusursuz bir kaynak alanı sergilediği saptanmıştır. Ayrıca takımın omuz çapı açısından bakıldığında 18 mm omuz çapına sahip olan takım uc profiline bağlı olmaksızın en iyi kaynak alanını vermiştir. 18 mm omuz çapına sahip ve kare uçlu pimli takım ile yapılan işlemde en iyi çekme deney sonucunu vermiştir [49].

Barlas ve Uzun Cu/CuZn30 çiftlerinin SKK ile birleştirilebilirliğinin ve mikroyapı ve mekanik malzemeleri üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda mikro yapının 6 ana bölgeye ayrıldığı görülmüştür. Bunlar ana metali, ITAB, karışan bölge, TMEB ve bakır kısmındaki ısı tesiri altındaki CuZn30 esas metali ayrıca birleşimin çekme mukavemeti çiftlerin ana metallerinin çekme mukavemetlerinde yüzeyin % 46 düşük olduğu saptanmıştır. Ayrıca kökün ve yüzeyin ve eğme mukavemetleri sırasıyla bakırın ana metalinden %47 daha büyük CuZn30 dan %31 daha düşük olduğu saptanmıştır [34].

Kumar ve Kailas 7020 T6 Al –Zn-Mg-çökeltme sertleştirilebilen alaşımın sürtünme karıştırma kaynağı esnasında ki kaynak takımının malzeme kaynak akışı ve kaynak oluşumu üzerine çalışmışlardır. Bu çalışma sonucunda 2 tip malzeme akışı olduğu bulunmuştur. Bunlardan biri takım omuzunun oluşturduğu akış ve pim ucunun oluşturduğu akışlardır. Takım ucundaki pim kısmı malzemeyi kat kat transfer ederken omuz kısmı ise malzemeyi toplu olarak hareket etmesini sağlar. SKK da soğan halkalarının oluşumu pin yoluyla oluşan akış ve takımın malzemenin düşey hareketinden dolayı oluşur. Deneyde aksenal kuvvetin 8.1 KN kadar çıktığı belirlenmiştir [50].

Thomas ve arkadaşlarının yapmış oldukları SKK kaynağının çelikler üzerine uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada düşük C'lu çelik ve % 12 Cr içeren paslanmaz çeliğin ilerleme hızı en optimum 1.7-4 mm/saniye olduğu saptanmıştır. Bu değer diğer hafif malzemelere göre düşüktür. Uygulamada en çok karşılaşılan problemler takımın aşınması ve malzemenin çok iyi sıkıştırılmamıştır.

Zhang ve arkadaşları 5052 Al alaşımlarını SKK ile birleştirerek kaynak parametrelerinin micro yapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda takımın dönüş hızı arttıkça mikro yapının daha da kabalaştığı saptanmıştır. Ayrıca takım dönüş hızı arttıkça kaynak birleşimlerinin mukavemetinde de düşüş görülmüştür. Ancak takımın dalış zamanı bileşim mukavemetleriyle bağlantılı değildir. 1541 devirde çekme makaslama ve çapraz çekme mukavemetleri 2847 N, 902N olarak değerleri bulmuşlardır [51].

Liu ve arkadaşları CuT2/Al 5A06 malzeme çiftlerinin birleştirilmesinin mikro yapı üzerine etkisini incelemiştir. Malzeme çiftlerinin 950 devir ve 150 mm/dk ilerleme hızıyla en yüksek kaynak kalıt S₁ yakalanmıştır çekme mukavemeti en yüksek 296 MPa olarak hesaplanmış bu değer T2 bakırın çekme mukavemetinin %100 ve 5A06 Al %94'üne eşittir. Yapılan XRD analizlerinde kaynak bölgesinde yeni bir Cu-Al intermetalik oluşmadığı gözlemlenmiştir. Kaynak bölgesinin mikro yapısı esasen bakır ve Al'un plastik difüzyonundan oluşmuştur [52].

Kafalı'nın yapmış olduğu çalışmada ise 3,6 mm kalınlığındaki T6 ısıl işlemi görmüş 6013 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. AA6013-T6 levhasına GermanAerospace Center (DLR) tarafından FSW yapılmıştır. Kaynak işlemi üç boyutlu CNC frezede özel bir uç ve omuz kullanılarak yapılmıştır. Kaynak 1000 mm/dak, 1200 devir/dakika'da gerçekleştirilmiştir. Uç ve omuzun çapları sırası ile 6mm ve 18mm'dir. Tekniğin en önemli parametreleri olan uç (pim) ve omuz geometrileri çalışmaya uygun olacak şekilde Pro-engineer çizim programı kullanılarak çizilmiştir. Yapılan çizim kullanılarak prototip uç ve omuz üretimi gerçekleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı esnasında kaynak merkezinden 6 mm ve 15 mm uzaklıklardan ayrıca omuz üzerinden sıcaklık değerleri alınmıştır. Kaynak işlemi

yaklaşık 1,5 dakika sürmüştür ve bu süre zarfında sıcaklık değerleri termokapullardan alınan değerler doğrultusunda bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Kaynak merkezinden uzaklaştıkça ısı değerlerinde azalma gözlenmiştir. Kaynak hücum ve firar kenarı taraflarından eşit mesafede alınan sıcaklık değerleri arasında ihmal edilebilir bir fark görülmektedir. Bu da kaynak işlemi esnasında sıcaklığın kaynak yapılan malzemelere eşit oranda yayıldığını göstermektedir. Ayrıca kaynak hücum ve firar kenarlarındaki sıcaklık farkının az oluşu kaynak ucunun dönüş yönünün, kaynak yapılan malzemede ortaya çıkan sıcaklığa etki etmediği saptanmıştır. Kaynak merkezine 6 mm uzaklıktan ve omuz üzerinden alınan değerlerde sırasıyla en yüksek sıcaklık değerleri 500°C ve 480°C bulunmuştur. Bu değerler göz önüne alındığında alüminyumun ergime sıcaklığı olan 660°C sıcaklığı asla çıkmadığı görülmüştür. Kaynak işlemi esnasında ergime gerçekleşmemiştir [53].

İpekoğlu'nun yapmış olduğu çalışmada AA6061 ve üstün mukavemet özellerine sahip AA7075 Al-alaşımı levhalar O-temper ve T6-temper şartlarında kendi içlerinde birleştirilmiş ve bu birleştirmeler üzerinde kaynak sonrası ısıl işlemin etkisi araştırılmıştır. 300x130mm ebatlarına lazerle kesim yöntemiyle getirilmiş levhaların kaynak yüzeyleri kaynak öncesinde eğe ile temizlenmek suretiyle kaynak parametreleri kullanılarak hadde yönüne dik olacak şekilde her bir Alaşım cinsi hem O-temper şartında hem de T6-temper şartında birleştirilmiş ve toplamda 16 adet kaynaklı parça elde edilmiştir. Kaynak işlemi 1 micron hassasiyete sahip üç eksenli CNC tezgahında 15 mm çaplı omuza ve üzerine M4 vida dişi açılmış pime sahip batıcı uç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan batıcı uç AISI H13 (EN X40CrMoV5-1) sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş olup aşınma direncini artırmak amacıyla imalat sürecinden sonra ısıl işleme tabi tutularak sertliği 52 HRC'ye çıkarılmıştır. Kaynak işlemi sırasında Al-alaşımı levhaların sabit bir şekilde tutulması için CNN tezgahına uygun bir şekilde tasarlanarak imal edilmiş. Parametrik çalışmalar neticesinde, 6061 Al-alaşımı levhalarda her iki temper durumu (O ve T6) için 1500 devir/dakika takım dönme hızı ve 400 mm/min ilerleme hızı, 7075 Al-alaşımı levhalarda her iki temper durumu (O ve T6) içinse 1000 devir/dakika takım dönme hızı ve 150 mm/min ilerleme hızı iyi sonuç veren uygun

parametreler olarak belirlenmiştir. 6061-O ve 6061-T6 Al-alaşımı levhalardan elde edilen kaynaklı bağlantıların içyapı incelemeleri neticesinde, bu levhaların her iki temper şartında da SKK ile kaynak hatası içermeyecek şekilde birleştirilebileceği sonucu ortaya çıkmıştır. 6061-O Alaşımı levhalardan elde edilen kaynaklı parçalarda, tüm kaynak parametrelerinde kaynak bölgesinde baz malzemeye nazaran sertlik artışı söz konusu olmuş olup bu sertlik artış oranı artan devir ve ilerleme hızı kombinasyonlarında daha düşük mertebelerde olmuştur. Bu levhaların kaynak merkezinde en yüksek sertlik değerini 750/150 numunesi verirken (56,4 HV), en düşük sertlik değerini 1500/400 numunesi vermiştir (47,9 HV). Buna karşın 6061-T6 kaynaklı levhalarda ise tüm kaynak parametrelerinde kaynak bölgesinde baz malzemeye nazaran bir sertlik kaybı söz konusu olmuştur. 1250/300 ve 1500/400 numunelerinin sertlik profilleri birbirine çok yakın sonuç vermiştir. Kaynak bölgesindeki en düşük sertlik değerini 1000/200 numunesi vermiştir (72 HV). Ayrıca 6061-T6 levhalardaki kaynak bölgesinin, karıştırma bölgesinin her iki tarafında sertlikte belirgin bir düşüşün söz konusu olduğu ITAB'lerin varlığından dolayı, 6061-O levhalara göre daha geniş olduğu da görülmüştür. O-temper şartındaki levhaların kaynak bölgesi yaklaşık olarak omuz çapı olan 15 mm iken, T6-temper şartındaki kaynaklı levhalarda bu bölge yaklaşık olarak iki katına çıkmakta ve 30 mm civarında olmaktadır. Hem 7075-O hem de 7075-T6 Al-alaşımı levhalardan elde edilmiş olan tüm kaynaklı numunelere ait mikrosertlik dağılımlarını göstermektedir. 7075-O kaynaklı levhalarda, tüm kaynak parametrelerinde kaynak bölgesinde baz malzemeye göre sertlik artışı söz konusu olmuş olup kaynak parametrelerinin dördünde elde edilen maksimum sertlik değerlerinin yaklaşık olarak birbirine eşit olduğu görülmektedir. 7075-T6 kaynaklı levhalarda ise tüm kaynak parametrelerinde kaynak bölgesinde esas metale nazaran bir sertlik kaybı söz konusu olmuştur. 1000/150, 1250/200 ve 1500/300 numunelerinde bu sertlik düşüşü birbirine yakın olmakla beraber, 750/100 parametresinde daha yüksek düzeyde bir düşüş söz konusu olmuştur. Bu numunelerin kaynak bölgesindeki en düşük sertlik değerini 100 HV olarak 750/100 numunesi vermiştir. Ayrıca 7075-T6 levhalarda kaynak bölgesinin 7075-O levhalara göre daha geniş olduğu da şekil üzerinden okunabilir. Bu durum, 6061-T6 levhalarda da olduğu gibi, 7075-T6 kaynaklı levhalardaki karıştırma bölgesinin her iki tarafında sertlikte belirgin bir düşüşün söz konusu olduğu

ITAB'lerin varlığından dolayıdır. O-temper şartındaki levhaların kaynak bölgesi yaklaşık olarak omuz çapı olan 15 mm iken, T6-temper şartındaki levhalarda bu bölge yaklaşık olarak iki katına çıkmakta ve 30 mm civarında olmaktadır [8].

Sayer'in yapmış olduğu çalışmada, yüksek korozyon direnci, soğuk şekillendirilebilme ve ısıl işlem yapılabilme özelliklerine sahip AA 6063 (AlMgSi0.5) alüminyum alaşımı SKK yöntemi ile birleştirilmiştir. Araştırmada farklı kaynak parametrelerinin bağlantının dayanımı ve kaynak bölgesindeki mikro yapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen plakalarda kaynak sonrasında herhangi bir çarpılma veya deformasyon oluşmamıştır. Ancak kaynak parametrelerine bağlı olarak kaynak bölgesinde hem gözenekli hem de gözeneksiz mikroyapı oluşmuştur. Bu çalışmada kullanılan 5mm kalınlığındaki AA 6063 tipi alüminyum alaşımı için, en uygun karıştırıcı takım dönme hızı 1600 dev/dak olarak belirlenmiştir. Mikroyapı incelemelerinde, kaynak bölgesinde yeniden kristalleşmeden dolayı homojen ve küçük taneli yapı oluştuğu görülmüştür. Kaynaklı numunelerin çekme mukavemetinin, ana malzemenin (AA 6063) çekme mukavemetine oranı %78 olmuş ve çekme testi sonrasında numunelerin %94'ü ITAB bölgesinden kopmuştur. Karıştırıcı uç üzerinde bulunan pim helis açısı çökelti sertleşmesi ve yaşlandırma sonrasında etkili olmuştur. Kaynaklı numunelerin çekme mukavemet değerleri, aynı şartlarda yaşlandırılan ana malzemenin (AA 6063) çekme mukavemet değerlerinden %18 daha fazla olmuştur [54].

Barlas'ın yapmış olduğu çalışmada Cu ve CuZn37 levhalar 22 mm/dakika sabit kaynak hızında, 400, 600, 800, 1000 devir/dakika takım dönme hızlarında SKK yöntemiyle alın-alına birleştirmiştir. Ayrıca aynı kaynak parametrelerinde, Cu ve CuZn37 levha konumları değiştirilmiş, böylece takım dönme hızının ve levha konumunun birleştirme özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Birleştirmelerin kaynak bölgelerindeki sıcaklık dağılımları ölçülmüş, mikroyapı karakterizasyonları yapılmış, sertlik ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda, birleştirmelerin kaynak bölgelerinde Cu-ITAB, CuZn37- ITAB, CuZn37-TMEB ve KM mikroyapıları belirlenmiştir. KM'lerin Cu ve CuZn37 malzemenin karışımından meydana geldiği ve bu bölgedeki baskın yapı değişiminin CuZn37 tane incelenmesi

olduğu görülmüştür. Takım dönme hızının KM ve ITAB'lardaki tane büyüklüğüne sistematik bir etkisi belirlenememiştir. Ancak, levha konumunun daha karmaşık bir KM oluşumunda etkili olduğu görülmüştür. Takım dönme hızının artmasıyla KM'lerdeki sıcaklıkların arttığı, fakat Cu ve CuZn37 malzemelerin ergime sıcaklıklarına ulaşmadığı tespit edilmiştir. XRD incelemeleri göstermiştir ki, sıcaklık artışı ve karıştırıcı ucun karıştırma hareketi kaynak bölgelerinde Cu_5Zn_8 metaller arası bileşiklerin oluşumuna neden olmuştur.

Sertlik ölçümlerinde, ITAB'lardaki sertliklerin Cu ve CuZn37 ana metallere göre azaldığı, KM'lerdeki sertliklerin ise Cu ana metalden yüksek ve CuZn37 ana metalden düşük olduğu görülmüştür. Ancak, değişken kaynak parametrelerinin bu bölgelerin sertlikleri üzerine etkileri belirlenememiştir. Çekme ve eğme deneylerinde en yüksek mukavemet özellikleri, 800 devir/dakika takım dönme hızında Cu levhanın ilerleme, CuZn37 levhanın yığıma kenarına sabitlendiği birleştirmede elde edilmiştir. Bu birleştirmenin kaynak performansının Cu ana metalle benzer, CuZn37 ana metalden ise düşük olduğu tespit edilmiştir. Mekanik deney sonuçları göstermiştir ki, takım dönme hızı ve levha konumu birleştirme özelliklerini etkilemiştir [18].

Sato ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada 1050 Al-alaşımı levhaların SKK ile birleştirilmeleri esnasında kaynak yüzeylerindeki oksit tabakanın kaynak bölgesinde zig zag şeklinde oluşan oksit tabakasını incelemişlerdir. Çalışmada, 2 mm kalınlığında 1050-H24 Al-alaşımı levhaları 600-2400 devir/dakika dönme hızlarında ve 87-720 mm/dakika ilerleme hızlarında SKK ile birleştirmişlerdir. Çalışma sonrasında, kaynak bölgesinde oluşan oksit filminin artan ısı girdisi ile parçacık şeklinde dağılım gösteren bir yapının, kök bükme testi sonucunda sürekli oksit filminin sebep olduğu anlaşılmıştır. Oksit filminin varlığının bir tür birleşme yetersizliğinden kaynaklanan ve çatlak oluşumuna olanak sağladığı anlaşılmıştır [55].

Çakır'ın yapmış olduğu çalışmada ise sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirme işlemi için 4 mm kalınlıkta Alüminyum 1050 ve %99.99 saflıkta

elektrolitik bakır kullanılmıştır. Alüminyum ve bakır malzemeler 100x150 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Birleştirme sırasında parçalarla temas halinde olan karıştırıcı uçta yüksek sıcaklıklar oluşacağından, işlem sırasında aşınma ve sertlik direncini koruyabileceği düşünülerek takım malzemesi (1.3343 tip) yüksek hız çeliği seçilmiştir. Üretimi yapılan karıştırıcı uca sertleştirme ısı işlemi yapılarak 62 HRC sertlik değeri kazandırılmıştır. Takım omuz çapı 18 mm, pim ise M4x3.87 mm olacak şekilde silindirik olarak imal edilmiştir. Deney optimizasyonu için değişik takım dönme ve ilerleme hızlarında deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde karıştırıcı uç alüminyum ve bakır levhaya 0 (sıfır) olarak konumlandırılmıştır. Yapılan birleştirmelerde düşük çekme dayanımları elde edilmiştir. Kaynak yüzey görünümünde sorun olmamakla birlikte içyapıda boşluklar oluşmuştur. Boşluklar ve kaynaklanmanın tam oluşmaması kaynaklı parçaların mekanik değerlerinin düşük olmasına neden olmuştur. Kaynak yüzeyleri incelendiğinde genelde kaynaklarda boşluk, çukur, birleşme yetersizliği gibi kaynak hatalarına rastlanılmamıştır. Bütün numunelerde takım kaydırılmasından (1-1,5-2 mm) dolayı kaynak bölgesi alüminyum tarafında oluşmuştur. Kaynak kesitleri incelendiğinde 2440/50/2 numunesinde karışımın alüminyum tarafında çok fazla oluşmadığı, bu durumun da mekanik değerleri olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Çekme deneyi sonucunda kopmalar genellikle kaynak bölgesinde ve alüminyumun ısı tesiri altındaki bölgesinde (ITAB) gerçekleşirken kırılma mekanizması sünek-gevrek olarak gerçekleşmiştir. Kopmaların literatüre uygun olarak alüminyum tarafında olması, kaynak bölgesinin alüminyum tarafında oluşması ve Al ana metalinin çekme mukavemetinin Cu ana metalinden düşük olmasına bağlanmıştır. Birleştirmelerin sertlikleri incelendiğinde; düşük mekanik özelliklere sahip numunede kaynak bölgesinde ortalama sertliğin daha az olduğu ortaya çıkmıştır. Yüksek mukavemetli numunede sertlik değerleri incelendiğinde kaynak bölgesinde ortalama sertliğin daha fazla olduğu, kaynak bölgesinde görülen sertlik artışlarının, bakırca zengin yapılara ve metaller arası oluşan intermetalik fazlara kaynak bölgesindeki sertliklerdeki dalgalanmalar ise mikroyapının heterojen olması sonucuna ulaşılmıştır [56].

Taban ve Kaluç'un yapmış olduğu çalışmada, SKK kaynağı (FSW) yöntemiyle kaynak edilmiştir. Kaynak edilecek parçaların boyutları 6.45x150x350 olan

alüminyum alaşımları, yatay oluk pozisyonunda I-Alın (Küt Alın) kaynak ağız biçiminde kaynak edilecek şekilde hazırlanmışlardır. AW 5083--AW 5083 eşalaşım çifti biçiminde MIG ve TIG kaynaklı bağlantılar çift taraflı olarak birer pasoda kaynak edilerek 4340 (%0.40 C, %0.70 Mn, %0.30 Si, % 0.80 Cr, %1.80 Ni, %0.25 Mo) çeliğinden yapılmış 20 mm çapında, ucunda 3.6 mm boyunda M5 sol vida açılmış pim bulunan ve omuzlu özel takım kullanılmıştır. FSW yöntemi ile birleştirilmiş levhada çarpılma görülmemiştir. En büyük çarpılmanın MIG kaynaklı levhada görülmüştür. Uygulanan kaynak yöntemi katı faz kaynak yöntemi olduğu için malzeme sıcaklığı, kaynak metalinde 400- 450°C'ye ulaştığından alüminyum alaşımının ergime sıcaklığının altındadır, ısı girdisi ergitme kaynak yöntemlerine göre, FSW 4kaynağında herhangi bir çarpılmayla karşılaşılmamıştır. TIG kaynaklı AW 5083- H321 levhanın akma mukavemeti ortalama 205, çekme mukavemeti 291 MPa olarak bulunmuştur. TIG ve MIG de kopmalar kaynak metalinde gerçekleşmiştir [57].

Meran ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada 2,5 mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik levhaları, 1000 dev/dak takım dönme hızında ve 40, 50, 63, 80, 100 mm/dak kaynak hızında SKK ile alın-alına kaynaklanabilirliğini araştırmışlardır. Kaynak için 1.2379 soğuk iş çeliğinden titanyum nitrür ile kaplanmış WC den yapılmış iki farklı takımdan yararlanılmıştır. Titanyum nitrür ile kaplanmış pim kırılmıştır. Fakat WC den yapılan uç 63 mm/dak kaynak hızında kırılmamış ve iyi bir birleştirme sonucu vermiştir. Çekme deneyinden elde edilen sonuçlara göre 63mm/dak kaynak hızında yapılan birleştirmeye göre ana metale yakın değerler elde edilirken diğer birleştirmelerdeki kaynak hızlarında ki yapılan kaynaklarda ana metale göre sonuçlar elde edilmiş [58].

BÖLÜM 5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Alüminyum Bakır Alaşımlarının Dökümü

SKK ile birleştirme işleminde iki farklı alaşımlı malzeme kullanılmıştır. Bu malzemelerin dökümü ve birleştirmelerini benzer hale getirilmesi için işlem basamakları aşağıda verilmiştir.

5.1.1. Döküm işlemleri

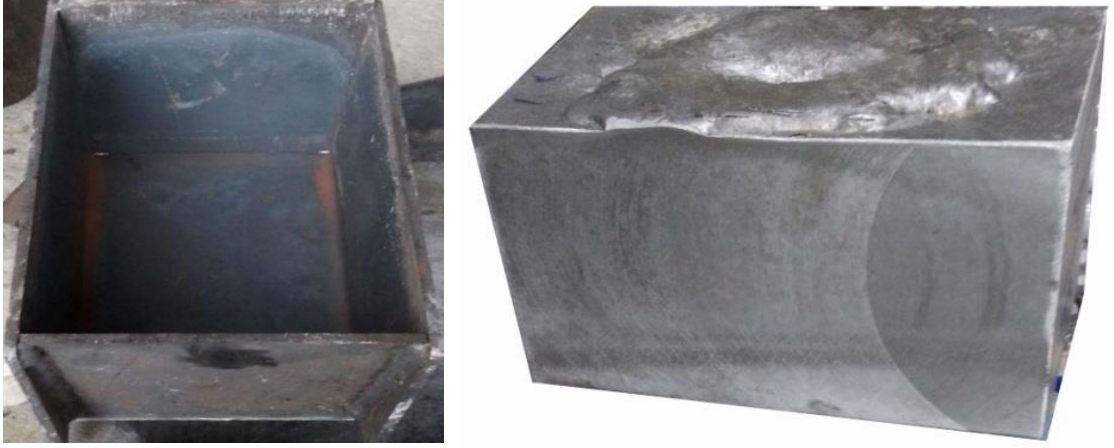
SKK yöntemi ile birleştirilecek levhalar için 5 mm kalınlıklarında %99,34 saflıktaki Al ve %2-%4,5 bakır alaşımlı levha malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemelerden alüminyum piyasadan temin edilmiş ve %2-%4.5 bakır alaşımı endüstriyel potada döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Kimyasal içerikleri spektral analiz ile belirlenmiştir. Saf alüminyum, %2 ve %4.5 Cu alaşımına ait spektral analiz sonuçları Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan alüminyum alaşımları

Element	Cu	Si	Mn	Mg	Mo	Fe	Al.
%4,5 Cu-Al	4,503	0,107	0,002	0,001	-	0,213	Kalan
%2 Cu-Al	2,05	0,098	0,0019	0,001	-	0,182	Kalan
Saf Al	-	-	-	-	0,035	0,455	Kalan

Al-%4.5,%2 bakır alaşımını dökmek için öncelikli olarak ilk aşama da 4 adet konik kap üretilmiştir. Döküm işleminin yapılacağı pota içerisine 40 kg Al-bakır alaşımı için 38.2kg saf Al ve 1.8 kg bakır teli kullanılmıştır. Daha sonra piyasadan temin edilen %99,34 saflıktaki alüminyumun, içerisine %4.5 bakır ilave ederek Al-bakır alaşımını elde etmek için endüstriyel grafitli pota içerisine saf alüminyumunu 660°C'de ertirilmiştir. Daha sonra %4.5 bakır teli ergiyen Alüminyum içerisine atılmış ve

yaklaşık olarak 700-730 °C'de Al-%4.5 bakır alaşımı elde edilmiştir. Aynı işlemleri tekrardan %2'lik bakır için 40 kg pota da 39.2 Al ve 0.8 kg bakır ilave ederek döküm işlemini gerçekleştirilmiştir. Dökülen blok ve kalıplar Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan kalıp ve dökülen blok

5.1.2. Malzemelerin levha halinde SKK'ya hazırlanması

SKK yöntemiyle Alüminyum bakır alaşımli levhalarının birleştirilmeleri öncesinde bazı ön hazırlıklar gerçekleştirilmiştir. Bu hazırlıkları şu şekildedir;

- Konik kap içerisine dökülen Al-Cu alaşımı kalıp içerisinden çıkarıldıktan sonra freze tezgahında tüm yüzeyler eşit olacak şekilde düzeltilmiştir.
- SKK sırasında Al ve alaşımları levhaların alın-alına gelecek yüzeyleri, dikey freze tezgâhında talaş kaldırma suretiyle düzeltilmiş, eğe ve zımpara ile çapaklar giderilerek ve 200x100x5 mm ebatlarına getirilmiştir.
- Birleştirmelerin kaynak bölgelerinde meydana gelen sıcaklıkların tespitinde kullanılacak olan termokupul uçlarının gömüleceği, 2.75 mm çapında kör delikler Al/Cu alaşımları levhalara matkapla açılmıştır.
- Mekanik deneylerde kullanılmak üzere testerede kesilen plakalar, CNC freze tezgâhında işlenmiştir. Şekil 5.2'de çekme numunelerinin işlenmesi esnasındaki görüntü verilmiştir.



Şekil 5.2. Testerede plakalar halinde kesilen çekme deneyi numunelerinin CNC de işlenmesi

5.2. SKK Yöntemiyle Birleştirmede Kullanılan Malzeme ve Donanımlar

5.2.1. Karıştırıcı takım özellikleri

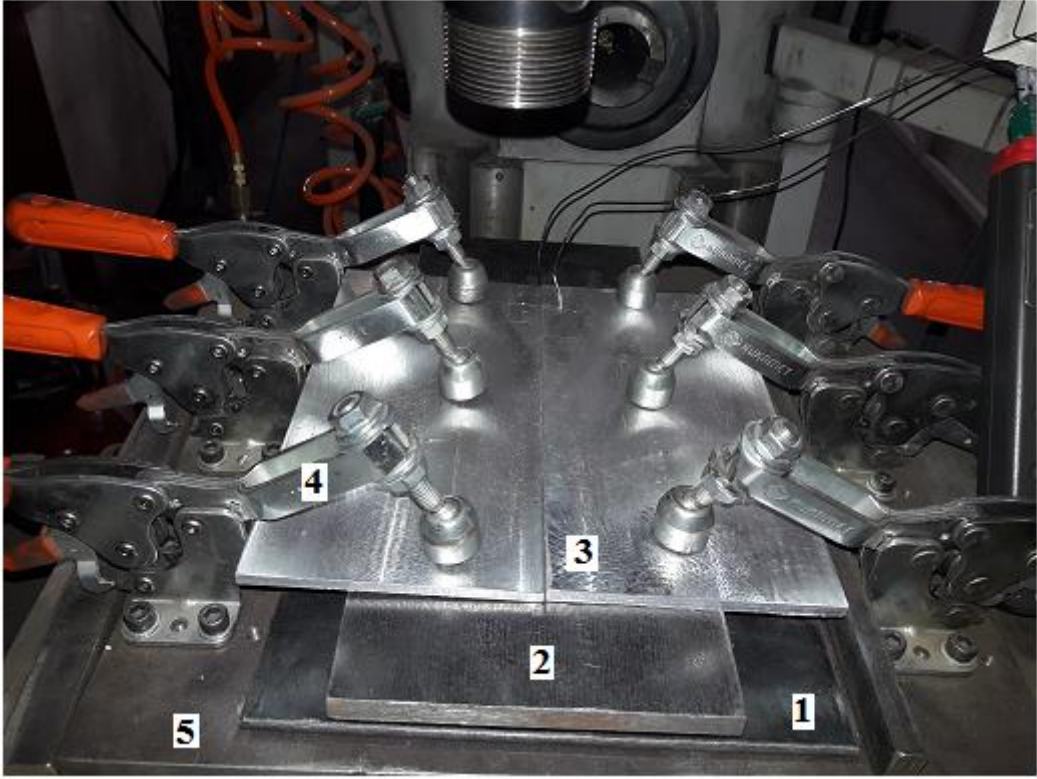
Alüminyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinde levha yüzeyleri ile temas halinde olan takımda yüksek sıcaklık değerlerine ulaşabileceğinden, yöntemin uygulanışı arasında aşınma ve sertlik direncini koruyabileceği düşünülen 3340 tip yüksek hız çeliği (HSS) takım malzemesi olarak seçilmiştir. Takım imalatında kullanılacak olan 25 mm çapındaki 3340 HSS malzeme piyasadan temin edilmiştir. Karıştırıcı uç, whitworth kesici takım kullanılarak 7:10 koniklikteki yüzeye, 0,6 mm diş derinliğinde, sağ ve sol helis dişler, açılarak elde edilmiştir.



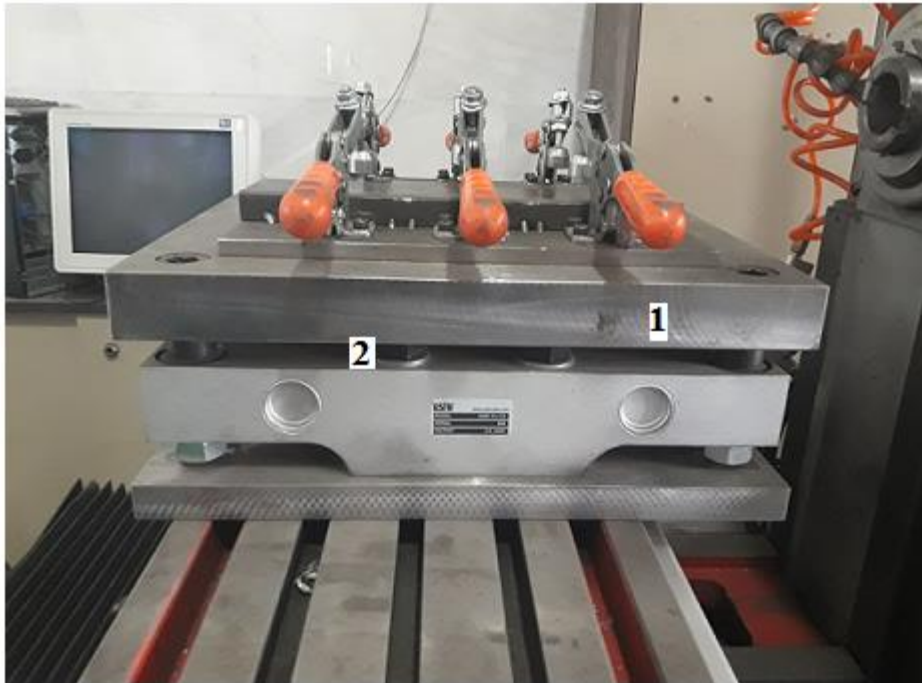
Şekil 5.3. Alüminyum alaşımlı levhaların SKK ile birleştirilmesinde kullanılan takım

5.2.2. Birleştirilecek levhaları sabitleme kalıbı

SKK yöntemiyle birleştirme işleminin başlangıcında, dönen karıştırıcı ucun levha yüzeylerinden içeri batması ve omuz kısmının levha yüzeylerine basmasıyla, levhalar yatay ve dikey eksenlerde hareket etmek isteyecektir. Levhaların bu şekildeki hareketleri kaynak süresince de devam edeceğinden ve beklenen özelliklerde kaynak yapmak mümkün değildir. Bundan dolayı, birleştirme esnasında alüminyum bakır alaşımlı levhaların hareket etmelerini önlenmek amacıyla, kalıp çeliğinden imal edilmiş sabitleme kalıbıyla hareket etmesi önlenmiş olur. Bununla birlikte, birleştirme sırasında levhalarda meydana gelebilecek geometrik bozuklukların engellenmesini sağlayan, paslanmaz çelikten yapılmış bir dayama levhası da bu sabitleme kalıbıyla beraber kullanılmıştır. Birleştirilecek levhalar, bu dayama levhası üzerine yerleştirilerek sabitlenmiştir.



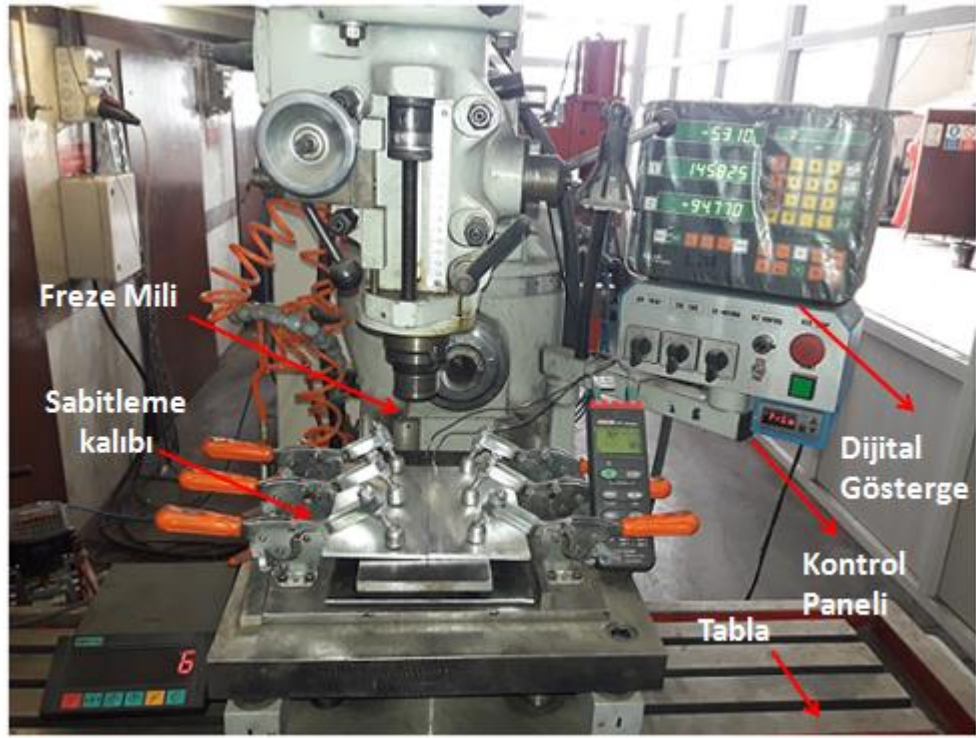
Şekil 5.4. Alüminyum ve alaşımlı levhaların SKK yöntemiyle birleştirilmesinde kullanılan sabitleme kalıp levhası (1ve2) Al/Cu levhaları(3), Tutucu baskı kolları(4), Sabit kalıp(5)



Şekil 5.5. Al/Cu alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinde kullanılan sabitleme kalıbı(1), Yük hücresi(2)

5.2.3. Dikey freze tezgâhı

Alüminyum alaşımı levhaların birleştirme işlemleri için, V-kayış kasnak tahrikli bir dikey kalıpcı frezesi kullanılmıştır. Kaynak hızı, invertör sürücü ile kontrol edilebilen tabla ile sallanırken, freze milinin dolayısıyla takımın devir/dakika cinsinden takım devir değeri bir potansiyometre ile ayarlanmaktadır. Takımın boşa ve kaynak sırasındaki takım dönme değerleri ise, dikey freze monte edilmiş bir dijital takometreden okunmaktadır. Ayrıca, şekil 5.6'da dikey kalıpcı freze tezgahının bazı kısımları gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Alüminyum levhaların birleştirilmelerinde kullanılan dikey kalıpcı freze tezgahı

5.2.4. Termokupul

SKK yönteminin uygulanması esnasında, özellikle takım omuz kısmının Al ve alaşımları levhaların yüzeylerine sürtünmesi sonucu, kaynak bölgesinde sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Bu sıcaklık artışın ölçülmesi için 2 mm çapta, 2.75 mm derinlikte K-tipi (KromNikel-Krom) termokupullar kullanılmıştır. Termokupullardan alınan sıcaklık değerlerinin tespiti ve kaydedilmesi için ise şekil 5.7.'de gösterilen,

aynı anda 4 kanaldan ölçüm yapabilen, (-200°C) – (+1370°C) sıcaklık ölçüm aralığına sahip Voltcraft marka K204 tip dijital sıcaklık veri kaydedici kullanılmıştır.



Şekil 5.7. SKK sırasındaki sıcaklıkların ölçümünde kullanılan sıcaklık veri kaydedici ve K-tipi termokupullar

5.3. SKK Yöntemi ile Al/Cu Alaşımların Levhalar Halinde Birleştirilmesi

SKK yöntemiyle birleştirme işlemleri, birleştirme işleminin gerçekleştirilmesi aşamalarından meydana gelmektedir. Dolayısıyla bu başlıkta, bu iki aşamada gerçekleştirilen işlemlerin detaylı bir şekilde tanımlamaları yapılacaktır.

5.3.1. Ön hazırlıklar

Yapılan iş/işlem sırası aşağıdaki gibidir;

- SKK için kullanılan takım, freze miline bağlanmış ve kaynak yönü doğrultusunda 2° lik bir eğimde yatırılmıştır.
- Al-Cu alaşımları levhaların birleştirilecek yüzeyleri tiner ile temizlendikten sonra levhalar dayama levhası üzerine yerleştirilmiştir. Karıştırıcı uç eksenini ile kaynak eksenini arasında kaçıklık olmayacak şekilde ayarlama yapıldıktan

sonra, levhalar freze tablasına bağlı sabitleme kalıbına hareket etmeyecek şekilde sabitlenmiştir.

- Kaynak bölgesindeki sıcaklık değerlerinin ölçülmesi için Al-Cu alaşımların levhalara açılan kör deliklere termokupul uçları gömülmüş ve termokupullar kaynak esnasında hareket etmeyecek şekilde sabitlenmiştir.
- Yukarıda sıralanan, birleştirilecek levhalar ile kullanılan makine ve donanımın hazır hale getirilmesini kapsayan işlem basamakları, birleştirilen tüm numuneler için uygulanmış ve birleştirme işlemlerine hazır hale getirilmiştir.
- Al ve alaşımlarının levhaların SKK yöntemiyle birleştirilebilirliğinin incelenmesinin yanı sıra, kaynak parametrelerinin birleştirme mikroyapı ve mekanik özelliklerine olan etkilerinin belirlenmesi için tablo 5.2’de gösterilen kaynak parametrelerinden yararlanılmıştır.

5.3.2. Kullanılan SKK parametreleri

Takım dönme hızı ile benzer ve farklı Al/Cu alaşımlı levhaların birleştirilmesinde kaynak parametreleri belirlenmiştir. Kaynak hızı (takım ilerleme hızı), takım batma açısı ve takım dönme yönü ise sabit kaynak parametreleri olarak belirlenmiştir. Birleştirmelerde kullanılan bu parametreleri, aşağıdaki gibi kısaca özetlemek mümkündür.

Takım dönme hızı, takım dönme hızının birleştirmelere olan etkisinin belirlenmesi amacıyla 800, 1000, 1200 dev/dak takım dönme hızları kullanılmıştır.

Al ve alaşımlı levhaların SKK ile birleştirilmelerinde kullanılan sabit parametreler ise şunlardır;

- Kaynak hızı = 32 mm/dak
- Takım eğim açısı = 2°
- Takım dönme yönü = Saat yönü

Çalışma sırasında freze mili ve dolayısıyla takım, arkaya meyilli olarak çalıştırılmış ve düşeyle yaptığı aç 2° olarak ayarlanmıştır.

Karıştırıcı ucun levhaların içine batırılmasından sonra freze tablası, daha önceden belirlenen 32 mm/dakika sabit kaynak hızında kaynak doğrultusu boyunca hareket ettirilmiştir. Böylece, omuz kısmının malzeme yüzeylerine teması ile oluşan sürtünme ısı ve karıştırıcı ucun dönme hareketi ile plastikleşen alaşımlı levhaların birleştirilmesine bağlanmıştır.

Birleştirmelerde kullanılan bu kodlamaları bir kaç örnekle açıklamak gerekirse; Takım dönme hızının 800, 1000, 1200, dev/dak, kaynak hızının 32mm/dak olduğu 2-2, 4.5-4.5, 4.5-2, kodlu numuneler alüminyum içerisindeki bakır alaşımının yüzde olarak oranı tanımlanmıştır.

Deney levhaların alın altına temas halindeki kenarlarının bitişine yakın, tabla hareketine sonlandırılmış ve karıştırıcı uç levhalardan çıkarılarak SKK yönteminin uygulanması tamamlanmıştır.

Tablo 5.2. Al/Cu levhaların birleştirmeleri için kullanılan SKK parametreleri

Numune kodu	Takım dönme hızı dev/dak	Kaynak hızı mm/dak	Takım dönme yönü
800/32/2-2	800	32	Saat yönü
1000/32/2-2	1000	32	Saat yönü
1200/32/2-2	1200	32	Saat yönü
800/32/4.5-2	800	32	Saat yönü
1000/32/4.5-2	1000	32	Saat yönü
1200/32/4.5-2	1200	32	Saat yönü
800/32/4.5-4.5	800	32	Saat yönü
1000/32/4.5-4.5	1000	32	Saat yönü
1200/32/4.5-4.5	1200	32	Saat yönü

Bu şekildeki kodlamalar sayesinde, tez kapsamında açıklanan deney sonuçlarının hangi kaynak parametrelerinde gerçekleştirilen numune için kullanıldığını kolayca anlamak mümkün olacaktır.

5.1.2 başlığında açıklanan birleştirme öncesi hazırlıklar tamamlandıktan ve kaynak parametreleri belirlendikten sonra Al/Cu levhaların SKK yöntemiyle birleştirilmeleri, aşağıdaki işlem sırası takip edilerek gerçekleştirilmiştir:

Takım 800, 1000, 1200 dev/dak takım dönme hızlarından birine ayarlanarak döndürülmüştür. Dönen karıştırıcı uç ile birleştirilecek ve elde edilen deney levha yüzeylerindeki kaynak hattı merkezi içerisine doğru batırılmıştır. Batırma işlemi, karıştırıcı ucun levha yüzeylerine ilk temasından itibaren 2.5 mm derinliğe ininceye kadar devam edilmiştir. Böylece, omuz kısmının da bir miktar levha yüzeylerine girmesi sağlanmıştır.

Al/Cu alaşımlı levhaların alın altına temas halindeki kenarlarının bitişine yakın, tabla hareketine son verilmiş ve karıştırıcı uç levhalardan çıkarılarak SKK yönteminin uygulanması tamamlanmıştır.

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Çekme Deneyi

Alüminyum, %2-%2, %4.5-%4.5 ve %4.5-%2 bakır içeren alaşımlardan her devir hızı için 3'er adet çekme deney numunesi hazırlanmıştır. Birleştirmeler için, ölçüleri şekil 6.1'de gösterilen çekme deney numuneleri, kaynak yönüne dik ve alın altına birleşme yüzeyleri merkezde olacak şekilde CNC freze de kesim yöntemiyle elde edilmiştir. Şekil 6.2'de numunelerin konumları ve şekil 6.3'te işlenme sonrası görüntüleri sunulmuştur. Enine çekme deneyleri bilgisayar donanımlı ve çekme deney yazılımına sahip SHIMADZU marka cihazla gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri sonunda, çekme yazılımından elde edilen çekme mukavemetleri (σ_c) MS-Excel programında ayrıca değerlendirilmiş ve sonuçların doğrulaması yapılmıştır. Sonuçta, her bir parametredeki birleştirme ve ana metaller için elde edilen sonuçların ortalaması alınarak çekme özellikleri belirlenmiş ve sonuçlarda sunulmuştur.

Çekme mukavemetlerinin hesaplanmasında kullanılan bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_c = \frac{F}{A_0}, A_0 = D \times H \quad (6.1)$$

Burada;

σ_c : Çekme mukavemeti (MPa),

F : Maksimum yük (N),

A_0 : Numune kesit alanı (mm²),

D : Numune genişliği (mm),

H : Numune kalınlığı (mm),

olarak ifade edilmektedir.

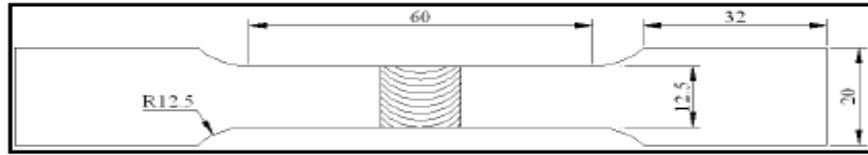
$$\%uzama = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \quad (6.2)$$

Burada;

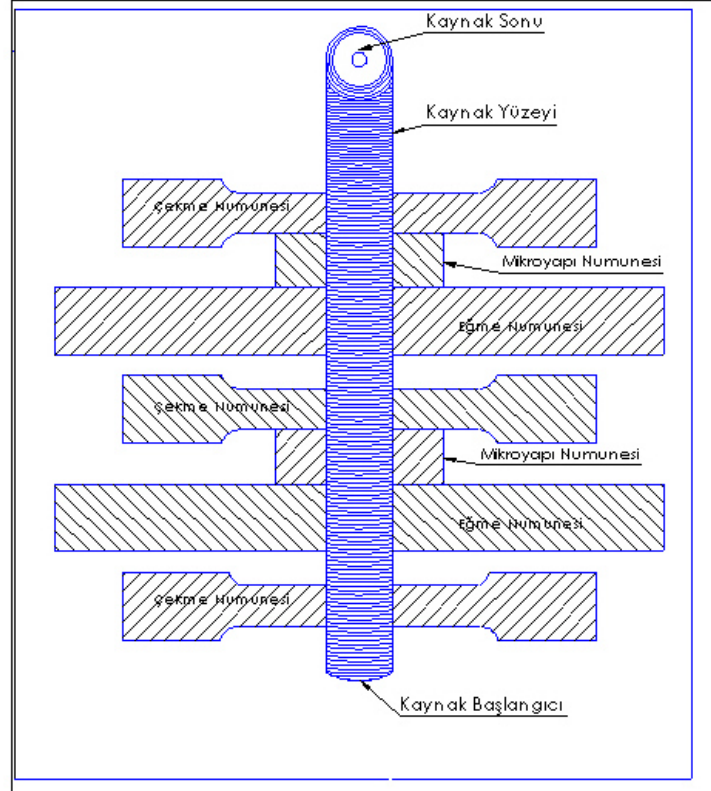
Δl : numunedeki uzama miktarı (mm),

l_0 : numunenin ilk ölçü boyu (mm)

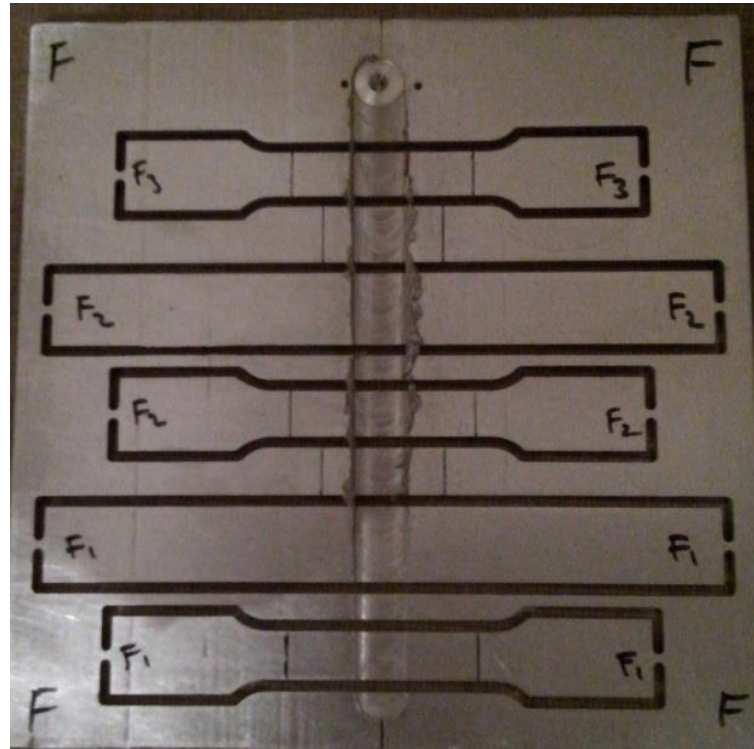
olarak ifade edilmektedir.



Şekil 6.1. Çekme deney numunesinin geometrik detayları (ölçüler mm)



Şekil 6.2. Birleştirilen Al-Cu alaşımı levhalardan çekme ve eğme numunelerinin yerleşim düzeni



Şekil 6.3. SKK yöntemiyle birleştirilen 1200/4.5-4.5 Cu alaşımı levha

6.2. Eğme Deneyi

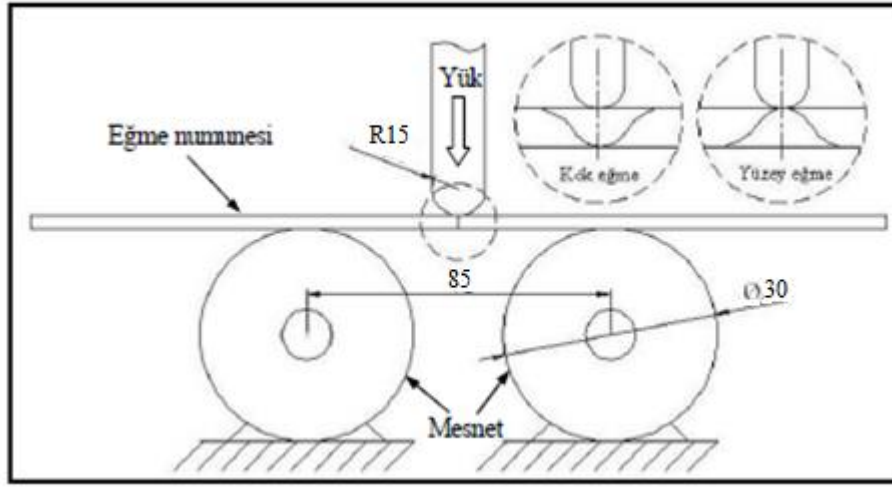
Birleştirilen Al ve alaşımlı levhaların kaynak yüzeyi ve kök kısmı mukavemetleri ile varsa kaynak hatalarının tespiti için üç-nokta 180° (U-şekli) eğme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, Al alaşımları, ana metallerin eğme deneyleri de yapılarak, birleştirmelerin kaynak özellikleri ana metallerle karşılaştırılmıştır. Aynı kaynak parametresine sahip her bir kaynaklı malzemedenden iki adet, toplamda dokuz kaynaklı malzemedenden 18 adet ve 4 adette kaynaklı ana metalden yüzey ve kök eğme numunesi hazırlanmıştır. Üç-nokta eğme deneyi numuneleri kaynak yönüne dik ve alın altına birleşme yüzeyleri merkezde olacak şekilde, frezede işlenerek elde edilmiştir. Şekil 6.4'te gösterilen SHIMADZU marka çekme ve eğme cihazında, numuneler 180°, yani U-şekli alıncaya veya çatlama, kırılma görülünceye kadar 20mm/dak hızında eğme deneyi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.4. Çekme-eğme deney cihazı

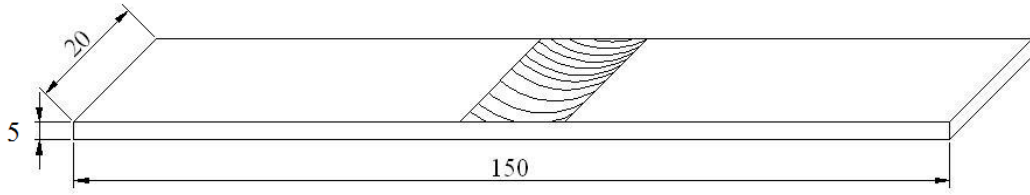
Barlas, benzer bir eğme deneyi çalışmasında Cu ve CuZn37 levhaların kaynak yüzeyi ve kök kısmı mukavemetleri ile kaynak hatalarının tespiti için üç-nokta 180° (U şekli) eğme deneylerini Alşa marka cihazda, numuneler 180°, yani U-şekli alıncaya veya çatlama, kırılma görülünceye kadar yükleme yapılarak gerçekleştirmiştir [18].

Deney sonrası elde edilen veriler MS-Excel programında değerlendirilmiş ve her bir parametredeki birleştirme için, altı adet numunenin ortalaması alınarak eğme mukavemetleri hesaplanmıştır. Şekil 6.5'te uygulanan eğme deneylerinin geometrik ölçüleri sunulmuştur.



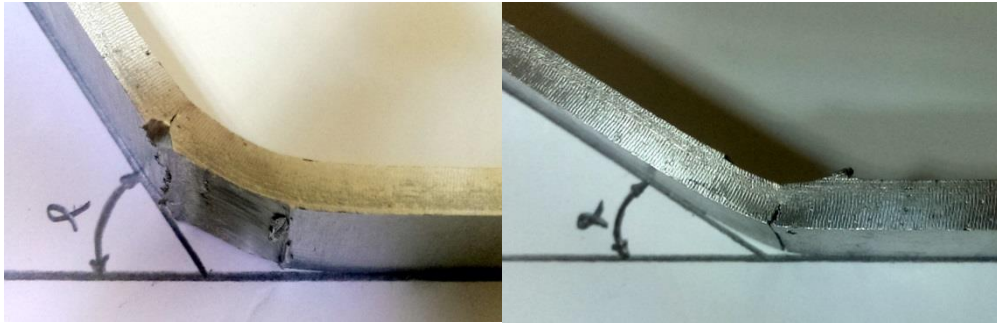
Şekil 6.5. Üç-nokta eğme deney düzeneği

Eğme deneyi uygulanan numunelerin üç boyutlu görseli ve ölçüleri şekil 6.6'da gösterilmektedir.



Şekil 6.6. Birleştirilen Al alaşımlı levhalardan elde edilen üç-nokta eğme deneyi numunesi

Eğme deneyi uygulanan numunelerde oluşan α açılarının belirlenmesinde izlenen yol Şekil 6.7.'de gösterildiği gibidir.



(a)

(b)

Şekil 6.7. Eğme deneyi sonucu oluşan α açılarının gösterilişi (a)-yüzey eğme, (b)-kök eğme

Eğme deneylerinde numunelerin eğme mukavemetinin (*alfa_e*) hesaplanmasında, kare kesitli kaynaklı birleştirmelerin üç-nokta eğme mukavemetlerinin belirlenmesi için 6.3 bağıntısı kullanılmıştır.

$$\sigma_e = \frac{3 \times F \times L}{2 \times D \times H^2} \quad (6.3)$$

Burada;

- σ_e : Eğme mukavemeti (MPa),
- F : Maksimum yük (N),
- L : Mesnetler arası mesafe (mm),
- D : Numune genişliği (mm),
- H : Numune kalınlığı (mm)

6.3. Metalografik İnceleme

Elde edilen deney levhaların birleştirilmesi sonrasında kaynak bölgelerinde meydana gelen mikroyapısal değişikliklerin belirlenmesinde kullanılacak olan numuneler, kaynak yönüne dik kesitte ve bütün mikroyapı bölgelerini kapsayacak şekilde hazırlanmıştır. Bu numuneler öncelikle şerit testerede kesilmiş, daha sonra dikey freze tezgâhında düzeltilerek elde edilmiştir. Mikroyapı inceleme numuneleri, sıcak preste bakalit toz kullanılarak kalıplandıktan sonra, 60-1200 numara arasında değişen zımpara kâğıtları kullanılarak zımparalanmıştır. Zımparalama işlemi sonrasında bakalite alınmış numunelerin yüzeyleri parlatma keçelerinde 0,1 mikron boyutlarda alümina toz içeren solüsyon kullanılarak parlatılmıştır. Parlatma sonrası numunelerini keller dağlayıcı ile dağlanmışır. Dağlama sonrası numuneler stereo mikroskop, optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve mikrosertlik incelemelerinde kullanılmıştır.

Optik mikroskop incelemeleri ve görüntülemeleri Şekil 6.8’de gösterilen Nikon Eclipse L150A marka mikroskop ve bu mikroskoba bağlı Clemex Vision Lite

görüntü analiz programı ile gerçekleştirilmiştir. Makroyapı görüntülemeleri ise Şekil 6.9'da gösterilen Nikon SMZ 800 marka stereo mikroskop ile yapılmıştır.



Şekil 6.8. Nikon SMZ 800, optik mikroskop



Şekil 6.9. Nikon Eclipse L150A marka stereo mikroskop

6.4. SEM Görüntülemesi-EDS Analizi

Taramalı elektron mikroskopunda görüntülemeler ile EDS analiz sonuçları JEOL-JSM 6060 LV cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

6.5. X-Işınları Karakterizasyonu

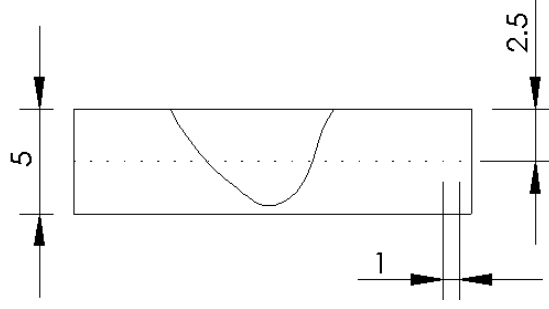
SKK uygulamasında meydana gelen yüksek ısı ve plastik deformasyondan dolayı, birleştirmelerin kaynak bölgesinde oluşabilecek faz dönüşümleri, metaller arası bileşik oluşumu gibi değişimlerin tespiti için X-ışınları difraktometresi (XRD) kullanılmıştır.

XRD incelemeleri, Rigaku marka XRD D/MAX/2200/PC tip cihazda, $10^{\circ} < 2\theta < 90^{\circ}$ tarama aralığında, 40 kV–30 mA ve Cu/K- α radyasyon ışını kullanılarak, $0,02^{\circ} \text{ mm}^{-1}$ tarama hızında gerçekleştirilmiştir.

6.6. Mikrosertlik Ölçümleri

Birleştirilen alüminyum alaşımlı levhaların kaynak bölgelerindeki sertlik dağılımlarının tespiti için, Vickers mikrosertlik (HV) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, Şekil 6.10' da gösterildiği üzere kaynak dikişine dik kesitte alınan numune yüzeyinde, tek doğrultuda ve sıra-sertlik alımı şeklinde yapılmıştır. Sıra-sertlik alımı, kaynak bölgesi orta noktasından esas metale Şekil 6.10'da gösterilen doğrultu boyunca 1 mm aralıklar ile yapılmıştır. İkinci sıra-sertlik ölçümlerim ise, numunenin kaynak merkezinden yukarıya doğru 1 mm aralıkla ve kaynak merkezinden aşağı doğru 1 mm aralıklarla gerçekleştirilmiştir.

Vickers mikrosertlik ölçümleri, Future-Tech FM 700 marka mikrosertlik cihazında, 12 saniye bekleme süresinde 300 gf (Gram Kuvvet) yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.10. Sertlik ölçüm yönteminin, numune üzerinde uygulanışının şematik olarak gösterimi (ölçüler mm)

BÖLÜM 7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. Kaynak Dikiş Görüntüleri

SKK yöntemi ile 5 mm kalınlıktaki Al-%2,%4.5 bakır levhaların farklı kaynak parametreleri kullanılarak alın-alına birleştirilmiştir. Bu birleştirmede kullanılan levhaların yüzey görünümleri aşağıda verilmiştir. Kaynak dikiş yüzeyleri, takım omuz kısmının teması sonucu meydana gelen ve birbiri ardı sıralanan yayların oluşturduğu bir görünüme sahiptir. Bu görüntü kaynak yüzeyinin pürüzsüzlüğünü de belirlemektedir. Kaynak dikişi kenarlarında, takım omuz kısmının levha yüzeylerine batma derinliğine bağlı olarak çapak oluşumu meydana gelmektedir. Takım omuz kısmı, levha yüzeylerinden içeriye ne kadar çok gömülürse, kaynak dikiş kenarlarında o oranda çapak birikimi de artmaktadır. Kaynak işlemi sonunda, karıştırıcı ucun levhalardan çıkartıldığı yerde bir delik meydana gelmektedir. Aynı kaynak parametreleri kullanılarak yapılan birleştirmelere ait bütün numunelerde kaynak dikiş görünümü birbirine benzediği için, bunlardan birinin temsili görünümü Şekil 7.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. SKK yöntemi ile birleştirilmiş Al- Cu levhaların genel yüzey görünümü

32 mm/dak sabit kaynak hızında ve 1000 dev/dak takım dönme hızında birleştirilen Al/%4.5-4.5Cu levhaya ait kaynak yüzeyleri ve kök kısımları gösterilmektedir. 800, 1000, 1200, dev/dak takım dönme hızlarında gerçekleştirilen Al-Cu levhaların kaynak yüzey görünümlerinde önemli ölçüde bir değişiklik olmamıştır.

7.2. SKK Sonrası Takım Durumu

Takım malzemesi ve geometrisi seçiminde, birleştirilecek olan malzeme özelliklerinin dikkate alınmasının yanı sıra, kullanılan takımın sertlik ve aşınma direnci gibi özelliklerinin de kaynak başlangıcında ve kaynak süresince değişmeyecek nitelikte olması istenmektedir.

Tez çalışması kapsamında %2-%2, %4.5-%4.5, %4.5-%2 Cu içeren alüminyum alaşımlı levhaların birleştirilmesinde kullanılan, 3340 HSS malzemedan üretilmiş takımın, karıştırıcı uç ve omuz kısmının kaynak sonrası genel durumunu göstermektedir. Şekil 7.2’de görüleceği gibi takımın kaynak sonrası durumu gösterilmiştir. Al- Cu alaşımlı levhaların birleştirilmesi esnasında yüksek sıcaklıktan dolayı takım karıştırıcı uç ve takımın omuz kısmına alüminyum sıvanmış ama dikkate değer bir aşınma meydana gelmemiştir.

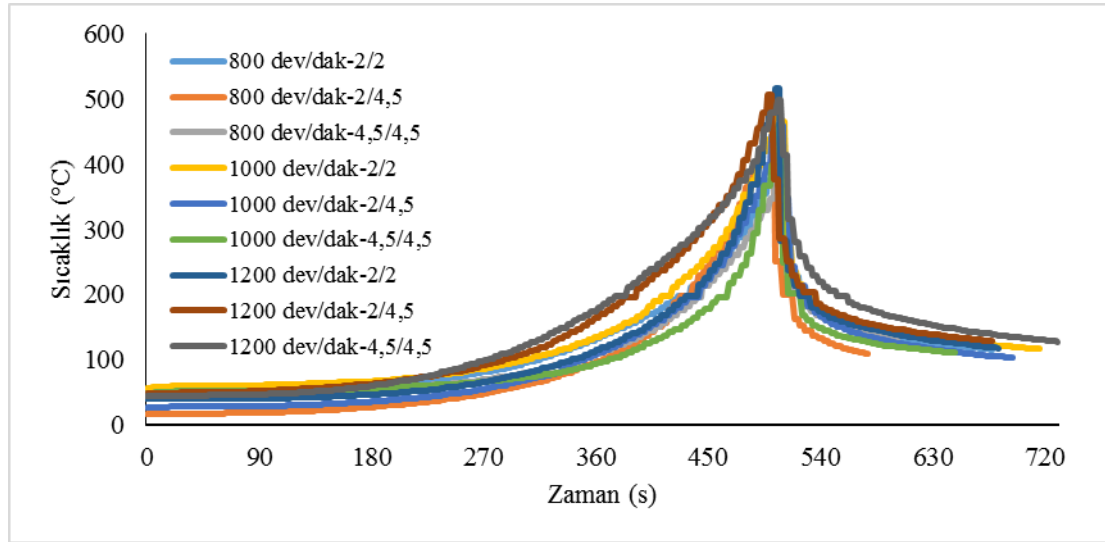
Birleştirmeler gerçekleştirildikten sonra yapılan değerlendirmeler sonucunda 3340 tipi HSS karıştırıcı uca sahip takımın Al-Cu birleştirmeleri için uygun olduğu sonucuna varılmıştır.



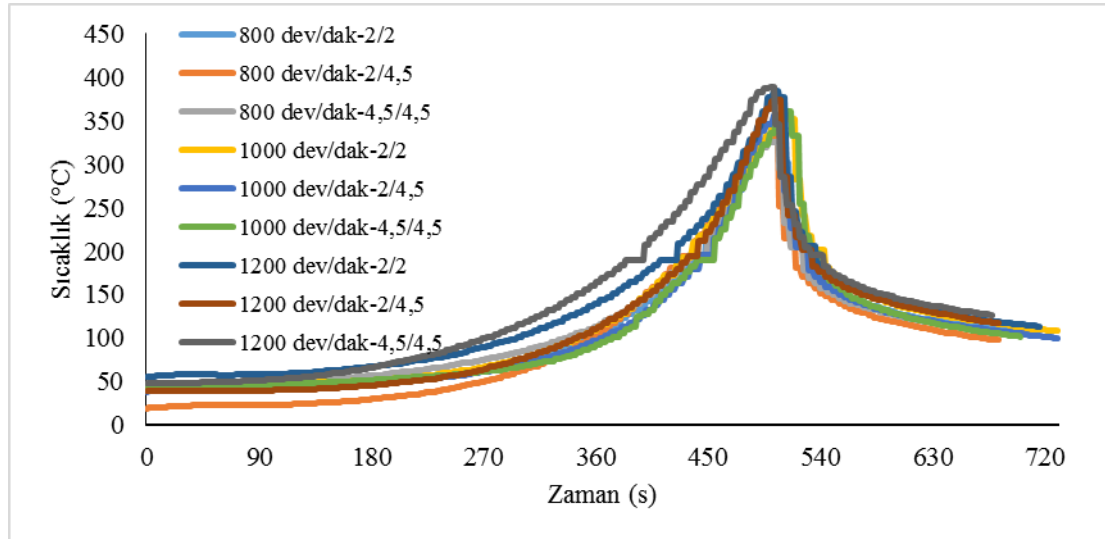
Şekil 7.2. SKK sonrası takım görüntüsü

7.3. Kaynak Sıcaklık Dağılımı

Artan devir sayısı ile KM'de ve ITAB Bölgesinde kaynak mukavemetinin sıcaklıklarının arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 7.3. ve 7.4.'de sırasıyla kaynak metali ve ITAB sıcaklıkları gösterilmektedir.



Şekil 7.3. Kaynak metali sıcaklığı



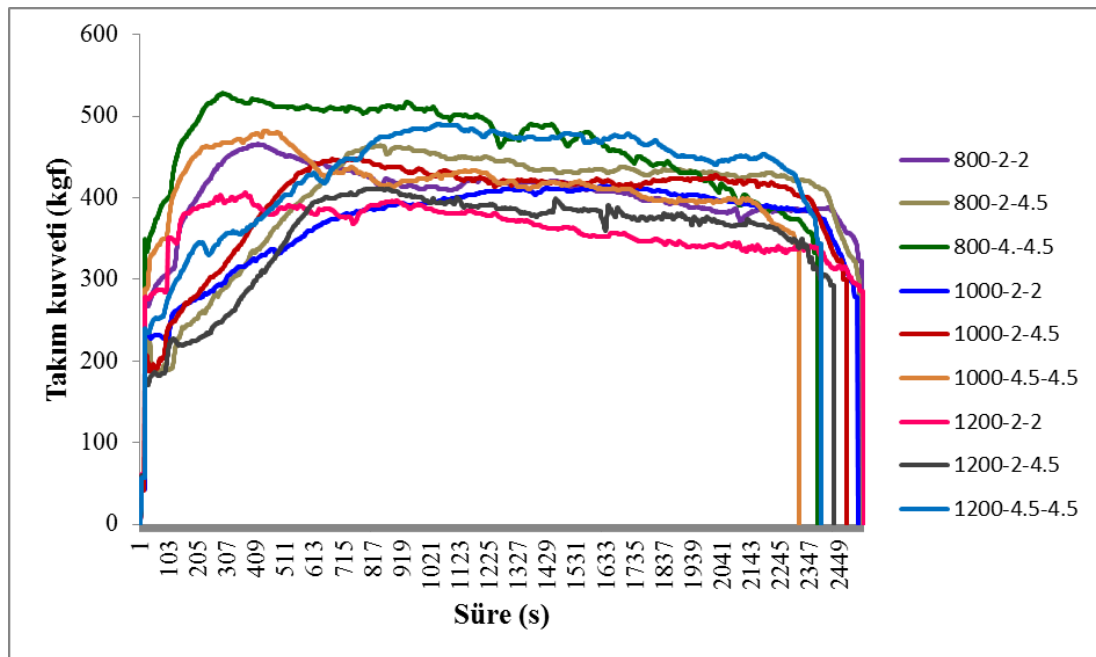
Şekil 7.4. ITAB sıcaklığı

7.4. Takım Kuvvetleri

Şekil 7.5'de Takım dönüş hızının farklı numunelerde takım kuvveti üzerine olan etkisi grafik biçiminde gösterilmektedir. Buna göre en büyük takım kuvveti 800 devir/dakika'da en yüksek takım kuvveti elde edilmiştir. %4.5-4.5 bileşimi en sert ve

devir sayısının da düşük olduğu göz önüne alındığında en yüksek olması beklenen bir durum olmuştur. En düşük takım kuvvetleri ise yüksek devir sayılarında elde edilmiştir. Bu verilere göre malzemenin sertliği arttıkça takıma gösterilen direnç artmış ve böylece takım kuvveti artmıştır. Ayrıca, takım devir sayısı arttıkça takım kuvvetlerinde azalma meydana gelmiştir.

Moghadam ve Farhangdoost'un [62] yapmış oldukları çalışmada, %4,45 Cu içeren Al alaşımının (2024-T351) SKK tekniği ile birleştirilebilmesini çalışmışlardır. Buna göre, takımın devir sayısı arttıkça elde edilen takım kuvvetlerinin de arttığı ve 800 devir/dakika'da, 31.2 mm/dk ilerleme hızında yaklaşık 829 kgf takım kuvvetleri elde edildiği görülmektedir. Çalışmamızda ise bu değer 550 kgf civarındadır. Takım kuvveti değerlerinin literatür ile birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 7.5. Takım dönüş hızının farklı numunelerde takım kuvveti üzerine olan etkisi

7.5. Birleştirmelerin Mekanik Özellikleri

Belirtilen kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen Al-Cu levhaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çekme ve eğme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonrası birleştirmelerden elde edilen değerler, hem birbirleriyle hem de Al-

Cu ana metallerle karşılaştırılmış, böylece en uygun kaynak parametrelerine sahip birleştirmenin belirlenmesi amaçlanmıştır.

7.6. Çekme Deneyi Sonuçları

Farklı kaynak parametreleri kullanılarak SKK yöntemiyle birleştirilen Al-Cu levhalardan alınan numunelere TS EN ISO 4136 standardı ile enine çekme deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen çekme deneyleri sonuçları yardımıyla;

- Takım dönme hızının birleştirme mukavemetine etkisi,
- Farklı ve benzer Al-Cu levhaların birleştirilebilirliğine etkisi
- Takım devirlerinin numune kopma tiplerine etkisi incelenabilmektedir.

Şekil 7.6 ve Şekil 7.7’de sırasıyla %2 Cu ve %4.5 Cu içeren Al alaşımlarının kaynak uygulanmayan numunelerinin çekme deneyi sonucu kopma görüntüleri gösterilmiştir. %2 Cu içeren Al alaşımında, kopmanın çekme bölgesi dışında olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, döküm esnasında oluşan döküm hatalarından dolayı olabileceği kanısına varılmıştır. %4.5 Cu içeren Al alaşımının ise beklenildiği üzere numunenin orta noktasında koptuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7.6. %2 Cu ana metal çekme numuneleri



Şekil 7.7. 4.5 Cu ana metal çekme numuneleri

Şekil 7.8, 7.10, 7.11, 7.13 ve 7.14’de gösterilen numuneler sırasıyla, 800 devir/dakika %2-2 Cu, 800 devir/dakika %4.5-4.5 Cu, 1000 devir/dakika %4.5-4.5

Cu, 800 devir/dakika %4.5-2 Cu ve 1000 devir/dakika %4.5-2 Cu içeren Al alaşımlarının SKK ile birleştirme ve çekme deneyi uygulanması sonucunda kaynak metalinde kökten kopma gerçekleşen numunelerin görüntüleri gösterilmiştir. Bu kopma tipleri ve devir sayıları incelendiğinde, kökten kopmaların genelde düşük devirlerde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Düşük devirde oluşan daha düşük kaynak ısısı ve daha az kaynak karışma nedeniyle olabileceği kanısına varılmaktadır.

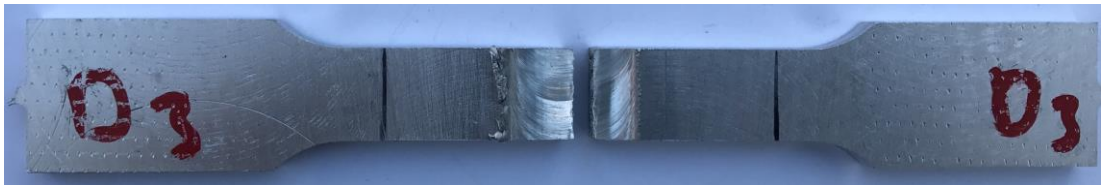
Şekil 7.9, 7.12 ve 7.15’de ise esas metalden kopmalar gerçekleşmiştir. Bu da kaynak bölgesinin mukavemetinin esas metalden daha fazla olduğu sonucuna varılabilir. Bu da kaynaklı birleştirmeler için istenen bir durumdur. Ayrıca, esas metalden kopan numunelerin devirleri incelendiğinde yüksek devirlerde olduğu görülmektedir. Bu da, kaynak esnasındaki ısı ve karışmanın yeterli düzeyde olduğuna işaret etmektedir.



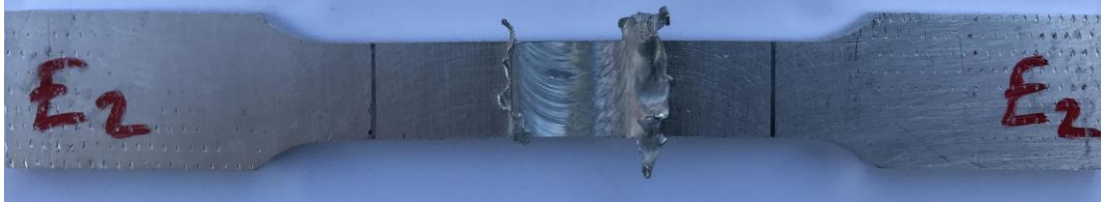
Şekil 7.8. 800/%2-2 Cu ,çekme deneyi sonrası kökten kopma



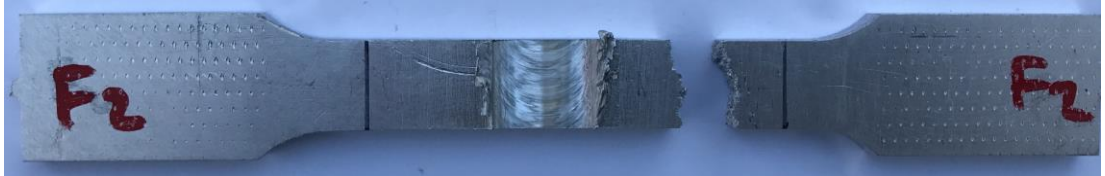
Şekil 7.9. 1200/%2-2 Cu Çekme deneyi sonrası, ana metalde meydana gelen kırılma örneğinin yüzey görünümü



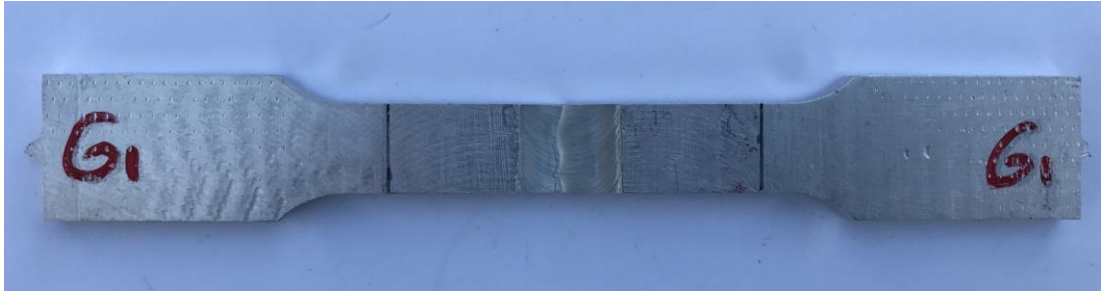
Şekil 7.10. 800/%4.5- 4.5 Cu, çekme deneyi sonrası kök de görülen kırılmanın görüntüsü



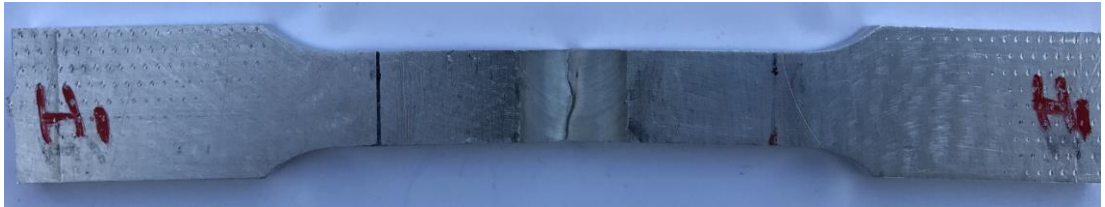
Şekil 7.5. 1000/%4,5-4,5 Cu İçerikli yüzey çekme numuneleri



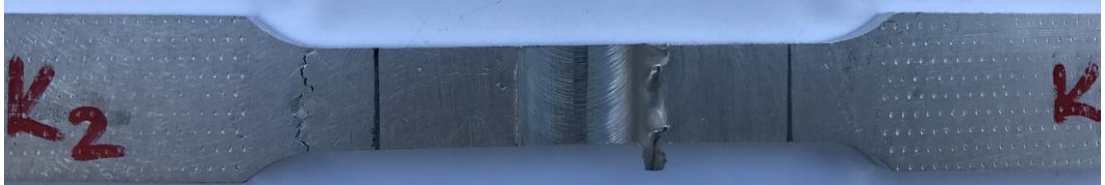
Şekil 7.6. 1200/%4,5-4,5 Cu, Çekme deneyi sonrası ana metalde meydana gelen kırılma örneğinin yüzey görünümü



Şekil 7.7. 800/%4,5-2 Cu, çekme deneyi sonrası yüzey görüntüsü



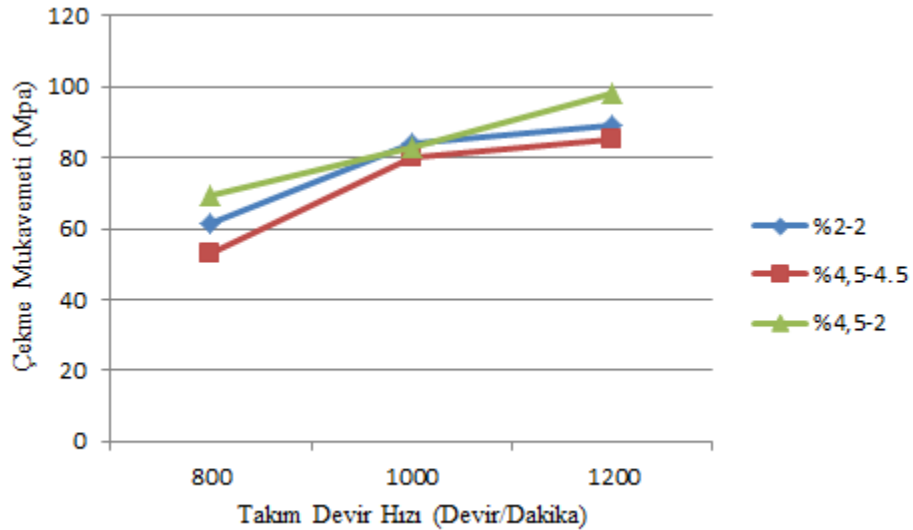
Şekil 7.8. 1000/%4,5-2 Cu kök çekme numuneleri



Şekil 7.9. 1200/%4,5- 2 Cu içerikli yüzey çekme numuneleri

Al-%2-%2 Cu alaşımında çekme mukavemeti ortalama 67.6 MPa iken Al-%4,5-%4,5 Cu alaşımında ana metalde ortalama çekme mukavemeti 75.6 MPa değerleri elde edilmiştir. Al-%2-%2 Cu alaşımında takım dönme hızları 800, 1000,1200

dev/dakilarda ortalama çekme mukavemet değerleri ise 41.5MPa, 56MPa, 69.6MPa olarak hesaplanmıştır. Al-%2-%4.5 Cu alaşımında ortalama çekme mukavemet değerleri 800, 1000, 1200 dev/dakika'larda 65.2MPa, 80.1MPa, 83MPa olarak bulunmuştur. Al-%4.5-%4.5 Cu alaşımında 800, 1000, 1200dev/dak takım dönme hızlarında ise 33.4 MPa, 76.6 MPa ve 82.5 MPa ortalama çekme mukavemetleri bulunmuştur. Böylece alınan bu sonuçlara göre takım devir hızı arttıkça ortalama çekme mukavemetlerinin arttığı gözlemlenmiş ve en yüksek çekme mukavemet değeri ise takım dönme hızı 1200 dev/dak olan numunelerde elde edilmiştir. Sonuç olarak Al-%2-%4.5 Cu olan alaşımlı numunenin takım dönme hızı 1200 dev/dak olan numunede en yüksek çekme mukavemetine ulaşılmıştır. Şekil 7.16.'da çekme deneyi sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 7.10. Takım devir sayısının çekme mukavemeti üzerine olan etkisi

7.7. Eğme Deneyi Sonuçları

Birleştirilen Al-Cu levhalardan alınan eğme numunelerinin kaynak yüzeylerine ve kök kısımlarına, TS EN ISO 5173 standardı ile üç-nokta 180° eğme deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen eğme deneyleri sonuçlar doğrultusunda;

- Takım dönme hızının eğme mukavemetlerine etkisi,
- Al-Cu levhaların takım dönme hızına göre eğme mukavemetlerine etkisi,
- Çatlak oluşumu vb hatalar tespit edilmeye çalışılmıştır.

Eğme deneyleri sonrasında birleştirmelerde belirlenen kaynak yüzeyi ve kök kısmı eğme mukavemet değerleri, Tablo 7.1.'de verilmiştir.

Tablo 7.1. Eğme deneyi sonucunda oluşan Kopma Açılı (α)

Numune Kodu	Yüzey Kopma Açısı (α)	Kökten Kopma Açısı
%2	38°	14.66°
%4,5	30°	51.5°
800/%2-2	119°	37°
1000/%2-2	97°	22.5°
1200/%2-2	42.5°	27.5°
800/%4,5-4,5	36°	11°
1000/%4,5-4,5	52°	31°
1200/%4,5-4,5	23.5°	15°
800/%4,5-2	42.5°	38°
1000/%4,5-2	73.5°	20°
1200/%4,5-2	97°	33°

Tablo 7.2.'de yüzey ve kök eğme mukavemetleri sunulmuştur. Buna göre, 1000 dev/dak takım dönme hızında Al-%2-%2 Cu alaşımlı numuneden en yüksek 1243 N yüzey eğme mukavemeti değerine ulaşılmış ve maksimum uzama 21.6 mm olarak hesaplanmıştır. Deneylerden alınan sonuçlara göre en yüksek mukavemet değerlerine yüzey eğme ile yapılan testlerden elde edilmiştir. Yüzey eğme mukavemetleri bakımından göz önüne alındığında 1000 devir/dakika, 32 mm/dakika ilerleme hızında, %4.5-4.5 Cu içeren Al alaşımlarında elde edilmiştir. En düşük eğme sonuçlarına da kökten yapılan deneylerden 800/%4.5-%4.5 numunesinden 462 N eğme mukavemeti ve 1.75 mm uzama değeri elde edilmiştir. Kök eğme mukavemetleri açısından değerlendirilecek olursak, en yüksek kök eğme mukavemeti 1200 devir/dakika takım devir hızı, 32 mm/dakika ilerleme ve %2-2 Cu içeren Al alaşımlarında 872 Mpa olarak elde edildiği görülmüştür.

Tablo 7.2. Eğme Numunesi yüzey eğme mukavemeti

Eğme Numunesi	Yüzey eğme mukavemeti (MPa)	Kök eğme mukavemeti (MPa)
Al%4.5Cu	1120	1120
Al%2Cu	1151	1151
800/32/2-2	1225	584
1000/32/2-2	1243	517
1200/32/2-2	1011	872
800/32/4.5-4.5	953	462
1000/32/4.5-4.5	975	797
1200/32/4.5-4.5	912,5	672
800/32/4.5-2	975	650
1000/32/4.5-2	1131	558
1200/32/4.5-2	1170	803

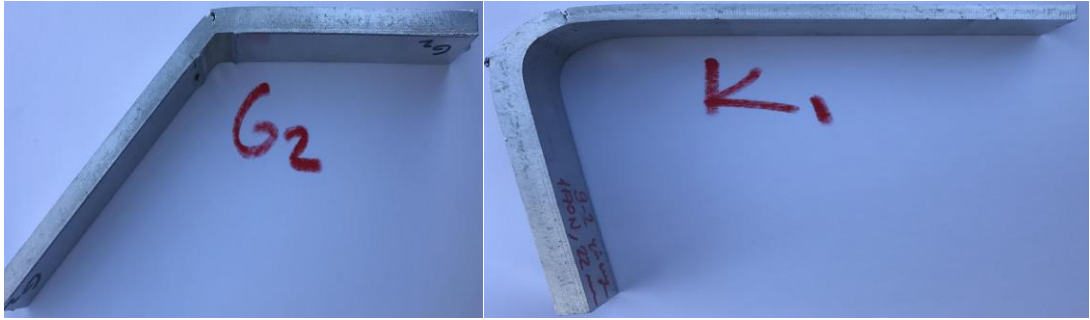
Şekil 7.17, Şekil 7.18 ve Şekil 7.19’da sırasıyla %2-2 Cu, %4.5-4.5 Cu ve %4.5-2 Cu içeren Al alaşımlarının yüzey ve kök kısımlarının eğme deneyi neticesinde elde edilen görüntüler gösterilmektedir. Görüntüler incelendiğinde, kök yönünden yapılan eğme deneylerinde %2-2 Cu, %4.5-2 Cu numuneleri kök içinden çatlama göstermemiştir. Ayrıca, yüzey yönünden incelendiğinde sadece %2-2 Cu içeren Al alaşımında kökten çatlama gerçekleşmiştir.



Şekil 7.11. %2 Cu-%2 Cu içerikli yüzey, kök eğme numuneleri



Şekil 7.18. %4.5 Cu-%4.5 Cu içerikli yüzey, kök eğme numuneleri



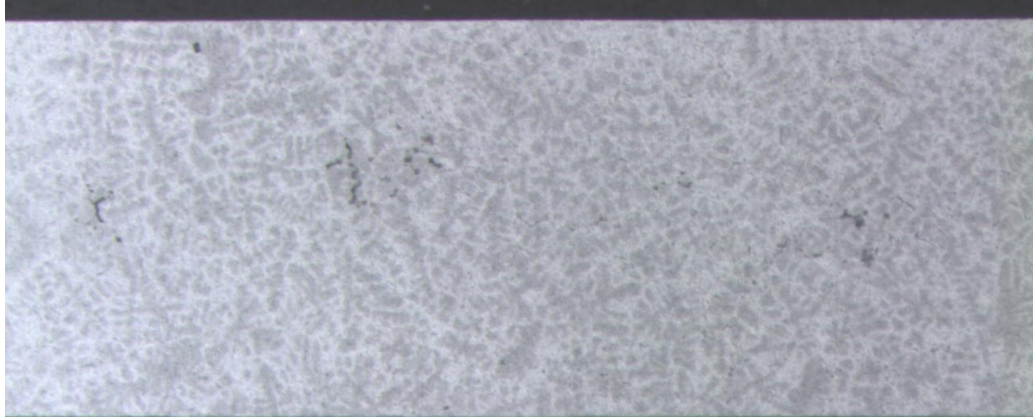
Şekil 7.12. %4.5 Cu-%2 Cu içerikli yüzey, kök eğme numuneleri

7.8. Kaynak Bölgelerinin Makroyapı Karakterizasyonu

Bu bölümde, SKK yöntemi ile 32 mm/dak sabit kaynak hızında ve 800, 1000, 1200, dev/dak takım dönme hızlarında birleştirilen alüminyum alaşımı levhaların, kaynak sırasında artan sıcaklık ve plastik deformasyonun etkisi sonucu meydana gelen kaynak bölgelerindeki makroyapı özellikleri incelenmiştir.

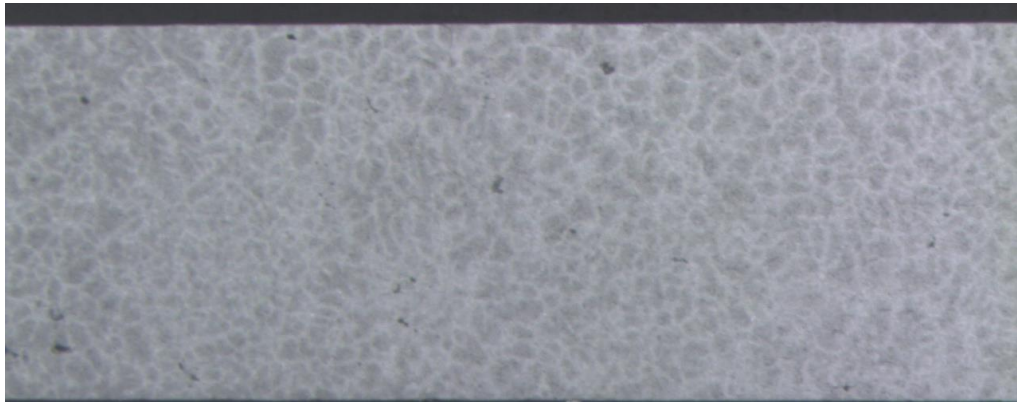
Birleştirilen Al-Cu alaşımli levhalardan kaynak yönüne dik doğrultuda alınan numune kesitlerindeki makroyapı resimleri Şekil 7.20-7.30'da gösterilmektedir. Makroyapı resimleri, stereo mikroskopta, $\times 5$ büyütmede numunelerin parçalar halinde dijital fotoğraflarının çekilmesi ve bunların birleştirilmesi sonucu elde edilmiştir. 800, 1000, 1200, alüminyum alaşımının kaynaklı birleştirilmesi sonucuna ait makroyapılar incelendiğinde boşluk, gözenek, tünel benzeri boşluk oluşumu gibi kaynak hatalarına rastlanmamıştır. Ancak, az da olsa bu ihtimallere de yer verilmiştir.

Şekil 7.20'den görüldüğü üzere, Al-%2 Cu içeren kaynaksız ana metalde dentritik kollar kısa ve dağınık bir görünüm sergilemektedir. Ana metalin yapısında döküm hatalarından kaynaklı gözenekler görünmektedir.



Şekil 7.13. %2 Cu içeren Al alaşımı ana malzemesi

Şekil 7.21'de görüldüğü üzere, Al-%4.5 Cu içeren kaynaksız ana metalde dentritik kollar geniş ve sık bir dağılım göstermektedir. Ana metalin yapısında dağınık bir şekilde noktalar halinde gözükten döküm boşlukları gözlemlenmiştir.



Şekil 7.14. %4.5 Cu içeren Al alaşımının ana malzemesi

Şekil 7.22-30 nolu şekillere bakıldığında, SKK sırasında dönmekte olan takım omuz kısmının alüminyum alaşımının levha yüzeylerine temas ettiği yerlerde, bir miktar malzemenin omuz kenarlarından dışarı doğru taşınarak çapak oluşturduğu görülmektedir. Çapak oluşumları, özellikle birleştirmelerin ilerleme kenarında daha belirgindir. Farklı kaynak parametrelerinde gerçekleştirilen birleştirmelerde meydana gelen kaynak bölgeleri, dağlama sonrası rahatlıkla görülebilmektedir. Bu kaynak

bölgeleri genel olarak, alt kısımlarda dar, takım omuz kısmının temas ettiği üst kısımlarda ise daha da genişleyen bir görünüm sergilemektedir.

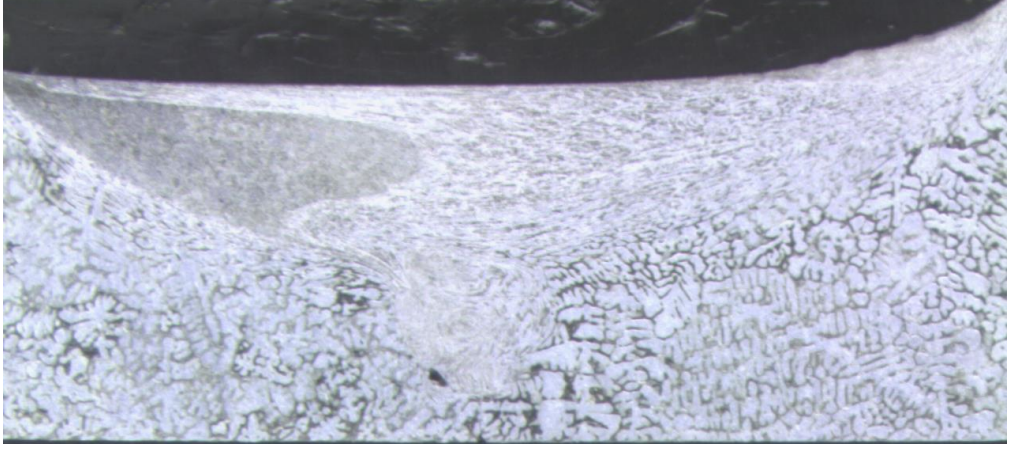
Birleştirilen Al/Cu levhaların kaynak bölgelerinde mikroyapısal değişimlerin olduğu belirlenmiştir. Farklı kaynak parametreleri kullanılarak yapılan birleştirmelerde benzer makroyapı ve mikroyapı bölgeleri elde edilmiştir. Dolayısıyla, Al/Cu ve birleştirmelerinde genelde ortak mikroyapı bölgeleri meydana gelmiştir.

KM'nin makroyapı incelemelerinde takım dönme hızı arttığında kaynaklı birleştirme esnasında yüksek ısı girdisinden dolayı girdaplı yapıların oluştuğu gözlemlenmiştir. KM'nin artan takım devir hızına bağlı olarak kaynak geometrisinin değiştiği gözlemlenmiştir.

Al/Cu alaşımı kaynaklı birleştirmenin KM'nin makro yapısı incelendiğinde dendritik kollarının birleştiği ve yüzeylerin aynı görünümü sergilediği gözlemlenmektedir.

Al-Cu alaşımının makroyapı incelemeleri sonucunda birleştirmelere ait mikroyapı bölgelerinin, takım dönme hızına bağlı olarak kaynak metalinin alanının değiştiği gözlemlenmiş, kaynak metalinde ITAB bölgelerinin oluşmadığı tespit edilmiştir. Şekil 7.25 buna örnek verilebilmektedir.

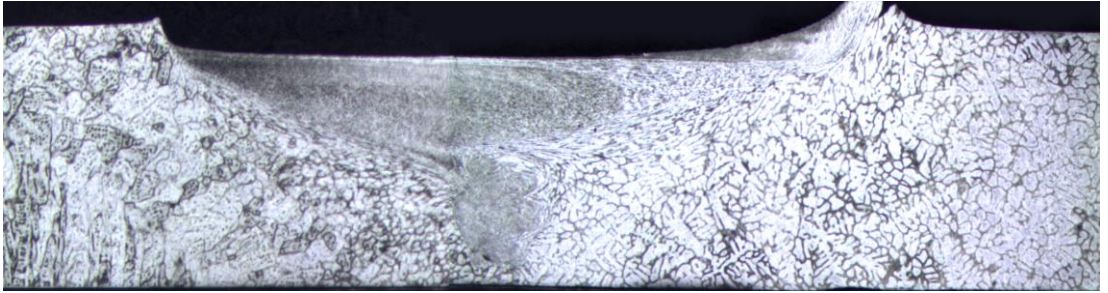
Özellikle Al-Cu alaşımında KM mikroyapı bölgesi ise ilerleme kenarına doğru daralarak uzamıştır. Şekil 7.65-7.61 nolu resimler incelendiğinde, KM'nin alanının geniş olduğu bölgelerde sertlik oranının arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle en yüksek sertlik değerine 1200/%4.5-4.5 numunesinde karşılaşılmış en düşük sertlik değerine de 800/%2-2 numunesinde ulaşılmıştır.



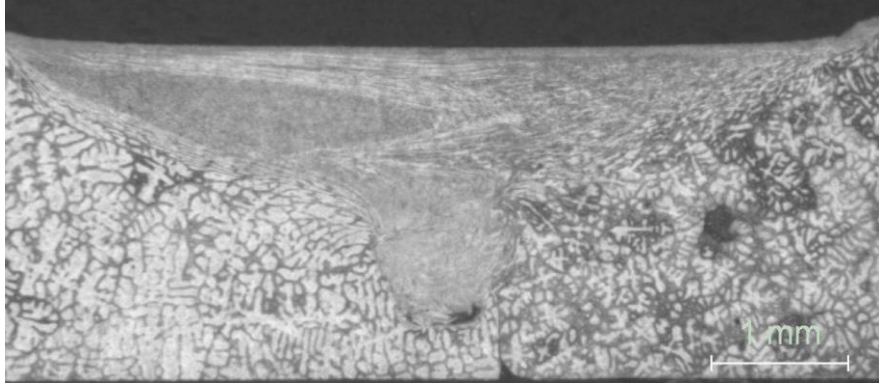
Şekil 7.15. 800/2-2 Cu numunesi KM makro görüntüsü



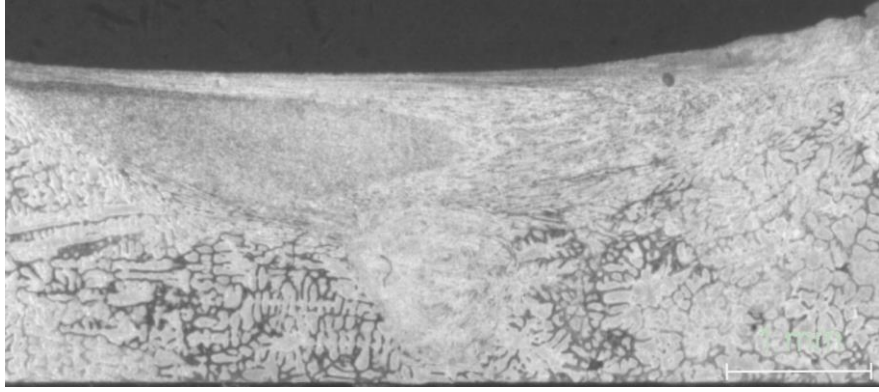
Şekil 7.16. 1000/2-2 Cu numunesi KM makro görüntüsü



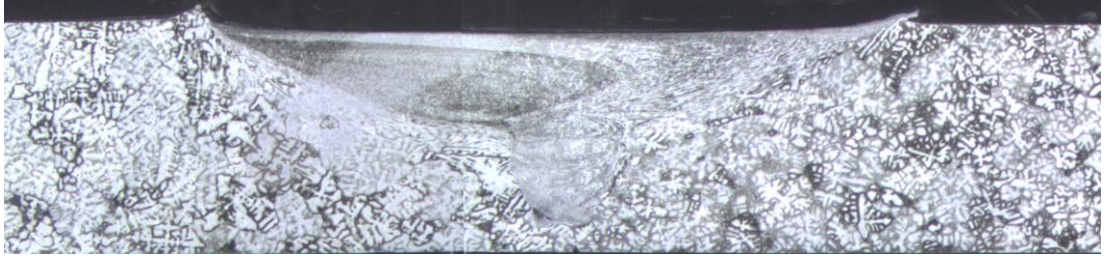
Şekil 7.17. 1200/2-2 Cu numunesi KM makro görüntüsü



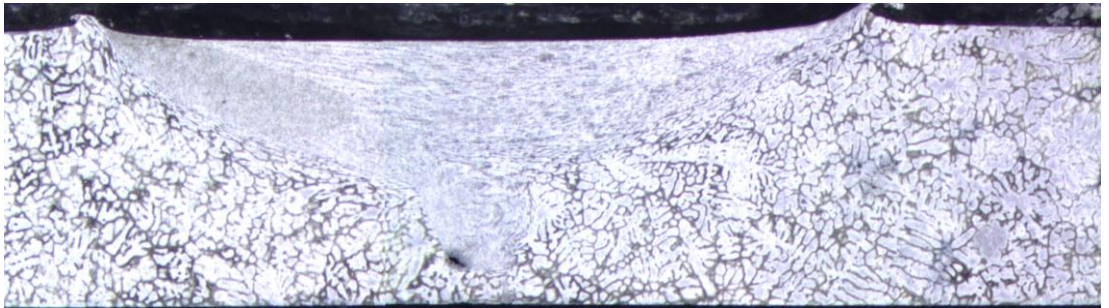
Şekil 7.18. 800/%4,5-4,5 Cu numunesi KM makro görüntüsü



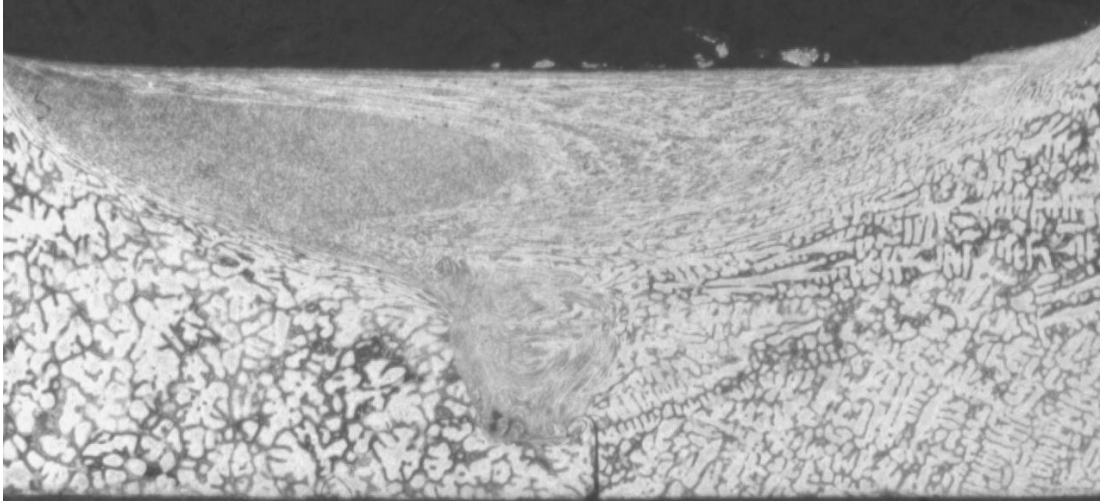
Şekil 7.19. 1000/%4,5-4,5 Cu numunesi KM makro görüntüsü



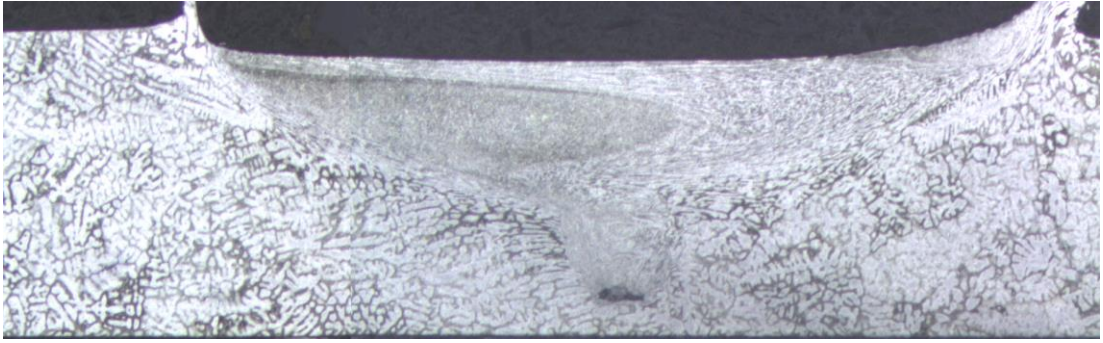
Şekil 7.27. 1200/%4,5-4,5 Cu numunesi KM makro görüntüsü



Şekil 7.20. 800/%4,5-2 Cu numunesi KM makro görüntüsü



Şekil 7.21. 1000/%4,5-2 Cu numunesi KM makro görüntüsü



Şekil 7.22. 1200/%4,5-2 Cu numunesi KM makro görüntüsü

7.9. Kaynak Bölgelerinin Mikroyapı Karakterizasyonu

Bu bölümde 800, 1000, 1200/32 kaynak parametrelerinde birleştirilen Al-Cu alaşımlı levhalarının kaynak bölgelerinde tespit edilen mikroyapı bölgelerinin, OM ve SEM kullanılarak yapılan incelemeleri verilmiştir. Farklı kaynak parametrelerinde birleştirilen her bir numunenin kaynak bölgelerine ait mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Kaynak bölgelerinde SEM-EDS analizler gerçekleştirilerek, özellikle yüksek ısı ve deformasyona maruz kalan KM'deki Al-Cu alaşımı içerisindeki elementler belirlenmiştir.

SKK sırasında ısı ve deformasyondan etkilenmemiş bölge olarak tanımlanan Al-Cu alaşımı ana metallerin mikroyapıları, tüm numunelerde benzer özellikler göstereceğinden, ana metallerin mikroyapı özellikleri bu başlık altında toplanmıştır.

32 mm/dak kaynak hızı ve 800, 1000, 1200 dev/dak takım dönme hızında birleştirilen Al/%2 Cu, Al/%4.5 Cu, Al/%4.5-%4.5 Cu, Al/%4.5-%2Cu, Al/%2-%2 Cu alaşımının mikro yapıları görüntülenmiştir.

Al-Cu alaşımı ana metaller ile 32 mm/dak sabit kaynak hızında, 800, 1000, 1200, dev/dak takım dönme hızlarında gerçekleştirilen Al-Cu alaşımı birleştirme numunelerinin kaynak bölgelerinde tespit edilen mikrosertlik dağılımları ve bu sertlik dağılımlarının mikroyapı bölgeleriyle olan ilişkileri değerlendirilmiştir.

Alüminyum alaşımı birleştirmelerinde genelde ortak mikroyapı bölgeleri meydana gelmesine rağmen, karışıklıklara neden olmamak için kaynak bölgelerinin tanımlamaları yapılmıştır. Dağlama reaktifi ile tespit edilebilen bu mikroyapı bölgeleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Alüminyum alaşımı birleştirmelerinin kaynak bölgelerindeki mikroyapı bölgeleri;

- Alüminyum alaşımı ana metali; Birleştirme sırasındaki ısı ve deformasyondan etkilenmeyerek mikroyapının değişmediği, kaynağın ilerleme kenarında olan bölgedir.
- Al alaşımı ITAB: Maruz kaldığı ısı etkisi sonucu Al alaşımı ana metale göre daha iri tane yapısına sahip olan, kaynağın ilerleme kenarındaki bölgedir.
- Al alaşımı - TMEB: Isı ve deformasyon etkisiyle yön değiştirerek uzamış tane yapısına sahip olan ve Al alaşımı levha tarafında meydana gelen termo-mekanik olarak etkilenmiş bölgedir.
- KM: Yüksek ısı ve yoğun plastik deformasyonun etkisi altında kalan ve Alüminyum alaşımli malzemelerin karışımından meydana gelen, yeniden kristalleşmiş ince tane yapısına sahip olan bölgedir.
- ITAB: Al alaşımı levha tarafında meydana gelen ve Al -Cu alaşımı ana metale göre daha iri tane yapısına sahip olan ısı tesiri altındaki bölgedir.

Makroyapı incelemeleri sonucunda birleştirmelere ait mikroyapı bölgelerinin, 800, 1000, 1200 devir/dakika takım dönme hızına sahip Al-Cu alaşımında birleştirmelerinde TMEB mikroyapı bölgelerinin meydana geldiği görülmüştür.

SKK ile birleştirilmiş numunelerin mikrosertlik ölçümleri, şekil 6.10'da gösterildiği gibi, kaynak dikişine dik kesitte ve İK-YK boyunca sıra-sertlik alımıyla gerçekleştirilmiştir. Farklı kaynak parametrelerine sahip her bir numunenin, orta kısmından kaynak merkezine doğru 1 mm aralıklarla yapılan ölçümler sonrasında, “sertlik-karıştırıcı uç ekseninden uzaklık” grafikleri elde edilmiştir. Daha sonra, sertlik alınan bölgelerde elmas ucun battığı yerlerin hangi mikroyapı bölgesi içerisinde olduğu optik mikroskop incelemeleriyle tespit edilmiştir. Bu şekilde, mikroyapı incelemelerinde belirlenen farklı mikroyapı bölgeleriyle elde edilen sertliklerin eşleştirmeleri yapılmış ve mikroyapı bölgelerinin sahip olduğu sertlik değişim aralıkları ile ortalama sertlik değerleri tespit edilmiştir.

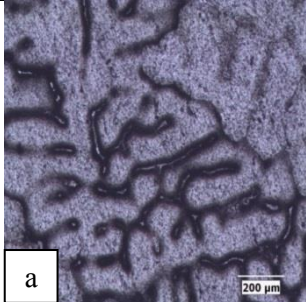
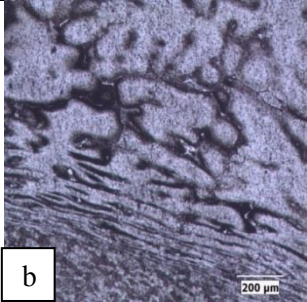
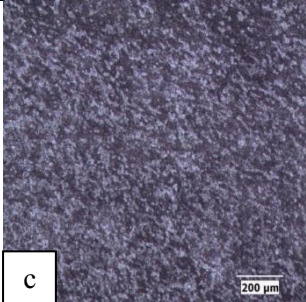
7.10. Farklı Takım Dönme Hızlarında %Cu Alaşım Elementi Aynı Olan Numunelerin SKK İle Birleştirilmesi

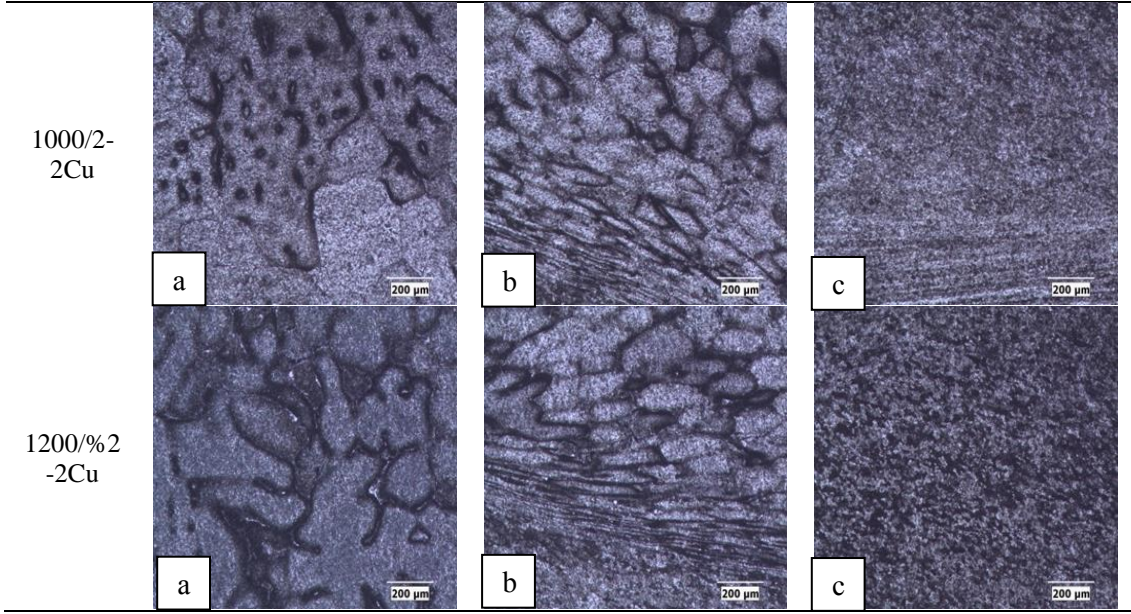
ITAB: Tablo 7.3'de görüldüğü gibi %2 Cu alaşımı içeren Alüminyum plakaların SKK yöntemiyle birleştirilmesinde farklı devir hızlarında elde edilen mikroyapı görüntülerinde değişiklikler gözlemlenmiştir. En düşük takım dönme hızında 800 devir/dakika'da yapılan birleştirmelerde oluşan mikroyapıda dentritik yapının 1000 ve 1200 devir/dakika'da yapılan birleştirmelere göre daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. 1000 devir/dakika kaynak hızına sahip birleştirmede dentritik kollarının oluşmadan kaldığı dağınık bir mikroyapıya sahip olduğu ve daha iri taneler halinde kaldığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber 1200/2-2 kodlu numunenin ITAB'ı, 800/2-2 kodlu numunenin ITAB'ına göre daha düzenli ancak karışık şekilli bir mikroyapı elde edilirken, takım dönme hızının artmasıyla tanelerin koparak parçalandığı, parçalanan tanelerin daha çok küreselleşme eğiliminde oldukları gözlemlenmiştir.

TMEB: Tablo 7.3.'de 800, 1000, 1200 devir/dakika'da elde edilen numunelerin TMEB bölgeleri incelendiğinde 800 devir/dakika takım dönme hızında elde edilen numunelerin mikroyapısında takım dönme yönüne doğru tanelerin uzayıp yönlendiği, yönlenen diğer tanelerin ise dentritik yapıdan koptuğu ve düzensiz olarak dağıldığı gözlemlenmiştir. 1000 devir/dakika takım dönme hızında yapılan kaynaklı birleştirmenin TMEB'inde mikroyapının dentritik yapıya sahip olmadığı, tanelerin küresele yakın olarak dağıldığı ve takım dönme yönüne doğru yönlenmiş tanelerin daha kısa ve küresele yakın olduğu gözlemlenmiştir. 1200 devir/dakika'da ise tane yapısının homojen olarak dağıldığı ve tanelerin 1000 devir/dakika'da elde edilen mikroyapıya göre küreselleştiği takım dönme yönüne doğru tanelerin yönlendiği ve uzadığı, bu uzamanın 800 devir/dakika'da elde edilen tane yapısına göre daha kısa olduğu gözlemlenmiştir.

KM: Tablo 7.3.'de 800, 1000, 1200 devir/dakika takım dönme hızında yapılan birleştirmelerin KM mikroyapılarında 800 devir/dakika takım dönme hızında elde edilen tane yapısı 1000 devir/dakika'da elde edilen tane yapısına göre daha homojen olarak dağıldığı, ancak tane boyutunun küçüldüğü gözlemlenmiştir. 1200 devir/dakika'da elde edilen KM mikroyapısında tanelerin uzamadan homojen olarak dağıldığı, küresele yakın olduğu ve tanelerin küçüldüğü gözlemlenmiştir.

Tablo 7.3. 800/%2-2, 1000/2-2 ve 1200/%2-2 kodlu numunelerin ITAB(a), TMEB(b) ve KM (c)'nin mikroyapı görüntüleri

Numune Kodu	ITAB	TMEB	KM
800/2-2Cu			



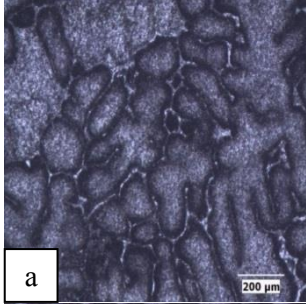
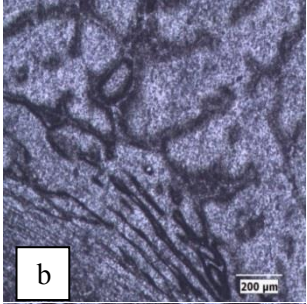
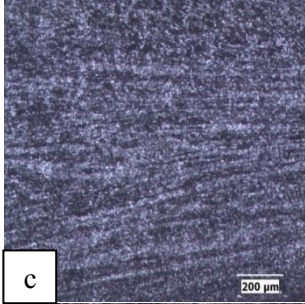
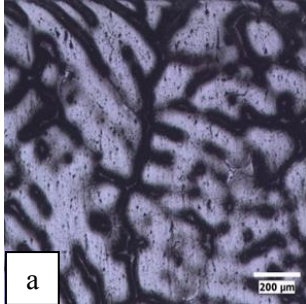
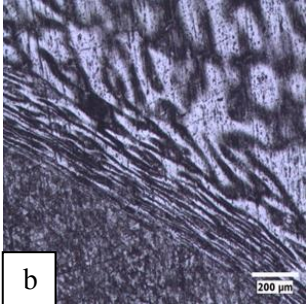
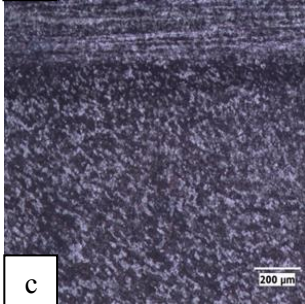
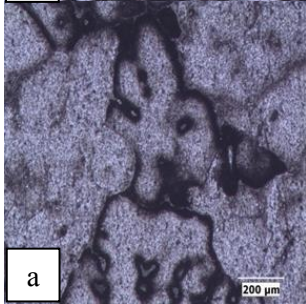
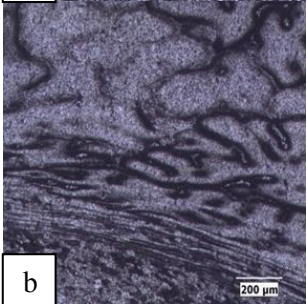
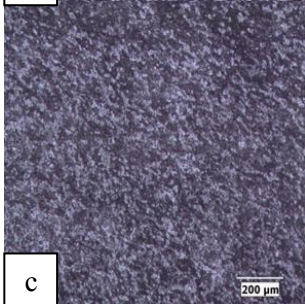
ITAB: %4,5 Cu alaşımı içeren Alüminyum plakaların SKK yöntemiyle birleştirilmesinde farklı devirlerde elde edilen mikroyapı görüntüleri Tablo 7.4'de görülmektedir. En düşük takım dönme hızında (800 devir/dakika) yapılan birleştirme işlemi sonrasında elde edilen mikroyapıda dentritik yapının %2 Cu alaşım elementi içeren numunedekine göre daha az belirgin olduğu, ancak %4,5 Cu alaşımı içeren numunelerin 1000 ve 1200 devir/dakika'da yapılan birleştirmelerine göre daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. 1000 devir/dakika kaynak hızına sahip birleştirmede tane yapısının büyüdüğü ve büyüyen tanelerin homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber 1200/4,5-4,5 kodlu numunenin ITAB'ı diğer numunelerin ITAB'larına göre daha iri tane yapısına sahip olduğu, tanelerin birbirleri ile birleştiği ve karışık şekilli bir mikroyapı elde edilmiştir. Takım dönme hızının artmasıyla ısı girişinin artması tanelerin birleşmesine neden olduğu gözlemlenmiştir.

TMEB: Tablo 7.4'de 800, 1000, 1200 devir/dakika'da elde edilen numunelerin TMEB bölgelerinde en küçük takım dönme hızı 800 devir/dakika'da elde edilen numunelerin mikroyapısında %2 Cu alaşım elementi içeren diğer numunelerin TMEB'lerinde olduğu gibi takım dönme yönüne doğru tanelerin uzayıp yönlendiği, 1000 devir/dakika dönme hızında yönlenmiş tanelerin en ince tane yapısında olduğu görülmektedir. Takım dönme hızının artmasıyla 1200 devir/dakika'da ısı girdisinin

artışı takım dönme yönüne doğru yönelen tanelerin büyüdüğü ve düzensiz olarak dağıldığı gözlemlenmiştir.

KM: Tablo 7.4'de takım dönme hızının artmasıyla KM'inde tane boyutu küçülmüştür. Bu da mikrosertlik ve mekanik özellikleri doğrudan etkilediği yapılan deneylerle tespit edilmiştir. Takım dönme hızının en yüksek olduğu 1200 devir/dakika dönme hızında tane boyutunun en küçük ve tanelerin homojen olarak dağıldığı, takım dönme hızının en düşük olduğu 800 devir/dakika takım dönme hızında ise tane boyutunun en büyük ve tanelerin düzensiz olarak dağıldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 7.4. 800/32/%4.5-4.5, 1000/32/%4.5-4.5 ve 1200/32/%4.5-4.5 kodlu numunelerin ITAB(a), TMEB(b) ve KM (c)'nin mikroyapı görüntüleri

Numune Kodu	ITAB	TMEB	KM
800/4.5-4.5Cu			
1000/4.5-4.5Cu			
1200/4.5-4.5Cu			

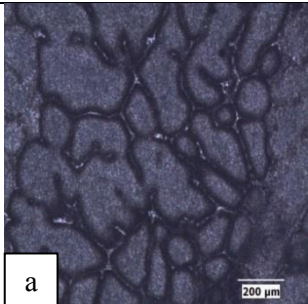
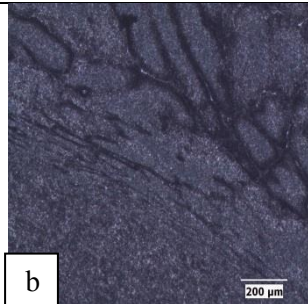
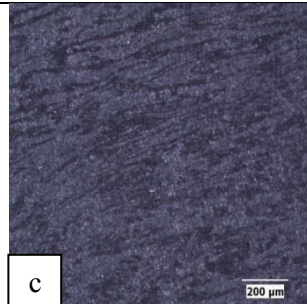
ITAB: Farklı oranlarda Cu alaşım elementi içeren (%4.5-2Cu) Alüminyum plakaların SKK yöntemiyle birleştirilmesinde seçilen takım dönme hızlarının (800-

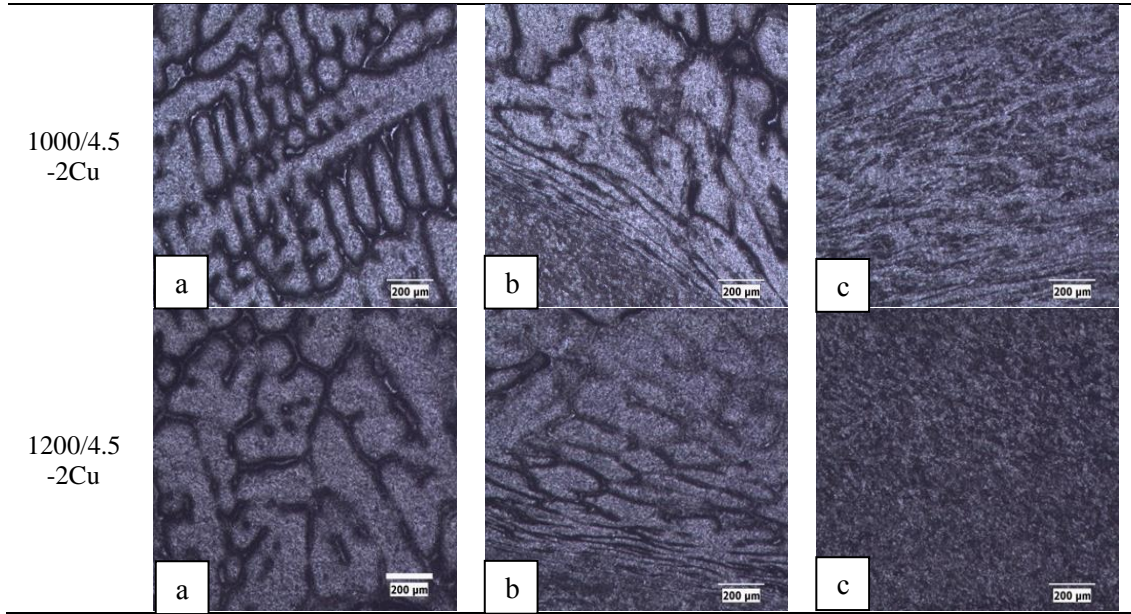
1000-1200 devir/dakika) mikroyapıya etkisi Tablo 7.5’de görülmektedir. En düşük takım dönme hızında (800 devir/dakika) yapılan birleştirme işlemi sonrasında elde edilen mikroyapıda dentritik yapının oluşmadan kaldığı, ancak 1000 devir/dakika takım dönme hızında elde edilen tane yapısının dentritik olarak homejen bir şekilde dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, 1200 devir/dakika takım dönme hızında elde edilen mikroyapıda dentritik yapının oluşmadığı ve tane boyutunun arttığı görülmektedir.

TMEB: Tablo 7.5’de numunelerin TMEB bölgelerinde en küçük takım dönme hızı 800 devir/dakika’da elde edilen numunelerin mikroyapısında takım dönme yönüne doğru tanelerin uzayıp yönlendiği, 1000 devir/dakika takım dönme hızında tane boyutunun büyüdüğü ve dentritikleşemediği görülmektedir. Takım dönme hızının artmasıyla 1200 devir/dakika’da dentritik görünümünden uzak bir tane yapısı gözlemlenirken, takım dönme yönüne doğru yönelen tanelerin küreselleşerek uzadığı gözlemlenmiştir.

KM: Tablo 7.5’de takım dönme hızının artmasıyla KM’inde tane boyutu küçülmüştür. Takım dönme hızının en yüksek olduğu 1200 devir/dakika’da tane boyutunun en küçük ve tanelerin homojen olarak dağıldığı, takım dönme hızının en küçük olduğu 800 devir/dakika’da ise tane boyutunun en büyük ve tanelerin düzensiz olarak dağıldığı gözlemlenmiştir.

Tablo 7.5. 800/%4.5-2, 1000/%4.5-2 ve 1200/%4.5-2 kodlu numunelerin ITAB(a), TMEB(b) ve KM (c)’nin mikroyapı görüntüleri

Numune Kodu	ITAB	TMEB	KM
800/4.5-2Cu			



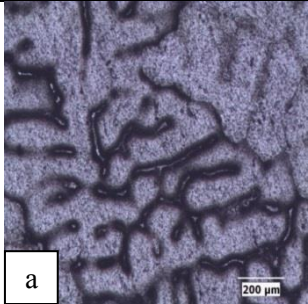
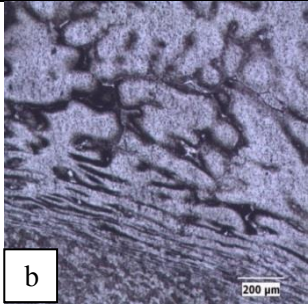
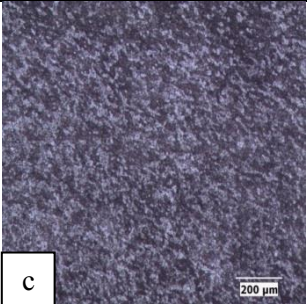
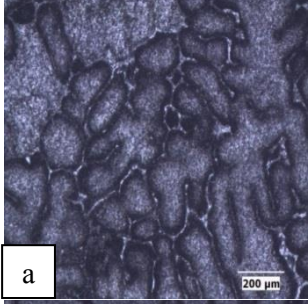
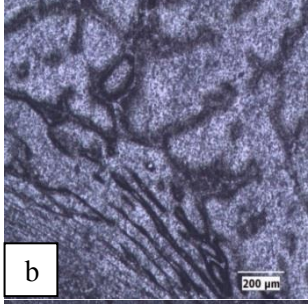
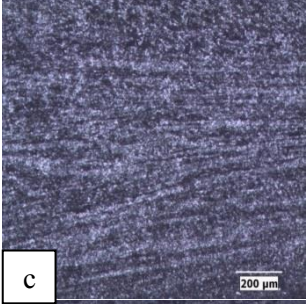
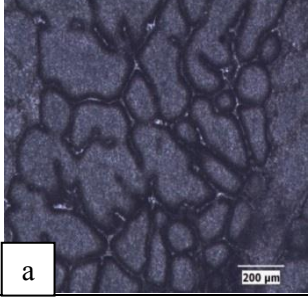
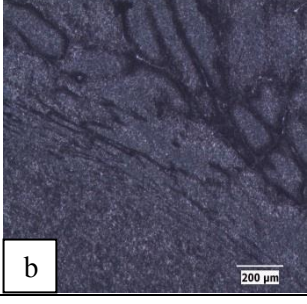
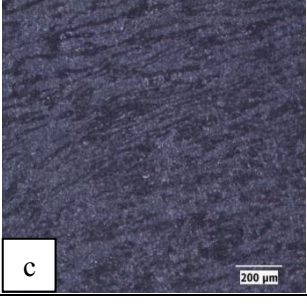
7.11. Aynı Takım Dönme Hızlarında Farklı %Cu Alaşım Elementi İçeren Numunelerin SKK İle Birleştirilmesi

ITAB: Tablo 7.6’da görülen numune mikroyapılarından ITAB görüntüleri 800 devir/dakika’da kaynak yapılmış 800/2-2, 800/4.5-4.5 ve 800/4.5-2 numuneleri kendi aralarında karşılaştırıldığında 800/4.5-4.5 numunesinde Cu oranı arttıkça mikroyapıdaki tane boyutunun büyüdüğü gözlemlenmiştir. Buna karşılık gelen 800/4.5-2 numunesinde ağırlık olarak %4.5 ve % 2 Cu içeren plakaların birleştirilmesinde tek plakanın artan Cu oranına göre 800/4.5-4.5 numunesinden elde edilen mikroyapıya göre daha küçük tane yapısı elde edilmiştir. 800/%2-2Cu numunesinde ağırlık olarak %2 Cu içeren levhaların birleştirilmesinde en büyük tane boyutu elde edilmiştir. 800/%4,5-2 Cu numunesinden elde edilen mikroyapıda elde edilen görüntü diğerlerine göre taneler homojen olarak dağılmıştır.

TMEB: Tablo 7.6’da TMEB bölgesinde 800/2-2 numunesinde tanelerin yönlenmesi daha fazla ve ince soğan halkası görünümündedir. Buna karşın alaşım elementinin arttığı diğer numunelerin TMEB bölgelerinde tanelerin düzensiz olarak yönlendiği ve soğan halkası görünümünden ziyade taneler uzayarak takımın dönme yönüne doğru yönlendiği saptanmıştır.

KM: Tablo 7.6’da numunelerin kaynak merkezlerini gösteren mikroyapı numuneleri analiz edildiğinde 800/%2-2 Cu numunesinde tanelerin homojen olarak dağıldığı ve daha küçük tane boyutuna sahip olduğu gözlemlenmiştir. 800/%4,5-4,5 Cu numunesinde alaşım elementi miktarına bağlı (%4.5 Cu) olarak karıştırmanın tane yapısında TMEB’den kaynak merkezine doğru lineer bir uzama olduğu ve 800/%4,5-2 Cu numunesine göre daha küçük tane yapısının elde edildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 7.6. 800/%2-2, 800/%4.5-2 ve 800/%4.5-2 kodlu numunelerin ITAB(a), TMEB(b) ve KM (c)’nin mikroyapı görüntüleri

Numune Kodu	ITAB	TMEB	KM
800/2-2 Cu			
800/4.5-4.5 Cu			
800/4.5-2 Cu			

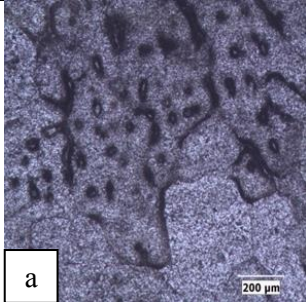
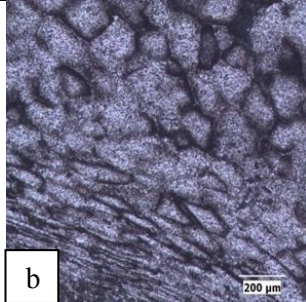
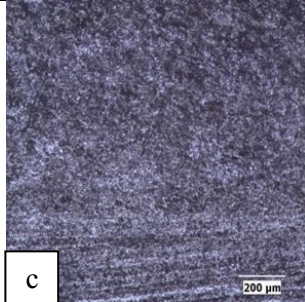
ITAB: Tablo 7.7’de görülen numune mikroyapılarından ITAB görüntüleri 1000 devir/dakika’da kaynak yapılmış 1000/%2-2 Cu, 1000/%4,5-4,5 Cu ve 1000/%4,5-2 Cu numuneleri kendi aralarında karşılaştırıldığında 1000/%4,5-2Cu numunesinde (%4.5-%2 Cu) Cu oranı arttıkça tane sınırlarının belirginleştiği ve dentritik yapının 800/%2-2 Cu, 800/%4,5-4,5 Cu ve 800/%4,5-2 Cu numunelerine göre artan karıştırma hızıyla küçüldüğü gözlemlenmiştir. Alaşım elementinin miktarındaki artış ile

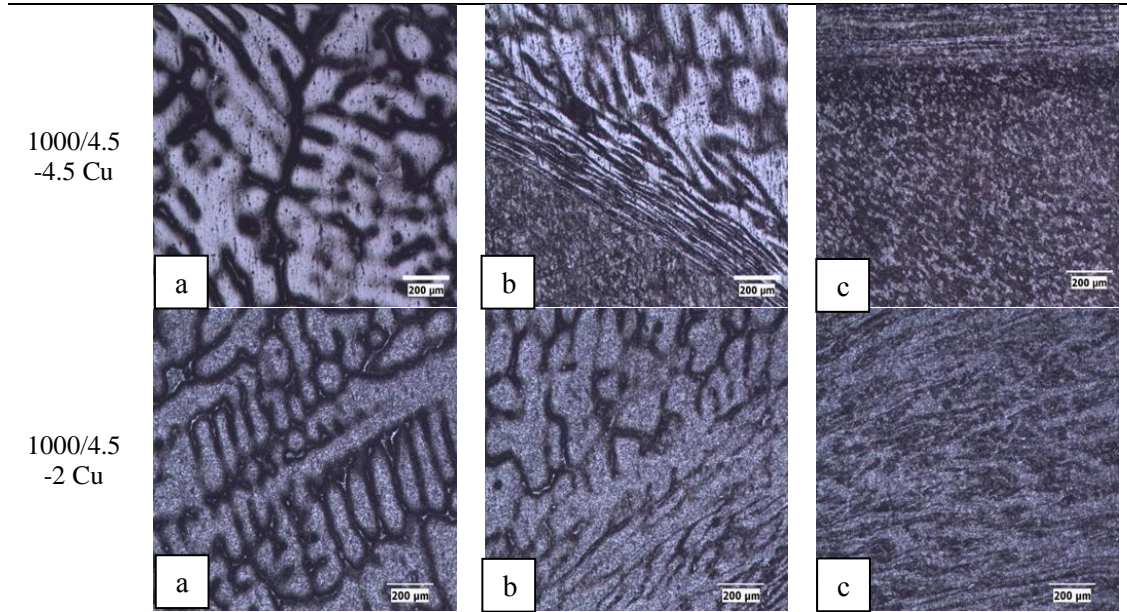
mikroyapıda oluşan dentiritik kollarının küçülerek daha homojen olarak dağıldığı saptanmıştır.

TMEB: Tablo 7.7’de TMEB bölgesinde 1000/%2-2 Cu numunesinde tanelerin daha küçük ve küresele yakın bir yapıya sahip olması ve tanelerin karıştırma hızının artmasıyla tane yapısında diğer numunelere göre daha ince soğan halkasına sahip bir mikroyapı gözlemlenmiştir. Buna karşın 800 devir/dakika karıştırma hızında elde edilen kaynaklı numunelerde olduğu gibi alaşım elementinin arttığı diğer numunelerin TMEB bölgelerinde tanelerin düzensiz olarak yönlendiği ve soğan halkası görünümünden ziyade taneler uzayarak takımın dönme yönüne doğru yönlendiği saptanmıştır.

KM: Tablo 7.7’de numunelerin kaynak merkezlerini gösteren mikroyapı numuneleri analiz edildiğinde 1000/%2-2 Cu numunesinde 800/%2-2 Cu numunesinde olduğu gibi tanelerin homojen olarak dağıldığı ve daha küçük tane boyutuna sahip olduğu gözlemlenmiştir. 1000/%4,5-2 Cu numunesinin kaynak merkezinde sütunsal ve takımın dönme yönüne bağlı olarak tanelerin yönlendiği gözlemlenmiştir. Ayrıca 1000/%4,5-4,5 Cu numunesinde tane yapısının daha küçük ve homojen olarak dağıldığı görülmektedir.

Tablo 7.7. 1000/2-2, 1000/%4.5-2 ve 1000/%4.5-2 kodlu numunelerin ITAB(a), TMEB(b) ve KM (c)’nin mikroyapı görüntüleri

Numune Kodu	ITAB	TMEB	KM
1000/2-2Cu			

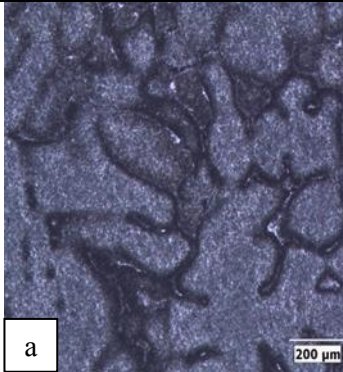
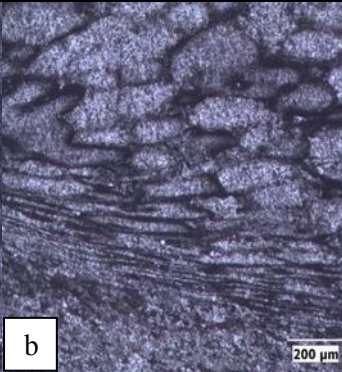
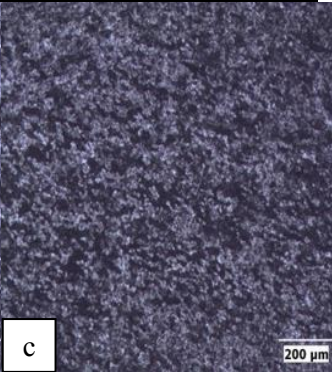
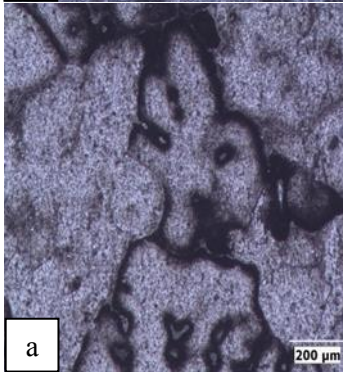
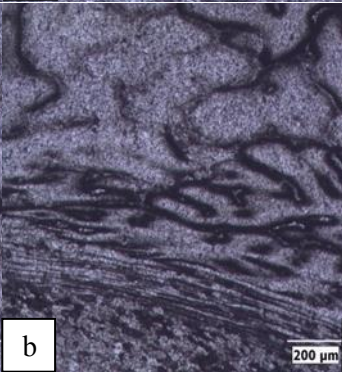
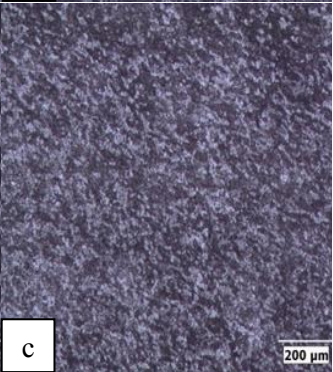
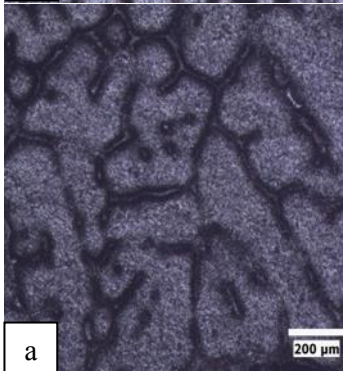
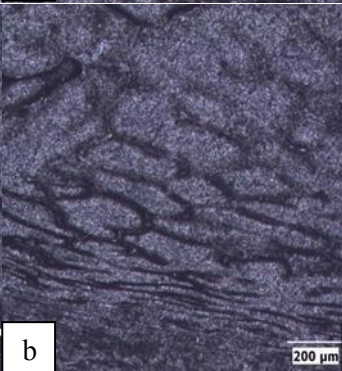
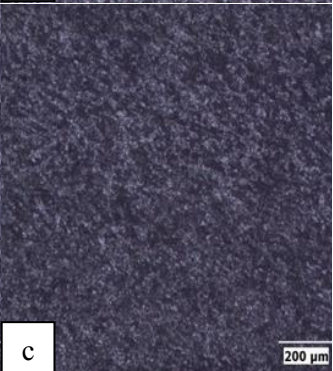


ITAB: Tablo 7.8’de görülen numunelerin mikroyapılarından ITAB görüntüleri 1200 devir/dakika’da kaynak yapılmış olan %2-2 Cu, %4,5-4,5 Cu, %4,5-2 Cu numuneleri bakır oranı arttıkça tane boyutu %4,5-2 Cu numunesinden hem kısmi ve tane büyümesi ve işlem esnasında oluşan basınç nedeniyle tanelerin kısmen yönlenmiş olduğu saptanmıştır.

TMEB: Tablo 7.8’de TMEB bölgesinde ise bakır oranı arttıkça tanelerin daha da büyük olduğu görülmüştür. Bakır oranının daha fazla artması neticesinde daha mukavemetli olur. Bakır oranı daha düşük olan bölgelerinde soğan halkaları ve daha fazla karışım gözlemlenmiştir. Ayrıca soğan halkaları %2 bakır numunesinde daha ince olduğu saptanmıştır. Soğan halkaları dışında bulunan TMEB yapısında tanelerin %2 bakır oranı 1200/%2-2 Cu numunesinde daha küçük tanelerin olduğu gözlemlenmiştir. %2’lik 1200/%2-2 Cu numunesi daha yumuşak olduğundan dolayı plastik akışın daha fazla olduğu saptanmıştır. Yani malzemenin plastik akış direnci az olduğu için (yumuşak olduğu için) soğan halkaları 1200/%4,5-4,5 Cu numunesinde daha fazla soğan halkası olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni %4.5 bakır oranına sahip malzemelerin %2’ye göre daha mukavemetli olduğu için daha fazla sürtünme enerjisi ortaya çıktığından bu ısı girdisinin %2 bakıra sahip numunelere göre daha fazla tane büyümesi etkisi yaptığı gözlemlenmiştir.

KM: Tablo 7.8'de KM bölgesinde 1200 devir/dakika'da %2-2 Cu, %4,5-4,5 Cu, %4,5-2 Cu numunelerin kaynak bölgeleri göz önüne alındığında %2 bakır oranına sahip yeniden oluşmuş tanelerin daha büyük ve bakırdan daha fazla tane sınırlarında yoğun olarak toplandığı gözlemlenmiştir. %4.5 bakır oranına sahip kaynak bölgesinin daha çok homojen olarak karıştığı gözlemlenmiştir. %4,5-2 Cu numunesinin %2-2 Cu numunesinden daha fazla %4,5-4,5 Cu numunesinden daha az homojen karıştığı gözlemlenmiştir.

Tablo 7.8. 1200/2-2 Cu, 1200/4,5-4,5 Cu 1200/4,5-2 Cu kodlu numunelerin ITAB(a), TMEB(b) ve KM (c)'nin mikroyapı görüntüleri

Numue Kodu	ITAB	TMEB	KM
1200/2-2Cu			
1200/4.5-4.5Cu			
1200/4.5-2Cu			

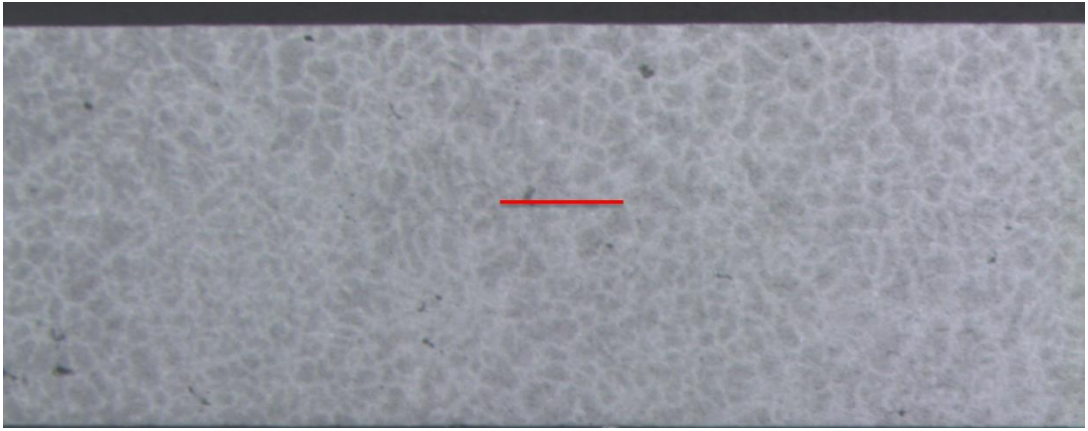
Rao ve arkadaşları [61], %6,7 Cu içeren Al alaşımının (AA2219) SKK ile birleştirilebilirliğini çalışmışlardır. Çalışmada elde edilen mikroyapı görüntüleri bu çalışma ile benzerlik göstermektedir. Ancak, Cu elementinin yapı içinde tane kenarlarında daha fazla olduğu görülmüştür.

Dubey ve arkadaşları [63], %4-10 arası Cu içeren Al döküm alaşımlarının aşınma davranışlarını incelemiştir. Yapılan çalışmada, elde edilen mikro yapı görüntülerinin bu çalışmadaki mikroyapı bölgelerine çok benzediği görülmektedir.

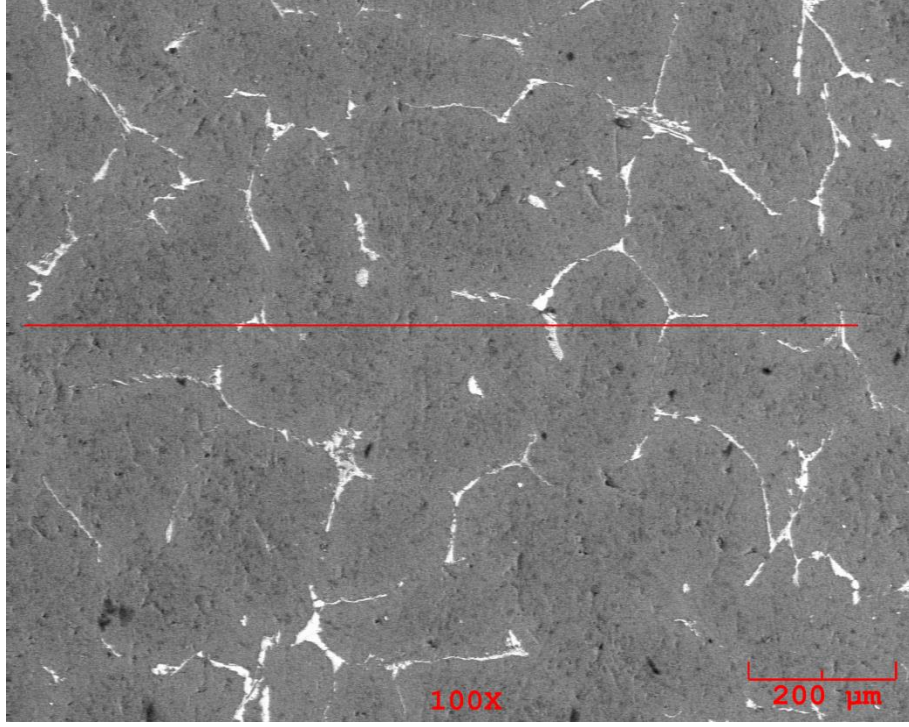
Böylece, literatür ile elde edilen mikroyapının uyumlu olduğu sonucuna varılmaktadır.

7.12. SEM-EDS Sonuçları

Al-Cu alaşımlı numunelerin EDS analizlerinde %2 Cu içeren alüminyum alaşımında bakır oranı %2.33 ve %4.5 Cu içeren alüminyum alaşımında ise %4.51 bakır 1200/2-2 olan numunenin kaynak merkezinden yapılan EDS analizinde Al %96.105, Cu %3.895 TMEB den yapılan çizgisel analizde sağ TMEB (takım ilerleme yönü termo mekanik etkilenmiş bölge) ise Al %95.85, Cu %4.14, sol TMEB (takım ilerleme tersi yönü) Al %95.724, Cu %4.27 olarak bulunmuş ve burada bakır oranının artmasının sebebi olarak yığılma kenarlarından alınan EDS analizlerinde bakır oranının buralarda daha yoğun olduğu tespit edilmiştir. Şekil 7.31 ve 7.32’de EDS alınan bölgenin konumu görülmektedir.

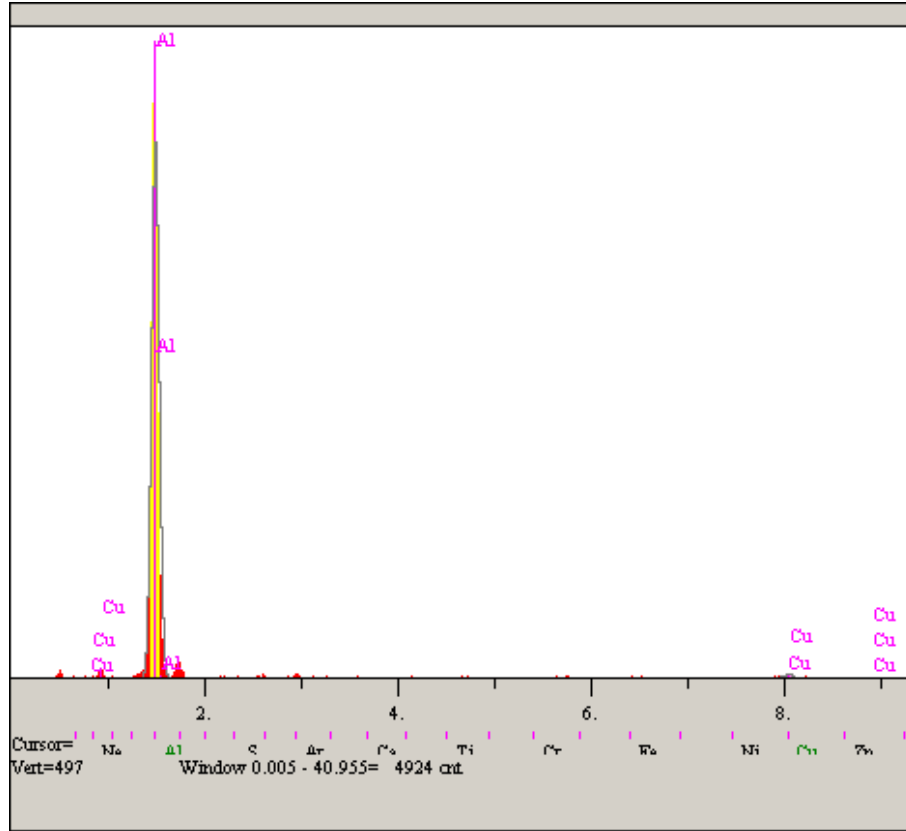


Şekil 7.23. %4,5-%2 Cu içeren alüminyum esas metalinin EDS analizi konumu



Şekil 7.24. %4,5 Cu içeren alüminyum esas metalinin EDS analizi konumları

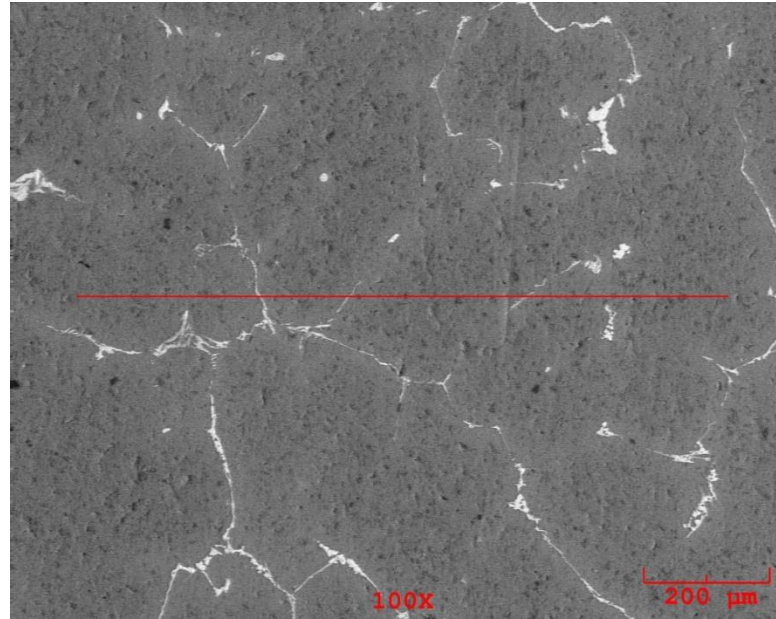
Şekil 7.33'deki %4,5 içeren numunenin EDS sonuçları incelendiğinde, bakır oranının %4,518 olduğu gözlemlenmiştir. %0,018 değeri kabul edilebilir hatanın altındadır. Buna göre deneyler için kullanılmaya uygun bulunmuştur. Analizlerde, numune içinde farklı elementler bulunamamıştır.



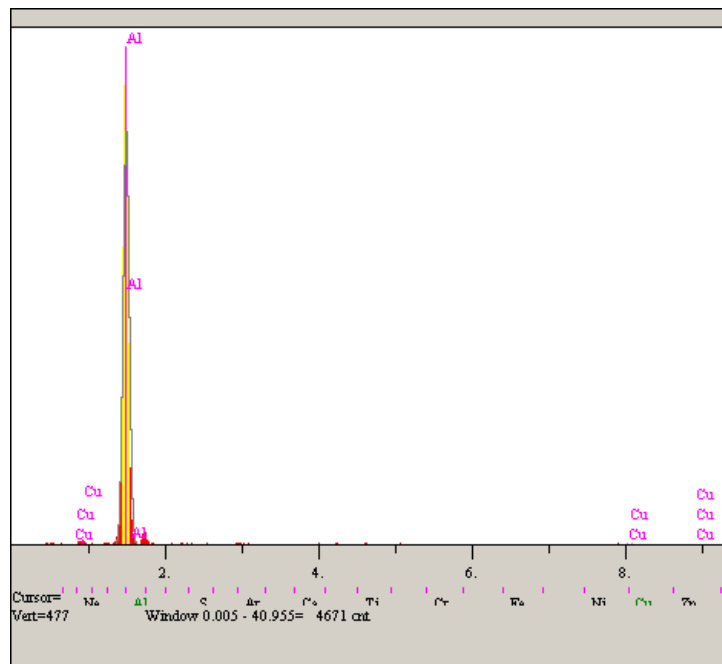
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units	
Al	Ka	4,090.10	127.908	95.482	wt.%	
Cu	Ka	42.59	13.053	4.518	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

Şekil 7.25. %4,5 Cu içeren alüminyum esas metalinin EDS analizi sonuçları

Şekil 7.34'de EDS analizlerinin yapıldığı bölge kırmızı çizgi ile gösterilmiştir. Şekil 7.35'te %2 Cu içeren alüminyum alaşımının EDS analiz sonuçları sunulmuştur. Buna göre, %2,3 Cu elde edildiği görülmüştür. %0,3 değeri kabul edilebilir değerdir. Döküm esnasında ayarlanan Cu oranı %2'dir %0,3 fazla çıkmasının nedeni bakırın tam olarak homojen dağılmaması ve tane sınırlarına çökelen bakırın EDS analizlerinde çok hafif sapmasından kaynaklandığı kanısına varılmaktadır.



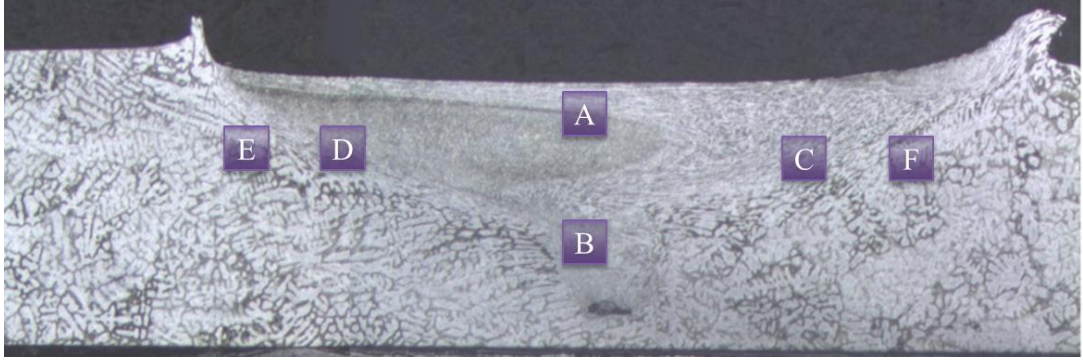
Şekil 7.26. %2 Cu içeren alüminyum esas metalinin EDS analizi konumları



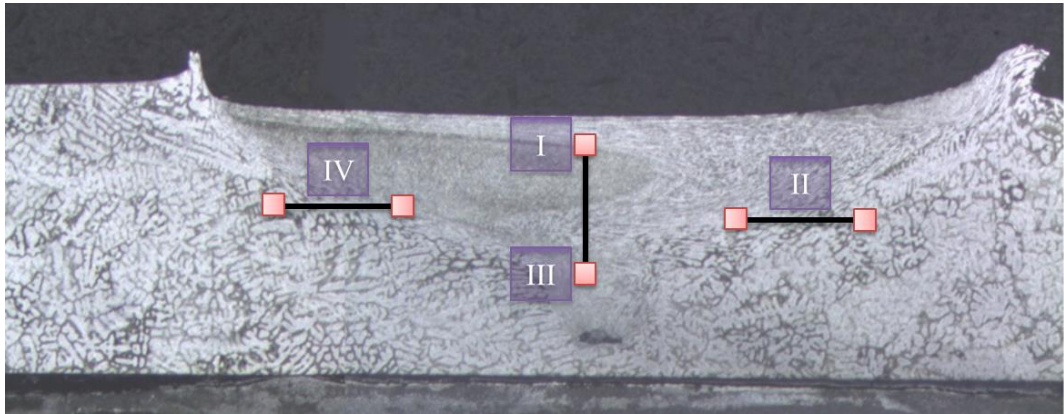
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
Al	Ka	3,810.50	123.459	97.661	wt.%
Cu	Ka	19.17	8.757	2.339	wt.%
				100.000	wt.% Total

Şekil 7.27. %2 Cu içeren alüminyum esas metalinin EDS analizi sonuçları

Şekil 7.36'de SKK'ile birleştirilen çiftlerin SEM görüntülerinin konumları görülmektedir. Ayrıca, Şekil 7.37'de kaynak karışım bölgesi (I-III), sağ TMEB (II) ve sol TMEB (IV) bölgelerinden alınan çizgisel EDS bölgelerinin konumları temsil edilmektedir.

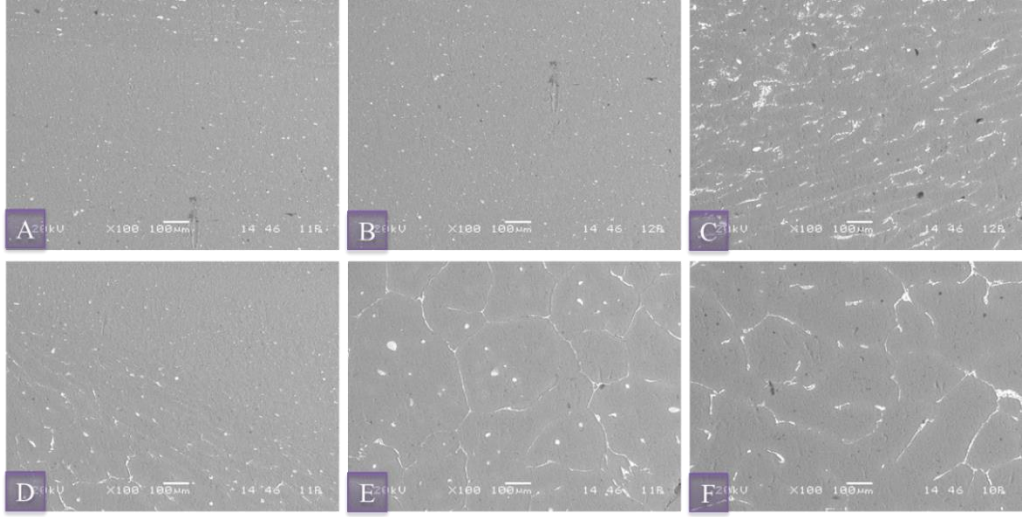


Şekil 7.28. SEM görüntüleri için örnek konum şablonu

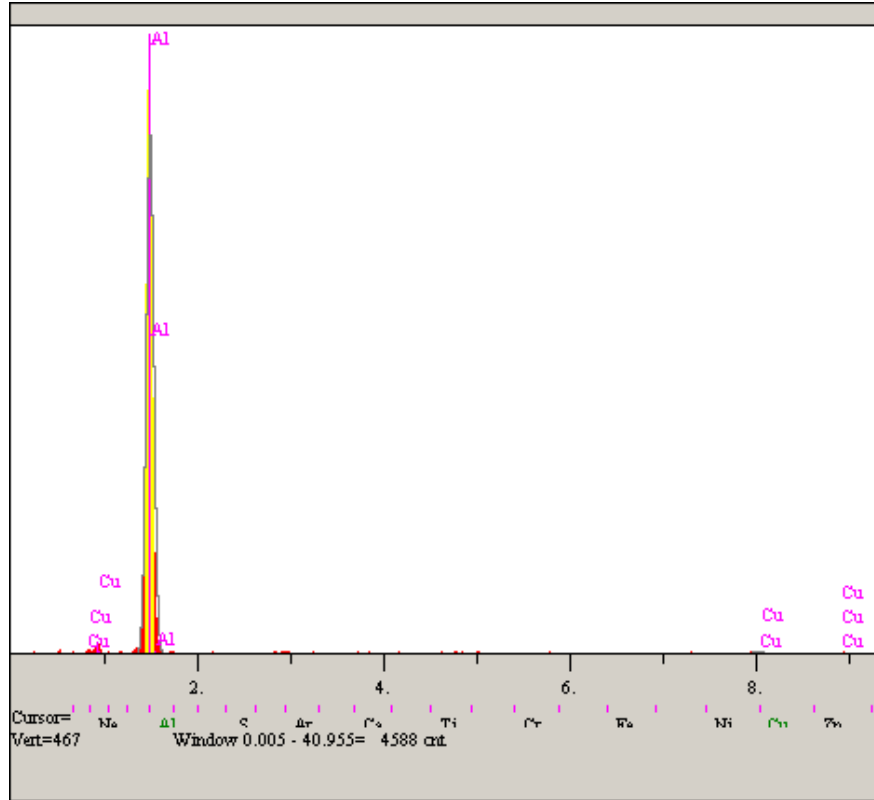


Şekil 7.29. Çizgisel EDS sonuçları için örnek konum şablonu

Şekil 7.38'de 1200 devir/dakika takım devir hızında %2-2 Cu içeren Al alaşımlarının SKK ile yapılan birleştirme sonucunda elde edilen SEM görüntüleri, 7.39-41'de ise çizgisel EDS sonuçları gösterilmektedir. Numunelerinin kaynak merkezinden yapılan EDS analizinde Al %96.105, Cu %3.895 TMEB den yapılan çizgisel analizde sağ TMEB ise Al %95.85, Cu %4.14, sol TMEB Al %95.724, Cu %4.27 olarak bulunmuş ve burada bakır oranının artmasının sebebi olarak yığıma kenarlarından alınan EDS analizlerinde bakır oranının buralarda daha yoğun olduğu tespit edilmiştir.

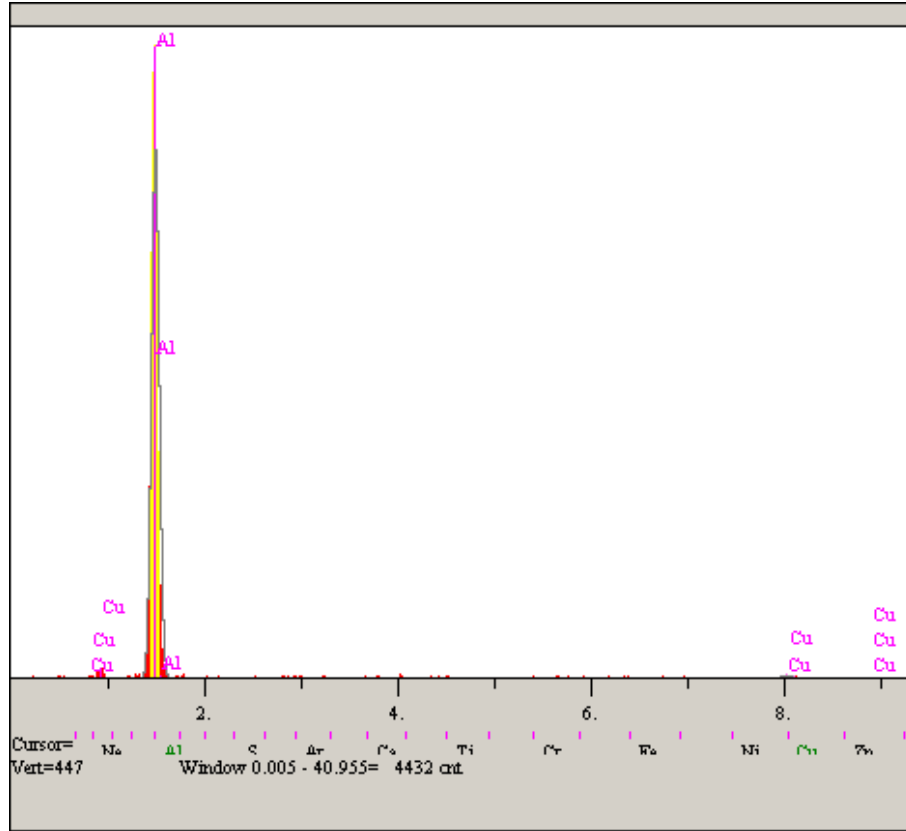


Şekil 7.30. 1200/2-2 numunesi için sem görüntüleri (A, B, C, D, E, F simgeleri şekil 7.36 deki konumlarıdır)



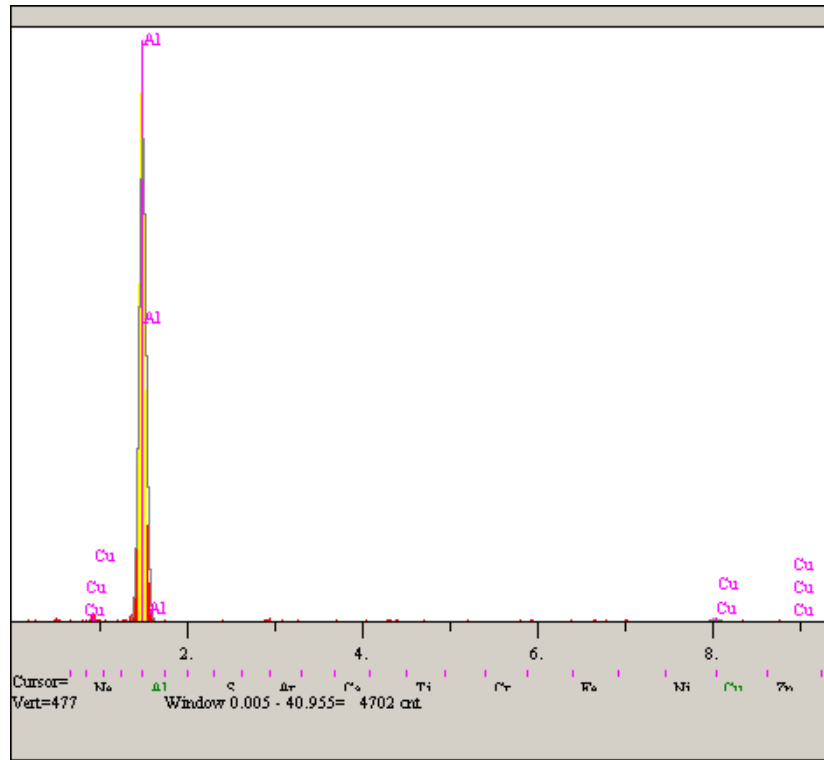
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
Al	Ka	3,860.63	124.268	96.105	wt.%
Cu	Ka	33.99	11.660	3.895	wt.%
				100.000	wt.% Total

Şekil 7.31. Şekil 7.37.'de gösterilen I-III nolu konumların 1200/2-2 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
Al	Ka	1,583.53	52.598	95.856	wt.%
Cu	Ka	14.95	5.110	4.144	wt.%
				100.000	wt.% Total

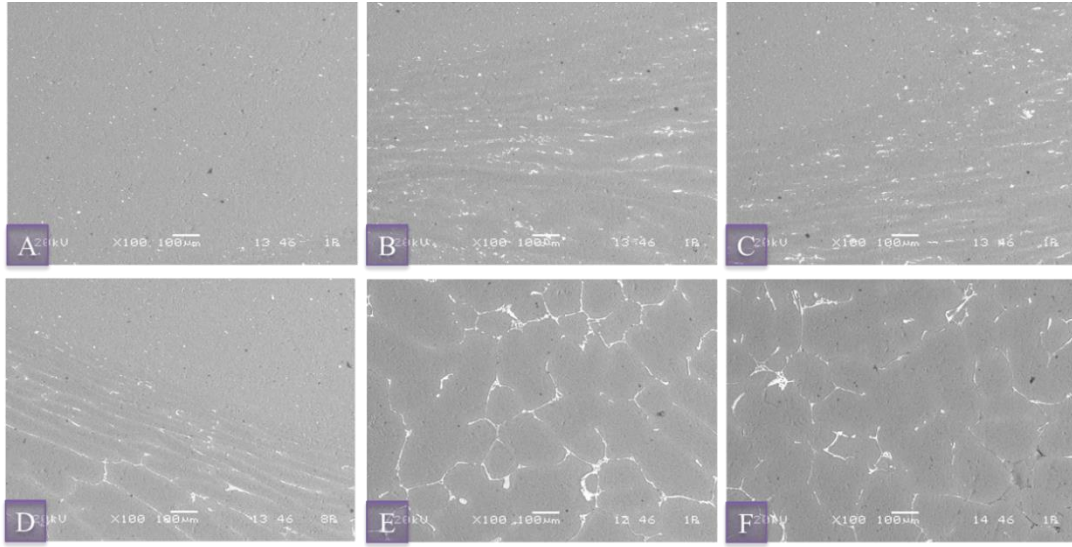
Şekil 7.40. Şekil 7.37.'de gösterilen II nolu konumunun 1200/2-2 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları



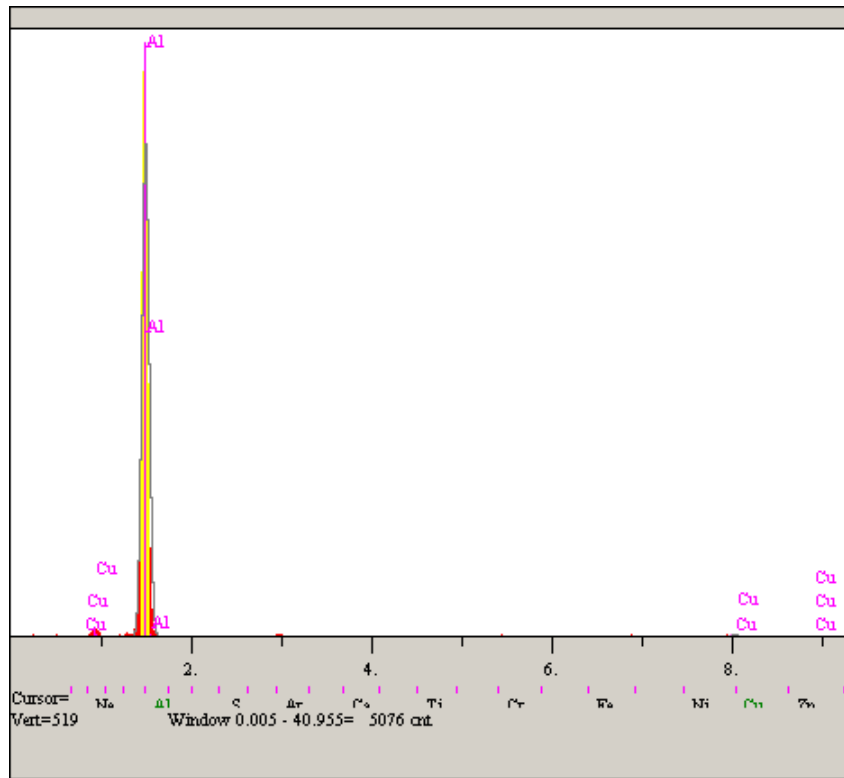
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
Al	Ka	3,874.99	124.499	95.724	wt.%
Cu	Ka	37.90	12.313	4.276	wt.%
				100.000	wt.%
					Total

Şekil 7.32. Şekil 7.37.'de gösterilen IV nolu konumunun 1200/2-2 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları

Şekil 7.42'de 1200 devir/dakika hızında %4,5-2 Cu içerikli Al alaşımlarının SEM görüntüleri Şekil 7.35'deki konumlara göre verilmiştir. D bölgesine bakılacak olursa soğan halkalarının oluşumunun belirsiz olduğu görülmektedir. Şekil 7.43'de I-III'nolu konumlarının, Şekil 7.44'de II nolu konumlarının ve Şekil 7.45'de ise IV nolu konumlarının EDS analizleri gösterilmektedir. Buna göre; elde edilen bakır oranı sırasıyla %3,18, % 3,381 ve %3.556'dır. Bu değerlerden, bakır oranının homojen bir şekilde dağıldığı sonucuna varabilmekteyiz.

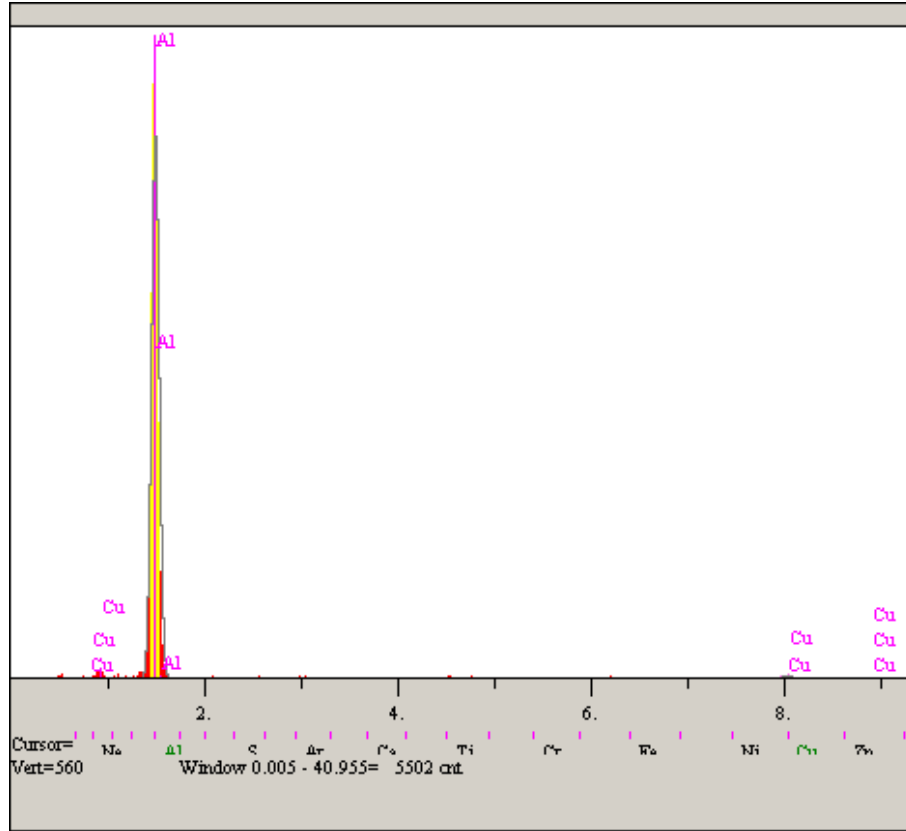


Şekil 7.33. 1200/4,5-2 numunesi için sem görüntüleri (A, B, C, D, E, F simgeleri şekil 7.36.'deki konumlarıdır)



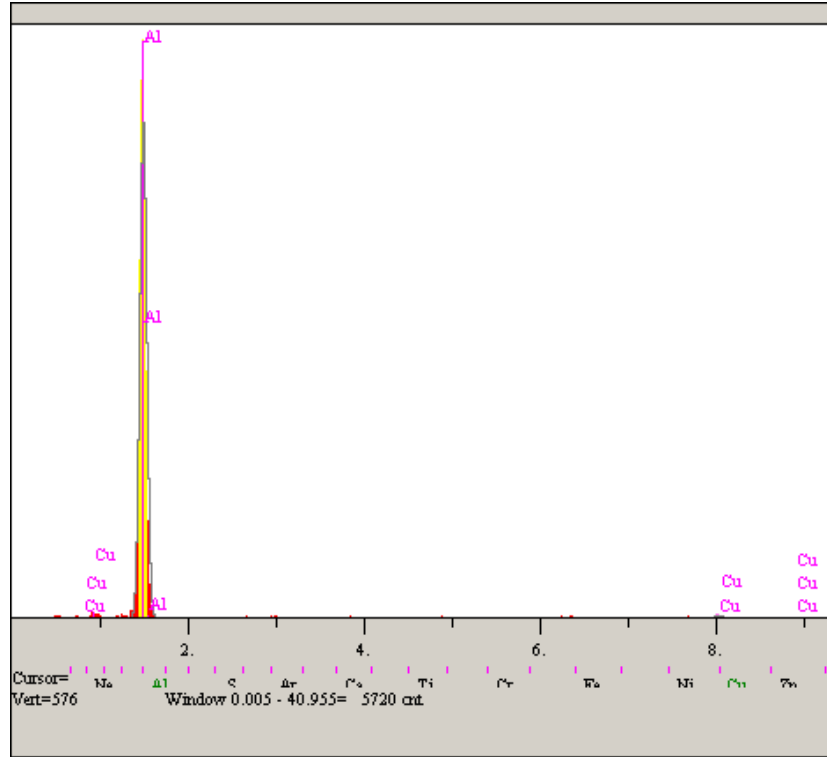
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
Al	Ka	4,214.75	129.842	96.820	wt.%
Cu	Ka	29.62	10.884	3.180	wt.%
				100.000	wt.% Total

Şekil 7.34. Şekil 7.37.'de gösterilen I-III nolu konumların 1200/4,5-2 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
Al	Ka	4,661.35	136.548	96.619	wt.%
Cu	Ka	35.05	11.840	3.381	wt.%
				100.000	wt.% Total

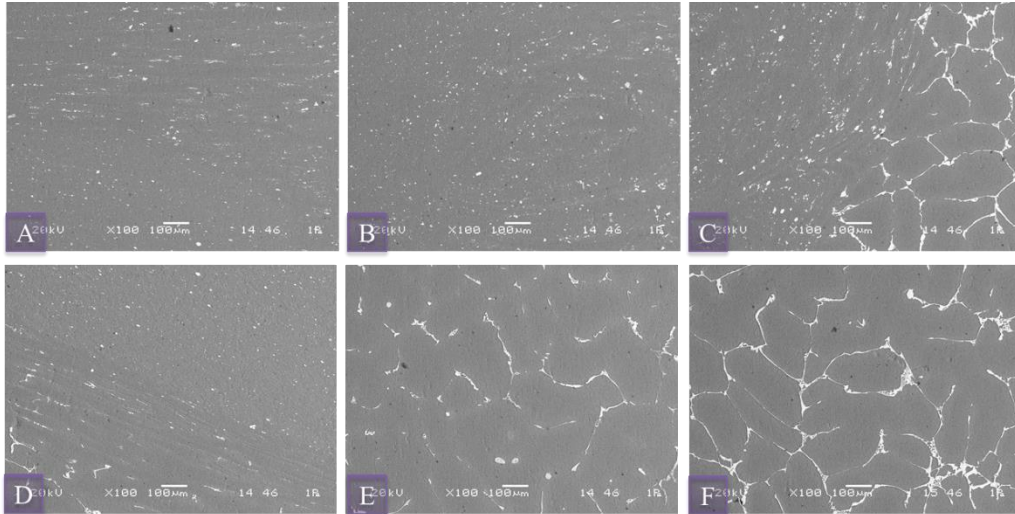
Şekil 7.35. Şekil 7.37.'de gösterilen II nolu konumun 1200/4,5-2 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları



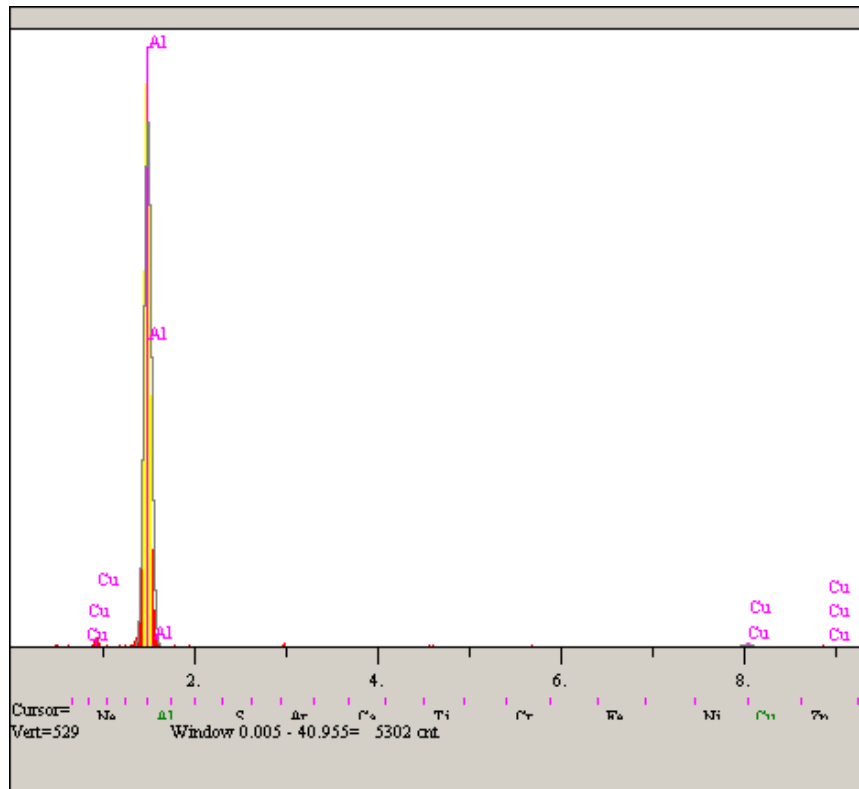
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
Al	Ka	4,814.80	138.778	96.444	wt.%
Cu	Ka	38.29	12.376	3.556	wt.%
				100.000	wt.%
					Total

Şekil 7.36. Şekil 7.37.'de gösterilen IV nolu konumun 1200/4,5-2 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları

Şekil 7.46'da 1200 devir/dakika takım dönüş hızında %4,5-4,5 Cu içerikli Al alaşımlarının SEM görüntüleri sunulmuştur. Buna göre, mikroyapının homojen bir şekilde karıştığı görülebilmektedir. Şekil 7.41'da, Şekil 7.32'de temsil edilen I-III nolu konumların, 7.48'de II nolu konumun ve 7.49'da IV nolu konumların çizgisel EDS sonuçları gösterilmektedir. Buna göre bölgelerde elde edilen Cu içerikleri sırasıyla, %4.78, %4,385 ve %4,483 olarak elde edilmiştir. Cu alaşımlarının sapma miktarı %0,28 altında olduğu ve bu nedenle Cu'nun homojen bir şekilde dağıldığı kanısına varılabilmektedir.

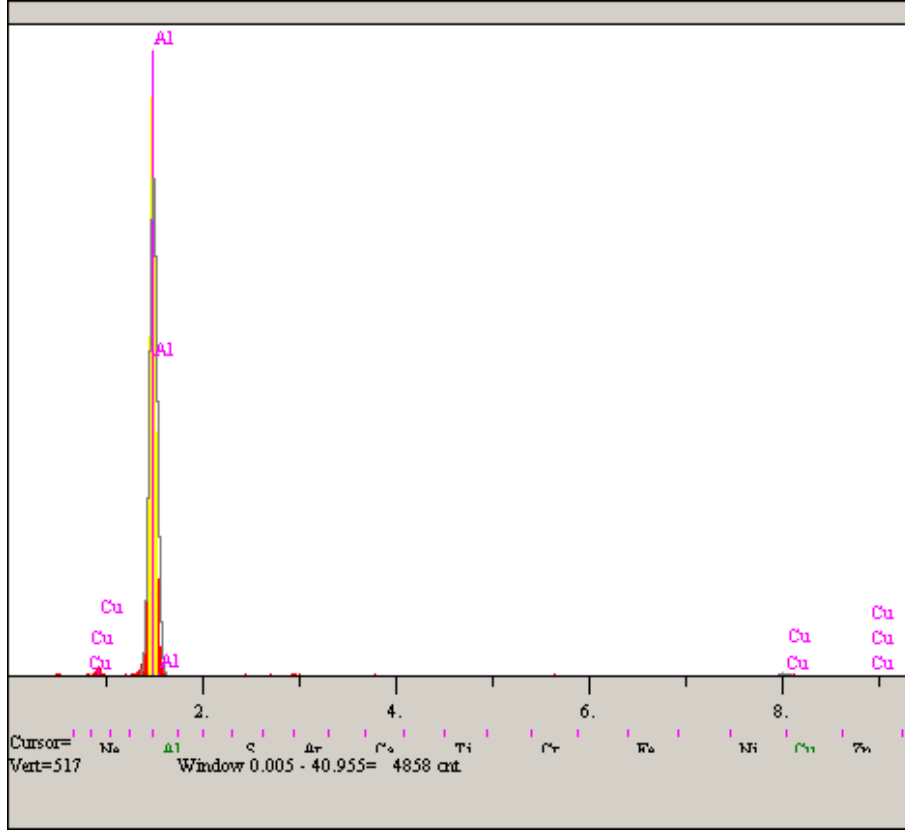


Şekil 7.37. 1200/4,5-4,5 numunesi için sem görüntüleri (A, B, C, D, E, F simgeleri şekil 7.36 deki konumlarıdır)



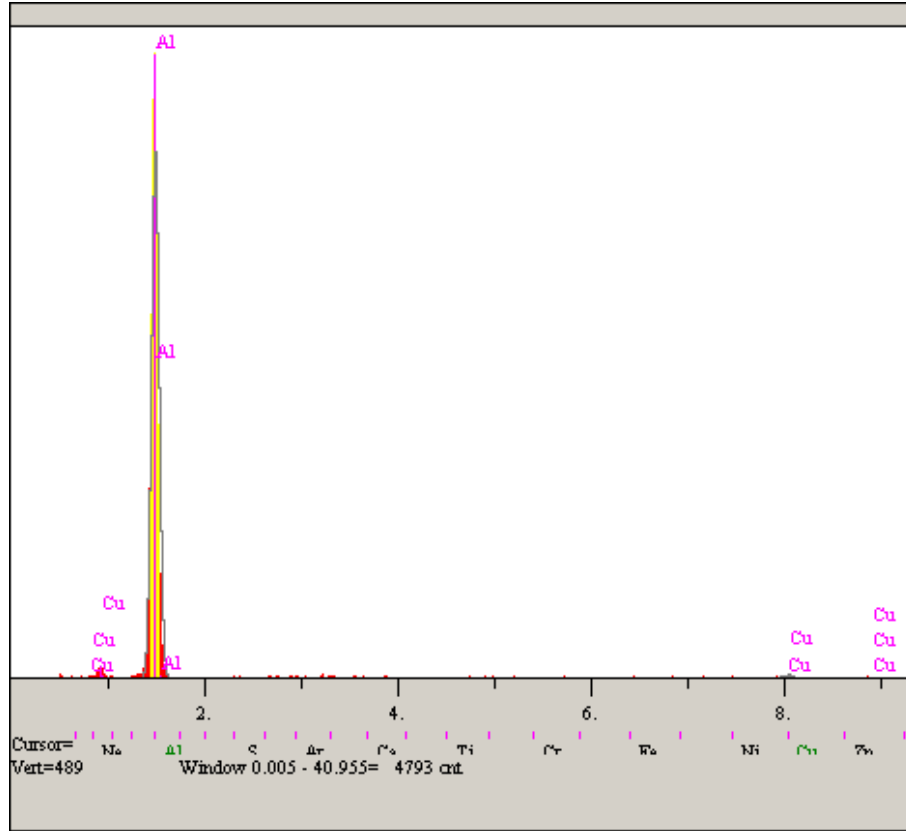
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
Al	Ka	4,489.76	134.011	95.212	wt.%
Cu	Ka	49.98	14.140	4.788	wt.%
				100.000	wt.% Total

Şekil 7.38. Şekil 7.37.'de gösterilen I-III nolu konumların 1200/4,5-4,5 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
Al	Ka	3,942.80	125.583	95.615	wt.%
Cu	Ka	39.68	12.599	4.385	wt.%
				100.000	wt.% Total

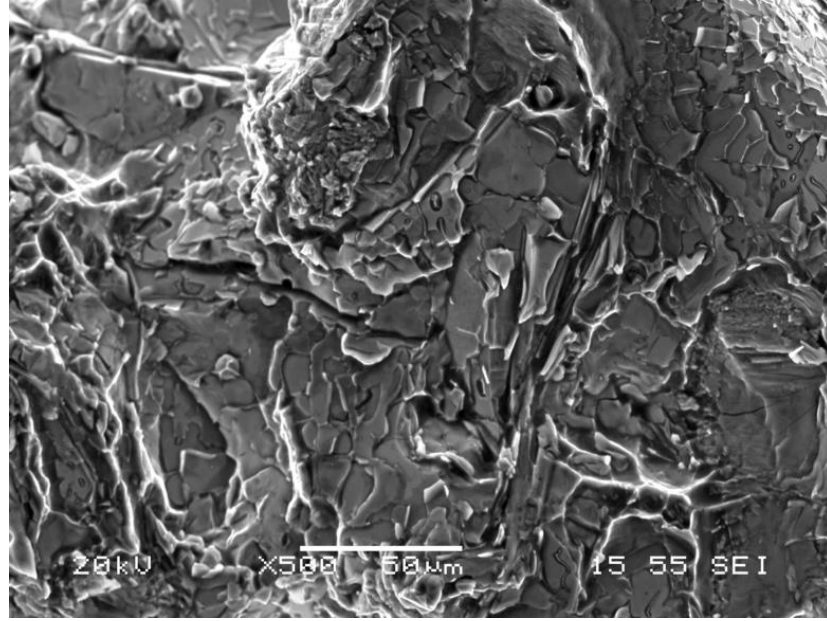
Şekil 7.39. Şekil 7.37.'de gösterilen II nolu konumun 1200/4,5-4,5 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları



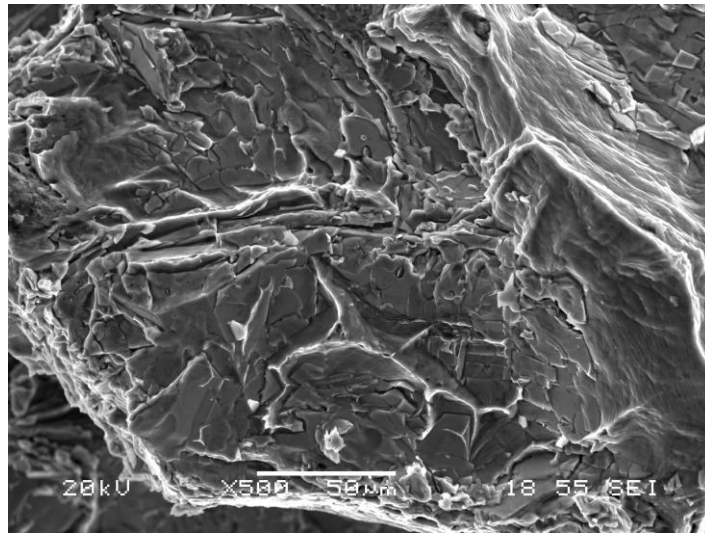
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	Units
Al	Ka	3,948.29	125.671	95.517	wt.%
Cu	Ka	40.75	12.768	4.483	wt.%
				100.000	wt.%
					Total

Şekil 7.40. Şekil 7.37.'de gösterilen IV nolu konumun 1200/4,5-4,5 numunesi için çizgisel EDS analiz sonuçları

Şekil 7.50'de 1200 devir/dakika takım dönüş hızında %4,5-4,5 Cu içeren Al alaşımlarının kırılma yüzeyi SEM görüntüsü gösterilmektedir. Şekil 7.51' de ise aynı takım dönüş hızında %4,5-2 numunelerinin kırılma yüzey görüntüsü sunulmuştur. Buna göre, SEM-EDS analizi ile mikroyapı sonuçlarının birbirlerini desteklediği gözlemlenmiştir.



Şekil 7.50. 1200/4,5-4,5 Çekme numunesi kırılmış yüzey SEM görüntüsü

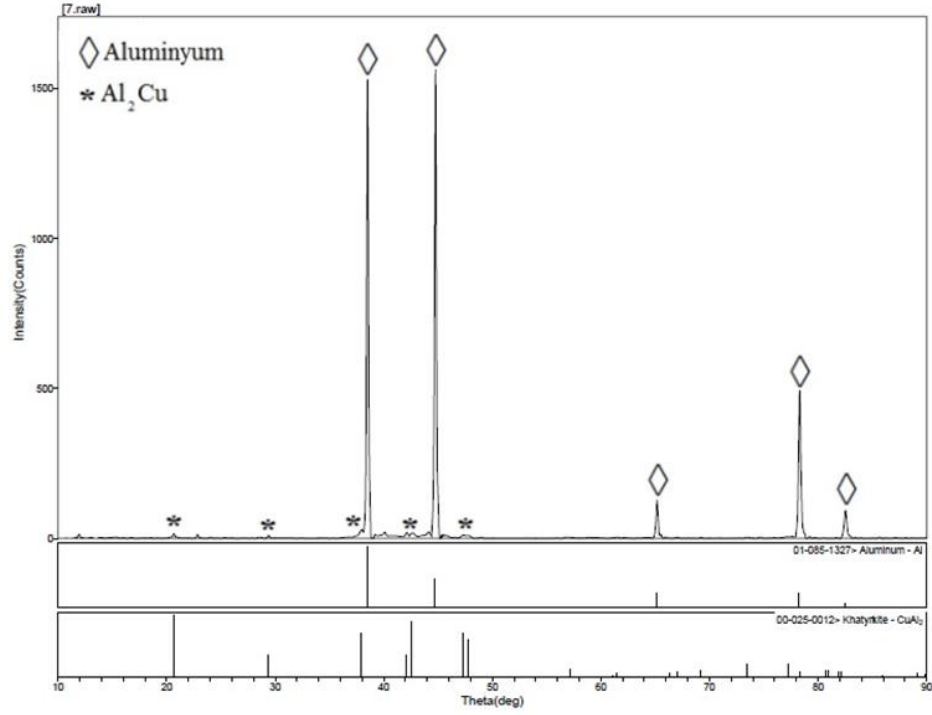


Şekil 7.41. 1200/4,5-2 Çekme numunesi kırılmış yüzey SEM görüntüsü

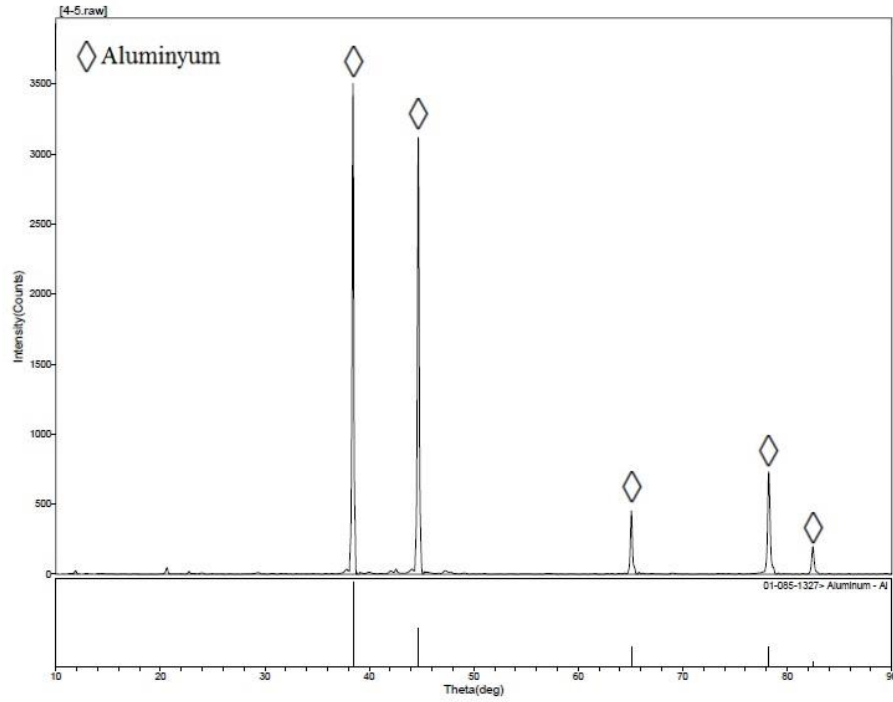
7.13. X-Işın Difraksiyon Sonuçları

SKK yöntemiyle birleştirilen Al-Cu alaşımına sahip levhaların kaynak bölgelerinde oluşan ısıdan etkilenmesi sonucu takım ucunun karıştırma hareketi sonucunda KM'ler içerisinde yoğun bir plastik deformasyon ile yeniden kristalleşme meydana gelmektedir. Bu nedenle KM'ler içerisinde faz değişikliklerine neden olabileceği tahmin edilmektedir. Olası faz değişikliklerinin tespit edilebilmesi için X-Işın difraksiyon (XRD) analizleri yapılmıştır.

Şekil 7.52 ve Şekil 7.53’de gösterilen %2 Cu ve %4.5 Cu içerikli Al alaşımı kaynaklı numunelerin XRD sonuçları irdelendiğinde, çalışmanın başlangıcında hedeflendiği gibi alüminyum oranı %95 üzerinde olduğu görülmektedir. Şiddeti düşük olan pikler muhtemelen karışımın içerisine katılan Cu elementine aittir. Pikler incelendiğinde şiddetleri yüksek ve genişlikleri dar olduğu görülmüştür.



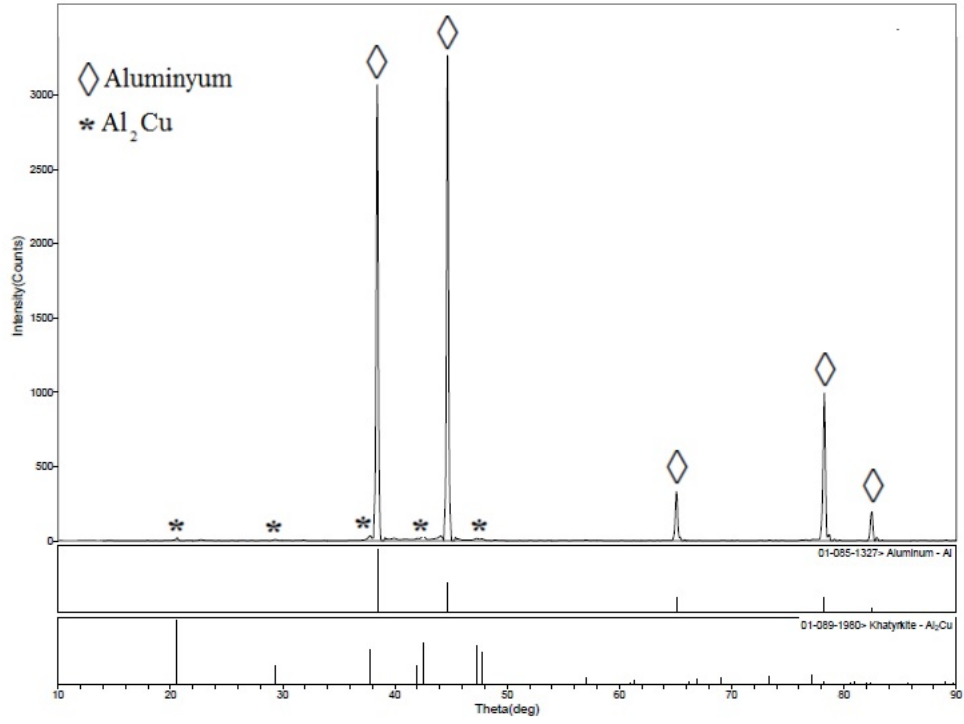
Şekil 7.42. %2 Cu Ana malzeme



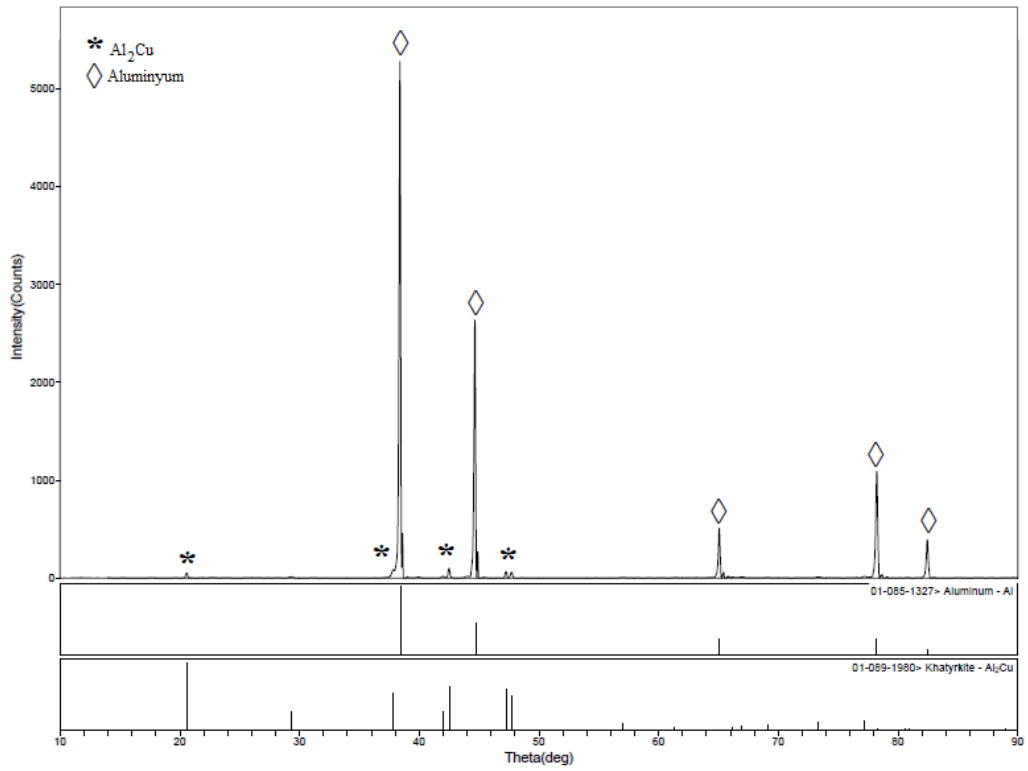
Şekil 7.43. %4.5 Cu Ana malzeme

Şekil 7.54-7.56 nolu şekillerde gösterilen 1200/4.5-4.5 Cu, 1200/4.5-2 Cu ve 1200/2-2 kodlu kaynaklı numunelerin XRD sonuçları incelendiğinde ana yapının alüminyum ve bunun yanında Al_2Cu fazı olduğu gözlemlenmiştir. 20° θ açısında şiddeti düşük olan Al_2Cu fazının piki gözükmemektedir. 1200/2-2 kodlu kaynaklı numunede tanımlanmamış gözükken yaklaşık olarak 20° açısındaki pik Al_2Cu fazına ait olması muhtemeldir.

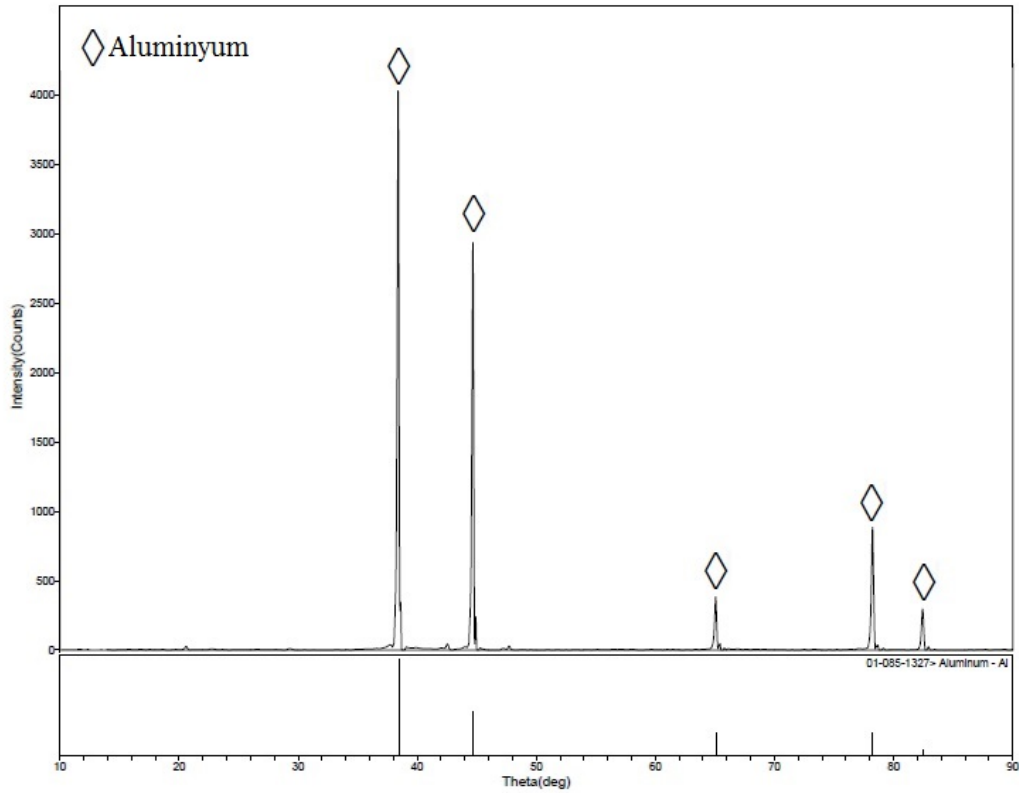
Yapılan XRD analizlerinde gevrek fazlara yada takımdan bulaşan bir yapıya rastanmamıştır. Ayrıca, Yahya ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada [59] AA2124/SiC/25p-T4 Alüminyum matrisli kompozit malzemesinin SKK ile birleştirilebilirliğini incelemiştir. Bu çalışmada da Al_4C_3 gibi gevrek fazların yapıda oluşmadığı da belirtilmiştir.



Şekil 7.44. %4.5-%2 Cu kodlu numune



Şekil 7.45. %4.5-%4,5 Cu kodlu malzeme



Şekil 7.46. %2-%2 Cu kodlu malzeme

7.14. Mikro Sertlik Sonuçları

Birleştirmelerde kullanılan Al-Cu ana metallerin mikrosertlik değerlerinin belirlenmesi için, kaynak işlemi yapılmış ve yapılmamış levhalardan kesilen numuneler kullanılmıştır. Bu numunelere kalıplama, zımparalama, parlatma ve dağlama gibi standart metalografik işlemler sonrası sıra-sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Mikrosertlik ölçümleri sonrasında Al-%4.5 Cu ana metalinin sertlik değeri ortalama 88.9 HV, Al-%2Cu ana metalinin ise 82.54 HV sertlik değerine ulaşılmıştır.

Genel olarak bakıldığında, karışma bölgesinin sertliği ana metalden daha fazla olmuştur. Sinhar ve Dwivedi'nin [60] yapmış olduğu çalışmada %4.8 Cu içeren Al alaşımının (AA2014) SKK ile birleştirilebilirliğini çalışmışlardır. Çalışma sonucunda, karışma bölgesinin mikrosertlikleri ana metalden daha da büyük olduğu

görülmüştür. Buna göre, mikrosertlik sonuçları literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

7.14.1. ITAB Al/4.5-4.5Cu

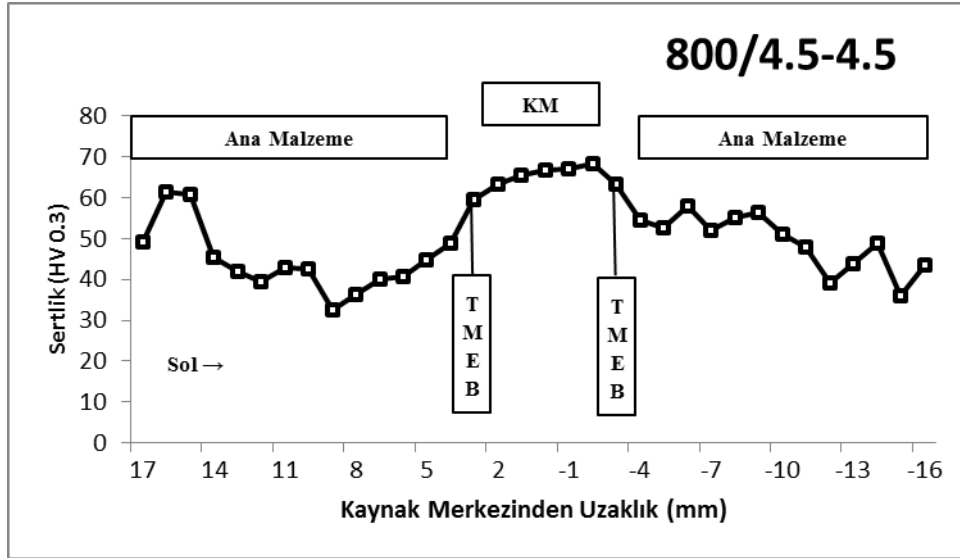
Şekil 7.57-59'da gösterilen mikrosertlik ölçümlerinde 800/4.5-4.5 Cu alaşımında ortalama 46.9 sertlik değeri elde edilirken 1000/4.5-4.5 Cu alaşımının ortalama 47.89 HV sertlik değeri ve 1200/4.5-4.5 Cu 53.87 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Takım dönme hızı artarken sertlik değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Takım dönme hızlarındaki sertlik değerleri Şekil 7.57-7.66'da gösterilmiştir.

7.14.2. KM Al/4.5-4.5Cu

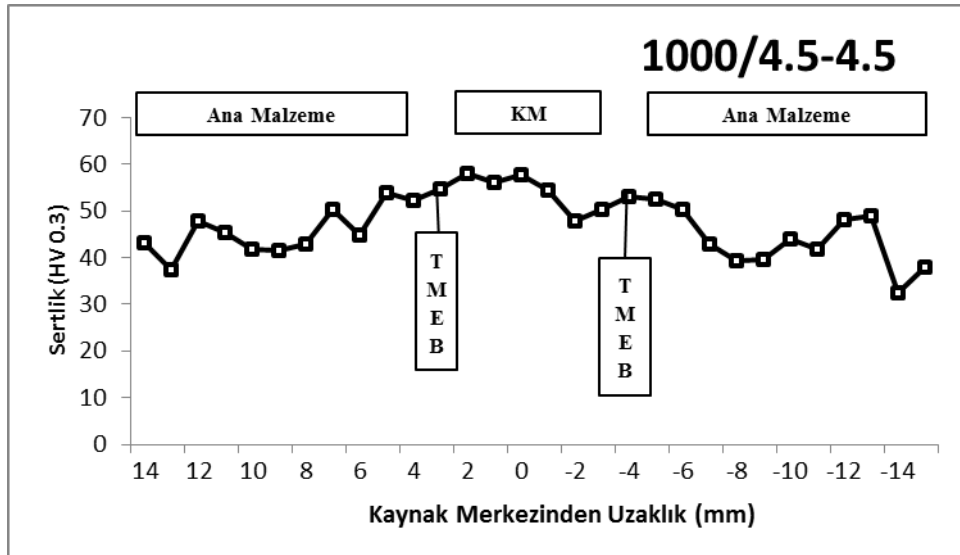
Şekil 7.56-58'de gösterilen mikroyapı incelemeleri ele alındığında kaynak merkezinde daha ince taneli yapılar gözlemlenmiştir. Kaynak merkezinden yapılan mikro sertlik ölçümlerinde 800/4.5-4.5 Cu alaşımında ortalama 66.2 HV 1000/4.5-4.5 için 54.05 HV, 1200/4.5-4.5 64.58 HV olduğu tespit edilmiştir. KM'nin alt ve üst bölgelerinden alınan sertlik değerleri ortalama birbirine yakın çıkmıştır. KM'de sertlik değerinin ITAB bölgesine göre yüksek çıkmasının nedeni tane yapılarının daha ince olmasına bağlanmıştır.

7.14.3. TMEB Al/4.5-4.5Cu

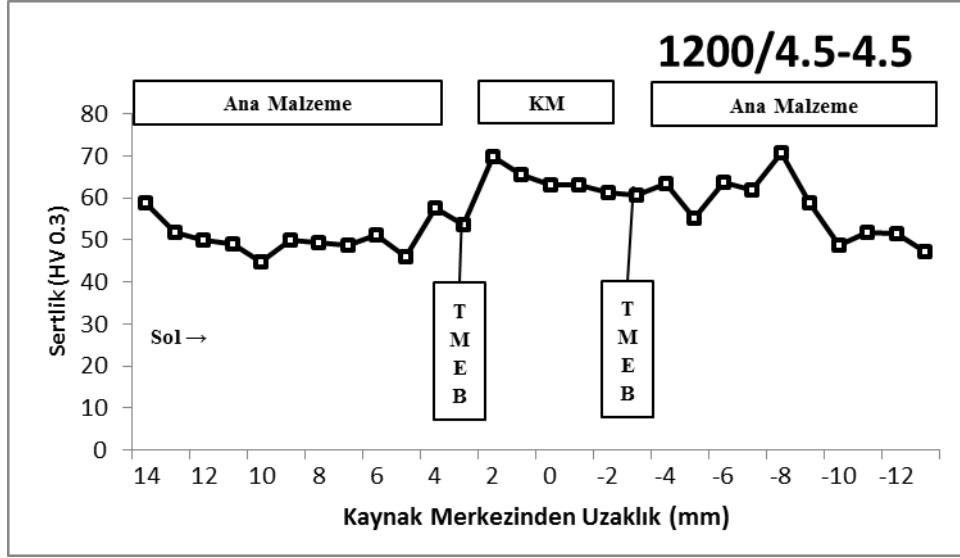
Şekil 7.57-59'da gösterilen mikroyapı incelemelerindeki TMEB bölgeleri ele alındığında, 800/4.5-4.5 Cu alaşımının mikro sertlik ölçümlerinde ortalama 61.45HV, 1000/4.5-4.5 Cu numunesi için ortalama 53.85 HV ve 1200/4.5-4.5 Cu numunesi için ortalama 57.15 HV sertlik değeri elde edilmiştir.



Şekil 7.47. Al/%4.5-4.5 Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı



Şekil 7.48. Al/%4.5-4.5 Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı



Şekil 7.49. Al/%4.5-4.5 Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı

7.14.4. ITAB Al/4.5-2Cu

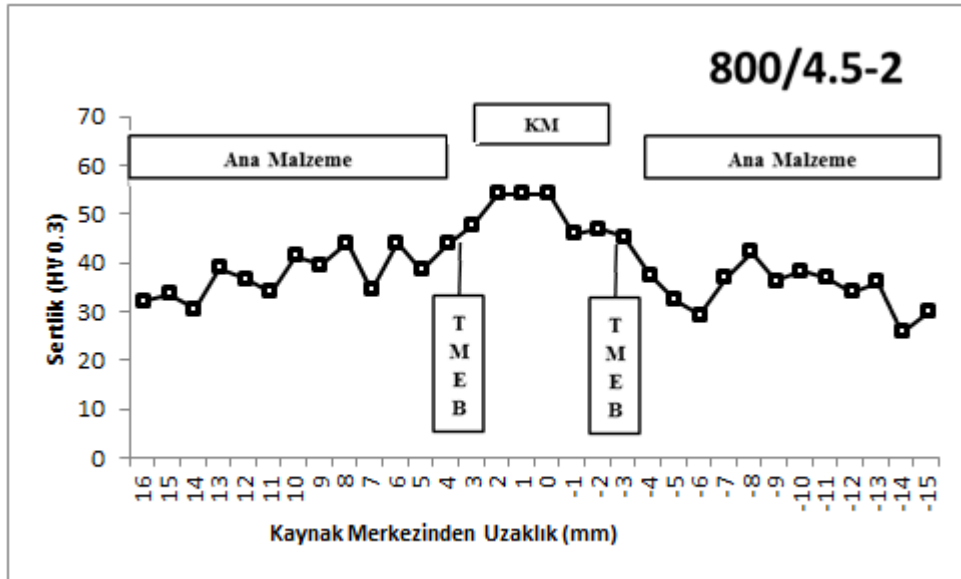
Şekil 7.60-62'de gösterilen 800 dev/dak Al-%4.5,2 Cu alaşımında 44.156 HV sertlik, 1000 dev/dak, Al/%4.5,%2 Cu alaşımında 45.514 HV sertlik, 1200dev/dak Al/%4.5-2 Cu alaşımında 46.545 HV sertlik değeri elde edilmiştir.

7.14.5. KM Al/4.5-2Cu

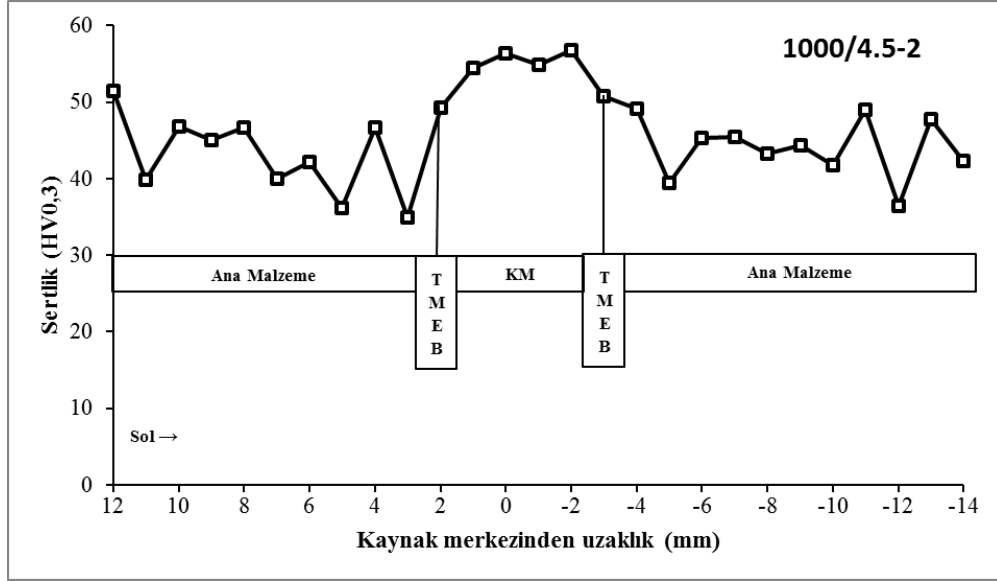
Şekil 7.60-62’de gösterilen 800 dev/dak da Al/%4.5,%2 Cu alaşımında ise 63.6HV 1000 dev/dak 55.6HV, 1200 dev/dak 54.74HV değeri elde edilmiştir.

7.14.6. TMEB Al/4.5-2Cu

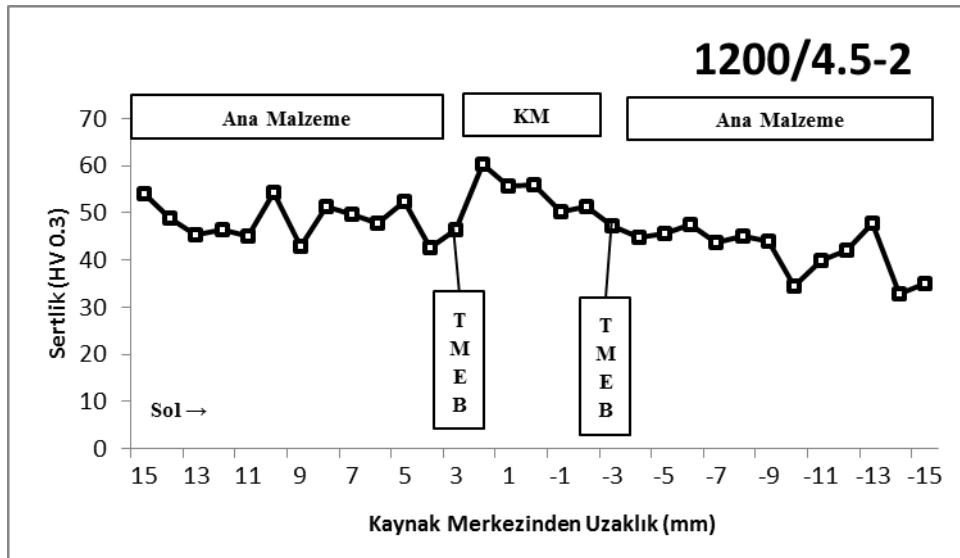
Şekil 7.60-62’de gösterilen 800 dev/dak da Al/%4.5,%2 Cu alaşımında ise 56.4 HV 1000dev/dak 50 HV, 1200 dev/dak 46.9 HV değeri elde edilmiştir.



Şekil 7.50. Al/%4.5-2 Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı



Şekil 7.51. Al/4.5-2 Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı



Şekil 7.52. Al/4.5-2 Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı

7.14.7. ITAB Al/2-2Cu

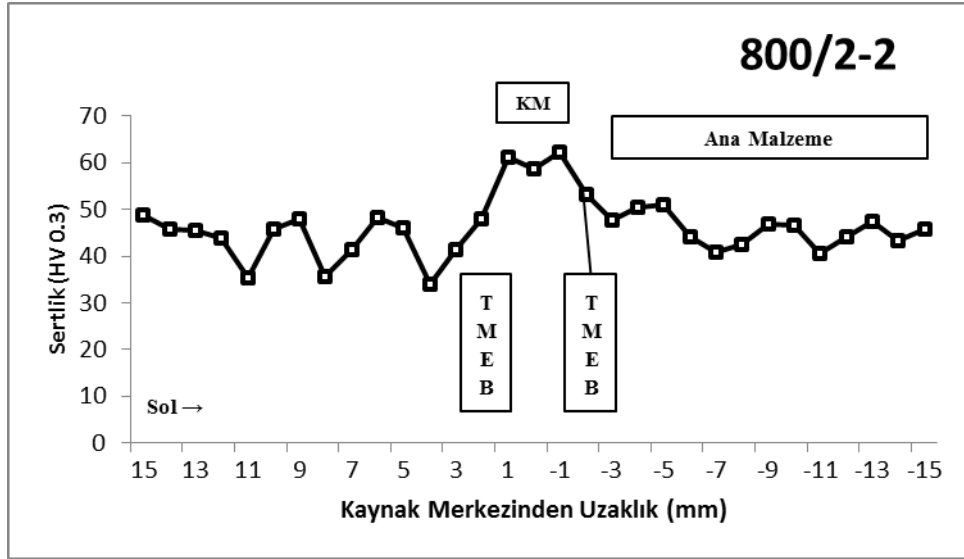
Şekil 7.63-65’de gösterilen 800 dev/dak Al/%2,%2 Cu alaşımında 44.334 HV sertlik değeri 1000 dev/dak Al/%2,%2 Cu alaşımında 48.308 HV ve 1200 dev/dak Al-%2,%2Cu alaşımında 50.283 HV ortalama sertlik değerleri bulunmuştur. Böylece takım dönme hızı artarken sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

7.14.8. KM Al/2-2Cu

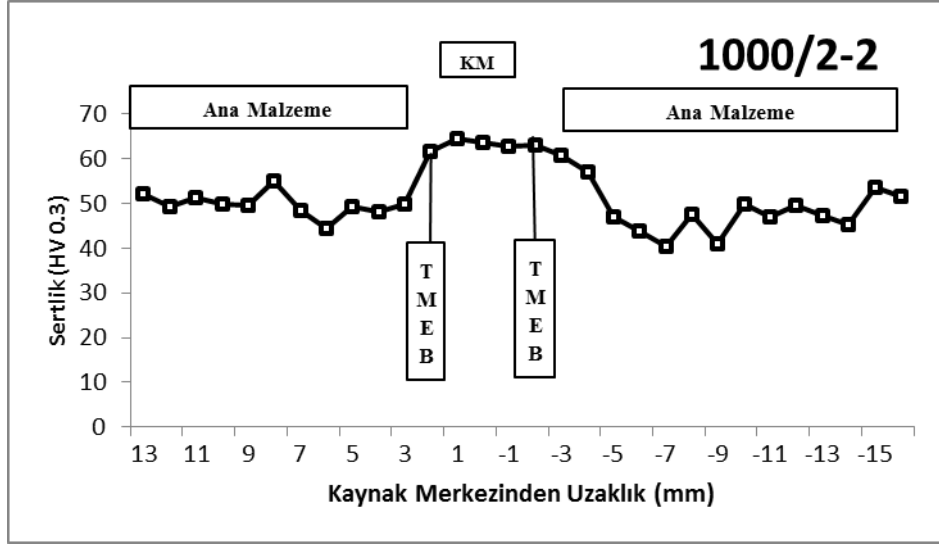
Şekil 7.63-65’de gösterilen %2,%2 Cu alaşımında 800dev/dak 60.7 HV 1000dev/dak 63 HV 1200 dev/dak da ise 64.72 HV ortalama sertlik değerlerine ulaşılmıştır

7.14.9. TMEB Al/2-2Cu

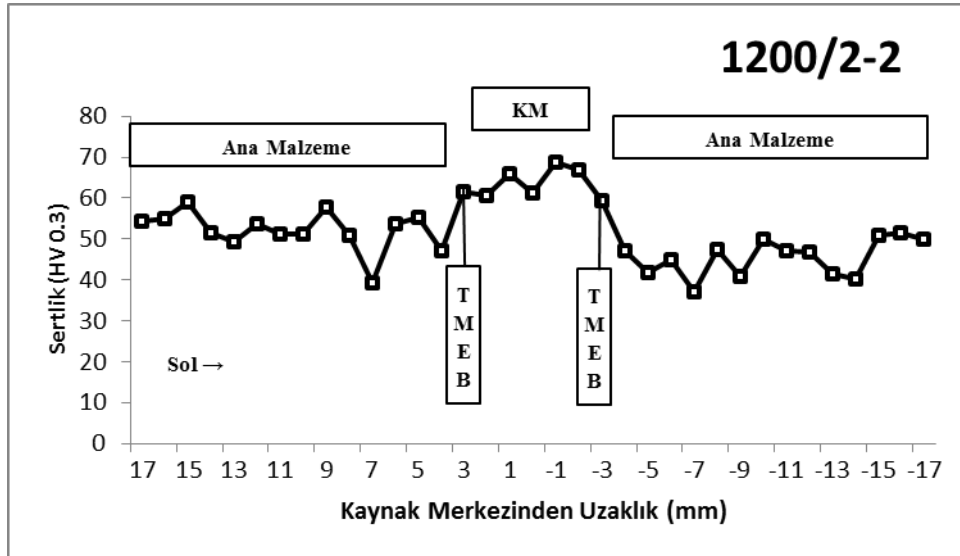
Şekil 7.63-65’de gösterilen Al/%2,%2 Cu alaşımında 800dev/dak da ise 50.6 HV 1000 dev/dak 59.25 HV 1200 dev/dak da ise 60.45 HV değerleri elde edilmiştir.



Şekil 7.53. Al/%2-2 Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı



Şekil 7.54. Al/2-2 Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı



Şekil 7.55. Al/2-2 Cu orta bölgelerine ait mikrosertlik dağılımı

BÖLÜM 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında SKK yöntemiyle 32 mm/dak sabit kaynak hızında, 800, 1000, 1200 dev/dak takım dönme hızında gerçekleştirilen Al-Cu alaşımlarının birleştirilmelerinin kaynak bölgelerindeki sıcaklık dağılımlarının ölçülmesi mikroyapı karakterizasyonu, sertlik dağılımları ve mekanik özelliklerinin tespit edilmesi bu çalışmaların sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda sırayla sıralanmıştır.

Kaynak sıcaklığının ölçümleri sonucunda 1200/%2-2 Cu içerikli alaşımın kaynak metali içerisinde en yüksek sıcaklık değerine ulaşılırken ITAB bölgesinin sıcaklığında en yüksek 1200/%4,5-4,5 Cu alaşımında gözlemlenmiştir. ITAB bölgesinde elde edilen sıcaklık 1200/%2-2 Cu alaşımının ITAB'ından elde edilen sıcaklık birbirine yakın çıkmıştır. Kaynak metali ve ITAB bölgelerinin sıcaklıkları artan devir hızıyla arttığı gözlemlenmiştir.

- Makro ve mikroyapı incelemeleri sonucunda bulunan sonuçlar: 800/4.5-4.5, 1000/4.5-4.5, 1200/4.5-4.5, 800/4.5-2, 1000/4.5-2, 1200/4.5-2, 800/2-2, 1000/2-2, 1200/2-2, dev/dak takım dönme hızlarında gerçekleştirilen Al-Cu alaşımlarının SKK yöntemiyle birleştirilmesi sonucu kaynaklı bölgelerin makroyapıları incelendiğinde başarılı bir birleştime gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir.

Mikroyapı incelemeleri sonucunda bulunan sonuçlar:

- Birleştirme işleminin yapıldığı numunelerde kök nüfuziyetizliğiyle karşılaşılmamıştır.

- Birleştirilen numunelerin ITAB, TMEB, KM bölgelerinde mikroyapı değişikliklerine rastlanmıştır.
- Değişken kaynak parametreleri olan takım dönme hızı ITAB bölgelerindeki tane büyüklüklerindeki değişime etkisi olmamıştır. Fakat takım devir hızı arttıkça KM yapısının artan devir sayısı ile tanelerin küçüldüğü gözlemlenmiştir. KM'lerde, genel olarak baskın olan mikroyapı değişiminin, Al-Cu tanelerinin yeniden kristalleşme sonucu incilmesi olduğu belirlenmiştir.
- Sertlik ölçümleri sonucunda bulunan sonuçlar: Bütün birleştirme işlemleri gerçekleştirilen numunelerin sertliklerine bakıldığında, en yüksek sertlik değerine Al/4.5-4,5 Cu alaşımında görülmüş, en düşük sertlik değeri ise Al/2-2 Cu alaşımında görülmüştür.
- Birleştirmelerin Al/Cu-ITAB'larına ait üst ve alt bölgelerinde, genel olarak önemli sertlik farklılıkları görülmemiş olup, değerlerin birbirlerine yakın çıktığı tespit edilmiştir.
- Birleştirmelerin KM'lerindeki en yüksek sertlik değerleri, yine en düşük takım dönme hızının uygulandığı 800/32 Al/Cu numunesinde elde edilmiştir. Ancak, takım dönme hızındaki artışa bağlı olarak KM'lerin içerisinde kayda değer bir sertlik azalması belirlenmemiştir.
- Birleştirilen Al-Cu levhaların takım dönme-ilerleme yönüne göre olan konumlarının, KM'lerin sertliklerine belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. KM'lerin üst ve alt bölgelerdeki sertliklerin, genel olarak birbirine benzer olduğu tespit edilmiştir.

Mekanik deneyler sonucunda bulunan sonuçlar:

- En yüksek çekme ve eğme mukavemet değerlerine bakıldığında takım devir hızı arttıkça ortalama çekme mukavemetlerinin arttığı gözlemlenmiş ve Al/%2 Cu-%4.5 Cu olan alaşımlı numunenin takım dönme hızı 1200 dev/dak olan da en yüksek çekme mukavemetine ulaşılmıştır. En düşük çekme mukavemeti değerine ise 800 dev/dak Al/%2-2 Cu alaşımında ulaşılmıştır.

- En düşük eğme mukavemetleri eğme deneyleri sonucunda 1000 dev/dak takım dönme hızında Al-%2-%2 Cu alaşımlı numuneden en yüksek 1243 N eğme mukavemeti değerine ulaşılmış ve maximum uzama 21.6 mm olarak hesaplanmıştır. Deneylerden alınan sonuçlara göre en yüksek mukavemet değerlerine yüzey eğme ile yapılan testlerden elde edilmiştir. En düşük eğme sonuçlarına da kök den yapılan deneylerden 800/%4.5-%4.5 numunesinden 462 N eğme mukavemeti ve 1.75 mm uzama değeri elde edilmiştir.
- Genellikle, takım dönme hızının artmasıyla birleştirmelerin mekanik özelliklerinin de arttığı tespit edilmiştir. 3340 takım çeliğinin Al-Cu alaşımlı levhalarının kaynağına uygun olduğu belirlenmiştir.
- Tüm birleştirmelerde tespit edildiği gibi XRD sonuçlarında 1200/4.5-4.5 Cu, 1200/4.5-2 Cu ve 1200/2-2 kodlu kaynaklı numunelerinin ana yapının alüminyum ve bunun yanında Al₂Cu fazı olduğu gözlemlenmiştir.
- Takım kuvveti, takım devir hızı arttıkça azalmıştır. Ayrıca, malzeme içindeki bakır oranı arttıkça takım kuvvetlerinde artış gözlemlenmiştir.

8.2. Öneriler

Tez çalışması kapsamında, Al-Cu levhaların SKK ile birleştirilmeleri, dikey kalıpcı frezesi kullanılarak yapılmıştır. Bu birleştirmelerin aynı zamanda, CNC dikey freze tezgâhı ile de yapılması ve sonuçların değerlendirilmesinin yararlı olabileceği düşünülmektedir.

Birleştirmelerde kullanılan takım geometrisi yeniden tasarlanıp, yeni birleştirmeler yapılabilir. Elde edilen sonuçlar, bu tez çalışmasındaki sonuçlarla karşılaştırılabilir.

Tez kapsamında kullanılan kaynak parametrelerinde ve farklı parametrelerde gerçekleştirilebilecek birleştirmelerin otomotiv ve uçak sektörüne yönelik olarak da, çalışma sıcaklıkları şartlarında yorulma deneyleri ve korozyon özelliklerinin incelemeleride yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Guo, J. F., Chen, H. C., Sun, C. N., Bi, G., Sun, Z., and Wei, J., Friction stir welding of dissimilar materials between AA6061 and AA7075 Al alloys effects of process parameters., *Materials and Design*, 56, 185–92, 2014.
- [2] Aydın, H., Bayram, A., Uğuz, A., and Akay, K. K. S., Tensile properties of friction stir welded joints of 2024 aluminum alloys in different heat-treated-state., *Materials & Design*, 30(6), 2211–21, 2009.
- [3] Yılmaz, S., Ünlü, B., and Uzkut, M., Alüminyum Alaşımlarında Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Uygulamaları., *Engineer & the Machinery Magazine*, 57(676), 2016.
- [4] Alper, M., Alüminyum sürekli döküm yöntemi ile üretilmiş 5052-5182 alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilirlik kabiliyetlerinin belirlenmesi., 2003.
- [5] Sorensen, C., Nelson, T., and Packer, S., Tool material testing for FSW of high-temperature alloys., *Symposium on Friction Stir Welding*, 2001.
- [6] Onar, V., Tıg Kaynağında Azot Gazının Alüminyum Yüzey Ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi., *Gazi Üniversitesi*, 2010.
- [7] Mısırlı, C., 5083 kalite alüminyum alaşımının homojenize edilerek sertlik değerlerinin ve mikroyapılarının incelenmesi., 2011.
- [8] İpekoğlu, G., Kaynak sonrası ısıl işlemin sürtünme karıştırma kaynaklı AA6061 ve AA7075 alüminyum alaşımı levhalarda içyapı ve mekanik özelliklere etkisinin., *Dokuz Eylül Üniversitesi*, 2011.
- [9] Delikanlı, Y., Alüminyum alaşımlarında çökelme sertleşmesinin mekanik özelliklere etkisi., 2011.
- [10] Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği. <http://malzememuh.cbu.edu.tr/>. Erişim Tarihi: 25.04.2017.
- [11] İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü. <http://www.mme.itu.edu.tr/>. Erişim Tarihi: 25.04.2017.
- [12] Benavides, S., Li, Y., Murr, L. E., Brown, D., and McClure, J. C., Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminum., *Scripta materialia*, 41(8), 809–15, 1999.

- [13] Nandan, R., DebRoy, T., and Bhadeshia, H. K. D. H., Recent advances in friction-stir welding - Process, weldment structure and properties., *Progress in Materials Science*, 53(6), 980–1023, 2008.
- [14] Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R., and Withers, P. J., Friction stir welding of aluminium alloys., *International Materials Reviews*, 54(2), 49–93, 2009.
- [15] Thomas, W. M., Friction Stir Welding - Recent Developments., *Materials Science Forum*, 426–432, 229–36, 2003.
- [16] Elangovan, K., Balasubramanian, V., and Babu, S., Developing an empirical relationship to predict tensile strength of friction stir welded AA2219 aluminum alloy., *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17(6), 820–30, 2008.
- [17] Squillace, A., Fenzo, A. De, and Giorleo, G., A comparison between FSW and TIG welding techniques: modifications of microstructure and pitting corrosion resistance in AA 2024-T3 butt joints., *Journal of Materials*, 2004.
- [18] Barlas, Z. and Hüseyin, U., Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış cu/al-1050 alın birleştirmesinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi., *Gazi Üniversitesi*, 2010.
- [19] Mishra, R., Sharma, S., Mara, N., and Mahoney, M., Mechanical properties of friction stir welded aluminum alloys., *Joining of Advanced and Specialty*, 2000.
- [20] Mohan, D., Friction Stir Welding Tools and Overview., *International Journal of IT, Engineering and Applied Sciences Research (IJIEASR)*, 3(4), 11–5, 2014.
- [21] Crawford, R., Cook, G. E., Strauss, A. M., and Nunes, A. C., A mechanistic study of the friction stir welding process., *Vanderbilt University*, 2006.
- [22] Mishra, R. S. and Ma, Z. Y., Friction stir welding and processing., *Materials Science and Engineering R: Reports*, 50(1–2), 1–78, 2005.
- [23] Rajakumar, S. and Balasubramanian, V., Correlation between weld nugget grain size, weld nugget hardness and tensile strength of friction stir welded commercial grade aluminium alloy joints., *Materials and Design*, 34, 242–51, 2012.
- [24] Kaluç, E. and Mert, Ş., Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler., *Makine Mühendisleri Odası “Kaynak Teknolojisi IV. ...*, 2003.
- [25] Reynolds, A., Tang, W., Gnaupel-Herold, T., and Prask, H., Structure, properties, and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds., *Scripta Materialia*, 2003.

- [26] Murr, L., A review of FSW research on dissimilar metal and alloy systems., *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2010.
- [27] Kallee, S., Nicholas, E., and Thomas, W., Friction stir welding- invention, innovations and applications., *Kei Kinzoku Yosetsu(Journal of Light Metal)*, 2005.
- [28] Alptekin, A., Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin paslanmaz çeliklere uygulanabilirliğinin araştırılması., 2006.
- [29] Alptekin, A., Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin paslanmaz çeliklere uygulanabilirliğinin araştırılması., Pamukkale Üniversitesi, 2006.
- [30] Mendez, P. F. and Eagar, T. W., Welding processes for aeronautics., *Advanced Materials and Processes*, 159(5), 39–43, 2001.
- [31] Venkata Rao, C., Madhusudhan Reddy, G., and Srinivasa Rao, K., Microstructure and pitting corrosion resistance of AA2219 Al–Cu alloy friction stir welds – Effect of tool profile., *Defence Technology*, 11(2), 123–31, 2015.
- [32] Liu, H., Hu, Y., Dou, C., and Sekulic, D. P. D., An effect of the rotation speed on microstructure and mechanical properties of the friction stir welded 2060-T8 Al-Li alloy., *Materials Characterization*, 123, 9–19, 2017.
- [33] Wang, L., Hui, L., Zhou, S., Xu, L., He, B., et al., Effect of corrosive environment on fatigue property and crack propagation behavior of Al 2024 friction stir weld., 26(11), 2830–7, 2016.
- [34] Barlas, Z. and Uzun, H., Microstructure and mechanical properties of friction stir butt welded dissimilar pure copper/brass alloy plates., *International Journal of Materials Research*, 101(6), 801–7, 2010.
- [35] Chen, H., Fu, L., and Liang, P., Microstructure, texture and mechanical properties of friction stir welded butt joints of 2A97 Al??Li alloy ultra-thin sheets., *Journal of Alloys and Compounds*, 692, 155–69, 2017.
- [36] Sinhmar, S. and Dwivedi, D. K. D., Enhancement of mechanical properties and corrosion resistance of friction stir welded joint of AA2014 using water cooling., *Materials Science and Engineering: A*, 684(September 2016), 413–22, 2017.
- [37] Kaçar, R., Emre, H., Demir, H., and Gündüz, S., Al-Cu-Al malzeme çiftinin sürtünme karıştırma nokta kaynak kabiliyeti., *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(2), 2011.
- [38] Venkata Rao, C., Madhusudhan Reddy, G., Srinivasa Rao, K., Rao, C., Reddy, G., and Rao, K., Influence of tool pin profile on microstructure and corrosion behaviour of AA2219 Al–Cu alloy friction stir weld nuggets., *Defence Technology*, 11(3), 197–208, 2015.

- [39] Trimble, D., O'Donnell, G. E., and Monaghan, J., Characterisation of tool shape and rotational speed for increased speed during friction stir welding of AA2024-T3., *Journal of Manufacturing Processes*, 17(Journal of Manufacturing Processes), 141–50, 2015.
- [40] Trimble, D., O'Donnell, G. E., and Monaghan, J., Characterisation of tool shape and rotational speed for increased speed during friction stir welding of AA2024-T3., *Journal of Manufacturing Processes*, 17(Thousand Oaks), 141–50, 2015.
- [41] Aydın, Ş., Ertürk, İ., and Önder, M., AA2024 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında farklı parametrelerin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi., *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2010.
- [42] Talwar, R., Bolser, D., Lederich, R., and Baumann, J., Friction Stir Welding of Airframe Structures., 2nd International Symposium on Friction Stir Welding, 1–10, 2000.
- [43] Kumagai, M., Tanaka, S., and Hatta, H., P644 Integral Wing Panel for Airplanes Produced by Friction Stir Welded Extrusion Shapes., SUMITOMO, 2002.
- [44] Colligan, K., Uçok, I., McTernan, K., Konkel, P., and Pickens, J., Friction Stir Welding of Thick Section 5083-H131 and 2195-T8P4 Aluminum Plates., in *Third International Symposium on Friction Stir Welding*, Sept 27–28, 2001 (Kobe, Japan), TWI, 2001.
- [45] Strangwood, M., Berry, J., Cleugh, D., and Leonard, A., Characterisation of the thermo-mechanical effects on microstructural development in friction stir welded age hardening aluminium-based alloys., *First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, California, USA, 2014, 1–10, 1999.
- [46] Bousquet, E., Poulon-Quintin, A., Puiggali, M., Devos, O., and Touzet, M., Relationship between microstructure, microhardness and corrosion sensitivity of an AA 2024-T3 friction stir welded joint., *Corrosion Science*, 53(9), 3026–34, 2011.
- [47] Uzun, H., Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminium alloy matrix composite., *Materials and Design*, 28(5), 1440–6, 2007.
- [48] Schneider, J. A. and Nunes, A. C., J., Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld., *Metallurgical and Materials Transactions B*, 35(8), 777–83, 2004.
- [49] Elangovan, K., Balasubramanian, V., and Babu, S., Predicting tensile strength

- of friction stir welded AA6061 aluminium alloy joints by a mathematical model., *Materials and Design*, 30(1), 188–93, 2009.
- [50] Kumar, K. and Kailas, S. V, On the role of axial load and the effect of interface position on the tensile strength of a friction stir welded aluminium alloy., *Materials and Design*, 29(4), 791–7, 2008.
- [51] Liu, H., Zhang, H., Pan, Q., and Yu, L., Effect of friction stir welding parameters on microstructural characteristics and mechanical properties of 2219-T6 aluminum alloy joints., *International journal of material forming*, 2012.
- [52] 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(25), 4106–8, 2008.
- [53] Kafalı, H. and Nuran, A., Havacılıkta Kullanılan 6013-T6 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağıyla Birleştirilmesi., Süleyman Demirel Üniversitesi Fen, 2014.
- [54] Sayer, S., AA 6063 (AlMgSi0. 5) tipi alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak değişkenlerinin, bağlantının dayanımı ve mikroyapı özellikleri üzerindeki., 2007.
- [55] Sato, Y. S. Y., Park, S. H. C. S., and Kokawa, H., Microstructural factors governing hardness in friction-stir welds of solid-solution-hardened Al alloys., *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(12), 3033–42, 2001.
- [56] Çakır, R. and Çelik, S., Alüminyum ve bakırın yüksek devirli sürtünme karıştırma kaynağında takım pozisyonunun etkisi., 2015.
- [57] Taban, E. and Kaluç, E., En Aw-5083- H321 Alüminyum Alaşımının Mig, Tig ve Sürtünen Eleman ile Birleştirme (Fsw) Kaynakli Bağlantılarının Mekanik ve Mikroyapısal Özellikleri., mmo.org.tr.
- [58] Meran, C., Kovan, V., and Alptekin, A., Friction stir welding of AISI 304 austenitic stainless steel., *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 38(10), 829–35, 2007.
- [59] Bozkurt, Y., Uzun H., Salman S., Microstructure and mechanical properties of friction stir welded particulate reinforced AA2124 SiC 25p T4 composite. *Journal of Composite Materials*. Cilt 45, 2237-2245, 2011
- [60] Sinhmar, Dwivedi, Enhancement of mechanical properties and corrosion resistance of friction stir welded joint of AA2014 using water cooling, *Materials Science & Engineering A* 684, 413–422, 2017
- [61] Rao, V., Reddy, M. G., Rao, K. S., Influence of tool pin profile on microstructure and corrosion behaviour of AA2219 AlCu alloy friction stir weld nuggets, *Defence Technology* (11), 197-208, 2015.

- [62] Moghadam, D. G., Farhangdoost, K., Influence of welding parameters on fracture toughness and fatigue crack growth rate in friction stir welded nugget of 2024-T351 aluminum alloy joints *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 26, 2567–2585, 2016.
- [63] Dubey, A. M., Kumar, A., Yadav, A. K., Wear behaviour of friction stir weld joint of cast Al (4–10%) Cu alloy welded at different operating parameters *Journal of Materials Processing Technology* 240, 87–97, 2017.

ÖZGEÇMİŞ

Yüksel ÖZDERİN 14.10.1984 Muğla'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Muğla'da tamamladı. 2003 yılında Muğla Anadolu Öğretmen Lisesi'nden mezun oldu. 2006 yılında başladığı Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi bölümünden 2011 yılında mezun oldu. Ardından Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğini bitirdi.