



**T. C.
SIVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM 1050 VE SAF BAKIR MALZEME ÇİFTİNİN
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİYLE
BİRLEŞTİRİLMESİNDE FARKLI GEOMETRİDEKİ UÇ
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet BEDİROĞLU
(20209256005)**

Savunma Sanayi Teknolojileri ve Stratejileri Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Doğan Engin ALNAK

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serdar MERCAN

**SİVAS
AGUSTOS 2023**

Mehmet BEDİROĞLU’ nun hazırladığı ve “**ALÜMİNYUM 1050 VE SAF BAKIR MALZEME ÇİFTİNİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE FARKLI GEOMETRİDEKİ UÇ PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından ‘**SAVUNMA SANAYİ TEKNOLOJİLERİ VE STRATEJİLERİ ANA BİLİM DALI**’ nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı	Doç. Dr. Doğan Engin ALNAK Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	
	Doç. Dr. Serdar MERCAN Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. İbrahim CAN Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Müjdat FIRAT Fırat Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Ferhat KOCA Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nevcihan GÜRSOY
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.

Bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterme koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Mehmet BEDİROĞLU, 2023

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde derin bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım danışman hocalarım sayın Doç. Dr. Doğan Engin ALNAK ve sayın Doç. Dr. Serdar MERCAN'a sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Çalışma boyunca derin bilgisini, tecrübesini ve manevi desteklerini benden esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Tanju TEKER'e, sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmanın kaynak uygulamalarında ve mekanik test numunelerinin imalatında gerekli yardımlarını esirgemeyen Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Teknikeri Vahit DÖŞKAYA'ya, karıştırıcı uç imalatında yardımcı olan Arçelik A.Ş. çalışanı Serkan VURAL'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca sundukları katkılarından dolayı anne, baba ve kardeşlerime, çalışmalarım boyunca göstermiş oldukları sabır sebebiyle eşime, kızlarıma ve biricik oğlum Muhammed Ali BEDİROĞLU'na teşekkür ediyorum.

Bu çalışma Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Komisyonu Başkanlığı tarafından TEKNO-2021-033 numaralı yüksek lisans tez projesi olarak desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Komisyonu Başkanlığı'na teşekkür ederim.

ÖZET

ALÜMİNYUM 1050 VE SAF BAKIR MALZEME ÇİFTİNİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİNDE FARKLI GEOMETRİDEKİ UÇ PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Mehmet BEDİROĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Savunma Sanayi Teknolojileri ve Stratejileri Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Doğan Engin ALNAK

Danışman: Doç. Dr. Serdar MERCAN

2023, 106+xv sayfa

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), farklı metalik özelliklere sahip malzemeleri tam bir ergitme yapmadan katı halde birleştirebilmektedir. Özellikle alüminyum ve bakır gibi farklı malzemeleri birleştirmek için yeni ve etkili bir teknik olarak kullanılmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde takım tasarımı ve konfigürasyonu bağlantı kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir.

Bu çalışmanın amacı, AA1050 ve saf bakır malzeme çiftinin sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde farklı geometrideki uç parametrelerinin, farklı devir ve farklı ilerleme hızlarının kaynaklı birleştirmenin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini analiz etmektir. Çalışmada 3 mm kalınlığa, 50 mm genişliğe ve 100 mm uzunluğa sahip AA1050 ve saf bakır levhalar, omuz çapı 16 mm, pim uzunluğu 2,7 mm olan, 710, 900 ve 1120 dev/dak dönme hızı ve 16, 20 ve 25 mm/dk ilerleme hızında, 1° takım açısı verilerek universal freze tezgâhında, freze pensine bağlanan, ucuna özel form verilmiş sert metal HSS Co10 uç ile gerçekleştirilmiştir. Kaynaklama işleminden sonra birleştirilen parçaların mekanik özelliklerine çekme deneyleri ve mikrosertlik testi yapılarak bakılmıştır. Kaynaklı bölgenin mikroyapıları ise; OM (optik mikroskop) ve morfolojik yüzey incelemeleri için SEM (taramalı elektron mikroskobu) kullanılarak incelenmiştir.

Sürtünme karıştırma kaynağı sonrası yapılan mekanik özellik ve mikroyapı incelemeleri sonucunda tüm kaynak işlemlerinde üçgen uç ile iyi bir birleştirme

sağlandığı görülmüştür. Üçgen uç ile yapılan kaynaklı birleştirmedeki malzeme hareketi, farklı ilerleme ve devirlerde de iyi sonuçlar vermiştir. Fakat en iyi birleştirme 900 dev/dak devirde ve 16 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. Karıştırma bölgesinde AA1050 malzemenin saf bakır üzerine daha fazla karıştığı açık bir şekilde görülmüştür.

Anahtar kelimeler: *Sürtünme Karıştırma Kaynağı, AA1050, Saf Bakır, Taramalı Elektron Mikroskobu, EDS*

ABSTRACT

INVESTIGATION OF END PARAMETERS IN DIFFERENT GEOMETRY IN COMBINATION OF ALUMINUM 1050 AND PURE COPPER PAIR WITH FRICTION MIXING WELDING METHOD

Mehmet BEDİROĞLU

Master of Science Thesis

Department of Energy Science and Technology Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Doğan Engin ALNAK

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Serdar MERCAN

2023, 106+xv pages

Friction stir welding (FSW) can join materials with different metallic properties in the solid state without complete melting. It is being used as a new and effective technique for joining dissimilar materials, especially aluminum and copper. In friction stir welding, tool design and configuration significantly affect the joint quality.

The aim of this study is to analyze the effect of different geometry of tip parameters, different rotational speeds and different feed rates on the microstructure and mechanical properties of the welded joint in friction stir welding of AA1050 and pure copper material pair. In the study, AA1050 and pure copper sheets with a thickness of 3 mm, a width of 50 mm and a length of 100 mm were welded on a universal milling machine with a shoulder diameter of 16 mm and a pin length of 2.7 mm, at a rotational speed of 710, 900 and 1120 rpm and a feed rate of 16, 20 and 25 mm/min, with a tool angle of 1°, using a hard metal HSS Co10 tip with a specially shaped tip connected to the milling collet. After the welding process, the mechanical properties of the joined parts were examined by tensile tests and microhardness tests. The microstructures of the welded area were examined using OM (optical microscope) and SEM (scanning electron microscope) for morphological surface examinations.

As a result of the mechanical properties and microstructure examinations after friction stir welding, it was seen that a good joint was obtained with the triangular tip in all welding processes. The material movement in the welded joint made with the triangular tip gave good results at different feeds and speeds. However, the best joint was obtained at a speed of 900 rpm and a feed rate of 16 mm/min. In the mixing zone, it was clearly seen that the AA1050 material was more mixed with pure copper.

Key words: *Friction Stir Welding, AA1050, Pure Copper, Scanning Electron Microscopy, EDS*

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	3
1.2. Yöntem.....	3
1.3. Literatür Araştırması	4
2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI	16
2.1. Alüminyumun Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri	18
2.2. Alüminyumun Alaşımları	19
2.2.1. 1000 Serisi (Saf Alüminyum)	20
2.2.2. 2000 Serisi (Alüminyum Bakır Alaşımları).....	21
2.2.3. 3000 Serisi (Alüminyum Manganez Alaşımları)	21
2.2.4. 4000 Serisi (Alüminyum Silisyum Alaşımları)	22
2.2.5. 5000 Serisi (Alüminyum Magnezyum Alaşımları).....	22
2.2.6. 6000 Serisi (Alüminyum, Magnezyum ve Silisyum Alaşımları).....	22
2.2.7. 7000 Serisi (Alüminyum Çinko Alaşımları)	23
2.2.8. 8000 Serisi (Alüminyum Lityum Alaşımları)	23
2.3. Alüminyumun ve Alaşımları Kaynağı	24
2.3.1. Ergitme kaynak yöntemleri	25
2.3.1.1. Elektrik ark kaynağı	25
2.3.1.2. TIG kaynağı	25
2.3.1.3. MIG kaynağı	26
2.3.1.4. Oksi-Asetilen kaynağı	27
2.3.1.5. Plazma kaynağı	27
2.3.1.6. Lazer kaynağı	28
2.3.1.7. Elektron ışın kaynağı.....	29
2.3.2. Katı hal kaynak yöntemleri	30
2.3.2.1. Sürtünme kaynağı	30
2.3.2.2. Difüzyon kaynağı	30
2.3.2.3. Direnç kaynağı	31
2.3.2.4. Ultrasonik kaynak	32
3. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI	34
3.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulanma Prensibi.....	34
3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlar	37
3.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Omuz ve Pim Şekilleri	38
3.3.1. Omuz şekilleri	38
3.3.2. Pim şekilleri	39
3.4. Kaynağın Metalurjik Yapısı	41
4. BAKIR VE ALAŞIMLARI	43

4.1. Bakır ve Alaşımlarının Sınıflandırılması	44
4.1.1. Saf bakır	45
4.1.2. Yüksek bakır içerikli alaşımlar	45
4.1.3. Bakır-çinko alaşımları (pirinçler).....	46
4.1.4. Bakır-kalay alaşımları (fosfor bronzları)	46
4.1.5. Bakır-alüminyum alaşımları (alüminyum bronzları)	47
4.1.6. Bakır-silisyum alaşımları (silisyum bronzları).....	47
4.1.7. Bakır-nikel alaşımları.....	48
4.1.8. Bakır-nikel-çinko alaşımları.....	48
5. MALZEME VE METOD	49
5.1. Malzeme.....	49
5.1.1. Malzemelerin kaynağa hazırlanması.....	50
5.1.2. Karıştırıcı uç malzemesi.....	51
5.1.3. Karıştırıcı uçların hazırlanması	52
5.1.4. Deneyler için kaynak parametrelerinin belirlenmesi	53
5.2. Metod	54
5.2.1. Deneylerin yapılması	54
5.2.2 Mikroyapı incelemesi.....	55
5.2.3. Mekanik testler.....	57
5.2.4. Karıştırıcı Uçun Kaynak Sonrası Durumu	59
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	61
6.1. Kaynaklı Bağlantıların Makro Görüntülerinin İncelenmesi	61
6.1.1. Üçgen karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin incelenmesi	62
6.1.1.1. 710 dev/dak ile birleştirilen numunelerin makro değerlendirmesi	63
6.1.1.2. 900 dev/dak ile birleştirilen numunelerin makro değerlendirmesi	64
6.1.1.3. 1120 dev/dak ile birleştirilen numunelerin makro değerlendirmesi	65
6.1.2. Kare karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin incelenmesi	66
6.1.2.1. 710 dev/dak ile birleştirilen numunelerin makro değerlendirmesi	66
6.1.2.2. 900 dev/dak ile birleştirilen numunelerin makro değerlendirmesi	67
6.1.2.3. 1120 dev/dak ile birleştirilen numunelerin makro değerlendirmesi	68
6.2. Mikroyapı Deney Sonuçları	69
6.2.1. Üçgen karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin incelenmesi.....	70
6.2.1.1. 710 dev/dak ile birleştirilen numunelerin mikroyapı değerlendirmesi 70	
6.2.1.2. 900 dev/dak ile birleştirilen numunelerin mikroyapı değerlendirmesi 72	
6.2.1.3. 1120 dev/dak ile birleştirilen numunelerin mikroyapı değerlendirmesi	75
6.2.2. Kare karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin incelenmesi	78
6.2.2.1. 710 dev/dak ile birleştirilen numunelerin mikroyapı değerlendirmesi 78	
6.2.2.2. 900 dev/dak ile birleştirilen numunelerin mikroyapı değerlendirmesi 81	
6.2.2.3. 1120 dev/dak ile birleştirilen numunelerin mikroyapı değerlendirmesi	83
6.3. Mekanik Deney Sonuçları.....	86
6.3.1. Çekme deneyi sonuçlarının incelenmesi	86
6.3.1.1. Kırık yüzey makroyapı incelemesi.....	86
6.3.1.2. Üçgen karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin çekme deney sonuçlarının incelenmesi.....	88
6.3.1.3. Kare karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin çekme deney sonuçlarının incelenmesi.....	90

6.3.1.4. Kırık yüzey mikroyapı incelemesi	92
6.3.1.5. Çekme deneyi sonrası numunelerin elementel mapping analizi	93
6.3.2. Mikrosertlik deneyi sonuçlarının incelenmesi	94
6.3.2.1. Üçgen karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin mikrosertlik incelenmesi.....	94
6.3.2.2. Kare karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin mikrosertlik incelenmesi	97
6.4. Elementel Mapping İncelemeleri	101
6.5. EDX (Enerji Dağılımlı X-ışını) İncelemeleri.....	102
7. SONUÇLAR	105
KAYNAKLAR	108
ÖZGEÇMİŞ	113

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Sürtünme karıştırma kaynak işlemi [39].	35
Şekil 3.2. Sürtünme karıştırma kaynağı şematik gösterimi modeli [40].	35
Şekil 3.3. Karıştırıcı takım tipleri a- sabit pim, b- ayarlanabilir pim, c- makara tipi pim [41].	38
Şekil 3.4. Omuz şekilleri ve özellikleri [41].	39
Şekil 3.5. SKK'da kullanılan karıştırıcı takım pimleri [41].	40
Şekil 3.6. SKK'da makro yapısal bölgeler [43].	41
Şekil 4.1. Bakıra ilave edilen alaşım elementleri etkisinin şematik olarak gösterimi [45].	44
Şekil 5.1. Freze tezgâhı.	50
Şekil 5.2. Deney numunesi boyutları.	51
Şekil 5.3. HSS Co10 karıştırıcı uç.	52
Şekil 5.4. Karıştırıcı uç teknik resmi.	53
Şekil 5.5. Sürtünme karıştırma kaynağı.	55
Şekil 5.6. (a) Parlatma Cihazı, (b) Optik Mikroskop	56
Şekil 5.7. TESCAN MIRA3 XMU taramalı elektron mikroskobu (SEM).	56
Şekil 5.8. Çekme deneyinde kullanılan numune ölçüleri (mm).	57
Şekil 5.9. Çekme deneylerinin yapıldığı Shimadzu marka çekme deney seti.	58
Şekil 5.10. Shimadzu HVM M3 marka mikro sertlik ölçüm cihazı.	59
Şekil 5.11. Karıştırıcı uçun kaynak sonrası görünümü.	60
Şekil 6.1. Üçgen uç ile yapılan kaynak yüzey, kök ve kesit görüntüleri.	61
Şekil 6.2. Kare uç ile yapılan kaynak yüzey, kök ve kesit görüntüleri.	62
Şekil 6.3. T1, T4 ve T7 numunelerine ait yüzey makro yüzey görüntüleri.	63
Şekil 6.4. T7 numunesine ait kök yüzey görüntüsü.	64
Şekil 6.5. T2, T5 ve T8 numunelerine ait yüzey makro yüzey görüntüleri.	65
Şekil 6.6. T2 numunesine ait kök yüzey görüntüsü.	65
Şekil 6.7. T3, T6 ve T9 numunelerine ait yüzey makro yüzey görüntüleri.	66
Şekil 6.8. T9 numunesine ait kök yüzey görüntüsü.	66
Şekil 6.9. S1, S4 ve S7 numunelerine ait yüzey makro yüzey görüntüleri.	67
Şekil 6.10. S1 numunesine ait kök yüzey görüntüsü.	67
Şekil 6.11. S2, S5 ve S8 numunelerine ait yüzey makro yüzey görüntüleri.	68
Şekil 6.12. S8 numunesine ait kök yüzey görüntüsü.	68
Şekil 6.13. S3, S6 ve S9 numunelerine ait yüzey makro yüzey görüntüleri.	69
Şekil 6.14. S3 numunesine ait kök yüzey görüntüsü.	69
Şekil 6.15. T1 mikroyapı SEM görüntüleri.	71
Şekil 6.16. T4 mikroyapı SEM görüntüleri.	71
Şekil 6.17. T7 mikroyapı SEM görüntüleri.	72
Şekil 6.18. T2 mikroyapı SEM görüntüleri.	73
Şekil 6.19. T5 mikroyapı SEM görüntüleri.	74
Şekil 6.20. T8 mikroyapı SEM görüntüleri.	75
Şekil 6.21. T3 mikroyapı SEM görüntüleri.	76
Şekil 6.22. T6 mikroyapı SEM görüntüleri.	77
Şekil 6.23. T9 mikroyapı SEM görüntüleri.	78
Şekil 6.24. S1 mikroyapı SEM görüntüleri.	79
Şekil 6.25. S4 mikroyapı SEM görüntüleri.	79
Şekil 6.26. S7 mikroyapı SEM görüntüleri.	80

Şekil 6.27. S2 mikroyapı SEM görüntüleri.....	81
Şekil 6.28. S5 mikroyapı SEM görüntüleri.....	82
Şekil 6.29. S8 mikroyapı SEM görüntüleri.....	82
Şekil 6.30. S3 mikroyapı SEM görüntüleri.....	84
Şekil 6.31. S6 mikroyapı SEM görüntüleri.....	84
Şekil 6.32. S9 mikroyapı SEM görüntüleri.....	85
Şekil 6.33. Üçgen uçla yapılan kaynaklara ait çekme numuneleri makro görüntüleri.....	86
Şekil 6.34. Kare uçla yapılan kaynaklara ait çekme numuneleri makro görüntüleri.....	87
Şekil 6.35. Üçgen karıştırıcı uçla 710 dev/dak ile yapılan numunelere ait çekme deney grafiği.....	88
Şekil 6.36. Üçgen karıştırıcı uçla 900 dev/dak ile yapılan numunelere ait çekme deney grafiği.....	89
Şekil 6.37. Üçgen karıştırıcı uçla 1120 dev/dak ile yapılan numunelere ait çekme deney grafiği.....	89
Şekil 6.38. Kare karıştırıcı uçla 710 dev/dak ile yapılan numunelere ait çekme deney grafiği.....	90
Şekil 6.39. Kare karıştırıcı uçla 900 dev/dak ile yapılan numunelere ait çekme deney grafiği.....	91
Şekil 6.40. Kare karıştırıcı uçla 900 dev/dak ile yapılan numunelere ait çekme deney grafiği.....	91
Şekil 6.41. (a) S2 ve (b) T2 çekme numunesinin kırık yüzey mikroyapı SEM görüntüsü.....	92
Şekil 6.42. S2 numunesinin elementel mapping haritası.....	93
Şekil 6.43. S5 numunesinin elementel mapping haritası.....	93
Şekil 6.44. T2 numunesinin elementel mapping haritası.....	94
Şekil 6.45. T5 numunesinin elementel mapping haritası.....	94
Şekil 6.46. Üçgen uçla 710 dev/dak ile yapılan T1, T4 ve T7 numunelerinin mikrosertlik grafiği.....	95
Şekil 6.47. Üçgen uçla 900 dev/dak ile yapılan T2, T5 ve T8 numunelerinin mikrosertlik grafiği.....	96
Şekil 6.48. Üçgen uçla 1120 dev/dak ile yapılan T3, T6 ve T9 numunelerinin mikrosertlik grafiği.....	97
Şekil 6.49. Kare uçla 710 dev/dak ile yapılan S1, S4 ve S7 numunelerinin mikrosertlik grafiği.....	98
Şekil 6.50. Kare uçla 900 dev/dak ile yapılan S2, S5 ve S8 numunelerinin mikrosertlik grafiği.....	99
Şekil 6.51. Kare uçla 1120 dev/dak ile yapılan S3, S6 ve S9 numunelerinin mikrosertlik grafiği.....	99
Şekil 6.52. T2 numunesinin elementel mapping haritası.....	101
Şekil 6.53. S5 numunesinin elementel mapping haritası.....	101
Şekil 6.54. T1 numunesinin elementel mapping haritası.....	102
Şekil 6.55. S1 numunesinin elementel mapping haritası.....	102
Şekil 6.56. S1 (a) EDS analizleri.....	103
Şekil 6.57. S1 (b) EDS analizleri.....	103
Şekil 6.58. S1 (c) EDS analizleri.....	103
Şekil 6.59. S1 (d) EDS analizleri.....	104

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1. Alüminyum alaşımlarına ilave edilen katkı maddeleri ve özellikleri	20
Tablo 2. AA1050 malzemenin kimyasal bileşimi (ağırlık %)	49
Tablo 3. Saf bakır malzemenin kimyasal bileşimi (ağırlık %)	49
Tablo 4. AA1050 ve saf bakırın mekanik özellikleri	49
Tablo 5. SKK’da kullanılan uç profilleri ve kaynak parametreleri	54
Tablo 6. Çekme deneyi sonuçları	87

KISALTMALAR DİZİNİ

TWI	İngiltere Kaynak Enstitüsü
SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
TIG	Tungsten Inert Gas
MIG	Metal Inert Gas (Gaz Metal Ark Kaynağı)
FSW	Friction Stir Welding (Sürtünme Karıştırma Kaynağı)
DKB	Dinamik olarak yeniden Kristalleşen Bölge
TEB	Termomekanik olarak Etkilenen Bölge
IEB	Isıdan Etkilenen Bölge
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
FSP	Friction Stir Process (Sürtünme Karıştırma İşlemi)
FSSW	Friction Stir Spot Welding (Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
EDX	Energy Dispersive X-Ray (Enerji Dağılımlı X-ışını)
EDS	Enerji Dağılım Spektroskopisi

1. GİRİŞ

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), 1991 yılında İngiltere Kaynak Enstitüsü'nde (TWI) icat edilen ve deneysel olarak kanıtlanan bir katı hal birleştirme tekniğidir. Bu yöntem, metal ve hafif metal alaşımlarının birleştirilmesinde kullanılan ileri bir teknoloji olarak kabul edilir [1]. TWI tarafından yapılan araştırmalar özellikle alüminyum ve alüminyum alaşımlarının SKK tekniği ile kaynak edilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte, bu kaynak tekniği farklı metallerin ve bazı tür termoplastik malzemelerin birleştirilmesinde de kullanılmaya başlanmıştır [2]. Örnek olarak, bakır ve alaşımları, titanyum ve alaşımları, magnezyum ve alaşımları, nikel ve alaşımları, kurşun alaşımları, çinko alaşımları ve bazı tür paslanmaz çelikler gibi farklı malzemeler SKK ile birleştirilebilir. Bu yöntem, sürtünme ve karıştırma prensiplerini kullanarak birleştirme işlemi gerçekleştirir. İki parça sürtünme oluşturacak şekilde birleştirilir ve ardından özel bir aletle sürtünme uygulanırken malzemeler karıştırılır. Bu süreç, malzemelerin atomik düzeyde birleşmesine ve güçlü bir bağ oluşturmaya olanak sağlar. SKK, kaynak sırasında erimeye neden olmadığı için genellikle daha az ısı etkisi ve deformasyonla sonuçlanır. Bu da kaynak bölgesinde düşük gerilme ve deformasyon sağlar. SKK, endüstriyel uygulamalarda geniş çapta kullanılan bir kaynak yöntemi haline gelmiştir.

Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK), düşük maliyetli ve yüksek performanslı bağlantılar için ideal bir yöntem olarak kabul edilen bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, omuz ve uç olmak üzere iki parçadan oluşan bir takım kullanılır. Takımın ucu ergimeyen bir karıştırıcı uçla donatılmıştır ve parçaların birleştirme hattı boyunca hareket ettirilmesi için dönen omuz kullanılır. SKK işlemi sırasında, takım parçaların arasına daldırılır ve birleştirme hattı boyunca ilerlerken farklı hızlarda döner. Bu süreçte, takımın karıştırıcı ucu malzemeleri karıştırır ve omuzun sürtünmesiyle ısı üretilir. Yüksek sıcaklık ergime sıcaklığının 0.8 katına kadar çıkabilir, ancak malzeme tamamen erimez. Bu yöntemde elde edilen maksimum sıcaklık, malzemenin ergime sıcaklığından daha düşüktür. SKK'nın başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için kaynak parametreleri büyük önem taşır. Bu parametreler arasında karıştırıcı uç takım geometrileri önem arz etmektedir. Takım geometrisi, malzemenin bölgesel

ısınmaması, ergitilmesi, karıştırılması ve taşınması sürecini etkiler, böylece malzeme akışını sağlayarak kaynak işlemini gerçekleştirir. SKK yöntemi, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Düşük maliyeti, yüksek bağlantı mukavemeti, düşük deformasyon ve ısı etkisi gibi avantajlarıyla tercih edilir. Bu yöntem, metal ve hafif metal alaşımlarının yanı sıra bazı termoplastik malzemelerin birleştirilmesinde de kullanılmaktadır [3].

Bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi AA1050 ile saf bakırın birleştirilmesi üzerine odaklanmaktadır. Bu iki malzeme farklı özelliklere sahip olmasından dolayı geleneksel ergitme kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi zordur. Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi, bu malzemelerin birleştirilmesi için alternatif ve avantajlı bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağının AA1050 ve saf bakırın birleştirilmesindeki performansı araştırılmıştır. Karıştırıcı uçun dönme hızı, uç geometrisi ve kaynak ilerleme hızı gibi değişken parametreler belirli aralıklarda değiştirilerek farklı kaynaklı birleştirmeler elde edilmiştir. Elde edilen kaynaklı bağlantıların mikroyapıları optik mikroskop ile incelenmiştir.

Ayrıca, kaynaklı numunelere çekme testleri uygulanarak mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda elde edilen kırık yüzeyler taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiş ve kırılma tipi ile kırık yüzey karakteristikleri analiz edilmiştir.

Bu deneysel çalışmanın elde edilen verileri, ilgili literatür ile birlikte değerlendirilerek sonuçlar yorumlanmıştır. Bu çalışmanın, ileride yapılacak diğer araştırmalar için bir referans kaynağı olabileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi AA1050 ve saf bakır gibi farklı malzemelerin birleştirilmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu yöntem, ilave kaynak metali gerektirmediği, koruyucu gaz kullanımına ihtiyaç duymadığı, temiz ve çevre dostu olduğu için zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Bu çalışma, sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin AA1050 ve saf bakırın birleştirilmesindeki etkinliğini göstermekte ve ilerideki araştırmalara yol gösterici olabilecek veriler sunmaktadır.

1.1. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada AA1050 ve saf bakır levha alın altına sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilecektir. Çalışmada, kaynak işlemlerinin tamamında karıştırıcı uç açısı olarak 1° belirlenmiş, SKK bağlantıları elde etmek için devir sayısı, ilerleme hızı ve karıştırıcı uç geometrisi gibi işlem parametreleri değiştirilmiştir. Devir sayısı, üç farklı düzeyde (710, 900, 1120 dev/dak), ilerleme hızı üç farklı düzeyde (16, 20, 25 mm/dak) ve uç geometrisi ise iki farklı düzeyde (üçgen, kare) olarak seçilmiştir. Bu şekilde toplamda 18 farklı deney gerçekleştirilmiştir. Yapılan çapraz çalışmalarla kaynak kalitesine etki eden parametreler değiştirilerek elde edilen kaynaklı bölgelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar karşılaştırılarak en iyi kaynak çifti elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmadaki amaç, havacılık, uzay ve otomotiv sanayinde önemli bir yere sahip olan alüminyum alaşımları ve bakır malzemelerin birleştirilmesinde korozyon dayanımı ve mukavemeti artırmak, maliyeti düşürerek uygun çalışma koşullarında ara yüzey uyumluluğu yüksek malzemeler elde etmek ve malzeme kullanılabilirliğini araştırmaktır. Ayrıca yeni nesil sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan birleştirmelerde üreticiler güvenilir ömür belirleme sayesinde uçaklarda ve otomobillerde malzeme performanslarını daha da geliştirebilirler. Daha ekonomik, daha hızlı ve daha hafif bir kaynak tekniği ile oldukça çetin bir rekabetin yaşandığı uzay, havacılık ve otomotiv sanayi pazarındaki işletmelerin dikkatini çekecektir. Uygun kaynaklama koşullarında bu malzemeler test edilerek hem ekonomiye katkı hem düşük maliyet hem de malzeme ağırlığından kazanç sağlayıp optimum kombinasyon sağlanması amaçlanmıştır.

1.2. Yöntem

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), parçaların birleşme bölgesinde sürtünme ile ısı oluşturarak çamurlaştırılması ve çamurlaşan malzemelerin karıştırıcı uç yardımıyla birleştirilmesi ile gerçekleştiren bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, daha sert bir malzemeden yapılmış bir sürtünme aparatı kullanılır. Aparatın dönen ucu, daha geniş bir metal gövdeye bağlı olan ve daha küçük çaplı

bir sondadır. Karıştırıcı uç, birleşme bölgesine daldırıldığında, geniş çaplı omuz olarak adlandırılan bölüm önce bir temas yapar. Karıştırıcı ucun dalma derinliği, kaynak nüfuziyeti olarak adlandırılır.

Omuzun teması, kaynak bölgesine ilave bir ısı sağlamanın yanı sıra, farklı geometrik şekillerdeki karıştırıcı uçla birlikte yumuşayan bölgeye etki eder. Yumuşayan metal, karıştırıcı uca doğru giderek daralan ancak üst yüzeyde omuzla temas eden daha geniş bir görünüme sahiptir. Karıştırıcı uçtan omuza kadar olan bölgedeki sürtünme ısı, karıştırıcının çevresiyle malzeme üst yüzeyi ve omuzun temas ettiği yüzeyde yumuşayan bir metal oluşturur.

Sürtünme karıştırma kaynağında, pim malzemelere temas ettiğinde sürtünme ve artan ısı, malzemelerin plastik değişimine neden olur. Bu değişim, malzemelerin akışını sağlar ve birleşme gerçekleşir. Kaynak işlemi sırasında ergime noktasına ulaşılmadığı için parçada süneklik ve dayanım açısından avantaj sağlanır. Düşük ısı girdisi nedeniyle distorsiyon daha azdır ve az gözenek içeren kaynaklar elde edilir.

Sürtünme karıştırma kaynağı, tüketilen dolgu malzemesi, koruyucu gaz kullanımı ve kenar hazırlığı gibi gereklilikleri ortadan kaldırarak kendi kendine birleşme sağlayan bir yöntemdir. Bu nedenle özellikle alüminyum ve alüminyum alaşımlarının geniş ölçekli üretiminde ark kaynağı yöntemlerinin yerini alabileceği görülmektedir. Gelecekte sürtünme karıştırma kaynağının kullanım alanlarının genişlemesi ve benzer malzemelerin birleştirilmesi için daha fazla çalışma yapılması beklenmektedir. Özellikle havacılık endüstrisinde, maliyet düşüklüğü nedeniyle sürtünme karıştırma kaynağının daha fazla kullanılacağı öngörülmektedir [4-6].

1.3. Literatür Araştırması

1991 yılında TWI Kaynak Enstitüsü tarafından geliştirilen sürtünme karıştırma kaynak yöntemi, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ergitme kaynağına alternatif olarak ortaya çıkmış bir katı hal kaynak tekniğidir. Bu yöntem, alüminyum alaşımlarının yanı sıra farklı türdeki metalleri de içeren çalışmalara olanak sağlamış ve yöntemin gelişimiyle paralel olarak bu alanda çalışmalar devam etmektedir. Son 15 yıl içinde özellikle alüminyum alaşımların sürtünme

karıştırma kaynağıyla birleştirilmesi konusunda, karmaşık mikroyapısal değişimlerin belirlenmesi ve mekanik davranışların araştırılması amacıyla birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Aşağıda, konuyla ilgili önemli bazı araştırmaların özetleri verilmiştir.

Alnak ve diğerleri (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, AISI 316 östenitik paslanmaz çelik ve sade karbonlu çelikler sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir. Çalışmada, 3 mm kalınlığında, 60 mm genişliğinde ve 120 mm uzunluğunda çelik plakalar kullanılmıştır. Kaynak işlemi için eşkenar üçgen profilli tungsten karbür uç kullanılmıştır, bu uçların omuz çapı 16 mm ve pim uzunluğu 2,7 mm olarak belirlenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı, 710 dev/dak devir sayısı ve 63 mm/dak ilerleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Kaynak esnasında takıma 1,5° açı verilmiştir. Çalışmada, birleştirilen çelik çiftlerinin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenerek en uyumlu çiftin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan mekanik testler ve mikroyapı analizleri sonucunda en uyumlu çiftin AISI 316-AISI 1010 olduğu tespit edilmiştir. Mekanik testlerde, AISI 316-AISI 1010 çelik çiftinin 618,81 MPa çekme dayanımıyla diğer çiftlere göre daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür. Mikroyapı incelemesinde ise tane boyutunun malzemenin mukavemetini büyük ölçüde etkilediği, özellikle büyük tanelerin olduğu bölgelerde malzemenin mukavemetinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu çalışma, AISI 316 östenitik paslanmaz çelik ve sade karbonlu çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi üzerine yapılmış ve en uyumlu çelik çiftinin belirlenmesine yönelik önemli bulgular ortaya koymuştur [7].

Ünal ve diğerleri (2019) çalışmasında, AISI 316L/AISI 4140 çelik çifti sürekli tahrikli sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Çalışmada, üç farklı devir sayısı, sürtünme basıncı ve yığma basıncı kullanılarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen çeliklerin birleşme ara yüzeyinde meydana gelen metalurjik değişiklikleri belirlemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Ayrıca, birleşme ara yüzeyine dik doğrultuda alınan numunelerin mikrosertlik ölçümleri yapılarak mikroyapı ile ilişkilendirilmiştir. Mikroyapı ve mikrosertlik analizleri sonucunda, düşük devir, yığma basıncı ve sürtünme basıncı kullanılan kaynaklarda birleşme bölgesinde bağlantısız

bölgelerin oluştuğu belirlenmiştir. Bu bölgelerin sertlik değerlerinin yüksek devir, yığma basıncı ve sürtünme basıncı kullanılan kaynaklara göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, artan devir sayısı ile birlikte ısı tesiri altındaki bölgenin genişleyerek ve aşırı deformasyona uğramış bölgede martenzit oluşumuyla birlikte sertleşme olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma, AISI 316L/AISI 4140 çelik çiftinin sürekli tahrikli sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilmesi ve kaynak sonrası metalurjik değişikliklerin incelenmesi üzerine önemli bulgular sunmaktadır [8].

Lee ve diğer araştırmacılar (2003), AA6005 alüminyum alaşımını sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle birleştirerek, mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemiştir. Makalelerinde, sürtünme kaynağı işlemiyle oluşan mikroyapıyı farklı bölgelere ayırmışlardır. İlk bölgeyi "kaynak metali" olarak adlandırmışlar ve buradaki sürtünme ısı ve plastik akışın ince ve uzunlamasına tanelerin oluşumuna yol açtığını belirtmişlerdir. İkinci bölgeyi "yassılaştıran ve uzayan tanelerden oluşan termomekanik etkilenen bölge" olarak tanımlamışlardır. Üçüncü bölge ise "ısıdan etkilenen bölge" olarak belirlenmiştir. Isıdan etkilenen bölgenin ana metalden çok farklı olmadığını ve mikroyapı incelemelerinde ayırt etmenin zor olduğunu vurgulamışlardır. Ancak mikrosertlik analizleriyle bu bölgenin tespit edilebileceğini öne sürmüşlerdir. Gerilme testlerinde, 1600 devir/dakika ve 507 mm/dakika kaynak parametrelerinde en iyi mukavemet değeri elde edilmiş ve bu değerin 220 MPa olduğu ve ana metalin %85'ine tekabül ettiği belirlenmiştir [9].

Park ve diğer araştırmacılar (2003), %60 Cu ve %40 Zn içeren pirinç alaşımını sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirerek mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmalarında, farklı devir sayılarından (1000 devir/dak'dan 1500 devir/dak'a kadar) ve farklı ilerleme hızlarından (500 mm/dak'dan 2000 mm/dak'a kadar) kaynaklanan kusursuz kaynaklar elde ettiklerini belirtmişlerdir. Mikroyapı incelemelerinde, karışım bölgesinde son derece ince taneler ve şekil değiştirmiş taneler ile termomekanik olarak etkilenen bölgede uzamış tanelerin varlığını tespit etmişlerdir. İlerleme hızı ve devir sayısı değişiklikleriyle kontrol edilen azalan ısı girdisinin, karışım bölgesindeki tüm sertlik değerlerinin ana malzemeye göre arttığını belirlemişler ve sertlik artışındaki ana faktörün düşük

ısı girdisi olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, karışım bölgesindeki dayanım değerlerinin, bu bölgedeki sertlik değerleri değişimleriyle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir [10].

Wadeson ve diğer araştırmacılar (2005), sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen AA7108-T79 alüminyum alaşımının korozyon dayanımını incelemişler ve termomekanik etkilenen bölgenin korozyondan en kolay etkilenen bölge olduğunu bildirmişlerdir. Bu sonuç, termomekanik etkilenen bölgenin mikroyapısal ve kimyasal değişikliklere maruz kalarak korozyona karşı daha hassas hale geldiğini göstermektedir [11].

Srinivasan ve diğer araştırmacılar (2005), AA6056/7075 alüminyum alaşım çiftlerinin sürtünme karıştırma kaynağındaki gerilmeli korozyon davranışını incelemişlerdir. 900 dev/dak ve 250 mm/dak kaynak parametreleri kullanarak birleştirdikleri bağlantıları %3,5 NaCl çözeltisine maruz bırakarak mekanik ve mikroyapı karakteristiklerini normal koşullardaki değerlerle karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında, korozyona tabi tutulmayan numunelerin düşük hızlardaki çekme testlerinde kırılmaların, daha düşük mekanik özelliklere sahip AA6061'in termomekanik olarak etkilenen bölge (TMAZ) bölgesinde meydana geldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, korozyonlu numunelerde ise kırılmaların AA7075 tarafında gözlemlendiğini vurgulamışlardır. Bu sonuçlar, korozyonun mekanik davranışı etkileyerek kırılma noktasını değiştirebileceğini ve farklı alaşımların farklı şekillerde etkilenebileceğini göstermektedir [12].

Reynolds ve diğer araştırmacılar (2003), sabit ilerleme hızı ve farklı iki devir sayısı kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı yapılan 3,2 mm kalınlığında 304L paslanmaz çeliğin yapısı, özellikleri ve kalıntı gerilmelerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, kaynatılan malzemenin çekme gerilmesinin ana malzemeninkine yakın olduğunu belirlemişlerdir. Bu sonuç, sürtünme karıştırma kaynağının 304L paslanmaz çelikte sağlam bir kaynak bağlantısı oluşturduğunu ve kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin ana malzemeye yakın olduğunu göstermektedir. Kalıntı gerilmelerin incelenmesi ise, kaynak işleminin malzeme üzerindeki gerilme etkisini değerlendirmeye yardımcı olmuştur [13].

Chen ve diğer araştırmacılar (2008), farklı özelliklere sahip 3 mm kalınlığındaki şerit döküm Al-Si (AC4C) ve Mg-Al-Zn (AZ31) alüminyum alaşımlarına sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle bindirme kaynağı uygulamışlardır. Kaynak sonrasında numunelerin SEM (taramalı elektron mikroskobu) ve EDS (enerji dağılım spektroskopisi) analizleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda, düşük kaynak hızı koşullarında yüksek ısı girdisi sağlandığında mikroyapının daha düzenli bölgelerden oluştuğu gözlemlenmiştir. Ancak yüksek kaynak hızlarında birleşme bölgesinde çatlaklar ve gözeneklerin oluştuğu, kararsız mikroyapıların gerilme testleri üzerinde olumsuz etkiler gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca XRD (X-ışını difraksiyonu) analizleriyle, ara bölgede oluşan faz yapılarının belirlendiği ifade edilmiştir. Bu sonuçlar, sürtünme karıştırma kaynağının farklı alüminyum alaşımlarının birleşiminde mikroyapı ve mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Yüksek ısı girdisi ve uygun kaynak hızı koşullarının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi, istenilen kaynak bağlantısı ve mikroyapı özelliklerinin elde edilmesini sağlayabilir [14].

Taban ve diğer araştırmacılar (2005), EN AW-5083-H321 alüminyum alaşımını MIG (Metal Aktiv Gaz), TIG (Tungsten İnert Gaz) ve sürtünme karıştırma kaynak yöntemleriyle birleştirmiş ve kaynaklı bağlantıların mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada sürtünme karıştırma kaynak yönteminin diğer yöntemlere göre daha iyi mekanik ve mikroyapısal özelliklere sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bu sonuçlar, sürtünme karıştırma kaynağının EN AW-5083-H321 alüminyum alaşımı için tercih edilebilecek bir kaynak yöntemi olduğunu göstermektedir. Sürtünme karıştırma kaynağının daha yüksek mukavemet, daha homojen mikroyapı ve daha az kusur içeren bağlantılar sağladığı belirlenmiştir. Bu nedenle, özellikle EN AW-5083-H321 alüminyum alaşımının kaynağı için sürtünme karıştırma kaynağının tercih edilebileceği sonucuna varılmıştır [15].

Cavaliere ve diğer araştırmacılar (2007), AA2024/AA7075 alüminyum alaşım çiftini sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemiyle birleştirerek mekanik özellikler ve mikroyapı karakteristiklerini belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmada, karıştırıcı takımın konumunun kaynak bölgesinden 0.5, 1, 1.5 mm uzakta paralel olarak yönlendirildiği ve bu alaşım çiftlerinin sabit devir ve

ilerleme hızı altında birleştirildiği bildirilmiştir. Yapılan çalışmada farklı takım uzaklıklarının çekme ve yorulma karakteristiklerinde kademeli olarak düşüşe neden olduğu ve bağlantılarda yorulma kırığı gelişimini artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, kaynakların kaynak merkezinden uzaklaşmasıyla mikrosertlik değerlerinde düşüş meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar, sürtünme karıştırma kaynağındaki takım konumunun ve kaynak bölgesinden uzaklığının kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini etkilediğini göstermektedir. Takım konumunun ve uzaklığının optimizasyonu, daha yüksek performanslı ve dayanıklı bağlantıların elde edilmesine katkı sağlayabilir [16]. Shigematsu ve diğer araştırmacılar (2003), AA5083 ve AA6061 alüminyum alaşımlarının çiftlerini hem birbirleriyle hem de kendi içlerinde sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemiyle birleştirerek mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, çekme testi sonuçlarında benzer özelliklere sahip olan kaynakların, benzer olmayan çiftlerle birleştirilenlere kıyasla daha yüksek gerilme değerlerine ulaştığını tespit etmişlerdir [17].

Zeng ve diğer araştırmacılar (2006), sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirdikleri AA6061 alaşımında karıştırıcı uçların aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, karıştırıcı uç pimlerinin aşınma sonucunda çaplarında düşüşlerin meydana geldiğini mikroyapı daralmalarıyla tespit etmişlerdir. Bu mikroyapı daralmalarının, mekanik özelliklerde mukavemet düşüşlerine ve kaynak metalinde gözenek oluşumuna yol açtığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca aşınma sonucunda kaynaklı bağlantılarda da sertlik düşüşleri gözlemlenmiştir. Bu çalışma, sürtünme karıştırma kaynağı sırasında karıştırıcı uçların aşınma davranışının önemli bir faktör olduğunu ve bu aşınmanın kaynak bölgesinde mekanik özelliklerde düşüşlere ve gözenek oluşumuna neden olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, kaynak parametrelerinin optimize edilmesi ve karıştırıcı uçların ömrünün artırılması için önlemler alınması gerektiğini vurgulamaktadır [18].

Cavaliere ve diğer araştırmacılar (2006b), AA2024/AA7075 alüminyum alaşım çiftini sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirerek mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, kaynaklı bağlantılara çekme ve yorulma testleri uygulanmıştır. Yorulma testleri $R=0.1$ sabit yük ve yaklaşık 75

Hz yük frekansı altında gerçekleştirilmiş ve S/N (gerilme-çevrim) yorulma dayanım eğrileri çıkartılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağıyla oluşan mikroyapı karakteristikleri optik ve elektron mikroskoplarında belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan yorulma testleri sonucunda, asıl malzemelerde yaklaşık 10^7 çevrimden büyük bir ömür beklenirken, farklı bu iki alaşımın yorulma ömrünün yaklaşık 10^6 çevrimde 44 MPa gerilmeye dayandığı belirlenmiştir. Bu çalışma, AA2024 ve AA7075 alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı sonucunda oluşan bağlantıların yorulma davranışlarını incelemekte olup, bu alaşımların yorulma ömrünün sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu bilgi, bu alaşımların uygulama alanlarında yorulma ömrüne dikkat edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır [19].

Zhou ve diğer araştırmacılar (2006b), Al-Mg alaşımlarını sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ve MIG (Metal Inert Gaz) yöntemiyle birleştirerek yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, SKK yöntemiyle birleştirilen numunelerin hesaplanan $R=0.1$ gerilme altındaki yorulma ömrünün, MIG ile birleştirilen numunelere kıyasla 6 ile 14 kat daha uzun olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, SKK ile birleştirilen numunelerdeki yorulma karakteristiklerinin, esas malzemenin değerine daha yakın olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, yorulma sonucu kırılan numunelerin incelenmesiyle kırık başlangıcı, dengeli kırık büyümesi ve aşırı yükleme belirlenmiş ve SEM analizleri sonucunda mikroskobik boşlukların sık ve yaygın olduğu, homojen bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Bu çalışma, SKK yönteminin Al-Mg alaşımlarının yorulma davranışını önemli ölçüde iyileştirdiğini ve yorulma ömrünü artırdığını göstermektedir. Ayrıca, SKK ile birleştirilen numunelerin yorulma karakteristiklerinin esas malzemeye daha yakın olduğu belirlenmiştir. Bu bilgi, sürtünme karıştırma kaynağının yorulma dayanımının artırılması için potansiyel bir yöntem olduğunu göstermektedir [20].

Scialpi ve diğer araştırmacılar (2007), SKK yöntemiyle birleştirilen 1,5 mm kalınlığındaki AA6082 alaşımının karıştırıcı uç omuz geometrilerinin kaynak dikiş morfolojisine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında üç farklı türde karıştırıcı omuz kullanarak, bu omuzların kaynağın yüzey kalitesi ve mekanik özellikleri üzerinde önemli bir rol oynadığını vurgulamışlardır. Araştırmacılar,

farklı karıştırıcı omuz geometrilerinin kaynak dikişindeki deformasyon, mikroyapı ve boşluk oluşumu gibi faktörleri etkilediğini gözlemlemişlerdir. Omuz geometrisindeki değişikliklerin kaynak bölgesindeki akış koşullarını etkilediği ve bu nedenle kaynak yüzey kalitesi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, farklı omuz geometrilerinin kaynaklı birleşimlerin mekanik özelliklerini, özellikle dayanım ve tokluk değerlerini etkilediği tespit edilmiştir. Bu çalışma, SKK yöntemiyle birleştirilen alüminyum alaşımlarında karıştırıcı uç omuz geometrilerinin önemli bir faktör olduğunu ve kaynaklı birleşimlerin kalitesi ve performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Bu bilgiler, SKK yöntemi uygulanırken karıştırıcı omuz geometrisinin dikkate alınmasının önemli olduğunu vurgulamaktadır [21].

Cavaliere ve diğer araştırmacılar (2005b), AA7075 alüminyum alaşımının SKK yöntemiyle birleştirilmesi üzerine yaptıkları çalışmalarda, kaynaklı bağlantıların farklı sıcaklık ortamlarındaki süperplastik özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca, çekme hızı oranlarını da değiştirmişlerdir. Çalışmalarında farklı sıcaklık derecelerinde çekilen numunelerin kırılma mekanizmalarını belirlemek için SEM incelemesi yapmışlardır. Bu inceleme sonucunda, farklı sıcaklık derecelerinde çekilen numunelerin farklı tiplerde kırılma mekanizmaları sergilediği ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar, AA7075 alüminyum alaşımının SKK yöntemiyle birleştirilmesi sonucunda elde edilen kaynaklı bağlantıların sıcaklık ortamına bağlı olarak farklı süperplastiklik özellikleri gösterebileceğini göstermektedir. Bu bilgi, bu alaşımın süperplastik özelliklerinin optimize edilmesi ve uygulamalarında kullanımının iyileştirilmesi açısından önemlidir [22].

Uzun (2007), SiC takviyeli AA2124 alüminyum alaşım kompozitin SKK yöntemiyle birleştirilmesi sonucunda oluşan mikroyapı karakteristiklerini belirlemek amacıyla bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında kaynak bölgesini dört farklı alanda inceleyerek, bu bölgelerin mikroyapı üzerindeki etkilerini belirlemiştir. Yapılan EDS analizlerinden elde edilen sonuçlara göre, ince taneli SiC parçacıklarının esas malzemede ve kaynak metalinde homojen bir şekilde dağıldığı ve SKK yöntemiyle kaynak metalinde aşırı ince taneli bir yapı oluştuğu tespit edilmiştir. Kompozit ana malzemesinde ortalama sertlik değeri 250 HV

olarak belirlenirken, kaynak metalinde bu değer 240 HV ve termomekanik olarak etkilenen bölgede ise 225 HV olarak kaydedilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada, kaynak metalindeki elektrik iletkenlik değerinin esas malzemeye göre oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, SiC takviyeli alüminyum alaşımların SKK yöntemiyle birleştirilmesi sonucunda oluşan mikroyapının, mekanik özellikler ve elektrik iletkenliği üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermektedir [23].

Fujii ve arkadaşları (2006) tarafından yapılan çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemiyle birleştirilen alüminyum alaşımlarında karıştırıcı uç profillerinin mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada üç farklı uç geometrisi olan üçgen, vida ve silindir şeklindeki karıştırıcı uçlar, belirlenen işlem parametrelerine göre üç farklı alüminyum alaşımı (AA1050-H24, AA5083-0, AA6061-T6) zerinde uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, düşük deformasyon direnci gösteren AA6061 alüminyum alaşımında uç profili önemli bir etki göstermemektedir. Ancak yüksek deformasyon direncine sahip AA5083 alaşımında, 1500 dev/dak dönme hızından daha yüksek hızlarda üçgen profilli uçların etkili olduğu grlmştir. Orta hızlarda (800-1200 dev/dk) vida profilli uçların etkili olduğu, düşük hızlarda (600 dev/dk ve altı) ise silindir profilli uçların etkili olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, alaşımın deformasyon direnci ve uç profili arasında etkileşim olduğunu göstermektedir. Farklı alaşımların özellikleri ve işlem parametreleri dikkate alınarak, uygun uç profili seçiminin SKK kaynak işleminin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini iyileştirebileceği sonucuna varılmıştır [24].

Cavaliere (2006a.) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, zirkonyum ilaveli AA2014 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi sonucunda elde edilen çekme dayanımı, yorulma dayanımı ve mikroyapı karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır. SKK işlemi nedeniyle oluşan yoğun ince taneli yeniden kristalleşme yapısının, oda sıcaklığındaki çekme ve yorulma deneylerinde esas malzemeden daha yüksek mukavemet değerleri gösterdiği tespit edilmiştir. Mikroyapısal incelemelerde, Al₃Zr partiküllerinin malzemeye homojen olarak dağıldığı ve kırık yüzey analizlerinde

ise malzemenin yüksek yoğunluklu çukurcuklardan oluşan lokal sünek kırılma mekanizması sergilediği görülmüştür. Bu sonuçlar, zirkonyum ilavesinin SKK ile birleştirilen alüminyum alaşımının mekanik özelliklerini artırdığını ve mikroyapıda değişikliklere neden olduğunu göstermektedir. Yüksek mukavemet değerleri ve sünek kırılma mekanizması, alaşımın yorulma dayanımı ve genel performansının iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır [25].

Sharma ve diğerleri (2004) tarafından yapılan çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemiyle birleştirilen dökme A356 alüminyum alaşımının yorulma davranışı incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, yorulma ömrünü etkileyen faktörlerin döküm alüminyum alaşımlarında mikroyapı homojenliği, ince taneli yapılar ve minimum oranda gözeneklilik olduğu belirlenmiştir. Mikroyapı homojenliği, alaşımın içerisindeki tane boyutlarının ve dağılımının düzenli olması anlamına gelir. Bu durum, malzemenin yorulma davranışını olumlu yönde etkiler çünkü homojen bir mikroyapı daha iyi dayanıklılık sağlar. İnce taneli yapılar da benzer bir etkiye sahiptir. İnce taneli yapılar, malzemenin yorulma ömrünü artırır çünkü taneler arasındaki sınırların hareketi kısıtlanır ve çatlakların yayılması önlenir. Ayrıca, minimum oranda gözeneklilik, malzemenin mukavemetini artırır ve yorulma direncini artırır çünkü gözenekler çatlak başlangıcı için zayıf noktalar oluşturabilir. Bu sonuçlar, dökme A356 alüminyum alaşımının SKK ile birleştirilmesi durumunda mikroyapı özelliklerinin önemli olduğunu ve bu özelliklerin yorulma davranışını etkilediğini göstermektedir. Mikroyapının homojenliği, ince taneli yapılar ve gözeneksizlik, malzemenin yorulma ömrünü artırmak için dikkate alınması gereken faktörlerdir [26].

Jones ve diğerleri (2005) tarafından yapılan çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemiyle birleştirilen AA2024-T351 alüminyum alaşımının mikroyapı ve mikrosertlik özellikleri incelenmiştir. Mikroyapı incelemesi, kaynak bölgesinin 4 mikron boyutlu dislokasyon mekanizması sergileyen ince tanelerden oluştuğunu ortaya koymuştur. Bu tespit, transmisyon elektron mikroskobu (TEM) analizleriyle yapılmıştır. Ayrıca, bu ince taneler içindeki dislokasyon yoğunluğunun diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu öne sürülmüştür. Çalışmada, ısıdan etkilenen bölgedeki sertlik düşmesinin d

fazındaki çökelmeler ve aşırı yaşlanma sonucu meydana geldiği belirlenmiştir. Bunun termomekanik olarak etkilenen bölgede daha az olduğu belirtilmiştir. Yani, kaynak bölgesindeki dislokasyon yoğunluğu ve ince taneler, bölgenin mikrosertlik özelliklerini etkilemiş ve termomekanik olarak etkilenen bölgedeki sertlik düşüşünün nedeni olarak çökme ve yaşlanma süreçleri gösterilmiştir. Bu sonuçlar, AA2024-T351 alüminyum alaşımının SKK yöntemiyle birleştirilmesi durumunda mikroyapı ve mikrosertlik özelliklerindeki değişimleri ortaya koymaktadır. Kaynak bölgesindeki ince taneler ve dislokasyon yoğunluğu, bölgenin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Isıdan etkilenen bölgede ise çökelmeler ve yaşlanma süreçleri nedeniyle sertlik düşmektedir [27].

Zhou ve diğerleri (2006a.) tarafından yapılan çalışmada, 5083 alüminyum alaşımı sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ve metal inert gaz (MIG) yöntemleriyle birleştirilerek yorulma davranışları incelenmiştir. Çalışmada, yorulma testleri yapılarak malzemelerin yorulma ömrü karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, SKK yöntemiyle birleştirilen kaynaklı bağlantıların MIG yöntemiyle birleştirilenlere göre 9 ila 12 kat daha uzun yorulma ömrüne sahip olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, SKK yönteminin 5083 alüminyum alaşımı için yorulma dayanımını artırdığını ve daha dayanıklı bağlantılar sağladığını göstermektedir. Yorulma ömrünün artması, kaynaklı bağlantının daha uzun süre boyunca yük altında dayanabilmesi anlamına gelir. SKK yönteminin, yorulma davranışı üzerindeki olumlu etkisi, bağlantının daha güvenilir ve uzun ömürlü olmasını sağlayabilir. Bu nedenle, 5083 alüminyum alaşımının kullanıldığı uygulamalarda SKK yöntemi tercih edilebilir [28].

Kurt ve diğerleri (2004) tarafından yapılan çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi incelenmiştir. Çalışmada, helisel kanallara sahip tek tip bir karıştırıcı uç kullanılarak, 800 dev/dak sabit dönme hızında ve 4 farklı ilerleme hızında alüminyum levhaları alın kaynağıyla birleştirilmiştir. Kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, kaynak ilerleme hızının artmasıyla çekme ve mikrosertlik değerlerinde doğru orantılı bir artış olduğu belirlenmiştir. Yani, daha yüksek kaynak ilerleme hızları kullanıldığında, kaynaklı bağlantının

mekanik özellikleri artmıştır. Bunun yanı sıra, araştırmacılar kaynak esnasında diklemesine oluşan ondülelerin artış gösterdiğini ve bu artışın kaynak ilerleme hızının azalmasıyla doğrudan ilişkili olduğunu belirlemişlerdir. Bu çalışma, kaynak hızının sürtünme karıştırma kaynağının birleşebilirlik performansına etkisini göstermektedir. Daha yüksek kaynak ilerleme hızları kullanıldığında, daha güçlü ve daha homojen bir kaynak bağlantısı elde edilebilir. Ancak, kaynak ilerleme hızının artmasıyla ondülelerin artması gibi bazı yan etkiler de gözlemlenebilir. Bu bulgular, sürtünme karıştırma kaynağı işleminin optimize edilmesi ve kaynak parametrelerinin dikkatlice kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir [29].

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Alüminyum ve alaşımları, yer kabuğunda en yaygın bulunan elementlerden biridir ve demir ve çelikten sonra endüstride en çok tercih edilen malzemeler arasında yer alır. Alüminyumun geniş kullanım alanı, bu malzemenin özellikleriyle ilgilidir.

Alüminyumun önemli özelliklerinden bazıları şunlardır;

İyi elektriksel ve ısı iletkenlik: Alüminyum, elektrik akımını ve ısıyı iyi ileten bir malzemedir. Bu özelliği nedeniyle elektrik ve elektronik uygulamalarda sıklıkla kullanılır.

Yüksek ısı ve ışık yansıtması: Alüminyum, yüksek miktarda ısı ve ışığı yansıtabilir. Bu nedenle güneş panelleri, reflektörler ve aydınlatma armatürleri gibi uygulamalarda tercih edilir.

Şekillendirilebilme kolaylığı: Alüminyum, sıcak veya soğuk şekillendirme işlemleriyle kolayca şekil verilebilir. Bu özelliği, alüminyumun farklı şekil ve boyutlarda ürünlerin üretimi için ideal bir malzeme olmasını sağlar.

Süneklik ve yumuşaklık: Alüminyum, sünek ve yumuşak bir malzemedir. Bu özelliği, alüminyumun kolayca bükülmesini ve şekil verilmesini sağlar.

Sertleştirilebilme: Bazı alüminyum alaşımları, çökelme yoluyla sertleştirilebilir. Bu sayede alaşımlar daha yüksek mukavemet özelliklerine sahip hale gelir.

Alüminyum ve alaşımları, dünya genelinde büyük ticari değeri olan ve büyük miktarlarda üretilen malzemelerdir. Havacılık ve otomotiv endüstrisindeki kullanımının önemi, alüminyumun "stratejik" bir metal olarak kabul edilmesine yol açmıştır. Alüminyum ve alaşımları, tarım, inşaat, kimya, gıda, ulaşım, elektrik ve elektronik gibi birçok sektörde giderek artan oranlarda kullanılmaktadır.

Ülkemizde alüminyum sanayi yeni olmasına rağmen, alüminyum ürünlerine olan talep hızla artmaktadır. Yurt içinde işlenen alüminyum ürünlerinin miktarı da artmaktadır. Alüminyum ve alaşımlarının kullanımı, üretim sektöründe ve ekonomik büyümede önemli bir rol oynamaktadır [30].

Alüminyum, hafif, dayanıklı ve fonksiyonel bir mühendislik malzemesi olarak önem kazanmıştır. Özkütlesi, çelik ve bakıra kıyasla yaklaşık üçte biri kadar olan 2,7 g/cm³'tür. Bu hafiflik, alüminyumun birçok avantaj sağladığı alanlarda

kullanımını teşvik etmektedir. Alüminyumun hafif olması, kullanıldığı uygulamalarda birçok avantaj sağlar. Özellikle taşıt endüstrisinde hafiflik, yakıt verimliliği ve performans artışı sağlar. Aynı zamanda havacılık, uzay endüstrisi, ambalaj sektörü, elektrik ve elektronik alanlarında da tercih edilen bir özelliktir. Alüminyum ayrıca esnek bir metaldir ve tasarım esnekliği sağlar. Bu özelliği sayesinde farklı şekillerde üretilebilir ve çeşitli tasarımlar için uygun bir malzeme olur. Alüminyumun mukavemeti, alaşım elementlerin eklenmesiyle artırılabilir. Saf alüminyumun yoğunluğu yaklaşık 2,7 g/cm³ olarak bilinirken, alaşımların kullanılması bu değeri biraz değiştirebilir. Daha ağır alaşım elementleri, ürünün ağırlığını artırabilir. Örneğin, 1xxx serisindeki alaşımlar saf alüminyuma daha yakın yoğunluklara sahiptir ve bu serideki alaşımlar genellikle %99 saf ticari alüminyum olarak kabul edilir. Alüminyumun hafiflik, dayanıklılık ve mühendislik özellikleri, geniş kullanım alanları ve avantajları nedeniyle günümüzde önemli bir mühendislik malzemesi haline gelmiştir.

Alüminyum hakkında bazı önemli özellikler:

İyi elektrik iletkeni: Alüminyum, elektrik akımını iyi ileten bir malzemedir. Bu nedenle elektrik ve elektronik uygulamalarda sıklıkla kullanılır.

İyi ısı iletkeni: Alüminyum, ısıyı iyi ileten bir malzemedir. Bu özelliği, ısı transferinin etkili bir şekilde gerçekleştirildiği uygulamalarda kullanılmasını sağlar.

Bol miktarda bulunma: Alüminyum, dünyada en yaygın bulunan elementlerden biridir. Doğada boksit cevheri şeklinde bulunur ve elektroliz yöntemiyle ayrıştırılarak elde edilir.

Mukavemetli alaşımlar: Saf alüminyum yumuşak bir metaldir, ancak alaşımları saf halden yaklaşık 15 kat daha mukavemetlidir. Bu nedenle, alüminyum alaşımları birçok dayanıklı ve güçlü uygulama için tercih edilir.

Hafiflik: Alüminyum, çeliğin veya bakırın yaklaşık üçte biri kadar ağırdır. Bu hafiflik, özellikle hafif ve taşınabilir yapıların, otomotiv ve havacılık sektöründe kullanılan araçların tasarımında avantaj sağlar.

İşlenebilirlik ve şekillendirilebilirlik: Alüminyum, kolaylıkla dövülebilir, makinede işlenebilir ve şekillendirilebilir. Bu özellikleri, çeşitli ürünlerin üretimi ve karmaşık formların oluşturulması için idealdir.

Korozyon direnci: Alüminyum, yüksek korozyon direncine sahip bir metaldir. Doğal olarak oluşan bir oksit tabakası sayesinde korozyona karşı dayanıklılık gösterir.

Çevre dostu ve geri dönüşümü kolay: Alüminyum, çevre dostu bir metaldir ve sonsuz defa geri dönüştürülebilir. Geri dönüşümü için gereken enerji, ilk üretim için gereken enerjinin yaklaşık %5'ine kadar düşebilir.

Alüminyum, pek çok endüstriyel sektörde kullanılan ve dünya ekonomisi için büyük bir öneme sahip olan bir malzemedir. Otomotiv, havacılık, savunma, inşaat, mobilya ve daha birçok sektörde geniş bir kullanım alanına sahiptir [31].

2.1. Alüminyumun Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Alüminyum, doğada oksijen ve silisyumdan sonra en bol bulunan üçüncü elementtir. Bu nedenle geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Alüminyumun kimyasal sembolü Al'dir ve periyodik tabloda 3-A grubunda yer alır. Atom numarası 13, atom ağırlığı ise 26,97'dir. Alüminyumun erime noktası 650 derece ve kaynama noktası 1800 derece olduğundan yüksek sıcaklıklara karşı dirençlidir. Alüminyum manyetik değildir ve mükemmel bir elektrik iletkenidir. Diğer metallerle hemen hemen tüm alaşımları oluşturabilir. Alüminyum oksit tabakası ince bir yüzey tabakası oluşturduğu için hem sıcak hem de soğuk durumdayken basınçla kolayca işlenebilir. Bükülebilir, çekilebilir ve damgalanabilir özelliklere sahiptir. Ateşle yanmaz, özel boya gerektirmez ve plastiklerden zehirli değildir. Alüminyum çok esnektir ve sadece 4 mikron kalınlığında sacların yanı sıra ekstra ince teller gibi ince yapıların üretiminde kullanılabilir. Bununla birlikte, alüminyumun üretimi diğer metaller ve malzemelere kıyasla daha maliyetlidir. Çok az miktarda katkı maddesi, alüminyumun özelliklerini büyük ölçüde değiştirebilir ve yeni uygulama alanlarına olanak sağlar. Örneğin, silikon ve magnezyum ile alaşım yapılmış alüminyum alaşımları, otomobil jantları, motorlar, şasiler ve modern otomobillerin diğer parçaları gibi sıradan yaşamda karşılaşılan uygulamalarda kullanılır. Cep telefonları ve tablet bilgisayarların üretiminde de yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımları bulunur. Bilim insanları ayrıca yeni alüminyum alaşımlarının geliştirilmesine devam etmektedir. Modern inşaat, otomotiv,

havacılık, enerji, gıda ve diğer endüstrilerde alüminyumun eksikliği düşünülemez hale gelmiştir. Ayrıca, ilerlemenin bir sembolü haline gelmiştir ve son teknoloji cihazlar ve araçlar genellikle alüminyumdan üretilmektedir.

Yukarıda sıralanan kalitelerin birleşiminin, alüminyumun endüstride en iyi seçim olmasını sağlamak için zaten yeterli olduğu gösteriyor; ancak yine de önemli olan başka bir özellik var: tekrar tekrar tekrar kullanılabilirliği. Alüminyumun saf hali ve alaşımları eritilebilir ve mekanik özelliklerine herhangi bir zarar vermeden tekrar kullanılabilir [32].

2.2. Alüminyumun Alaşımları

Alüminyum alaşımları, ana metali olarak alüminyumun kullanıldığı ve farklı uygulama gereksinimlerine göre üretilen alaşımlardır. Bu alaşımlar, dövme alaşımları ve döküm alaşımları olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Dövme alüminyum alaşımları, plastik şekillendirme yöntemiyle şekillendirilen alaşımlardır. Bu alaşımlar, döküm alaşımlarından farklı mikroyapı ve kimyasal özelliklere sahiptir. Döküm alüminyum alaşımları ise sadece döküm yöntemiyle şekillendirilir [33]. Bu iki ana grup içerisinde, alaşımlar ısıtılabilir ve uygulanabilen ve uygulanamayan olmak üzere iki alt gruba ayrılır. Isıtılabilir ve uygulanabilen alaşımlar, belirli ısıtılabilirle çökelme sertleşmesi elde edebilir. Bu alaşımlar, 2XXX, 6XXX ve 7XXX serileri olarak sınıflandırılır. Isıtılabilir uygulanamayan alaşımlar ise çökelmeyle sertleştirilemez ve dayanıklılıklarını artırmak için sadece soğuk işleme tabi tutulabilirler. Bu alaşımlar, 1XXX, 3XXX ve 5XXX serileri olarak sınıflandırılır. Alüminyum alaşımları, farklı uygulamalarda kullanılan ve istenilen özelliklere sahip olan malzemelerdir. Bu alaşımlar, endüstriyel sektörlerde, otomotiv endüstrisinde, havacılıkta, inşaat, elektronikte ve daha birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Her alaşımın farklı özellikleri ve kullanım alanları bulunmaktadır, bu nedenle doğru alaşım seçimi önemlidir [34].

Alüminyumun bazı kötü döküm ve mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle alüminyum alaşımlarında bazı elementlerin ilave edilmesi gerekmektedir. Bu ilave edilen elementlere göre alüminyum alaşımları sınıflandırılır. Amerikan Alüminyum Birliği (Aluminum Association), alüminyum alaşımlarını

sınıflandırmak için dört rakamdan oluşan bir sistem kullanır. Bu sistemde, ekstrüzyon, haddeleme, dövme veya döküm yöntemleriyle üretilen alüminyum alaşımlarının simgesi dört rakamdan oluşur. Simgenin ilk rakamı, alaşımın hangi temel elementi içerdiğini belirtir. Örneğin, 1XXX serisi alaşımlar saf alüminyum (%99.00) temsil eder. İkinci rakam, özel olarak eklenen katkı elementlerinin sayısını belirtir ve 1'den 9'a kadar değişebilir. 2XXX'den 8XXX'e kadar olan alüminyum alaşımlarında ilk rakam, alaşım türünü belirtirken, ikinci rakam değişiklikleri veya modifikasyonları ifade eder. Son iki rakamın özel bir anlamı yoktur, sadece alaşımı diğer alaşımlardan ayıran bir sıra numarası gibi kullanılır. Bu sınıflandırma sistemi, alüminyum alaşımlarının özelliklerini ve bileşenlerini belirlemek ve doğru alaşım seçimini sağlamak için kullanılır. Her rakam kombinasyonu, farklı özelliklere ve uygulamalara sahip bir alaşımı temsil eder. Bu nedenle, alaşım seçimi yaparken bu sınıflandırma sistemini dikkate almak önemlidir [30].

Tablo 1. Alüminyum alaşımlarına ilave edilen katkı maddeleri ve özellikleri

Al Alaşımları	Alaşım Elementi	Özellikleri
1000	%99 Saf Alüminyum	Yüksek Elektrik İletkenliği
2000	Bakır	Yüksek Mukavemet
3000	Manganez	Gıda Ambalajları
4000	Silisyum	Düşük Ergime Sıcaklığı
5000	Magnezyum	Yüksek Korozyon Direnci
6000	Magnezyum ve Silikon	Isıl İşleme Sertleştirilebilme
7000	Çinko	Yüksek Mukavemet
8000	Lityum, Kalay, Zirkonyum,	Yüksek Dayanım ve Sertlik

2.2.1. 1000 Serisi (Saf Alüminyum)

1000 serisi alüminyum alaşımları, ticari alüminyum alaşımları arasında en saf olanları temsil eder. Bu seride yer alan alaşımlar genellikle saf alüminyum (%99.00) içerir. 1000 serisi alaşımların korozyon direnci yüksektir, bu nedenle çeşitli endüstrilerde tercih edilir. Aynı zamanda mükemmel elektrik ve ısı iletim özelliklerine sahiptirler, bu da elektrik ve kimya endüstrilerinde kullanımlarını

destekler. Mekanik özellikleri düşük olsa da, gerinim sertleştirme yöntemiyle mukavemetlerinde küçük artışlar elde edilebilir. Gerinim sertleştirme, malzemenin plastik deformasyonla mukavemetini artırmak için uygulanan bir işlemdir. 1000 serisi alaşımlar genellikle kaynak yapılabilir özelliktedir. Bu da onları farklı uygulamalarda kullanım için daha esnek hale getirir. Elektrik ve kimya endüstrileri gibi alanlarda, yüksek korozyon direnci, elektrik iletkenliği ve ısı iletkenliği gibi özellikler önemlidir. Bu nedenle 1000 serisi alüminyum alaşımları bu endüstrilerde yaygın olarak tercih edilir.

2.2.2. 2000 Serisi (Alüminyum Bakır Alaşımları)

2000 serisi alüminyum alaşımları, ana alaşım elementi olarak bakır içerir. Bu alaşımlar, daha iyi performans gösterebilmek için genellikle ısı işleme tabi tutulurlar. Isıl işlem sonucunda, 2000 serisi alaşımlar çok iyi mekanik özelliklere sahip olurlar. 2000 serisi alaşımlar genellikle geniş bir sıcaklık aralığında yüksek performans ve mükemmel dayanıklılık gösterir. Bu özellikleri sayesinde uçak gövdesi, havacılık sektöründe kullanılan parçalar, araç gövde panelleri gibi yüksek mukavemet gerektiren ürünlerin imalatında yaygın olarak kullanılırlar. Ancak, 2000 serisi alaşımların korozyon direnci diğer ticari alüminyum alaşımlarına kıyasla daha düşüktür. Bu nedenle, korozyona maruz kalabilecek ortamlarda kullanımı sınırlı olabilir. Kaynak kabiliyeti ise alaşıma bağlı olarak orta seviyededir. 2000 serisi alaşımların kaynaklanması özel dikkat gerektirebilir ve uygun kaynak parametrelerinin kullanılması önemlidir. 2000 serisi alüminyum alaşımları, yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Özellikle uçak gövdeleri, havacılık sektöründe kullanılan parçalar ve araç gövde panelleri gibi ürünlerin imalatında yaygın bir şekilde kullanılırlar.

2.2.3. 3000 Serisi (Alüminyum Manganez Alaşımları)

3000 serisi alüminyum alaşımlarının birincil alaşım elementi manganezdir. Bu serideki alaşımlar, mükemmel şekil değiştirme ve kaynak kabiliyetine sahiptir. Ayrıca, iyi bir korozyon direncine ve orta düzeyde mukavemete sahiptirler. 3000 serisi alaşımlar genellikle ısı işlem göremez özelliktedir, yani ısı işlem uygulanarak sertleştirilemezler. Ancak, serinin yaklaşık %20'si, 1xxx serisine göre daha güçlü olan alüminyum alaşımları içerebilir. Bu alaşımlar genellikle gıda ambalajları, içecek kutuları, kimyasal kaplar, mutfak ekipmanları,

endüstriyel çatılar ve ısı eşanjörü imalatında kullanılır. Şekil değiştirme ve kaynak kabiliyetinin iyi olması, bu alaşımların farklı şekillerde ve işlemlerde kolaylıkla kullanılabilmesini sağlar. Ayrıca, iyi korozyon direnci, gıda ve kimyasal endüstriler gibi çeşitli uygulama alanlarında tercih edilmelerini destekler.

2.2.4. 4000 Serisi (Alüminyum Silisyum Alaşımları)

4000 serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi silisyumdur. Genellikle %12'ye kadar silisyum içerirler. Eğer alaşımda bakır varsa, çökelme sertleştirilmesi uygulanabilir. 4000 serisi alaşımlar, düşük termal genleşme katsayısına sahip olup aynı zamanda yüksek aşınma direnci ve korozyon dayanımına sahiptirler. Bu özellikler, bu alaşımların mimari uygulamalarda tercih edilmesine ve anot oksit kaplamasında kullanılmasına yol açar. Silisyum içeriğinden dolayı, kömür grisi bir renge sahiptirler. 4000 serisi alaşımlar, yüksek sıcaklığa dayanıklı parçaların imalatında, kaynaklı yapılar, levha imalatı, kaynak teli ve lehim alaşımı gibi çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Özellikle pistonlar gibi yüksek sıcaklıkta çalışan parçalar için tercih edilirler.

2.2.5. 5000 Serisi (Alüminyum Magnezyum Alaşımları)

5000 serisi alüminyum alaşımları, magnezyum ile alaşımlıdır. Bu serinin alaşımları mükemmel kaynak kabiliyetine sahip olup aynı zamanda deniz suyu ve kimyasallara karşı yüksek korozyon dayanımına sahiptirler. Magnezyum oranının artmasıyla birlikte sertlik ve mukavemet artar, ancak süneklik azalır. Bu nedenle, 5000 serisi alaşımlar yüksek sıcaklıkta hizmet etmek için uygun değildir. 5000 serisi alüminyum alaşımları, birçok farklı kullanım alanına sahiptir. Özellikle basınçlı kaplar, binalar, otomotiv ve gemi endüstrisi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılırlar. Yüksek korozyon direnci, bu alaşımların deniz suyu ve agresif kimyasallarla temas eden ortamlarda güvenilir bir seçim olmalarını sağlar. Ayrıca, mükemmel kaynak kabiliyeti, imalat süreçlerinde kolaylık sağlar. Ancak yüksek sıcaklıkta kullanım için uygun olmadıkları için belirli sınırlamalar da bulunmaktadır.

2.2.6. 6000 Serisi (Alüminyum, Magnezyum ve Silisyum Alaşımları)

6000 serisi alüminyum alaşımlarının temel alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Bu serinin alaşımları, 2xxx ve 7xxx serisi alaşımlar kadar yüksek

bir dayanıklılığa sahip olmasa da, iyi şekillendirilebilirlik, kaynak kabiliyeti, işlenebilirlik ve nispeten iyi bir korozyon direnci ile orta seviyede dayanıklılığa sahiptirler. 6000 serisi alüminyum alaşımları genellikle sac, levha ve ekstrüzyon ürünü olarak bulunurlar. Bu alaşımlar, özellikle ekstrüzyon yöntemiyle üretilen parçaların imalatında sıklıkla tercih edilirler. İyi şekillendirilebilirlikleri ve işlenebilirlikleri, çeşitli endüstrilerde geniş kullanım alanı bulmalarını sağlar. Bunlar arasında otomotiv sektörü, inşaat endüstrisi, mobilya imalatı ve elektronik sektörü gibi alanlar yer alabilir.

2.2.7. 7000 Serisi (Alüminyum Çinko Alaşımları)

7000 serisi alüminyum alaşımları çinko ile alaşımlıdır ve ticari olarak mevcut tüm alüminyum alaşımlarının en yüksek mukavemetine sahip olanlarıdır. Bu serinin alaşımları çöktürme yoluyla sertleştirilebilir ve mükemmel dayanım özellikleri sunar. Genellikle havacılık, uzay endüstrisi ve motor sporları gibi sektörlerde kullanım bulurlar. Ana alaşım elementi çinko olan bu alaşımlar genellikle (%1 ile %8 arasında Zn içerir) magnezyum (Mg), bakır (Cu) ve düşük oranlarda mangan (Mn) ve krom (Cr) gibi elementlerle birlikte kullanılır. Bu kombinasyon, alaşımın mukavemetini arttırmak için tasarlanmıştır. 7000 serisi alüminyum alaşımları ısıtılma tabi tutulabilir ve yüksek dayanım gösterebilir. Aynı zamanda çökelme sertleştirme yöntemiyle mukavemetleri daha da artırılabilir. Kaynak kabiliyetleri, alaşım bileşimi ve kullanılan yöntemle ilgili olarak değişiklik gösterir. Bu alaşımlar, kötüden çok iyiye uzanan bir kaynak kabiliyeti yelpazesine sahiptir. 7000 serisi alüminyum alaşımları özellikle uçak gövdelerinde sıklıkla kullanılır. Yüksek mukavemetleri ve hafiflikleri, havacılık sektöründe önemli bir avantaj sağlar. Ayrıca diğer endüstrilerde de kullanım alanı bulurlar, özellikle nerede yüksek mukavemet gerektiren uygulamalar söz konusu ise tercih edilirler.

2.2.8. 8000 Serisi (Alüminyum Lityum Alaşımları)

8000 serisi alüminyum alaşımları, lityum ve bazen kalay gibi elementlerin eklenmesiyle oluşturulur. Lityum, bu serideki alaşımlara hafiflik, yüksek çekme ve akma dayanımı gibi önemli özellikler kazandırır. 8000 serisi alüminyum lityum alaşımları, mükemmel mekanik özelliklere sahip olup iyi yorulma direnci ve tokluk gösterir. Bu alaşımlar, artan sertlikle birlikte daha düşük yoğunluk

sağlamak üzere tasarlanmıştır. Bu nedenle, diğer alüminyum alaşımlarıyla karşılaştırıldığında yüksek mukavemet ve hafiflik kombinasyonu sunarlar. Ancak, üretim maliyetleri 8000 serisi alüminyum alaşımlarının diğer alüminyum alaşımlarına göre daha yüksek olabilir. Bu nedenle, genellikle havacılık sektörü gibi yüksek teknoloji parçalarının tasarımında ve üretiminde tercih edilirler. Ayrıca savunma ve silah sistemlerinde de kullanılmaktadır, çünkü bu alaşımlar yüksek mukavemet ve dayanıklılık gerektiren uygulamalara uygun özelliklere sahiptir.

2.3. Alüminyumun ve Alaşımları Kaynağı

Alüminyum ve alaşımları farklı kaynak yöntemleriyle birleştirilebilir. Ancak, kaynak işlemi sırasında bazı kusurların ortaya çıkması kaçınılmaz olabilir ve kaynaklanabilirlikleri alaşım türüne göre değişebilir [35]. Alüminyum alaşımlarının kolaylıkla kaynak edilebilen serileri genellikle 1xxx, 3xxx ve 5xxx serileridir. Bu seriler genellikle ısıl işlem kabul etmeyen alaşımlardır ve kaynak işlemi daha kolaydır. Ancak, 2xxx ve 4xxx serileri gibi ısıl işlem kabul eden alaşımlar da kaynak edilebilir, ancak özel teknikler gerekebilir ve süneklilik biraz daha düşük olabilir. Yüksek mukavemetli ve ısıl işlem kabul eden 6xxx ve 7xxx serileri de kaynak edilebilir, ancak bu serilerin kaynak sonrası ısıl işlem davranışı dikkate alınmalıdır ve bazı durumlarda kaynak bölgeleri daha kırılgan olabilir. Kaynak yöntemleri arasında gaz ergitme kaynağı ve örtülü elektrotla ark kaynağı gibi teknikler kullanılabilir. Bu yöntemlerle kaynaklanırken bazı kaynak kusurları ortaya çıkabilir, ancak uygun ekipman, parametreler ve kalite kontrol önlemleriyle bu kusurlar minimize edilebilir. Kaynak işlemi sırasında kaynak bölgesinin korunması için uygun gaz atmosferi veya koruyucu kaplamalar da kullanılabilir. Sonuç olarak, alüminyum ve alaşımları kaynak edilebilir, ancak alaşım türüne ve kaynak parametrelerine dikkat edilmelidir. Uygun kaynak teknikleri ve kalite kontrol önlemleriyle alüminyum kaynağı başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilir [36].

2.3.1. Ergitme kaynak yöntemleri

2.3.1.1. Elektrik ark kaynağı

Elektrik ark kaynağı yöntemleri, alüminyum ve alaşımlarının birleştirilmesinde kullanılan yaygın kaynak tekniklerinden biridir. Örtülü elektrotla ark kaynağı, ekonomik olması ve basit kullanımı nedeniyle tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde, elektrik arkı kullanılarak iki metal parça ergitilir ve birleştirilir. Örtülü elektrot, yanarak ergiyen metalin kaynak metali haline geçtiği ve gazların ortaya çıktığı bir kaplama içerir. Bu gazlar, ark bölgesini korur ve oluşan cüruf kaynak dikişini dış etkenlerden korur. Alüminyum ve alaşımlarının çeşitli tipleri, örtülü elektrotlarla ark kaynağı yöntemiyle birleştirilebilir. Isıl işlem yoluyla sertleşmeyen alaşımlar ve yapısal sertleşmeli alaşımlar da bu yöntemle kaynak edilebilir. Ancak, dikişe yakın bölgelerde mekanik özelliklerin bir miktar düşebileceği dikkate alınmalıdır. Çinko (Zn) ve magnezyum (Mg) içeren alaşımlar ise kaynaktan sonra herhangi bir işlem gerektirmeden genellikle tüm mekanik özelliklere sahip olurlar. Doğru akım ters kutuplama (DATK) yöntemi, 2 mm'den kalın alüminyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılan bir yöntemdir. Ancak, 6 mm'den ince malzemelerin kaynağında sıvı ve gaz sızdırmazlığı elde etmek daha zor olabilir. Örtülü elektrotla ark kaynağı, alüminyum ve alaşımlarının kaynağında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ancak, kaynak işlemi sırasında uygun parametrelerin ve kalite kontrol önlemlerinin uygulanması önemlidir [30].

2.3.1.2. TIG kaynağı

TIG (Tungsten Inert Gas) kaynağı, alüminyum ve alaşımlarının kaynağında yaygın olarak kullanılan bir başka kaynak yöntemidir. TIG kaynağı, bir tungsten elektrot ve inert bir gaz (genellikle argon) kullanarak gerçekleştirilir. Bu yöntemde, bir tungsten elektrot ile kaynak bölgesinde bir ark oluşturulur. Ark, tungsten elektroda uygulanan yüksek voltaj ve akım ile oluşur. Kaynak işlemi sırasında, inert gaz, kaynak bölgesini atmosferden izole ederek oksidasyonu önler ve ergimiş metalin hızlı soğumasını sağlar. TIG kaynağı, alüminyum ve alaşımlarının yüksek kaliteli kaynaklarının elde edilmesine olanak tanır. Bu yöntemle ince malzemelerin hassas kaynakları yapılabilir. Ayrıca, TIG kaynağı, özellikle estetik açıdan önemli olan uygulamalarda temiz ve düzgün kaynak

dikişleri elde etmek için tercih edilir. TIG kaynağı, yüksek hassasiyet, düşük sıcaklık deformasyonu, düşük kaynak artığı ve daha az kusurlu kaynaklar gibi avantajlar sunar. Ancak, TIG kaynağı, diğer kaynak yöntemlerine kıyasla daha yavaş bir işlemdir ve daha fazla deneyim ve beceri gerektirebilir.

Bu nedenle, TIG kaynağı alüminyum ve alaşımlarının kaynağında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir, özellikle hassas ve estetik açıdan önemli uygulamalarda tercih edilir.

2.3.1.3. MIG kaynağı

MIG (Metal Inert Gas) kaynağı, alüminyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılan bir başka yaygın kaynak yöntemidir. MIG kaynağı, elektrik arkı oluşturarak metal parçalarını birleştirmek için kullanılan bir sürekli tel elektrot ve bir inert gaz kullanır. Bu yöntemde, bir sürekli tel elektrot kaynak tabancasından beslenir ve kaynak bölgesine beslenen elektrik arkı ile erir. Aynı anda, kaynak tabancasından çıkan inert gaz (genellikle argon) kaynak bölgesini atmosferden izole eder ve oksidasyonu önler. MIG kaynağı, hızlı ve verimli bir kaynak yöntemidir. Sürekli tel elektrotun kullanımı, sürekli kaynak sağlar ve kaynak hızını artırır. Bu yöntemle daha kalın malzemelerin kaynağı kolaylıkla yapılabilir. Alüminyum ve alaşımlarının MIG kaynağı, düzgün ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ancak, alüminyumun yüksek ısıl iletkenliği ve termal genleşme katsayısı nedeniyle, uygun ekipman ve parametrelerin kullanılması önemlidir. Özellikle alüminyum kaynaklarında doğru gaz karışımı ve akım ayarları önemlidir. MIG kaynağı, genellikle endüstriyel uygulamalarda, otomotiv sektöründe ve büyük ölçekli kaynak işlemlerinde tercih edilir. Hızlı ve verimli bir kaynak sağlar ve genellikle diğer kaynak yöntemlerine kıyasla daha kolay bir uygulama sunar. Ancak, MIG kaynağı, bazı durumlarda daha fazla kaynak artığı ve daha az estetik dikişlerle sonuçlanabilir. Ayrıca, daha ince malzemelerin hassas kaynaklarında TIG kaynağı tercih edilebilir.

Özetlemek gerekirse, MIG kaynağı alüminyum ve alaşımlarının hızlı ve verimli bir şekilde kaynağı için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Doğru ekipman ve parametrelerin kullanılması önemlidir ve genellikle endüstriyel uygulamalarda tercih edilir.

2.3.1.4. Oksi-Asetilen kaynağı

Oksi-Asetilen kaynağı, oksijen ve asetilen gazlarının kullanılarak yapılan bir kaynak yöntemidir. Bu yöntem, alüminyum ve alaşımlarının yanı sıra diğer metallerin de kaynağında kullanılabilir. Oksi-Asetilen kaynağı, oksijen ve asetilen gazlarının birleşiminden oluşan bir alevle metal parçaların birleştirilmesini sağlar. Oksijen, kaynak bölgesindeki metali oksitleyerek eritme işlemini gerçekleştirir, asetilen ise yakıcı bir alev sağlar. Bu yöntemde, bir oksijen ve asetilen gazı kaynak aleti kullanılır. Oksijen ve asetilen gazları ayrı basınç regülatörleri ve hortumlarla kaynak aletine bağlanır. Gazlar birleşerek bir karışım oluşturur ve kaynak alevi oluşturulur. Kaynak alevi, metali eriterek birleştirme işlemini gerçekleştirir. Oksi-Asetilen kaynağı, özellikle ince ve hassas kaynak işlemlerinde tercih edilir. Bu yöntemle düşük sıcaklıkta kaynak yapılabilir ve daha hassas kontrol sağlanabilir. Oksi-Asetilen kaynağı, alüminyumun yüksek ısı iletkenliği ve termal genleşme katsayısı gibi özelliklerini dikkate alır. Ancak, Oksi-Asetilen kaynağı diğer kaynak yöntemlerine kıyasla daha zahmetli ve daha yavaş bir işlemdir. Gaz tüplerinin taşınması ve güvenli kullanımı gerektirir. Ayrıca, doğru gaz oranı ve ayarlamalarının yapılması önemlidir.

Özetlemek gerekirse, Oksi-Asetilen kaynağı alüminyum ve diğer metallerin kaynağında kullanılan bir yöntemdir. Hassas ve ince kaynak işlemlerinde tercih edilir. Ancak, diğer kaynak yöntemlerine kıyasla daha zahmetli ve yavaş bir işlemdir. Doğru gaz oranları ve ayarlamaları önemlidir.

2.3.1.5. Plazma kaynağı

Plazma kaynağı, yüksek sıcaklıklarda bir plazma arkı oluşturarak metal parçaların birleştirilmesi işlemidir. Bu yöntem, alüminyum ve alaşımlarının yanı sıra diğer metallerin de kaynağında kullanılabilir. Plazma kaynağı, bir plazma kaynak makinesi kullanılarak gerçekleştirilir. Bu makine, inert bir gaz (genellikle argon) kullanarak bir plazma arkı oluşturur. Plazma, gazın yüksek bir sıcaklıkta iyonize olması sonucu oluşan yüklü parçacıklardan oluşan bir gaz halidir. Plazma arkı, yüksek sıcaklıkta ve yoğunlukta bir enerji kaynağı sağlar. Metal parçalar plazma arkının etkisiyle erir ve birleşir. Plazma arkı, metal parçalar arasındaki bağlantıyı güçlendirir ve yüksek kaliteli kaynak

birleştirmeleri sağlar. Plazma kaynağı, yüksek hassasiyet gerektiren ve ince parçaların kaynağında tercih edilir. Bu yöntemle hassas kontrol sağlanabilir ve daha az deformasyon oluşur. Ayrıca, yüksek hızda kaynak yapılabilir.

Plazma kaynağı, genellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Özellikle otomotiv, havacılık, gemi inşaatı ve metal imalat sektörlerinde yaygın olarak kullanılır. Alüminyum ve alaşımlarının yanı sıra paslanmaz elik ve bakır gibi metallerin kaynağında da etkilidir. Plazma kaynağı, diğer kaynak yöntemlerine kıyasla daha karmaşık ve pahalı bir işlemdir. Özel ekipman ve uzmanlık gerektirir. Ayrıca, gaz tüketimi ve gaz akışının doğru ayarlanması önemlidir.

Özetlemek gerekirse, plazma kaynağı, yüksek sıcaklıklarda plazma arkı kullanarak metal parçaların birleştirilmesini sağlayan bir yöntemdir. Hassas ve ince parçaların kaynağında tercih edilir. Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Ancak, diğer kaynak yöntemlerine kıyasla daha karmaşık ve pahalı bir işlemdir. Uzmanlık gerektirir ve doğru gaz ayarlamaları önemlidir.

2.3.1.6. Lazer kaynağı

Lazer kaynağı, yoğunlaştırılmış bir lazer ışını kullanarak metal parçaların birleştirilmesi işlemidir. Bu yöntem, alüminyum ve alaşımlarının yanı sıra çeşitli metallerin kaynağında kullanılabilir. Lazer kaynağı, bir lazer kaynak makinesi aracılığıyla gerçekleştirilir. Lazer ışını, yoğunlaştırılmış bir enerji kaynağı olarak kullanılır. Lazer ışını, metal parçalar üzerinde odaklanmış bir nokta oluşturur ve bu noktada yoğun bir ısı meydana getirir. Bu yoğun ısı, metal parçaların yüzeyini eritir ve birleştirir. Lazer kaynağı, hassas bir kontrol sağlayarak yüksek kaliteli kaynak birleştirmeleri elde etmeyi mümkün kılar. Ayrıca, hızlı ve verimli bir kaynak işlemi sunar. Lazer kaynağı, diğer kaynak yöntemlerine kıyasla çeşitli avantajlara sahiptir. İnce ve hassas kaynak işlemleri için uygundur. Deformasyonu minimize eder ve daha az termal etkilenme sağlar. Ayrıca, kaynak bölgesinde az miktarda cüruf oluşur. Lazer kaynağı, genellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Otomotiv, havacılık, elektronik ve hassas makineler gibi sektörlerde sıkça tercih edilir. Alüminyum gövdeler, hassas parçaların birleştirilmesi, boru kaynakları gibi birçok uygulamada kullanılabilir. Lazer kaynağı, özel ekipman gerektiren ve uzmanlık gerektiren bir işlemdir.

Lazer kaynak makineleri yüksek maliyetli olabilir. Ayrıca, kaynak işlemi sırasında dikkatli bir şekilde odaklanma ve pozisyon kontrolü gerektirir.

Özetlemek gerekirse, lazer kaynağı, yoğunlaştırılmış bir lazer ışını kullanarak metal parçaların birleştirilmesini sağlayan bir yöntemdir. Hassas ve ince kaynak işlemleri için uygundur. Endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılır ve çeşitli avantajlara sahiptir. Ancak, özel ekipman ve uzmanlık gerektirir ve yüksek maliyetli olabilir.

2.3.1.7. Elektron ışın kaynağı

Elektron ışın kaynağı, elektron ışınlarının kullanıldığı bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, yüksek enerjili elektron ışınları metal parçaların birleştirilmesi için kullanılır. Elektron ışın kaynağı genellikle vakum ortamında gerçekleştirilir. Elektron tabancası adı verilen bir cihaz, yüksek gerilim uygulayarak elektronları hızlandırır ve odaklanmış bir ışın oluşturur. Bu elektron ışını, metal parçaların birleştiği noktaya yönlendirilir. Elektron ışını, metal parçaların yüzeyini eriterek ve birleştirerek kaynağı gerçekleştirir. Elektronlar, yüksek hızları ve enerjileri nedeniyle malzemenin içine nüfuz eder ve sıcaklık kontrolüyle birlikte birleşmeyi sağlar. Elektron ışın kaynağı, yüksek hassasiyet ve kontrol sağlar. Metal parçaların erimesi ve birleşmesi hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleşir. Ayrıca, malzemenin termal etkilenmesi ve deformasyonu minimum seviyede olur. Bu yöntem, alüminyum ve alaşımlarının yanı sıra birçok farklı metalin kaynağında kullanılabilir. Elektron ışın kaynağı, havacılık, otomotiv, uzay endüstrisi ve elektronik gibi birçok sektörde tercih edilen bir yöntemdir. Elektron ışın kaynağı, özel ekipman gerektiren ve uzmanlık gerektiren bir işlemdir. Vakum ortamı ve yüksek gerilim uygulaması gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Ayrıca, yüksek maliyetli bir yöntem olabilir.

Özetlemek gerekirse, elektron ışın kaynağı, elektron ışınlarının kullanıldığı bir kaynak yöntemidir. Yüksek hassasiyet, hızlı birleştirme ve minimum deformasyon gibi avantajları vardır. Alüminyum ve diğer metallerin birleştirilmesinde kullanılır. Ancak, özel ekipman ve uzmanlık gerektirir ve yüksek maliyetli olabilir.

2.3.2. Katı hal kaynak yöntemleri

2.3.2.1. Sürtünme kaynağı

Sürtünme kaynağı, iki parçanın birbirine sürtünerek kaynağının oluşturulduğu bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, biri sabit diğeri hareketli olan iki silindirik parçanın alın yüzeyleri, eksenel basınç uygulanarak birbirine sürtünür. Bu sürtünme işlemi sonucunda sürtünme ısısı oluşur ve parçalar birleşir.

Sürtünme kaynağında kullanılan önemli parametreler şunlardır:

Devir sayısı: Hareketli parçanın dönüş hızıdır ve sürtünme kaynağı sürecindeki hızı etkiler.

Sürtünme süresi: Parçaların sürtünme işlemi altında birleşme süresidir. Bu süre, kaynağın kalitesini etkileyen önemli bir faktördür.

Sürtünme basıncı: İki parçanın birbirine uygulanan basınçtır. Bu basınç, parçaların sıkışması ve birleşmesi için gereklidir.

Yığılma süresi: Sürtünme işlemi sonucunda oluşan kaynak bölgesinin soğuması ve stabilize olması için verilen süredir.

Yığılma basıncı: Yığılma süresi boyunca kaynak bölgesine uygulanan basınçtır. Bu basınç, kaynak bölgesinin sağlamlaşmasını sağlar.

Sürtünme kaynağı uygulanmadan önce, kaynak yapılacak malzemelerin yüzeylerinin yağ, pas ve kir gibi unsurlardan arındırılması önemlidir. Bu, kaynak kalitesi açısından büyük bir öneme sahiptir.

Sürtünme kaynağı, normalde kaynak işlemi uygulanamayan yüksek mukavemetli ısıl işlem kabul eden alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde kullanılabilir. Bu yöntemde, malzemelerin ergimesi için enerjiye ihtiyaç duyulmadığından maliyet ve işçilikten tasarruf sağlanır. Ayrıca, kaynak bölgesi tamamen sünektir, yani mukavemette bir kayıp oluşmaz. Bu nedenle, sürtünme kaynağı alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi için etkili bir yöntemdir.

2.3.2.2. Difüzyon kaynağı

Difüzyon kaynağı, bir katı hal birleştirme kaynağı yöntemidir. Bu yöntemde, eşleştirilmiş aynı veya farklı iki malzemenin ergime sıcaklıklarının altında bir sıcaklıkta, malzemelerde tespit edilebilir plastik akma oluşturmayacak bir basınç altında bir süre boyunca tutulmasıyla kaynağın oluşturulması sağlanır. Bu yöntemde hedef, malzemeler arasında metalik bir bağ oluşmasını sağlamaktır.

Difüzyon kaynağı, King ve Tanuma tarafından önerilen difüzyon mekanizması üzerine kuruludur ve üç aşamadan oluşur:

Birinci aşama: Bu aşamada, plastik deformasyon ve sürünme kullanılarak malzemeler arasındaki yüzey teması artırılır. Bu, malzemelerin daha iyi bir şekilde birbirine oturmasını sağlar.

İkinci aşama: İlk aşamada tam olarak yok edilemeyen arakesit boşlukları, difüzyon yoluyla ortadan kaldırılır. Bu aşamada, tane sınırı difüzyonu olarak adlandırılan bir mekanizma hakimdir. Bu mekanizma, malzemeler arasında atomların hareket etmesini ve bağ oluşturmalarını sağlar.

Üçüncü aşama: Bu aşamada, difüzyon süreci tamamlanır ve malzemeler arasında istenilen metalik bağ oluşur. Bağın gücü ve kalitesi, malzemelerin özelliklerine, difüzyon süresine ve sıcaklık koşullarına bağlı olarak değişir.

Difüzyon kaynağı yöntemi, benzer veya farklı malzemelerin birleştirilmesinde kullanılır ve genellikle yüksek sıcaklık ve basınç altında gerçekleştirilir. Bu yöntem, homojen ve güçlü bir bağ oluşturabilme yeteneğiyle bilinir. Difüzyon kaynağı, özellikle malzemelerin ergime noktaları arasında büyük bir fark olduğunda veya diğer kaynak yöntemlerinin uygulanamadığı durumlarda tercih edilen bir yöntemdir.

2.3.2.3. Direnç kaynağı

Direnç kaynağı, metal parçalar arasından geçen elektrik akımının parçaların gösterdiği dirençten kaynaklanan ısı ve aynı zamanda uygulanan basınç ile yapılan bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, elektrik akımının geçtiği malzeme direnç gösterir ve bu direncin neden olduğu ısı kaynak bölgesinde oluşur. Kaynak işlemi için basınç, kaynak makinesindeki elektrotlar veya çeneler aracılığıyla uygulanır.

Direnç kaynağında, malzemedan geçen elektrik akımı haricinde başka bir ısı kaynağı kullanılmaz. Isı, kaynak yapılacak bölgedeki direnç nedeniyle oluşur ve aynı zamanda uygulanan basınçla birleşme sağlanır.

Bazı alüminyum alaşımları, diğer kaynak yöntemlerine kıyasla direnç kaynağıyla daha kolay bir şekilde kaynatılabilir. Genellikle diğer kaynak işlemleriyle birleştirilebilen döküm alaşımları, direnç kaynağıyla da

birleştirilebilir. Sürekli döküm ve kum döküm alaşımları başarıyla nokta kaynağı yapılabilirken, kalıp dökümlerin bu yöntemle birleştirilmesi daha zor olabilir.

Yüksek mukavemetli alaşımlar olan 2024 ve 7075 alaşımları genellikle kolaylıkla direnç kaynağıyla kaynatılabilirler, ancak daha düşük mukavemetli alaşımlara kıyasla çatlak ve gözenek oluşma eğilimleri daha fazladır. Kaynak metalindeki çekme çatlakları genellikle bakır ve çinko içeren alaşımlara özgüdür (örneğin 2024 ve 7075 alaşımları).

Direnç kaynağı, hızlı, verimli ve otomatik bir kaynak yöntemidir. Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır ve genellikle yüksek hızlı seri üretim gerektiren alanlarda tercih edilir.

2.3.2.4. Ultrasonik kaynak

Ultrasonik kaynak yönteminde, birleştirilecek parçalar, hareketli bir ultrasonik frekansla titreşen sonotrot (kaynak başlığı) ile sabit duran bir altlık arasına yerleştirilir ve hafif bir kuvvetle bastırılır. Sonotrot tarafından oluşturulan ultrasonik titreşimler, yüzeye paralel olarak üstteki parçaya iletilir ve temas yüzeylerinde, yani alt ve üst kaynak noktalarında bağlantıya yol açacak bir relatif hareket oluşturur. Ultrasonik dikiş kaynağında, bindirilen levhalar, dönen tekerlek şeklindeki sonotrotlar tarafından senkronize edilen altlık makaralarına bastırılır. Tekerlek şeklindeki sonotrotların levha titreşimleri, üstteki parçaya iletilir.

Ultrasonik kaynak yöntemi, metal-cam birleştirmesi gibi farklı malzemelerin birleştirilmesinde kullanılabilir. Örneğin, alüminyum ve altın kaplamalı cam arasında birleştirme yapılabilir. Bu yöntemle 0,004 ila 1 mm kalınlığındaki metaller kaynatılabilir. Aynı zamanda çok ince malzemeleri kalın malzemelerle birleştirme kolaylığı sağlar. Kaynak sonucunda deformasyon oluşmaz ve kaynak bölgesinde çarpılma meydana gelmez.

Alaşımlar genel olarak sünek saf metallerle kıyaslandığında ultrasonik kaynak yöntemiyle daha zor bir şekilde birleştirilebilirler. Ancak, uygun parametrelerin kullanılmasıyla alaşımlar da başarılı bir şekilde ultrasonik kaynakla birleştirilebilir.

Ultrasonik kaynak, hızlı, otomatik ve hassas bir kaynak yöntemidir. Yüksek frekanslı titreşimlerle birleştirme sağladığından, genellikle küçük parçaların, plastiklerin ve elektronik bileşenlerin birleştirilmesinde tercih edilir.

3. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

1991 yılında Wayne Thomas tarafından icat edilen Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding - SKK), malzemelerin birleştirilmesi için dönen bir pim tarafından üretilen sürtünme ısını kullanan bir katı hal birleştirme işlemidir. Bu yöntemde, birleştirilecek malzemeden daha sert bir malzemeden yapılmış bir tükenmez pim kullanılır. SKK işlemi, malzemelerin ergime noktasına gelmeden katı halde birleştirilmesini sağlar. Kaynak yapılacak malzemeler, kaynak hattında pim tarafından döndürülerek ve pim ilerletilerek birleştirme gerçekleştirilir. Pimin dönme ve ilerleme hareketi, malzemeler arasında sürtünme ve plastik deformasyona neden olur. Bu sürtünme ve plastik deformasyon, malzemelerin akışını ve birleşmesini sağlar [37].

SKK yöntemi, ark kaynağına kıyasla çeşitli avantajlar sunar. Daha düşük ısı girdisi nedeniyle malzemelerin termal etkilenimi en aza indirgenir, böylece distorsiyon ve deformasyon azalır. Ayrıca, kaynak bölgesinde gözeneklerin oluşma olasılığı düşüktür. Bu yöntem, farklı alaşımlara ve malzemelere sahip parçaların birleştirilmesinde de kullanılabilir. SKK yöntemi, özellikle alüminyum ve alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, çelik, bakır ve magnezyum gibi diğer metallerin birleştirilmesinde de başarılı sonuçlar elde edilebilir. Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK), endüstriyel uygulamalarda geniş kabul gören bir birleştirme yöntemi olmuştur ve gelecekte daha da yaygınlaşması beklenmektedir [38].

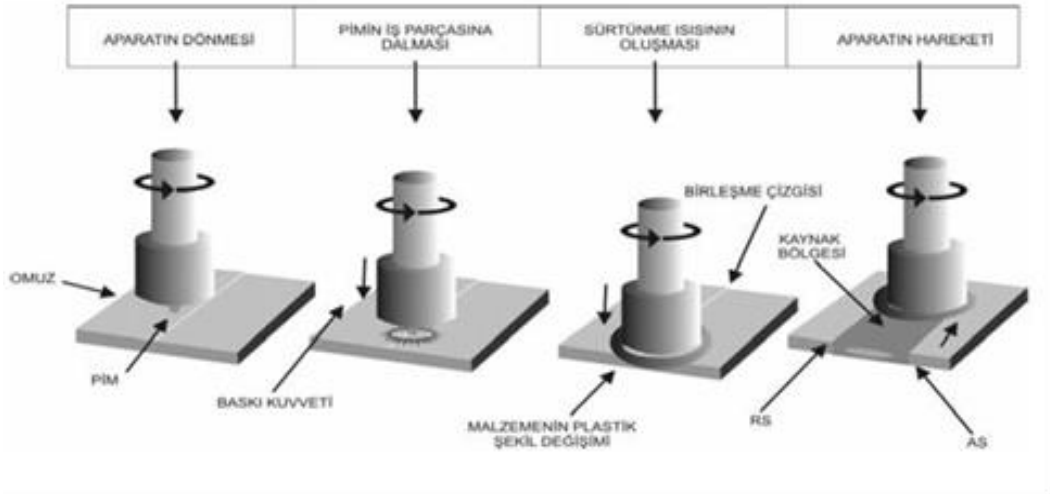
3.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulanma Prensibi

Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSW) işleminde kullanılan pim, omuz ve karıştırıcı uçtan oluşur (Şekil 3.1). Belirli bir hızda dönen pim, iki metal plakanın kesiştiği noktadan başlayarak ilerletilir. Pim, destek plakasına sıkıca sabitlenmiştir. İşlemin başlangıcında, plakaların üst yüzeyi omuz yüzeyiyle temas eder ve sürtünme oluşur. Bu sürtünme, omuzda ısınmaya ve kaynak yapılacak malzemenin yumuşamasına neden olur. Metalin plastik deformasyonu, kaynak hattı boyunca birleştirme bölgesinde gerçekleşir. Pim,

kesişim bölgesinde karıştırma hareketi yaratır ve ardından metalin ilerleyen taraftan geri çekilme tarafına doğru transferini sağlar. Bu karıştırma ve transfer işlemi, plakaların birleşmesini sağlar. Sürtünme Karıştırma Kaynağı işlemi, birleştirme sırasında malzemelerin ergime noktasına gelmemesini sağlayarak katı halde birleşme sağlar. Aşama aşama sürtünme karıştırma kaynağı işlemi Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bu şekilde, pim ve karıştırıcı uçun hareketlerini ve kaynak işleminin nasıl gerçekleştiğini daha iyi anlayabiliriz.



Şekil 3.1. Sürtünme karıştırma kaynak işlemi [39].



Şekil 3.2. Sürtünme karıştırma kaynağı şematik gösterimi modeli [40].

Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SSK), birçok avantaja sahip olan bir birleştirme yöntemidir. İşte sürtünme karıştırma kaynağının bazı avantajları:

- Yüksek Mekanik Dayanım: SSK, kaynak bölgesinde mükemmel bir moleküler birleşme sağlar, bu da yüksek mekanik dayanım ve mukavemet sağlar. Kaynaklı bölgeler, genellikle ana malzemeden daha yüksek dayanıma sahip olabilir.
- Ergime Olmaması: SSK, malzemeleri eritmeden birleştirir. Bu, malzemelerin mikro yapılarının korunmasına ve ısıya duyarlılığı olan malzemelerin bile birleştirilmesine olanak sağlar.
- Distorsiyonun Azalması: SSK, düşük ısı girdisi nedeniyle distorsiyona daha az eğilimlidir. Bu, birleştirilen parçaların şeklinin ve boyutunun daha iyi korunmasını sağlar.
- Yüksek Verimlilik: Sürtünme karıştırma kaynağı, hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir ve takımlar uzun süreli kullanıma dayanıklıdır. Bu, verimli ve sürekli bir üretim süreci sağlar.
- Düşük Hata Oranı: SSK, düşük hata oranıyla birleştirme sağlar. Kaynak bölgesinde genellikle gözenekler, çatlaklar veya porozite gibi hatalar meydana gelmez.
- Çevre Dostu: Sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak sırasında ek dolgu malzemesi veya koruyucu gaz kullanımını gerektirmez. Bu da işlemi çevre dostu kılar.
- Geniş Malzeme Yelpazesi: SSK, çeşitli metallerin birleştirilmesinde etkili bir yöntemdir. Alüminyum, çelik, titanyum, bakır gibi farklı alaşımlar ve metaller SSK ile başarılı bir şekilde birleştirilebilir.

Bu avantajlar, sürtünme karıştırma kaynağını birçok endüstride tercih edilen bir birleştirme yöntemi haline getirmektedir. Uçak, otomotiv, gemi yapımı, raylı taşımacılık ve diğer birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SSK), birçok avantaja sahip olsa da bazı dezavantajlara da sahiptir. İşte sürtünme karıştırma kaynağının bazı dezavantajları:

- Yüksek Ekipman Maliyeti: Sürtünme karıştırma kaynağı için kullanılan ekipmanlar, diğer kaynak yöntemlerine göre daha karmaşık ve

maliyetlidir. Özellikle büyük ölçekli üretimlerde yüksek maliyetler gerekebilir.

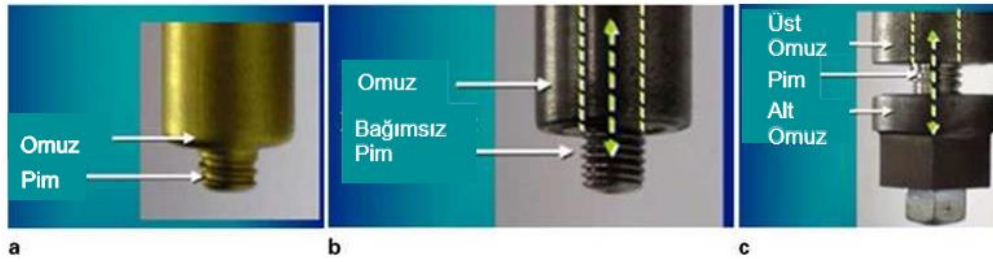
- Sınırlı Birleştirme Derinliği: SSK yöntemi, sınırlı birleştirme derinliği ile sınırlıdır. Derin kaynaklarda zorluklar yaşanabilir ve daha fazla işlem adımı gerekebilir.
- İnce Levhalarda Zorluklar: Sürtünme karıştırma kaynağı, ince levhalarda uygulanması zor olabilir. Levha kalınlığı, işlem parametrelerini ve uygulanabilirliği etkileyebilir.
- Sınırlı Geometrik Esneklik: SSK, karmaşık geometrilere sahip parçaların birleştirilmesinde sınırlamalara sahip olabilir. Özellikle iç bölgelerde veya dar alanlarda uygulanması zor olabilir.
- Yüzey Hazırlığı Gerekliği: SSK işlemi için malzemelerin temiz ve düzgün bir yüzeye sahip olması gereklidir. Yüzey hazırlığı ve düzgünlüğü, kaynak kalitesini etkileyebilir.
- İşlem Sıcaklığına Duyarlı Malzemelerde Zorluklar: Bazı malzemeler, sürtünme karıştırma kaynağı sırasında yüksek sıcaklıklara maruz kalabilir veya ısıya duyarlı olabilir. Bu durumda, işlem parametrelerinin dikkatlice kontrol edilmesi ve uygun önlemlerin alınması gerekebilir.
- Tamir ve Geri Dönüşüm Zorlukları: SSK işlemi sonrasında kaynak bölgesinde değişiklik yapmak veya geri dönüşüm işlemi uygulamak zor olabilir. Bu durum, tamirat veya geri dönüşüm gerektiren uygulamalarda dezavantaj olabilir.

Bu dezavantajlar, sürtünme karıştırma kaynağının bazı uygulamalarda sınırlamalara sahip olabileceğini göstermektedir. Ancak, bu dezavantajlar, sürtünme karıştırma kaynağının birçok avantajına kıyasla daha az önemli olabilir ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak yöntemin tercih edilebilirliği değişebilir.

3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlar

Makara tipi takım ise omuz ve pimin birleştirildiği silindirik bir yapıya sahiptir ve pim kaynak sırasında dönerek malzeme akışını sağlar (Şekil 3.3). Makara tipi takımlar, daha esnek bir şekilde kullanılabilir ve daha geniş bir kaynak yüzeyine

sahip parçaların birleştirilmesine olanak tanır. Pimlerin aşınması veya hasar görmesi durumunda kolayca değiştirilebilirler. Takım geometrisi, sürtünme karıştırma kaynağının başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için önemlidir. Takımın doğru tasarlanması ve uygun malzemeden imal edilmesi, malzeme akışının kontrolünü sağlar ve istenilen kaynak kalitesini elde etmeye yardımcı olur. Ayrıca takımın dayanıklılığı ve değiştirilebilirliği, sürtünme karıştırma kaynağı işleminin verimliliğini etkileyen faktörlerdir. Takım geometrisi, sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarında optimize edilerek daha iyi performans elde edilebilir. Araştırmalar ve geliştirmeler, farklı takım tasarımlarının kullanılmasıyla sürtünme karıştırma kaynağının daha geniş malzeme yelpazesine uygulanabilmesini ve daha verimli sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.3. Karıştırıcı takım tipleri a- sabit pim, b- ayarlanabilir pim, c- makara tipi pim [41].

3.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Omuz ve Pim Şekilleri

3.3.1. Omuz şekilleri

Takım geometrisi sürtünme karıştırma kaynağı işleminin başarısı için kritik bir faktördür. Omuz yüzeyinin şekli ve uç özellikleri, malzeme akışını ve kaynak kalitesini etkileyen önemli faktörlerdir. Şekil 3.4'te gösterilen omuz şekilleri ve özellikleri, farklı tasarım seçeneklerini temsil etmektedir.

Düz omuz yüzeyi: En basit tasarıma sahip olan düz omuz yüzeyi, malzeme akışını etkin bir şekilde kontrol etmekte yetersiz olabilir ve çapak oluşumuna yol açabilir.

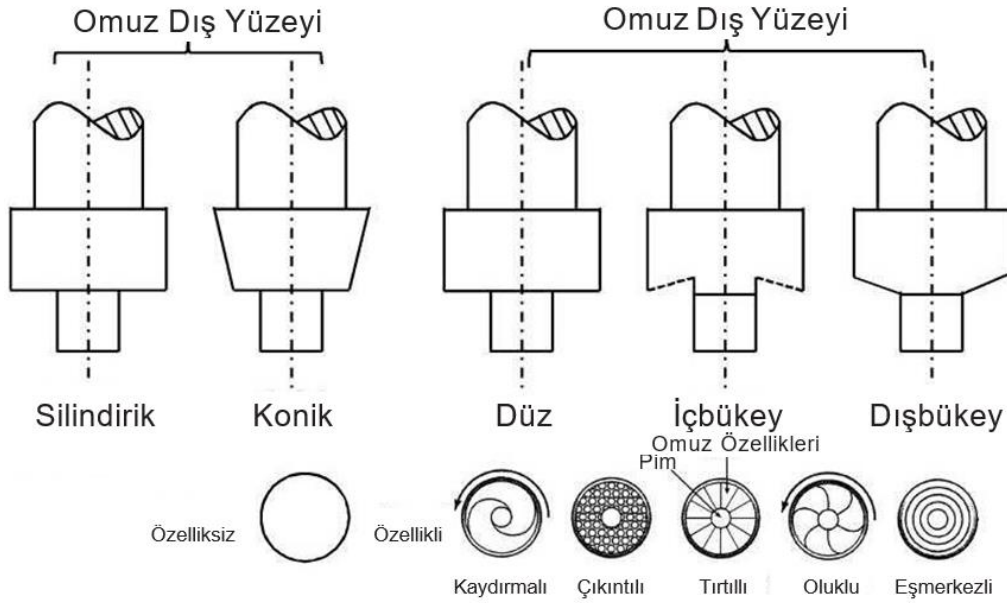
İçbükey omuz yüzeyi: İçbükey omuz yüzeyi, düz omuz yüzeyine göre daha fazla kontrol sağlar. Pimle birlikte hareket eden malzeme omuz boşluğunda birikir ve

çıkış hacmi olarak görev yapar. Bu tasarım, malzeme akışını daha iyi yönetir ve çapak oluşumunu azaltır.

Dışbükey omuz yüzeyi: İlk denemelerde başarısızlıkla sonuçlanan dışbükey omuz yüzeyi, malzemenin pimden uzaklaşmasına neden olabilir ve istenmeyen sonuçlara yol açabilir.

Omuz ucu biçimleri ise farklı uygulamalarda kullanılan takım özelliklerini temsil eder. Bunlar arasında pürüzsüz veya özelliksiz, salyangoz şekilli, çıkıntılı, tırtıl, oluklu ve eş merkezli daireler gibi çeşitli özellikler bulunur. Bu özellikler, içbükey, düz veya dışbükey omuz uçlarına uygulanabilir ve malzeme akışını ve kaynak kalitesini etkileyebilir.

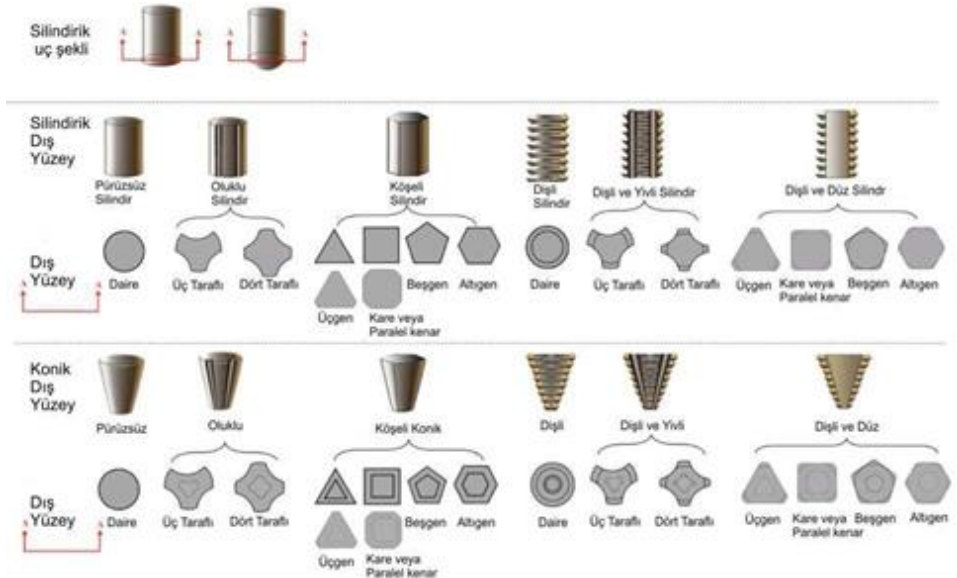
Takım geometrisinin doğru şekilde tasarlanması, malzeme akışının kontrolünü sağlamak ve istenilen kaynak kalitesini elde etmek için önemlidir. Deneyler ve optimizasyon çalışmaları, farklı takım geometrisi seçeneklerinin kullanılmasıyla sürtünme karıştırma kaynağı işleminin performansını artırabilir ve daha kaliteli kaynaklar elde etmeye yardımcı olabilir [45].



Şekil 3.4. Omuz şekilleri ve özellikleri [41].

3.3.2. Pim şekilleri

Sürtünme karıştırma pimi, iş parçasının yüzeylerini keserek parçayı iş parçasının arka tarafına taşıma işlevi gören bir parçadır. Pimler genellikle düz veya kubbe şeklinde olabilir (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. SKK'da kullanılan karıştırıcı takım pimleri [41].

Düz pimler: Düz pimler en yaygın pim şeklidir ve üretimi kolaydır. Ancak iş parçasına dalma sırasında yüksek şekil verme kuvveti gerektirdiği için dezavantajları da vardır.

Kubbe pimler: Kubbe şeklindeki pimler, iş parçasına dalarken oluşacak şekil verme kuvvetini azaltabilir, takım aşınmasını azaltabilir ve bölgesel gerilme birikimini azaltarak takım ömrünü artırabilir.

Pimler genellikle silindirik veya konik dış yüzeye sahip olabilir.

Silindirik pimler: Silindirik pimler, özellikle 12 mm kalınlığa kadar olan iş parçalarının birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılır. Kalın levhalarda ise kaynak bütünlüğünü korumak için ilerleme hızı düşürülerek yüksek devir sayılarında çalışılır. Silindirik pimlerin kullanılması işlem parametrelerini sınırlayabilir.

Konik pimler: Konik pimler, daha yüksek sürtünme ısısı ve geniş temas alanı nedeniyle plastik deformasyonu artırır. Ayrıca kaynak bölgesinde yüksek hidrostatik basınç oluşturur, bu da malzemenin karışmasını ve kaynak bütünlüğünü sağlamak için önemlidir. Ancak bu yüksek sıcaklık ve hidrostatik basınç, takım aşınmasını artırabilir.

Pimlerin dış yüzeyleri farklı şekillerde olabilir, dişli, düz veya yivli gibi. Düz pimler genellikle yüksek mukavemetli veya aşındırıcı alaşımlar için tercih edilirken, dişli pimlerde dişlerin kolayca aşınması nedeniyle dikkatli

seçilmelidir. Tüm bu faktörler, sürtünme karıştırma kaynağı işlemi sırasında pim tasarımının önemini vurgular. Doğru pim seçimi ve tasarımı, iş parçasıyla etkileşimi optimize ederek kaliteli bir kaynak elde etmeye yardımcı olur [34].

3.4. Kaynağın Metalurjik Yapısı

Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi sırasında, karıştırılmış bölgedeki yüksek sıcaklık ve yoğun plastik deformasyon, malzemede yeniden kristalleşme ve doku gelişimine neden olur. Bu süreçte, karıştırılmış bölge içinde ve etrafında irileşme ve çökelti oluşumu gerçekleşir. Şekil 3.6'de gösterildiği gibi, sürtünme karıştırma kaynağı işlemi sonucunda üç ayrı bölge tanımlanır:



Şekil 3.6. SKK'da makro yapısal bölgeler [43].

Karıştırılmış (kaynak) bölge: Bu bölge, en yoğun deformasyonun ve sıcaklığın olduğu bölgedir. Yüksek sıcaklık ve plastik deformasyon, malzemede yeniden kristalleşmeye ve doku gelişimine neden olur. Karıştırılmış bölgede, malzeme akışı ve karışımı gerçekleşir, taneler yeniden düzenlenir ve çökelti oluşabilir. Bu bölgede, malzeme özellikleri ve mikro yapı önemli ölçüde değişir.

Termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge (TEB): TEB, karıştırılmış bölgenin çevresinde yer alır. Bu bölge, karıştırılmış bölgeye yakın olan ancak daha düşük sıcaklık ve deformasyon seviyesine sahip olan bir bölgedir. TEB'de de malzeme yeniden düzenlenir, ancak karıştırılmış bölgedeki kadar yoğun olmayabilir. Bu bölgede de mikro yapı ve özellikler değişir.

Isıdan etkilenmiş bölge (IEB): IEB, kaynak işlemi sırasında yüksek sıcaklığa maruz kalan ancak plastik deformasyonun etkisiyle karıştırılmamış olan bölgedir. Bu bölge, malzemenin çevresindeki soğutma etkisiyle oluşur. IEB,

genellikle kararlı mikro yapıya sahip olabilir, ancak bazı termal dönüşümler ve çökelti oluşumu da gözlemlenebilir.

Bu üç bölge, sürtünme karıştırma kaynağı işlemi sonucunda malzemenin mikro yapısında ve özelliklerinde farklılıklar yaratır. Bu farklılıkların anlaşılması ve değerlendirilmesi, kaynaklı bağlantının kalitesini ve performansını belirlemek için önemlidir [42].

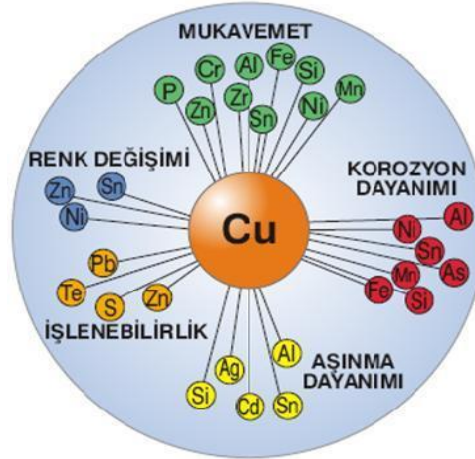
4. BAKIR VE ALAŞIMLARI

Bakır ve alaşımları, endüstride yaygın olarak kullanılan temel ticari metal gruplarındandır. Bakır, kimyasal simgesi "Cu" olan ve Kıbrıs adasından gelen Latince "cuprum" kelimesinden türetilen bir elementtir. Bakır ve birçok bakır alaşımı, yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapıya sahiptir. Saf bakır, ergime sıcaklığı 1084°C olan, oldukça yumuşak ve şekillendirilebilir bir metaldir. Saf bakırın çekme mukavemeti 221-455 MPa arasında değişirken, akma mukavemeti 69-365 MPa arasındadır. Yoğunluğu 8,968 g/cm³ olup, alüminyumun yoğunluğundan yaklaşık 3 kat daha fazladır. Saf bakırın elektrik iletkenliği, gümüşün elektrik iletkenliğine kıyasla biraz daha düşük olsa da, elektrik iletkenliği ve termal iletkenliği (398 W/mK) alüminyumdan yaklaşık 1-1,5 kat daha yüksektir. Bakırın elektrik iletkenliği, mühendislik metalleri ve alaşımlarının elektrik iletkenliklerinin %100 olarak kabul edildiği standart bir referans olarak belirlenmiştir. Bakır ve alaşımları genellikle manyetik özelliklere sahip değildir. Bakır ve alaşımları, mükemmel elektrik ve termal iletkenlikleri, üstün korozyon dirençleri, kolay üretilebilme özellikleri ve iyi mukavemet özellikleri ve yorulma direnci gibi özelliklerinden dolayı birçok endüstriyel uygulama alanında yaygın olarak kullanılırlar. Yüksek elektriksel ve termal iletkenlikleri, termal direnç, düşük geçirgenlik özellikleri ve özgün renk gibi diğer önemli özellikleri de mevcuttur. Saf bakır, elektrik ve elektronik endüstrisinde kablo ve tel yapımında, bağlantı parçalarında ve elektrik akışının istendiği birçok alanda sıklıkla kullanılır. Bakır ve alaşımları, çok iyi korozyon dirençleri nedeniyle içme suyu, tuzlu su, alkali çözeltiler ve birçok organik kimyasala karşı ideal malzemeler olarak su boruları, vana bağlantıları, ısı değiştiricileri, kimyasal ekipmanlar ve kayma yatakları gibi uygulamalarda kullanılır. Ancak bakır, sülfür ve amonyum bileşikleriyle reaksiyona girebilir. Özellikle amonyum hidroksit çözeltileri, bakır ve alaşımlarıyla hızlı bir şekilde reaksiyona girerek şiddetli bir korozyona neden olabilir [44].

4.1. Bakır ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Bakır, çeşitli elementler ve metallerle alaşım yapılabilen bir malzemedir. Saf bakırın alaşımlanması genellikle mukavemet artışı, korozyon direncinin artırılması, dövülebilirliğin iyileştirilmesi, dekoratif görünüm elde etme gibi amaçlarla gerçekleştirilir. Bakır alaşımlarında en yaygın olarak kullanılan elementler şunlardır: alüminyum (Al), arsenik (As), berilyum (Be), kadmiyum (Cd), krom (Cr), kobalt (Co), demir (Fe), kurşun (Pb), mangan (Mn), nikel (Ni), oksijen (O), fosfor (P), silisyum (Si), gümüş (Ag), kükürt (S), tellür (Te), kalay (Sn), çinko (Zn) ve zirkonyum (Zr). Bu elementler, bakır alaşımlarında farklı miktarlarda kullanılırlar.

Örneğin, alüminyum, nikel, silisyum, kalay ve çinko gibi elementler bakır alaşımlarında yüksek oranda bulunabilirken, demir, kurşun, fosfor gibi diğer elementler ise düşük miktarlarda ilave edilirler. Şekil 4.1, alaşım elementlerinin saf bakır üzerindeki etkilerini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 4.1. Bakıra ilave edilen alaşım elementleri etkisinin şematik olarak gösterimi [45].

Bu alaşım elementleri, bakırın özelliklerini değiştirerek istenilen özelliklere sahip alaşımlar elde edilmesini sağlar. Örneğin, alüminyum ilavesi bakırın mukavemetini artırırken, nikel ilavesi korozyon direncini artırabilir. Silisyum, bakırın döküm özelliklerini iyileştirirken, kalay ve çinko gibi elementler ise bakırın işlenebilirliğini artırabilir. Bu şekilde, alaşım elementlerinin dikkatli seçimi ve oranlamasıyla istenilen özelliklere sahip bakır alaşımları elde edilebilir.

4.1.1. Saf bakır

Saf bakırlar en az %99,3 oranında Cu (bakır) elementini içerir. Bakırın farklı tipleri arasında oksijensiz bakır, elektrolitik bakır, ateşte rafine edilmiş bakır ve deokside edilmiş fosfor bakır gibi çeşitler bulunur. Oksijensiz bakır, maksimum 10 ppm (parça başına milyon) oksijen içeren ve diğer alaşım elementlerinin toplamının minimum %0,01 olduğu bir bakır çeşididir (UNS C10100-C10800). Bu tür bakırların üretimi sırasında deoksidasyon elementleri kullanılmaz. Ancak bakır içindeki oksijen, yüksek sıcaklıklarda yapılan eritme işlemi sırasında atmosferden emilir. Oksijensiz bakır, homojen bir mikroyapıya sahip olması nedeniyle mükemmel süneklik özelliği gösterir ve ark kaynak yöntemleri ve sert lehimleme gibi işlemlerle kolaylıkla birleştirilebilir. Oksijensiz bakıra gümüş ilavesi yapılarak yüksek sıcaklıklarda mukavemet artışı sağlanabilirken, elektrik iletkenliğinde herhangi bir azalma olmadan mükemmel elektrik iletkenliği korunur [46-48].

4.1.2. Yüksek bakır içerikli alaşımlar

En fazla %5 alaşım elementi içeren bakır alaşımları mevcuttur ve genellikle kolay işlenebilir bakır ve çökelti-sertleştirmeli bakır olarak iki farklı tiptedir. Kolay işlenebilir bakırlar (UNS 14500-C14710), kurşun, tellür ve selenyum gibi elementleri içerir. Bakır, bu elementleri katı çözelti olarak düşük düzeyde çözebilir. Tellür ve selenyum, matris içinde ince ve uzun sert parçacıklar olarak bulunurken, kurşun ise matris boyunca ince ve ayrık partiküller şeklinde dağılım gösterir. Bu inklüzyonlar, bakırın süneklik özelliklerini azaltırken, işlenebilirlik özelliğini artırır. Ergitme kaynak yöntemleri bu bakır tipleri için tavsiye edilmez çünkü bu bakır alaşımları sıcak-kılmalara ve çatlaklara karşı hassastırlar. Kolay işlenebilir bakırlar genellikle lehimleme ve sert lehimleme yöntemleriyle birleştirilebilirler. Çökelti-sertleştirmeli bakırlar ise farklı alaşım elementlerinin çökelti olarak sertleştirdiği bir yapıya sahiptir. Bu tür bakırlar genellikle yüksek mukavemet ve sertlik gerektiren uygulamalarda kullanılır. Bakır alaşımları, farklı alaşım elementlerinin eklenmesiyle istenen özelliklere sahip malzemeler elde edilmesini sağlar. İşlenebilirlik, mukavemet, sertlik, korozyon direnci gibi özellikler, alaşım elementlerinin seçimi ve oranlamasıyla kontrol edilebilir.

4.1.3. Bakır-çinko alaşımları (pirinçler)

Bakır alaşımlarında, çinko (Zn) temel alaşım elementi olduğunda bu alaşımlar genellikle "pirinç" olarak adlandırılır. Çinko dışındaki diğer alaşım elementleri ise pirinçlerin belirli mekanik ve korozyon özelliklerini geliştirmek için eklenir. Mangan, kalay, demir, silisyum, nikel, kurşun ve alüminyum gibi elementler tek başına veya birlikte, nadiren %4'ü aşan oranlarda pirinçlere ilave edilir. Özel pirinçler arasında alüminyum pirinçleri ve kalay pirinçleri gibi bazı alaşımlar bulunur ve ikinci alaşım elementi ile adlandırılırlar.

Pirinçler dövme ve döküm yöntemleriyle üretilebilir. Ancak, döküm yoluyla üretilen pirinçler genellikle dövme pirinçler kadar homojen bir yapıya sahip değildir. Çinko ilavesiyle bakır alaşımına ergime sıcaklığı, yoğunluk, elektrik iletkenliği, termal iletkenlik ve elastik modül azalır. Bununla birlikte, çinko ilavesiyle mukavemet, sertlik, süneklik ve termal genleşme özellikleri artar. Pirincin sıcak işlem özellikleri, çinko içeriği arttıkça azalma eğilimi gösterir. Pirincin rengi, çinko içeriği arttıkça kırmızıdan sarıya doğru değişir. Bu nedenle, birleştirme sonrası yüzey görünümünün önemli olduğu uygulamalarda, pirinç malzemenin rengiyle uyumlu bir ilave metal seçimi yapılması önemlidir.

4.1.4. Bakır-kalay alaşımları (fosfor bronzları)

Bakır-kalay alaşımları genellikle %1-10 arasında kalay içerir. Bu alaşımlar aynı zamanda "fosfor bronzu" olarak da bilinir, çünkü döküm sırasında deoksidan olarak %0,03-0,04 arasında fosfor eklenir. Fosfor bronzları, dövme (UNS C50100-C52400) ve döküm alaşımları (UNS C90200-C91700) olarak elde edilebilir. Döküm bakır-kalay alaşımları, dövme alaşımlarına benzer, ancak çinko veya nikel eklenir ve %20'ye kadar yüksek oranlarda kalay içerir. Ayrıca kurşunlu bakır-kalay alaşımları (UNS C92200-C94500) da bulunur.

Bakır-kalay alaşımları dar bir plastik aralığa sahiptir ve 621-677°C sıcaklık aralığında sıcak işlem yapılır. %4'ten düşük kalay içeriğine sahip alaşımlar en iyi sıcak işlem özelliklerine sahiptir. Kurşunlu bakır-kalay alaşımları (UNS C53400 ve C54400), iyi işlenebilme özelliği için %2-6 arasında kurşun içerir. Bazı alaşımlar elektrik ark kaynağı ile kaynak edilebilirken, genel olarak kaynakla birleştirilmeleri önerilmez. Kurşun içeriğinin artması, kaynak kabiliyetini azaltır. Ayrıca, yüksek ön-tav sıcaklıklarından, yüksek ısı

girdisinden ve yavaş soğuma hızlarından kaçınılmalıdır. Gaz-altı kaynak yöntemleri, kaynakta gözenek oluşumuna neden olduğu için önerilmez. Köprü yatakları, bağlantı araçları, tutucular, kimyasal ekipmanlar ve tekstil makine parçaları, bu alaşımların uygulama alanlarına örnek olarak verilebilir.

4.1.5. Bakır-alüminyum alaşımları (alüminyum bronzları)

%3-5 arasında alüminyum içeren bakır alaşımlarına "alüminyum bronzları" (UNS C61300-C63000) denir. Ayrıca, farklı miktarlarda demir, nikel, mangan ve silisyum gibi elementleri de içerebilirler. Alüminyum bronzlarının iki farklı tipi vardır, metalurjik yapılarına ve ısı işlem gösterdikleri tepkiye göre ayrılırlar. İlk tip, %7'den az alüminyum içeren tek fazlı alaşımlardır ve bunlar sertleştirme işlemiyle sertleştirilemezler. İkinci tip ise çift fazlı bakır-alüminyum alaşımlarıdır. Her iki tipteki alaşımların elektrik ve ısı iletkenlikleri düşüktür ancak kaynak kabiliyetleri iyidir. Alüminyum bronzlarında alüminyum içeriği %8'in altında olduğunda, sıcaklıkla birleşme eğilimleri artar ve kaynakta yüksek gerilmeler varsa çatlaklar oluşabilir. Alüminyum bronzları genellikle pompa, vana, su bağlantı elemanları ve denizcilik uygulamalarında kullanılır.

4.1.6. Bakır-silisyum alaşımları (silisyum bronzları)

Bakır-silisyum alaşımları (UNS C64700, C66100, C87300-C87900) "silisyum bronzları" olarak bilinir. Yüksek mukavemet, mükemmel korozyon direnci ve iyi kaynaklanabilirlik özelliklerine sahip olmaları nedeniyle endüstriyel uygulamalar için önemli kabul edilirler. Dövme alaşımlar, %1,5-4 arasında silisyum içerir ve ayrıca %1,5 veya daha az miktarlarda çinko, kalay, mangan veya demir içerebilir. C87300 dışındaki döküm silisyum bronz alaşımları ise dökülebilirliği artırmak için yüksek miktarda (%4-30) çinko içerir.

Silisyum ilavesiyle bakırın çekme mukavemeti ve sertlik özellikleri artar. Silisyum bronzlarının sünekliği, silisyum ilavesiyle %1'e kadar azalır. %4 silisyum içeriğiyle maksimum süneklik elde edilir. Ancak, silisyum içeriğinin artmasıyla elektrik ve ısı iletim özellikleri azalır. Silisyum bronzlarında kaynak öncesi gerilim giderme ve istenilen sıcaklığa ulaşmak için yavaş bir şekilde ısınma gereklidir. Bu alaşımlar yüksek sıcaklıklarda sıcak-kürlenmeye tabi tutulabileceğinden, kritik sıcaklık aralığında hızlı bir şekilde soğutulmaları gerekmektedir. Demir ilavesiyle silisyum bronzlarının çekme mukavemeti ve

sertlik artar. Çinko ve kalay ilavesiyle ise alaşımanın ergime özelliği artar, döküm işlemi ve oksî-gaz yöntemiyle birleştirilebilme kalitesi iyileşir. Silisyum bronzları hidrolik basınç hatlarında, ısı eşanjörü borularında, denizcilik endüstrisinde kullanılan transmisyon millerinde, bağlantı elemanlarında, madeni aynalarda ve kimyasal işlem ekipmanlarında kullanılırlar.

4.1.7. Bakır-nikel alaşımları

Ticari bakır-nikel alaşımları (UNS C70100-C72950, C96200-C96900), %5-45 arasında değişen oranlarda nikel içerir. Kaynaklı imalatlarda kullanılan bu alaşımlar genellikle %10-30 arasında nikel ve düşük seviyelerde demir, mangan veya çinko elementleri içerir. Bakır-nikel alaşımlarının çoğu deoksidan element içermez. Bu nedenle, ergitme kaynak yöntemlerinde porozite oluşumunu engellemek için deoksidan özelliklere sahip ilave metallerin kullanılması gerekmektedir. Bakır-nikel alaşımları, nikel içeriğinin artışına göre orta derecede çekme mukavemeti gösterir. Bu alaşımlar sünek ve nispeten tok bir özellik sergilerken, elektrik ve ısı iletim özellikleri nispeten düşüktür. Ayrıca, sıcak ve soğuk şekillendirilebilme özellikleri iyi olduğundan levha, boru, tüp, çubuk gibi üretilmeye uygundur. Yaygın uygulama alanları buhar araçları, soğutucular ve ısı eşanjörleridir.

4.1.8. Bakır-nikel-çinko alaşımları

Bakır-çinko alaşımlarına nikel ilavesiyle, alaşıma gümüşümsü bir görünüm kazandırılır. Bu nedenle, bu alaşımlar dekoratif amaçlı uygulamalarda sıklıkla kullanılır. Nikel ilavesiyle alaşımanın mukavemeti ve korozyon direnci artmasına rağmen, bazı alaşımlar çinko kaybına maruz kalabilir ve gerilmeli korozyon çatlamasına karşı hassas hale gelebilir. Bakır-nikel-çinko alaşımları olarak da adlandırılan nikel-gümüş alaşımlarının (UNS C73200-C79900 ve C97300-C97800) iki farklı tipi vardır. Birincisi, nikel ve çinko ile birlikte %65 bakır içeren tek fazlı bir alaşımdır, diğeri ise bakır oranı %55-60 arasında değişen çift fazlı bir alaşımdır. Nikel-gümüş alaşımlarının yaygın uygulama alanları arasında metal eşyalar, bağlantı elemanları, optik ve kamera parçaları, asit depolama ürünleri ve mutfak eşyaları bulunur.

5. MALZEME VE METOD

5.1. Malzeme

Çalışmada 3 mm kalınlığa, 50 mm genişliğe ve 100 mm uzunluğa sahip %99,57 saflıkta AA1050 ve ticari olarak satılan %99,98 saf bakır levha kullanılmıştır. Birleştirilecek levhalar kaynak öncesi zımpara kâğıdı ile levha yüzeyindeki oksit tabakası temizlenmiştir. Pim omuz çapı 16 mm, pim uzunluğu 2,7 mm olan kare ve üçgen şeklindeki HSS Co10 uçlar universal freze tezgâhında, freze pensine bağlanarak 710, 900, 1120 dev/dak dönme hızı ve 16, 20 ve 25 mm/dk ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir.

Malzemeler ticari olarak temin edilmiştir. Malzeme sertifikaları üzerinden alınan verilere göre AA1050 malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 2.'de, saf bakır malzemeye ait kimyasal bileşim Tablo 3.' te, AA1050 ve saf bakırın mekanik özellikleri Tablo 4.'te verilmiştir.

Tablo 2. AA1050 malzemenin kimyasal bileşimi (ağırlık %)

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Cr ⁺³
99,57	0,121	0,236	0,001	0,002	0,001	0,023	0,007	0,001

Tablo 3. Saf bakır malzemenin kimyasal bileşimi (ağırlık %)

Cu	Si	P	S	Al	Ni	Zn	Fe
99,98	0,00135	0,00285	0,00139	0,00209	0,00212	0,00295	0,00408

Tablo 4. AA1050 ve saf bakırın mekanik özellikleri

Özellikleri	Birim	Cu	AA1050
Çekme Mukavemeti	MPa	269	124
Kopma Mukavemeti	MPa	190	70,15
Uzama	%	19,13	10,9
Sertlik	HV	88,21	42,5

5.1.1. Malzemelerin kaynağa hazırlanması

Bu çalışmada AA1050 ve saf bakır malzeme sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir. Deneyler, iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada üçgen uç, ikinci aşamada ise kare uç kullanılarak kaynak işlemi yapılmıştır. Çaprazlamalar yapılarak kaynaklı bölgelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak en iyi kaynak çifti belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada kullanılan üçgen ve kare uçlar, farklı takım geometrisine sahip oldukları için kaynak işleminin sonucunu etkileyebilir. Mikroyapı ve mekanik özellikler incelenerek, farklı kaynak çiftleri arasındaki performans farkı değerlendirilmiştir. En iyi kaynak çifti, yani en uyumlu malzeme kombinasyonu, belirli kriterlere göre belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçların analizi, kaynaklı bölgelerin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu değerlendirme, kaynaklı birleştirmenin kalitesini ve dayanıklılığını anlamak için önemlidir. En iyi kaynak çiftinin belirlenmesi, uygun malzeme kombinasyonunun seçilerek, kaynaklı birleştirmenin istenen performansı sağlamasını amaçlamaktadır.

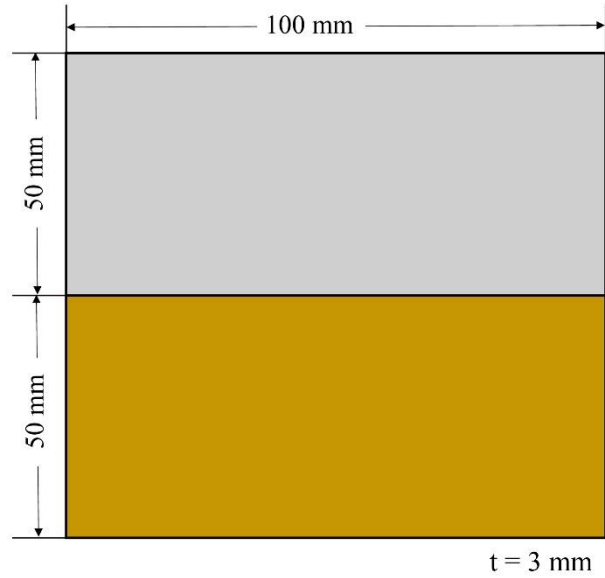
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu atölyesinde sürtünme karıştırma kaynak işlemleri için Taksan FU 315x1250 V/2 marka 10 kW gücünde bir Universal Freze tezgâhı kullanılmıştır (Şekil.5.1.).



Şekil 5.1. Freze tezgâhı.

Bu tezgâh, ilerleme hızını 16 mm/dak ile 800 mm/dak arasında ve freze mili devir sayısını 28 dev/dak ile 1400 dev/dak arasında değiştirme yeteneğine sahiptir. Bu tezgâh, sürtünme karıştırma kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılan önemli bir ekipmandır. İlerleme hızı ve freze mili devir sayısı gibi parametreler, işlemin hızını, kesme kuvvetlerini ve malzeme deformasyonunu etkileyebilir. Bu tezgâhın esnekliği, farklı malzemelerin ve iş parçalarının sürtünme karıştırma kaynağı için uygun koşullarda birleştirilmesini sağlayabilir. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu atölyesinde bulunan bu tezgâh, sürtünme karıştırma kaynak işlemlerinin yapıldığı araştırmalar ve uygulamalar için önemli bir araçtır. Tezgâhın geniş hız ve ilerleme aralığı, çeşitli kaynak parametrelerinin test edilmesine ve en uygun koşulların belirlenmesine olanak tanır.

Kesim nedeniyle çapak oluşmaması ve iyi bir kaynak dikişi elde etmek için freze tezgâhında plakaların kenarları düzgün bir şekilde kesilmiştir. Bu, plakaların birleştirildiği noktalarda düzgün bir temas sağlamak için önemlidir. Her bir plaka, 50x100 mm boyutunda olacak şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 5.2. Deney numunesi boyutları.

5.1.2. Karıştırıcı uç malzemesi

HSS Co10 (High-Speed Steel) uç, sürtünme karıştırma kaynağı için kullanılan bir tür karıştırıcı uçtur. HSS Co10 malzemesi, yüksek sıcaklık dayanımı ve aşınma direnci sağlayan bir takım çeliği türüdür. Bu özellikleri sayesinde

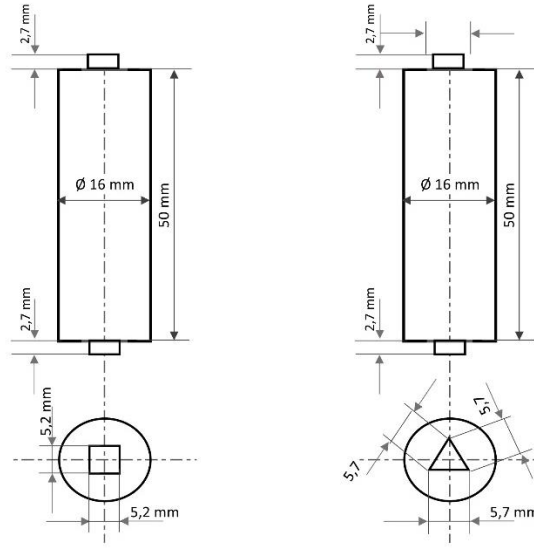
sürtünme karıştırma kaynağı işlemi için uygun bir seçenektir. HSS uçlar, çeşitli şekillerde tasarlanabilir. Genellikle silindirik veya konik şekilli olurlar ve omuz bölgesindeki malzemeyi karıştırarak kaynak işlemini gerçekleştirirler. Uçlar, pimin dönme hareketiyle birlikte malzemenin akışını sağlar ve yüksek sürtünme ısısı oluşturarak malzemenin plastik deformasyonunu sağlar. HSS uçlar, sürtünme karıştırma kaynağı işlemi sırasında yüksek sıcaklıklara maruz kalır ve yoğun bir şekilde aşınır. Bu nedenle, dayanıklılık ve uzun ömür sağlamak için yüksek kaliteli HSS malzemeleri ve uygun şekillendirme ve işleme teknikleri kullanılır. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi için HSS uçlar, genellikle alüminyum ve alüminyum alaşımları gibi yumuşak malzemelerin birleştirilmesinde kullanılır. Bu uçlar, kaynak bölgesinde malzeme akışını sağlamak ve karıştırma etkisini oluşturmak için etkili bir şekilde çalışır.



Şekil 5.3. HSS Co10 karıştırıcı uç.

5.1.3. Karıştırıcı uçların hazırlanması

Literatür araştırmasına dayanarak yapılan seçimlere göre, sürtünme karıştırma kaynağı için karıştırıcı uçun omuz çapı plaka kalınlığının 5 katı olarak belirlenmiştir. Ayrıca, yapılan araştırmada Alüminyum ve bakır için en uygun uç geometrisinin üçgen ve kare profilli takım uçları olduğu vurgulanmıştır. Bu nedenle deneylerde de eşkenar üçgen ve kare profilli uçlar kullanılmıştır. Bu uçlar genellikle sert metal karbür takımlardan yapılmaktadır ve sürtünme karıştırma kaynağı işlemi için uygun kabul edilmektedir [49, 50].



Şekil 5.4. Karıştırıcı uç teknik resmi.

5.1.4. Deneyler için kaynak parametrelerinin belirlenmesi

Çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı bağlantıları elde etmek için devir sayısı, ilerleme hızı ve karıştırıcı uç geometrisi gibi işlem parametreleri değiştirilmiştir. Literatür araştırmasından elde edilen veriler doğrultusunda, kaynak yapılacak malzemelerin özellikleri ve malzeme kalınlığı da dikkate alınarak parametreler belirlenmiştir. Devir sayısı, üç farklı düzeyde (710, 900, 1120 dev/dak), ilerleme hızı üç farklı düzeyde (16, 20, 25 mm/dak) ve uç geometrisi ise iki farklı düzeyde (üçgen, kare) olarak seçilmiştir. Bu şekilde toplamda 18 farklı deney gerçekleştirilmiştir. Burada üçgen karıştırıcı uçla yapılan SKK işlemleri İngilizce üçgen anlamına gelen Triangle teriminin baş harfi olan T ile kare karıştırıcı uçla yapılan SKK işlemlerine ait numuneler ise İngilizce kare anlamına gelen Square teriminin baş harfi olan S harfi ile sembolize edilmiştir. Kullanılan değişken parametreler Tablo 5.'te belirtilmiştir.

Tablo 5. SKK’da kullanılan uç profilleri ve kaynak parametreleri

Malzeme	Karıştırıcı Uç Profili	İlerleme Hızı (mm/dakika)	Dönme Hızı (devir/dakika)	Numune Kod Numarası
AA1050-Cu	Üçgen	16	710	T1
			900	T2
			1125	T3
		20	710	T4
			900	T5
			1125	T6
		25	710	T7
			900	T8
			1125	T9
	Kare	16	710	S1
			900	S2
			1125	S3
		20	710	S4
			900	S5
			1125	S6
		25	710	S7
			900	S8
			1125	S9

5.2. Metod

5.2.1. Deneylerin yapılması

A: Kaynak edilecek malzemenin tezgâh tablasına sabitlenmesi

Bu adımda karıştırıcı uçun yüksek devirlerde dönmesi sebebiyle kaynak edilecek parçaların hareket etmesini önlemek için tezgâh tablasına sabitlenmesi gerekmektedir.

B: Karıştırıcı ucun belirli bir devirde iş parçasına dalması, takım omzunun iş parçasına sürtünmeye başlaması.

Bu adımda karıştırıcı uç, belirlenen devir hızında dönerek iş parçasına temas eder. Sürtünme kuvvetiyle birlikte malzeme yumuşamaya başlar.

C: Takım omzunun sürtünme ile birlikte ısınmaya başlaması.

Bu adımda sürtünme nedeniyle takım omzunda ısınma meydana gelir yüksek sürtünme ısısı, malzemenin plastik deformasyonunu sağlar.

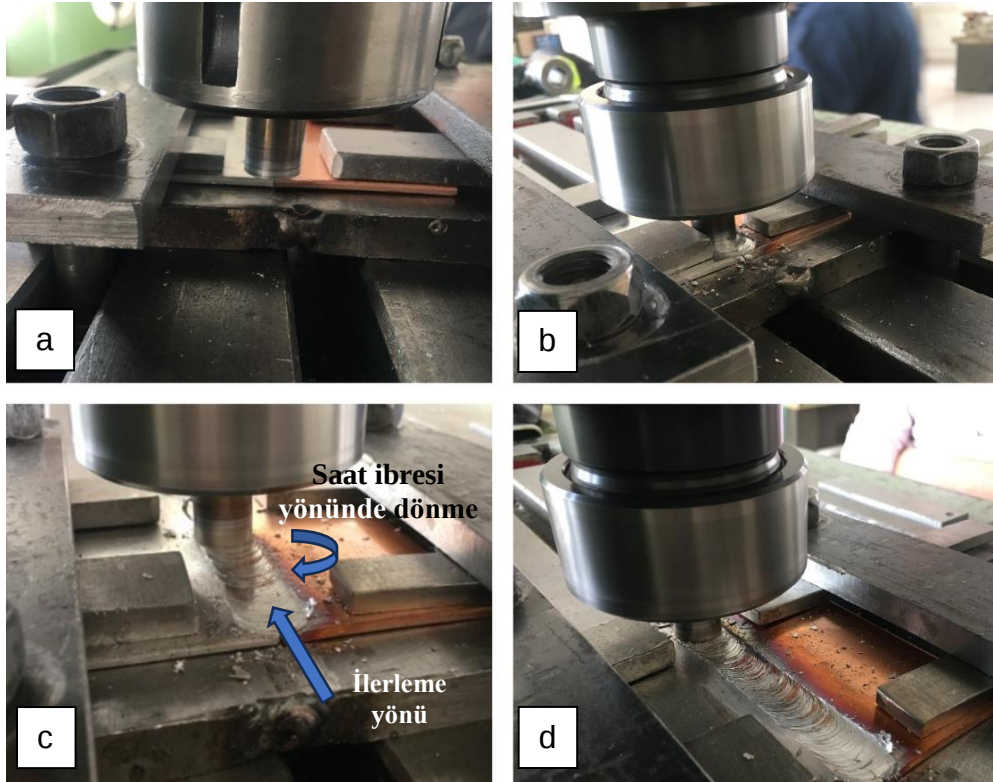
D: Pime ilerleme hareketinin verilmesi.

Bu adımda karıştırıcı uç ilerletilerek malzeme akışı sağlanır. Pim, ilerleme hareketiyle birlikte malzemeyi keserek ve karıştırarak kaynak bölgesini oluşturur.

E: Sürtünme karıştırma kaynağının devam ettirilip sonlandırılması.

Bu adımda sürtünme karıştırma kaynağı işlemi devam ettirilir ve istenen kaynak bölgesi oluşturulur. Kaynak işlemi tamamlandığında, karıştırıcı uç geri çekilir ve kaynak sonlandırılır.

Bu aşamalar, sürtünme karıştırma kaynağı işleminin temel adımlarını göstermektedir. İşlem sırasında, malzemenin plastik deformasyonu, ısı birikimi ve malzeme akışı sağlanarak güçlü ve dayanıklı bir kaynak bağlantısı oluşturulmaktadır (Şekil 5.5.).

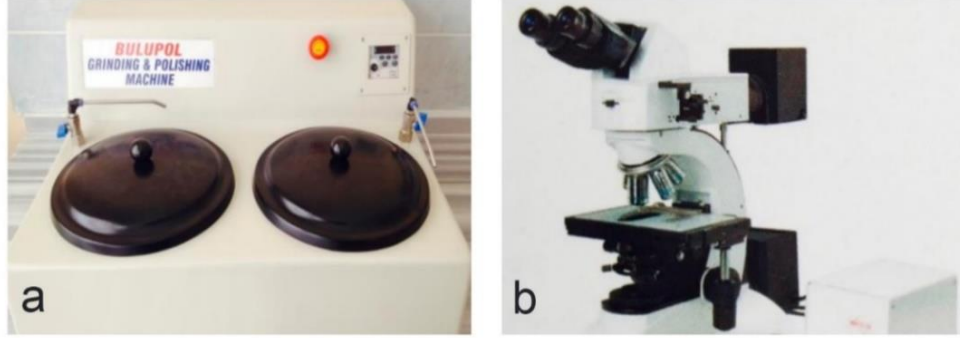


Şekil 5.5. Sürtünme karıştırma kaynağı.

5.2.2 Mikroyapı incelemesi

Sürtünme Karıştırma Kaynak yöntemiyle birleştirilen AA1050 ve saf bakır malzemenin kaynak bölgelerinden SEM ve XRD görüntüleri elde etmek için numuneler alınmıştır. Alınan numuneler Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan AOB/POL BULUPOL (Şekil 5.4.a) marka parlatma cihazı ile zımparalama yapılarak yüzey pürüzlükleri giderilmiştir. Zımparalama işleminde INDASA RHYNOWET RED LINE (P 180, P 220, P 320, P 400, 600, P 800, P 1000, P 1200) sulu zımpara kullanılmıştır. Zımparalama işleminin her aşamasında

Endüstriyel Metalografik Trinoküler Mikroskop (Şekil 5.6.b) ile görüntüler kontrol edilmiştir. Zımparalama işlemi sonrasında elmas pasta ve çuha yardımıyla son parlatma işlemi yapıp AA1050 tarafı Keller Reaktifi ile saf bakır tarafı ise $FeCl_3$ çözeltisi ile yüzey dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.6. (a) Parlatma Cihazı, (b) Optik Mikroskop

SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), bir numune yüzeyini taramak için odaklanmış bir elektron demeti kullanarak görüntüler elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzemelerin incelenmesi için, numunelerin yüzey morfolojisi, elementel dağılımı ve kırık yüzeyleri analiz etmek amacıyla SEM kullanılmıştır. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan TESCAN MIRA3 XMU marka taramalı elektron mikroskobu, bu analizler için kullanılan bir cihazdır.

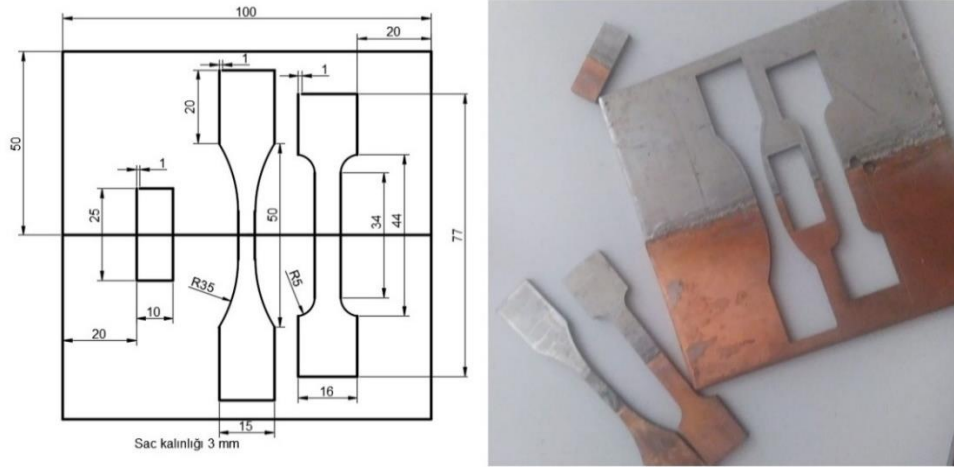


Şekil 5.7. TESCAN MIRA3 XMU taramalı elektron mikroskobu (SEM).

SEM, numunenin yüzeyine odaklanmış elektron demeti gönderir ve bu demet numunenin yüzeyiyle etkileşime girerek farklı sinyaller üretir. Bu sinyallerin algılanması ve işlenmesi sonucunda yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir. SEM analizi, sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzemelerin mikroyapısını, yüzey morfolojisini, çatlak ve kırık yüzeylerini incelemek için kullanılır. Ayrıca, elementel dağılımı ve bileşim analizini yapmak için enerji dağılım spektroskopisi (EDS) gibi ek tekniklerle birleştirilebilir. Şekil 5.7'de görülen SEM cihazı, numunelerin yüzeylerinin ayrıntılı bir şekilde incelenebilmesi için kullanılan bir araçtır. Bu cihaz, malzemelerin yapısal ve yüzey özelliklerini daha iyi anlamak ve sürtünme karıştırma kaynağı sonucunda oluşan bağlantıların mikroyapısını incelemek için önemli bir araçtır.

5.2.3. Mekanik testler

Çekme deneyleri, sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzeme çiftlerinin mekanik özelliklerini değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen AA1050 ve saf bakır levhalar Şekil 5.8. deki ölçülere göre su jeti ile kesilmiştir.



Şekil 5.8. Çekme deneyinde kullanılan numune ölçüleri (mm).

Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında Shimadzu marka çekme deney seti kullanılarak bu deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.9'da görülen çekme deney seti, malzemenin gerilme ve deformasyon davranışını ölçmek için kullanılır. Deney sırasında, bir numune çekme makarasına tutturulur ve kontrollü bir şekilde gerilirken deformasyon miktarı kaydedilir. Bu sayede numunenin gerilme-gerinim eğrisi elde edilir ve

malzemenin mekanik özellikleri değerlendirilir. Çekme deneyleri, sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzeme çiftinin dayanıklılığını, esneklik özelliğini, gerilme direncini ve diğer mekanik özelliklerini belirlemek için önemli bir araçtır. Bu deneylerin sonuçları, kaynak bağlantısının kalitesini ve performansını değerlendirmede kullanılır ve kaynak parametrelerinin optimizasyonu için yol gösterici olabilir.



Şekil 5.9. Çekme deneylerinin yapıldığı Shimadzu marka çekme deney seti.

Şekil 5.10'da Shimadzu HMV M3 marka mikrosertlik ölçüm cihazı görülmektedir. Mikrosertlik incelemesi, SKK ile birleştirilen AA1050 ve Cu metalinin kaynak bölgesinden alınan numunelere; ana metal ve ısıdan etkilenmiş kaynaklı bölgeye 1 kg yük uygulanarak, 15 saniye bekletilip, 1 mm aralıklarla ilerletilerek mikro sertlik testine tabi tutulmuştur.



Şekil 5.10. Shimadzu HMV M3 marka mikro sertlik ölçüm cihazı.

5.2.4. Karıştırıcı uçun kaynak sonrası durumu

Şekil 5.11’de SKK sonrası HSS Co10 karıştırıcı ucun omuz ve pim kısmına AA1050 ve saf bakır malzemenin sıvandığı ve uç kısmında üçgen ve kare şeklinde görüntünün oval bir şekle dönüştüğü tespit edilmiştir. Bu nedenle tüm birleştirme işleminden önce karıştırıcı uça sıvanan alüminyum ve bakır malzemeler temizlenerek yeni birleştirme işlemine hazırlanmıştır. Her ne kadar karıştırıcı uç birleştirilecek metallere sert olsa da 3 defa kaynak yaptıktan sonra karıştırıcı uçtaki yorulma, aşınma ve deformeler sebebiyle uç kısmının kırıldığı görülmüştür.



Şekil 5.11. Karıştırıcı uçun kaynak sonrası görünümü.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Kaynaklı Bağlantıların Makro Görüntülerinin İncelenmesi

Yapılan SKK işlemlerinde takım uç açısı 1° olarak kaynak işlemleri yapılmıştır. Kaynak parametreleri iki farklı uç geometrisi ile üç farklı devir ve üç farklı ilerleme hızı literatüre uygun olarak belirlenmiştir. Şekil 6.1. de üçgen karıştırıcı uç ile yapılan kaynaklı numunelere ait makro görüntüler verilmiştir. Görüntülerde kaynak ön yüzeyi, kaynak kök yüzeyi ve kaynak kesiti görüntüleri birlikte gösterilmiştir.

NUMUNE KODU	KAYNAK GÖRÜNÜMÜ		
	KAYNAK ÖN YÜZEYİ	KAYNAK KÖK YÜZEYİ	KAYNAK KESİTİ
T1 710/16			
T2 900/16			
T3 1120/16			
T4 710/20			
T5 900/20			
T6 1120/20			
T7 710/25			
T8 900/25			
T9 1120/25			

Şekil 6.1. Üçgen uç ile yapılan kaynak yüzey, kök ve kesit görüntüleri.

Genel olarak makro görüntüleri bakıldığı zaman kaynak ön yüzey makro görüntü kalitesi ile kaynak kök yüzey makro görüntü kalitesi arasında benzer yapıda makro görüntüler olduğu gözlemlenmiştir. Aynı durum kaynak kesitine bakıldığı zaman da bariz bir şekilde görülmektedir.

Şekil 6.2. de ise kare karıştırıcı uç ile yapılan kaynaklı numunelere ait makro görüntüler verilmiştir. Görüntülerde kaynak ön yüzeyi, kaynak kök yüzeyi ve kaynak kesiti görüntüleri birlikte gösterilmiştir.

NUMUNE KODU	KAYNAK GÖRÜNÜMÜ		
	KAYNAK ÖN YÜZEYİ	KAYNAK KÖK YÜZEYİ	KAYNAK KESİTİ
S1 710/16			
S2 900/16			
S3 1120/16			
S4 710/20			
S5 900/20			
S6 1120/20			
S7 710/25			
S8 900/25			
S9 1120/25			

Şekil 6.2. Kare uç ile yapılan kaynak yüzey, kök ve kesit görüntüleri.

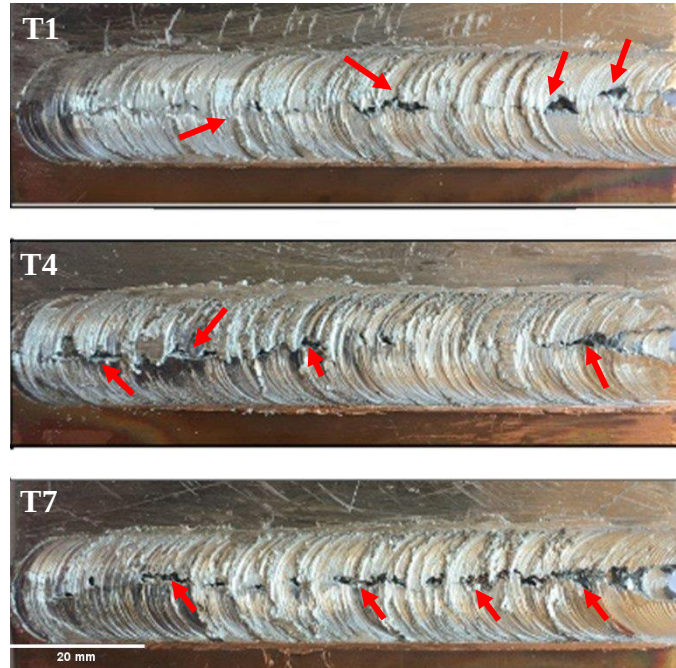
6.1.1. Üçgen karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin incelenmesi

Üçgen karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin makro görüntülerine bakıldığı zaman özellikle 710 dev/dak ile yapılan SKK işleminde bariz boşluklar

görülmektedir. 900 dev/dak ile birleştirilen numunelerin kaynak yüzeylerinin daha düzgün yapıda elde edildiği görülmektedir. Devir sayısının arttırılarak 1120 dev/dak olması durumunda ise kaynak üst yüzeyinin düzensiz bir yapıda olduğu tespit edilmiştir.

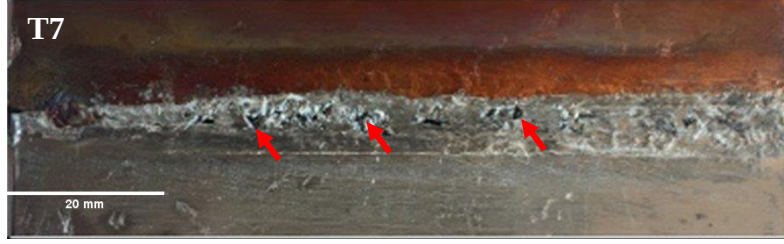
6.1.1.1. 710 dev/dak ile birleştirilen numunelerin makro değerlendirilmesi

Şekil 6.3.' te T1, T4 ve T7 numunelerinin makro yüzey görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde gözle görülür boyutta boşluklar açıkça görülmektedir. Her üç numunedeki boşluklar Şekil 6.3. de oklarla gösterilmiştir. Boşlukların uzunlukları 5 mm ile 27 mm arasında değişiklik göstermiştir. Boşluk uzunluklarının, ilerleme hızı arttıkça arttığı tespit edilmiştir. Bu durum 710 dev/dak ile yapılan birleştirmelerde devir sayısının düşük olması ile ortaya çıkan ısının yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.3. T1, T4 ve T7 numunelerine ait yüzey makro yüzey görüntüleri.

T7 nolu numune kök yüzeylerinde boşluklar olduğu, AA1050 malzeme ile saf bakır malzeme arasında birleşmelerin tam sağlanamadığı Şekil 6.4. de görülmektedir. Kaynak ön yüzeyinde oluşan boşlukların benzer şekilde kaynak kök yüzeyinde olduğu görülmektedir. Bu boşluklar Şekil 6.4.'te oklarla gösterilmiştir.

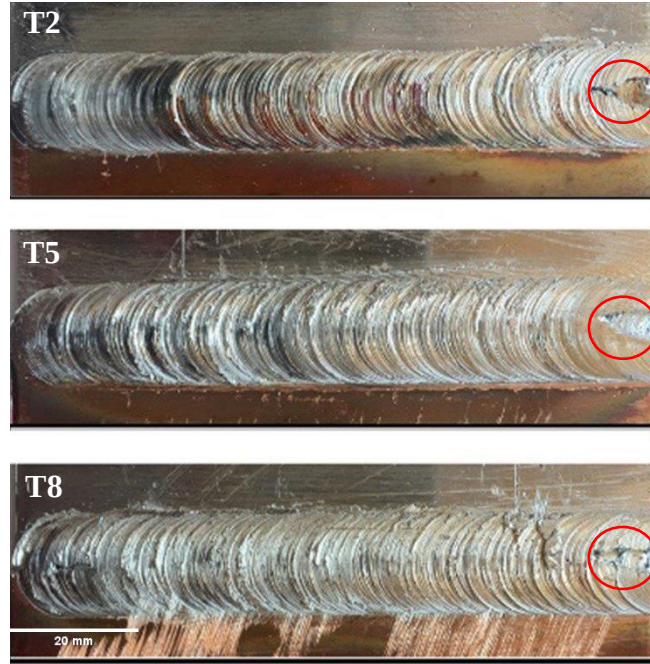


Şekil 6.4. T7 numunesine ait kök yüzey görüntüsü.

710 dev/dak ile yapılan birleştirmelerde kaynak kök yüzeyinde de boşlukların oluşması ön yüzeyde olduğu gibi devir sayısının düşüklüğü sebebiyle ortaya çıkan ısının yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır.

6.1.1.2. 900 dev/dak ile birleştirilen numunelerin makro değerlendirilmesi

Şekil 6.5.'te T2, T5 ve T8 numunelerinin makro yüzey görüntüleri verilmiştir. Görüntülerin iyi olduğu, özellikle T2 numunesinde bakır ve AA1050 malzemenin difüze olduğu yüzey görüntülerinden net bir şekilde anlaşılmaktadır. İlerleme hızının T5 ve T8 numunelerinde artmasıyla difüzyonun azaldığı görülmektedir. Bu numunelerde SKK işleminde genel bir problem olan karıştırıcı uçun kaynak bitim noktasında oluşturduğu boşluklar bariz bir biçimde görülmektedir. Bu boşluklar Şekil 6.5.'te ve diğer numunelerde daire içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 6.5. T2, T5 ve T8 numunelerine ait yüzey makro yüzey görüntüleri.

Şekil 6.6. da görüldüğü gibi T2 kaynak kök yüzeyi görüntülerinde de temiz ve düzgün bir görüntü elde edilmiştir.

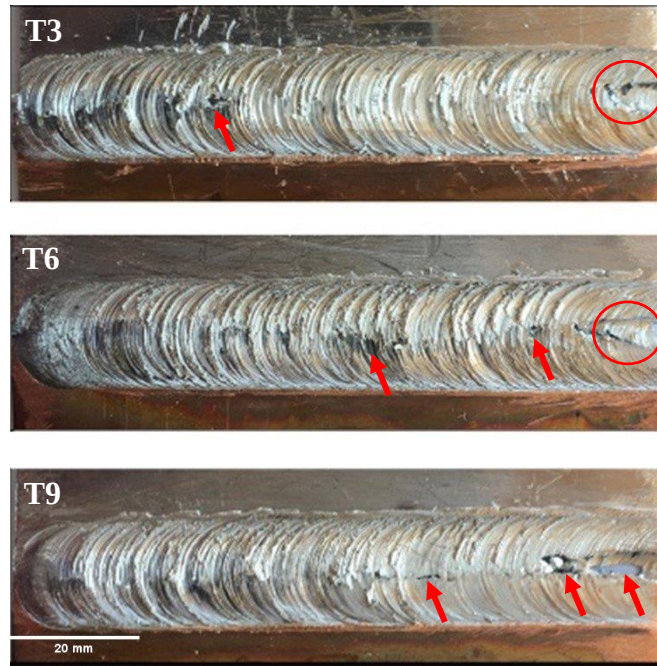


Şekil 6.6. T2 numunesine ait kök yüzey görüntüsü.

Bu durumda AA1050 ve Cu malzemenin SKK işleminde 900 dev/dak ile yeterli ısı sağlanmış ve kaynak işlemi kusursuz bir biçimde gerçekleşmiştir.

6.1.1.3. 1120 dev/dak ile birleştirilen numunelerin makro değerlendirmesi

Şekil 6.7.'de T3, T6 ve T9 numunelerinin makro yüzey görüntüleri verilmiştir. Kaynakta boşluk ve deliklerin olduğu görülmektedir. T3 ve T6 numunesinde yüzey görüntülerinde küçük çapta boşluklar T9 numunesinde ise devir sayısının yüksekliğinden kaynaklanan ısı sebebiyle malzemenin fazla çamurlaştığı ve ilerleme hızındaki yükseklik nedeniyle de tam birleşme sağlanamadığından delik oluştuğu görülmektedir.



Şekil 6.7. T3, T6 ve T9 numunelerine ait yüzey makro yüzey görüntüleri.

Şekil 6.8.'deki T9 numunesine ait kaynak kök yüzey görüntülerine bakıldığı zaman AA1050 malzeme ile bakır malzeme arasında kaynak kök pasosunda düzgün bir yüzey elde edilmiş fakat ön yüzeydeki delikli yapı buradan da net bir biçimde gözükmemektedir. Şekil 6.8.'de T9 numunesine ait kök yüzey görüntüsündeki delik kısım ok işaretiyle gösterilmiştir.



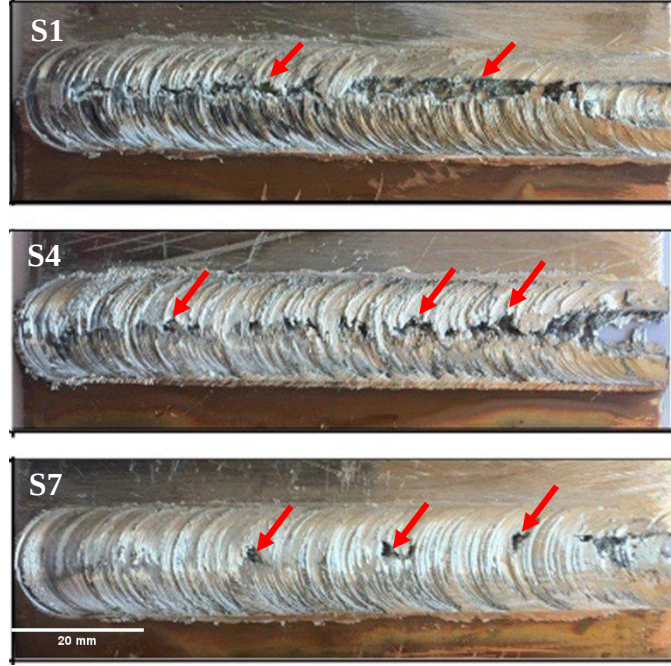
Şekil 6.8. T9 numunesine ait kök yüzey görüntüsü.

6.1.2. Kare karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin incelenmesi

Kare karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin makro görüntülerine bakıldığı zaman özellikle 710 dev/dak ile yapılan SKK işleminde S1 ve S4 numunelerinde uzun boşluklar görülmektedir. 900 dev/dak ile birleştirilen numunelerin kaynak yüzeylerinin daha düzgün olduğu görülmektedir. 1120 dev/dak ile yapılan kaynak işlemlerinde ise kaynak bölgesinde çıkıntılar ve kaynak üst yüzeyinde küçük boşluklar görülmektedir.

6.1.2.1. 710 dev/dak ile birleştirilen numunelerin makro değerlendirmesi

Kare karıştırıcı uç ile kaynaklanan S1, S4 ve S7 numunelerinin makro görüntüleri incelendiğinde çok uzun biçimde boşluklu yapılar görülmektedir. Her üç numunedeki boşluklar Şekil 6.9.'da oklarla gösterilmiştir.



Şekil 6.9. S1, S4 ve S7 numunelerine ait yüzey makro yüzey görüntüleri.

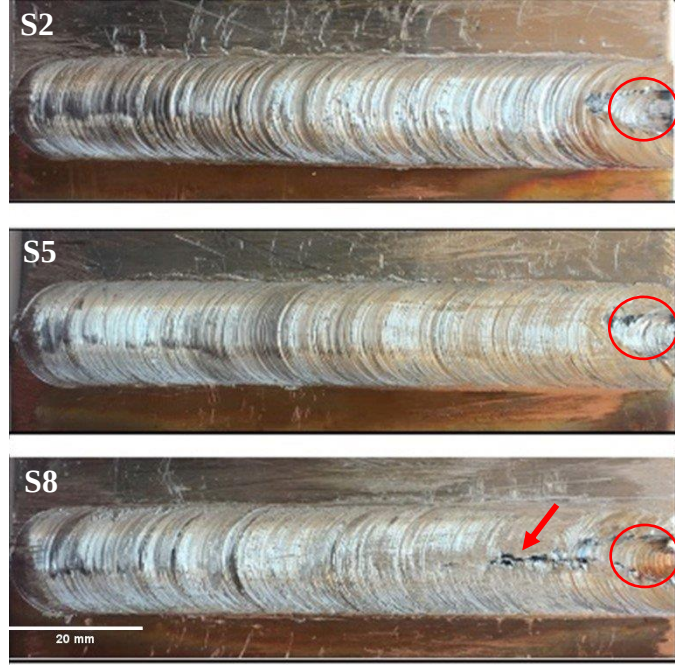
S1 numunesindeki boşluk uzunlukları 20 mm ile 30 mm, S4 numunesindeki boşluk uzunluğu ise 25 mm'dir. S7 numunesinde ise S1 ve S4 numunesinde olduğu kadar uzun boşluklar görülmemektedir. Kaynak ön yüzeyindeki uzun boşluklu yapının benzerleri özellikle S1 kök yüzeyinde de görülmektedir. 710 dev/dak dönme hızında kare karıştırıcı uçla yapılan kaynak birleştirmelerinde de yeterli ısının elde edilemediği ve AA1050 ve Cu malzemenin çamurlaşmış birbiriyle karışmadığı net olarak görülmektedir.



Şekil 6.10. S1 numunesine ait kök yüzey görüntüsü.

6.1.2.2. 900 dev/dak ile birleştirilen numunelerin makro değerlendirmesi

Şekil 6.11.'de S2, S5 ve S8 numunelerinin makro yüzey görüntüleri verilmiştir. S8 numunesine ait makro görüntülerde 8 mm'lik bir boşluk olduğu görülmektedir. Bu numunelerde de karıştırıcı uçun kaynak bitim noktasında oluşturduğu boşluklar daire içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 6.11. S2, S5 ve S8 numunelerine ait yüzey makro yüzey görüntüleri. Aynı devirde S2 ve S5 numunelerinde herhangi bir boşluk bulunmuyorken ve gayet iyi bir yüzey görüntüsü elde edilmişken S8 numunesinde boşluk oluşumunun sebebi ilerleme hızının atmış olmasından kaynaklanmaktadır.

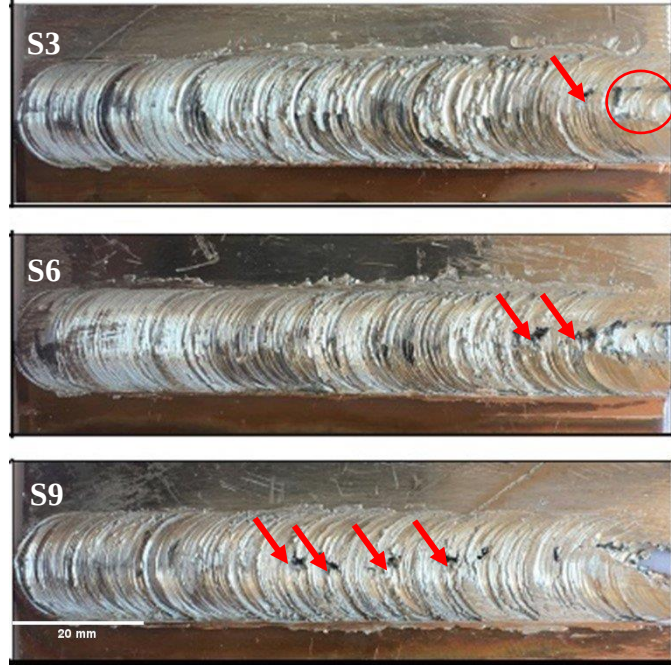


Şekil 6.12. S8 numunesine ait kök yüzey görüntüsü.

S8 numunesinin yüzey görüntülerinde boşluk olmasına rağmen kök kısmında iyi bir karışımın sağlandığı ve kaliteli bir birleştirme elde edildiği Şekil 6.12.'de açıkça görülmektedir.

6.1.2.3. 1120 dev/dak ile birleştirilen numunelerin makro değerlendirmesi

Şekil 6.13.'te S3, S6 ve S9 numunelerinin makro yüzey görüntüleri verilmiştir. S3 numunesinde küçük bir boşluklu yapı görülürken ilerleme hızının artmasıyla S6 ve S9 numunelerinde boşlukların çoğaldığı görülmektedir.



Şekil 6.13. S3, S6 ve S9 numunelerine ait yüzey makro yüzey görüntüleri.

Şekil 6.14.'teki S3 numunesine ait kök yüzey görüntülerine bakıldığında zaman AA1050 malzeme ile bakır malzeme arasında kaynak kök pasosunda düzgün bir yüzey elde edilmiştir.



Şekil 6.14. S3 numunesine ait kök yüzey görüntüsü.

6.2. Mikroyapı Deney Sonuçları

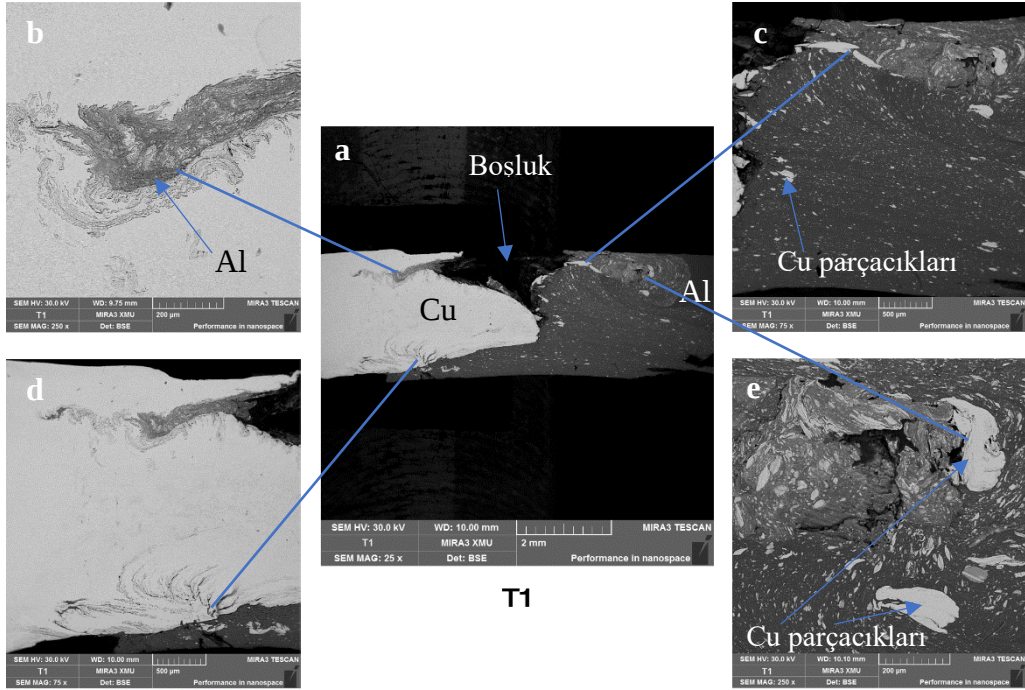
Numunelere ait değerlendirmeler uç geometrisi, devir sayısı ve ilerleme hızına bağlı olarak ayrı ayrı yapılmıştır. İlk olarak üçgen karıştırıcı uç ile 710 dev/dak dönme hızı ile yapılan T1, T4 ve T7 numuneleri akabinde 900 dev/dak dönme hızı ile yapılan T2, T5 ve T8 numuneleri daha sonra 1120 dev/dak dönme hızı ile yapılan T3, T6 ve T9 numunelerinin mikroyapı SEM görüntüleri incelenmiştir. İkinci olarak ise kare karıştırıcı uç ile 710 dev/dak dönme hızı ile yapılan S1, S4 ve S7 numuneleri daha sonra 900 dev/dak dönme hızı ile yapılan

S2, S5 ve S8 numuneleri en sonunda 1120 dev/dak dönme hızı ile yapılan S3, S6 ve S9 numunelerinin mikroyapı SEM görüntüleri incelenmiştir.

6.2.1. Üçgen karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin incelenmesi

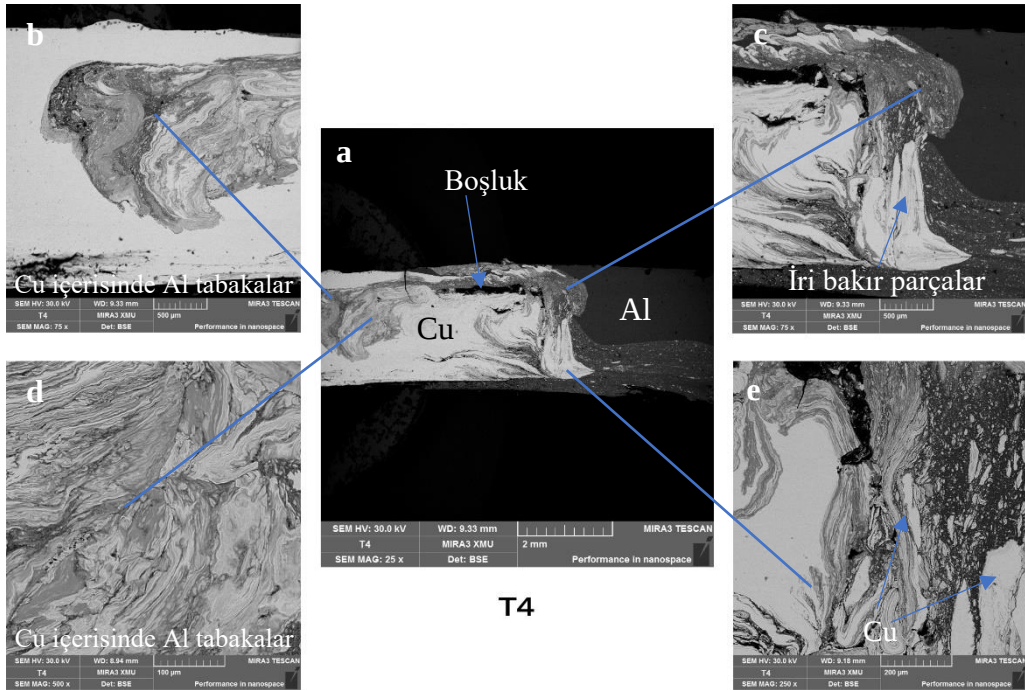
6.2.1.1. 710 dev/dak ile birleştirilen numunelerin mikroyapı değerlendirmesi

Üçgen uç kullanılarak 710 dev/dak ile birleştirilen T1 nolu numuneye ait mikroyapı SEM görüntüleri Şekil 6.15.'te verilmiştir. Şekil 6.15. (a)'da kaynak bölgesinde her iki metalin iç içe geçtiği karışım bölgeleri görülmektedir. Fakat bu yeterli düzeyde gerçekleşmemiştir. Kaynak kesitinde boşluklu bir yapı meydana geldiğinden bağlantının istenilen düzeyde gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Şekil 6.15. (b-d) SEM görüntülerinde AA1050'nin Cu içerisinde dağıldığı fakat tam olarak tutunmaların olmadığı görülmektedir. Şekil 6.15. (c)'de Al içinde irili ufaklı yapıda Cu taneleri görülmektedir. Yapı düzensiz bir karışım sergilemektedir. Bakır parçalar, AA1050 içerisinde karışmamış bir şekilde durmaktadır. Metaller arasında yer yer tutunmalar olsa da kaynaktaki boşluklu yapıdan kaynaklı olarak tam bir birleşme sağlanamamış gözenekler ve boşluklar bulunmaktadır.



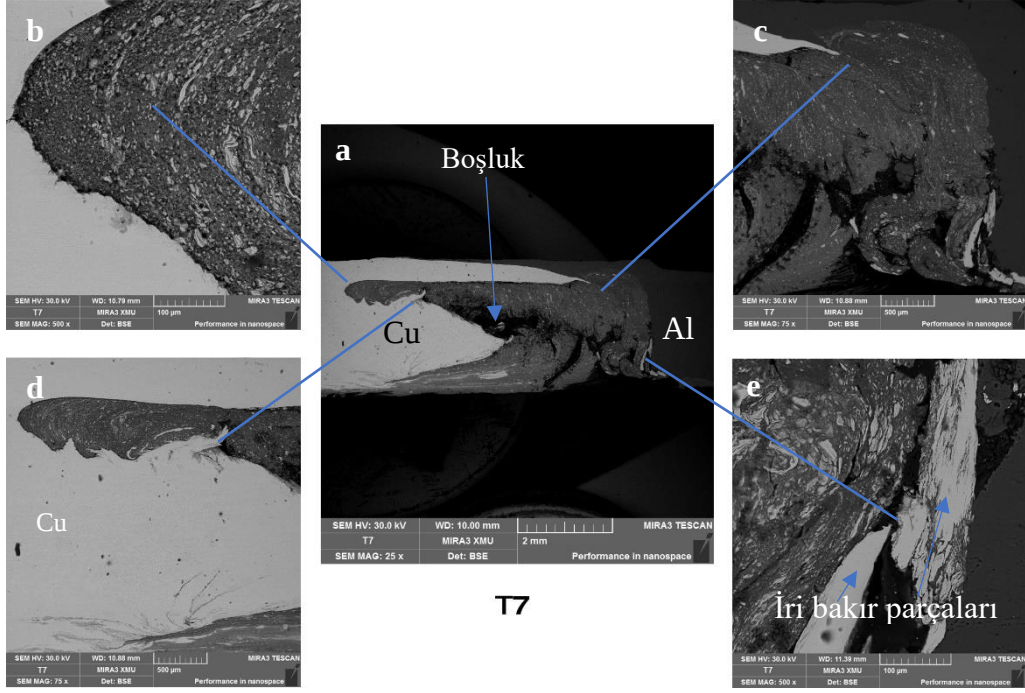
Şekil 6.15. T1 mikroyapı SEM görüntüleri.

Şekil 6.16. T4 mikroyapı görüntülerinde AA1050 içerisinde Cu, Cu içerisinde AA1050 tabakalar mevcuttur.



Şekil 6.16. T4 mikroyapı SEM görüntüleri.

Birleşmenin tam olarak sağlanamadığı (a)'da görülmektedir. (b) ve (d)'de Cu içerisinde AA1050 malzemenin dağılım sergilediği (c) ve (e)'de Cu parçacıkları AA1050 içerisinde dağılmadığı iri parçalar halinde kaldığı görülmektedir.

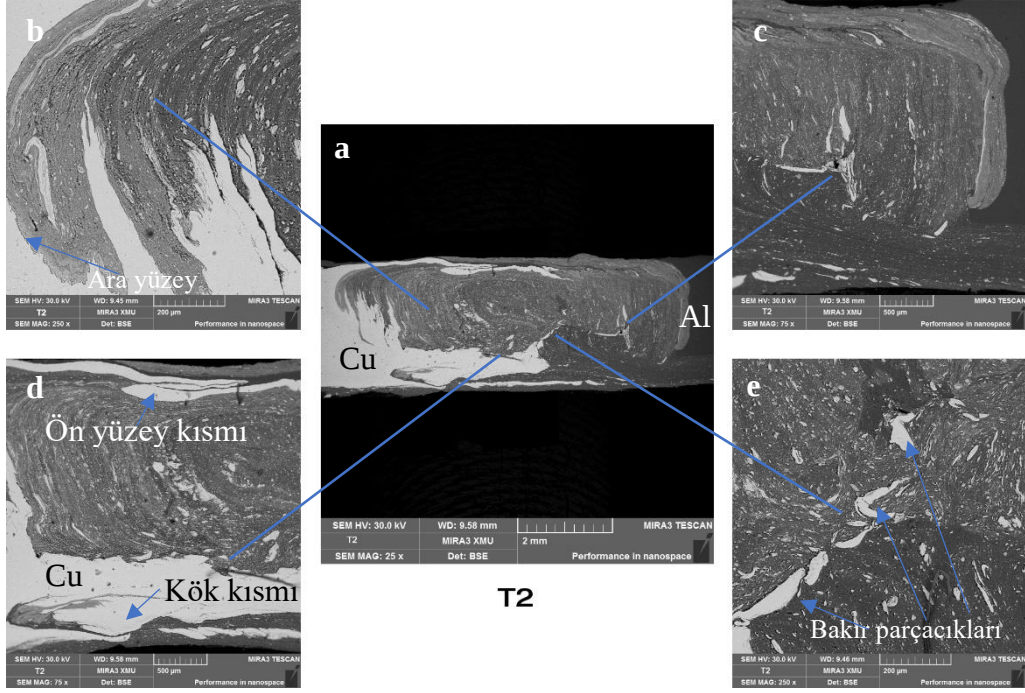


Şekil 6.17. T7 mikroyapı SEM görüntüleri.

Şekil 6.17. T7 mikroyapı görüntülerinde AA1050 ve Cu arasında yer yer geçişler görülmekte fakat malzemeler arasında tam bir tutunma oluşmamıştır. Şekil 6.17. (b)'de malzemenin homojen bir dağılım sergilediği görülmektedir. (c)'de boşluklu yapılar göze çarpmakta (d)'de AA1050 malzemenin Cu malzeme içerisinde mukavemeti artıracak biçimde kılcal damarlar şeklinde dağıldığı görülmektedir. (e)'de ise homojen bir dağılım oluşmadığı Cu parçalarının plaka halinde dağıldığı görülmektedir. Bu numunelerde kaynak bölgesinde karışımın yetersiz olduğu görülmektedir. Bu durum düşük devir ile yapılan bağlantılarda yeterli ısının elde edilememesinden dolayı malzemenin çamurlaşıp birleşememesinden kaynaklanmaktadır. Düşük devirde malzeme karışımının sağlanacağı ısının oluşamaması ve ilerleme hızının da artması ile birlikte kaynakta boşluklar meydana gelmiştir.

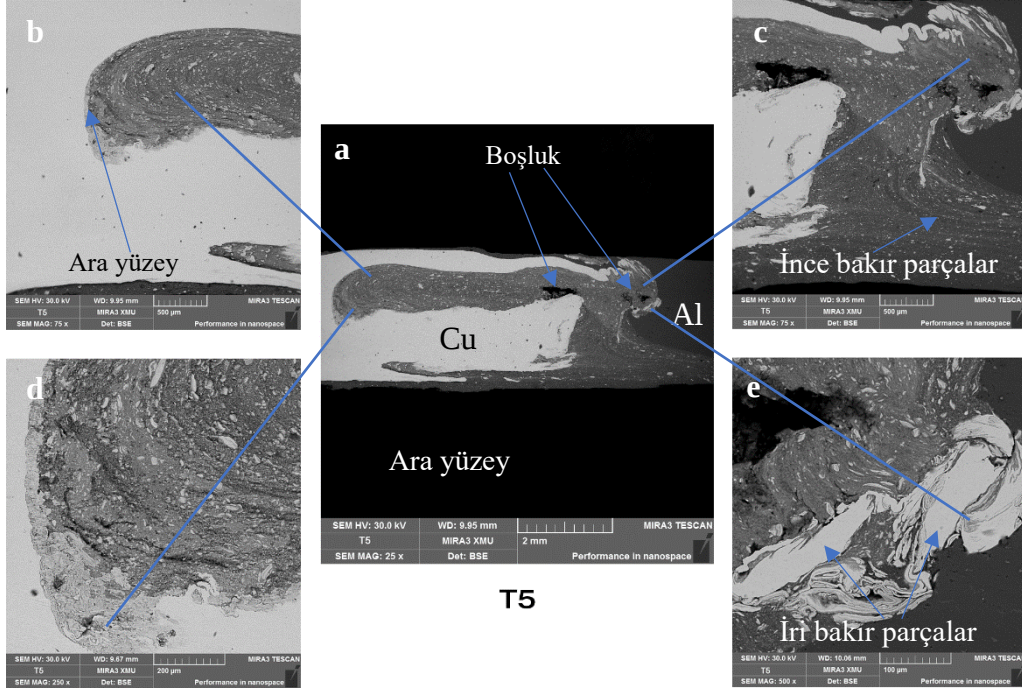
6.2.1.2. 900 dev/dak ile birleştirilen numunelerin mikroyapı değerlendirmesi

Şekil 6.18. üçgen uçla 900 dev/dak dönme hızı ile birleştirilen T2 numunesine ait mikroyapı SEM görüntüleri verilmiştir. T2 numunesinin mikroyapı (a) görüntülerinde bakır malzemenin alüminyum içerisinde homojen bir dağılım sergilediği görülmektedir.



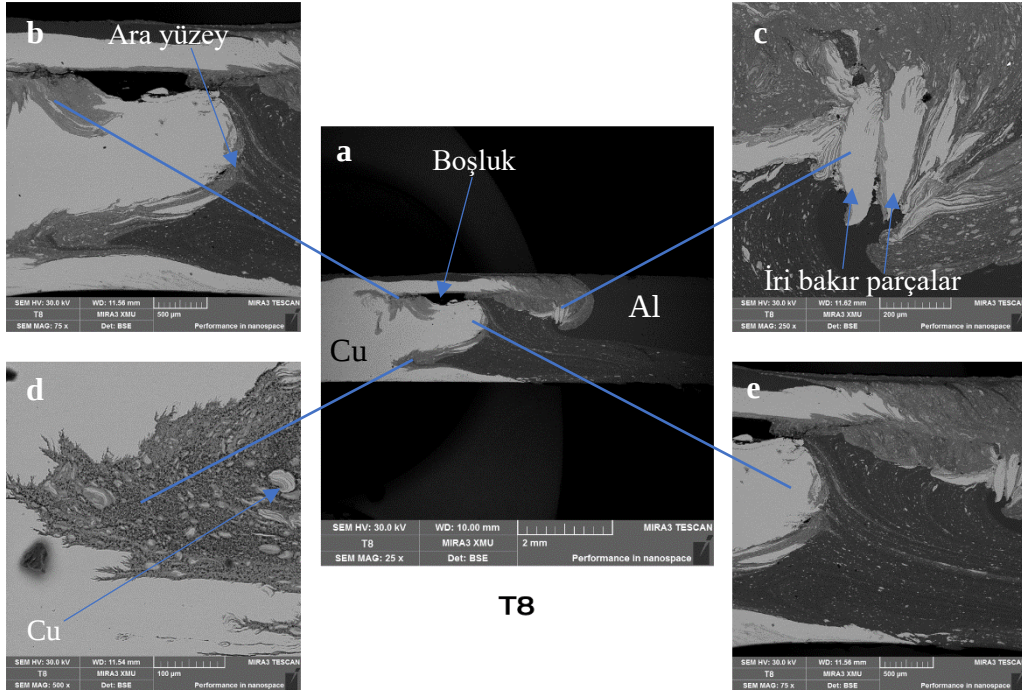
Şekil 6.18. T2 mikroyapı SEM görüntüleri.

Malzeme geçişlerinin ve (b) ara yüzeylerdeki malzeme tutunmalarının çok iyi olduğu fark edilmektedir. Kaynakta boşluk ve gözenek görülmemektedir. Kaynak ön yüzey kısmındaki karışımın (c)'de AA1050 ve Cu parçaları arasında yeterli reaksiyon sağlanmış ve karışım bölgesinde herhangi bir kusur gözlenmemiştir. Cu parçalarının çevresinde, AA1050-Cu intermetalikleri ve bariz ara yüzey katmanları görülmektedir. Cu parçacıklarının Al matrisinde dağıldığı ve AA1050-Cu malzemenin birbirleriyle tam bir karışım sağladığı görülmektedir.



Şekil 6.19. T5 mikroyapı SEM görüntüleri.

Şekil 6.19. T5 mikroyapı (a) görüntülerinde AA1050 malzemenin bakır içerisinde uzun bir hat şeklinde yayıldığı, bakır malzemenin de AA1050 içerisinde dağılım sergilediği ve oklarla gösterilen kısımlarda boşlukların bulunduğu görülmektedir. (b)'de Cu malzemeden koparılan parçacıkların alüminyum içerisine sürüklenmesi neticesinde bakırca zengin bölgeler ve AA1050 malzemenin Cu içerisinde yayılmasıyla alüminyumca zengin bölgelerin oluştuğu, (c)'de Cu parçalarının AA1050 içerisinde dağılım sağladığı, (d)'de ise Cu-AA1050 malzemenin karıştığı ara yüzeyler net bir şekilde gözükmemektedir. (e)'de bakır parçaların oklarla gösterilen kısımlarda dağılmadığı ve iri parçalar halinde kaldığı görülmektedir.



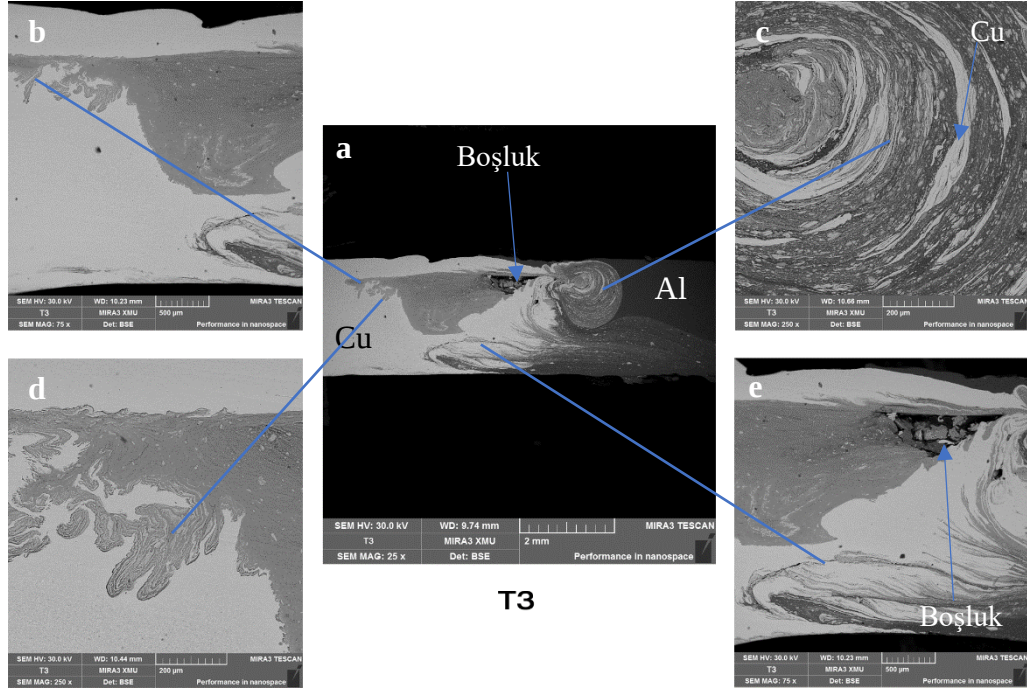
Şekil 6.20. T8 mikroyapı SEM görüntüleri.

Şekil 6.20. T8 mikroyapı (a) görüntülerinde karışım bölgesinde Cu ile AA1050 malzemeler birbirine geçmiş ve iyi bir karışım sağladığı görülmektedir. (a)'da okla gösterilen kısımda boşluklu yapı meydana geldiği görülmektedir. (b) ve (e)'de Al içerisinde Cu ve Cu içerisinde Al geçişleri görülmektedir. (c)'de oklarla gösterilen iri bakır parçalar malzeme içerisinde tam dağılım sağlayamamıştır. (d)'de ise Al malzemenin bakır içerisinde yayıldığı ve alüminyum matris içerisinde bakır parçacıklarının iyi bir dağılım gösterdiği açıkça görülmektedir. Bu numunelerde dikkat çeken durum T2 numunesinde hiç boşluk oluşmamış iken T5 ve T8 numunelerinde boşlukların oluşmasıdır. Bu boşlukların oluşma nedeni aynı devir sayısında yapılan kaynak işlemlerinde ilerleme hızının artmasına bağlı olarak oluştuğu açıkça görülmektedir.

6.2.1.3. 1120 dev/dak ile birleştirilen numunelerin mikroyapı değerlendirmesi

Üçgen uç kullanılarak 1120 dev/dak ile birleştirilen T3 nolu numuneye ait mikroyapı SEM görüntüleri Şekil 6.21.'de verilmiştir. (a)'da T3 numunesinin mikroyapı görüntülerinde karışımın sağlandığı, malzeme tutunmalarının gerçekleştiği görülmekte olup okla gösterilen kısımda boşluklu bir yapı bulunmaktadır. (b) ve (d) görüntülerinde Al malzemenin bakır çerisinde dağılım

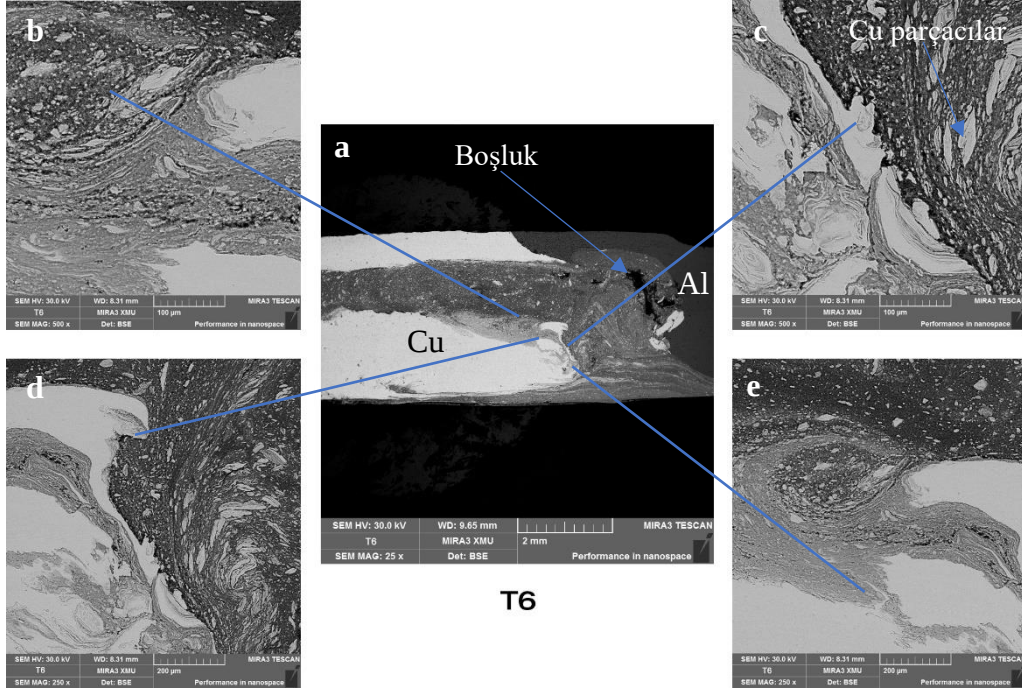
gösterdiği malzemelerin birbiri içerisindeki dağılımlarının iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 6.21. T3 mikroyapı SEM görüntüleri.

(c)'de üçgen karıştırıcı uçun dönme hareketine bağlı olarak soğan halkası şeklinde görüntüler oluşmuştur. Malzeme akışı benzer metallerin ve farklı metallerin SKK'da işleminde oldukça farklıdır. Soğan halkası şekli, benzer özelliklere sahip metallerin SKK işleminde karışma bölgesinde yaygın olarak görülür. Farklı fiziksel, kimyasal ve metalürjik özelliklere sahip malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında karışım bölgesinde kompleks bir mikro yapı bulunur. Burada meydana gelen soğan halkası görüntüsü bakır malzemenin alüminyum matrisi içerisinde yayıldığını ve kaynak kalitesinin iyi olduğunu göstermektedir. (e)'de ise malzeme geçişlerinin ve ara yüzeylerdeki malzeme tutunmalarının iyi düzeyde olduğu fark edilmektedir. Al ve Cu malzemenin birbirleriyle tam bir karışım sağladığı görülmektedir.

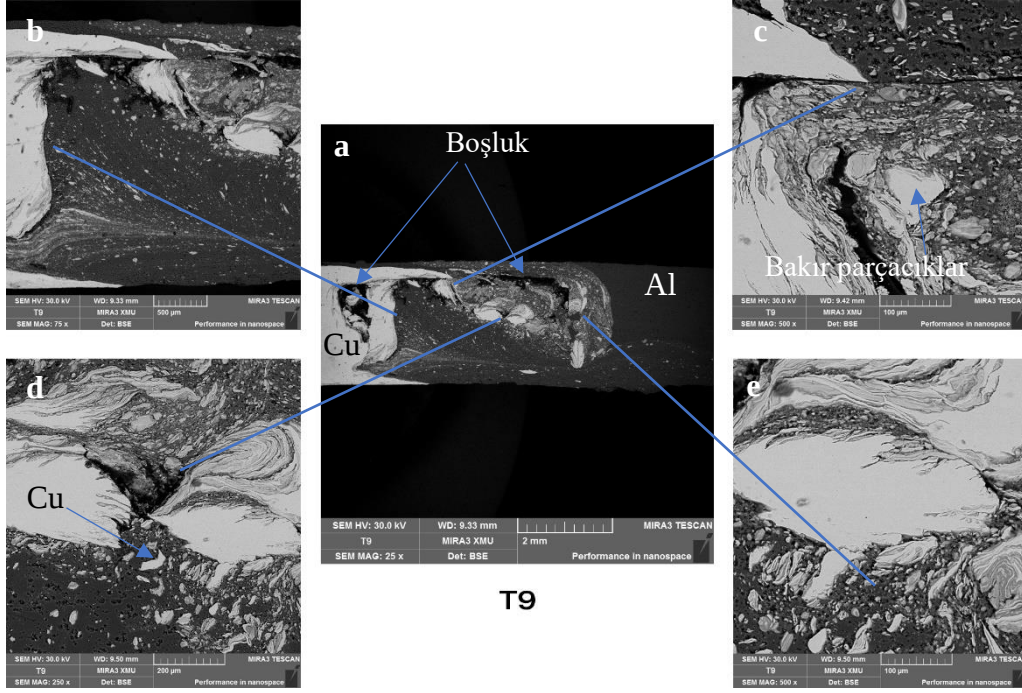
Şekil 6.22. T6 mikroyapı (a) görüntülerinde Al ile Cu malzeme arasındaki bakır malzemeden koparılan parçacıkların alüminyum içerisine sürüklendiği bu bakımdan bakırca zengin bölgelerin olduğu ve ara yüzeylerdeki tutunmaların iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 6.22. T6 mikroyapı SEM görüntüleri.

T6 numunesinde (a) görselinde okla gösterilen bölgede boşluklu yapının olduğu, (b), (c), (d) ve (e) görüntülerinde ise Al matris içerisinde Cu parçacıklarının dağılım gösterdiği metal geçişlerinin iyi düzeyde olduğu görülmektedir.

Şekil 6.23. T9 mikroyapı (a) görüntülerinde malzeme geçişi ve karışmaların olduğu bölgede boşluklu yapılar görülmektedir. Okla gösterilen bu boşluklu yapılar kaynak birleşimini olumsuz etkilemektedir. Bakır parçacıklar iri bir şekilde boşluklu yapıların içerisine yerleşmiştir. (b) ve (c) görselinde Cu parçaları Al malzeme ile tam bir birleşme sağlayamamıştır. Numune görselinde bu durum açıkça görülmektedir. (d) görselinde girdap biçiminde çukur bir oluşmuş, Cu parçalar Al matris içerisinde düzensiz bir biçimde dağılmıştır. (e) görselinde ise bakır plakaların düzensiz dağılımı ve malzeme birleşiminde heterojen bir dağılım olduğu görülmektedir.



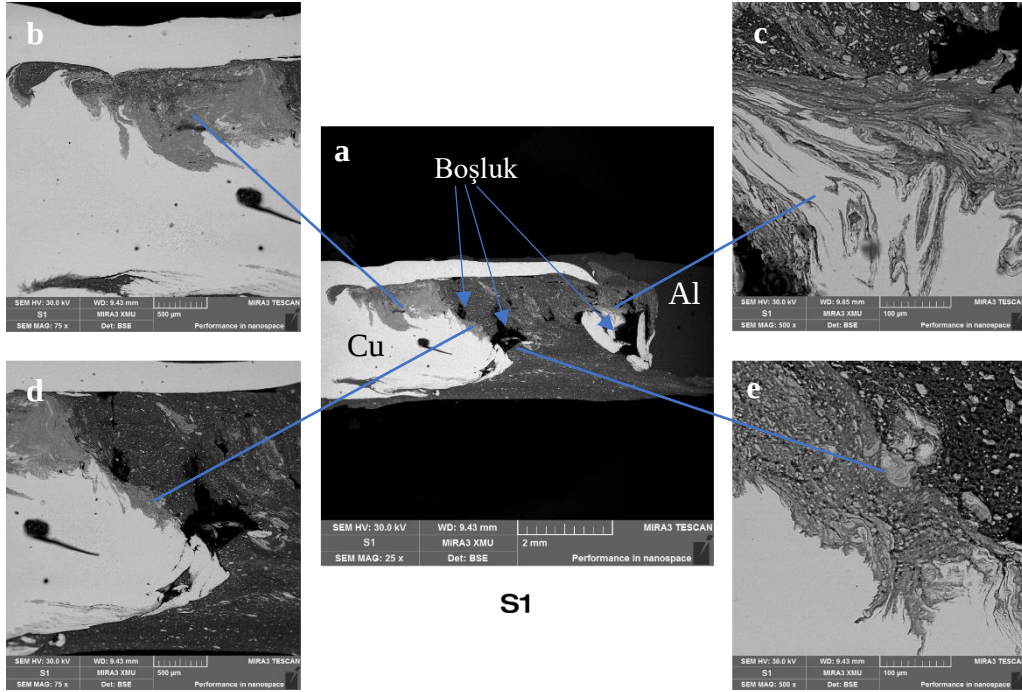
Şekil 6.23. T9 mikroyapı SEM görüntüleri.

1120 dev/dak ile yapılan kaynaklı birleştirmelerde düşük ilerleme hızlarında kaynak bölgesinde boşluk görülmezken ilerleme hızının artmasıyla boşluklu yapıların oluştuğu tespit edilmiştir. 1120 devirde elde edilen ısı ile malzemelerin çamurlaştığı fakat ilerleme hızının artmasıyla karışımların tam olarak gerçekleşmediği tespit edilmiştir.

6.2.2. Kare karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin incelenmesi

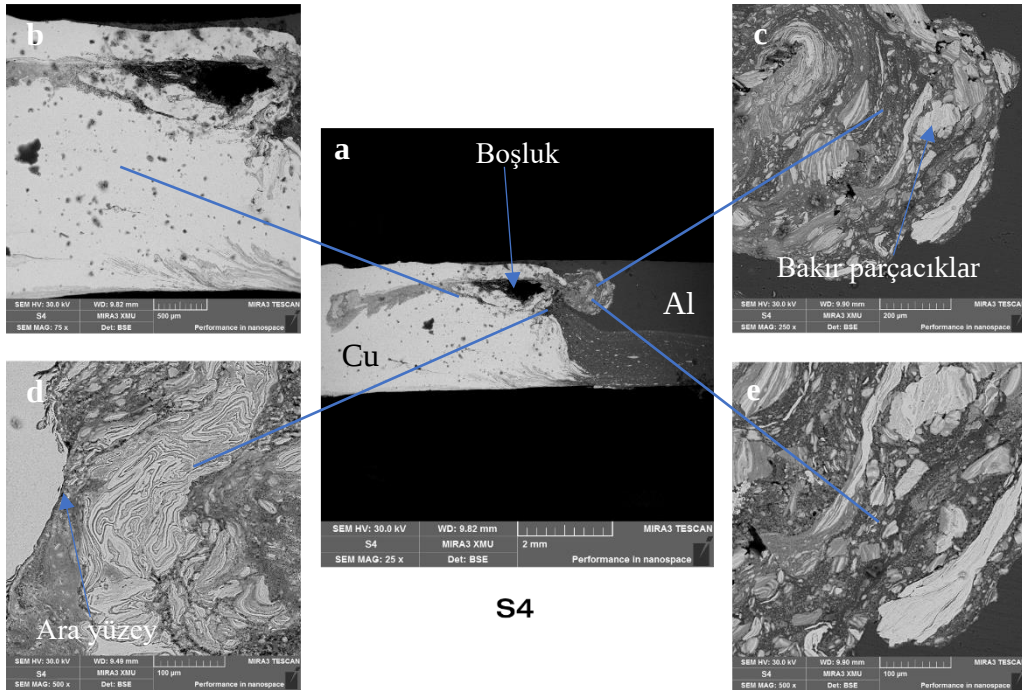
6.2.2.1. 710 dev/dak ile birleştirilen numunelerin mikroyapı değerlendirmesi

Kare uç kullanılarak 710 dev/dak ile birleştirilen S1 numunesine ait mikroyapı SEM görüntüleri Şekil 6.24.'te verilmiştir. Şekil 6.24. (a)'da kaynak bölgesinde her iki metalin kısmen karışım sağladığı bölgeler görülmektedir. Kaynak metalini bu numunede yeterli düzeyde düzeyde birleşmemiştir. Kaynak metalinde boşluklu yapılar meydana geldiği için kaynaklı birleştirme istenilen düzeyde gerçekleşmemiştir. Şekil 6.24. (b) görüntülerinde AA1050'nin Cu içerisinde dağıldığı görülmektedir. (c)'de bakırın alüminyum matris içerisinde dağıldığı fakat boşluklu yapılar net biçimde görülmektedir. (d-e)'de arayüz geçişleri ve malzemelerin birbirleriyle tutunmalarının iyi olduğu fakat yapının düzensiz bir karışım sergilediği görülmektedir.



Şekil 6.24. S1 mikroyapı SEM görüntüleri.

Şekil 6.25. S4 (a) mikroyapı görüntülerinde zayıf bir bağlantı olduğu Birleşmenin tam olarak sağlanamadığı boşluklu bir yapı görülmektedir.

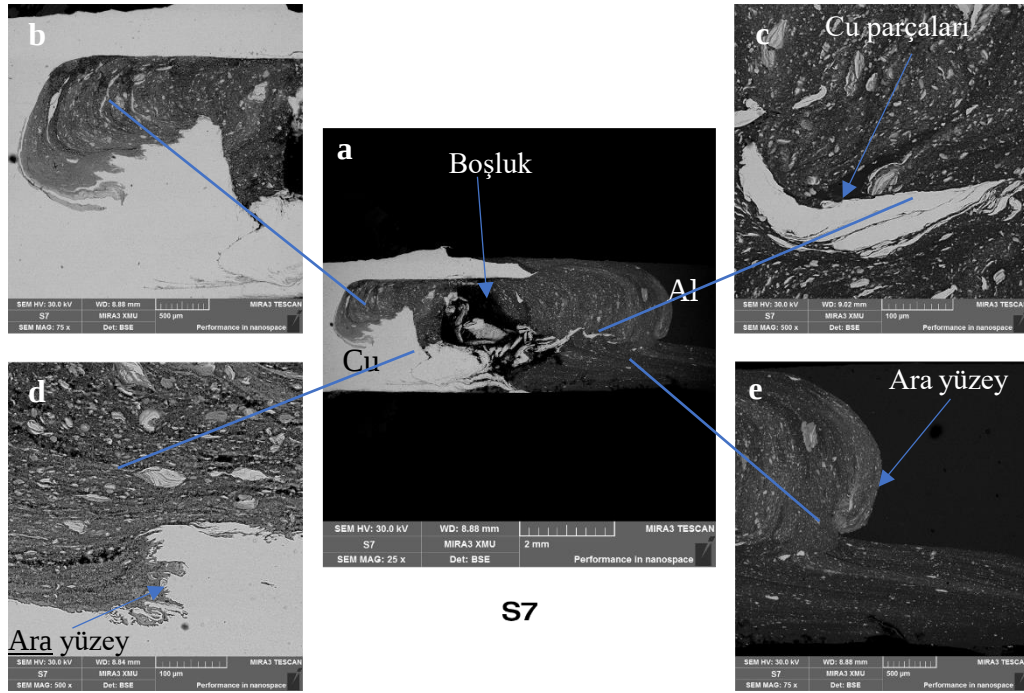


Şekil 6.25. S4 mikroyapı SEM görüntüleri.

AA1050 içerisinde tam karışım sağlayamamış iri boyutta bakır parçalar mevcuttur. (b) ve (d)'de Cu içerisinde AA1050 malzemenin dağılımı sergilediği

(c) ve (e)'de Cu parçacıkları AA1050 içerisinde dağılmadığı iri parçalar halinde kaldığı görülmektedir.

Şekil 6.26. S7 mikroyapı (a) görüntülerinde bakırca zengin bölgeler mevcut fakat bu bölgelerde bakır alüminyum içerisinde parçalanmamış bütün halde durmaktadır. AA1050 ve Cu arasında geçişler görülmekte fakat malzemeler arasında tam bir tutunma oluşmamıştır. Şekil 6.26. (b)'de malzemenin homojen bir dağılım sergilediği bu kısımdaki tutunmaların iyi düzeyde olduğu görülmektedir. (c)'de boşluklu yapılar ve iri bakır parçaları görülmektedir. (d)'de AA1050 malzemenin Cu malzeme içerisinde mukavemeti artıracak biçimde dağıldığı görülmektedir. (e)'de ise homojen bir dağılım gerçekleştiği görülmektedir.

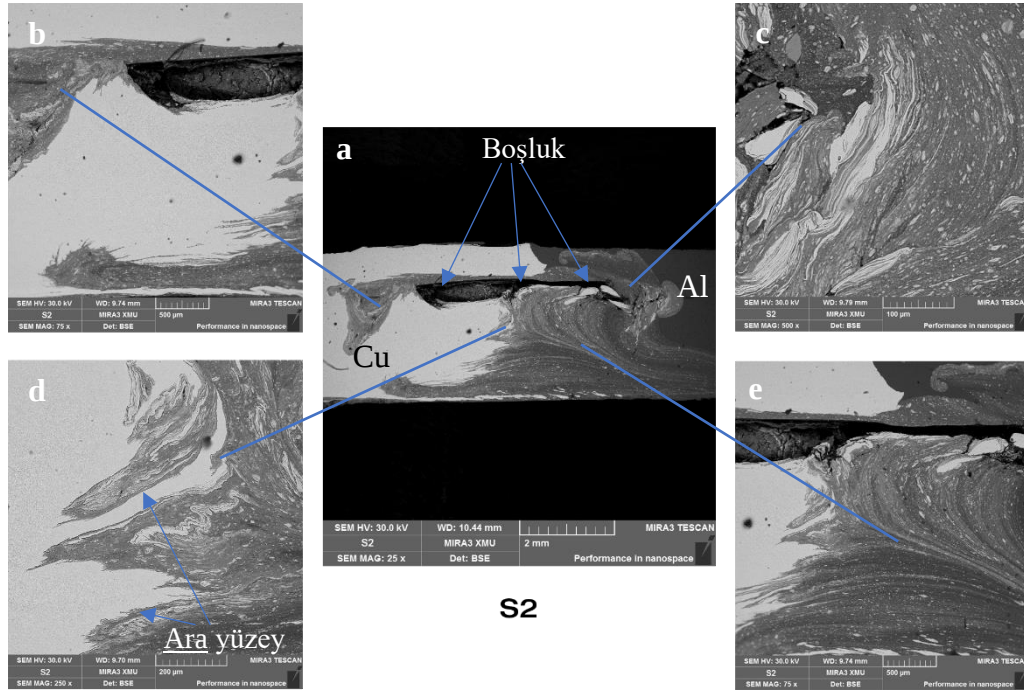


Şekil 6.26. S7 mikroyapı SEM görüntüleri.

S7 kaynak numunesinde S1 ve S4 numunesine göre daha büyük bir boşluk meydana gelmiştir. Bunun sebebi; 710 dev/dak kare ucla birleştirilen bu numunelerde devir sayısının düşüklüğünden kaynaklanan ısı girdisinin az olmasından dolayı metallerin birbirleriyle karışacak seviyede yumuşamadığını göstermektedir. Yetersiz devir sayısı nedeni ile yeterli ısıya ulaşılmaması ve aynı zamanda artan ilerleme hızının kaynak bölgesinde tam karışım sağlayamadığı SEM görüntülerinde net olarak görülmektedir.

6.2.2.2. 900 dev/dak ile birleştirilen numunelerin mikroyapı değerlendirmesi

Şekil 6.27. Kare uçla 900 dev/dak dönme hızı ile birleştirilen S2 numunesine ait mikroyapı SEM görüntüleri verilmiştir. S2 numunesinin mikroyapı (a) görüntülerinde bakır malzemenin alüminyum içerisinde homojen bir dağılım sergilediği malzeme geçişlerinin gayet iyi olduğu fakat okla gösterilen kısımda uzun bir boşluk meydana geldiği görülmektedir.

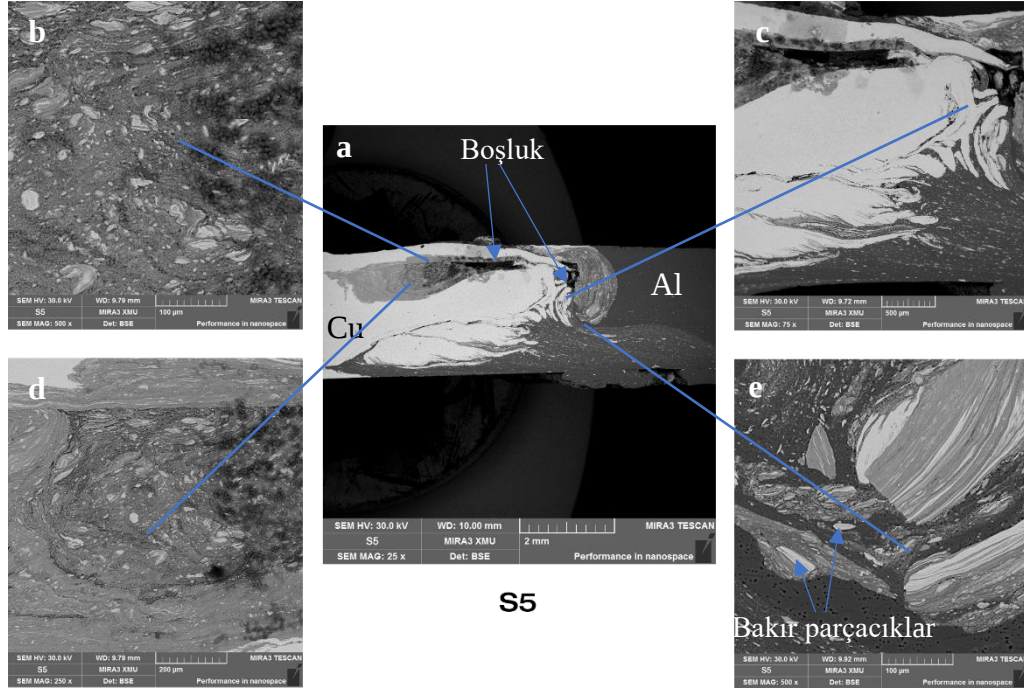


Şekil 6.27. S2 mikroyapı SEM görüntüleri.

Şekil 6.27. (b)'de AA1050 ve Cu malzeme geçişlerinin ve ara yüzeylerdeki bağlantıların iyi düzeyde olduğu fark edilmektedir. (c)'deki karışımın iyi olduğu fakat boşluklu yapıdan dolayı malzeme geçişinde kusurların olduğu görülmektedir. (d-e)'de ise malzeme karışımlarının ve bağlantılarının iyi olduğu ve arayüz tutunmalarının iyi bir biçimde gerçekleştiği görülmektedir.

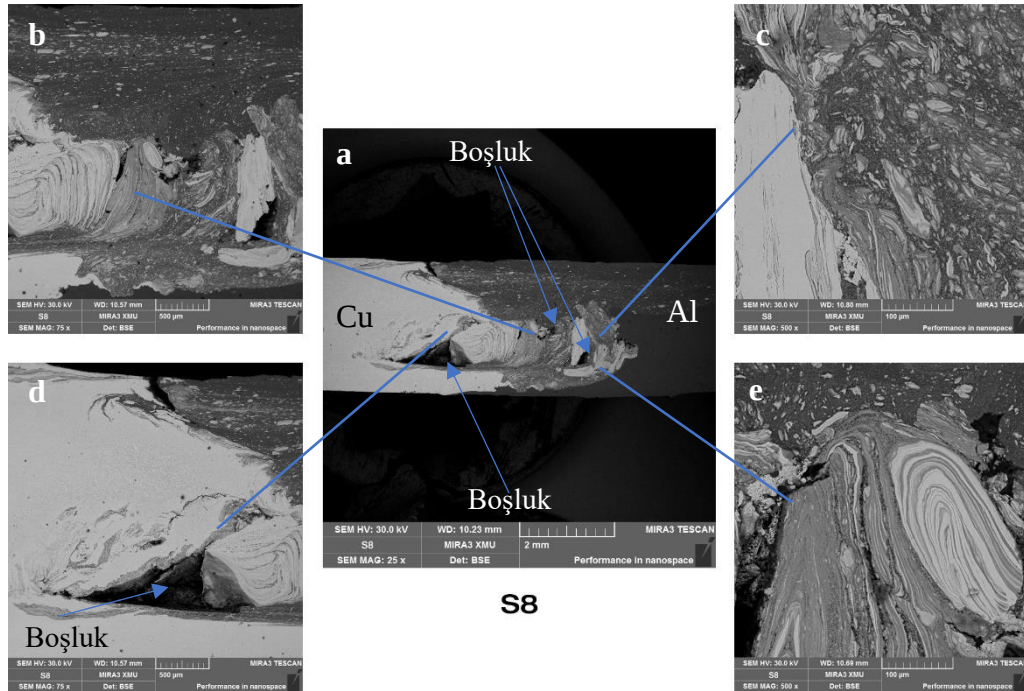
Şekil 6.28. (a)'da S5 mikroyapı görüntülerinde karışımın dalgalı bir şekil aldığı, malzemelerin birbirleriyle tutunmalarının iyi olduğu fakat kaynak bölgesinde gözenek ve boşlukların olduğu görülmektedir. Bu boşlukların kaynak mukavemetini etkileyecek büyüklükte olduğu görülmektedir. Şekil 6.28. (b-d)'de malzeme karışımlarının iyi düzeyde olduğu açık bir biçimde

görülmektedir. (c-d)'de boşluklu kısımlara yakın yerlerde malzeme karışımlarının iri taneler şeklinde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.28. S5 mikroyapı SEM görüntüleri.

Şekil 6.29. S8 mikroyapı (a) görüntülerinde ise karışım bölgesinde karışmayan bölgeler ve boşluklu yapıların olduğu görülmektedir.



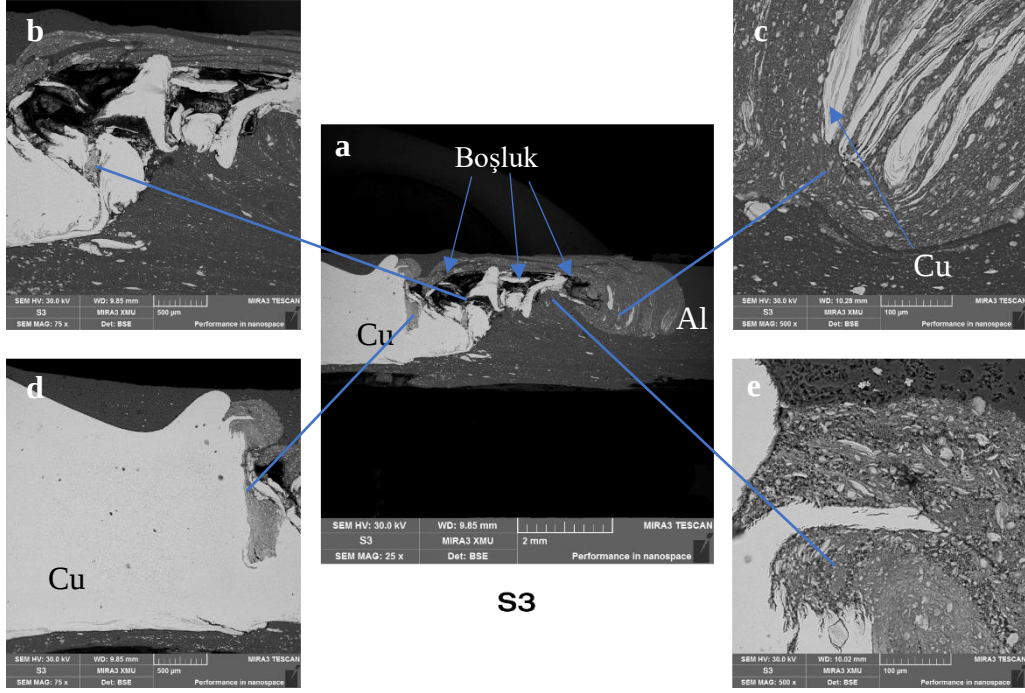
Şekil 6.29. S8 mikroyapı SEM görüntüleri.

(b) görüntüsünün üst kısmında Al matris içerisinde Cu parçacıkları görülürken orta ve alt kısımlarda karışmayan iri bakır taneleri görülmektedir. (c-e)'de boşluklu yapı etrafında karışmanın tam gerçekleşmediği, parmak izine benzer şekilde AA1050-Cu malzemenin tam karışmadığı görülmektedir. (d)'de ise bakır malzeme tarafında büyük boşluk oluşmuş bakır malzemenden koparılan parçaların yerini Al malzeme dolduramamıştır.

Kare uçla 900 dev/dak dönme hızı ile birleştirilen S2, S5 ve S8 numunelerinde kaynak bağlantılarının ve metal geçişlerinin üçgen karıştırıcı uçla yapılan T2, T5 ve T8 numunelerindeki kadar iyi seviyede olmadığı alüminyum içerisinde bakır parçacıklarının homojen dağılım gösteremediği tespit edilmiştir. Üçgen uç ile aynı devirde yapılan kaynaklarda daha iyi karışımların elde edildiği mikroyapı incelemelerinde de gözükmemektedir. Üçgen uçlu karıştırıcının köşe açılarının 60° ve kare uçlu karıştırıcının köşe açısının 90° olduğu göz önünde bulundurulursa 60°'lik açının daha sivri ve keskin olmasından dolayı malzemeyi 90°'lik açığa göre daha iyi koparıp, taşıyıp, karıştırdığı görülmektedir.

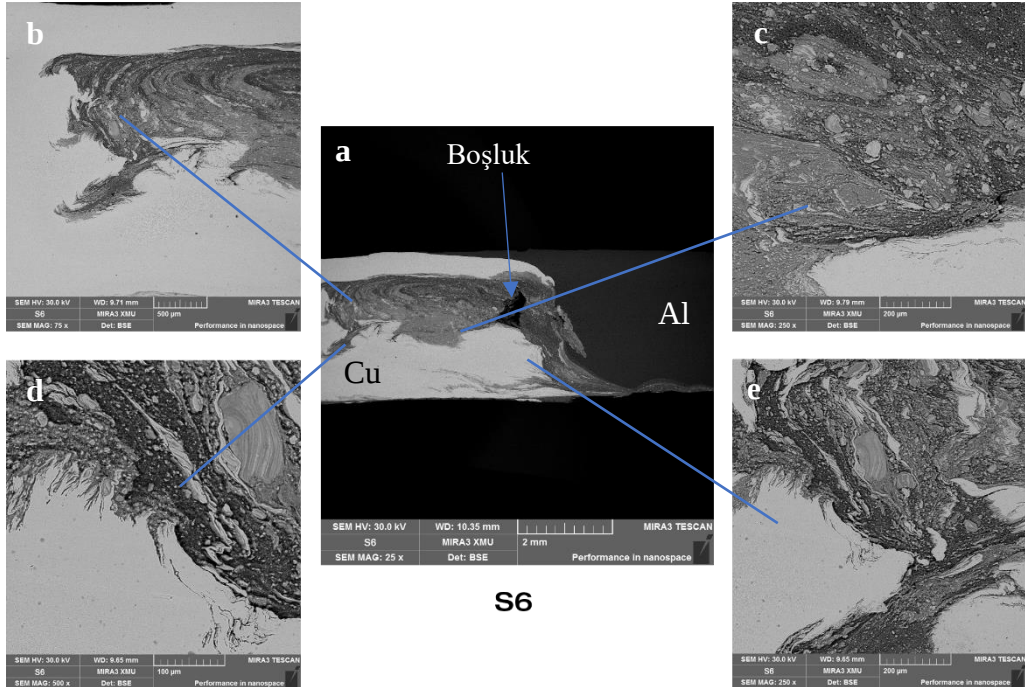
6.2.2.3. 1120 dev/dak ile birleştirilen numunelerin mikroyapı değerlendirmesi

Şekil 6.30. Kare uçla 1120 dev/dak dönme hızı ile birleştirilen S3 numunesine ait mikroyapı SEM görüntüleri verilmiştir. (a) numunesinin mikroyapı görüntülerinde kare karıştırıcı uçla yapılan SKK işleminde bakır malzemeden kopan parçaların Al matris içerisinde tam karışım sağlamadığı ve bütün parçalar şeklinde kaldığı görülmektedir. Aynı şekilde malzeme ara yüzey geçişlerinin de iyi düzeyde olmadığı ve kaynak bölgesinde boşluklar bulunduğu tespit edilmiştir. (b) SEM görüntüsünde boşluklu yapının içerisinde bütün şeklinde Cu parçaları bulunmaktadır. Kaynak bölgesinde metal birleşmeleri mevcuttur ama boşluklu yapı kaynak kabiliyetini zayıflatmıştır. (c)'de şerit halinde uzanan bakır parçalarının Al içerisine yerleştiği, bu kısımda metal karışımının iyi durumda olduğu görülmektedir. (d)'de metaller arasında geçişler olsa da tam bir tutunma olmadığı görülmektedir. (e)'de metal geçişlerinin görüldüğü bakır parçaların alüminyum matris içerisinde dağıldığı görülmektedir.



Şekil 6.30. S3 mikroyapı SEM görüntüleri.

Şekil 6.31. (a) S6 mikroyapı SEM görüntülerinde karışım bölgesinde metal geçişleri görülmektedir. Ara yüzeylerinde karışımların olduğu bakır parçacıklarının alüminyum matris içerisinde irili ufaklı dağıldığı görülmektedir.

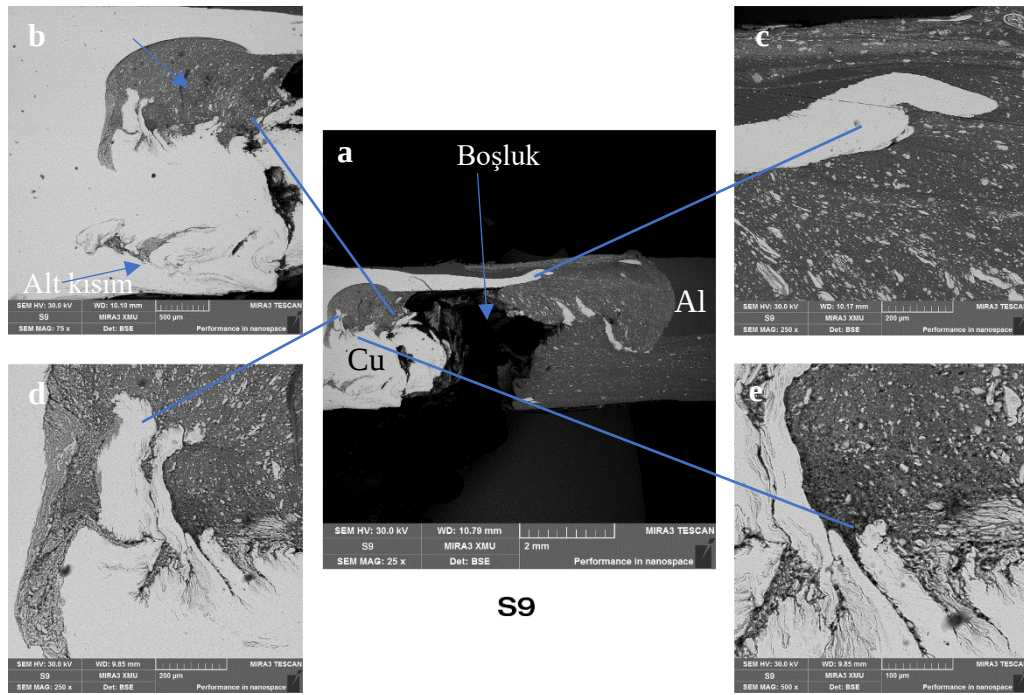


Şekil 6.31. S6 mikroyapı SEM görüntüleri.

(b) görüntülerinde AA1050 ve Cu metali arasında iyi bir karışımın olduğu metallar arasındaki tutunmalar net bir biçimde görülmektedir.

(c)'de Al matris içerisinde dağılmış bakır parçacıklarının olduğu ve arayüz bölgelerindeki geçişler görülmektedir. (d-e)'de ise Cu parçacıkların Al içerisindeki düzensiz dağılımı görülmektedir.

Şekil 6.32. mikroyapı SEM (a) görüntülerinde geniş bir boşluk olduğu görülmektedir. Alüminyum ve bakırın birleşim kısımlarındaki karışımların iyi derecede olduğu fakat boşluklu yapının büyüklüğü nedeniyle iyi bir kaynak elde edilemediği görülmektedir. (b) görüntüsünün üst kısımlarında iyi bir karışım elde edilmişken alt kısımlarında kılcal şekilde malzeme geçişleri görülmektedir. (c)'de Cu malzeme Al içerisine uzun bir hat şeklinde dalmış ve küçük bakır parçacıklar Al matris içerisinde dağılmış durumdadır. (d-e) Al matris içerisinde iri bakır parçacıklar görülmektedir.



Şekil 6.32. S9 mikroyapı SEM görüntüleri.

Kare uçla 1120 dev/dak ile yapılan SKK işleminde yüksek ilerleme hızlarda malzemenin iyi karışmadığı kaynak bölgesinde boşlukların görüldüğü, bu devirlerdeki kaynak işlemlerinde üçgen uçla yapılan SKK işlemlerinden elde edilen mikroyapı SEM görüntülerinin kare uçla yapılan SKK işlemlerinden elde edilen SKK işlemlerinden daha iyi görüldüğü tespit edilmiştir. Devir sayısının yüksekliği ile birlikte ilerleme hızı da artınca kaynakta boşlukların oluştuğu görülmüştür.

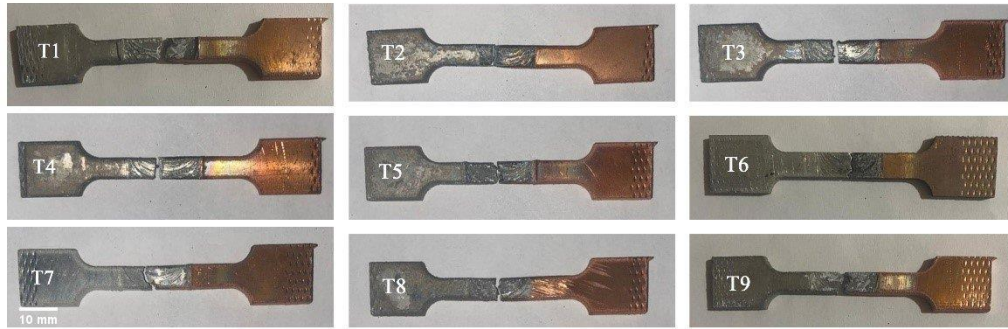
Sürtünme karıştırma kaynak işleminde ısı girdisi kaynak hızı ile ters orantılıdır. Yüksek kaynak hızı, yetersiz ısı girdisi üreteceğinden kaynaklı bağlantılarda arayüz yeterli düzeyde oluşmaz. Çok yüksek kaynak hızlarında daha düşük ısı girdisi oluşacağından Al-Cu malzemesinin uygun olmayan şekilde karışmasına ve kaynakta boşluk gibi kusurların oluşmasına neden olur. Daha yüksek kaynak hızlarında yetersiz malzeme akışı, birleşim yerlerinde boşlukların oluşmasına sebep olur. Son derece yüksek kaynak hızı da çok zayıf metalik bağ oluşturur. Hatasız bağlantı elde etmek için düşük kaynak hızı ve yüksek dönüş hızı önerilir. Birbirinden farklı metallerin fiziksel, kimyasal ve metalürjik özelliklerindeki farklılıklar nedeniyle kaliteli bir kaynak elde etmek için devir sayısı ve kaynak hızı arasında iyi bir korelasyon sağlanmalıdır.

6.3. Mekanik Deney Sonuçları

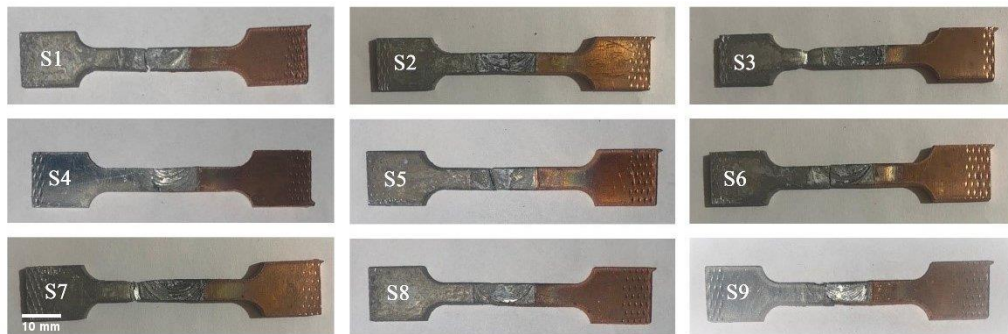
6.3.1. Çekme deneyi sonuçlarının incelenmesi

6.3.1.1. Kırık yüzey makroyapı incelemesi

Kaynaklı numunelerin çekme testi sonrasındaki makro görüntüleri Şekil 6.33. ve Şekil 6.34.'te verilmiştir.



Şekil 6.33. Üçgen uçla yapılan kaynaklara ait çekme numuneleri makro görüntüleri.



Şekil 6.34. Kare uçla yapılan kaynaklara ait çekme numuneleri makro görüntüleri.

Hem üçgen karıştırıcı uçla yapılan hem de kare karıştırıcı uçla yapılan SKK işlemine ait çekme testi numunelerinin makro görüntülerinde kopmaların kaynak bölgesinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. S3, S7 ve S9 çekme numunelerine ait makro görüntülerde kopmaların sünek bir biçimde, T2 numunesine ait makro görüntülerde sünek-gevrek biçimde diğer numunelerde ise gevrek bir biçimde gerçekleştiği görülmektedir.

Kaynaklı numunelerin çekme testi sonrasında elde edilen çekme mukavemeti, % uzama ve kaynak performans değerleri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Çekme deneyi sonuçları

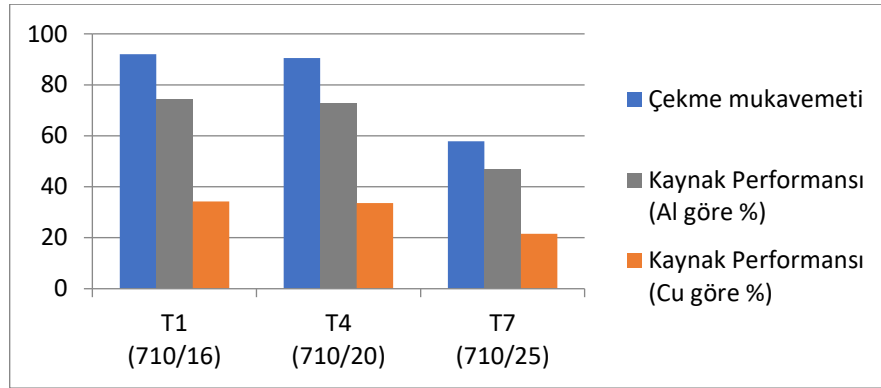
Deney Numunesi	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	Kaynak Performansı (Al göre %)	Kaynak Performansı (Cu göre %)
Al	124,000	11,81	-	-
Cu	269,000	13,89	-	-
T1	92,049	0,66682	74,23	34,22
T2	137,318	1,70761	110,74	51,05
T3	110,253	0,81527	88,91	40,99
T4	90,460	0,49205	72,95	33,63
T5	129,543	2,89074	104,47	48,16
T6	106,359	0,77362	85,77	39,54
T7	57,900	0,43984	46,70	21,52
T8	126,461	1,40344	101,98	47,01
T9	105,280	0,74819	84,90	39,14
S1	37,527	0,23239	30,26	13,95
S2	125,146	1,62362	100,09	46,52
S3	98,180	0,57847	79,18	36,50
S4	50,695	0,42340	40,88	18,85
S5	123,558	2,04666	99,64	45,93
S6	94,880	1,21066	76,51	35,27
S7	71,883	0,39183	57,97	26,72
S8	101,742	0,91703	82,05	37,82
S9	88,116	0,77755	71,06	32,76

Ana malzemelerin çekme mukavemet değerleri Al için 124 MPa, Cu için de 269 MPa olarak verilmiştir. En yüksek çekme mukavemeti üçgen karıştırıcı uç ile

yapılan işlemlerde T2 numunesinde 137,318 MPa, en düşük çekme mukavemeti ise T7 numunesinde 57,900 MPa değeri elde edilmiştir. Kare karıştırıcı uç ile yapılan işlemlerde en yüksek çekme mukavemeti S2 numunesinde 125,146 MPa, en düşük çekme mukavemeti ise S1 numunesinde 37,527 MPa olarak elde edilmiştir. Kaynaklı numunelerin % kaynak performansı belirlenirken çekme mukavemet değeri daha düşük olan alüminyum ana metaline göre belirlenmiştir. Kaynak Performansı = (Kaynaklı numunenin çekme mukavemeti/Alüminyum (Bakır) ana metalinin çekme mukavemeti) × 100

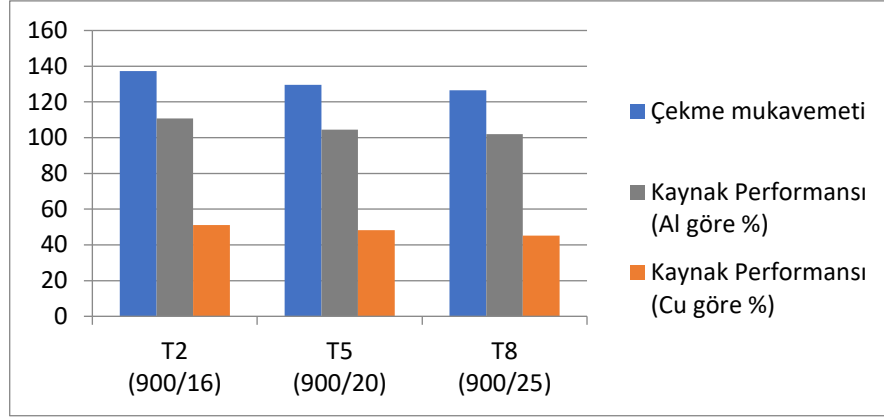
6.3.1.2. Üçgen karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin çekme deney sonuçlarının incelenmesi

Üçgen karıştırıcı uçla 710 dev/dak ile kaynaklanan numunelere ait çekme deney sonuçlarını gösteren grafik Şekil 6.33.'de verilmiştir.



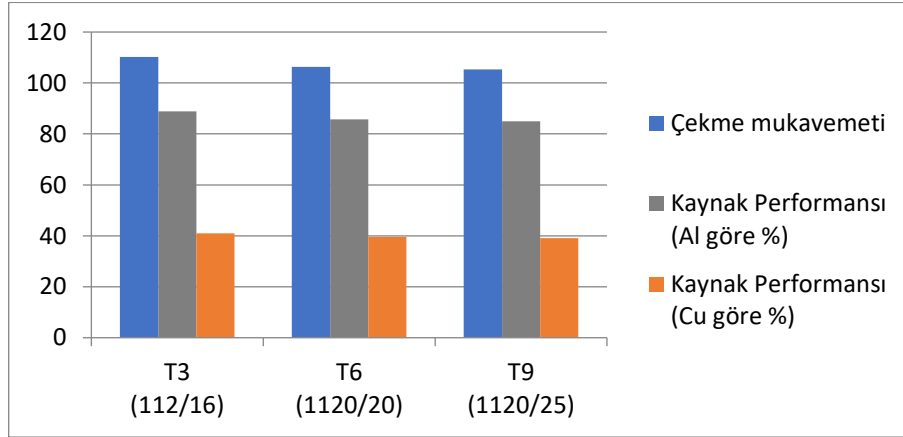
Şekil 6.35. Üçgen karıştırıcı uçla 710 dev/dak ile yapılan numunelere ait çekme deney grafiği.

Sabit devir sayısı altında birleştirilen T1 (92,049 MPa), T4 (90,460 MPa), T7 (57,900 MPa) numunelerinde çekme mukavemetinin her iki malzeme çifti AA1050 ve Cu malzeme çekme mukavemetine göre daha düşük olduğu, ilerleme hızının artması ile birlikte de çekme mukavemet değerinin daha da düştüğü tespit edilmiştir. Bunun nedeni; düşük devir sayısına bağlı olarak kaynak bölgesinde yeterli ısının oluşamaması, birleştirilecek malzemelerin çamurumsu hale gelemeyerek, yeterli birleşmeyi sağlayamaması ve ilerleme hızının artmasıyla da istenilen difüzyonun gerçekleşmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.36. Üçgen karıştırıcı uçla 900 dev/dak ile yapılan numunelere ait çekme deney grafiği.

Şekil 6.34.'te verilen T2 (137,318 MPa), T5 (129,543 MPa), T8 (126,461 MPa) numunelerinde çekme mukavemetinin AA1050 malzemenin çekme mukavemetine göre yüksek, Cu malzeme çekme mukavemetine göre düşük olduğu tespit edilmiştir. İlerleme hızının artması ile birlikte bu numunelerde de çekme mukavemet değeri de kısmen düşmüştür. Bu durum, yeterli sıcaklık değerine ulaşan kaynak bölgesinde hızlı ilerleme sebebiyle istenen difüzyonun gerçekleşmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



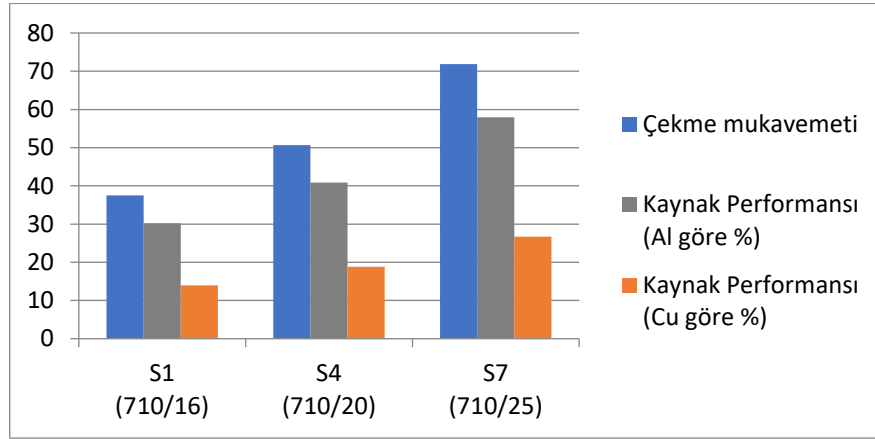
Şekil 6.37. Üçgen karıştırıcı uçla 1120 dev/dak ile yapılan numunelere ait çekme deney grafiği.

Şekil 6.35.'te verilen T3 (110,253 MPa), T6 (106,359 MPa), T9 (105,280 MPa) numunelerinde çekme mukavemetinin her iki malzeme çifti AA1050 ve Cu malzeme çekme mukavemetine göre düşük olduğu tespit edilmiştir. İlerleme hızının artması ile birlikte çekme mukavemet değerlerinde az da olsa düşme olmuştur. Burada yüksek devirden dolayı malzemenin çok ısınma ve fazla

çamurlaşma neticesinde yeterli sürede katılaşmadığı ve ilerleme hızındaki artışla da istenilen difüzyonun tam olarak gerçekleşmediği ve çekme mukavemetinde az da olsa düşüşlere sebep olduğu düşünülmektedir.

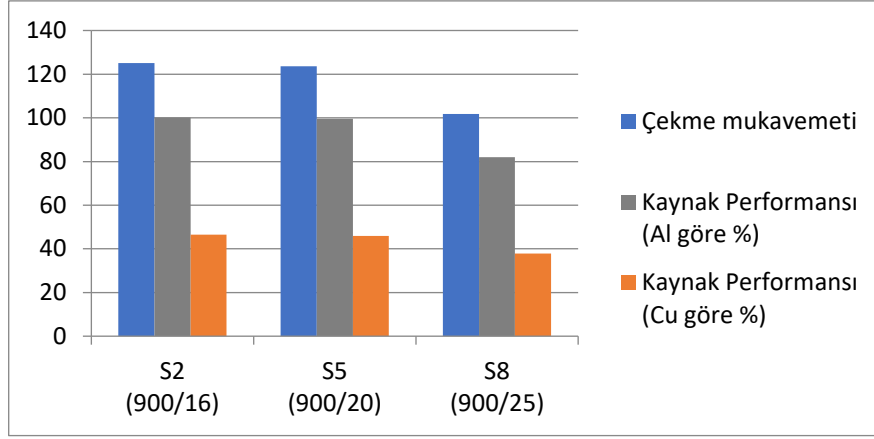
6.3.1.3. Kare karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin çekme deney sonuçlarının incelenmesi

Kare karıştırıcı uçla 710 dev/dak ile kaynaklanan numunelere ait çekme deney sonuçlarını gösteren grafik Şekil 6.36.'da verilmiştir. S1 (37,527 MPa), S4 (50,695 MPa), S7 (71,883 MPa) numunelerinde çekme mukavemetinin her iki malzeme çifti AA1050 ve Cu malzeme çekme mukavemetine göre çok düşük olduğu tespit edilmiştir.



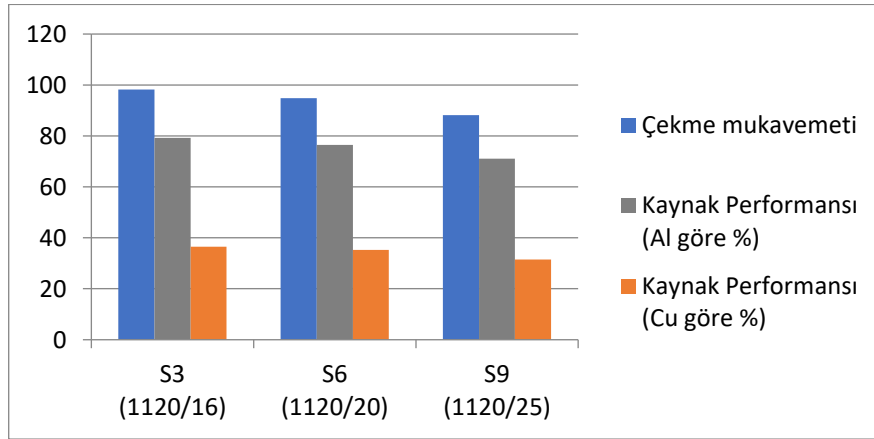
Şekil 6.38. Kare karıştırıcı uçla 710 dev/dak ile yapılan numunelere ait çekme deney grafiği.

Bu SKK işleminde en düşük çekme mukavemeti 37,527 MPa ile S1 numunesinde elde edilmiştir. Düşük devir, düşük ilerleme hızında böyle bir sonucun aynı parametrelerle yapılan üçgen karıştırıcı uca göre mukavemetinin çok düşük çıkmasının sebebi kare karıştırıcı ucun düşük devir ve düşük ilerleme hızında ortaya koyduğu kötü performans olarak değerlendirebiliriz. Burada ilerleme hızının artması ile birlikte çekme mukavemet değerlerinde artış görülmüştür. Bu durum düşük devir ve yüksek ilerleme hızında kare karıştırıcı ucun mukavemeti artırıcı etki gösterdiği şeklinde değerlendirilebilir.



Şekil 6.39. Kare karıştırıcı uçla 900 dev/dak ile yapılan numunelere ait çekme deney grafiği.

Şekil 6.37.'de verilen S2 (125,146 MPa), S5 (123,558 MPa), S8 (101,742 MPa) numunelerinde çekme mukavemetinin AA1050 malzemeye göre yeterli derecede, Cu malzemeye göre ise çekme mukavemetinin düşük olduğu tespit edilmiştir. İlerleme hızının artması ile birlikte çekme mukavemet değerlerinde düşüş görülmüştür. Bu durum yeterli sıcaklık değerine ulaşılan kaynak bölgesinde hızlı ilerleme nedeniyle malzemelerin birleşmesi için yeterli sürenin ve istenen difüzyonun gerçekleşmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



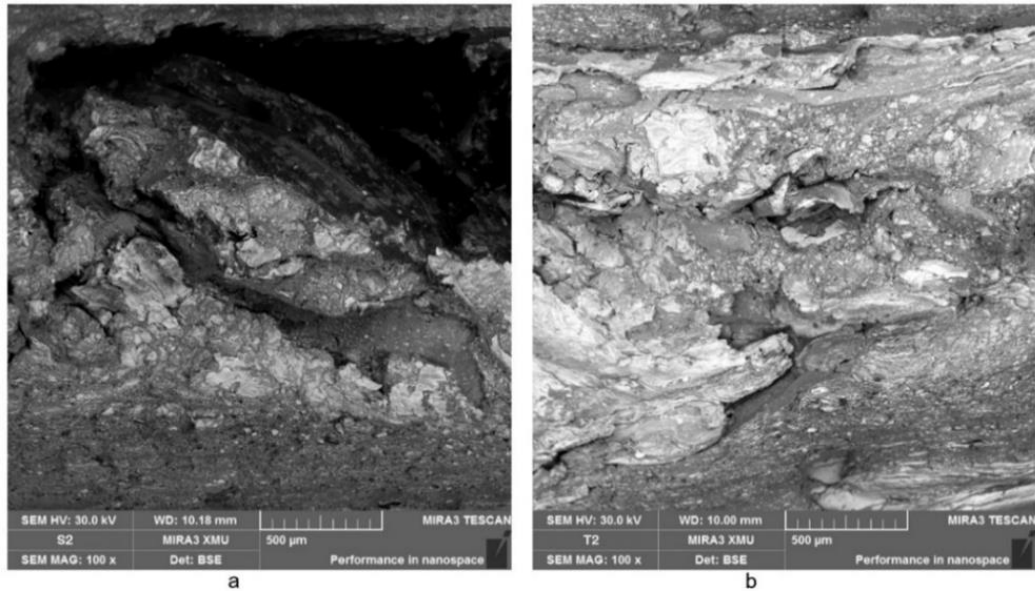
Şekil 6.40. Kare karıştırıcı uçla 900 dev/dak ile yapılan numunelere ait çekme deney grafiği.

Şekil 6.38.'de verilen S3 (98,180 MPa), S6 (94,880 MPa), S9 (88,116 MPa) numunelerinde çekme mukavemetinin her iki malzeme çifti AA1050 ve Cu malzeme çekme mukavemetine göre düşük olduğu tespit edilmiştir. İlerleme hızının artması ile çekme mukavemet değerlerinde de düşüş görülmüştür. 900 dev/dak ile kaynaklanan numuneler için söylemiş olduğumuz; kaynak

bölgesinde yeterli ısı oluşmuş fakat ilerleme hızı nedeniyle malzemelerin birleşmesi için yeterli süre ve istenen difüzyon gerçekleşmemesinden kaynaklanmaktadır.

6.3.1.4. Kırık yüzey mikroyapı incelemesi

Şekil 6.39. da Üçgen karıştırıcı uçla birleştirilen T2 ve kare karıştırıcı uçla birleştirilen S2 numunesinin çekme testi sonucunda kırılan yüzeylerine ait mikroyapı SEM görüntüleri verilmiştir. Kaynak makro görüntüleri ve çekme deneyi sonuçlarına baktığımızda özellikle üçgen uçla birleştirilen T2 ve kare uçla birleştirilen S2 numunelerinin çekme mukavemet değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.



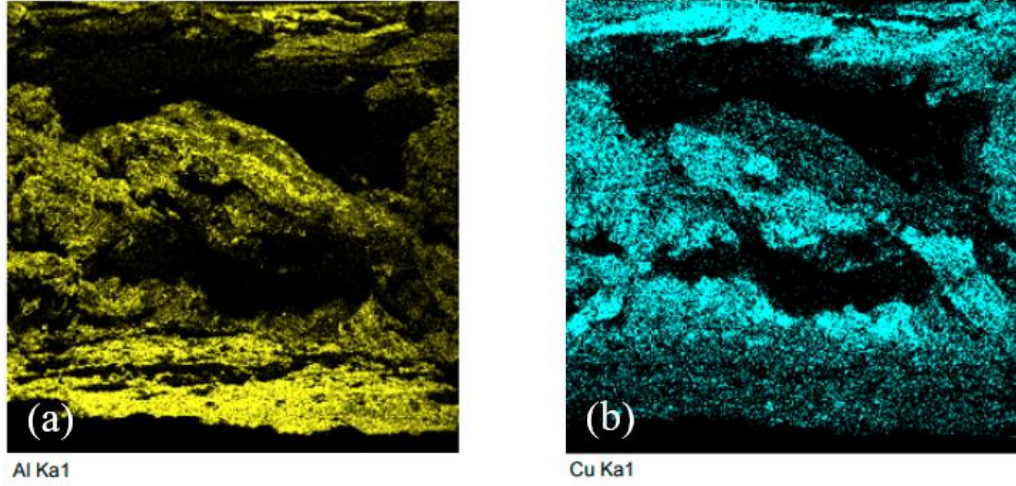
Şekil 6.41. (a) S2 ve (b) T2 çekme numunesinin kırık yüzey mikroyapı SEM görüntüsü.

Şekil 6.41.'de kaynak kesitinden elde edilen mikroyapı analizlerinden de anlaşılacağı üzere malzemelerin birleşme noktasında AA1050 ve Cu malzemenin yeniden kristalleşen bölgesi ile termomekanik olarak etkilenen bölge arasında karışmaların varlığı net olarak görülmektedir. Bakır tarafındaki kırılma alanında görülen büyük miktarda farklı boyutlardaki çukurlar, kaynaklı bölgede sünek kırılma olduğunu gösterir. Aslında, bu kısımda görülen çeşitli gamzeler, malzemelerin plastik deformasyona uğramasının bir sonucudur ve numunenin gerilme mukavemetini güçlendiren bir durumdur. Malzemelerin birbirleriyle olan tutunmaları ve çekme testi sonunda oluşan kırık yüzey

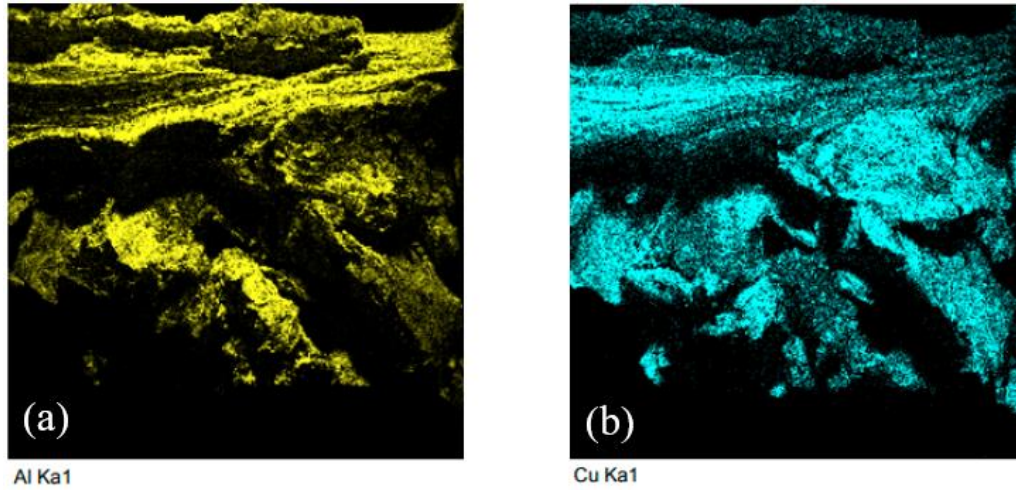
boşlukları SKK işleminde AA1050-Cu arasında malzeme geçişlerinin yeterli düzeyde olduğunu göstermektedir.

6.3.1.5. Çekme deneyi sonrası numunelerin elementel mapping analizi

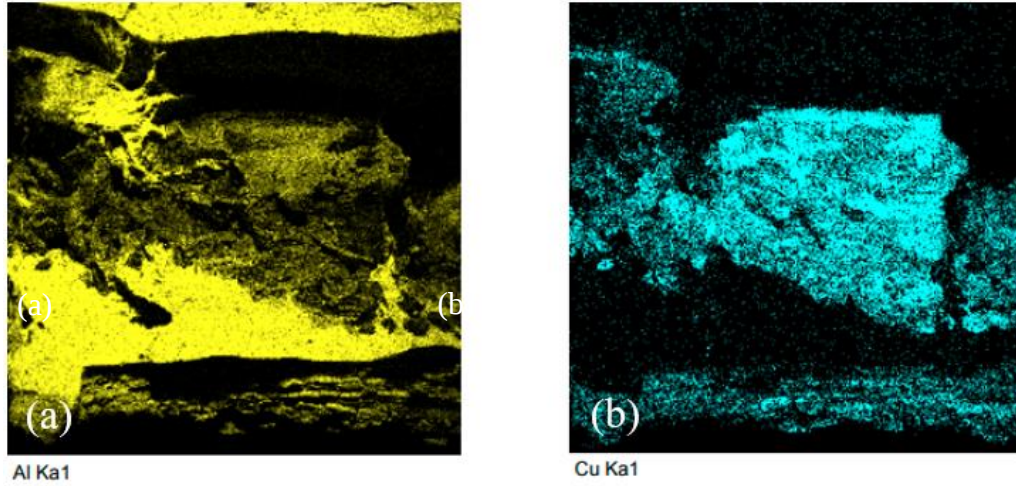
Şekil 6.42.-6.45'te numunelerin çekme testi sonrası elementel mapping analizleri verilmiştir. Yapılan kırık yüzey incelemelerinde yer yer Al ve Cu atomları dağılım göstermiştir.



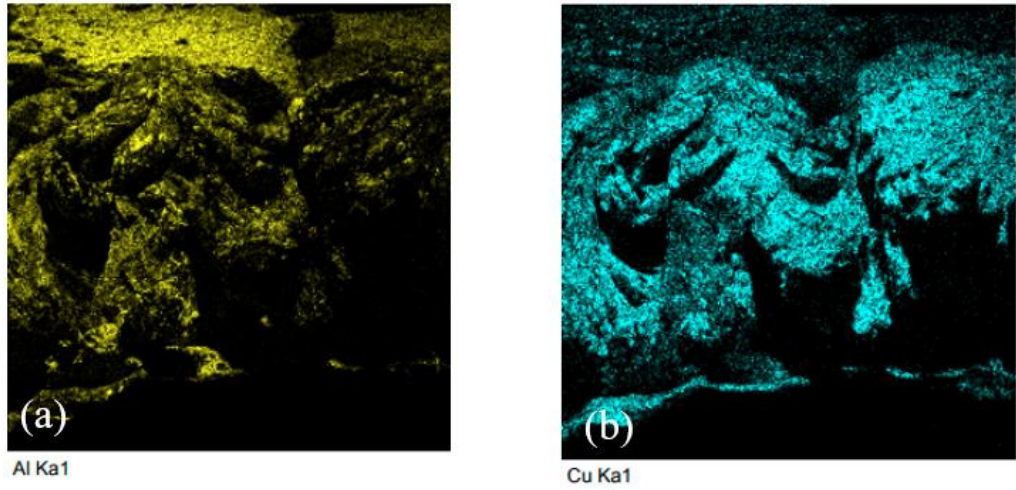
Şekil 6.42. S2 numunesinin elementel mapping haritası.



Şekil 6.43. S5 numunesinin elementel mapping haritası.



Şekil 6.44. T2 numunesinin elementel mapping haritası.



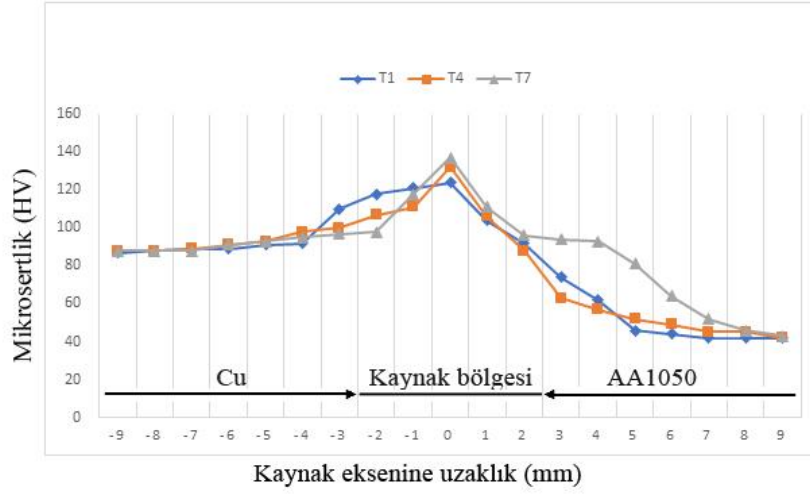
Şekil 6.45. T5 numunesinin elementel mapping haritası.

6.3.2. Mikrosertlik deneyi sonuçlarının incelenmesi

AA1050 ve Cu malzemenin üçgen ve kare uç ile 710, 900, 1120 dev/dak dönme hızı ve 16, 20, 25 mm/dak ilerleme hızında yapılan SKK ile birleştirilen numunelerin kesit bölgesi boyunca gerçekleştirilen mikrosertlik sonuçları grafiklerle gösterilmiştir. AA1050 malzemenin sertlik değeri 42,5 HV ve Cu malzemenin sertlik değeri 88,21 olarak tespit edilmiştir.

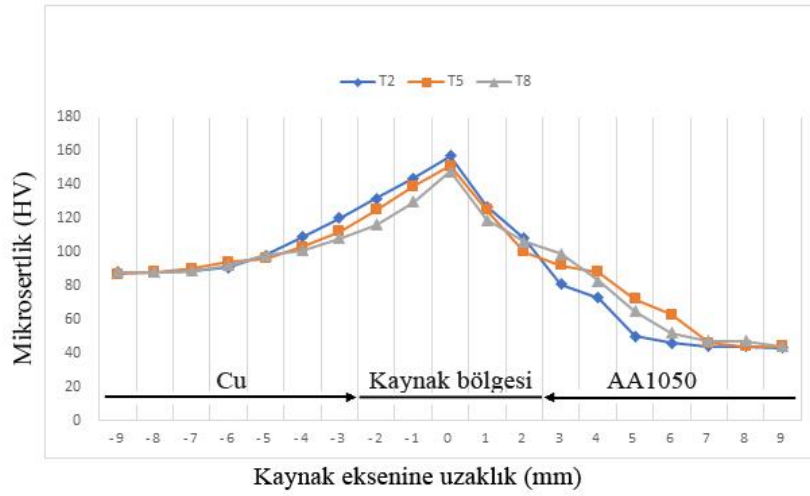
6.3.2.1. Üçgen karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin mikrosertlik incelenmesi

Şekil 6.46.-6.48 de üçgen uçla yapılan numunelere ait mikrosertlik deney sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.46. Üçgen uçla 710 dev/dak ile yapılan T1, T4 ve T7 numunelerinin mikrosertlik grafiği.

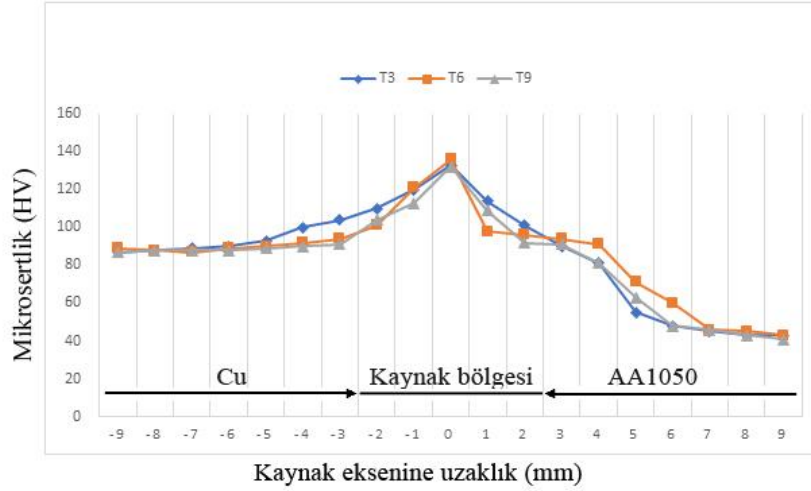
710 dev/dak dönme hızında T1, T4 ve T7 numunelerinin mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 6.46.'da verilmiştir. T1 numunesi incelendiğinde kaynak bölgesinde en yüksek sertliğin 124 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 101 HV ve AA1050 tarafında ise 67 HV olduğu görülmüştür. Bu numunede ısı girdisi düşük olduğundan malzemelerin sünek bir davranış sergilediği ve sertlik değerinin düşük olduğu düşünülmektedir. T4 numunesine ait malzemenin en yüksek sertlik değeri 132 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 100 HV ve AA1050 tarafında ise 68 HV olduğu görülmüştür. T7 numunesine malzemenin en yüksek sertlik değeri 137 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 99 HV ve AA1050 tarafında ise 82 HV olduğu görülmüştür. İlerleme hızının artmasıyla birlikte KM'de sertlik değerleri yükselmiş, Cu tarafında sertlik değerlerinin düştüğü AA1050 tarafında ise arttığı görülmüştür.



Şekil 6.47. Üçgen uçla 900 dev/dak ile yapılan T2, T5 ve T8 numunelerinin mikrosertlik grafiği.

900 dev/dak dönme hızında T2, T5 ve T8 numunelerinin mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 6.47.'de verilmiştir. T2 numunesi incelendiğinde kaynak bölgesinde en yüksek sertliğin 157 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 112 HV ve AA1050 tarafında ise 77 HV olduğu görülmüştür. T5 numunesinde kaynak bölgesinde en yüksek sertliğin 151 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 109 HV ve AA1050 tarafında ise 83 HV olduğu, T8 numunesinde kaynak bölgesinde en yüksek sertliğin 148 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 106 HV ve AA1050 tarafında ise 81 HV olduğu görülmüştür. Devir sayısının artmasıyla ısı girdisi artmış ilerleme hızındaki artışla ise ısı girdisi azaldığı için malzemenin sertlik değerleri T2'de artış göstermiş T5 ve T8 numunelerinde düşüş görülmüş ve bu

durumda malzeme sünek-gevrek bir davranış göstermiştir.

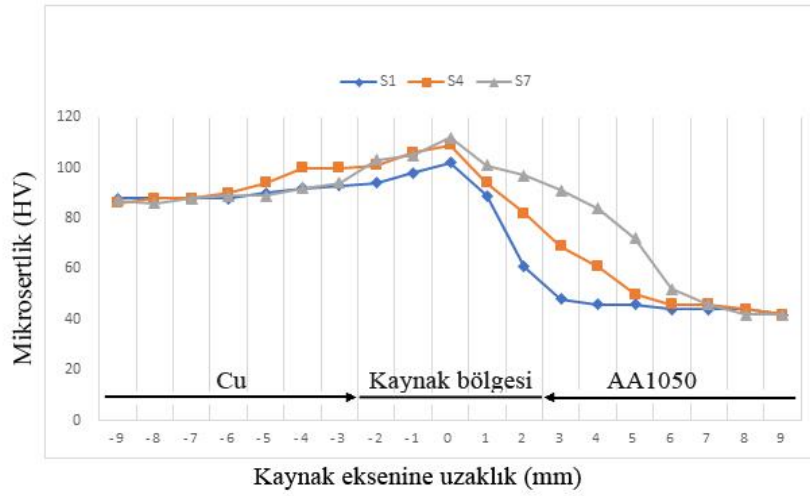


Şekil 6.48. Üçgen uçla 1120 dev/dak ile yapılan T3, T6 ve T9 numunelerinin mikrosertlik grafiği.

1120 dev/dak dönme hızında T3, T6 ve T9 numunelerinin mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 6.48.'de verilmiştir. T3 numunesi incelendiğinde kaynak bölgesinde en yüksek sertliğin 133 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 102 HV ve AA1050 tarafında ise 75 HV olduğu görülmüştür. T6 numunesine ait malzemenin en yüksek sertlik değeri 136 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 99 HV ve AA1050 tarafında ise 78 HV olduğu görülmüştür. T9 numunesine malzemenin en yüksek sertlik değeri 132 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 97 HV ve AA1050 tarafında ise 75 HV olduğu görülmüştür. Isı girdisi daha da arttığı ve tane yapısı büyüdüğü için malzeme gevrek bir davranış sergilemiş ve sertlik artmıştır.

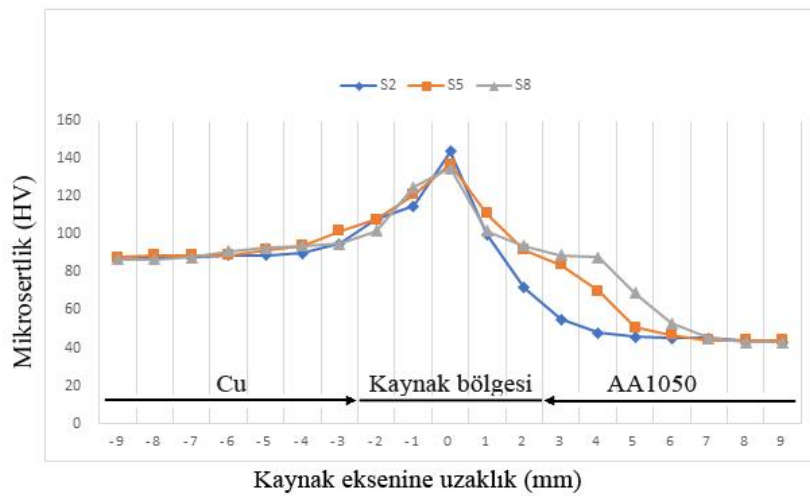
6.3.2.2. Kare karıştırıcı uçla kaynaklanan numunelerin mikrosertlik incelenmesi

Şekil 6.49.-6.51'de kare uçla yapılan numunelere ait mikrosertlik deney sonuçları verilmiştir.



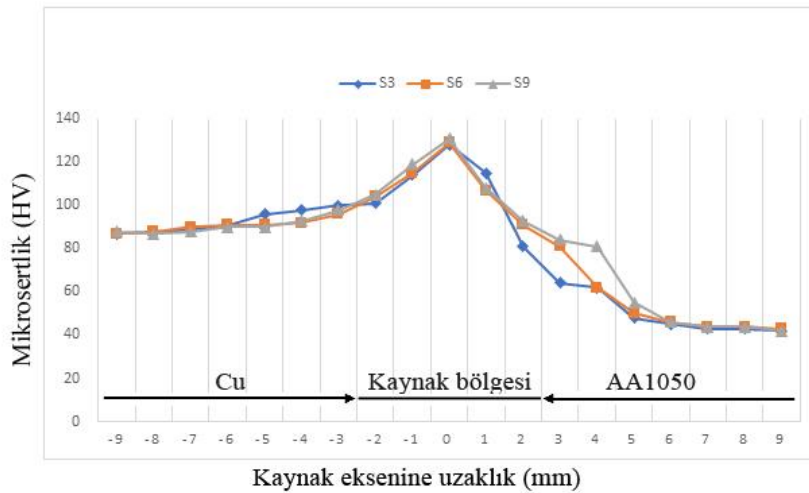
Şekil 6.49. Kare uçla 710 dev/dak ile yapılan S1, S4 ve S7 numunelerinin mikrosertlik grafiği.

710 dev/dak dönme hızında S1, S4 ve S7 numunelerinin mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 6.49.'da verilmiştir. S1 numunesi incelendiğinde kaynak bölgesinde en yüksek sertliğin 102 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 92 HV ve AA1050 tarafında ise 57 HV olduğu görülmüştür. S4 numunesine ait malzemenin en yüksek sertlik değeri 109 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 96 HV ve AA1050 tarafında ise 64 HV olduğu görülmüştür. S7 numunesine malzemenin en yüksek sertlik değeri 112 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 95 HV ve AA1050 tarafında ise 74 HV olduğu görülmüştür. Isı girdisi çok düşük olduğundan malzemelerin sünek bir davranış sergilediği ve sertlik değerinin düşük olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.50. Kare uçla 900 dev/dak ile yapılan S2, S5 ve S8 numunelerinin mikrosertlik grafiği.

900 dev/dak dönme hızında S2, S5 ve S8 numunelerinin ısı girdisi artmış malzemenin sertlik değerleri de artış göstermiş ve malzeme sünek-gevrek bir davranış göstermiştir. İlerleme hızına bağlı olarak sertlik değerleri düşmüştür. 900 dev/dak dönme hızında S2, S5 ve S8 numunelerinin mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 6.50.'de verilmiştir. S2 numunesi incelendiğinde kaynak bölgesinde en yüksek sertliğin 144 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 99 HV ve AA1050 tarafında ise 64 HV olduğu görülmüştür. S5 numunesinde kaynak bölgesinde en yüksek sertliğin 137 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 101 HV ve AA1050 tarafında ise 72 HV olduğu, S8 numunesinde kaynak bölgesinde en yüksek sertliğin 135 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 100 HV ve AA1050 tarafında ise 76 HV olduğu görülmüştür. Devir sayısının artmasıyla ısı girdisi artmış ilerleme hızındaki artışla ise ısı girdisi azaldığı için malzemenin sertlik değerleri S2 kaynak merkezinde artış göstermiş S5 ve S8 numunelerinde düşüş görülmüş ve bu durumda malzeme sünek-gevrek bir davranış göstermiştir.



Şekil 6.51. Kare uçla 1120 dev/dak ile yapılan S3, S6 ve S9 numunelerinin mikrosertlik grafiği.

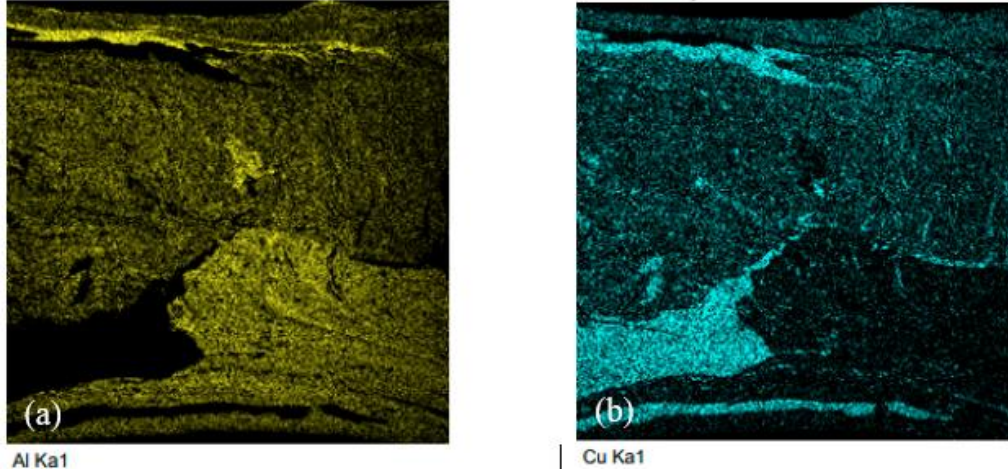
1120 dev/dak dönme hızında S3, S6 ve S9 numunelerinin mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 6.51.'de verilmiştir. S3 numunesi incelendiğinde kaynak bölgesinde en yüksek sertliğin 128 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 99 HV

ve AA1050 tarafında ise 67 HV olduğu görülmüştür. S6 numunesine ait malzemenin en yüksek sertlik değeri 129 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 99 HV ve AA1050 tarafında ise 68 HV olduğu görülmüştür. S9 numunesine malzemenin en yüksek sertlik değeri 131 HV, Cu tarafında ortalama sertliğin 99 HV ve AA1050 tarafında ise 73 HV olduğu görülmüştür. Isı girdisi daha da arttığı ve tane yapısı büyüdüğü için malzeme gevrek bir davranış sergilemiş ve sertlik artmıştır.

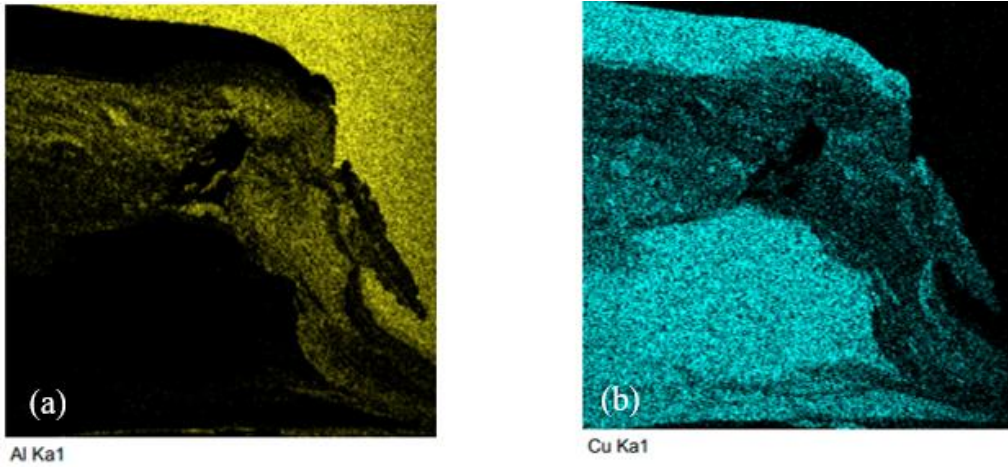
Şekil 6.46.'dan Şekil 6.51.'e kadarki mikrosertlik grafikleri incelendiğinde, AA1050/Cu malzemenin kaynak merkezine (KM) doğru gidildikçe sertlik değerlerinde artışın olduğu görülmektedir. Özellikle Termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge (TEB)'de aynı durum açıkça görülmektedir. Bunun sebebi dönme ısısının etkisiyle AA1050 ve Cu malzemenin tane yapısında meydana gelen değişimler ve hızlı soğuma ile birlikte malzemelerin tane yapısındaki değişimin kalıcı hale gelmesidir. Benzer biçimde Park ve diğer araştırmacılar (2003), karışım bölgesindeki tüm sertlik değerlerinin ana malzemeye göre arttığını belirlemişler ve sertlik artışındaki ana faktörün düşük ısı girdisi olduğunu vurgulamışlardır [10]. Ayrıca Jones ve diğerleri (2005), IEB'deki sertlik düşmesinin d fazındaki çökelmeler ve aşırı yaşlanma sonucu meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bu durumun TEB'de daha az olduğu, KB'deki dislokasyon yoğunluğu ve ince tanelerin, bölgenin mikrosertlik özelliklerini etkilediği ve TEB'deki sertlik düşüşünün nedeni olarak çökelme ve yaşlanma süreçleri gösterilmiştir. IEB'de ise çökelme ve yaşlanma süreçleri nedeniyle sertliğin düştüğünü belirtmişlerdir [27]. Yine aynı şekilde Lee ve diğer araştırmacılar (2003), IEB'nin ana metalden çok farklı olmadığını ve mikroyapı incelemelerinde ayırt etmenin zor olduğunu vurgulamışlardır. Ancak mikrosertlik analizleriyle bu bölgenin tespit edilebileceğini öne sürmüşlerdir [9]. Kaynak merkezi (KM)'deki sertleşmenin dislokasyon yoğunluğu ve ince taneli yapıdan kaynaklandığı, AA1050 ve Cu ana malzemelerine doğru gidildikçe TEB ve IEB'de sertlik değerlerinin düşüş göstermesinin sebebi ise çökelme ve yaşlanma süreçleri nedeniyle olduğu düşünülmektedir.

6.4. Elementel Mapping İncelemeleri

T2 çekme numunesinin elementel mapping haritası Şekil 6.52.'de verilmiştir. Yapılan sürtünme karıştırma kaynak işleminde alüminyum atomlarının bakır tarafına bakır atomlarının da alüminyum tarafına difüze olduğu tespit edilmiştir. Al ve Cu atomlarının üniform bir dağılım sergilediği saptanmıştır.

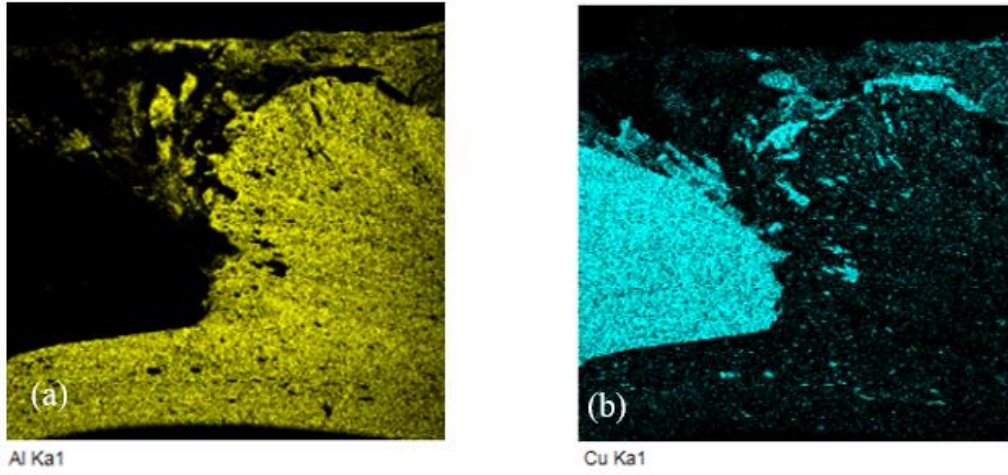


Şekil 6.52. T2 numunesinin elementel mapping haritası.

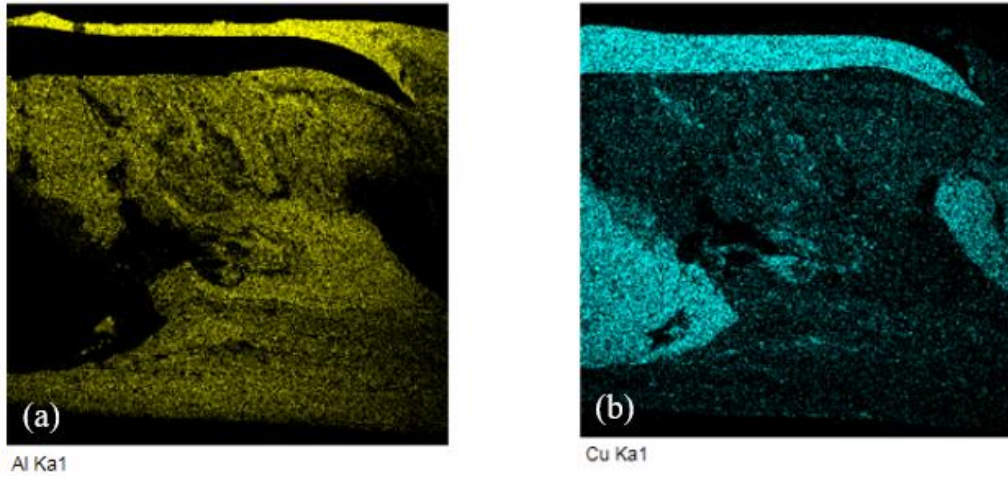


Şekil 6.53. S5 numunesinin elementel mapping haritası.

Kare uçla birleştirilen S5 numunesinin elementel mapping haritası Şekil 6.53.'de verilmiştir. Aynı şekilde burada da alüminyum atomlarının bakır tarafına bakır atomlarının ise alüminyum tarafına difüze olduğu görülmektedir. Yine burada da Al ve Cu atomları üniform bir dağılım sergilemektedir.



Şekil 6.54. T1 numunesinin elementel mapping haritası.

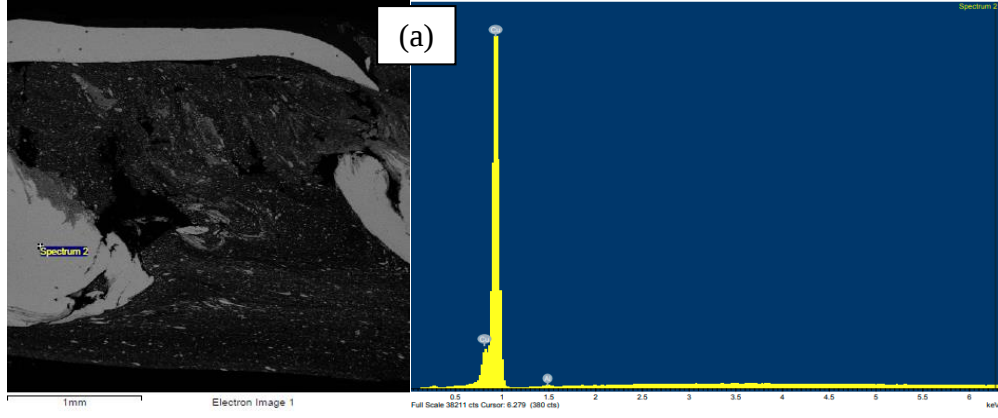


Şekil 6.55. S1 numunesinin elementel mapping haritası.

Şekil 6.54. ve Şekil 6.55.'te verilen T1 ve S1 numunelerinde alüminyum ve bakır atomlarının yeterince birbirine difüze olamadığı görülmektedir.

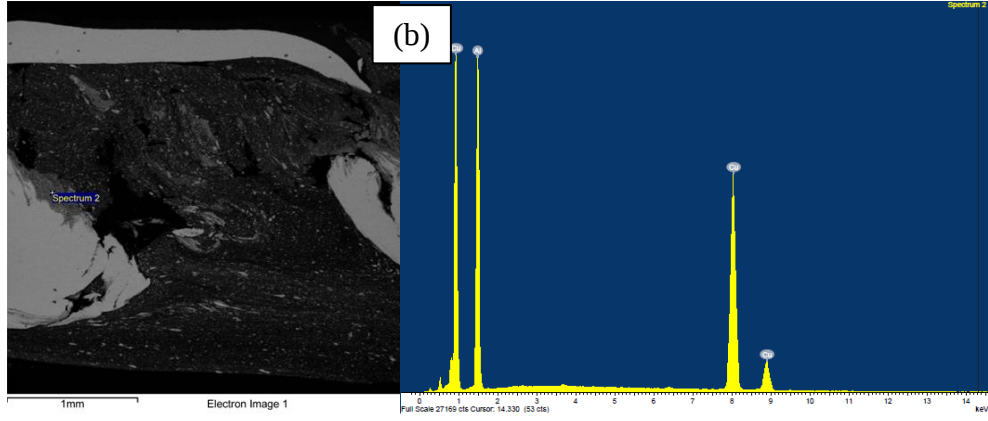
6.5. EDX (Enerji Dağılımlı X-ışını) İncelemeleri

S1 numunesinin EDS analizleri Şekil 6.56-6.59.'da verilmiştir.



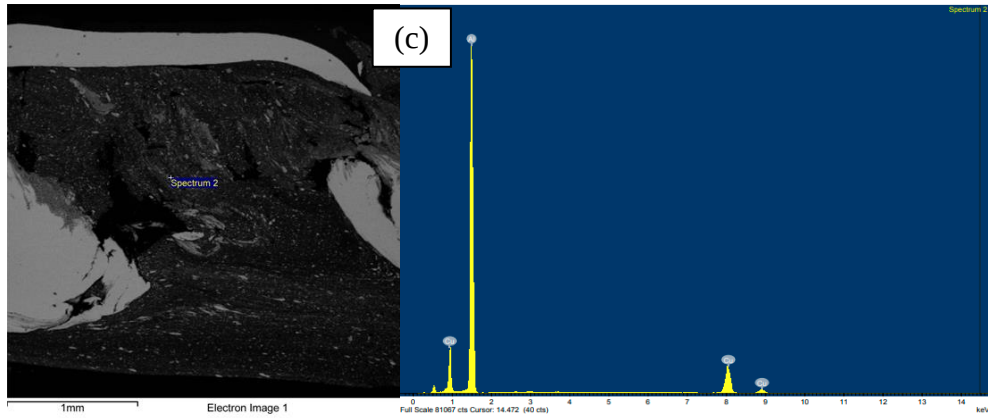
Şekil 6.56. S1 (a) EDS analizleri.

S1 (a) numunesinin 2 nolu spektrumunda Al 1,58 at.% ve Cu 98,42 at.% olarak saptanmıştır.



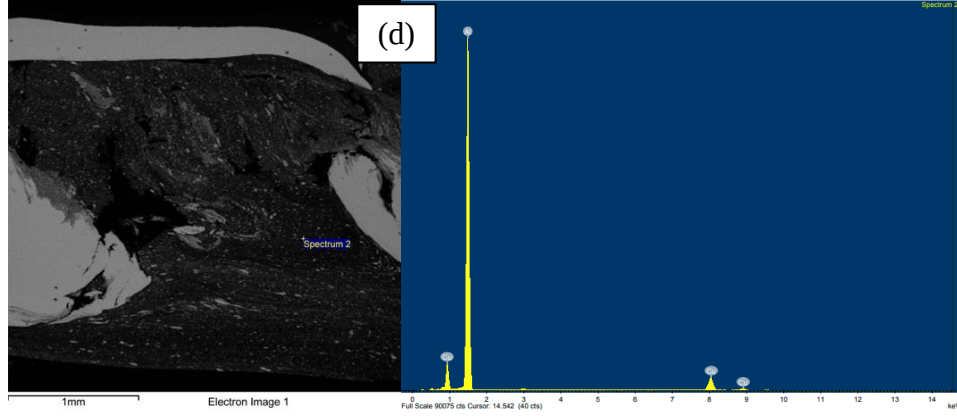
Şekil 6.57. S1 (b) EDS analizleri.

S7 (b) numunesinin 2 nolu spektrumunda Al 69,45 at.% ve Cu 30,55 at.% olarak saptanmıştır.



Şekil 6.58. S1 (c) EDS analizleri.

S1 (c) numunesinin 2 nolu spektrumunda Al 90,46 at.% ve Cu 9,54 at.% olarak saptanmıştır.



Şekil 6.59. S1 (d) EDS analizleri.

S1 (d) numunesinin 2 nolu spektrumunda Al 94,15 at.% ve Cu 5,85 at.% olarak saptanmıştır.

EDS sonuçları, Şekil 6.56-6.59. konumlarındaki kimyasal bileşimlerin sırasıyla Al₂Cu, Al₄Cu₉ ve Cu'nunkine yaklaşık olarak eşit olduğunu göstermektedir. Buradaki katmanlı yapılar, Cu parçalarından ve Al-Cu intermetaliklerinden oluşmuştur. AA1050 ve Cu parçaları arasındaki reaksiyonunun yüksek dönüş hızı ve düşük ilerleme hızlarında gerçekleştiği açık bir biçimde görülmektedir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, AA1050 levha ile Cu levha alın altına getirilerek 710, 900, 1120 dev/dak dönme hızlarında ve 16, 20, 25 mm/dak ilerleme hızlarında, 1° takım açısı verilerek sürtünme karıştırma kaynağı ile alın kısmından başarılı biçimde kaynak edilmiştir.

18 farklı parametre ile gerçekleştirilen kaynak işleminden sonra kaynaklı numunelerin mukavemetini ölçmek için çekme testi yapılmıştır. Çekme testi sonucuna göre en yüksek çekme mukavemetinin üçgen karıştırıcı uç ile 900 dev/dak dönme hızı ve 16 mm/dak ilerleme hızında 137,318 MPa olarak elde edildiği görülmüştür. Kaynak performansının AA1050 ana metaline göre %110,74 saf bakıra göre %51,05 olduğu tespit edilmiştir. Yine üçgen karıştırıcı uç ile en düşük çekme mukavemeti; 710 dev/dak dönme hızında, 25 mm/dak ilerleme hızında 57,900 MPa olup kaynak performansının AA1050 ana metaline göre %46,70 saf bakır malzemeye göre %21,52 olduğu tespit edilmiştir.

Kare karıştırıcı uç ile yapılan kaynak işleminde ise en yüksek çekme mukavemetinin aynı şekilde 900 dev/dak dönme hızı ve 16 mm/dak ilerleme hızında 125,146 MPa olduğu, kaynak performansının ise AA1050 ana metaline göre %100,09 saf bakıra göre %46,52 olduğu tespit edilmiştir. Kare karıştırıcı uç ile en düşük çekme mukavemetinin 710 dev/dak dönme hızında, 16 mm/dak ilerleme hızında 37,527 MPa olup kaynak performansının AA1050 ana metaline göre %30,26 saf bakır malzemeye göre %13,95 olduğu tespit edilmiştir.

Farklı malzeme çiftlerinin birleştirilmesinde farklı geometrideki uç parametrelerinin mekanik değerleri etkileyen önemli bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır.

Kaynak edilen AA1050 ve Cu malzemenin çekme numunelerinin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri incelenmiş olup çekme mukavemeti yüksek numunelerin kopma yüzeyinde çukurlar oluşurken, mukavemeti düşük numunelerde birleşmenin zayıf olması nedeniyle kopma yüzeyinde düz bir görüntü olduğu belirlenmiştir.

Numunelerin kırık yüzey incelemeleri ve elementel mapping analizlerinde yer yer AA1050 ve Cu atomlarının dağılım gösterdiği tespit edilmiştir.

AA1050 ve saf bakır kaynağında, kaynak bölgesinin Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) ve Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) analizlerinde metaller arası bileşiklerin varlığı belirlenmiştir.

Mikroyapı incelemelerinde kaynak bölgesinde ince taneli, bakırca zengin tabaka ve parçacıklar, farklı boyutlarda alüminyum matris içerisinde dağılım göstermiştir. Mukavemet değeri yüksek numunelerde homojen bir dağılım varken düşük mukavemet değerine sahip numunelerde heterojen bir dağılım göze çarpmaktadır.

710 dev/dak dönme hızında üçgen karıştırıcı uç ile 16, 20 ve 25 mm/dak ilerleme hızlarında yapılan kaynak işlemlerinde ilerleme hızı arttıkça mukavemetin düştüğü, kare karıştırıcı uç ile yapılan kaynak işlemlerinde ise ilerleme hızı arttıkça mukavemetin az da olsa arttığı tespit edilmiştir.

900 dev/dak dönme hızında üçgen karıştırıcı uç ile 16, 20 ve 25 mm/dak ilerleme hızlarında en yüksek mukavemet değerleri elde edilmiş olup üçgen uça göre göre düşük olsa da kare karıştırıcı uç ile yapılan işlemlerde de iyi sonuçlar elde edilmiştir.

1120 dev/dak dönme hızında her iki uç ile tüm ilerleme hızlarında birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Üçgen karıştırıcı uçlardaki 60°'lik köşe açılarının kare karıştırıcı uçlardaki 90°'lik köşe açılara göre karıştırılacak malzeme çiftinden parçacıkları daha iyi koparıp karıştırdığı sonucuna ulaşılmış olup üçgen karıştırıcı uç ile yapılan

birleştirmelerin kare karıştırıcı uç ile yapılan birleştirmelere göre daha iyi çekme mukavemeti gösterdiği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Thomas, W. M., Nicolas, E. D., Needham, J. C.** (1991). International Patent Application. Patent No: *GB9125978A*, 6 Aralık
- [2] **Kaluç, E.** (2007). “Sürtünen Eleman ile Kaynak (FSW) Yöntemi”, (Makine Mühendisleri Odası Yayını) (MMO/2007/460), Ankara Matbaası, Ankara
- [3] **Url-1** < <https://malzemebilimi.net/surtunme-karistirma-kaynagi-fsw-nedir.html> >, alındığı tarih: 24.04.2021
- [4] **Yılmaz, S. S., Ünlü, B. S., Uzkut, M., Ertürk, D.** (2016). “Alüminyum Alaşımlarında Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Uygulamaları,” Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 676, s. 56-63.
- [5] **Taban, E., Kaluç, E.** (2004). “Sürtünen Eleman ile Birleştirme (FSW) Kaynaklı EN AW-5083 Alüminyum Alaşımı Bağlantıların Mekanik ve Mikro Yapısal Özellikleri.” Metal Dünyası, sayı 137, s. 125–130.
- [6] **Url-2**, < <https://www.uslularhadde.com/surtunme-karistirma-kaynagi> >, alındığı tarih: 24.06.2023
- [7] **Alnak, Y., Özer, A. & Savaş, V.** (2021). Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen AISI 316 Paslanmaz Çelik ve Karbonlu Çelik Çiftlerinin Mekanik Özelliklerinin ve Mikroyapılarının İncelenmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36 (3), 719-733. DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1005507
- [8] **Ünal, E., Karaca, F., Sarsılmaz, F.** (2019). Investigation of interface microstructure properties of AISI 316L /AISI 4140 steel couple welded by friction welding process, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 34:2, 701-708. DOI: 10.17341/gazimmfd.416528.
- [9] **Lee, W. B., Yeon, Y. M. and Jung, S. B.** (2003). Evaluation of the microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6005 aluminum alloy, Materials Science and Technology, 19, 513-518.
- [10] **Park, H.S., Kimura, T., Murakami, T., Nagano, Y., Nakata, K., Ushio, M.** (2003). Microstructures and mechanical properties of friction stir welds

of 60% Cu–40% Zn copper alloy, *Materials Science and Engineering A*, 371, No: 1-2, 160-169.

- [11] **Wadeson, D.A., Zhou, X., Thompson, G.E., Skeldon, P. Oosterkamp, L.D., Scamans, G.** (2005). Corrosion behaviour of friction stir welded AA7108 T79 aluminium alloy, *Corrosion Science*, 48, 887-897.
- [12] **Srinivasan, B.P., Dietzel, W., Zettler, R., Sivan, V.** (2005). Stress corrosion cracking susceptibility of friction stir welded AA7075–AA6056 dissimilar joint, *Materials Science and Engineering A*, 392, 292
- [13] **Reynolds, A.P., Tang, W., Gnaupel-Herolh, T., Prask, H.** (2003). Structure, properties, and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds, *Scripta Materialia*, 48, No: 9, 1289-1294.
- [14] **Chen, Y.C. and Nakata, K.** (2008). Friction stir lap joining aluminum and magnesium alloys, *Scripta Materialia*, 58, 433-436.
- [15] **Taban, E., Kaluç, E.** (2005). EN AW-5083-H321 alüminyum alasımının MIG, TIG ve sürtünme karıştırma kaynaklı (FSW) bağlantılarının mekanik ve mikroyapısal özellikleri, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 46, 541, 40- 51.
- [16] **Cavaliere, P. and Panella, F.** (2007). Effect of tool position on the fatigue properties of dissimilar 2024-7075 sheets joined by Friction Stir Welding, *Journal of Materials Processing Technology*, Accepted Manuscript.
- [17] **Shigematsu, I ., Kwon, Y.J., Suzuki, K., Imai, T., Saito, N.** (2003). Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding, *Journal of Materials Science Letters* 22, 353–356.
- [18] **Zeng, W. M. and Wu, H.L.** (2006). Effect of tool wear on microstructure, mechanical properties and acoustic emission of friction stir welded 6061Al alloy, *Acta Metallurgica Sinica*, 19, 9-19.
- [19] **Cavaliere, P., Nobile, R., Panella, F.W., Squillace, A.** (2006b). Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding, *International Journal of Machine Tools*, 46, 588-594.
- [20] **Zhou, C., Yang, X., Luan, G.** (2006b). Investigation of microstructures and fatigue properties of friction stir welded Al–Mg alloy, *Materials Chemistry and Physics*, 98, 285-290.

- [21] **Scialpi, A., Filippis, L.A.C., Cavaliere, P.** (2007). Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy, *Materials and Design*, 28, 1124-1129.
- [22] **Cavaliere, P., Squillace, A.** (2005b). High temperature deformation of friction stir processed 7075 aluminium alloy, *Materials Characterization*, 55, 136-142.
- [23] **Uzun, H.** (2007). Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminium alloy matrix composite, *Materials and Design*, 28, 1440-1447.
- [24] **Fujii, H., Cui, L., Maeda, M., Nogi K.** (2006). Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 419, 25-31.
- [25] **Cavaliere, P.** (2006a), Effect of friction stir processing on the fatigue properties of a Zrmodified 2014 aluminium alloy, *Materials Characterization*, 57, 100-104.
- [26] **Sharma, S.R., Ma, Z.Y., Mishra, R.S.** (2004). Effect of friction stir processing on fatigue behavior of A356 alloy, *Scripta Materialia*, 51, 237-241.
- [27] **Jones, M.J., Heurtier, P., Desrayaud, C., Montheillet, F., Allehaux, D. Driver J.H.** (2005). Correlation between microstructure and microhardness in a friction stir welded 2024 aluminium alloy, *Scripta Materialia*, 52, 693-697.
- [28] **Zhou, C., Yang, X., Luan, G.** (2006a). Effect of root flaws on the fatigue property of friction stir welds in 2024-T3 aluminum alloys, *Materials Science and Engineering A*, 418, 155–160.
- [29] **Kurt, A., Boz, M., Özdemir, M.** (2004) Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Hızının Birleşebilirliğe Etkisi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 19, No 2*, 191-197.
- [30] **Oğuz, B.** (1990). *Demir dışı Metallerin Kaynağı Metalurji- Uygulama*, Oerlikon Yayınları, İstanbul.
- [31] **Url-3**, < <https://www.canaluminyum.com.tr/aluminyum> >, alındığı tarih: 07.06.2023

- [32] **Url-4**, < <https://malzemebilimi.net/aluminyumun-hayatimizdaki-onemi-ozellikleri-ve-aluminyum-kullanimi.html> >, alındığı tarih: 10.07.2023
- [33] **Askeland, D. R.** (1998). Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri, (Çev: Erdoğan, M.), Nobel Yayın Dağıtım, 1: 1-348.
- [34] **Başer, T. A.** (2012). “Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı,” Mühendis ve Makina, cilt 53, sayı 635, s. 51-5
- [35] **Kaluç, E., Taban, E.** (2005). ”Metal Dünyası”, sayfa 144
- [36] **Url-5**, < <https://malzemebilimi.net/aluminyum-alasimlarinda-kullanilan-kaynak-yontemleri.html> >, alındığı tarih: 02.07.2023
- [37] **Sayer, A.** (2007). AA 6063 (AlMgSi0.5) Tipi Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin, Bağlantının Dayanımı Ve Mikroyapı Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi
- [38] **Thomas, W. M. Threadgill, P. L. Nicholas, E. D.** (1999). Feasibility of Friction Stir Welding Steel, Science and Technology of Welding and Joining, 4(6), 365–372
- [39] **Url-6**, < <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/friction-stir-welding-147> >, alındığı tarih: 23.07.2023
- [40] **Mouloud, Aissani & Gachi, Saliha & Fouad, Boubenider & Benkedda, Younes.** (2010). Design and Optimization of Friction Stir Welding Tool. Materials and Manufacturing Processes - MATER MANUF PROCESS. 25. 1199-1205. 10.1080/10426910903536733.
- [41] **Zhang, Y. N. Cao, X. Larose, S. Wanjara, P.** (2012). Review of Tools for Friction Stir Welding and Processing, Canadian Metallurgical Quarterly, 51(3), 250–261
- [42] **Tekin, A.** (1981). Çeliklerin Metalurjik Dizaynı, Doyuran Matbaası, İstanbul, TR.
- [43] **Şık, A.** (2005). “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Alüminyum Levhaların Eğme ve Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi,” Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sakarya Üniversitesi, cilt 9, sayı 2, s.12-17

- [44] **Cardarelli, F.** (2008). Materials Handbook A Concise Desktop Reference, 2nd Edition, Springer, sf. 179-183, London
- [45] **Koçak, H.** (2006). “Bakır alaşımları el kitabı”, Sağlam Metal, İstanbul, 1-32
- [46] **Url-7,** < http://www.aalco.co.uk/literature/pdfs/Aalco_Copper_Alloys.pdf >
alındığı tarih: 10.02.2009.
- [47] **Url-8,** < http://www.brazing.com/techguide/procedures/copper_welding.asp >,
alındığı tarih: 10.10.2008.
- [48] **Url-9,** < <http://www.copperinfo.co.uk/alloys/brass/brasses-properties-andapplications.shtml> >, alındığı tarih: 10.10.2008.
- [49] **Meran, C. Canyurt, O. E.** (2010). Friction stir welding of austenitic stainless steels, The Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 432-439
- [50] **Ragu Nathan, S. Balasubramanian, V. Malarvizhi, S.V. Rao, A. G.** (2016). Effect of Tool Shoulder Diameter on Stir Zone Characteristics of Friction Stir Welded HSLA Steel Joints, Transactions of the Indian Institute of Metals, 1861-1869, <https://link.springer.com/article/10.1007/s12666-016-0846-3>

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Mehmet BEDİROĞLU
Doğum Yeri ve Tarihi	Sivas, 02.02.1975
Medeni Hali	Evli
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Reşit Akif Paşa İlkokulu 58050 Sivas
E-posta Adresi	mehmetbediroglu@hotmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Sivas Endüstri Meslek Lisesi Döküm Bölümü, 1993
Lisans	Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği, 1999 Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, 2020
Yüksek Lisans	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Kamu Yönetimi, 2015 Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Savunma Sanayi Teknolojileri ve Stratejileri, 2020-2023

İş Tecrübesi

MEB	Öğretmen 1999-2015 Müdür Yardımcısı 2015- Devam ediyor
-----	---

Akademik Yayınlar

Tezsiz Y. Lisans Projesi	Dünyada ve Türkiye’de Kamu Sendikacılığı, 2015
--------------------------	--