

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**AZ63-AA6063 MALZEME ÇİFTİNİN SÜRTÜNME
KAYNAK YÖNTEMİ İLE
BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Remzi KALLI

Yüksek Lisans Tezi
Anabilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri
Tez Danışman: Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ

ELAZIĞ-2018

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AZ63-AA6063 MALZEME ÇİFTİNİN SÜRTÜNME KAYNAK YÖNTEMİ İLE
BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Remzi KALLI

(161140104)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25.09.2018

Tezin Savunulduğu Tarih : 02.11.2018

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ (FÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sermin OZAN (FÜ)

Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN (KOCAELİ Ü)

KASIM-2018

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarım sırasında benden hiçbir yardımını ve desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ' ne sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma sürecinde, bana bilgi ve fikirlerinden istifade ettiren Sayın Arş. Gör. Dr. NİDA KATI' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen annem ve babam Serpil-Şükrü KALLI' ye teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Ayrıca Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) yönetim birimine (Proje No: TEKF.17.24) desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Remzi KALLI
ELAĞIĞ-2018

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
TABLolar LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ	1
2. KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ.....	2
3. KAYNAK TEKNOLOJİSİ.....	6
3.1 Kaynak Kabiliyeti	6
3.2 Ergitme Kaynak Yöntemleri	7
3.3 Katı Hal Kaynak Yöntemleri	8
4. SÜRTÜNME KAYNAĞI	9
4.1. Sürtünme Kaynak Çeşitleri.....	13
4.1.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı.....	13
4.1.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı.....	14
4.1.3. Kombine Sürtünme Kaynağı	16
4.2. Kaynak Parametreleri	17
4.2.1. Devir Sayısı	17
4.2.2. Sürtünme Basıncı.....	17
4.2.3. Sürtünme Süresi.....	18
4.2.4. Yığma Basınç Kuvveti.....	18
4.2.5. Yığma Süresi	18
4.3. Malzemelerin Sürtünme Kaynak Kabiliyeti	19
4.4. Kaynak Yapılacak Bağlantıların Yüzeylerinin Hazırlanması.....	20
4.5. Kaynak Yapılacak Parçaların Bağlanması.....	20
4.6. Birleşme Bölgesindeki İç Yapı.....	21
4.7. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Parça Geometrileri	22
4.8. Sürtünme Kaynağının Kullanım Alanları	23
4.8.1. Makine İmalatı.....	23

4.8.2. Otomotiv Endüstrisi.....	23
4.8.3. Havacılık ve Uzay Tekniği	24
4.8.4. Elektronik ve Elektroteknik Endüstrisi.....	24
4.9. Sürtünme Kaynağının Avantajları	25
4.10. Sürtünme Kaynağının Dezavantajları	26
5. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....	28
5.1. Magnezyumun Genel Özellikleri.....	28
5.2. Magnezyum Alaşımları ve Üretim Yöntemleri	28
5.3. Magnezyum Alaşımları ve Standartları	29
5.4. Magnezyum Alaşımlarının Temel Özellikleri	29
5.5. Alaşım Elementlerinin Magnezyum Alaşımına Etkisi	30
5.5.1. Alüminyum (Al)	30
5.5.2. Çinko (Zn)	30
5.5.3. Kurşun (Pb).....	30
5.5.4. Kalay (Sn).....	30
5.5.5. Mangan (Mn).....	30
5.5.6. Demir(Fe)	30
5.5.7. Bakır (Cu)	31
5.5.8. Toprak Alkali Elementler	31
5.6. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları	31
6. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	32
6.1. Alüminyumun ve Alaşımlarının Genel Özellikleri.....	32
6.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	33
6.2.1. Döküm Alüminyum Alaşımları	34
6.2.2. Dövme Alüminyum Alaşımları	34
6.2.2.1.6xxx Serisi Alaşımları	36
6.3. Alaşım Elementlerinin Alüminyum Alaşımlarına Etkisi.....	37
6.3.1. Bakır (Cu)	37
6.3.2. Silisyum (Si)	37
6.3.3. Magnezyum (Mg)	37
6.3.4. Manganez (Mn)	38
6.3.5. Çinko (Zn)	38
6.3.6. Titanyum (Ti).....	38

6.3.7. Demir (Fe)	38
6.3.8. Nikel (Ni).....	38
6.3.9. Zirkonyum (Zr).....	38
6.3.10. Kalay	38
6.3.11. Krom (Cr)	39
6.4. Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları	39
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	40
7.1. Çalışmanın Amacı	40
7.2. Kaynak Öncesi İşlemler.....	41
7.2.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri	41
7.2.2. Sürtünme Kaynak Tezgâhı	42
7.2.3. Deney Parametreleri	43
7.3. Kaynak Sonrası Yapılan İncelemeler	44
7.3.1. Metalografik İncelemeler.....	44
7.3.2. Mikrosertlik Analizi.....	45
7.3.3. Çekme Deneyi	47
7.3.4. Radyografi Testi	48
8. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	51
8.1. Kaynaklı Birleştirmelerin Makroskobik İncelemeleri	51
8.1.1. 1500 Dev/Dk İle Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri .	52
8.1.2. 1600 Dev/Dk İle Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri .	53
8.1.3. 1700 Dev/Dk İle Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri .	54
8.2. Kaynaklı Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri.....	55
8.2.1. 1500 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri	56
8.2.2. 1600 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri	58
8.2.3. 1700 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri	60
8.3. Kaynaklı Numunelerin Mikrosertlik İncelemeleri.....	62
8.4. Kaynaklı Birleştirmelerin Çekme Dayanımlarının İncelenmesi.....	64
8.5. Kaynaklı Birleştirmelerin SEM-EDS Analizi ve Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi	67
8.6. Kaynaklı birleştirmelerin XRD Sonuçlarının İncelenmesi.....	70
8.7. Radyografi Test Sonuçlarının İncelenmesi.....	71

9.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	74
9.1.	Öneriler	75
	KAYNAKLAR	76
	ÖZGEÇMİŞ	80



ÖZET

Bu çalışmada, AZ63 Magnezyum ve AA6063 Alüminyum malzeme çifti, farklı devir sayıları (1500-1600-1700 dv/dk), farklı sürtünme basıncı (20-30-40 MPa), farklı yığma basıncı (40-60-80 MPa), sabit sürtünme süresi (6 sn) ve sabit yığma süresinde (4 sn) sürekli tahrikli sürtünme kaynak tekniği ile birleştirilmiştir. Elde edilen kaynaklı bağlantılara çekme testi uygulandı. Mikrosertlik ölçümleri Vickers skalasında 50 gr'lık yük altında yapıldı. Kaynak sonrası üretim parametrelerinin birleşme bölgesinde meydana gelen mikro yapı değişiklikleri; Optik Mikroskop ve EDS analizleri ile incelendi. Kaynaklı bağlantıların Radyografik muayenesi yapıldı. Yapılan incelemeler sonrasında, AZ63 Magnezyum ve AA6063 Alüminyum alaşımlarını birleştirmede seçilen devir sayılarının (1500-1600-1700 dv/dk) genel olarak yetersiz kaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AZ63, AA6063, Sürtünme Kaynak Yöntemi, Kaynak Kabiliyeti, Malzeme Muayene.

SUMMARY

Investigation of the Weldability of AZ63-AA6063 Material Pair by Friction Welding Method

In the study, the AZ63 magnesium and AA6063 aluminum material pair was joined via continuous drive friction welding technique at different rpm values (1500-1600-1700 rev/min), different friction pressure (20-30-40 MPa), different upsetting pressure (40-60-80 MPa), fixed friction time (6 sec) and fixed upsetting time (4 sec). Tensile test was applied to the welded joints obtained. Microhardness measurements were made in Vickers scale under a load of 50 g. Microstructure changes in the joint zone of post-welding production parameters were investigated by optical microscope and EDS analyses. Radiographic examination of welded joints was performed. After the examinations, it was shown that the rpm values selected to join AZ63 magnesium and AA6063 aluminum alloys (1500-1600-1700 rev/min) remained generally insufficient to join these two base materials.

Key Words: AZ63, AA6063, Friction Welding Method, Weldability, Material Inspection.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Kaynak kabiliyetinin, malzeme, üretim yöntemi ve konstrüksiyona bağlılığının gösterilmesi.....	6
Şekil 4.1. Sürtünme kaynağı mekanizması	9
Şekil 4.2. Sürtünme kaynağı işlem basamakları	10
Şekil 4.3. Sürtünme kaynağının uygulanma şekilleri.....	11
Şekil 4.4. Yörüngesel hareketle sürtünme kaynağı	11
Şekil 4.5. Lineer titreşim hareketi ile sürtünme kaynağı.....	12
Şekil 4.6. Sürtünme kaynak cihazı ve donanımı	12
Şekil 4.7. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı	13
Şekil 4.8. Klasik sürtünme kaynak parametreleri.....	14
Şekil 4.9. Volan tahrikli sürtünme kaynağı	15
Şekil 4.10. Volan tahrikli sürtünme kaynak parametreleri.....	15
Şekil 4.11. Sürtünme kaynak makinası	16
Şekil 4.12. Sürtünme kaynağı bağlantı tasarımları	21
Şekil 4.13. Sürtünme kaynağına uygun parça kesitleri	23
Şekil 4.14. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş dizel motor pistonu	23
Şekil 4.15. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş egzoz supapları.....	24
Şekil 4.16. Ticari araçlarda sürtünme kaynağı uygulanmış çeki kolları	24
Şekil 4.17. Sürtünme Kaynağı ile imal edilmiş uçak parçası.....	24
Şekil 4.18. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş parçalara örnekler.....	25
Şekil 6.1. Alüminyumda alaşım elementlerinin genel bileşimleri	34
Şekil 6.2. Al-Mg ₂ Si denge diyagramı.....	37
Şekil 7.1. Sürtünme kaynak numuneleri	41
Şekil 7.2. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak tezgâh fotoğrafı.....	42
Şekil 7.3. Malzeme çiftinin birleşme düzenini gösteren resim	43
Şekil 7.4. Metalografik incelemede kullanılan numuneler.....	44
Şekil 7.5. Metalografik İncelemeler için hazırlanan numune boyutları	45
Şekil 7.6. Mikrosertlik cihazı	46
Şekil 7.7. Mikrosertlik ölçümü yapılan noktaların şematik gösterimi	47
Şekil 7.8. Çekme deney numunelerine ait ölçüler	47

Şekil 7.9. Çekme deney numunesi	48
Şekil 7.10. Çekme deney cihaz	48
Şekil 7.11. Radyografik testin çalışma prensibi	49
Şekil 7.12. X-Ray cihazında 500 kV bir gerilimle belirlenen derin penetrasyon kalınlığı ve malzeme grafiği	49
Şekil 7.13. Rigaku marka Radioflex -300EGS3 tipi cihaz (a) ve control paneli (b).....	50
Şekil 8.1. Kaynak bölgesinde oluşan flanş ve IEB' nin gösterimi	51
Şekil 8.2. Kaynak sonrası birleştirmelerin flanş geometrisine ait özelliklerinin şematik gösterimi	51
Şekil 8.3. N7, N8 ve N9 nolu numunelere ait yüzey ve ara yüzey fotoğrafları	52
Şekil 8.4. N4, N5 ve N6 nolu numunelere ait yüzey ve ara yüzey fotoğrafları	53
Şekil 8.5. N1, N2 ve N3 nolu numunelere ait yüzey ve ara yüzey fotoğrafları	54
Şekil 8.6. Mikroyapı değişikliğinin meydana geldiği bölgeler	55
Şekil 8.7. N7 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri	56
Şekil 8.8. N8 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri	57
Şekil 8.9. N9 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri	57
Şekil 8.10. N4 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri	58
Şekil 8.11. N5 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri	59
Şekil 8.12. N6 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri	59
Şekil 8.13. N1 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri	60
Şekil 8.14. N2 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri	61
Şekil 8.15. N3 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri	61
Şekil 8.16. Mikrosertlik ölçüm sonuçlarının değiştiği bölgeler	63
Şekil 8.17. Sürtünme kaynaklı numunelerin mikrosertlik grafiği ve değerleri	63
Şekil 8.18. Çekme test sonuçlarına ait grafik	64
Şekil 8.20. Çekme deneyi sonunda kırılan parçaların şematik gösterimi	66
Şekil 8.21. N1 nolu numunenin (AZ63-AA6063) A) SEM görüntüsü B) 1 nolu noktanın EDS grafiği C) 2 nolu noktanın EDS grafiği D) 3 nolu noktanın EDS grafiği E) Kırılma yüzey görüntüsü	68
Şekil 8.22. N8 nolu numunenin (AZ63-AA6063) A) SEM görüntüsü B) 1 nolu noktanın EDS grafiği C) 2 nolu noktanın EDS grafiği D) 3 nolu noktanın EDS grafiği E) Kırılma yüzey görüntüsü	70
Şekil 8.23. N1 nolu numunenin XRD analiz sonuçları	71

Şekil 8.24. Film inceleme cihazı (Görüntüleyici)	71
Şekil 8.25. Numunelerin radyografik test fotoğrafları (N1, N2, N5, N7, N8, N9)	72



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. Malzemeler ve sürtünme kaynağına uygunluğu.....	19
Tablo 5.1. Saf Mg 'un mekanik ve fiziksel özellikleri	28
Tablo 5.2. Alaşım elementleri ve kısaltmaları	29
Tablo 6.1. % 99.5 saflık derecesine sahip alüminyumun genel özellikleri	32
Tablo 6.2. Dövme alüminyum ve alaşımlarının sınıflandırılması	35
Tablo 6.3. Bazı 6xxx serisi alaşımların kimyasal bileşimleri	36
Tablo 7.1. AZ63-AA6063 malzeme çiftinin kimyasal özellikleri	41
Tablo 7.2. AZ63-AA6063 malzeme çiftinin mekanik özellikleri.....	41
Tablo 7.3. Sürtünme kaynağında kullanılan kaynak parametreleri	44
Tablo 8.1. Kaynak kusurları ve radyografik görüntünün tanımı	72

1. GİRİŞ

Kaynak, bugün imalat sektörünün büyük bir kısmı tarafından önemi kabul edilmiş, pek çok sayıda tekniği kapsayan bir teknoloji haline gelmiştir. Bilimsel anlamda inceleme ve araştırma konusu olmuştur. Çünkü kaynaklı birleştirmelerin artık yaşamın her noktasına uzanan, uygulamaları söz konusudur. Bunun yanında yeni ve özellikli malzeme türlerinin geliştirilmesi ve bu malzemelerin birleştirilmesinde güvenle kullanılacak kaynak tekniklerin icadı, kaynak tekniğinin uygulama alanlarını daha da genişletmektedir. Bu sonuçlar düşünüldüğünde, kaynaklı bağlantıların mutlaka iyi analiz edilmesi ve incelenmesi zorunlu hale getirmektedir. Günümüzde ergitme, katı hal ve bunların kapsadığı birçok kaynak yöntemi bulunmaktadır [1].

Bu çalışmada, farklı özelliklere sahip malzeme çiftlerinden AZ63 Magnezyum ve AA6063 Alüminyum alaşımlarının bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliği araştırılmıştır. Araştırma; hem malzeme bilimi ve karakterizasyonu hem de kaynak bilimi alanlarında literatüre önemli katkılar sağlamayı hedeflemektedir. Kaynaklı bağlantılar her değişikende 2 adet olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. AZ63-AA6063 malzeme çifti farklı parametrelerde (1500-1600-1700 dev/dk devir sayısı, 20-30-40 MPa sürtünme basıncı, 40-60-80 MPa yığma basıncı 6 sn sürtünme süresi ve 4 sn yığma süresi) sürtünme kaynak tekniği ile birleştirmişlerdir.

2. KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ

O. Bölük vd. [2] sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirdikleri Al-Cu malzeme çiftinin birleşme arayüzeyinde oluşan yüksek sıcaklık ve deformasyon sonucu ortaya çıkan intermetalik fazların mikrosertlik değerini yükselttiğini tespit etmişlerdir.

U. Çalığülü vd. [3] yapmış oldukları çalışmalarda, AISI 4340 temperlenmiş çelik ile AISI 2205 duplex paslanmaz çelik çiftini sürtünme kaynağı başarılı bir şekilde birleştirmişlerdir. Kaynaklı birleştirmelere yaptıkları çekme testleri sonucunda, 2200 rpm devir sayısı, 40 MPa sürtünme basıncı, 80 MPa yığma basıncı, 6 saniye sürtünme süresi ve 3 saniye yığma süresi kullanılarak kaynak edilen numunelerin maksimum gerilme mukavemetini 635.66 MPa olarak ölçmüşlerdir.

M. Türkmen vd. [4] yapmış oldukları çalışmada, sürtünme kaynağı ile birleştirdikleri AISI 1010-Bakır alaşımlarına uyguladıkları radyografi testleri sonucunda devir sayısı, sürtünme ve yığma basıncında ki artışa bağlı olarak flanş miktarının arttığını gözlemlemişlerdir.

İ. Kırık vd. [5] sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinasında birleştirdikleri AISI 1040/304L çelik çiftinin mikroyapısal ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, ara yüzeydeki sürtünme süresi arttıkça mikroyapı unsurlarının değiştiğini, gerilme mukavemet değerlerinin de bu sonucu doğruladığını gözlemlemişlerdir.

U. Çalığülü vd. [6] alüminyum esaslı metal matriks kompozitinin AA6061 alüminyum alaşımına sürtünme kaynağı ile kaynak edilebilirliğini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda, takviyenin parçacık boyutu ve hacim boyutunun sürtünme kaynaklı bağlantıların gerilme direnci üzerinde önemli bir rol oynadığını görmüşlerdir.

N. Katı vd. [7] otomotiv ve havacılık sektöründe sıkça kullanılmaya başlanan magnezyum alaşımlarından AM50 / AM60 magnezyum alaşım çiftini sürtünme kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirliğini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda, sürtünme basıncı ve yığma basıncının kaynaklı bağlantıların sertlik ve gerilme mukavemetine etki ettiğini gözlemlemişlerdir.

B. Buldum vd. [8] çalışmalarında, haddelenmiş AZ31 magnezyum alaşım levhalarını TIG ve sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirerek bu iki kaynak yöntemi arasındaki fark

ve hangi yöntemin daha üstün avantajlara sahip olduğunu araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda sürtünme karıştırma kaynak yönteminde ısı girdisinin, ergitme kaynak yöntemlerine göre daha az olmasından dolayı kaynak edilmiş malzemelerde çarpılma görülmemiştir. Bu çalışma sonucunda bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağının ergitme kaynak yöntemleriyle oldukça zor kaynaklanan magnezyum alaşımlı malzemelere başarıyla uygulanabildiği gözlemlenmiştir.

R. Bulut vd. [9] çalışmalarında, sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirdikleri 4 mm kalınlığındaki AZ31 magnezyum alaşımlı sac levhalara devir sayısı ve ilerleme hızının etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda kaynak parametrelerinin malzemenin eğme mukavemetinde iyileşme, sertlikte de azalma meydana getirdiğini ölçmüşlerdir. Bu çalışma ile kaynak parametrelerinin birleşimin eğme mukavemeti ve mikroyapı özelliklerine direkt etkili olduğunu belirlemiştir.

A. Şık [10] yaptığı çalışmada, sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile 4 mm kalınlığa sahip AZ31 magnezyum alaşım levhaları alın pozisyonunda birleştirerek, oluşan bağlantının mekanik özelliklerini incelemiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, farklı parametrelerle yapılan birleştirmelerde devir sayısında ki artışa bağlı olarak kaynaklı bağlantıların, çekme mukavemetinde ve sertliğinde bir düşüş meydana geldiğini gözlemlemiştir.

S. Mercan vd. [11] yaptıkları çalışmada, AISI 2205 / AISI 1020 malzeme çiftini farklı parametreler kullanarak sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinası kullanarak birleştirmişlerdir. Sürtünme kaynaklı bağlantıların mikrosertlik dağılımının Aşırı Deformasyona Uğramış Bölge, Deformasyona Uğramış Bölge ve Kısmen Deformasyona Uğramış Bölge' de değiştiğini ancak bütün numunelerde benzer bir sertlik dağılımının ortaya çıktığı tespit etmişlerdir. Bu dağılımda sertliğin, kaynak arayüzeyinde ve arayüzeye yakın bölgelerde yükseldiğini ve daha sonra bir miktar düştüğünü belirlemiştir. Kaynak arayüzeyinden esas metale doğru ilerlendikçe malzemelerin sertlik değerlerinin esas metalin sertlik değerlerine ulaşıldığını belirlemiştir.

M. Uzkut vd. [12] sürtünme kaynak yöntemi ile subap imalatında kullanılan iki farklı çeliği birleştirip mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda numunelerde kaynak bölgesine yaklaştıkça, tane küçülmesi ve tane yassılaşması ile karşılaşmışlardır. Tane yassılaşmasının, kaynak esnasında oluşan deformasyona dik doğrultuda tanelerin yönlenmesi şeklinde geliştiğini gözlemlemiştir.

A. Gül [13] yaptığı çalışmalarda, demir ve demir dışı alaşımların sürtünme kaynak tekniği ile kaynak edilmesi işleminde, kaynak parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda sürtünme basıncı değerinin yüksek, sürtünme zamanı değerinin de düşük tutulduğu kaynak işlemlerinde, elde edilen kaynak bağlantısının mekanik özelliklerinin olumlu yönde etkilendiğini gözlemlemişlerdir.

S. Sayer [14] yaptığı çalışmalarda, sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirdiği AA6063 alüminyum alaşımların bağlantı dayanımı ve mikroyapı özelliklerine, kaynak parametrelerinin etkisini incelemiştir. Yapmış olduğu mikroyapı incelemeleri neticesinde, kaynak bölgesinde yeniden kristalleşmeden dolayı homojen ve küçük taneli bir yapının meydana geldiğini gözlemlemiştir. Kaynaklı numunelerin çekme testleri sonucunda numunelerin %94'ünün ITAB bölgesinden koptuğunu ve çekme mukavemetinin ana malzemenin (AA6063) çekme mukavemetine oranının %78 olduğunu tespit etmiştir.

A. Şık vd. [15] sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirdikleri AA2024 alüminyum alaşımlı kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerine farklı kaynak parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Oluşan bağlantılara yorulma, sertlik, eğme ve çekme deneyleri yapmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda yüksek devir sayısı ve düşük ilerleme hızlarında bağlantılara giren ısı miktarı artışına bağlı olarak mekanik özelliklerde bir düşüşün meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

M. Gürler [16] alüminyum alaşımlarının sürtünme kaynak özelliklerini incelemiştir. Çalışmaları sonucunda alüminyum alaşımlarında ki boyca kısalmaların; kaynak basıncı, yığma basıncı ve kaynak süresi ile doğru orantılı olduğunu tespit etmiştir.

Z. A. Kadayıfçı [17] Sürtünme Karıştırma Kaynağı kullanarak birleştirdiği AA6061 ve AA7075 alaşım çiftinin mekanik özelliklerine devir sayısı ve ilerleme hızının etkisini incelemiştir. Çalışmaları sonucunda, devir sayısında ki artışla düzgün bir kaynak yüzeyinin elde edildiğini ve elde edilen bu düzgün kaynak yüzeyinin en ideal gerilme ve yer değişimi sağlarken; elastite modülü daha düşük bağlantılarının elde edildiğini gözlemlemiştir.

F. Sarsılmaz vd. [18] sabit devir sayısı ve farklı ilerleme hızları kullanarak birleştirdikleri sürtünme karıştırma kaynaklı AA1050/AA5083 alüminyum alaşımlı levhaların mikroyapı ve mekanik özelliklerine kaynak parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, sabit devir sayısı ve artan ilerleme hızına bağlı olarak daha düşük sürtünme sıcaklığı nedeniyle kaynaklı bağlantının mukavemet değerlerinin kademeli bir şekilde arttığını belirlemişlerdir.

M. Bozu [19] yapmış olduğu çalışmalarda kaynak parametrelerinin (devir sayısı, ilerleme hızı) mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Çalışmaları sonunda ilerleme hızının artması ile birlikte kaynak yapılmış numunelerin çekme dayanımının arttığını, devir sayısının artması ile birlikte ise malzemeye giren yüksek ısı girdisinden dolayı çekme dayanımının azaldığı gözlemlemiştir.

S. Yılmaz vd. [20] saf alüminyum, 5038 ve 7075 Alüminyum alaşımlarını sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile farklı parametrelerde kaynak ederek kaynaklı numunelerin mekanik özellikler başta olmak üzere, ITAB'ın ve kaynak bölgesinin sertleşebilirliği, bu bölgelerin içyapıları ve kaynaklı numunelerin dayanım değerlerini incelemiştir. Bu çalışmalar sonucunda, kaynak metaline giren ısı miktarının devir sayısı ve kaynak ilerleme hızına bağlı olarak kontrol edilebileceğini ve ilerleme hızındaki artışa bağlı olarak ITAB bölgesinin genişliğinin değişiklik gösterebileceğini tespit etmişlerdir.

H. Kafalı vd. [21] 6013-T6 Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğini ve kaynak yapılan malzemelerin mekanik özelliklerini ve içyapı değişikliklerini incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda ana malzemeye ve kaynaklı malzemelere mekanik testler uygulanmışlar ve mikroyapı incelemesi yapmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda, kaynaklı numunelerin ITAB bölgesinde sertliğin dolayısıyla da mukavemetin düştüğünü gözlemlemiştir. Bu durumun, mukavemet açısından ITAB bölgesinin mekanik testlerde en zayıf bölge olduğunu dolayısıyla kopmaların bu bölgede gerçekleştiğini gözlemlemiştir.

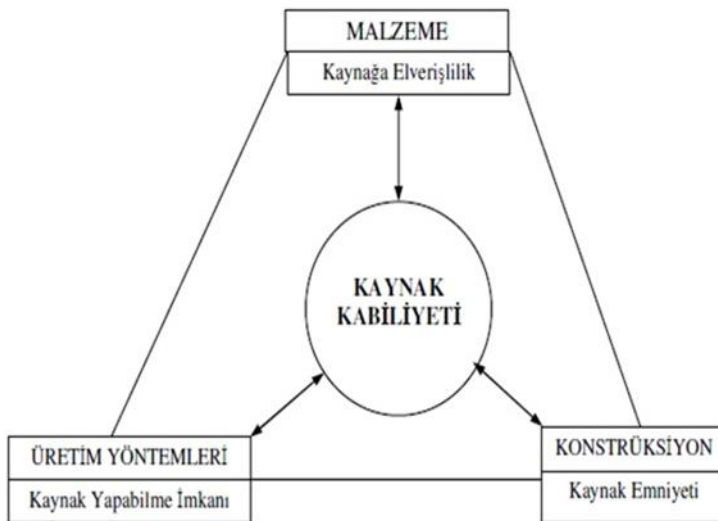
3. KAYNAK TEKNOLOJİSİ

Kaynak, metalik malzemeleri ısı veya basınç veya her ikisini birden kullanarak, aynı türden ve erime aralığı aynı olan veya yakın bir malzeme katarak veya katmayarak birleştirme işlemine metal kaynağı denilir [22].

- 1) Katı hal kaynak yöntemleri
- 2) Ergitme kaynak yöntemi.

3.1. Kaynak Kabiliyeti

Malzemelerin seçilen kaynak tekniği ile birleşebilme yeteneğine kaynak kabiliyeti denmektedir. Kaynaklı imalat işlemlerinde kaynağın amacı, yalnızca malzemelerin birleştirilmesi değil birleştirilen kaynaklı bağlantıların çalışma koşullarında bozulmadan görevini yerine getirmesidir. Kaynaklı bağlantıların bu şartları sağlama derecesine ise kaynak kabiliyeti denmektedir. Kaynak kabiliyetini etkileyen başlıca faktörler Şekil 3.1 gösterilmektedir. Kaynak kabiliyeti ise yalnızca malzemeye bağlı olmamakla birlikte kaynak konstrüksiyonuna ve yapılan kaynak usulüne bağlıdır. Kaynak yapılan bir malzeme kaynak yapılmış bir yöntem ile yüksek bir kaynak kabiliyeti gösterirken farklı bir yöntem kullanıldığında ise daha düşük bir kaynak kabiliyeti gösterebilir [23].



Şekil 3.1. Kaynak kabiliyetini etkileyen başlıca faktörler [24].

Kaynak kabiliyeti aynı zamanda bir malzemenin kaynağa elverişliliğini, kaynak emniyetini ve kaynak edilebilmeyi kapsamaktadır. Kaynak kabiliyetinin olabilmesi için en az aşağıdaki iki şartın gerçekleşmesi gerekmektedir;

1. Kaynak edilen malzemelerin belirli bir kaynak yöntemiyle birleştirilebilmesi mümkün olmalı (kaynağa elverişlilik).
2. Kaynak edilen malzemeler, kaynak sonrası maruz kalacağı gerilmelere dayanabilmelidir (kaynak emniyeti) [23].

Pratikte ise bir malzemenin kaynak kabiliyeti derecesini aşağıdaki ifadeler yardımı ile belirlenmektedir;

• **İyi kaynak edilebilir:** Malzemenin herhangi bir ön ve nihai tavlamaya ihtiyaç duymaksızın kaynak edilebileceğini ifade eder.

• **Kaynak edilebilir:** Kaynak edilecek malzemelerin kalınlığının artması sonucunda bir ön tavlama ısı işlemi gerekir. Bu tür malzemeler için, kaynak edilebilir deyimini kullanılmaktadır.

• **Şartlı olarak kaynak edilebilir:** Bu tür malzemelerde ise karbon oranının yüksek olmasından ya da kimyasal bileşiminde çeşitli alaşım elementlerinin bulunmasından dolayı kaynaklı birleştirmelerin geçiş bölgelerinde sertleşme ve çatlama tehlikesi sebebiyle ön tavlama yapılmalı ve soğuma işlemi kontrolü bir şekilde gerçekleştirilmelidir [25].

3.2. Ergitme Kaynak Yöntemleri

Ergitme kaynağı, kaynak edilecek malzemeleri sadece sıcaklığın etkisi ile bölgesel olarak eritip, ilave bir metal katarak veya katmadan birleştirme işlemdir [24].

1. Termit Kaynağı
2. Elektrik Ark Kaynağı
3. Direnç Nokta Kaynağı
4. MIG-MAG Kaynağı
5. Elektro Cüruf Kaynağı
6. Oksi-Asetilen Kaynağı
7. Elektron Işın Kaynağı
8. TIG Kaynağı
9. Lazer Kaynağı
10. Tozaltı Kaynağı

11. Plazma Transfer Ark (PTA) Kaynağı

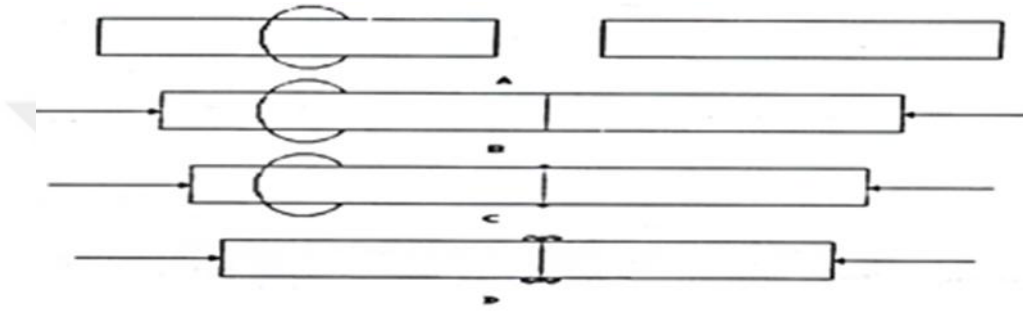
3.3. Katı Hal Kaynak Yöntemleri

Kaynak edilecek aynı ya da farklı özellikteki iki malzemeyi, ertitme olmadan eğer ertitme olmuş ise ertitmiş metalin ekstrude edildiği ve nihai birleşmenin ise iki katı yzey arasında geręekleřtięi kaynaklı birleştirme işlemleridir.

1. Ultrasonik Kaynak
2. Srtünme Karıştırma Kaynağı
3. Patlamalı Kaynak
4. Soğuk Basınç Kaynağı
5. Srtünme Kaynağı
6. Difüzyon Kaynağı

4. SÜRTÜNME KAYNAĞI

Sürtünme kaynak tekniği, elektrik enerjisi veya herhangi bir enerji kaynağından yararlanmaksızın, kaynaklanacak parçalarının temas yüzeylerinde sürtünme yolu ile elde edilen mekanik enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesi sonucunda ortaya çıkan ısıdan yararlanılarak yapılan bir katı hal kaynak yöntemidir (Şekil 4.1) [26].



Şekil 4.1. Sürtünme kaynağı mekanizması [27].

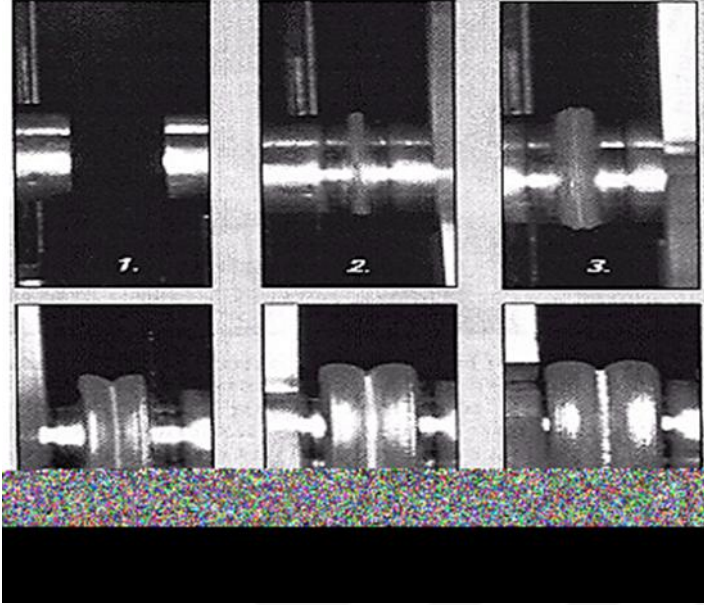
Bu kaynak yöntemini genellikle eksenel simetriye ve dairesel kesite sahip parçaların birleştirilmesinde kullanılmakta olup, son zamanlarda sürtünme kaynağı üzerinde yapılan geliştirmeler neticesinde daire dışı kesitli parçalarda kolaylıkla birleştirilebilmektedir.

Sürtünme kaynağını malzeme ve enerji tasarrufu sağladığı için son zamanlarda daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Bu kaynak yönteminde aynı veya farklı kimyasal yapıya sahip malzeme türleri ve farklı kesitteki parçalarda kolaylıkla birleştirilebilmektedir.

Şekil 4.2’de sürtünme kaynak yönteminin işlem basamakları görülmektedir. Şekil 4.2’de görülen işlem basamaklarını ayrıntılı bir şekilde anlatacak olursak;

1. Kaynak edilecek parçalardan birisi dönen bir aynaya bağlanarak döndürülürken diğer parça sabittir. Sabit olan parça ilerletilerek dönen parçaya temas ettirilir.
2. Dönme ve malzemelerin teması sonucunda sürtünen yüzeylerde ısı açığa çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu ısı kaynak bölgesinde metallerin ergime sıcaklığının her zaman altındadır.
3. Uygulanan basınç ile birlikte yumuşamış metal kaynak arayüzeyinde dışarı tasmaya baslar.
4. Dövmüş olan sıcak bölge arayüzeyden dışarıya doğru aktarılır.

5. Makinede dönme işlemi durdurulur ve yığma kuvveti ile kaynak işlemi bitirilir.
6. Elde edilen kaynaklı bağlantı yüksek bir kaynak kalitesine sahip olmakla birlikte tüm yüzey ve çapta homojen bir yapı elde edilir.



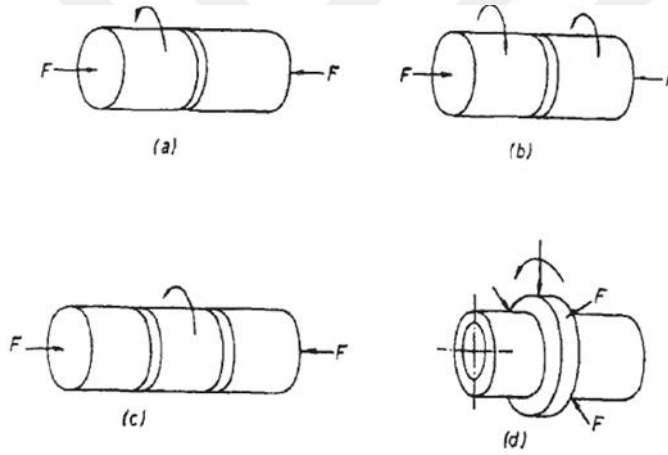
Şekil 4.2. Sürtünme kaynağı işlem basamakları[27,28].

Kaynaklama süresi zarfında temas yüzeyleri basınç altında olup ısıtma ya da sürtünme fazı olarak nitelendirilen bu süreç kaynaklanacak malzemelerin yüzeylerinde plastik şekil değiştirme sıcaklığına çıkılma kadar devam eder. Çeliklerde bağlantı bölgesinin sıcaklığı 900-1300 °C civarlarındadır. Isıtma fazı işleminde sonra yığma basıncı uygulanarak arayüzeyde ısıtılan metal yığılmaktadır. Bu şekilde kaynak bölgesinde termomekanik işlem gerçekleşmiş olur ve bunun sonucunda bu bölgede iyi bir tane yapısı görülür. Bunların sonucunda diğer yöntemler ile kaynak yapılamayan metal ve metal alaşımları çok rahat bir şekilde kaynak yapılabilirler.

Bilindiği üzere kaynak yapılacak parçalarda kaynak bağının oluşabilmesi için parçaların çıplak yüzeylerinin temas etmesi gerekmektedir. Sürtünme kaynak işleminde oluşabilecek tüm temassızlıklar sürtünme işlemi ile giderildiğinden temas işlemi çok iyi bir şekilde gerçekleşmektedir. Sürtünme kaynağında normal şartlarda herhangi bir ergime olayı gerçekleşmemektedir, kaynak işlemi sırasında çok az miktarlarda ergime olmuşsa bile yığma basınç kuvveti ile ergimiş metal dışarı atıldığından kaynak bölgesinde ergimiş metale ait herhangi bir delil bulunmamaktadır [29,27].

Sürtünme kaynağı genellikle dairesel kesite sahip olan çubuk veya boruları birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu tarz uygulamalarda dönme hareketiyle sürtünme oluşturulur ve süreç konvansiyonel sürtünme kaynağı olarak nitelendirilir. Sürtünme kaynağının uygulama şekilleri Şekil 4.3’de görülmektedir.

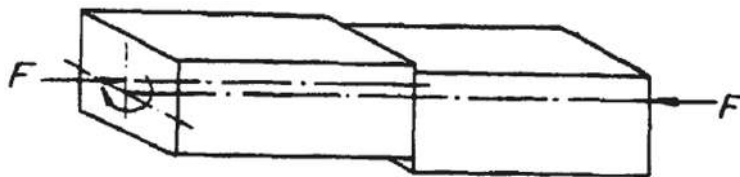
- Şekil 4.3 (a)’da sürtünme kaynağının en fazla kullanılmakta olan ve en basit uygulama şekli görülmektedir.
- Şekil 4.3 (b) küçük çaplı numunelerin kaynağında yüksek dönme hızları gerekli olduğu durumlarda kullanılmaktadır.
- Şekil 4.3 (c) çok uzun iki parçayı birleştirmede kullanılan bir yöntemdir.
- Şekil 4.3 (d) ise boruların kaynağında kullanılan ve radyal kuvvetin etkisi ile dönel bir bilezikten faydalanılarak yapılan kaynak yöntemidir.



Şekil 4.3. Sürtünme kaynağının uygulanma şekilleri[13].

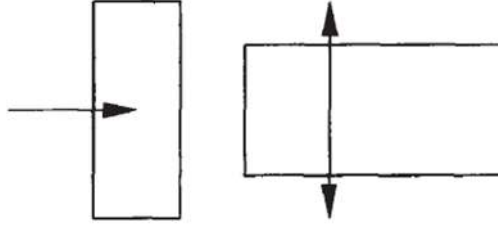
Sürtünme kaynağında, sürtünme için genelde kullanılan dönme hareketinin yanı sıra;

Yörüngesel hareket: Bu kaynak yöntemi ile silindirik olmayan parçalar kaynak edilebilmektedir. Şekil 4.4’den de görüldüğü gibi sabit şekilde duran bir parçanın üzerinde diğer parça dairesel yörünge de hareket ettirilerek kaynaklama işlemi gerçekleştirilir



Şekil 4.4. Yörüngesel hareketle sürtünme kaynağı[30,13].

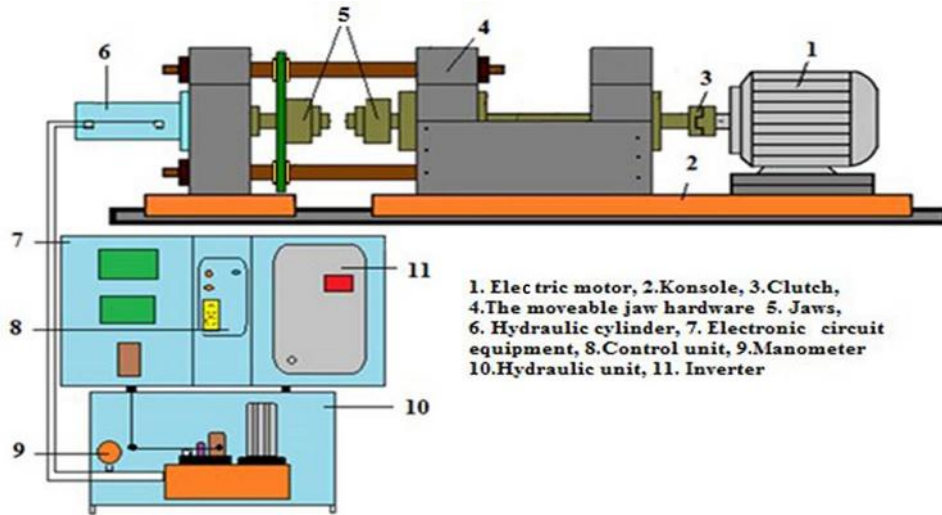
Lineer titreşim hareketi: İlk defa Vill tarafından önerilen bu yöntemde (Şekil 4.5), parçalardan birisi basınç altında ileri ve geri titreşim hareketi yaparak kaynaklama işlemi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.5. Lineer titreşim hareketi ile sürtünme kaynağı[30,13].

Açısal titreşim hareketi: bu kaynak yönteminde ise parçalardan bir tanesi uygulanan basınçla birlikte belirli bir açıyı gören yay parçası yörüngesinde hareket etmektedir [13].

Sürtünme kaynak makinesi görünüş olarak bir torna tezgâhını andırırsa da, yapılan bir takım modifiyelerle birlikte Şekil 4.6’da bölümleri kolaylıkla görülebilen sürtünme kaynak cihazları elde edilmektedir [27].



Şekil 4.6. Sürtünme kaynak cihazı ve donanımı [56].

4.1. Sürtünme Kaynak Çeşitleri

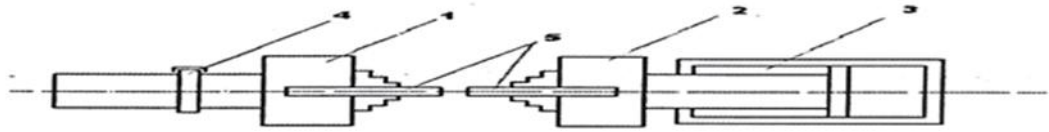
Sürtünme kaynağı, kaynaklama işlemi için gerekli olan mekanik enerjiyi sağlayan kaynak türüne göre iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. Gelişen teknoloji sayesinde artık bu iki farklı yöntemin birleştirilmesi ile birlikte kombine kaynak yöntemleri geliştirilmiş olup bunlar;

1. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı,
2. Kombine (hibrid) sürtünme kaynağı,
3. Volan tahrikli sürtünme kaynağı [31,32].

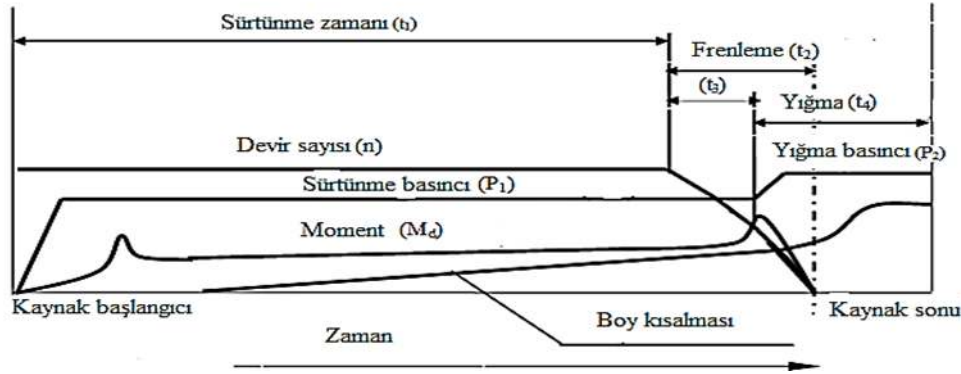
4.1.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Bu kaynak yönteminde gerekli olan dönme enerjisi sürekli bir tahrik grubu ile sağlanmaktadır. Bu yöntemde dönmekte olan iş parçasından sabit olan iş parçasına basınç uygulanması sonucunda mekanik enerji ısı enerjisini dönüştürülür.

Kaynak edilecek iş parçalardan bir tanesi motor tahrik ünitesine bağlanır ve sabit bir hızda döner, daha sonra birleştirilecek parçalara sabit aksenal kuvvet uygulanır. Birleştirilmek istenen iş parçaları daha önceden belirlenmiş olan kaynak süresi boyunca ya da belirlenmiş olan aksenal kısılma gerçekleşinceye kadar birbirlerine sürtünür ve dışarıdan frenleme işlemi yapılarak kaynak işlemi bitirilir. Kaynak işlemi sırasında uygulanan basınç yığılma amacı ile arttırılarak kaynaklı parçalar soğuyuncaya kadar basınç uygulanmaya devam eder (Şekil 4.7) [31,32].



Şekil 4.7. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı [26].



Şekil 4.8. Klasik sürtünme kaynak parametreleri [26].

Temel kaynak parametreleri:

1. Devir sayısı,
2. Yüzeye bağlı sürtünme kuvveti ve sürtünme süresi/sürtünme mesafesi,
3. Yüzeye bağlı yığılma kuvveti ve yığılma süresi / yığılma mesafesidir (Şekil 4.8) [13].

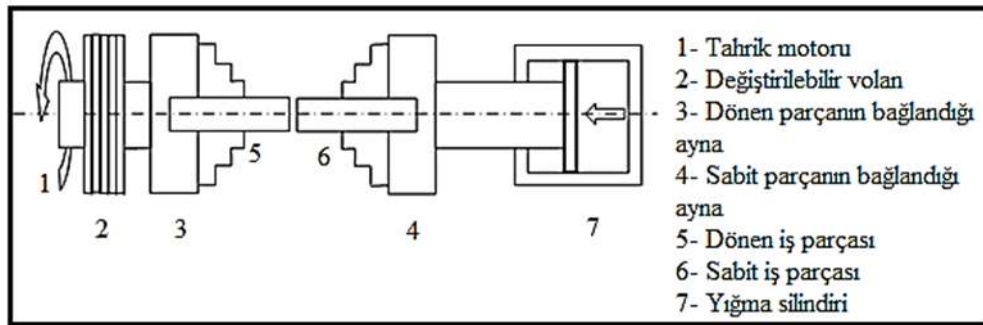
4.1.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Bu kaynak yönteminde, tahrik motoru volan sistemi sürekli döner ve dönen iş parçasını uygun bir hıza getirmek için volan-mil sistemine birleştirilir. Birleştirme için gerekli olan hıza ulaşıldıktan sonra motor valanı mil volanından ayrılır. Atalet momenti oldukça düşük olan mil volanı, kaynak işlemini tamamlamak için fren yapmadan hızlı bir şekilde durur. Bu özelliğinden dolayı kaynak yönteminin adı literatürde “atalet kaynağı” olarak da bahsedilmektedir. Volana bağlı olan parçalardan biri istenilen bir hıza ivmelendirilir, bu sayede mekanik enerji volana depolanır.

Sonradan iki iş parçası da birbirlerine temas ettirilerek parçalara bir basınç uygulanmaktadır. Daha sonra iş parçaları bu basınç altında sürtünür ve volan enerjisinde ara yüzeydeki sürtünmeye harcanmış olur. Kaynak bölgesi volanın hızı azaldıkça ısınmaktadır. Bazen gerekli olan durumlarda volanın hızı tamamen durmadan uygulanan basınç artırılır ve volan tamamen durduktan sonra da basınç bir süre uygulanmaya devam ettirilir (Şekil 4.9).

Aşağıda volan tahrikli sürtünme kaynağının, sürekli tahrikli sürtünme kaynağına olan üstünlükleri sıralanmıştır;

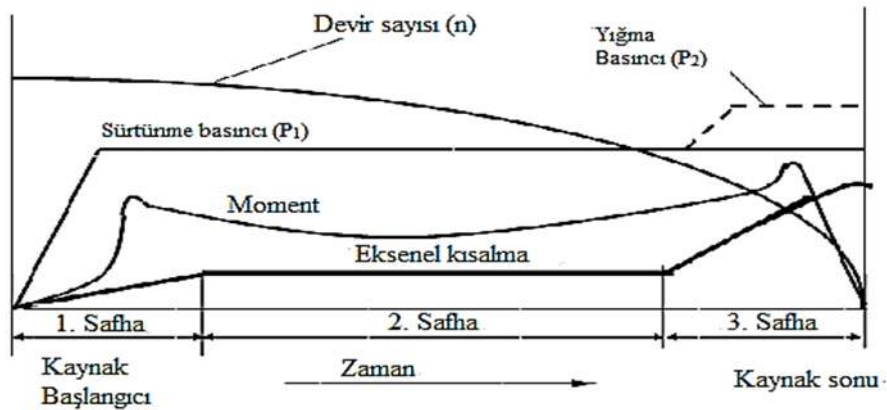
- Sürekli tahrikli sürtünme kaynağına göre daha kaliteli bir kaynak dikişi elde edilir,
- Oluşan ITAB bölgesi daha dardır,
- Üretim sürekli tahrikli sürtünme kaynağına göre daha seri gerçekleşmektedir,
- Parçaların kaynak edilmesi için gerekli güç ihtiyacı daha azdır,
- Volan tahrikli sürtünme kaynak cihazının düzeneği sürekli tahrikli sürtünme kaynağına göre basittir.



Şekil 4.9. Volan tahrikli sürtünme kaynağı [26].

Volan tahrikli sürtünme kaynağının temel kaynak parametreleri Şekil 4.10'dan da görüldüğü gibi;

- Devir sayısı,
- Yüzeye bağlı dövme kuvveti,
- Dövme süresi,
- Volanın kütlesidir [31].



Şekil 4.10. Volan tahrikli sürtünme kaynak parametreleri [26].

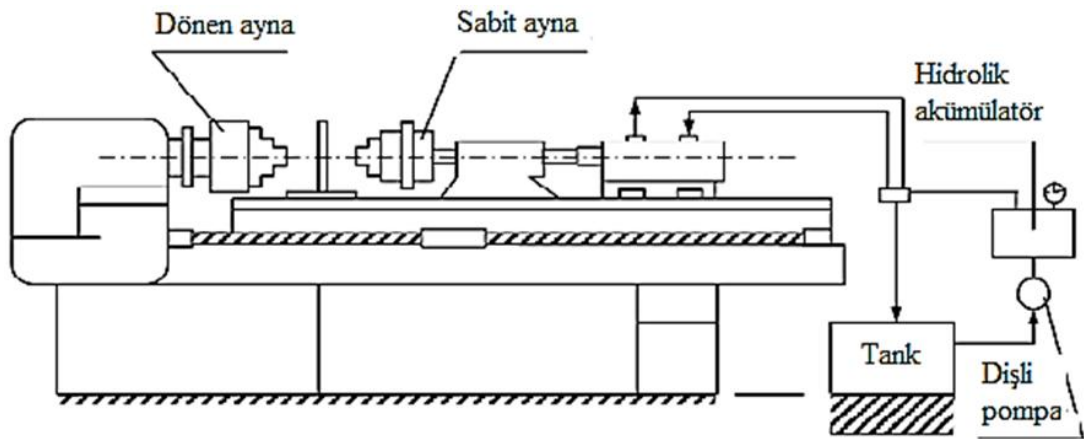
4.1.3. Kombine Sürtünme Kaynağı

Bu kaynak yöntemi ile her iki kaynak işlemi de yapılabilir. Kaynak işlemi, sürtünme ve yığma safhalarını içermektedir. Hem atalet ve hem de sürtünme kaynağı için moment eğrilerinin değişimi işlemin izahı için önemli değer taşımaktadır. Yöntemin başlangıcında ilk önce kuru sürtünme vardır ve bu sürtünmenin etkisi ile birlikte moment eğrisi bir zirve yapar daha sonra ise dengeye gelir.

Oksit tabakalarının yüzeyden parçalanıp uzaklaştırılması sonucunda parçaların çıplak yüzeylerindeki temas sırasında atomsal düzeyde kuvvetli bağlar oluşmaya başlamaktadır. Oluşan bu bağlar sürtünme hareketinin de yardımıyla koparılmaya çalışılır. Bu koparılmalar sonucunda parçaların temas noktalarında büyük adhezyon kuvvetleri oluşmaktadır. Bunun sonucunda ise moment artar ve sıcaklık kaynak işlemi için gerekli düzeye çıkar. Frenleme sonrasında hızın azalması ile birlikte moment de sıfıra düşmektedir.

Sürtünme kaynağının tipik bir görüntüsü Şekil 4.11 de verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere sürtünme kaynak makinası;

- Ana gövde bağlama tertibatları,
- Dönme ve yığma mekanizmaları,
- Güç ünitesi,
- Fren sistemi,
- Kumanda tablosu,
- Kontrol üniteleri kısımlarından oluşmaktadır [26].



Şekil 4.11. Sürtünme kaynak makinası [26].

4.2. Kaynak Parametreleri

Sürtünme kaynağında, kontrol edilmesi gereken çok fazla sayıda parametre bulunmaktadır. Bu parametreler;

- Devir sayısı
- Sürtünme basıncı
- Sürtünme süresi
- Yığma basıncı
- Yığma süresidir.

Bu parametrelerin dışında, kaynak edilecek numunenin geometrisi ve numunenin kimyasal bileşimi de önemlidir.

4.2.1. Devir Sayısı

Literatürde yapılan incelemeler sonucunda ara yüzey sıcaklığını ve bağlantı kalitesini etkileyen en önemli parametrenin devir sayısı olduğu izah edilmektedir. Yüksek devir sayısı, yüksek ara yüzey sıcaklığı üretirken; düşük devir sayısının ise kaynak edilecek parçaların arayüzeylerinde yetersiz sıcaklığa neden olmasından dolayı kaynak kalitesini olumsuz etkilemektedir. Yüksek devir sayısına bağlı olarak deformasyon hızındaki değişim kaynak süresini kısaltmaktadır. Çelikler için devir sayısı 1.2- 1.8 m/s arasında olmalıdır. 1.2 m/s altındaki hızlarda düzensiz bir yığılma oluşmaktadır. Bununla birlikte, düşük devir sayılarında kaynak arayüzeyinde oluşabilecek intermetalik faz oluşumu sınırlanabilmektedir. Yüksek devir sayılarında ise sürtünme basıncı ve sürtünme süresinin dikkatli seçilmesi sonucu kaynak bölgesinde oluşan aşırı ısınma kontrol edilebilmektedir [33].

4.2.2. Sürtünme Basıncı

Sürtünme basıncı kaynak yapılacak malzemelerin plastik şekil değiştirme özelliklerine ve geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Uygulanan basınç kuvveti malzemelerin temas yüzeylerinde bulunan oksitleri uzaklaştırarak temas yüzeylerinin atmosfer ile bağlantısını kesebilmelidir. Bunların yanı sıra sürtünme süresinin malzemelerin temas yüzeylerinde

istenilen sıcaklığı sağlayabilecek düzeyde olması gerekmektedir. Kaynak parametrelerinden olan basınç değişkenini kaynak bölgesinin sıcaklığı ve oluşan aksel kısılma ile kontrol etmek mümkündür [13,34].

4.2.3. Sürtünme Süresi

Sürtünme süresinin, malzemelerin arayüzeylerindeki, istenmeyen pislik ve kalıntıları temizleyebilecek ve gerekli olan plastik deformasyon için istenilen arayüzey sıcaklığına çıkabilecek düzeyde olması gerekmektedir. Sürenin uzun tutulması halinde ITAB genişlemekte ve aşırı yığılma meydana gelmektedir [30,35,13].

4.2.4. Yığma Basınç Kuvveti

Yığma basıncı özellikle çeliklerde sürtünme işlemi sonrasında bağlantı kalitesini arttırmaktadır. Uygulanan yığma basıncı kaynak yapılacak malzemenin sıcak akma sınırına bağlı olmakla birlikte uygulanan basınç kuvvetinin ise aşırı derecede kaynak yığılmasına neden olmayacak kadar yüksek ve yetersiz bir kaynaklamaya neden olacak kadar da düşük olmaması gerekmektedir. Sürtünme işlemi sonrası uygulanan yığma basıncı ile birlikte malzemeler arasında ki difüzyon hızlanmaktadır. Sürtünme kaynak yönteminde uygulanan yığma basınç kuvveti malzemelerin sıcak dövme mukavemetlerinden daha düşük olmalıdır. Çok yüksek alınan yığma basınç kuvvetlerinden dolayı kaynaklanan malzemelerde aşırı metal deformasyonu oluşmaktadır ve buna bağlı olarak da kaynak bölgesinde aşırı yığılma sonucu metalik olmayan inklüzyonlar ve istenmeyen enine bir akış görülmektedir [30,13].

4.2.5. Yığma Süresi

Kaynak edilecek malzeme çiftlerinin arayüzeylerindeki plastik deformasyonu gerçekleştirmek ve malzemeler arası difüzyonu hızlandırmak amacıyla yığma basınç kuvvetinin uygulandığı süreye yığma süresi denmektedir [30,35,13].

4.3. Malzemelerin Sürtünme Kaynak Kabiliyeti

Sürtünme kaynağı, demir ve demir dışı metallerin yanı sıra, diğer kaynak yöntemleri ile kaynak edilemeyen farklı kimyasal ve mekanik özelliklere sahip metallerin kaynağında da kullanılmaktadır. Ergime sıcaklığı altındaki sıcaklıklar ve kısa kaynak süresi sürtünme kaynağına bu olanağı vermektedir.

Sürtünme kaynak yöntemi ile dövülebilir ve kuru sürtünme özelliği iyi olmayan malzemeler rahatlıkla birleştirilebilir. Bağlantı bölgesinin yeterli kaynak sıcaklığına çıkamamasında kuru yağmalaya sebep olan alaşım elementleri rol almaktadırlar.

Bu kaynak yönteminde yüksek alaşımlı çeliklerden düşük alaşımlı çeliklere (yumuşak çeliklere) kadar bütün demir esaslı malzemeler kaynaklanabilmektedir. Düşük alaşımlı çelikler geniş bir parametre aralığında kolaylıkla kaynaklanabilirken, HSS tipi yüksek alaşımlı çeliklerin kaynağı daha dar bir parametre aralığında ve daha yüksek devir sayılarında kaynaklanabilmektedir. Kaynak işlemi sonunda kaynaklı bağlantıların tokluk ve çatlak hassasiyeti dikkate alınarak bağlantı üzerinde oluşan çapakların çatlak başlangıcına neden olmasına engel olmak için alınması gerekmektedir.

Malzemelerin sürtünme kaynağına uygunlukları Tablo 4.1’de görülmektedir.

Tablo 4.1. Malzemelerin sürtünme kaynak uygunluğu [27].

	Ticari Saf Alüminyum	Alüminyum Alaşımaları	Bakır	Bakır Alaşımaları	Yumuşak Çelik	Orta Karbonlu Çelik	Düşük Alaşımlı Çelik	Sertleştirilmiş Çelik	Yüksek Hız Çeliği	Östenitik Paslanmaz Çelik	Ferritik Paslanmaz Çelik	Dublex Paslanmaz Çelik	PH Paslanmaz Çelik	Martenzitik Paslanmaz Çelik	Nikel	Nikel Alaşımaları	Niobyum	Titanyum Alaşımaları	Tungsten	Zirkonyum
Ticari Saf Alüminyum																				
Alüminyum Alaşımaları																				
Bakır																				
Bakır Alaşımaları																				
Yumuşak Çelik																				
Orta Karbonlu Çelik																				
Düşük Alaşımlı Çelik																				
Sertleştirilmiş Çelik																				
Yüksek Hız Çeliği																				
Östenitik Paslanmaz Çelik																				
Ferritik Paslanmaz Çelik																				
Dublex Paslanmaz Çelik																				
PH Paslanmaz Çelik																				
Martenzitik Paslanmaz Çelik																				
Nikel																				
Nikel Alaşımaları																				
Niobyum																				
Titanyum Alaşımaları																				
Tungsten																				
Zirkonyum																				

Kaynak Edilebilirlik Alaşım Miktarına Bağlıdır

1 Kaynak Edilebilir
2 Kaynak Edilebilir
Kaynak Başlangıcında Isıl İşlem Olmalı
3 Kaynak Edilebilir
Kaynak Edilebilirlik Alaşım Miktarına Bağlıdır
4 Kaynak Edilebilirlik Alaşım Miktarına Bağlıdır
5 Kaynak Edilebilirlik Alaşım Miktarına Bağlıdır
Kaynak Başlangıcında Isıl İşlem Olmalı
6 Kaynak Edilebilirlik Alaşım Miktarına Bağlıdır
Kaynak Edilebilirlik Alaşım Miktarına Bağlıdır

4.4. Kaynak Yapılacak Bağlantıların Yüzeylerinin Hazırlanması

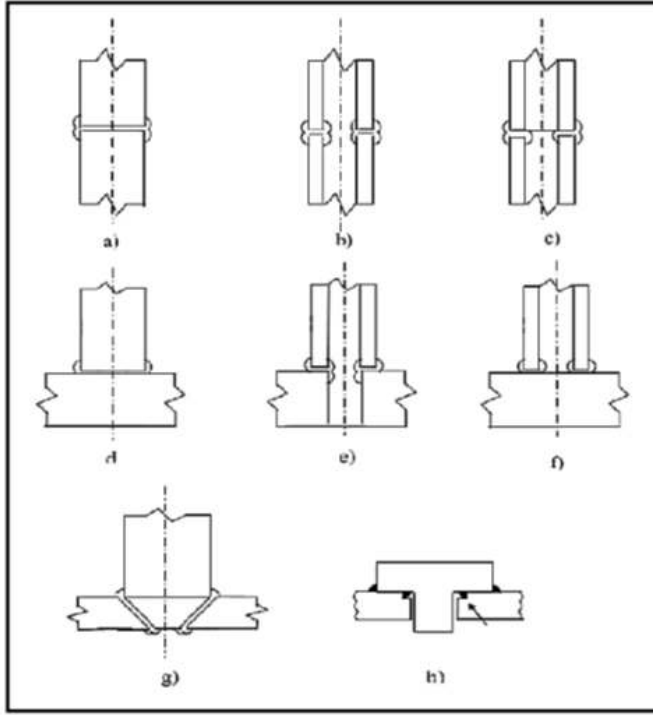
Kaynak yapılacak parçaların yüzeylerinin hazırlanmasında aşağıda verilen hususların dikkate alınması gerekmektedir: [37,36].

1. Kaynak edilecek parçaların arayüzeylerinden sürtünmeyi önleyip azaltacak, herhangi bir kav, kalın oksit tabakası, hadde ve döküm tabakası, çekme ya da dövme işlemlerine ait tozlar gibi yabancı unsurlar uzaklaştırılmalıdır.
2. Yumuşatma tavlama ile ağız bölgesinde su verilmiş sert tabakalar giderilmeli ya da bu tabaka oldukça ince olmalıdır ki kaynaklama sırasında ortadan kalkabilmelidir.
3. Yüksek mukavemetli malzemeler ile düşük mukavemetli malzemelerin kaynağında deformasyon kabiliyeti farkından dolayı ortaya çıkabilecek sorunları gidermek için yüksek mukavemetli malzemeye ön tavlama yapılmalıdır.

4.5. Kaynak Yapılacak Parçaların Bağlanması

Sürtünme kaynağında dönme hareketi ve eksenel kuvvetler iletilebilmeli ve bağlama yüzeylerinin kirlenmesi önlenmelidir. Parça tasarımları yapılırken en az kaçıklığı verecek şekilde tasarlanmalıdırlar. Sürtünme kaynağı yapılabilecek temel tasarım şekilleri Şekil 4.12 a-f’de görüldüğü gibi, çubuk-çubuk, çubuk-boru, çubuk-levha, boru-boru, boru-levha ve boru-disk şeklindedir.

D.L. Kuruzar [37,36] açılı bağlantıların kaynağında eksenle olacak açının 30° den fazla olmasını önermiştir. Literatürde ise bu açının $30-45^\circ$ ve $45-60^\circ$ arasında olması vurgulanmıştır. Şekil 4.12 g’de açılı bağlantıya ilişkin bir örnek görülmektedir. Bunun yanı sıra Şekil 4.12’de görüldüğü gibi bazı kaynaklı birleştirmelerde yığma işleminin yapılmasının zor olmasından dolayı yığma aralıkları bırakılması gerekmektedir.



Şekil 4.12. Sürtünme kaynağı yapılabilecek bağlantılar [37]

4.6. Birleşme Bölgesindeki İç Yapı

Sürtünme kaynağında da ergitme ve difüzyon kaynaklarında olduğu gibi kaynak dikişinde, kaynak edilen malzemelerin birbiri içerisine karıştığı bir bölge ve de bu karışma bölgesinin etrafında kaynak edilen her iki malzeme tarafında ortaya çıkan ısıdan etkilenmiş bir bölge mevcuttur.

Malzemelerin birbirleri içerisinde karıştığı bölgede difüzyon sonucu atomlar karşılıklı olarak yer değiştirme yapmaktadırlar. Isıdan etkilenmiş bölgede ortaya çıkan ısı miktarı genellikle malzemelerin ergime sıcaklıklarının altındadır.

Farklı malzemelerin sürtünme kaynağında mikroyapı da gerçekleşebilecek değişimler aşağıda görülmektedir;

- İntermetalik faz oluşumları,
- Karbon değeri yüksek alaşımsız çeliklerde karbon miktarında azalma,
- Mikroyapı da yeniden kristalleşme,
- Kaynaklı malzemelerin ergime sıcaklığından daha düşük sıcaklığa sahip ötektik alaşım oluşumu,

- Mikroyapı da tane irileşmesi.

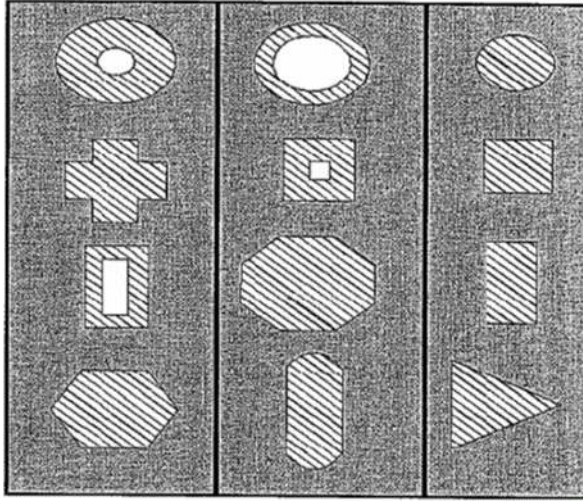
Yukarıda maddeler şeklinde saydığımız durumlar, kaynaklı birleştirmelerin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır. Oluşan intermetalik fazlar sert ve gevrek bir yapıya sahip olmalarında dolayı kaynak bölgesinin gevrekleşmesine neden olurlar. Karbon değerlerinde ki azalma sonucunda alaşımsız çeliklerin mukavemetinde azalma meydana gelmektedir. Mikroyapı da gerçekleşen yeniden kristalleşme veya tane irileşmesi sonucunda yumuşak bölgeler oluşmaktadır.

Kaynak edilme işleminin kısa, sıcaklık değişiminin az olması sürtünme kaynağının avantajlarından biridir. Bu özellikleri sayesinde diğer kaynak yöntemlerinde görülen içyapı değişimleri sürtünme kaynağında daha az görülmektedir.

4.7. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Parça Geometrileri

Bu kaynak yöntemini genellikle eksenel simetriye ve dairesel kesite sahip parçaların birleştirilmesinde kullanılmakta olup, son zamanlarda sürtünme kaynağı üzerinde yapılan geliştirmeler neticesinde daire dışı kesitli parçalarda kolaylıkla birleştirilebilmektedir.

İçi dolu ya da boş kesitli parçaların bu kaynak yöntemi ile birleştirmek mümkündür. Kaynak edilecek olan dolu kesitteki parçaların çapları 1 mm den 300 mm ye kadar olabilir. Boş kesitteki parçaların kaynağında ise kaynak edilecek parçaların çapları benzer büyüklükte olmalıdır. Sürtünme kaynağı üzerinde yapılan çalışmalar ve geliştirmelerle birlikte Şekil 4.13’de görülen çeşitli kesit ve şekildeki parçaların kaynak edilebilmektedir [27].



Şekil 4.13. Sürtünme kaynağına uygun parça kesitleri[27].

4.8. Sürtünme Kaynağının Kullanım Alanları

Sürtünme kaynağının kullanım alanlarına ait örnekler aşağıda verilmiştir.

4.8.1. Makine İmalatı: Dişli çarklar, hidrolik silindirler, piston kolları, matkap uçları, krank milleri, sonsuz vidalı miller (Şekil 4.14) [37].

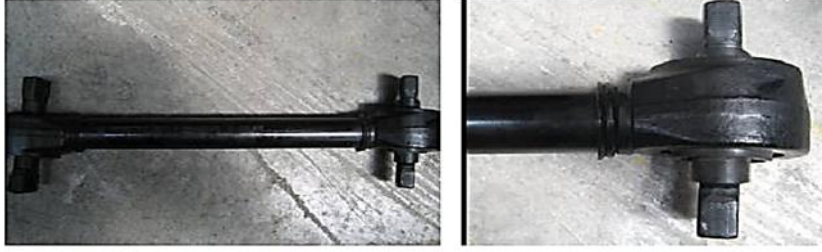


Şekil 4.14. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş dizel motor pistonu [27].

4.8.2. Otomotiv Endüstrisi: Egzos subapları, fren ve kardan milleri, turbo dondurucular, araçların vites kolları, ön yıkama odaları, ön ısıtma odaları, araçların bazı şanzıman parçaları, boru milleri vs. (Şekil 4.15 ve Şekil 4.16) [27].



Şekil 4.15. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş egzoz supapları [27].



Şekil 4.16. Ticari araçlarda sürtünme kaynağı uygulanmış çeki kolları [27].

4.8.3. Havacılık ve Uzay Tekniği: Rotorlar, yanma odaları, türbinler, borular, fittingsler, miller, itme memeleri ve flanşlar, (Şekil 4.17) [37].



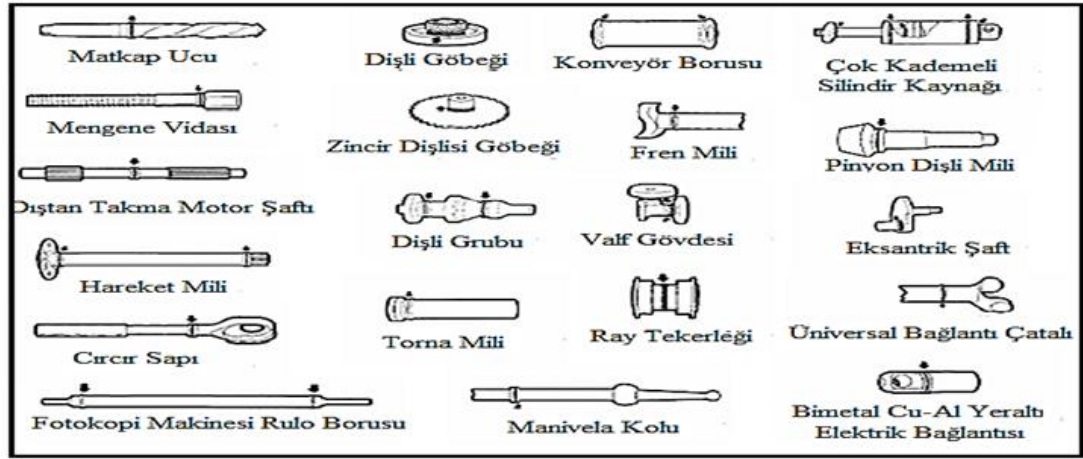
Şekil 4.17. Sürtünme Kaynağı ile imal edilmiş uçak parçası[27].

4.8.4. Elektronik ve Elektroteknik Endüstrisi:

- Gaz analizleri için alıcı kameraları,
- Fittingsler,
- Röntgen cihazı tüpleri için döner anot milleri,

- Devre kontakları,
- Kromatograflar için ayırma sütunları,
- Sübap yuvaları,
- Sürekli lehim uçları,
- Geçiş parçaları,
- Flanşlar,
- Boru tesisatı bağlantıları.

Şekil 4.18’de sürtünme kaynak tekniği kullanılarak imal edilmiş parçalara görülmektedir [37].



Şekil 4.18. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş parçalara örnekler [27].

4.9. Sürtünme Kaynağının Avantajları

1. Sürtünme kaynak yönteminde diğer kaynak yöntemlerine nazaran sarf edilen enerji miktarı daha azdır.
2. Sürtünme kaynak yöntemiyle diğer yöntemlerle kaynak edilmesi zor ya da imkânsız malzemeler kaynak edilebilir.
3. Sürtünme kaynak yönteminde malzeme kaybının az olmasından dolayı, malzeme maliyetlerinde ciddi derecede tasarruf sağlanmaktadır [13].
4. Diğer yöntemlerde kaynak arayüzeyinde görülen gevrek faz oluşumu sürtünme kaynağında görülmemektedir.

5. Sürtünme kaynağında diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi kaynak işleminden sonra yetersiz mekanik özellikler gösteren pek çok alaşım bu yöntemle rahatlıkla kaynak edilebilir [13].
6. Kaynaklama işlemi malzemelerin ergime derecelerinin altında olduğu için farklı metallerin kaynağı yapılabilmektedir.
7. Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen kaynaklı malzemelerin dayanımları esas malzemeye denk ya da bazı durumlarda daha yüksek olabilmektedir.
8. Yöntem bir katı hal kaynak yöntemi olduğu için kaynak sonrası kaynak bölgesinde cüruf vs. oluşumu olmamaktadır.
9. Kaynak edilecek malzemelerin temas yüzeylerinde gerçekleşen sürtünme ile birlikte bütün oksit ve yabancı maddeler kaynak arayüzeyinden uzaklaştırılır.
10. Sürtünmenin etkisi ile ortaya çıkan ısı bölgesel olmasından dolayı kaynak bölgesinin her iki tarafındaki ITAB çok dardır ve herhangi bir metalürjik dönüşüm gerçekleşmemektedir.
11. Kaynak parametrelerinden yığılma kaynak dikişini havanın olumsuz etkilerinden korumaktadır [30,13].
12. Sürtünme kaynağının pek çok uygulaması otomatik bir şekilde gerçekleşmektedir.
13. Kaynak işlemi sırasında herhangi bir kıvılcım ortaya çıkmadığı için kaynak tezgâhları operatörlere yakın kurulabilir ve bunun sonucunda ortamda alan tasarrufu sağlanmaktadır [13].
14. Kaynak parametrelerinin kontrolü oldukça basittir.
15. Sürtünme kaynak yöntemi ile farklı kesit ve şekildeki malzemelerin kaynağı yapılabilmektedir [27].

4.10. Sürtünme Kaynağının Dezavantajları

1. Kaynak edilecek parça geometrisi sürtünme kaynağını sınırlandırmaktadır.
2. Kaynak edilecek parçaların kesit alanlarının çok büyük olması sürtünme kaynağını sınırlandırmaktadır [13].
3. Kaynak işlemi sonucunda malzemelerde boyca kısalmalar görülmektedir ve bu duruma bağlı olarak malzeme kaybı yaşanmaktadır.
4. Sürtünme kaynak makinelerinin ve donanımlarının maliyetleri oldukça yüksektir [13].

5. Kaynak işlemi sonrasında kaynak bölgesinde gevrekleşme görülebilir.
6. Kaynak edilecek parça boyutları makine boyutlarıyla sınırlıdır.



5. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

5.1. Magnezyumun Genel Özellikleri

Yapısal uygulamalarda kullanılabilecek en hafif metal olan Mg elementi ilk olarak 1808 yılında Sir Humphrey Davey keşfetmiştir. Yer kabuğunda %2.7, okyanuslarda ise %0.13 oranında bulunan Magnezyum elementi Periyodik Tablonun IIA grubunda bulunan bir toprak alkali elementtir. Saf halde bulunan Mg 'un mekanik ve fiziksel özellikleri tablo 5.1 'de görülmektedir [38].

Tablo 5.1. Saf Mg 'un Mekanik ve Fiziksel Özellikleri [38].

Simgesi	Mg
Atom numarası	12
Atom ağırlığı	24.312 g/mol
Kaynama noktası	1090 °C
Ergime noktası	650 °C
Yoğunluğu	1.74 g/cm ³
Elektron düzeni	3s ²
Kristal yapısı	Hekzagonal sıkı paket
Çekme Dayanımı	80-180 MPa
Young Modülü	45 GPa
Çekme (katı-sıvı)	4.2 %
Atom hacmi	14.0 (atom ağırlığı/yoğunluk)
Özgül ısısı	0.25 cal/g °C
Isı iletkenliği	156 W/m°K, s.cm.°C (oda sıcaklığında)
Elektrik iletkenliği	22.4 m/(mm ²)(oda sıcaklığında)
Kaynama ısısı	32.517 kcal/atomgram

5.2. Magnezyum Alaşımları ve Üretim Yöntemleri

Magnezyum genel olarak diğer metallerin üretildiği yöntemlerle şekillendirilir. Malzemeden beklenen özellikler dikkate alınarak imalat yöntemi seçilmelidir. Magnezyum alaşımlarının imalatında, döküm yöntemleri (basınçlı döküm ve kum döküm) ve plastik şekillendirme yöntemleri (ekstrüzyon, dövme, haddeleme) başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Magnezyum için optimum şekillendirme yöntemi ise yüksek basınçlı kalıp döküm ve ekstrüzyondur [39].

5.3. Magnezyum Alaşımları ve Standartları

Mg alaşımlarının sınıflandırılması ASTM (A275) standardına göre belirlenmekte olup yöntem ise iki harfle birlikte iki rakamı kapsamaktadır. İki harf, alaşım içerisinde en fazla bulunan iki elemanına verilmiş olan harf kısaltmasıdır. Rakamlar ise alaşımın içerisinde bulunan bu iki alaşımın yüzdelik dilimleridir. Yaygın olarak kullanılan alaşım elementlerinin tek harf sistemine göre listelenmiş şekli Tablo 5.2’ de verilmiştir [38].

Tablo 5.2. Alaşım elementleri ve kısaltmaları

Harf	A	C	E	H	J	K	L	M	Q	S	W	X	Z
Element	Al	Cu	Re	Tr	Sr	Zr	Li	Mn	Ag	Si	Yi	Ca	Zn

Örnek AZ63 alaşımının açıklaması aşağıda verilmektedir.

A→ Al’u yani Mg’dan sonra alaşımda en fazla bulunan elementi ifade etmektedir.

Z→ Zn’yi yani alaşımda 2. olarak en fazla bulunan elementi ifade etmektedir.

6→ Alaşım içerisinde bulunan Al oranının yaklaşık olarak 5,6-6,4 arasında olacağını ifade etmektedir.

3→ Alaşım içerisinde bulunan Zn oranının yaklaşık olarak 2,6-3,4 arasında olacağını ifade etmektedir.

5.4. Magnezyum Alaşımlarının Temel Özellikleri

Yüksek saflıktaki Mg alaşımları şekillendirme kabiliyetlerinin ve darbe dayanımlarının yüksek olması sonucunda çok iyi korozyon dayanımı göstermektedirler. Bu alaşımlar döküm işleminde yüksek döküm hızı, talaşlı imalatı ise uzun takım ömrü ile birlikte çok iyi oranda mekanik işlenebilirlik göstermektedirler. Magnezyum plastik malzemelere termoplastik özelliğinden dolayı alternatif oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra yüksek oranda esneklik ve çalışma koşullarında da yüksek verim göstermesi yapısal konstrüksiyonlarda plastik malzemelere göre daha yüksek bir avantaj sağlamaktadır. Mg alaşımlarında, güneş ışığına maruz kalınması sonucu plastiklerde görülen yaşlanma, renk değişimi ve mekanik özelliklerde azalma gibi durumlar görülmemektedir [40].

5.5. Alaşım Elementlerinin Magnezyum Alaşımına Etkisi

Diğer metallerde olduğu gibi magnezyumda nadiren saf halde kullanılır. Magnezyuma ilave edilen alaşım elementleri malzemenin dayanımı arttırmaktadır. Magnezyum sahip olduğu HSP kafes yapısı ve tane çapı çok fazla elementle katı çözünebilirliğe müsaade etmektedir. Mg alaşımları Sn, Fe, Al, Cu, Be, Zr, Si, Ag, Ca, Mn, Zn ve Ni gibi ana elementleri ile birlikte Na, Li, K alkali ve Ln, Ce, Y, Nd toprak elementleri (RE) katılarak alaşımlandırılabilirler. Mg alaşımları bu elementlerin biri veya birkaçı ile alaşımlandırıldığında genellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olmaktadırlar. Al elementi, Mg alaşımlarında en fazla kullanılan alaşım elementidir [41,42].

5.5.1. Alüminyum (Al): Al, Mg alaşımlarının katı çökelti dayanımını ve ergimiş metalin dökülebilirliğini geliştirmekte, döküm alaşımlarının mikro gözenek oluşumunu azaltmaktadır. Alaşıma ilave edilen Al alaşımın sertliğini, dayanımını ve katılaşma zamanını arttırırken sünekliğini ise azaltmaktadır.

5.5.2. Çinko (Zn): Alaşıma ilave Zn, tane sınırlarındaki ötektik oluşumunu arttırması sonucu alaşımın katılaşma sıcaklığını düşürmektedir. Zn alaşıma, korozyon özellikleri üzerinde kötü bir etkisi bulunan Cu'nun korozyon dayanımı üzerindeki etkisini azaltmak için ilave edilir. ökelti sertleşmesi gösteren Zn ortam sıcaklıklarında dayanımı ve ergiyiğin akıcılığını arttırmaktadır. Zn tane sınırlarında ökilmesi sonucunda sıcak yırtılma oluşturduğundan alaşıma ilavesi %2 ile sınırlıdır. [41].

5.5.3. Kurşun (Pb): Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazını inceltmek için alaşıma iyi bir çözünürlüğe sahip Pb ilave edilir [41].

5.5.4. Kalay (Sn): Sn alaşımın sünekliğini ve işlenebilirliği arttırmakla birlikte sıcak işlem sırasında alaşımın çatlama eğilimini azaltmaktadır [41].

5.5.5. Mangan (Mn): Mn, Mg alaşımlarında daha çok korozyon direncini arttırmak için kullanılmaktadır. Mangan Fe-Mn ökeltilerinde demirin kontrolü için kullanılmaktadır. Alaşıma ilave edilen Mn alaşımın sürünme direncini geliştirmekle birlikte Fe'in etkisini azaltarak, korozyonu engellemektedir. Mg alaşımlarının dayanımında Mn'ın etkisi azdır. Mg içerisinde Mn, sıcaklığa bağlı olarak % 3,4'e kadar katı eriyik oluşturabilmektedir [41].

5.5.6. Demir(Fe): Alaşıma ilave edilen Fe, Mg'un elik kalıplarla kuvvetli reaksiyona girmesini arttırmakla birlikte korozyon özelliklerini ise büyük oranda azaltmaktadır. Mg alaşımlarına ilave edilen Fe miktarı %0.01-0.03 aralığında olmalıdır [38].

5.5.7. Bakır (Cu): Cu, dökülebilirliği iyileştirmekle birlikte yüksek sıcaklıklara dayanımı artırmaktadır. Alaşıma ilave edilen Cu miktarı %0,05'i geçtiğinde alaşımın korozyon dayanımına zararlı etkisi vardır.

5.5.8. Toprak Alkali Elementler: Araştırmalar sonucunda RE elementleri alaşımın, sürünme direncini ve yüksek ısı dayanımını artırdığı döküm porozitesini ise azalttığı bilinmekle birlikte alaşımın dökülebilirliği iyileştirmekte ve mikroporoziteyi azaltmaktadır. RE elementleri oda sıcaklıklarında ve yüksek sıcaklıklarda alaşımda katı eriyik ve çökelme sertleşmesi yaparlar [43].

5.6. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Mg alaşımları hafif olmalarından ve özgül çekme dayanımlarının büyük olmasından dolayı elektronik, havacılık ve uzay, savunma, otomotiv sanayisinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar [44].

6. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

6.1. Alüminyumun ve Alaşımlarının Genel Özellikleri

Oksijen ve Silisyumdan sonra yer kabuğunda en fazla bulunan 3. element olan Alüminyum (% 8) üzerine ilk çalışmalar, 18. yüzyılın sonları ile 19. Yüzyılın başlarında gerçekleştirilmiştir. Sir Humprey Davy 1807'de alüminyum bileşiklerinin içerisinde bir metal olduğunu ileri sürmüştür ve buna da alüminyum ismini vermiştir. Alüminyum hidroksitlerden $[AlOOH]$ ve $[Al(OH)_3]$ üretilen bir metal olan alüminyum periyodik cetvelin 3A grubunda bulunur [29]. Tablo 6.1 saflık derecesi %99.5 olan alüminyumun genel özellikleri görülmektedir [45].

Tablo 6.1. % 99.5 saflık derecesine sahip alüminyumun genel özellikleri [45]

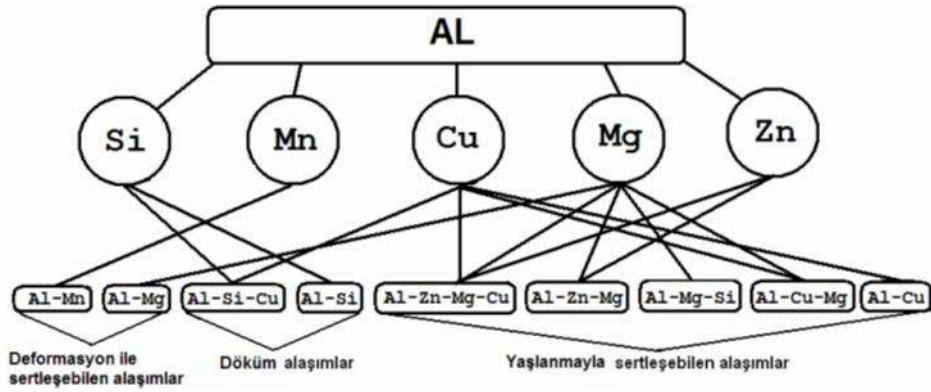
Sembol	Al
Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı	26,97 g/mol
Kristal Yapısı	YMK
Erime Noktası	660 °C
Yoğunluğu (Oda sıcaklığında)	2.7 g/cm ³
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	150-320 °C
Buharlama Noktası	2450 °C
Isıl Genleşme Katsayısı	23.5 µm m ⁻¹ K ⁻¹
Özgül Isısı	0.224 cal/g (100 °C'de)
Gizli Ergime Isısı	94 cal/g
Çekme Mukavemeti	40-100 N/mm ²
Akma Mukavemeti	10-30 N/mm ²
Elastite Modülü	72 x 10 ³ N/cm ²
Kayma Modülü	27 x 10 ⁵ N/cm ²
% Uzama	45
% Kopma Uzaması	30-40
Sertlik	20 (HV)
Çentik Darbe Tokluğu	100 J/cm ²
Elektrik İletkenliği	% 59.5 IACS
Elektrik Direnci	2.65 x 10 ⁻⁸ ohm metre
Katılma Esnasında Kendini Çekme	% 6.7

Mat gümüşümsü renkte ve oldukça yumuşak ve hafif bir metal olan alüminyum mühendislik malzemeleri içerisinde oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Alüminyumun mat gümüşümsü rengi ise havaya maruz kalması sonucu metalin yüzeyinde oluşan ince bir oksit (Al_2O_3) film tabakasından meydana gelmektedir. Oluşan bu ince oksit tabakası metale çok üstün korozyon özelliği sağlamakla birlikte metali çok yüksek sıcaklıklarda bile ortamdaki korozif etkilerden korumaktadır. Alüminyum, manyetik ve zehirleyici değildir. Saf haldeki alüminyumun çekme mukavemeti yaklaşık olarak 49 (MPa) iken alüminyum alaşımlandırıldığında ise çekme dayanımı 700 MPa kadar çıkmaktadır. Alüminyum yoğunluk olarak çeliğin veya bakırın yaklaşık 1/3'ü kadardır. Alüminyumun saflık derecesinin artmasıyla birlikte ısı ve elektrik iletkenliği paralel olarak artmaktadır. Alüminyum kolaylıkla dövülebilir, makinede işlenebilir ve dökülebilir. [17]

Alüminyumun başlıca en önemli özellikleri ise, sünek ve yumuşak olmasından dolayı soğuk ve sıcak şekillendirilebilme kolaylığı, iyi derecede elektrik ve ısı iletkenliği bunların yanı sıra yüksek oranda ısı ve ışık yayması ve bazı alaşımlarının da çökelme yoluyla sertleştirilebiliyor olması gibi özellikler sayılabilir [17].

6.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları döküm ve dövme alüminyum alaşımları olmak üzere iki gruba ayrılır. Dövme alüminyum alaşımları alaşıma katılan metale göre dört rakamdan oluşan bir sınıflandırma sistemiyle sınıflandırılırlar. Tablo 6.2'de görüldüğü gibi dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında alüminyuma katılan esas metal birinci rakamı göstermektedir. Alaşım içerisinde bulunan en fazla elemente göre 2xxx-7xxx serisi arasında adlandırılır. Dövme alaşımlarda döküm yöntemi ile kütük (ingot) şeklinde üretilen alaşımlar plastik şekil verme yöntemleri kullanılarak ürün halini alırlar. Döküm alaşımlarında ergimiş şekilde bulunan metale istenilen bileşim ve özellik ayarları yapıldıktan sonra alaşım direkt olarak ürün kalıbına dökülmektedir. Dövme ve döküm alaşımları Şekil 6.1'den de görüldüğü gibi element bileşimlerine göre farklı sınıflara ayrılmaktadır [18].



Şekil 6.1. Alüminyumda alaşım elementlerinin genel bileşimleri [18]

6.2.1. Döküm Alüminyum Alaşımları

Bu alaşımlar; genellikle pres döküm, kum döküm ve sabit kalıp yöntemleri ile imal edilirler. Döküm alaşımlarının fiziksel özellikleri son derece yüksektir ve bu alaşımlar talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmeye elverişlidirler. Kaynak edilebilirler ve genellikle dövme alaşımlara uygulanan ısıl işlemler döküm alaşımlarının bir kısmına da başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Bu özelliklerinin yanı sıra, mukavemet değerleri ve korozyon özellikleri de oldukça iyidir. Döküm alaşımlarının en önemli alaşım elementi (% 5-12) silisyumdur. Silisyumun ötektik reaksiyon veren bir element olmasından dolayı alaşıma katılmasıyla alaşımın, akıcılığını, besleme kabiliyetini ve mukavemeti artırır. Isıl işlem uygulanabilir özellikteki alaşımlara magnezyum elementi % 0.3-1 arasında eklenir ve çökelme (Mg_2Si) sertleşmesi ile birlikte malzemenin mukavemetinin artması sağlanır. Yüksek sıcaklık direncini arttırmak için alaşıma %1-4 arasında ilave edilen bakır $CuAl_2$ çökelme fazını oluşturur. Yaşlanma amacı ile alaşıma ilave edilen çinko $MgZn_2$ çökeltisi oluşturmaktadır. Tane küçültücü olarak titanyum (Ti) ve bor (B), ötektik yapıyı modifiye edici olarak ise sodyum (Na) ve stronsiyum (Sr) elementleri eklenir. Kalay (Sn) ve krom (Cr) gibi elementleri ise diğer özellikleri kontrol etmek için kullanılabilir [18].

6.2.2. Dövme Alüminyum Alaşımları

Dövme alüminyum alaşımları, plastik şekil verme (haddeleme, dövme ve ekstrüzyon gibi) yöntemleriyle üretilirler. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında ilk rakam içerdiği temel alaşım elementine göre hangi alaşım grubuna ait olduğunu belirtir. % 99.00 saflıktaki alüminyum 1XXX grubundadır. %99'dan sonraki değerleri ise son iki rakam

belirtmektedir. Alaşıma özel olarak katılan elementlerin sayısını ise soldan ikinci rakam belirtmektedir ve bu rakam 1 ile 9 arasında değişiklik gösterebilir. Dövme alüminyum alaşımlarından 2XXX-8XXX e kadar olan alaşımlarda ilk rakam alaşımın türünü, ikinci rakam ise modifikasyonları (değişimleri) simgelemektedir. Son iki rakam ise özel bir anlam taşımamakla birlikte alaşımı dizideki diğerlerinden ayıran bir sıra numarası gibi kullanılmaktadır.

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması ve ısıtıl işlem uygulanabilirlikleri Tablo 6.2’de görülmektedir. Dövme alüminyum alaşımların sınıflandırılması genellikle alaşıma katılan elementlere göre sınıflandırılırken, yaşlandırma ısıtıl işlemi açısından da incelenmektedir [18].

Tablo 6.2. Dövme alüminyum ve alaşımlarının sınıflandırılması [18].

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

Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirilebilmesi, alaşıma diğer metallerin ilave edilmesi ile gerçekleşmektedir. Literatürlerde ticari vasıftaki alüminyumun içerisinde eser miktarlarda bulunan yapı kirleticilerin saf metale kıyasla mukavemeti % 50’ye kadar arttırdığı bilinmektedir. Alüminyum alaşımlarının imal edilmesinde en çok mangan, silisyum, magnezyum, çinko ve bakır kullanılmaktadır. Bu metaller, istenilen özellikte ürün imal edilebilmesi için alaşıma, tek veya bileşik halde ilave edilebilirler.

Döküm alaşımlarında (hadde alaşımları için) alaşıma ilave edilen metallerin toplam yüzdesi, nadiren % 10’un üstüne çıkmaktadır. Ticari alüminyumlara kıyasla, dökülmüş ve tavlanmış haldeki alüminyum alaşımlarının çekme mukavemeti (alaşıma ilave edilen bileşimlere bağlı olarak) iki katına kadar çıkmaktadır. Alaşımlandırma işlemi sonucunda alüminyumun mukavemetinde görülen yükseliş diğer özelliklerdeki değişimler sonucunda meydana gelmektedir. Bu değişimler ise farklı alaşımlarda nadiren birebir olmaktadır. Çünkü alaşımlar, aynı çekme dayanımına sahip olmasına rağmen farklı elektrik ve ısı iletkenliği, süneklik ve de üretim kolaylığı açısından önemli derecede farklılıklar

göstermektedir. Alaşımların yoğunluğu içerisine ilave edilen katkı elementlerine göre değişiklikler göstermektedirler [18].

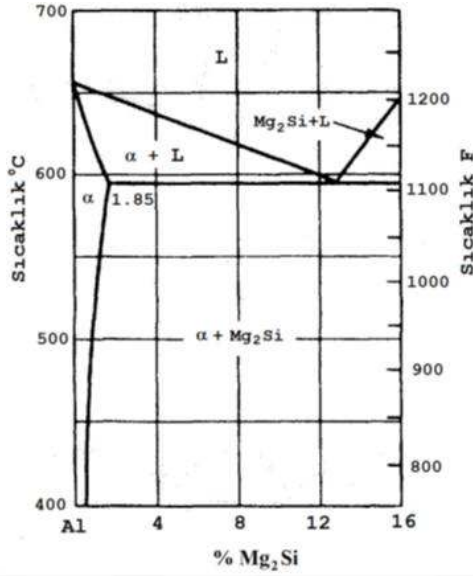
6.2.2.1. 6xxx Serisi Alaşımları

6XXX serisi alüminyum alaşımları, silisyum ve magnezyumun birlikte oluşturdukları seriyi temsil etmektedir. Bu seriye ait kimyasal içerikler Tablo 6.3’ de verilmiştir. Magnezyum ve silisyum birleşmesi sonucunda Mg_2Si bileşiğini oluşturur ve oluşan bu metaller arası Mg_2Si bileşiğinin sıcaklık ile değişen çözünürlüğüne bağlı olarak 6XXX serisi alaşımlarda sertleşme görülmektedir. Şekil 6.2’ de görüldüğü gibi bu bileşik alüminyum ile birlikte basit bir ötmektik sistemi oluşturmaktadır.

Çözeltiye alınıp suni olarak yaşlandırılan 6XXX serisi alaşımlarda matrisin içerisinde Mg_2Si partikülleri çöker ve bunun sonucunda da alaşımın mukavemeti ve sertliği orta seviyelerde görülmektedir. Yaşlandırma sonucu elde edilen bu mukavemet değeri ise 2XXX ve 7XXX serisine kıyasla daha az olur. 6061 alaşımı 6XXX serisi içerisinde en yaygın olan ve ısıtıl işlem özelliği en iyi olandır. Kimyasal özelliklerine bağlı olarak iyi mekanik özellik sergilemesinden dolayı bu alaşımlar uçak ve uzay sanayisi, taşıma araçları, demiryolu taşıtları gibi sanayi sektörünün çeşitli alanlarında kullanılmaktadırlar. Ayrıca 6XXX serisi alaşımlar, ısıtıl işlemle sertleştirilebilen alaşımlar arasında soğuk şekillendirmeye elverişli alaşımlardır. Tablo 6.3’de bazı 6xxx serisi alaşımların kimyasal bileşimleri görülmektedir [18].

Tablo 6.3. Bazı 6xxx serisi alaşımların kimyasal bileşimleri[18].

Alaşım tipi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
AA6061	0.4-0.8	0.7	0.15-0.40	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	-	0.25	0,15	Kalan
AA6063	0.3-0.7	0.7	0.10	0.5	0.4-0.9	-	0.2	0,10	0,20	Kalan
AA6070	1.3	-	0.28	0,7	0.8	-	-	-	-	Kalan
AA6082	0.7-1.3	0.5	0.10	0.4-0.10	0.5-1.2	0.25	0.10	0,20	0,20	Kalan



Şekil 6.2. Al-Mg₂Si denge diyagramı [18].

6.3. Alaşım Elementlerinin Alüminyum Alaşımlarına Etkisi

Yüksek elektrik iletkenliğine sahip alüminyuma çeşitli alaşım elementleri ilavesi sonucunda da mekanik ve döküm özellikleri de iyileştirilmektedir. Alüminyumu alaşımlandırmak için kullanılan başlıca elementler ve özellikleri aşağıdaki gibidir [46].

6.3.1. Bakır (Cu): Alaşıma ilave edilen bakır, alüminyumun dayanımını, sertliğini ve işlenebilirliğini artırır. Alaşımlara %4-6 oranında ilave edilen bakır elementi, alaşımın ısıtma işlem kabiliyetini artırırken korozyon direnci ile birlikte, dökülebilme ve sıcak yırtılma direncini azaltmaktadır [47]

6.3.2. Silisyum (Si): Alaşıma katılan silisyum ilavesi ile birlikte alaşımın; akıcılık, korozyon direnci ve kaynak kabiliyeti gibi özellikleri iyileşmektedir. Silisyum ilavesinin mekanik özelliklere katkısı, alaşımın bileşimine ve mikro yapısına bağlı olarak değişmektedir. Alaşımın mukavemet artışını küçük ve yuvarlak şeklindeki Al tanecikleri ve Al-Si ötektiği sağlar. Alaşımın çekme dayanımını arttıran iğnecik şekilli Al-Si ötektiği; sünekliği, yorulma ve darbe dayanımını ise düşürmektedir [48].

6.3.3. Magnezyum (Mg): Al-Si alaşımlarına, % 0.25-0.5 gibi eser miktarlarda magnezyum ilavesi sonucunda alaşımın ısıtma işlem kabiliyeti kazanması sağlanır. Alaşıma ilave edilen magnezyum, mukavemet, korozyon direnci ve kaynak kabiliyetini artırır. Düşük silisyum alaşımlarında, %3-6 gibi yüksek miktarlarda magnezyum kullanımı, oksitlenmeyi azaltır. Alaşımda yüksek miktarlarda demirin bulunması ise, sünekliği,

işlenebilirliği ve ani yük değişimlerine karşı direnci azaltır. Magnezyum, ötektik altı Al-Si alaşımlarında ise demirin mekanik özellikleri üzerindeki negatif etkiyi ortadan kaldırarak mukavemet, aşınma direnci ve korozyon direnci gibi özellikleri iyileştirir [47,48].

6.3.4. Manganez (Mn): Alaşıma %1,2 oranında ilave edilen manganez sonucunda alaşımin yapısında oluşan katı eriyik mukavemetlenmesine bağlı olarak alaşımin mekanik özellikleri artar. Ayrıca, manganez, korozyon direncine zarar vermeksizin 50-60 °C alaşımin yeniden kristalleşme sıcaklığını yükseltir. Manganez, demirin mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki kötü etkiyi ortadan kaldırır buna bağlı olarak mukavemet ve korozyon direnci artar. Alaşımda manganez bulunması, ince dağılımlı (Mn,Fe)Al₆ intermetaliklerini oluşturarak, demirin kaba olarak çökmesini önler [47,48].

6.3.5. Çinko (Zn): Çinko, bakır ve magnezyumla birlikte alaşımin ısıtılma işlem kabiliyetini artırır. Alüminyum alaşımlarına katılan çinko ilavesi ile birlikte alaşımin, çekme mukavemeti haddelenebilme, işlenebilme özellikleri ve darbe dayanımı artar. Al-Si alaşımlarına katılan ve çökme sertleşmesine neden olan çinko, alaşımin aşınma direncini iyileştirir [47, 48].

6.3.6. Titanyum (Ti): Titanyum alüminyum alaşımlarında tane küçültücü olarak kullanılır. Alaşımlarda titanyum bulunması, alaşımin çekme mukavemeti ve sünekliğini artırırken ısı iletkenliğini düşürür [47, 48].

6.3.7. Demir (Fe): Demir alüminyum alaşımlarında tane küçültücü etkiye sahiptir ve bazı alaşımlarında ise termal mukavemeti arttırmaktadır. Alüminyum alaşımlarında demir tane küçültücü etki yapar ve bazı alüminyum alaşımlarında ise termal mukavemeti artırır. Demir, Al-Si alaşımlarının mekanik özelliklerine negatif etki yapar. İçeriğinde yüksek oradan silisyum bulunan alüminyum alaşımlarında demir, kaba ve gevrek bir yapının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu özelliğinden dolayı demir oranının en az seviyede olması istenmektedir [49].

6.3.8. Nikel (Ni): Alüminyum alaşımlarında bakır ile birlikte kullanılan nikel, alaşımin yüksek sıcaklıklarda dayanımını ve sertliğini artırır [47].

6.3.9. Zirkonyum (Zr): Alüminyum alaşımlarında zirkonyum tane küçültücü etkiye sahiptir. Alaşımda katılan zirkonyum korozyona engel olmakla birlikte ve yüksek sıcaklıklarda alaşımin sürünme mukavemetini de arttırmaktadır [46].

6.3.10. Kalay: Alaşım içerisinde bulunan kalayın korozyon direnci ve sıcak yırtılmalar üzerinde negatif bir etkisi vardır [46].

6.3.11. Krom (Cr): Alaşıma %0.15–0.25 oranında ilave edilen krom, "Al-Zn-Cu" alaşımlarının mukavemetini artırırken, gerilmeli korozyon olasılığını ise azaltmaktadır [46].

6.4. Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

Alüminyum ve alaşımları yoğunlukları oldukça fazla olan demir ve bakır metalinin yerine ağırlık azaltılmasının oldukça önemli olduğu hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Bunlara örnek verecek olursak imalat sanayi başta olmak üzere, taşıt araçlarının yapımında, çeşitli konstrüksiyonların yapımında, elektrik endüstrisi gibi çeşitli ve farklı alanlarda kullanılmaktadır [46].



7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Çalışmanın Amacı

Farklı kimyasal özelliklere sahip iki metalik malzemeyi geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirmek genellikle güç ve problemlidir. Bu problemler; yüksek vizkozite, düşük akıcılık, kontrolsüz katılaşma, istenmeyen reaksiyonlar ve düşük kaynak kabiliyetidir. Ayrıca, metalik malzemelerin geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi sırasında, kaynak yapılmış malzemelerde genelde kaynak yapan kişiden meydana gelen kaynak hataları ve kaynak yapılmış malzemenin soğuması sırasında oluşan kaynak kusurlarının minimize edilmesi için katı hal kaynak teknikleri kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada; son zamanlarda otomotiv, uzay-uçak sanayisi ve savunma sanayi gibi alanlarda kendine geniş kullanım alanı bulan magnezyum (AZ63) ve alüminyum (AA6063) alaşımlarının bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliği araştırılmıştır. Araştırma; hem malzeme bilimi ve karakterizasyonu hem de kaynak bilimi alanlarında literatüre önemli katkılar sağlamayı hedeflemektedir. Deneylerde kullanılacak malzemeler, piyasadan ticari olarak 12 mm çap ve 70 mm uzunluğa sahip olacak şekilde temin edilmiş ve deneysel tasarım programına uygun şekilde numaralandırılmıştır. Her değişken parametrede 2 adet kaynaklı bağlantı elde edilmiştir. AZ63-AA6063 malzeme çiftleri sürtünme kaynak yöntemiyle, 1500-1600-1700 dev/dk devir sayısı, 20-30-40 MPa sürtünme basıncı, 40-60-80 MPa yığma basıncı, 6 sn sürtünme süresi ve 4 sn yığma süresi kullanılarak birleştirilmiştir. Elde edilen kaynaklı bağlantıların çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla, kaynaklı numuneler TS EN ISO 6892-1 standartlarına uygun hale getirilmiştir.

Sürtünme kaynak tekniği ile birleştirilen kaynaklı numunelerin çekme deneyi ile birlikte mikro yapı incelemeleri yapılmış ve kaynaklı bağlantıların hasar süreci analiz edilmiştir. Bu incelemelerin yanı sıra ortaya çıkabilecek söz konusu problemler tahribatsız (radyografi) malzeme muayene yöntemiyle de incelenmiştir. Kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişimi belirlemek için Optik, SEM, EDS ve XRD analizi yapılmıştır. Deney sonuçları literatür ışığında değerlendirilerek üretim parametrelerinin bu iki malzeme çiftinin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliği üzerine olan etkileri belirlenmiştir.

7.2. Kaynak Öncesi İşlemler

7.2.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

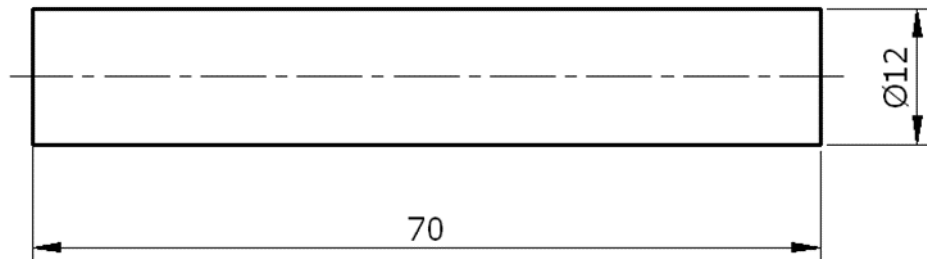
Sürtünme kaynak işlemine tabi tutulacak AZ63 magnezyum ve AA6063 alüminyum alaşımları, her biri 12 mm çap ve 70 mm uzunluğunda olacak şekilde piyasadan ticari olarak temin edilmişlerdir. AZ63 magnezyum ve AA6063 alüminyum malzemelerin kimyasal bileşimleri Tablo 7.1’de, mekanik özellikleri ise Tablo 7.2’de verilmiştir. Deneylerde kullanılan malzemelerin şematik görünümü Şekil 7.1’de verilmiştir.

Tablo 7.1. AZ63-AA6063 malzeme çiftinin kimyasal özellikleri

Malzeme	Alaşım Elementleri (% wt)								
	Fe	Zn	Cu	Ni	Mn	Si	Ti	Mg	Al
AZ63	-	2.7	0.08	0.01	0.11	0.12	-	Kalan	5.67
AA6063	0.7	0.10	0.10	0.2	0.5	0.3-0.7	0.20	0.4-0.9	Kalan

Tablo 7.2. AZ63-AA6063 malzeme çiftinin mekanik özellikleri

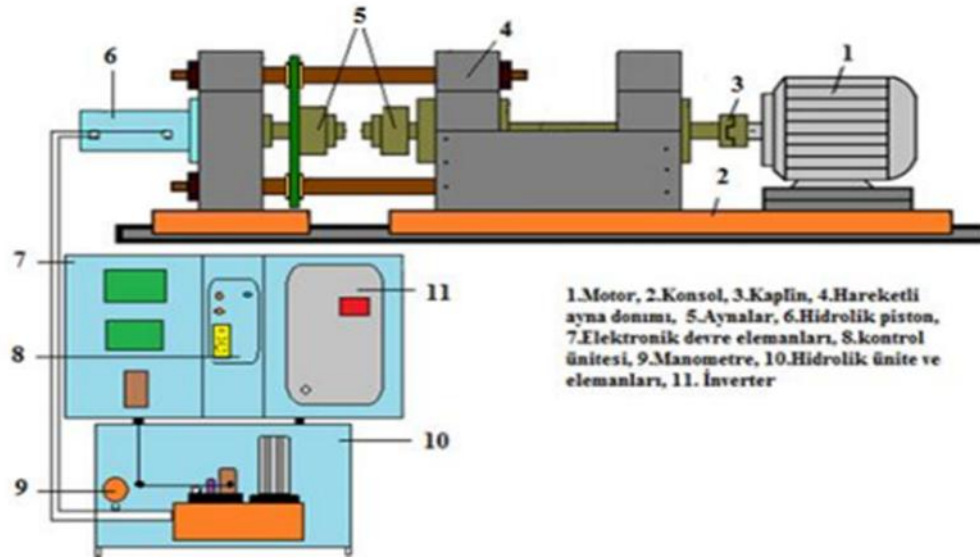
Malzeme	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Elastite Modülü (GPa)	Sertlik (HV)
AZ63	240	128	6-12	65-70
AA6063	235	140	70	70



Şekil 7.1. Sürtünme kaynak numuneleri

7.2.2. Sürtünme Kaynak Tezgâhı

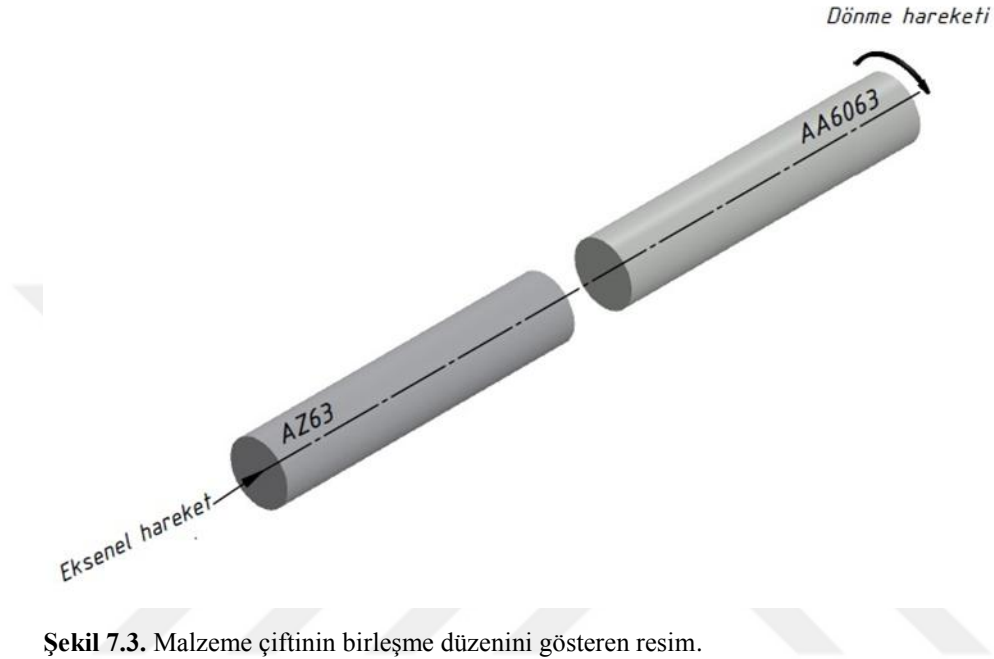
Piyasadan hazır olarak temin edilen numuneler sürekli tahrikli sürtünme kaynak tezgâhı kullanılarak kaynak yapılmışlardır. Tezgâhta deneylerde kullanılacak olan deney parametreleri (devir sayısı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresi) istenilen düzeyde ayarlanabilmektedir. Deneylerde kullanılan tezgâh fotoğrafı Şekil 7.2’ de görülmektedir.



Şekil 7.2. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak tezgâhı fotoğrafı [56].

Tahrik motoru ve döner ayna aynı ekseninde olması için tezgâh kazağı üzerine sabitlenmişlerdir. 11.1 Kw’lık Simens marka DC motor ve bu tahrik motoru kontrol eden 11.1 Kw’lık Simens marka midi vektör invertör kullanılmıştır. 0-5 V arası DC gerilimle çalışan hız kontrol ünitesi ile 0-3500 dv/dk aralığındaki her devir sayısında çalışabilecek şekilde dönerli torna aynası kontrol edilebilmektedir. Ayrıca, sürtünme kaynağında önemli bir parametre olan frenleme ve frenleme süresi, inverter üzerinden tahrik motoruna DC gerilim uygulanarak kontrol edilebilmektedir. Hareketli ayna, tezgâh üzerine dönerli ayna ile maksimum 0.002 eksen kaçıklığında Ø60mm çapındaki dört adet eksenleme mili üzerine bağlanmış ve 120 mm stoklu hidrolik piston mili yardımıyla ileri geri hareketini yapmaktadır. Dönerli ayna ile eksenel hareketli ayna donanımını birbirine bağlayan bu dört adet mil, eksenel hareketli aynanın ileri geri hareketi esnasındaki titreşimleri ve eksen kaymaları önlemektedir.

Sürtünme kuvveti etkisi ile parçaları ayna içerisinde kaymasını, burkulma ve eksen kaçıklıklarını önlemek amacıyla aynaların iç kısmında 35 mm mesafede dayamalar yerleştirilmiştir. Deneylerin tamamında AZ63 magnezyum alaşımları sabit aynaya bağlanırken AA6063 alüminyum alaşımları döner aynaya bağlanmıştır. Parçaların tezgâha bağlanma düzenleri şematik olarak 7.3’ de gösterilmiştir.



Şekil 7.3. Malzeme çiftinin birleşme düzenini gösteren resim.

7.2.3. Deney Parametreleri

AZ63 magnezyum ve AA6063 alüminyum malzeme çiftinin sürtünme kaynaklı birleştirmeleri için yaklaşık parametre değerlerinin belirlenmesinde öncelikli olarak literatür çalışması tamamlanmış daha sonra ise yapılan ön çalışmalar ile birlikte kaynaklı bağlantıların yapılabileceği en uygun kaynak parametreleri belirlenmiştir. Bu kapsamda devir sayısı, sürtünme basıncı ve yığma basıncı gibi kaynak parametreleri değişken olarak seçilirken sürtünme süresi ve yığma süresi gibi kaynak parametreler de sabit kaynak parametresi olarak seçilmiştir. Tablo 7.3’de verilen kaynak parametrelerine göre deneysel tasarım gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7.3. Sürtünme kaynağında kullanılan kaynak parametreleri

Numune No	Kaynak parametreleri				
	Devir sayısı (dev/dk)	Sürtünme basıncı (MPa)	Sürtünme süresi (sn)	Yığılma basıncı (MPa)	Yığılma süresi (sn)
N7	1500	20	6	40	4
N8	1500	30	6	60	4
N9	1500	40	6	80	4
N4	1600	20	6	40	4
N5	1600	30	6	60	4
N6	1600	40	6	80	4
N1	1700	20	6	40	4
N2	1700	30	6	60	4
N3	1700	40	6	80	4

7.3. Kaynak Sonrası Yapılan İncelemeler

7.3.1. Metalografik İncelemeler

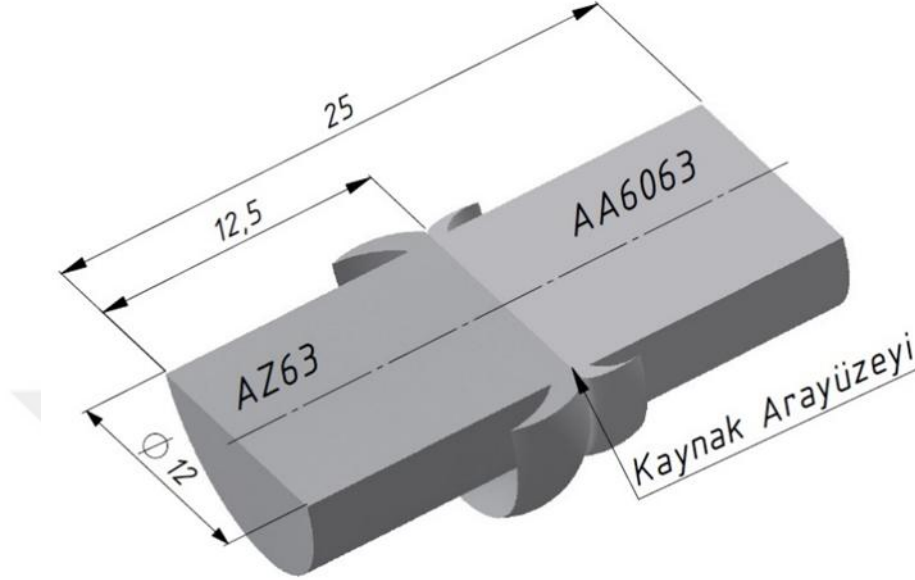
Sürtünme kaynak makinasında birleştirilmiş AZ63-AA6063 malzeme çiftinin yüzey karakteristiklerini belirlemek için, dijital fotoğraf makinası kullanılarak makroskobik yüzey fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 7.4).



Şekil 7.4. Metalografik incelemede kullanılan numuneler

Sürtünme kaynak işleminden sonra birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişikliklerin incelenmesi amacıyla numuneler; birleşme bölgesine dik doğrultuda su soğutmalı disklerle içyapıya herhangi bir zarar vermeden dik doğrultuda kesilmişlerdir. Dik doğrultuda kesilen numunelere metalografik incelemeler yapmak amacı ile sırasıyla 400, 600, 800, 1000 ve 1200 meshlik zımparalar ile yüzeyleri temizlenmiştir. Yüzeyleri temizlenen numunelere 3 µm’luk elmas pasta ile parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işleminden sonra kaynaklı numunelerin AZ63 Magnezyum tarafı 3 birim HCl asit ve 1 birim HNO₃ karışımından oluşan çözelti ile AA6063 Alüminyum tarafı ise modifiye keller

çözeltisi (95 ml saf su, 1 ml HF, 1 ml HCl, 3 ml HNO₃) ile dağlanarak metalografik incelemeler için hazır hale getirilmiştir. Metalografik incelemeler ve mikro sertlik ölçümleri için hazırlanan numune boyutları Şekil 7.5.' de gösterilmiştir.



Şekil 7.5. Metalografik İncelemeler için hazırlanan numune boyutları

Sürtünme kaynağı yapılmış kaynaklı numunelere, kaynak parametrelerinin kaynak bölgesine ve mikro yapıya etkilerinin araştırılması amacı ile her bir numune için taramalı elektron mikroskobu ile inceleme yapılmıştır. Yapılan incelemelerde özellikle kaynak arayüzündeki çatlak başlangıçları ve ilerleme özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla Fırat Üniversitesi, Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.

Kaynaklı numunelerin mikroyapı analizi çalışmalarında EDS analizleri kaynak bölgesinde oluşan fazların kimyasal içerikleri belirlenmiştir. Bu amaçla Fırat üniversitesi, Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan JEOL marka JSM-2001F analiz test cihazı kullanılmıştır.

Kaynaklı bağlantıların ara bölgesinde oluşan fazların tespiti için X-Ray analizleri, İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezine ait cihaz ile yapılmıştır.

7.3.2. Mikrosertlik Analizi

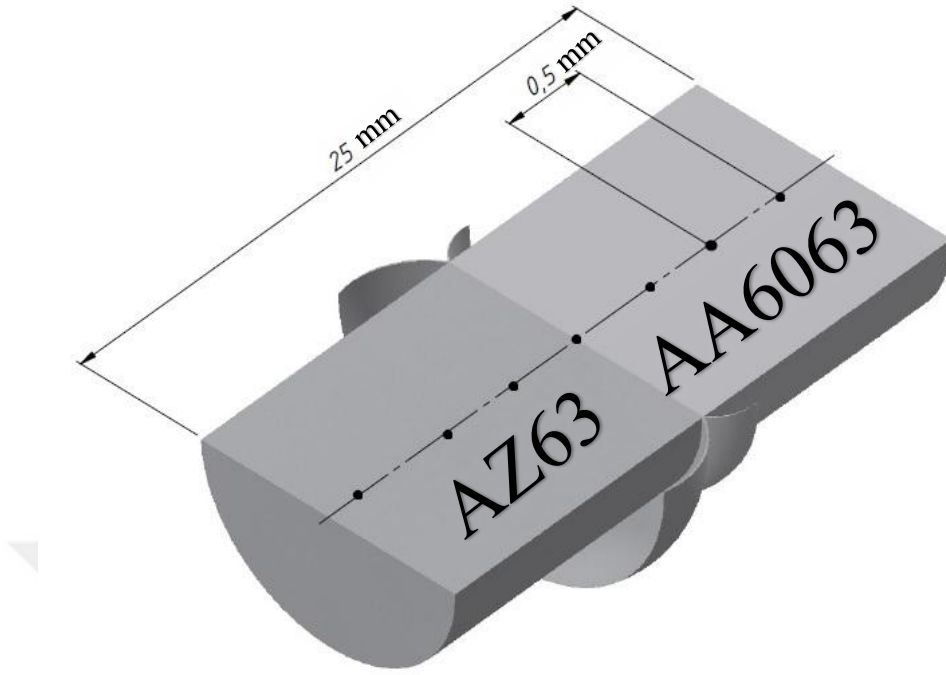
Sürtünme kaynak tekniği kullanılarak birleştirilmiş kaynaklı numunelerin sertlik değişimlerini belirlemek amacı ile mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri

yapılmadan önce sürtünme kaynaklı numuneler geleneksel temizleme ve parlatma işlemleri ile hazırlandıktan sonra hazırlanan zltilerle metalografik olarak dağlanıp hazır hale getirilmişlerdir. Dağlanan numunelerin mikrosertlik lmleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında bulunan EMCOTEST DuraScan marka mikrosertlik cihazı ile 50 gr yük uygulanarak, numunelerin tam orta ekseninden ve kaynak kesatine dik olacak şekilde bir hat üzerinden 0,5 mm aralıklarla ve 10 sn'lik yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik lmnn gerçekleştirildiği cihaz ekil 7.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.6. Mikrosertlik cihazı [51].

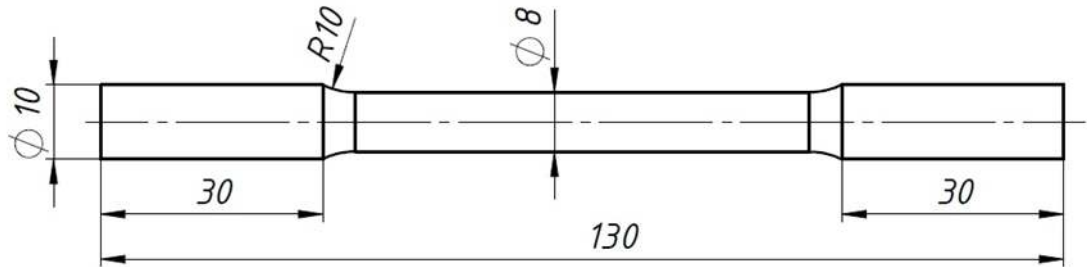
Ölçümlerde 136° tabanı kare olan piramit u kullanılmıştır. Mikrosertlik lmlerinin yapıldığı bölgeler ekil 7.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.7. Mikrosertlik ölçümü yapılan noktaların şematik gösterimi

7.3.3. Çekme Deneyi

Sürtünme kaynaklı numunelere çekme testi uygulamak amacı ile kaynaklı numuneler CNC torna tezgâhında mikroyapının bozulmaması için soğutma sıvısı kullanılarak hassas bir şekilde TS EN ISO 6892-1 standartlarına uygun ölçülere getirilmiştir (Şekil 7.9). Çekme deney numuneleri 10x130 mm ölçülerinde silindirik olarak hazırlanmıştır. Deney numunelerinin şematik gösterimi ve ölçüleri Şekil 7.8’de görülmektedir.



Şekil 7.8. Çekme deney numunelerine ait ölçüler [TS EN ISO 6892-1].



Şekil 7.9. Çekme deney numunesi

Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin çekme testleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan SHIMADZU AG-X 50 KN marka çekme cihazı ile 50.000 N yük altında ve 1mm/dk çekme hızında standartlara uygun olarak yapılmıştır. Çekme testi işleminde sonra kaynaklı numunelerin kırılma yüzeyleri not alınmış, sonuçların değerlendirilmesi aşamasında kullanılmak üzere çekme testi işlemi sonucu kopmuş numunelerin ve kırılma yüzeylerinin fotoğrafları çekilmiştir. Tüm çekme testleri oda sıcaklığında laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Çekme testlerinin yapıldığı çekme cihazı Şekil 7.10’da görülmektedir.

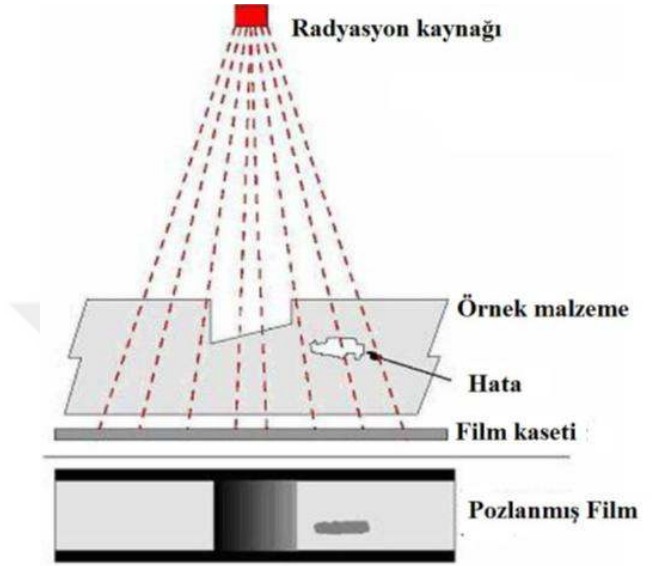


Şekil 7.10. Çekme deney cihazı[51].

7.3.4. Radyografi testi

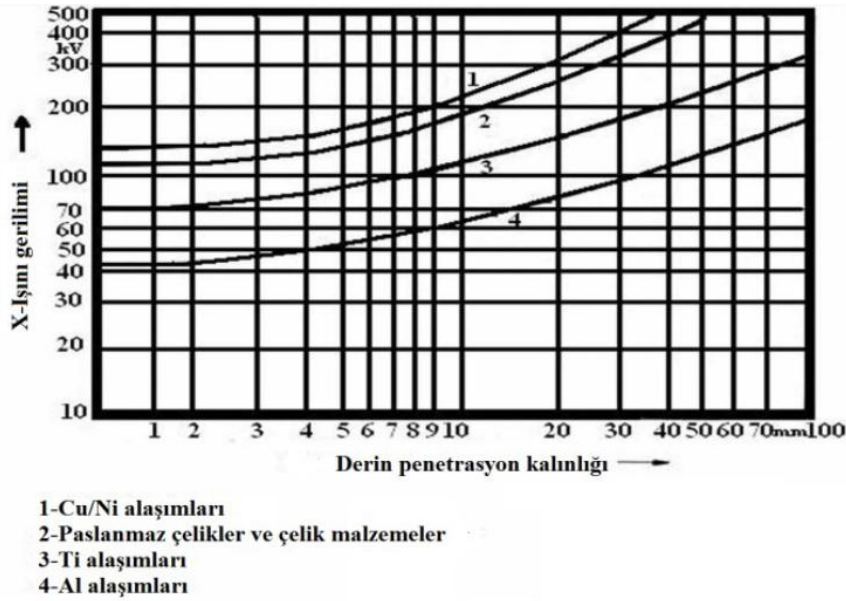
Sürtünme kaynak işlemi gerçekleşen numunelerin birleşme bölgelerinin detaylı olarak incelenmesi ve olası kaynak hatalarını kontrol etmek amacı ile numuneler X-Ray Radyografi testine tabi tutulmuştur. Kaynak dikişinin kontrolünde, tahribatsız yöntemler arasından kalınlığı 12 mm olan radyografik test ve radyasyon kaynağı olarak da x-ışını tüpü

kullanılmıştır. Prensip olarak Şekil 7.11’de görülebilir. X-Ray radyografi testi için; C4 tipi 100x240 mm Kodak film ve 0.125 mm kalınlığında ön ve arka kurşun ekranlar kullanıldı. X ışınları 12 mm kalınlığındaki malzemeye diyagramı oluşturmak için 48 saniye boyunca ışın gönderilerek filmlendi. X-ışını cihazı ve film arasındaki mesafe 600 mm’dir.



Şekil 7.11. Radyografik testin çalışma prensibi [52,53].

X-ışını gerilimi malzemenin kalınlığına göre Şekil 7.12’ye bakılarak 70 kV seçildi.



Şekil 7.12. X-Ray cihazında 500 kV bir gerilimle belirlenen derin penetrasyon kalınlığı ve malzeme grafiği [54,55].

X-Işını cihazı olarak, 300 KV kapasiteye sahip, Rigaku Radioflex–300EGS3 tipi cihaz kullanıldı (Şekil 7.13 a-b).



Şekil 7.13. Rigaku marka Radioflex -300EGS3 tipi cihaz (a) ve control paneli (b) [54,55].

8. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

8.1. Kaynaklı Birleştirmelerin Makroskobik İncelemeleri

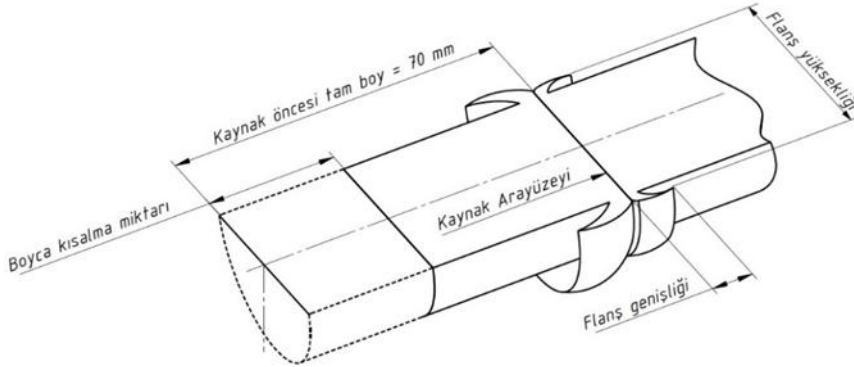
Şekil 8.1 incelendiğinde sürtünme kaynak tekniği kullanılarak kaynak edilen numunelerde flanş oluştuğu görülmektedir. Sürtünme kaynağındaki bu flanş oluşumu kaynak yapılan malzemelerin arayüzeylerinden dışarı yönde taşan malzemelerden oluşmaktadır. Farklı parametrelerde sürekli tahrikli sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde görülen flanş oluşumu Şekil 8.1’de ki görülen resim baz alınarak değerlendirilmiştir.

Sürtünme kaynaklı bağlantılara ait makro resimler incelendiğinde; kaynaklı bağlantıların temelde benzerlik gösterdiği fakat dışarı taşan malzeme (flanş) miktarında ve malzeme profilinde önemli farklılıklar görülmektedir.

Sürtünme kaynak tekniği ile birleştirilen numunelerde kaynak kalitesi, ara yüzey ve birleşme bölgesine yakın IEB’nin kalitesi ile doğru orantılıdır. Kaynaklı bağlantılarda oluşan flanş oluşumları Şekil 8.2’de gösterilen şematik düzen baz alınarak ölçülmüştür.



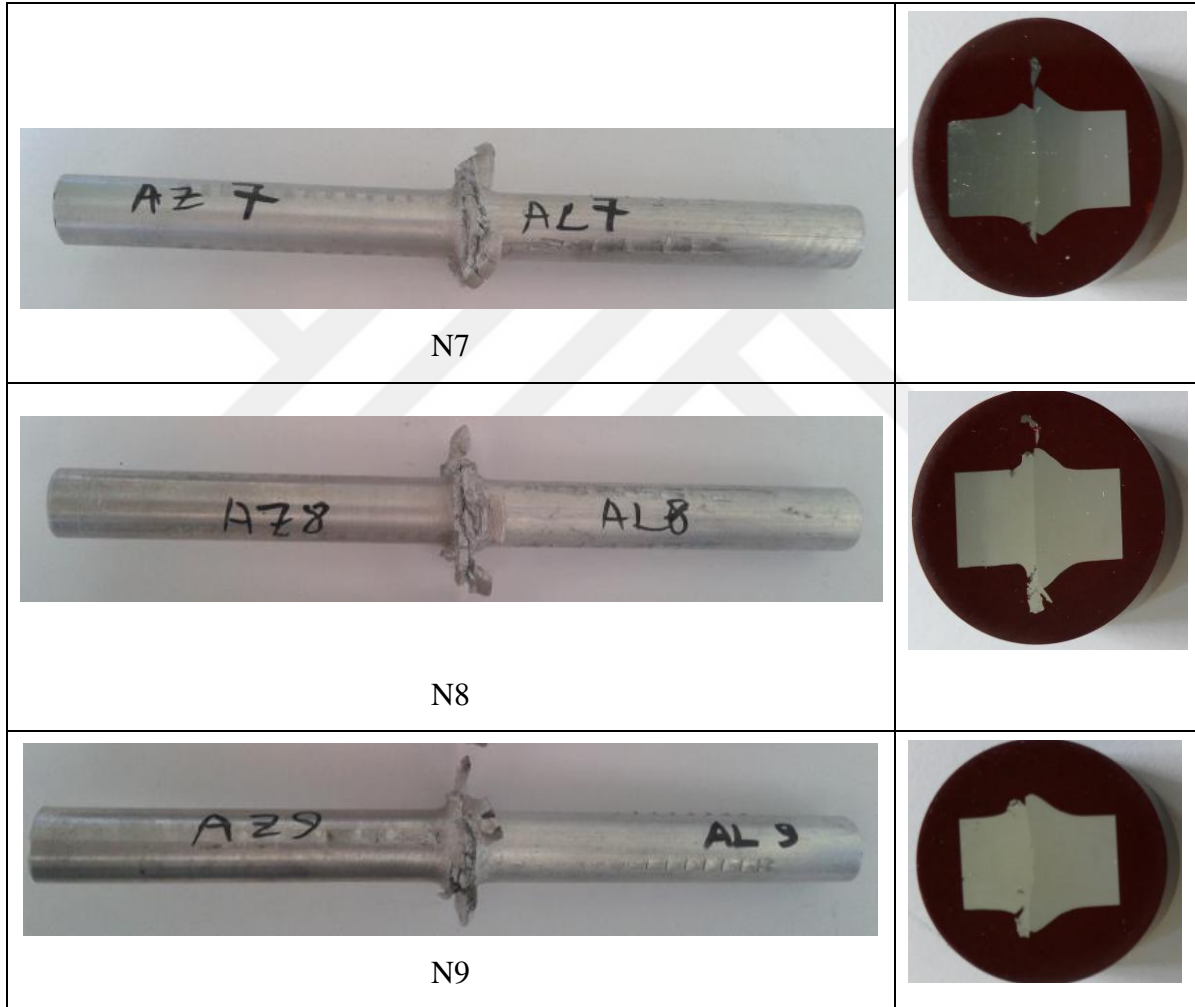
Şekil 8.1. Kaynak bölgesinde oluşan flanş ve IEB’ nin gösterimi.



Şekil 8.2. Kaynak sonrası birleştirmelerin flanş geometrisine ait özelliklerinin şematik gösterimi [51].

8.1.1. 1500 Dev/Dk İle Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri

Sürtünme kaynak tekniği ile 1500 dev/dk devir sayısı, 20-30-40 MPa sürtünme basıncı, 40-60-80 MPa yığma basıncı, 6 sn sürtünme süresi ve 4 sn yığma süresi kullanılarak birleştirilen N7, N8 ve N9 no'lu bağlantıların makroskobik incelemeleri; Şekil 8.3'de görülen yüzey ve ara yüzey fotoğrafları, değişen kaynak parametreleri (sürtünme basıncı ve yığma basıncı) baz alınarak değerlendirilmiştir.

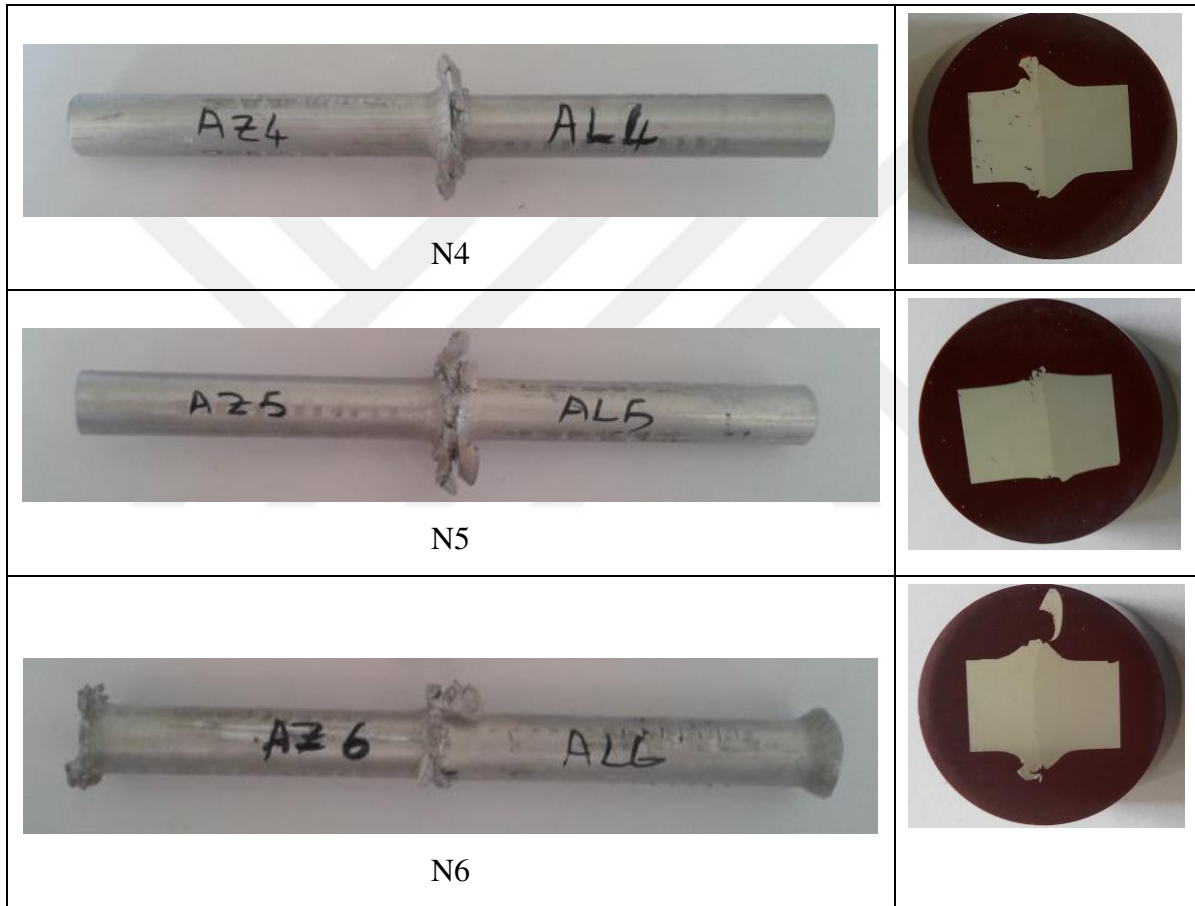


Şekil 8.3. N7, N8 ve N9 nolu numunelere ait yüzey ve ara yüzey fotoğrafları

Bu kaynaklı birleştirmelere ait fotoğraflar incelendiğinde (şekil 8.3); sürtünme basıncı ve yığma basıncının artmasına bağlı olarak dışarı taşan malzeme miktarında artış gözlemlenmiş olup arayüzeyde herhangi bir boşluk veya çatlığa rastlanmamıştır. Alüminyumun ısı iletkenlik katsayısının Magnezyuma oranla daha yüksek olmasından dolayı; dışarı taşan flanş miktarının AA6063 tarafında daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

8.1.2. 1600 Dev/Dk İle Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri

Sürtünme kaynak tekniği ile 1600 dev/dk devir sayısı, 20-30-40 MPa sürtünme basıncı, 40-60-80 MPa yığma basıncı, 6 sn sürtünme süresi ve 4 sn yığma süresi kullanılarak birleştirilen N4, N5 ve N6 no'lu bağlantıların makroskobik incelemeleri; Şekil 8.4'de görülen yüzey ve ara yüzey fotoğrafları, değişen kaynak parametreleri (devir sayısı, sürtünme basıncı ve yığma basıncı) baz alınarak değerlendirilmiştir.

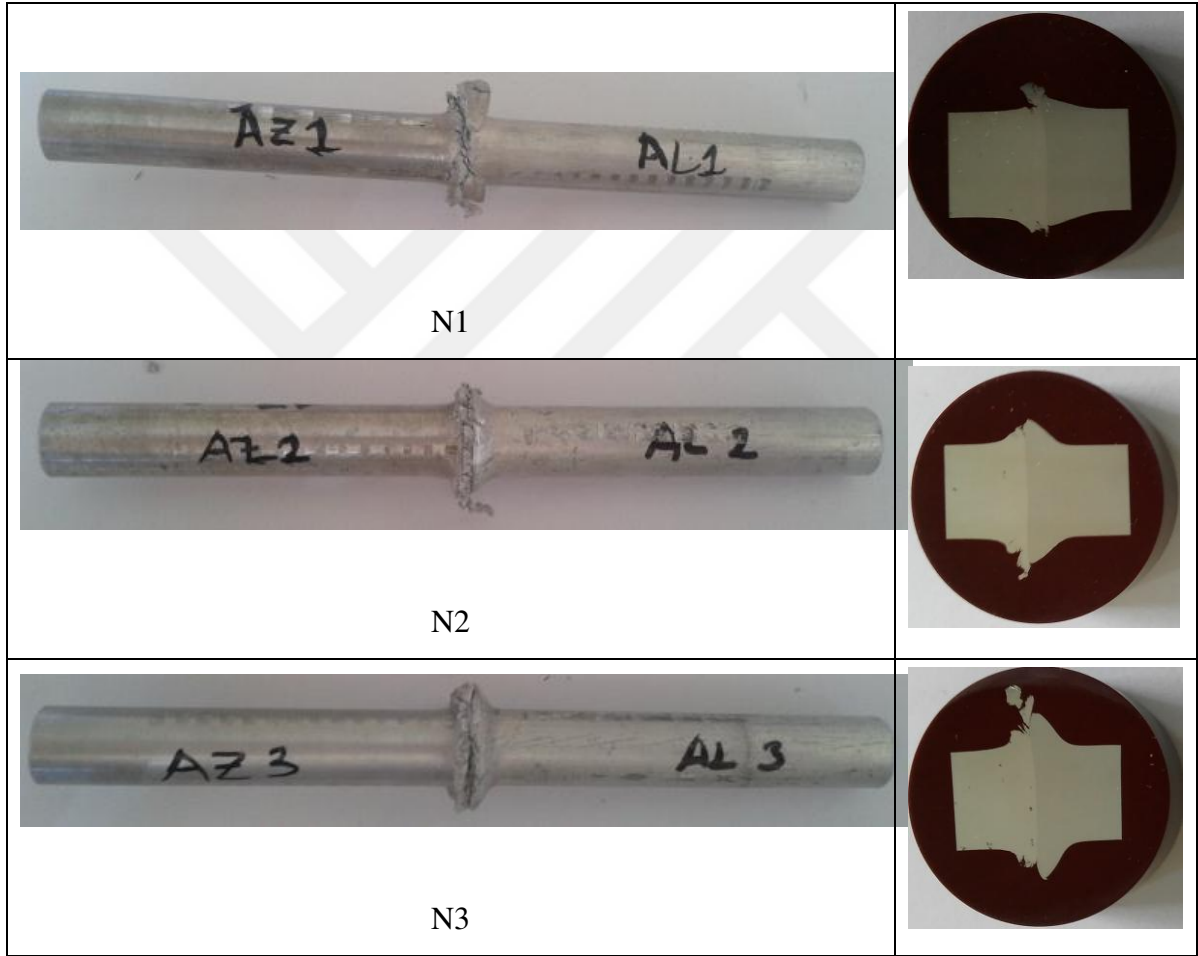


Şekil 8.4. N4, N5 ve N6 nolu numunelere ait yüzey ve ara yüzey fotoğrafları

Bu kaynaklı bağlantılara ait makro fotoğraflar incelendiğinde (Şekil 8.4); devir sayısı, sürtünme basıncı ve yığma basıncının artmasına bağlı olarak dışarı taşan malzeme miktarında artış gözlemlenmiş olup arayüzeyde herhangi bir boşluk veya çatlak rastlanmamıştır. 1500 dev/dk' da yapılan birleştirmeler ile kıyaslama yapıldığında, 1600 dev/dk' da yapılan birleştirmelerin mikroyapı açısından daha iyi birleştirmeler olduğu görülmektedir. Boşluk veya çatlak durumunun daha az olduğu görülmektedir.

8.1.3. 1700 Dev/Dk İle Birleştirilen Kaynaklı Bağlantıların Makroskobik İncelemeleri

Sürtünme kaynak tekniği ile 1700 dev/dk devir sayısı, 20-30-40 MPa sürtünme basıncı, 40-60-80 MPa yığma basıncı, 6 sn sürtünme süresi ve 4 sn yığma süresi kullanılarak birleştirilen N1, N2 ve N3 no'lu bağlantıların makroskobik incelemeleri; Şekil 8.5'de görülen yüzey ve ara yüzey fotoğrafları, değişen kaynak parametreleri (devir sayısı, sürtünme basıncı ve yığma basıncı) baz alınarak değerlendirilmiştir.



Şekil 8.5. N1, N2 ve N3 nolu numunelere ait yüzey ve ara yüzey fotoğrafları

Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen kaynaklı bağlantılardan N1, N2 ve N3 nolu birleştirmelere ait ara yüzey makro fotoğraflar incelendiğinde, tüm kaynaklı numunelerde bağlantısız bölgelerin oluşmadığı birleşmeler görülmektedir. Şekil 8.5 incelendiğinde kaynaklı numunelerde AA6063 alüminyum tarafındaki ısı iletkenliğinin AZ63 magnezyuma oranla daha fazla olması hızlı bir sıcaklık artışına neden olduğu ve buna bağlı olarak yığma basıncında ki artış ile birlikte AA6063 alüminyum tarafında flanş oluşumunun arttığı

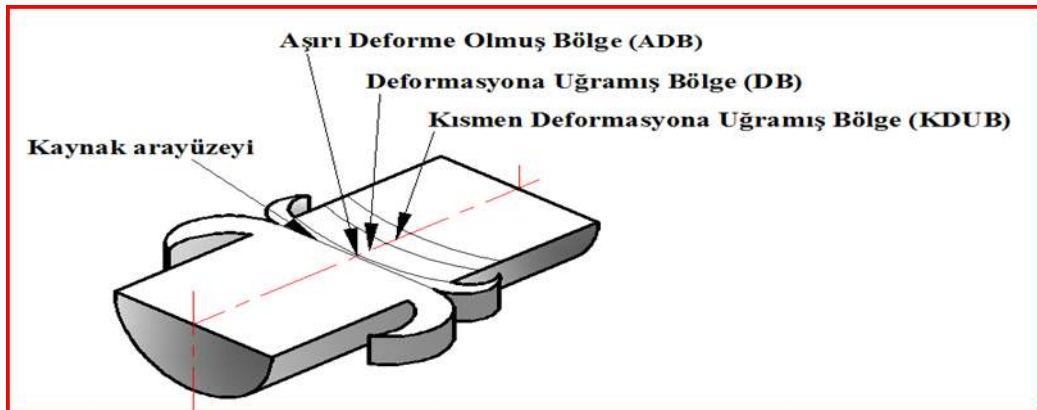
gözlemlenmiştir. Mikroyapı açısından 1500 ve 1600 dev/dk'da yapılan birleştirmeler ile kıyaslama yapıldığında artan devir sayısı ile birlikte boşluksuz ve çatlaksız bölgelerin oluştuğu görülmektedir.

8.2. Kaynaklı Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri

Ergitme kaynak yöntemlerinde mikroyapının değişmemesi ve çökelmelerin engellenebilmesi için kaynak yöntemi ve kullanılan ilave metalin kimyasal bileşimi ve özellikleri dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Kaynak işlemi sırasında ortaya çıkan sıcaklık nedeni ile mikroyapının değişme ihtimali vardır. Sürtünme kaynağında ergimenin olmamasından, kaynak işleminin çok kısa bir zamanda yapılması ve hızlı soğuma gibi özelliklerinden dolayı ergitme kaynaklarında görülen metalürjik değişimler engellenebilmektedir.

Sürtünme kaynağında, kaynak edilmiş parçaların arayüzeylerinde meydana gelen değişimler Şekil 8.6'da görüldüğü gibi Esas Malzeme (EM), Deformasyon Bölgesi (DB), Kısmen Değişime Uğramış Bölge (KDUB) olarak adlandırılmaktadır.

Yapılan detaylı SEM incelemeleri sonucunda deformasyona uğramış bölgenin içerisinde olan fakat yapısal olarak farklılık gösteren aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB) belirlenmiş olmakla birlikte kaynaklı yapı dört farklı bölüm şeklinde belirlenmiş ve incelemeler buna göre yapılmıştır. İşlem parametrelerinin, bu dört bölgenin boyutunu etkilediği literatürde vurgulanmaktadır.

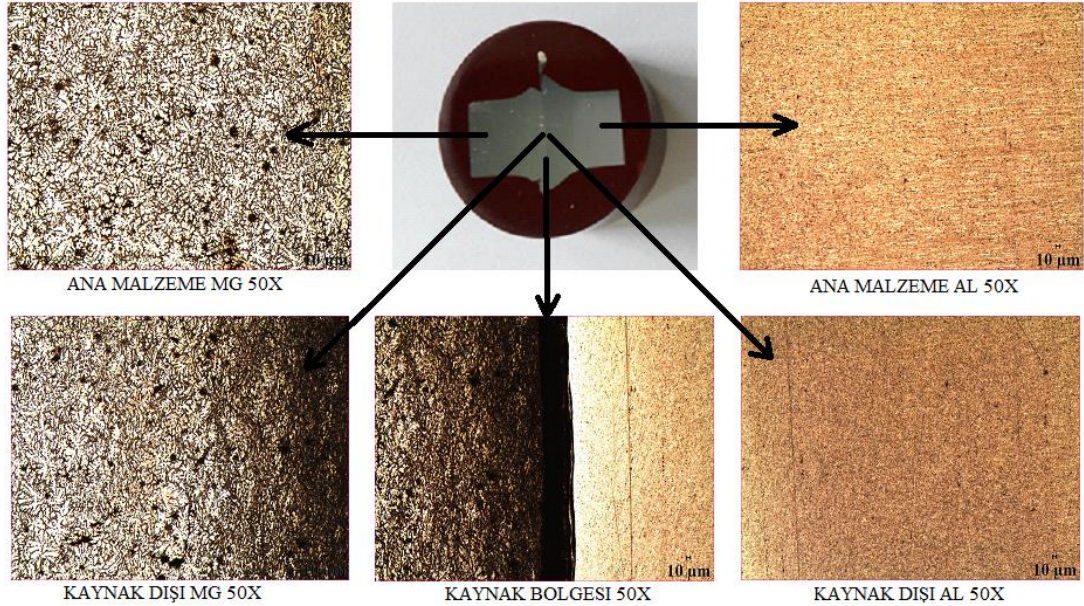


Şekil 8.6. Mikroyapı değişikliğinin meydana geldiği bölgeler [51].

Bu çalışmada, farklı bileşime sahip iki malzeme çifti (AZ63 Magnezyum/AA6063 Alüminyum) farklı işlem parametreleri kullanılarak, sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Birleşme sonrası AZ63 Magnezyum / AA6063 Alüminyum malzeme çiftinin birleşme arayüzeyleri optik mikroskop yardımı ile fotoğrafları çekilerek incelenmiştir. Farklı bileşime sahip malzeme çiftlerinin kaynağında birleşme bölgesinin her iki yanında farklı yapıların ortaya çıktığı bilinmektedir. Bundan dolayı her iki malzeme çiftinin içindeki yapılar farklı olacağından ayrı ayrı olacak şekilde incelenmiştir.

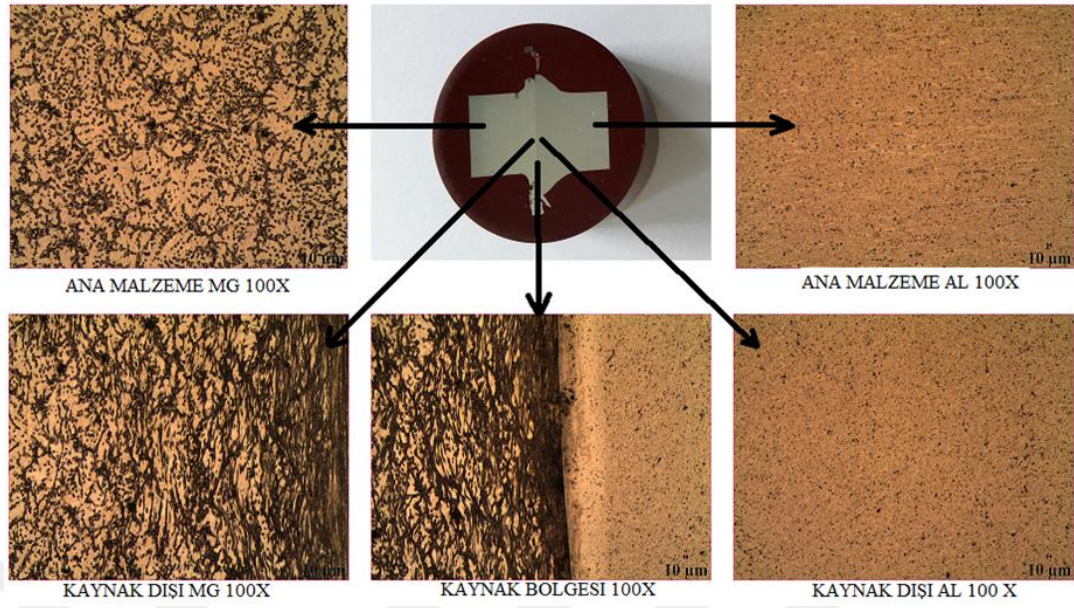
8.2.1. 1500 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri

Aşağıda verilmiş olan Şekil 8.7’de, 1500 dv/dk, 20 MPa sürtünme basıncı, 40 MPa yığma basıncı, 6 sn. sürtünme süresi ve 4 sn. yığma süresi kullanılarak birleştirilen N7 nolu kaynaklı birleştirmeye ait ayrıntılı optik fotoğraflar görülmektedir. Fotoğraflardan da görüldüğü üzere ana malzemelerin mikroyapısında herhangi bir dönüşüm olmamıştır. Ayrıca birleşme bölgelerinde de boşluksuz ve çatlaksız bölgelerin olduğu görülmektedir.



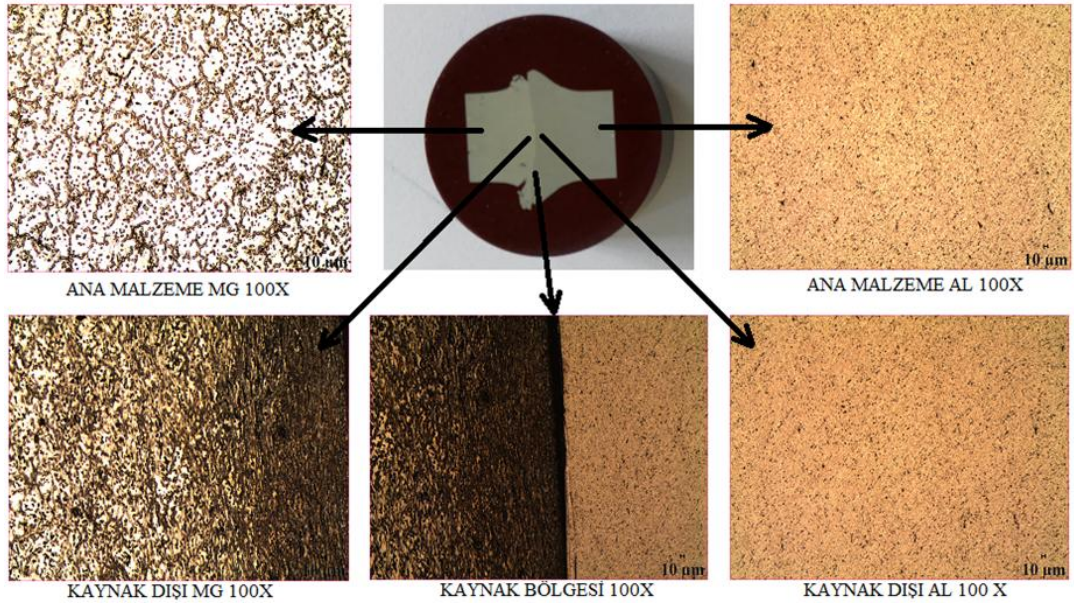
Şekil 8.7. N7 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri

Şekil 8.8’de, 1500 dv/dk, 30 MPa sürtünme basıncı, 60 MPa yığma basıncı, 6 sn. sürtünme süresi ve 4 sn. yığma süresi kullanılarak birleştirilen N8 nolu kaynaklı birleştirmeye ait ayrıntılı optik fotoğraflar görülmektedir.



Şekil 8.8. N8 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri

Şekil 8.9’da 1500 dv/dk, 40 MPa sürtünme basıncı, 80 MPa yığma basıncı, 6 sn. sürtünme süresi ve 4 sn. yığma süresi kullanılarak birleştirilen N9 nolu kaynaklı birleştirmeye ait ayrıntılı optik fotoğraflar görülmektedir.



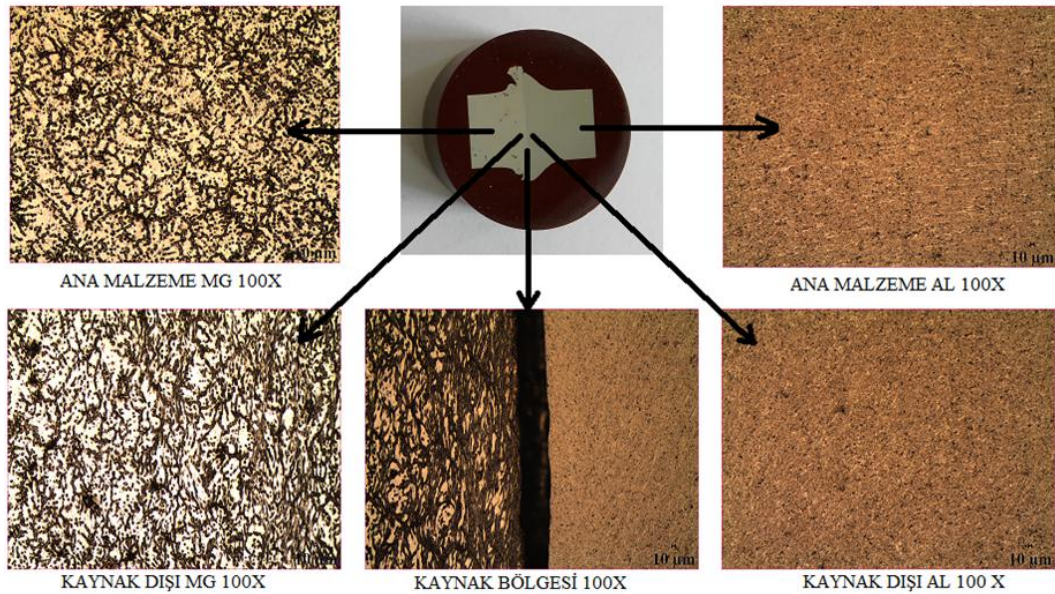
Şekil 8.9. N9 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri

Bu kaynaklı numunelerin arayüzeylerinden alınan optik fotoğrafları (Şekil 8.7-8.8-8.9) incelendiğinde, ana malzemelerin mikro yapılarında herhangi bir değişiklik meydana

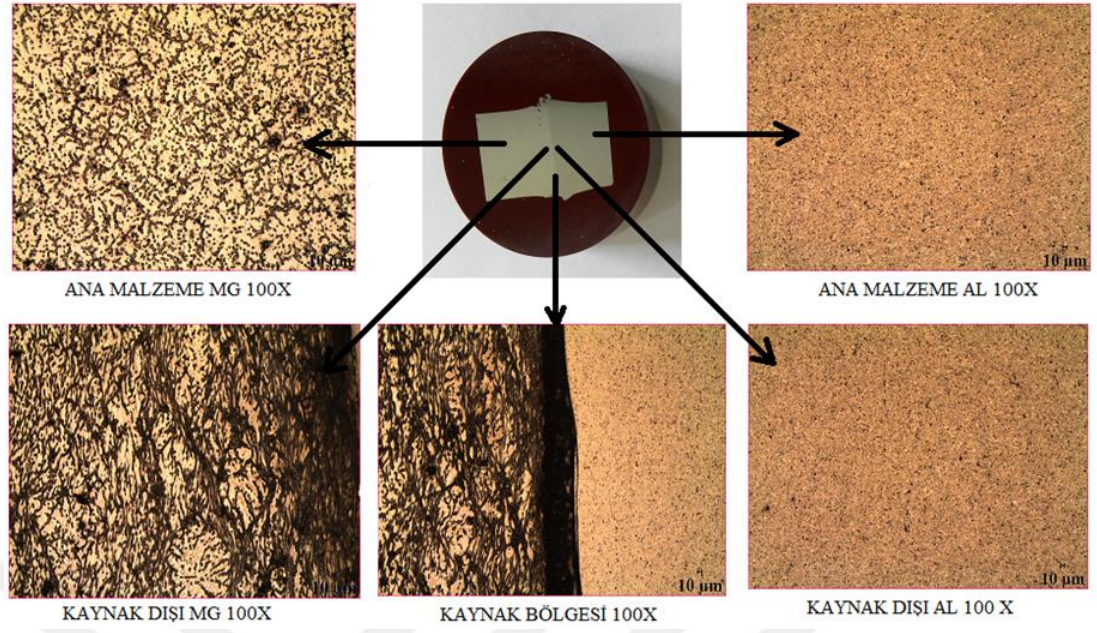
gelmemiştir. Kaynaklı numunelerin birleşme bölgeleri net bir şekilde görülmekte olup birleşme yüzeylerinde herhangi bir boşluk, çatlak ve bağlantısız bölgelerin oluşmadığı görülmektedir. Artan sürtünme ve yığma basıncına göre, yönlenmiş tane yapısının arttığı görülmektedir. Buna bağlı olarak dışarı taşan flanş miktarıda artmıştır.

8.2.2. 1600 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri

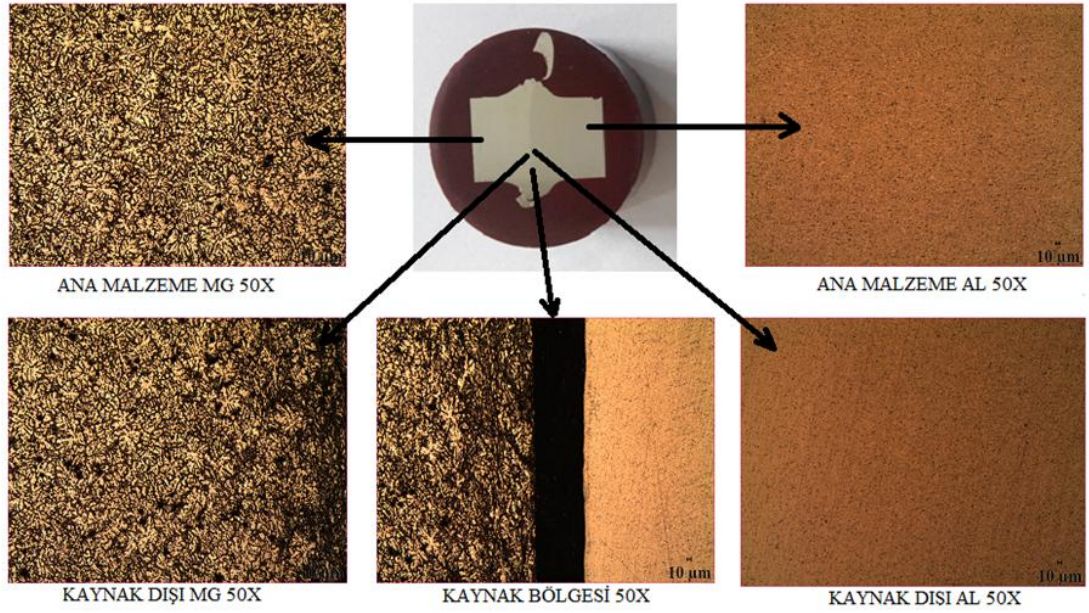
1600 dev/dk devir sayısı, 20, 30, 40 MPa sürtünme basıncı, 40, 60, 80 MPa yığma basıncı, 6 sn sürtünme süresi ve 4 sn yığma süresi kullanılarak birleştirilen N4, N5 ve N6 no'lu kaynaklı birleştirmelere ait kaynak sonrası arayüze ait Optik fotoğrafları Şekil 8.10-8.11-8.12 de verilmiştir. 1500 dev/dk' da yapılan birleştirmeler ile kıyaslandığında; artan devir sayısına bağlı olarak ana malzemenin mikroyapısında herhangi bir değişiklik olmazken; birleşme bölgesine yakın bölgelerde daha fazla sıkıştırılmış ve yönlenmiş tanelerin olduğu gözlenmiştir.



Şekil 8.10. N4 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri



Şekil 8.11. N5 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri



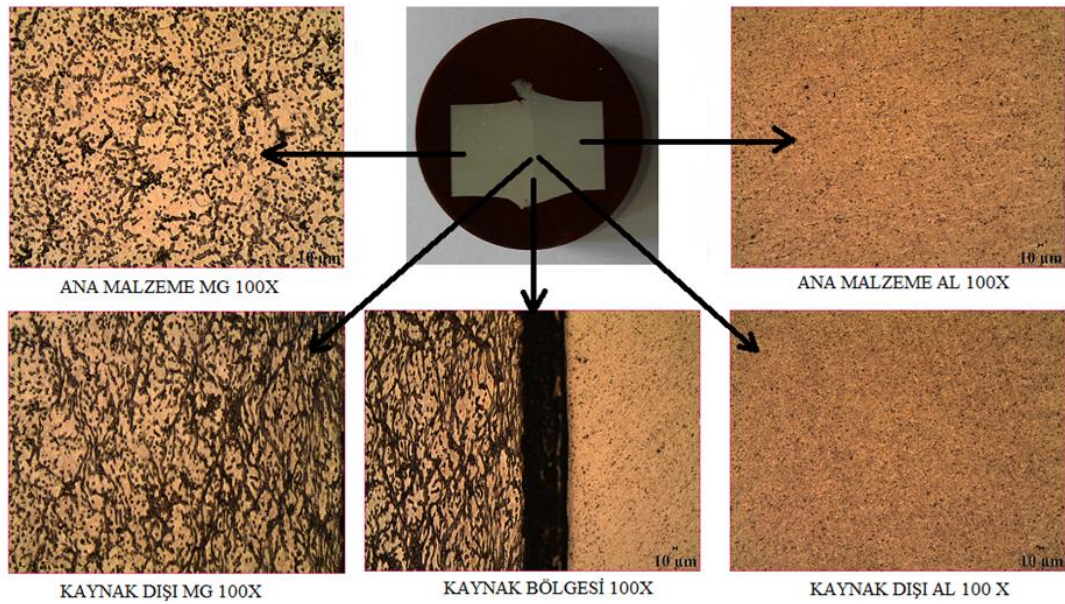
Şekil 8.12. N6 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri

Bu kaynaklı numunelerin arayüzeylerinden alınan optik fotoğrafları (Şekil 8.10-8.11-8.12) incelendiğinde, ana malzemelerin mikro yapılarında herhangi bir değişiklik meydana gelmemiştir. Ancak artan devir sayısı ile birlikte sürtünme basıncı ve yığma basıncının da etkisiyle birleşme bölgesinin her iki tarafında da aşırı deformasyona uğramış bölge ve deformasyona uğramış bölge de her iki tarafta tane yönelimleri açıkça görülmektedir.

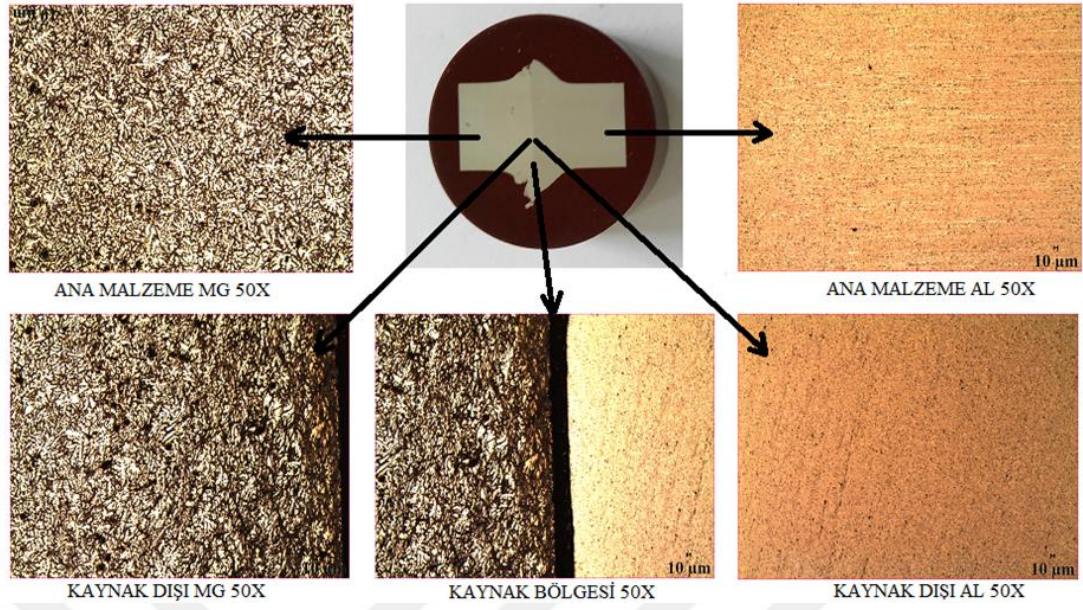
Kaynaklı numunelerin birleşme bölgeleri net bir şekilde görülmekte olup birleşme yüzeylerinde herhangi bir boşluk, çatlak ve bağlantısız bölgelerin oluşmadığı görülmektedir.

8.2.3. 1700 dev/dk ile Birleştirilen Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri

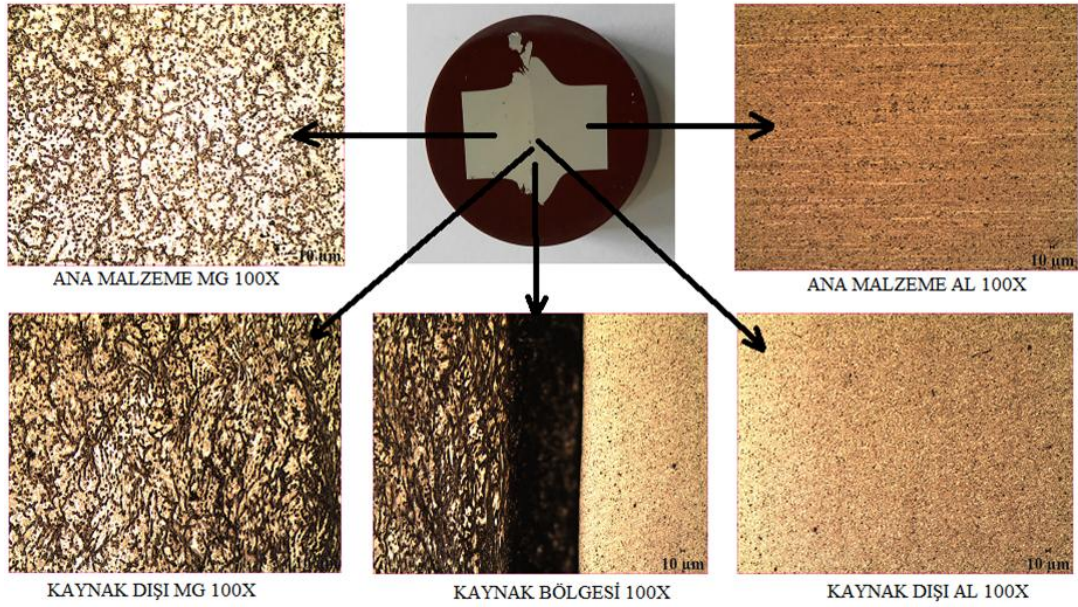
1700 dev/dk devir sayısı, 20- 30-40 MPa sürtünme basıncı, 40- 60,-80 MPa yığma basıncı, 6 sn sürtünme süresi ve 4 sn yığma süresi kullanılarak birleştirilen N1, N2 ve N3 no'lu kaynaklı birleştirmelere ait kaynak sonrası arayüzey Optik fotoğrafları Şekil 8.13- 8.14-8.15'da verilmiştir.



Şekil 8.13. N1 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri



Şekil 8.14. N2 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri



Şekil 8.15. N3 nolu numunenin arayüzey optik görüntüleri

Bu kaynaklı numunelerin arayüzeylerinden alınan optik fotoğrafları (Şekil 8.13-8.14-8.15) incelendiğinde, birleşme yüzeylerinde herhangi bir boşluk, çatlak ve bağlantısız bölgelerin oluşmadığı görülmektedir. 1500 ve 1600 dev/dk’ da yapılan birleştirmeler ile kıyaslandığında; artan devir sayısı ile birlikte dışarı taşan flanş miktarının arttığı ve boşluksuz bölgelerin meydana geldiği görülmektedir.

Farklı sürtünme ve yığma basıncı kullanılarak birleştirilen bu kaynaklı numunelerin birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişikler şekil 8.13-8.14-8.15 görülmektedir. N4, N5 ve N6 nolu numunelerde görülen tane yönlenmelerinin artan devir sayısı ile birlikte 1700 dv/dk ile birleştirilen N1, N2 ve N3 numunelerinde daha belirgin olduğu görülmektedir. Tane yönlenmelerinin artmasının ise devir sayısındaki artışa bağlı olarak sürtünme arayüzeyinde oluşan sıcaklığın artmasına bağlı olduğu düşünülmektedir.

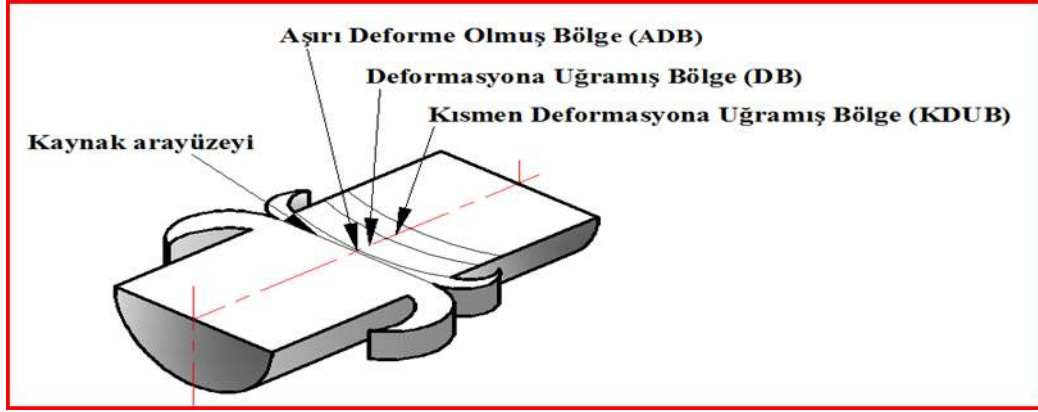
8.3. Kaynaklı Numunelerin Mikrosertlik İncelemeleri

AZ63 magnezyum ve AA6063 alüminyum malzemelerin sürtünme kaynak işlemi gerçekleştirilmeden önce mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. AZ63 magnezyum için sertlik değeri 65-70 HV, AA6063 alüminyum için 65 HV olarak belirlenmiştir.

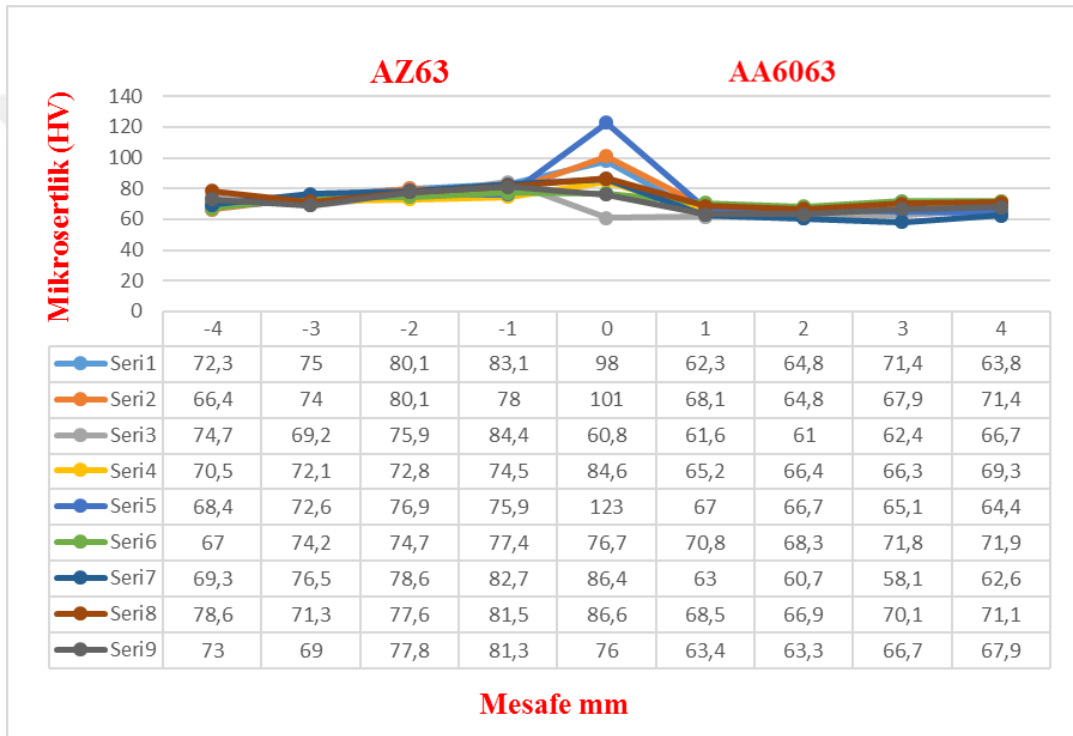
Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen kaynaklı numunelerin mikrosertlik ölçümleri, değişen kaynak parametrelerinin kaynaklı bağlantıların sertliği üzerine olan etkisini belirlemek amacı ile yapılmıştır. Kaynaklı bağlantıların mikrosertlik lmleri, Optik Mikroskop analizlerini yapmak için hazırlanmış olan numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı bağlantıların mikrosertlik ölçümleri, bağlantıların birleşme bölgesinde karşılıklı olarak çizgisel bir hat doğrultusunda 0.5 mm aralıklarla alınmıştır.

Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen kaynaklı bağlantıların mikrosertlik dağılımları literatürde izah edildiği gibi üç farklı bölgede değiştiği görülmektedir (şekil 8.16). Bu bölgeler şekil 8.16'dan da görüldüğü gibi Aşırı Deforme Olmuş Bölge (ADB), Deformasyona Uğramış Bölge (DB) ve Kısmen Deformasyona Uğramış Bölge (KDB) olarak bilinmektedir.

Kaynaklı bağlantıların mikro sertlik değerleri kaynak ara yüzeyi boyunca değişiklik gösterdikten sonra, esas malzemeye doğru ilerledikçe tekrardan esas malzemenin sertlik değerlerine geri döndüğü tespit edilmiştir.



Şekil 8.16. Mikrosertlik ölçüm sonuçlarının değiştiği bölgeler [51].



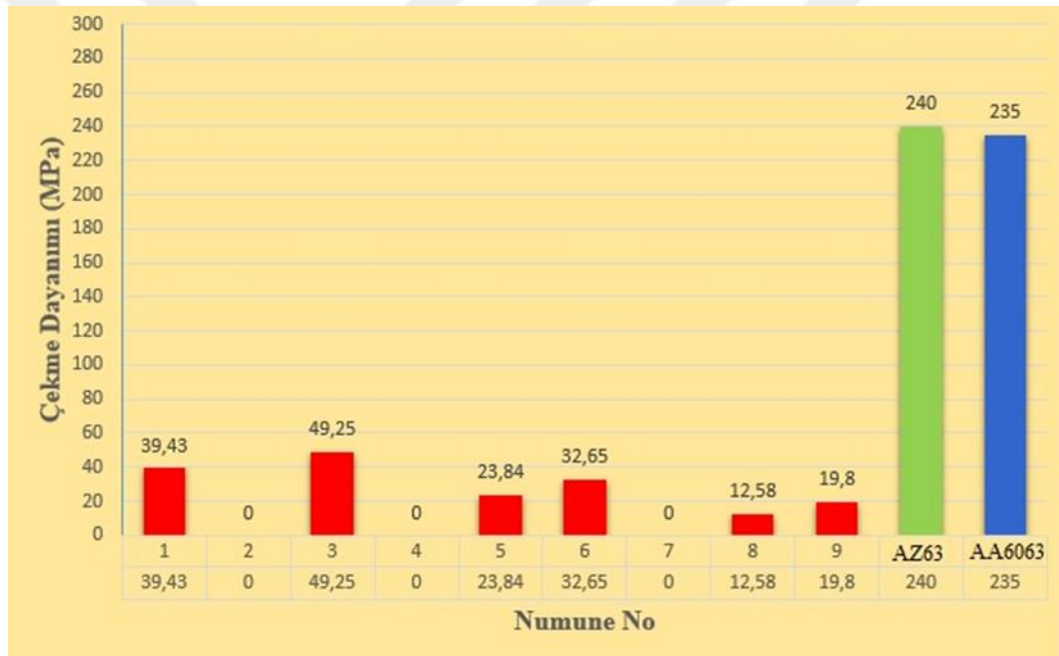
Şekil 8.17. Sürtünme kaynaklı numunelerin mikrosertlik grafiği ve değerleri

Sürtünme kaynaklı bağlantıların kaynak arayüzeyine dik doğrultuda alınan mikrosertlik değerleri Şekil 8.17 görülmektedir. Sürtünme kaynaklı numunelere ait grafik incelendiğinde (Şekil 8.17) N1-N2-N4-N5-N7-N8 numunelerinde, AZ63 ana malzemenin kaynak bölgesine doğru ilerledikçe sertlik değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir. N3-N6-N9 numunelerinde ise AZ63 ana malzemenin kaynak bölgesine doğru ilerledikçe sertlik değerlerinde artışın olduğu görülmektedir, fakat diğer kaynaklı numunelerin aksine kaynak bölgesindeki sertlik değerlerinde ani bir düşüş meydana gelmiştir. Kaynak bölgesinin hemen yanında AA6063 kısmında ise genel olarak sertlik değerlerinde bir düşüşün meydana geldiği görülmektedir. Kaynaklı bağlantıların farklı bölgelerinden alınan mikrosertlik sonuçlarına

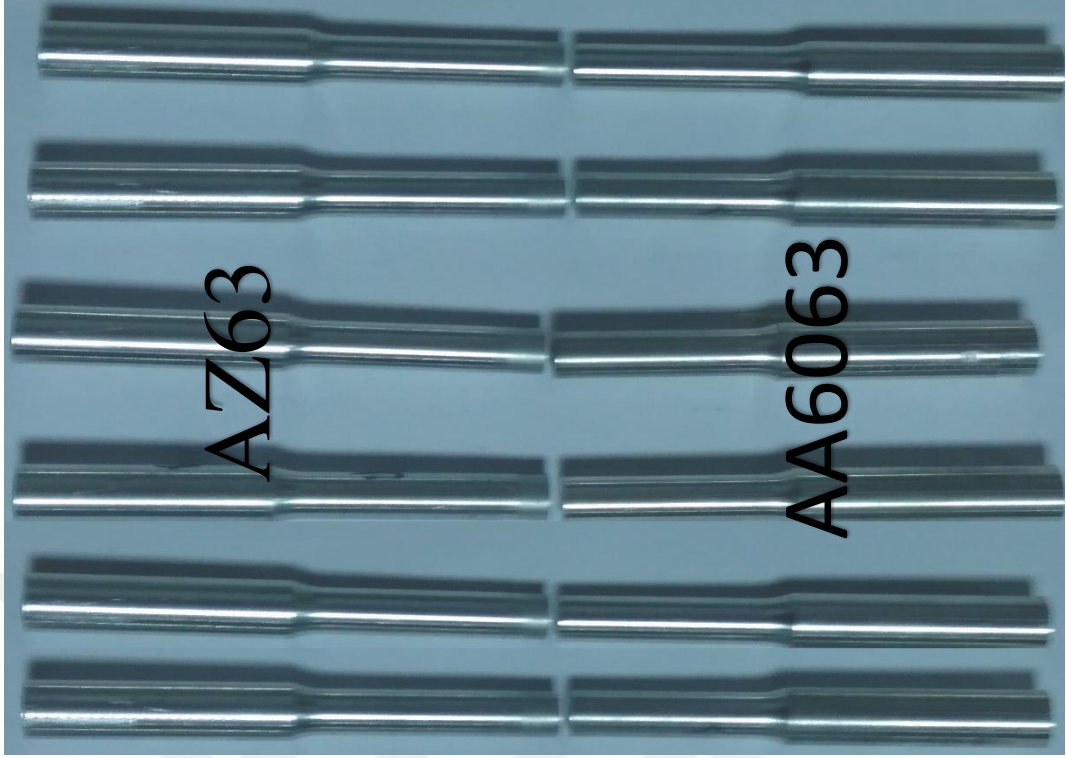
baktığımızda genel olarak ana malzemenin mikrosertlik değerlerine yakın değerlerin çıktığı tespit edilmiştir. Bu durum; mikrosertlik sonuçları açısından incelendiğinde kaynaklı bağlantılarda kırılğan intermetalik fazların oluşmadığını göstermektedir.

8.4. Kaynaklı Birleştirmelerin Çekme Dayanımlarının İncelenmesi

Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AZ63 magnezyum - AA6063 alüminyum malzeme çiftlerinin yük taşıma kabiliyetleri ve yükleme esnasında oluşan plastik deformasyonu tanımlamak için kaynaklı numunelere TS EN ISO 6892-1 standardına göre çekme testi yapılmıştır. Çekme deneyi sonunda kırılan parçaların şematik gösterimi Şekil 8.20 görülmektedir.



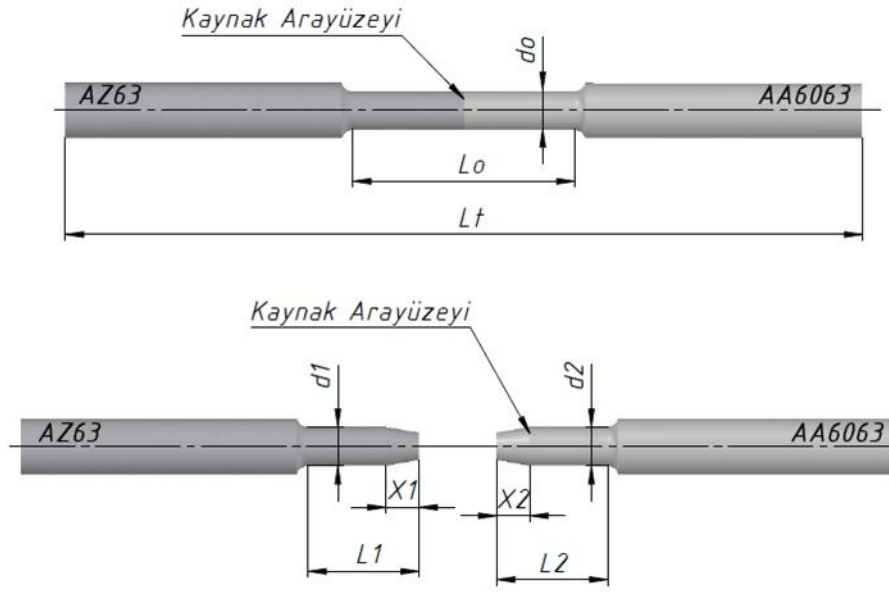
Şekil 8.18. Çekme test sonuçlarına ait grafik.



Şekil 8.19. N1, N3, N5, N6, N8 ve N9 nolu numunelerin çekme testi sonuçları

Şekil 8.19’da görüldüğü gibi, sürtünme kaynaklı numunelerde kopmanın kaynak bölgesinden kırıldığı görülmektedir. Çekme testine tabi tutulan sürtünme kaynaklı numunelerden, N2, N4 ve N7 nolu numuneler çekme test numuneleri hazırlama işlemi sırasında kaynak bölgelerinden kırılmıştır N1, N3, N5, N6, N8 ve N9 nolu numunelerde ise herhangi bir sorun görülmemiştir.

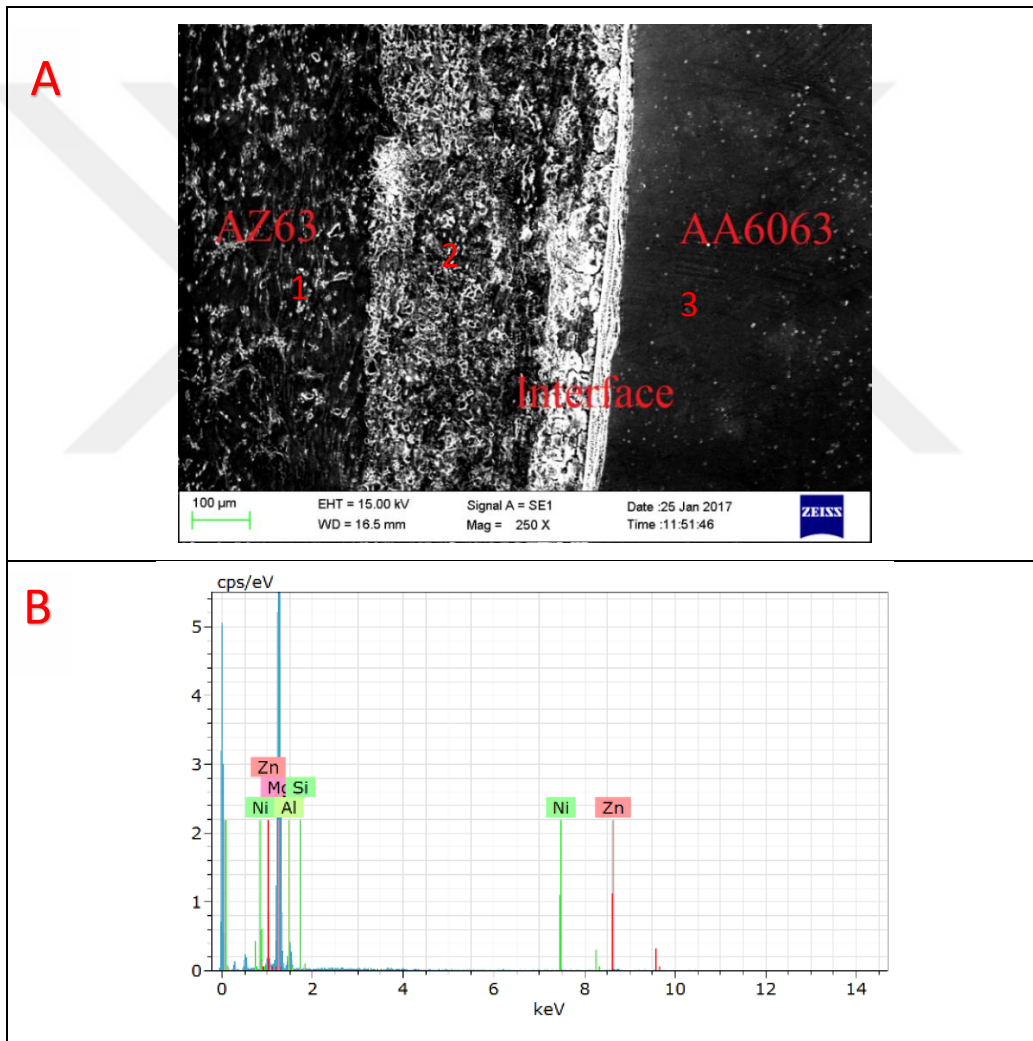
N1, N3, N5, N6, N8 ve N9 nolu numunelerin çekme test sonucu kırılma yüzeyleri incelendiğinde (Şekil 8.19) bu kaynaklı bağlantıların gevrek kırılma mekanizması gösterdiği görülmektedir. Şekil 8.18’ deki çekme test sonuçlarına baktığımızda N1 nolu numunenin max. çekme gerilmesi 39,43 MPa, N3 nolu numunenin max. çekme gerilmesi 49,25 MPa, N5 nolu numunenin max. çekme gerilmesi 23,84 MPa, N6 nolu numunenin max. çekme gerilmesi 32,65 MPa, N8 nolu numunenin max. çekme gerilmesi 12,58 MPa, N9 nolu numunenin max. çekme gerilmesi 19,8 MPa olduğu görülmektedir. Mikroyapı ve mikrosertlik incelemelerinde kaynaklı numunelerde herhangi bir sorun gözlemlemediğimizi söylememize rağmen çekme test sonuçları; bize numunelerimizin kaynaklama işleminin başarısız olduğunu göstermiştir. Bu durum; Magnezyum ve Alüminyum alaşımlarının oksijene afinitesinin yüksek olması ve vakum ortamı olmaması sonucu meydana gelmesi muhtemel oksidasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir.

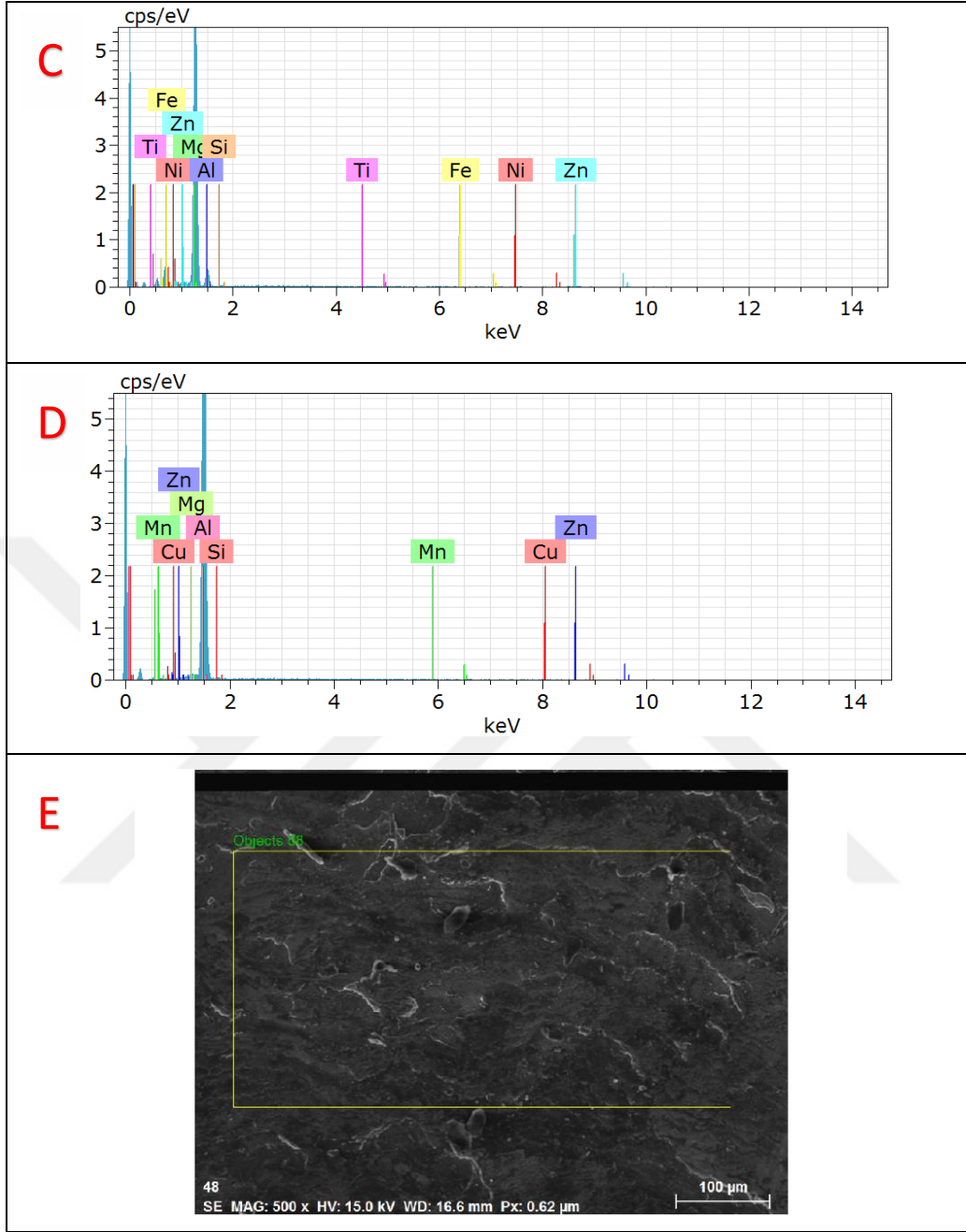


Şekil 8.20. Çekme deneyi sonunda kırılan parçaların şematik gösterimi

8.5. Kaynaklı Birleştirmelerin SEM-EDS Analizi ve Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi

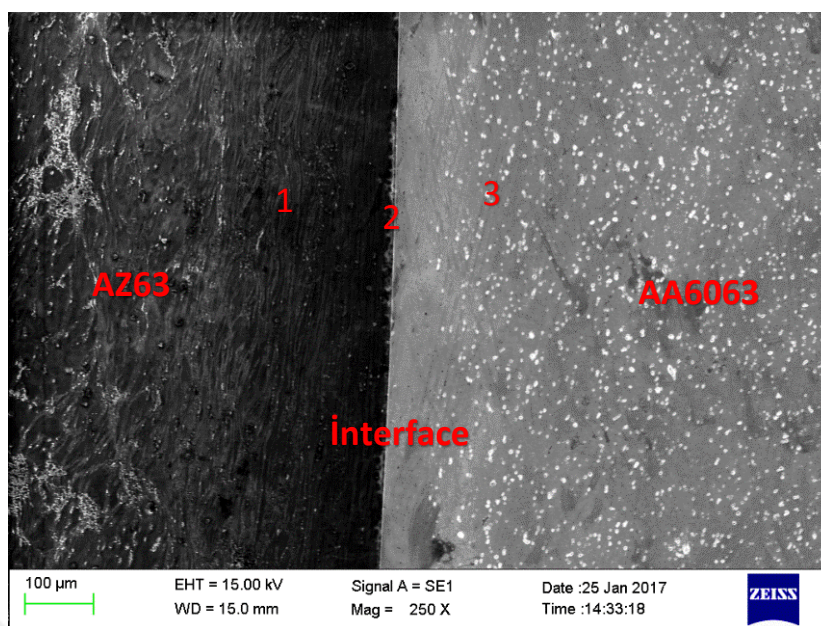
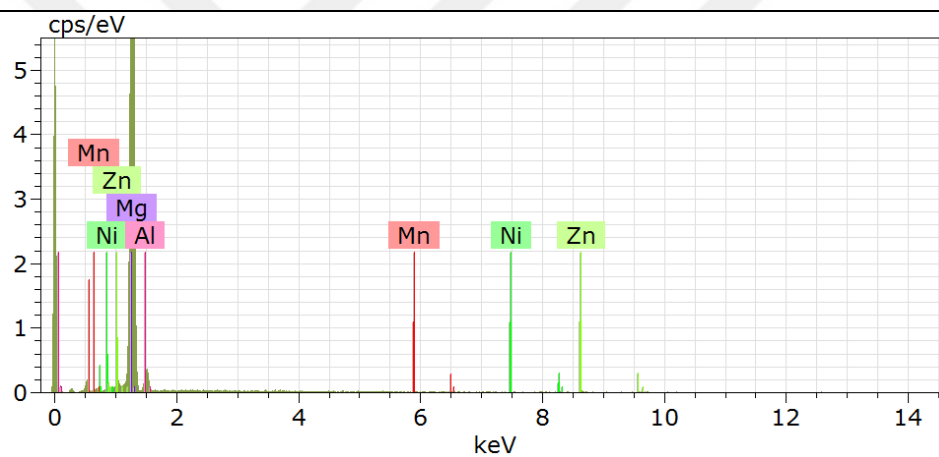
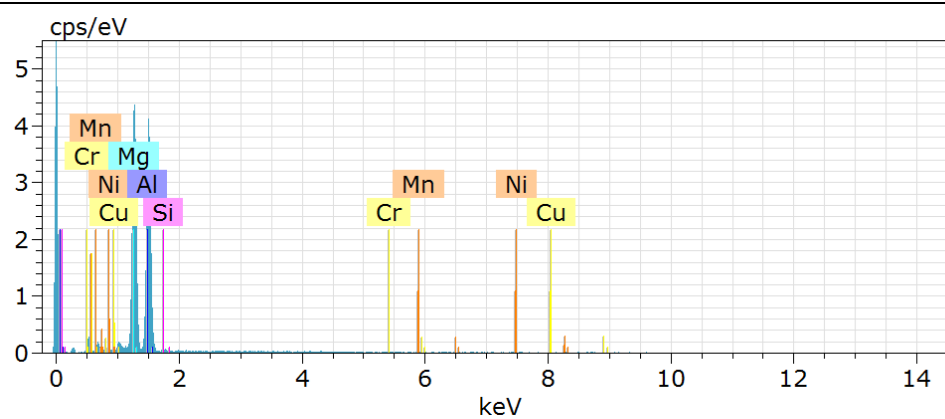
Sürtünme kaynak yöntemi ile kaynak edilmiş AZ63 magnezyum ve AA6063 alüminyum malzeme çiftindeki elemental geçişler 3 farklı noktadan EDS analizi alınarak hesaplandı. Kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri (Şekil 8.21 E ve Şekil 8.22 E) incelendiğinde kaynaklı bağlantıların gevrek kırılma mekanizması gösterdiği tespit edilmiştir.

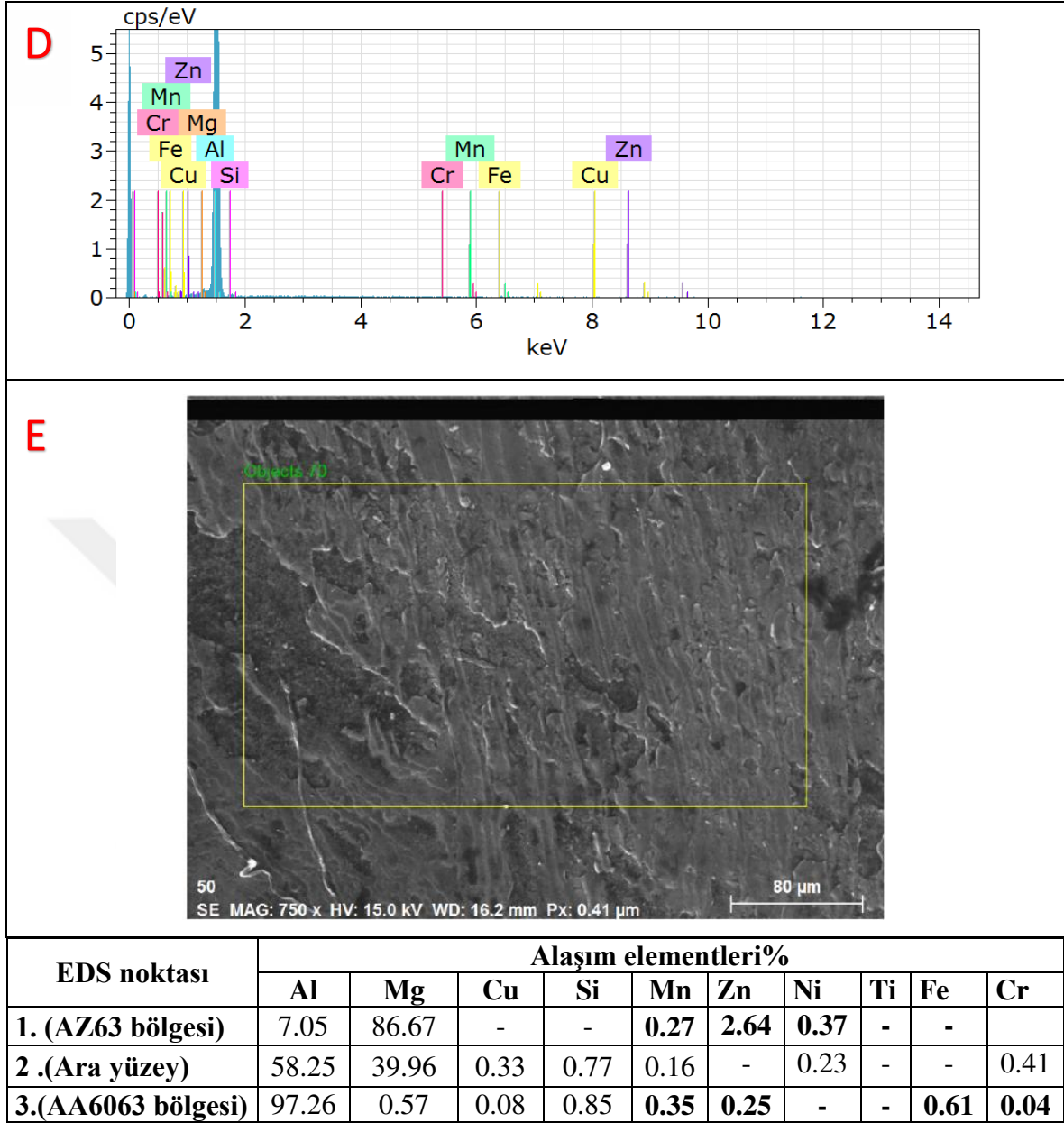




EDS noktası	Alaşımlar elementleri%								
	Al	Mg	Cu	Si	Mn	Zn	Ni	Ti	Fe
1. (AZ63 bölgesi)	11.47	86.93	-	0.07	-	1.00	0.55	-	-
2. (Ara yüzey)	9.74	83.30	-	0.29	-	5.36	0.61	0.39	0.31
3. (AA6063 bölgesi)	97.25	0.62	1.30	0.51	0.19	0.12	-	-	-

Şekil 8.21. N1 nolu numunenin (AZ63-AA6063) A) SEM görüntüsü B) 1 nolu noktanın EDS grafiği C) 2 nolu noktanın EDS grafiği D) 3 nolu noktanın EDS grafiği E) Kırılma yüzey görüntüsü

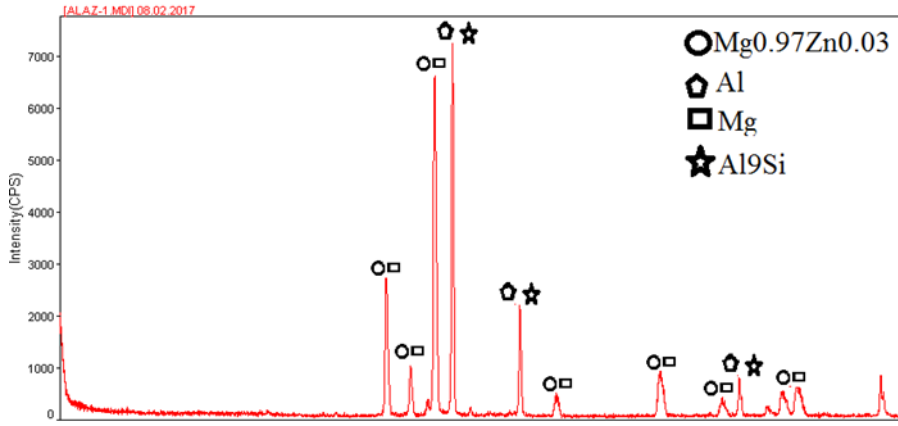
A**B****C**



Şekil 8.22. N8 nolu numunenin (AZ63-AA6063) A) SEM görüntüsü B) 1 nolu noktanın EDS grafiği C) 2 nolu noktanın EDS grafiği D) 3 nolu noktanın EDS grafiği E) Kırılma yüzey görüntüsü

8.6. Kaynaklı birleştirmelerin XRD Sonuçlarının İncelenmesi

Sürtünme kaynaklı malzemelerin kaynak yüzeyinden alınan XRD analizleri Şekil 8.23’de görülmektedir. XRD analizleri incelendiğinde kaynaklı birleştirmelerde $Mg_{0.97}Zn_{0.03}$, Al, Mg ve Al_9Si fazları tespit edilmiştir. Bu fazların ise birleşmeyi olumsuz yönde etkileyen intermetalik fazlar olduğu düşünülmektedir.



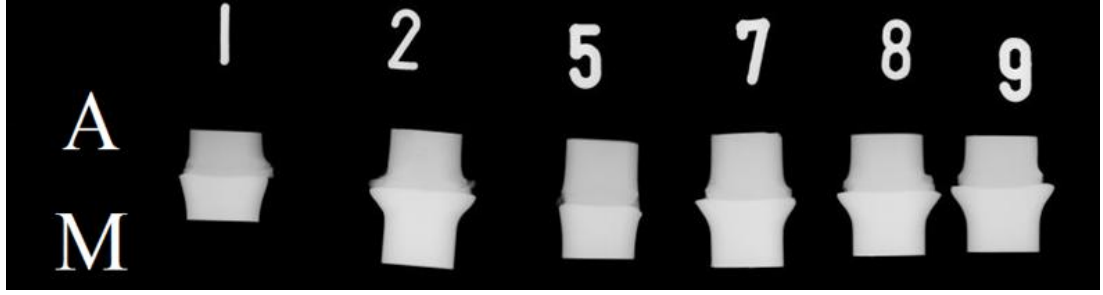
Şekil 8.23. N1 nolu numunenin XRD analiz sonuçları

8.7. Radyografi Test Sonuçlarının İncelenmesi

Tablo 8.1’de Uluslararası Kaynak Enstitüsüne göre kaynak kusurlarının ve de radyografik film görüntülerinin tanımları ve açıklamaları ayrıntılı bir şekilde verilmiştir [27,28]. Radyografik filmi çekilen kaynaklı bağlantıların filmleri Şekil 8.24'deki görüntüleyici yardımıyla Tablo 8.1'deki tanımlamalar ve açıklamalar baz alınarak değerlendirilmiştir.



Şekil 8.24. Film inceleme cihazı (Görüntüleyici) [25,26].



Şekil 8.25. Numunelerin radyografik test fotoğrafları (N1, N2, N5, N7, N8, N9).

Tablo 8.1. Kaynak kusurları ve radyografik görüntünün tanımı [27-28].

A: Gaz boşlukları Aa: Porozite Ab: Gaz kabarcıkları	Tanım	Yakalamadan dolayı gaz kabarcıkları oluşur Gaz kanalları veya uzun boşluklar
	Radyografik görüntü	Dairenin etrafında keskin siyah gölgeler Daireye bağlı keskin siyah veya hata değişiminin uzun gölgeleri
B: Cüruf Ba: Cüruf Bb: Cüruf hataları	Tanım	Kaynak boyunca cüruf veya diğer yabancı maddeler Boşluklarda yakalanmış cüruf veya yabancı maddeler
	Radyografik görüntü	Karanlık gölgeler ya da rastgele şekiller. Kaynak dikiş kenarına paralel sürekli koyu çizgiler.
C: Yetersiz kaynak	Tanım	Ana malzeme kaynağı ve malzeme arasında kaynak dikişi boyunca iki boyutlu hata olmaması için birleşme
	Radyografik görüntü	Keskin kenarlı ince koyu çizgi.
D: Yetersiz Derin Penetrasyon	Tanım	Kök kaynağındaki birleşmede dikiş eksikliği
	Radyografik görüntü	Orta koyu dikiş sürekliliği veya farklı çizgide kaynak
E: Çatlaklar Ea: Dikey çatlaklar Eb: Yatay çatlaklar	Tanım	Metal lokal gerilme mukavemetinin aşılması
	Radyografik görüntü	Düz, ince koyu çizgi.
F: Hararet kanalı	Tanım	Kanal veya olukta oluşan yüzey ve dikiş arasındaki kaynak metali
	Radyografik görüntü	Kaynak dikiş boyunca geniş ve koyu çizgi olarak yayılır.

Bu çalışmada, son zamanlar da otomotiv, uzay-uçak sanayisi başta olmak üzere savunma sanayisinde geniş kullanım alanı bulan magnezyum (AZ63) ve alüminyum (AA6063) alaşımlarının sürtünme kaynak tekniği ile birleştirilen kaynaklı bağlantıların daha sonra radyografi yöntemi ile incelenmiştir.

Tablo 8.1'de en yaygın olarak görülen kaynak kusurlarının ve radyografik görüntülerin tanımlarına göre AZ63 magnezyum - AA6063 alüminyum alaşımları yetersiz kaynak grubuna girmektedir (C).

Yapılan incelemeler sonucunda 1700 dev/dk devir sayısı, 30 MPa sürtünme basıncı, 60 Mpa yığma basıncı, 6 sn sürtünme süresi ve 4 sn yığma süresi kullanılarak birleştirilen N2 numunesinde en iyi birleşmenin gerçekleşmiş olduğunu fakat genel olarak seçilen parametrelerin bu iki ana malzemeyi birleştirmede yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 8.25).



9. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, AZ63 magnezyum ve AA6063 alüminyum malzeme çifti, farklı devir sayıları (1500-1600-1700 dv/dk), farklı sürtünme basıncı (20-30-40 MPa), farklı yığma basıncı (40-60-80 MPa), sabit sürtünme süresi (6 sn) ve sabit yığma süresinde (4 sn) sürekli tahrikli sürtünme kaynak tekniği ile birleştirilmiştir. Kaynaklı bağlantıların, kaynak bölgeleri radyografi yöntemiyle incelenmiştir, değişen işlem parametrelerinin mikroyapı, mikrosertlik ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiş olup, çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Bu çalışma AZ63 magnezyum ve AA6063 alüminyum alaşımlarını birleştirmede seçilen devir sayılarının (1500-1600-1700 dv/dk) bu iki ana malzemeyi birleştirmede genel olarak yetersiz kaldığı tespit edilmiştir.
- Kaynaklı birleştirmeler makro ve mikro düzeyde incelendiğinde herhangi bir çatlak ve bağlantısız bölgeye rastlanmamıştır.
- Kaynaklı birleştirmeler mikroyapı açısından incelendiğinde; sürtünme basıncı ve yığma basıncındaki artışa bağlı olarak deformasyona uğramış bölgede bir daralma meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- Mikrosertlik açısından bakıldığında; ana malzemeden kaynak bölgesine gidildikçe sürtünme basıncı ve yığma basıncında ki artışa bağlı olarak kaynaklı bağlantıların sertliğinde artış meydana gelmiştir. En yüksek mikrosertlik değeri N5 nolu numunede 123 HV olarak ölçülmüştür.
- Çekme test sonuçları incelendiğinde; tüm numunelerin (N1, N3, N5, N6, N8 ve N9) kaynak bölgelerinden kırıldığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla kaynaklı bağlantıların birleşmede yetersiz kaldığı tespit edilmiştir.
- Kaynak parametrelerinin artması ile (devir sayısı, sürtünme basıncı ve yığma basıncı) birlikte kaynaklı bağlantıların mukavemetinde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. En yüksek çekme değeri 1700 dv/dk, 40 Mpa sürtünme basıncı ve 80 MPa yığma basıncın da kaynak edilen N3 nolu numunede yaklaşık olarak 50 MPa olarak ölçülmüştür. Ancak sürtünme kaynaklı bağlantılarda beklenen birleşme kalitesinin ana malzemeye oranla en az %50 olması gerektiğinden bu kaynaklı bağlantıların yetersiz olduğu tespit edilmiştir.

- EDS analizlerinde ise; Al, Mg, Cu, Si, Mn, Zn, Fe, Ni, Ti ve Cr elementleri tespit edilmiş olup, bu elementlerin mevcut malzemelerin yapısındaki elementler ile uyum sağladığı tespit edilmiştir.
- X-ray analizinde $Mg_{0.97}Zn_{0.03}$ ve Al_9Si fazı tespit edilmiştir. Bu fazların birleşmeleri olumsuz yönde etkileyen fazlar olduğu düşünülmektedir.
- Tablo 8.1'de gösterilen en yaygın kaynak kusurları tanımları ve radyografik görüntülere göre AZ63-AA6063 alaşımları yetersiz kaynak grubuna girmektedir (C). Yapılan incelemeler sonucunda 1700 dev/dk devir sayısı, 30 MPa sürtünme basıncı, 60 Mpa yığma basıncı, 6 sn sürtünme süresi ve 4 sn yığma süresi ile birleştirilen N2 numunesinde en iyi birleşmenin gerçekleşmiş olduğunu fakat genel olarak seçilen parametrelerin birleştirmede yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 8.25).

9.1. Öneriler

1. Yapılan çalışmanın korozyon ve yorulma dayanımı incelenebilir.
2. Kaynaklı bağlantılar farklı tahribatlı ve tahribatsız testlere tabii tutularak incelenebilir.
3. Başka bir kaynak tekniği ve farklı değişkenler kullanılarak kaynak işlemi yapılabilir.
4. Aratabaka kullanılarak kaynak bağlantı mukavemeti incelenebilir.
5. Kaynak sonrası kademeli soğutma ısıtma işlemi yapılarak mikroyapıdaki değişiklikler incelenebilir.
6. Magnezyum ve Alüminyum alaşımlarının oksijene olan afinitesinin yüksek olmasından dolayı birleşmeyi olumsuz etkileyecek bu durumu ortadan kaldıracabilecek çözüm yolları (vakum ortamı vs.) uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Açık, M.**, 2014. AISI 1010-Bakır malzeme çiftinin sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [2] **Bölük, O.**, 1999. A study on friction welding process, 7th Denizli Materials Symposium, sa: 507-511 , April 2-3-4.
- [3] **Caligulu, U., Yalcinoz, M., Kati, N., Balalan Z., and Islak, S.**, 2015. The effects of rotation speed and friction time for joining of aisi 4340-2205 steels by friction welded, Metallofizika i Noveishie Tekhnologii, vol, 37(5), pp. 665-681.
- [4] **Caligulu, U., Acık, M., Turkmen M., and Gür, K.A.**, 2016. Radiography test of AISI 1010-Copper alloys welded by friction welding, SYLWAN, vol, 160(4), pp. 468-479, ISSN:0039-7660.
- [5] **Kirik, I., Ozdemir, N., and Caligulu, U.**, 2012. Examination of Microstructure and mechanical properties of friction welded joints of medium carbon steel to austenitic stainless steel, 14th International Materials Symposium, (IMSP'2012), Pamukkale Üniversitesi, 501-510, Denizli/Türkiye.
- [6] **Kirik, I., Ozdemir, N., and Caligulu, U.**, 2012. "Weldability of aluminum based metal matrix composite to AA6061 Aluminum alloy by using friction welding, 2. International Conference on Welding Technologies, (ICWET'12), Gazi Üniversitesi, 466-478, Ankara/Türkiye.
- [7] **Kati, N., Akkaş, M., Kırık, İ., ve Ozan, S.**, 2012. AM50/AM60 magnezyum alaşım çiftinin sürtünme kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirliğinin araştırılması, 2. Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi, s: 313-321, 23-25 Mayıs.
- [8] **Buldum, B., Şık, A., ve Ertürk, İ.**, 2012. TİG ve sürtünme karıştırma kaynağı (Skk) ile birleştirilen magnezyum levhaların eğme yorulma dayanımının incelenmesi, 2. Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi, s: 423-431, 23-25 Mayıs.
- [9] **Bulut, R., Aydın, M., ve Baksan, B.**, 2012. AZ31 magnezyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle birleştirilmesi, 2. Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi, s: 567-576, 23-25 Mayıs.
- [10] **Şık, A.**, 2010. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen magnezyum levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi, SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi, 14. Cilt, 2. Sayı, s.134-140.
- [11] **Mercan, S., Özdemir, N.**, 2013. AISI 2205 / AISI 1020 malzeme çiftinin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi, NWSA-Technological Applied Sciences, 2A0080, 8, (2), 18-34.
- [12] **Uzkut, M., Ünlü, B.S., Akdağ, M.**, 2006. Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş yüksek alaşımlı iki farklı çeliğin mikroyapı ve mekanik özellikleri, Teknolojik araştırmalar: MTED (6), 11-17.
- [13] **Gül, A.**, 2006. Farklı metalsel malzemelerin sürtünme kaynağında, kaynak parametrelerinin dikiş özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] **Sayer, S.**, 2007. AA6063 (Almgisi0.5) tipi alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak değişkenlerinin, bağlantının dayanımı ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

- [15] **Şık, A., Ertürk, İ. ve Önder, M.,** 2010. AA2024 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında farklı parametrelerin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi ,Cilt 16, Sayı 2, Sayfa 139-147.
- [16] **Gürler, M.,** 2000. Alüminyum alaşımlarının sürtünme kaynak özellikleri, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] **Kadayıfçı, Z., A.,** 2013. Benzer ve farklı türden alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [18] **Sarsılmaz, F., ve Özdemir, N.,** 2008. Skk yöntemiyle birleştirilen alüminyum alaşımlarında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi Cilt 7, Sayı:2.
- [19] **Bozu, M.,** 2007. Sürtünme karıştırma kaynağında farklı kaynak parametrelerinin deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [20] **Yılmaz, S. S., Ünlü, B., S., Uzku, M., ve Durmuş, H.,** 2010. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş saf alüminyum, 5083 ve 7075 alüminyum alaşımlarının kaynak bölgesinin mikroyapı ve mekanik özellikleri, 13th International Materials Symposium (IMSP'2010), Pamukkale University, Denizli, Turkey.
- [21] **Kafalı, H., ve Ay, N.,** 2014. Sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmiş havacılık ve uzay yapılarında kullanılan Al6013-T6 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi ,Cilt 7 Sayı 2 (85-101).
- [22] **Anık, S.,** 1991. Gedik Eğitim vakfı kaynak teknolojisi eğitim araştırma ve muayene enstitüsü, Kaynak Tekniği El Kitabı, Yöntemler ve Donanımlar, İstanbul, s. 12, 93,109,113-115,150-152, 208-213.
- [23] **Çalgül, U.,** Kaynak Metalurjisi Ders Notları, Fırat üniversitesi, s. 7-10.
- [24] **Çalgül, U.,** Kaynak Metalurjisi ve Teknolojisi Ders Notu, Fırat Üniversitesi, s. 4-7.
- [25] **Oğuz, B.,** 1985. Karbonlu ve alaşımlı çeliklerin kaynağı, OERLIKON Yayını, s. 1.
- [26] **Sönmez, F.,** 2007. Sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş yüksek hız çeliği (HSS) ve AISI 1040 çeliklerinde mukavemet ve metalürji özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- [27] **Çelik, Ö.,** 2008. Sürtünme kaynağı yapılmış farklı malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Manisa.
- [28] **Marr, S.,** 2001. Friction welding into the future, welding design and fabrication, 74 (8):34-36.
- [29] **Duffin, F.D., and Bahrani, A.S.,** 1973. Frictional Behaviour of mild steel of friction welding, Wear, pp 53-73.
- [30] **Yılmaz, M.,** 1993. Investigation of different tool steel friction welding supply district, PhD Thesis, Y.T.Ü. Institute of Science and Technology, İstanbul.
- [31] **Ünal, E.,** 2003. Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 4340 çeliği ile paslanmaz çeliklerin yorulma dayanımının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [32] **Bahrani, A.S., and Grassland, B.,** 1996. Friction welding, CME, 61-66.
- [33] www.teknikport.com
- [34] **Anık, S.,** 1983. Kaynak Teknolojisi El Kitabı, İTÜ Makine Fakültesi.

- [35] **MEGEP**, 2007. Metal Teknolojisi, Elektrik Direnç Kaynağı, Ankara.
- [36] **Şahin, M.**, 2001. Sürtünme kaynağı ile birleştirmede parça boyutları ve plastik şekil değiştirmenin etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- [37] **Çil, E.**, 2009. Sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş paslanmaz çelik ve bakır parçaların kaynak bölgesi özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- [38] **Koç, E.**, 2008. Alasım Elementlerinin magnezyum döküm özelliklerine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük.
- [39] **Atalay, O.**, 2009. Magnezyum ve alaşımlarının konstrüksiyon malzemesi olarak otomotivde kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [40] **Bulut, R.**, 2009. Magnezyum AZ31 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Kütahya.
- [41] **Büyükgenç, Ö.**, 2011. AM60 ve AZ61 magnezyum alaşımlarının soğuma hızına bağlı mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [42] **Ünver, G.**, 2011. AZ91 magnezyum alaşımına Ti ve Cr alaşım elementlerinin ilavesinin özelliklere etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [43] **Erçayhan, Y.**, 2010. Alaşım elementlerinin magnezyumun mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- [44] **Kerenciler, H.**, 2014. Magnezyum alaşımlarında yaşlanma sertleşmesinin mekanik özelliklere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [45] **Toktaş, A.**, 2006. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin AA6063 alüminyum alaşımına uygulanması ve kaynak parametrelerinin malzeme iç yapısı ile mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir.
- [46] **Şafak S. A.**, 2011. Uçak endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarının elektrik direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [47] **Brown, J.R.**, 1999. FosecoNon-Ferrous foundrymans handbook, Butterworth-Heinemann, Oxford, 11: 340.
- [48] **Turhan, S.**, 2002. Alüminyumun mekanik özelliklerine ve aşınma dayanımlarına magnezyumun ve silisyumun etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [49] **Öz, Ö.**, 2007. Yaşlandırma ısı işleminin AA7075 malzemeli dikdörtgen plağın burkulma yükü üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Z.K.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 54.
- [50] **Alan, S.**, 2008. Alüminyum Raporu – Mayıs.

- [51] **Katı, N.**, 2014. Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AISI 4340 / AISI 420 çelik çiftinin burulma davranışının incelenmesi, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [52] **Ekinci, S.**, The Evaluation of the Welding Seam Errors with Digital Radiographic Methods”, The Atom Energy Foundation of Turkey, Istanbul.
- [53] The Certificate of Material Testing Knowledge, Ereğli Iron and Steel Plants T.A.Ş.
- [54] **Taşkın, M., Caligulu, U., and Turkmen, M.**, 2011. X-Ray tests of AISI 430 and 304 stainless steels and AISI 1010 low carbon steel welded by CO₂ laser beam welding”, MP-Materials Testing-Materials and Components Technology and Application, 53 (11-12), pp. 741- 747.
- [55] **Dikbas, H., Caligulu, U., Taskin, M., and Turkmen, M.**, 2013. X-Ray Radiography of Ti6Al4V welded by Plasma Tungsten Arc (PTA) welding”, Mp-Materials Testing-Materials and Components Technology and Application, Vol. 55, pp. 197-202.
- [56] **Kirik, I., Ozdemir, N., and Caligulu U.**, 2013. Effect of particle size and volume fraction of the reinforcement on the microstructure and mechanical properties of friction welded MMC to AA 6061 aluminum alloy, Kovove Materials, 51(4), pp. 221-227.

ÖZGEÇMİŞ

Aday Remzi KALLI, 1994 Erzin/HATAY’ da dünyaya geldi. 2012 yılında Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümüne başladı ve buradaki öğrenimini 2016 yılında bitirdi. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri Üretim Metalurjisi Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başlamış olup, halen devam etmektedir. Aday bekârdır. Yabancı dili İngilizce’dir.

