

**AA 7075 – AA 6061 MALZEME ÇİFTİNİN SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Yücel ASMA

**Yükseklisans Tezi
Metalürji Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ayhan ORHAN**

OCAK-2014

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

**AA 7075 – AA 6061 MALZEME ÇİFTİNİN SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yücel ASMA

(092221106)

Anabilim Dalı: Metalürji Eğitimi

Programı: Malzeme Eğitimi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ayhan ORHAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 06 Ocak 2014

OCAK-2014

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

**AA 7075 – AA 6061 MALZEME ÇİFTİNİN SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yücel ASMA

(092221106)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 06 Ocak 2014

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ayhan ORHAN

Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ

Yrd. Doç. Dr. Ali Kaya GÜR

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanması esnasında yoğun çalışmalarına rağmen zaman ilgisini esirgemeyen, danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ayhan ORHAN başta olmak üzere, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen Fırat Üniversitesi öğretim üyelerinden Doç.Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ'ne ve Atölye çalışmalarında yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Halil DİKBAŞ'a, teşekkür ederim.

Yüksek Lisans tezim süresince bana sürekli maddi ve manevi destek olan ablam,Prof. Dr. Çiğdem BEKTAŞ'a sonsuz teşekkür ederim.

**Yücel ASMA
ELAĞIĞ – 2014**

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AA 7075 – AA 6061 MALZEME ÇİFTİNİN SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Yücel ASMA

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji Eğitimi Anabilim Dalı

2014, Sayfa: 95

Sürtünme kaynağı katı hal kaynaklarından birisi olup, birleştirilecek parçaların birbirleriyle temasları esnasındaki sürtünmeden doğan ısı esasına dayanır. Üretilen ısı malzemeleri birleştirmede kullanılır. Yöntem, son zamanlarda değişik metal çiftlerini kaynak etmede kullanılmıştır.

Bu çalışmada AA 6061 ve AA 7075 malzemeleri farklı sürtünme kaynak parametreleri ile birleştirildi ve sürtünme kaynaklı bağlantılar elde edildi. Bu bağlantıların mikroyapı, mikrosertlik ve çekme testi incelemeleri yapıldı.

Çalışmada 1. bölümde giriş yapılmıştır. 2. bölümde Al ve alaşımları anlatılmıştır. 3. bölümde Al ve alaşımlarının kaynağından bahsedilmiştir. 4. bölümde sürtünme kaynağı izah edilmiştir. 5. bölüm literatür çalışmalarını vermektedir. 6. ve 7. bölümlerde sırasıyla, deneysel çalışmalar ile sonuç ve tartışmaları verilmektedir.

Bu çalışmanın sonucunda AA 6061 ile AA 7075 malzeme çiftinin farklı sürtünme kaynak parametrelerinde birleştirildiği ve farklı mikroyapı özellikleri gösterdiği anlaşılmıştır. Ayrıca en iyi çekme dayanımı 3 nolu numunede gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme Kaynağı, AA 6061, AA 7075, Mikroyapı.

ABSTRACT

Master Thesis

THE INVESTIGATION OF JOINABILITY A COUPLE OF AA 7075 - AA 6061 MATERIALS WERE JOINED WITH FRICTION WELDING

Yucel ASMA

Firat University

Graduate School of Science

Department of Metallurgy Education

2014, Page: 95

Friction welding is one of the solid states bonding methods and based on heat from friction during contact-rotation of counter parts to be joined. The heat produced is used to join the materials. Recently the method has used to weld different material couples.

In this study, different AA 6061 and AA7075 materials joined with friction welding parameters were obtained and friction welded joining. Microstructural analyses microhardness and tensile strength test of these connections were made.

In the study an introduction is given in chapter 1st Al and its alloys is disclosed in the chapter 2nd. In the 3rd chapter, of Al and its alloys are mentioned. In the 4th chapter, friction welding is explained. 5th chapter gives the literature. In the 6th and 7th chapters, experimental studies and results and discussions are given respectively.

As a result of this study, AA 7075 to AA 6061 couple of materials with different friction welding parameters is joined and it was understood that the appear of different microstructural features. Besides of the more tensile strength occurred sample number of three.

Keywords: Friction Welding, AA 6061, AA 7075, Microstructure.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	
ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
1.GİRİŞ.....	1
2. ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARI.....	3
2.1. Al ve Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	4
2.1.1. Döküm Alüminyum Alaşımları.....	4
2.1.2. Dövme Alüminyum Alaşımları.....	6
2.2. 1xxx Serisi Alaşımlar.....	7
2.3. 2xxx Serisi Alaşımlar.....	8
2.4. 3xxx Serisi Alaşımlar.....	8
2.5. 4xxx Serisi Alaşımlar.....	9
2.6. 5xxx Serisi Alaşımlar.....	9
2.7. 6xxx Serisi Alaşımlar.....	10
2.8. 7xxx Serisi Alaşımlar.....	11
2.9. 8xxx Serisi Alaşımlar.....	12
3. ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARININ KAYNAĞI.....	14
3.1. TIG Kaynağı.....	14
3.2. MIG Kaynağı.....	15
3.3. Elektrik Ark Kaynağı.....	16
3.4. Oksi-Asetilen Kaynağı.....	17
3.5. Plazma Ark Kaynağı.....	20
3.6. Lazer Kaynağı.....	21
3.7. Elektron Işın Kaynağı.....	22
3.8. Difüzyon Kaynağı.....	23
3.9. Direnç Kaynağı.....	24
3.10. Ultrasonik Kaynak.....	24

3.11. Sürtünme Karıştırma Kaynağı.....	24
3.12. Sürtünme Kaynağı.....	26
3.12.1. Sürtünme Kaynağının Mekanizması.....	27
3.12.2. Sürtünme Kaynağının Uygulanması.....	30
3.12.3. Sürtünme Kaynak Değişkenleri.....	31
3.12.3.1. Dönme hızı (Çevresel Hız).....	31
3.12.3.2. Sürtünme Basınç Kuvveti.....	32
3.12.3.3. Sürtünme Süresi.....	32
3.12.3.4. Yığma Süresi.....	33
3.12.3.5. Yığma Basınç Kuvveti.....	33
3.12.3.6. Frenleme.....	35
3.12.4. Sürtünme Kaynağının Kalitesini Etkileyen Faktörler.....	35
3.12.5. Sürtünme Kaynağı Yöntemleri.....	36
3.12.5.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı.....	37
3.12.5.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı.....	39
3.12.6. Sürtünme Kaynağının Avantajları.....	40
3.12.7. Sürtünme Kaynağının Dezavantajları.....	41
4. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	42
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	46
5.1. Çalışmanın Amacı.....	46
5.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	47
5.3. Sürtünme Kaynağı Deneylerinin Yapılışı.....	48
5.4. Metalografik İncelemeler.....	49
5.5. Mikrosertlik Ölçümleri.....	51
5.6. Çekme Deneylerinin Ölçümleri.....	52
6. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME.....	54
6.1. Metalografik İncelemeler.....	54
6.1.1. 1 Nolu Numunenin Metalografik İncelemesi.....	54
6.1.2. 2 Nolu Numunenin Metalografik İncelemesi.....	57
6.1.3. 3 Nolu Numunenin Metalografik İncelemesi.....	59
6.1.4. 4 Nolu Numunenin Metalografik İncelemesi.....	61

6.1.5. 5 Nolu Numunenin Metalografik İncelemesi.....	64
6.2. Deney Numunelerinin Mikrosertlik Sonuçları.....	67
6.3. Deney Numunelerinin Çekme Testi Sonuçları.....	70
7. GENEL SONUÇLAR.....	74
8. KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	83

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 Al – Si Faz Diyagramı.....	5
Şekil 2.2 Döküm Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	5
Şekil 2.3 Dövme Alüminyum Alaşımlarının Adlandırılması.....	6
Şekil 3.1. Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Sonrası Bölgesel Dağılımı.....	14
Şekil 3.2. TIG Kaynağının Şematik Resmi.....	15
Şekil 3.3. MIG Kaynak Donanım Şeması.....	16
Şekil 3.4. Elektrik Ark Kaynağının Şematik Resmi.....	17
Şekil 3.5. Oksi-Asetilen Kaynağının Şematik Resmi.....	19
Şekil 3.6. Plazma Arkının Şematik Görünümü.....	20
Şekil 3.7. Lazer Işınıyla Kaynağın Şematik Resmi.....	22
Şekil 3.8. Difüzyon Kaynak Seti.....	23
Şekil 3.9. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Aşamaları.....	25
Şekil 3.10. Sürtünme Kaynağı Mekanizması.....	27
Şekil 3.11. Yörüngesel Hareketle Sürtünme Kaynağı.....	28
Şekil 3.12. Titreşim Hareketiyle Sürtünme Kaynağı.....	28
Şekil 3.13. Sürtünme Kaynağının İşlem Safhaları.....	29
Şekil 3.14. Sürtünme Kaynağında Yığılma Bölgesi.....	29
Şekil 3.15. Sürtünme Kaynağında Oluşan Yığılma.....	31
Şekil 3.16. Hareket Şekline Göre Sürtünme Kaynak Yöntemleri.....	36
Şekil 3.17. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynak Makinesinin Şematik Yapısı.....	37
Şekil 3.18. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı Kaynak Parametreleri.....	37
Şekil 3.19. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynak Makinesinin Şematik Yapısı.....	39
Şekil 3.20. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağında Kaynak Parametreleri.....	40
Şekil 5.1. Sürtünme Kaynağı Yapılacak Numune.....	48
Şekil 5.2. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynak Makinesi.....	48
Şekil 5.3. Sürtünme Kaynak Makinesinin Şematik Resmi.....	49
Şekil 5.4. Metalografik İnceleme Numunesi.....	50
Şekil 5.5. Nikon MA-200 Optik Mikroskop.....	50
Şekil 5.6. Numunelerinin Şematik İncelenmesi.....	51
Şekil 5.7. Mikrosertlik Değerlerinin Ölçümü.....	51

Şekil 5.8. Durascan-20 Mikrosertlik Ölçüm Cihazı.....	52
Şekil 5.9. Çekme Numunesi.....	52
Şekil 5.10. Shimadzu AG-X Çekme Testi Cihazı.....	53
Şekil 5.11. Jeol-5600 SEM Mikroskobu.....	53
Şekil 6.1. 1 Nolu Numunenin Metalografik İncelenmesi.....	56
Şekil 6.2. 2 Nolu Numunenin Metalografik İncelenmesi.....	58
Şekil 6.3. 3 Nolu Numunenin Metalografik İncelenmesi.....	61
Şekil 6.4. 4 Nolu Numunenin Metalografik İncelenmesi.....	63
Şekil 6.5. 5 Nolu Numunenin Metalografik İncelenmesi.....	66
Şekil 6.6. Numunelerin Bölgesel Ortalama Mikrosertlik Grafiği.....	68
Şekil 6.7. 1 Nolu Numunenin Mikrosertlik Grafiği.....	68
Şekil 6.8. 2 Nolu Numunenin Mikrosertlik Grafiği.....	69
Şekil 6.9. 3 Nolu Numunenin Mikrosertlik Grafiği.....	69
Şekil 6.10. 4 Nolu Numunenin Mikrosertlik Grafiği.....	69
Şekil 6.11. 5 Nolu Numunenin Mikrosertlik Grafiği.....	70
Şekil 6.12. Numunelerin Gerilme-% Uzama Grafiği.....	70
Şekil 6.13. Çekme Testi Sonrası Makro Görüntüler.....	71
Şekil 6.14. 3 Nolu Numunenin AA 7075 Tarafındaki Kırık Yüzey Resmi.....	72
Şekil 6.15. 3 Nolu Numunenin AA 6061 Tarafındaki Kırık Yüzey Resmi.....	72
Şekil 6.16. 4 Nolu Numunenin AA 7075 Tarafındaki Kırık Yüzey Resmi.....	73
Şekil 6.17. 4 Nolu Numunenin AA 6061 Tarafındaki Kırık Yüzey Resmi.....	73

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Saf Alüminyumun Teknik Özellikleri.....	3
Tablo 2.2. Dövme Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	7
Tablo 2.3. AA1050 Alaşımının Kimyasal Bileşimi.....	7
Tablo 2.4. AA1050 Alaşımının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	8
Tablo 2.5. Farklı Al-Cu Alaşımlarının Kimyasal Bileşimleri.....	8
Tablo 2.6. Al-Mn Alaşımlarının Kimyasal Bileşimleri.....	9
Tablo 2.7. Bazı 5xxx serisi Alaşımlarının Kimyasal Bileşimleri.....	10
Tablo 2.8. Bazı 6xxx Serisi Alaşımların Kimyasal Bileşimleri.....	11
Tablo 2.9. 7xxx Serisi Alaşımların Kimyasal Bileşimleri.....	12
Tablo 2.10. Bazı 8xxx Serisi Alaşımların Kimyasal Bileşimleri.....	13
Tablo 3.1. Malzeme Cinsine Göre Seçilecek Parametre Değerleri.....	35
Tablo 5.1. AA 6061 Alaşımın Kimyasal Analizi.....	47
Tablo 5.2. AA 7075 Alaşımın Kimyasal Analizi.....	47
Tablo 5.3. Deney Malzemelerin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri.....	47
Tablo 5.4. Sürtünme Kaynak Parametreleri.....	49
Tablo 6.1. Numunelerinin Boyca Kısılma Miktarı.....	54
Tablo 6.2. 1 Nolu Numunenin EDS Analizleri.....	56
Tablo 6.3. 2 Nolu Numunenin EDS Analizleri.....	59
Tablo 6.4. 3 Nolu Numunenin EDS Analizleri.....	61
Tablo 6.5. 4 Nolu Numunenin EDS Analizleri.....	64
Tablo 6.6. 5 Nolu Numunenin EDS Analizleri.....	67
Tablo 6.7. Deney Numunelerin Bölgesel Ortalama Mikrosertlik Değerleri.....	68

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiye uygun olarak malzeme bilimi de gün geçtikçe gelişim göstermiştir. Bazen doğada mevcut bulunan hammaddeler, ihtiyaca cevap verememektedir. Bu nedenle insanoğlu yeni malzeme arayışlarına girmiştir.

Günümüzde alüminyum ve alüminyum alaşımlı malzemelerin kaynağı konusunda yapılan araştırma ve çalışmaların büyük bir çoğunluğunda, özellikle sürtünme ve sürtünme karıştırma kaynak yöntemlerinin önemli avantajlar sağladığı görülmektedir.

Sürtünme kaynağı modern birleştirme yöntemlerinden birisidir. Sürtünme kuvvetleri etkisi ile açığa çıkan ısı enerjisinden malzemelerin birleştirilmesini sağlar. Bu kaynak yönteminde; kaynak için gerekli ısı kaynak edilecek iki iş parçasının ara yüzeylerinin sürtünmesi ile elde edilir.

Sürtünme enerjisiyle oluşan ısıdan faydalanarak kaynak yapma fikri eskilere dayanmaktadır. 1900'li yılların başından itibaren yapılan sonunda sürtünme kaynağına ait ilk patent 1929 yılında W. H. Richter tarafından İngiltere'de alınmıştır. Ancak sürtünme kaynağı ile ilgili gerçek bilimsel çalışmalar 1956 yılından sonra başlamıştır. Bu yıllardan itibaren çeşitli ülkelerde birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır. Rusya'da Will ve arkadaşlar sürtünme kaynağı yöntemini önce torna makinesinde uygulanmış ve çelik çubuklar da yüksek kalitede bir birleşme sağlamışlardır. Bu çalışmalar başarı ile sonuçlandıktan sonra 1961 yılından itibaren Amerikan yapımı kaynak makinesinin de piyasaya sürülmesiyle çalışmalar hız kazanmıştır (Orhan, 2003).

Kaynak teknolojisindeki gelişmeler neticesinde daha önce plastik malzemelere uygulanan sürtünme kaynak metodu, bugün diğer kaynak metotları ile kaynatılması zor olan, özellikle farklı bileşim ve türdeki metallerin kaynağında son derece iyi sonuçlar verebilmektedir. Bu yöntemle yapılan bir kaynak işleminde erime bölgesi çok dar ve sarf edilen enerji diğer yöntemlere göre azdır. Koruyucu gaz ve ilave metal kullanımına ihtiyaç duyulmaması ve zaman tasarrufu gibi nedenlerle maliyeti düşüren etkiler sağlanmaktadır. Ayrıca iş kazalarına yol açabilecek ark oluşumu, radyasyon, sağlığa zararlı gaz ve duman çıkışı ya da insan gözüne zararlı lazer ışını gibi olumsuz durumlar sürtünme kaynak yönteminde mevcut olmadığı için temiz ve çevre dostu bir kaynak yöntemidir. Söz konusu kaynak yönteminin ticari olarak da kullanım alanı her geçen gün genişlemekte ve gelişmektedir.

Genellikle yaslandırma sertleştirmesi yapılmış olan alüminyum alaşımlarının ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde, aşırı derecede çatlak ve gözenek oluşumu gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Alüminyum alaşımlarının katılaşma sıcaklık aralıklarının geniş olması ve ısıl genleşme katsayılarının yüksek olması, çatlak oluşumunun en önemli nedenleridir (Oğuz, 1990; am, 2002).

Elektrik ark kaynağındaki yüksek ısı girdisi, alüminyum alaşımlarında kaynak dikişinde çatlak oluşumuna neden olan diğeri bir faktördür. Ayrıca yüksek ısı girdisi, özellikle yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarında, ısıdan etkilenen bölgede (ITAB) tane sınırlarında düşük ergime sıcaklıklı fazların oluşumuna ve dolayısıyla bu bölgede tane sınırlarında katılaşma esnasında çatlamaya neden olabilmektedir. Diğeri yandan alüminyumun, sıvı halde hidrojen çözünürlüğünün katı haldekinden çok daha yüksek olması da boşluk oluşumuna yol açmaktadır. Vakum ortamında yapılan elektron kaynağı yöntemi gözeneklilik açısından en avantajlı ergitme kaynak yöntemidir. Fakat elektron kaynağı, vakum ortamında yapıldığı için, düşük buharlaşma sıcaklığına sahip alaşım elementleri içeren alüminyum alaşımlarında, kaynak dikişinde alaşım elementi kaybı, dolayısıyla mukavemet düşüşü söz konusu olabilmektedir (am, 2002; Sarsılmaz, 2008).

Bu deneysel çalışmada, geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirmesi zor ve problemli olan ve havacılık, uzay ve savunma sanayisi gibi yaygın kullanım alanları olan farklı özelliklere sahip AA6061 ile AA7075 alaşımları, modern ve alternatif bir yöntem olan sürtünme kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerde, dönme hızı (devir sayısı), değışken parametre olarak kullanılmış, farklı mekanik ve mikroyapı özelliklerine sahip birleştirmeler elde edilmiştir. Elde edilen sürtünme kaynaklı bağlantıların ara kesitinden alınan mikroyapılar, optik mikroskobu ile incelenmiştir. Sürtünme kaynağı ile birleştirilen AA6061 ve AA7075'in, mekanik özelliklerini belirlemek için kaynaklı numunelere; mikrosertlik ve çekme testleri uygulanmıştır. Çekme deneyleri sonucunda elde edilen kırık yüzeyler, taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenerek, kırılma tipi ve kırık yüzey karakteristikleri incelenmiştir. Deneysel alışma sonucunda elde edilen veri ve bulgular, ilgili literatür ışığında değıerlendirilerek sonuçlar yorumlanmıştır. Çalışmanın bu konuyla ilgili ileride yapılacak diğeri araştırmalara yardımcı olabileceğı düşünölmektedir.

2. ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARI

Alüminyum ve Al alaşımları, demir esaslı alaşımlardan sonra, kullanımı en yaygın olan endüstriyel malzemelerdir. Alüminyum ve alaşımlarının geniş kullanım alanlarına sahip olması ve tercih edilmesinin birçok önemli nedenleri vardır. Bunlar; genel olarak korozyon dayanımları yüksektir, hafiftirler (özellik ağırlığı: 2,7 g/cm³), elektrik iletkenliği yüksektir, yaşlandırma sertleştirmesine uygundur, kolay işlenebilirler, alüminyum ve alaşımlarının “mukavemet/yoğunluk” değerleri yüksektir, dekoratif amaçlı yüzey işlenebilirliği bu alaşımların kullanım alanını oldukça geniş yer tutmaktadır.

Tablo 2.1’de verilen özellikleriyle saf alüminyum, teknik malzeme olarak özellikle korozyon dayanımı ve yüzey kalitesi yüksek olması gereken parçaların üretiminde öncelikle kullanılır (oto farları ve diğer yansıtıcılar, kimya ve gıda endüstrisinde kullanılan çeşitli kutular, kaplar ve ince yapraklar (folyo), elektronik sanayinde özel iletkenler... v.b.) gibi geniş kullanım alanlarına sahiptir.

Tablo 2.1 Saf Alüminyumun Teknik Özellikleri

Özellik ağırlık (g/cm ³)	Ergime sıcaklığı (°C)	Isıl genleşme katsayısı (25°C’de)	Elektrik direnci (nΩ·m)	Elastiklik modülü (kN/mm ²)	Çekme mukavemeti (N/mm ²)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Kopma uzaması (%)	Kopma büzülmesi (%)	Sertlik (HB)
2,7	660	23,1	26,50	65-70	70-140	20-30	30-50	80-95	5-15

Alüminyumun elektrik ve ısı iletkenliği, bakıra göre daha azdır. Fakat spesifik elektrik iletkenliği (elektrik iletkenliği/yoğunluk) ve spesifik ısı iletkenliği (ısı iletkenliği/yoğunluk) değerleri karşılaştırıldığında bakırdan daha iyi olduğu görülür. Bundan dolayı, hava elektrik hatlarında alüminyum alaşımları kullanılır. Ayrıca alüminyumun fiyatı da bakıra göre daha düşüktür. Korozi ortamda alüminyumun yüzeyi bir oksit tabakası ile kaplanarak, alüminyumun korozyona dayanıklılığını sağlar. Bu özelliğinden dolayı alüminyum pek çok korozi ortamda kullanılabilir. Alüminyum alaşımlarının içindeki diğer elementler alüminyum ile galvanik pil oluşturmaya uygun olduklarından dolayı, korozyon açısından alüminyumun mümkün olduğu kadar saf olarak kullanılması tavsiye edilir. Fakat mekanik özelliklerindeki dayanım düşüklüğü (zayıflık) nedeniyle uygulamalarda saf Al kullanımı yaygın değildir. Alüminyumun, sıcak ve soğuk

şekillendirilebilme kabiliyeti iyidir. Ekstrüzyon yöntemiyle çok karışık geometrik yapıya sahip alüminyum profiller üretilebilir. Kalınlığı bir kaç mikrona ulaşılabilen folyolar üretilerek paketlenmede işlemlerinde kullanılabilir. Gıda endüstrisinde kullanılan paketlenme folyoları saf alüminyumdan yapılır. Alüminyum, elektrolitik olarak oksitlendirilerek değişik renklerde üretilebilir. Eloksoal denilen bu işlem ile hem korozyona dayanıklı, hem de değişik renklerde mimaride kullanılan profiller üretilerek pencere, kapı vb. yapımında kullanılabilir. Bazı durumlarda sertliği ve dayanımı yüksek alüminyum alaşımlarının üstü saf Al ile kaplanarak korozyon özellikleri iyileştirilebilmektedir.

2.1. Al ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri alaşım elementlerine ve mikroyapısına bağlı olarak değişir. Alüminyuma katılan en önemli alaşım elementleri bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur. Alüminyum alaşımları üretim yöntemine bağlı olarak dövme ve döküm alaşımları diye iki ana gruba ayrılır.

Bu iki grup içerisindeki alaşımlar ısıtılma işlemi uygulanabilen ve ısıtılma işlemi uygulanamayan alaşımlar şeklinde alt gruplarda incelenebilirler. Isıtılma işlemi uygulanabilen alaşımlara ‘yaşlanma sertleşmesi’ ısıtılma işlemi uygulanır. Isıtılma işlemi uygulanamayan alaşımlara ise katı eriyik, deformasyon ve dağılım sertleşmesi yöntemleri uygulanarak mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir.

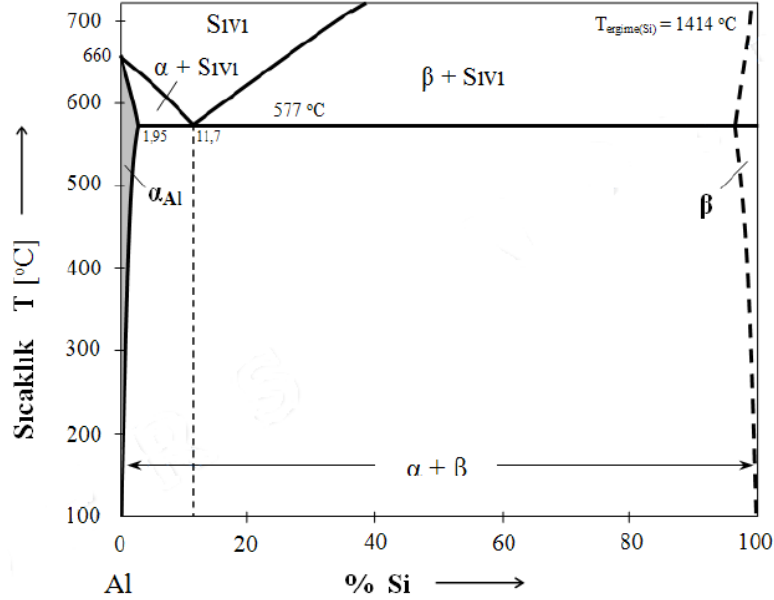
2.1.1. Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm alüminyum alaşımlarından pek çoğu ötektik reaksiyona neden olan, iyi akıcılık ve dökülebilirlik sağlayan yeterince silisyum içerirler (%5-12 Si). Akışkanlık, sıvı metalin kalıp içerisinde iyi şekilde vaktinden önce katılaşmadan akabilmesidir. Dökülebilirlik, iyi bir dökümün kolay bir şekilde bir alaşımdan elde edilmesidir.

Alüminyum silisyum alaşımlarının özellikleri, α alüminyum matrisin katı eriyik mukavemetlenmesi, β fazının dağılım mukavemetlenmesi, ilk tane boyutu, şekli ve aynı zamanda ötektik oluşumu tayin eden katılaşmayla kontrol edilir (Şekil 2.1).

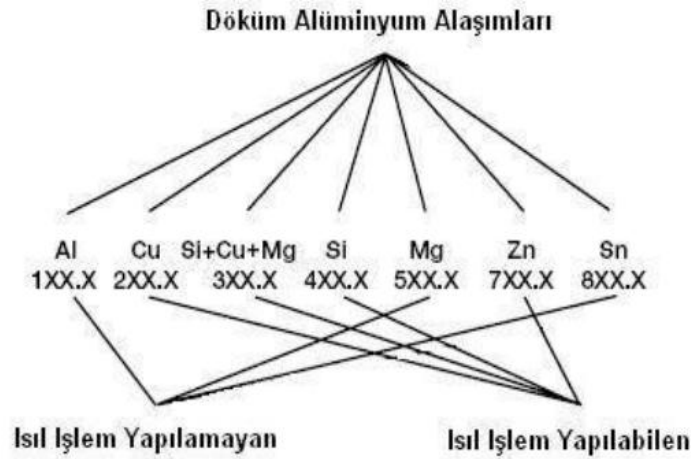
Hızlı soğumanın elde edildiği metal kalıpta yapılan dökümlerde daha ince bir tane büyüklüğü ve ötektik yapı elde edildiğinden daha yüksek mukavemet elde edilebilmektedir. Belirli alaşımlarda mikro yapıyı ve bu nedenle de dağılım mukavemetlenmesi düzeyini iyileştirmek amacıyla bor ve titanyum ilaveleri ile tane inceltme, ötektik yapıyı değiştirmek için sodyum veya stronsiyum kullanarak

modifikasyon veya birincil silisyumu incelterek mukavemetlenme sağlamak için fosfor ilavesi yapılır. Döküm alüminyum alaşımlarında %0,3-1,0 magnezyum ilavesi çökelti sertleşmesine bağlı dayanım artışı sağlar. Bakır, bazı döküm alüminyum alaşımlarında %1-4 oranlarda bulunur. Özellikle yüksek sıcaklıklarda dayanım artışı sağlar.



Şekil 2.1 Al – Si Faz Diyagramı

Döküm alüminyum alaşımlarının kendi içinde sınıflandırılması Şekil 2.2’de görüldüğü gibi; ısıtılabilir döküm alüminyum alaşımları ve ısıtılabilir yapılamayan döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki sınıfta toplanır. Döküm alüminyum alaşımlarının gruplandırılması ise şu şekilde olur;



Şekil 2.2 Döküm Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

1XXX: Saf alüminyum.

2XXX: Esas alaşım elementi bakırdır.

3XXX: Esas alaşım elementi silisyumdur. Bakır ve magnezyum gibi başka alaşım elementleri de bulunabilir. Sanayide kullanılan döküm alaşımlarının % 90'ı bu seridir.

4XXX: Esas alaşım elementi silisyumdur.

5XXX: Esas alaşım elementi magnezyumdur.

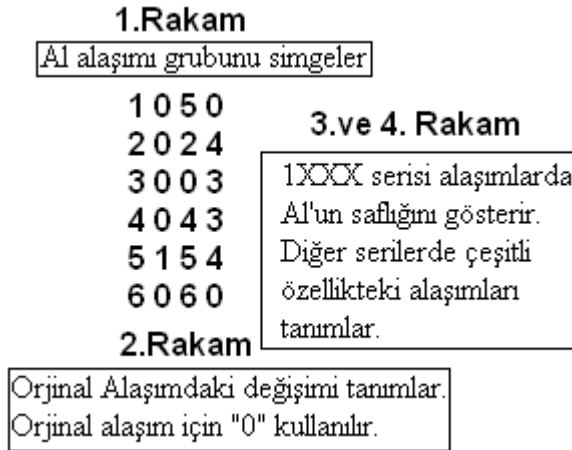
6XXX: Bu seri numarası kullanılmamaktadır.

7XXX: Esas alaşım elementi çinkodur.

8XXX: Esas alaşım elementi kalaydır.

2.1.2. Dövme Alüminyum Alaşımları

Bu alaşımlar, isimlendirilmesinden de anlaşılacağı gibi; dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi plastik şekil verme yöntemleriyle üretilmektedirler. Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon kabiliyeti iyi olup kolayca şekillendirilebilirler. Alüminyum dövme ve döküm alaşımlarının büyük bir kısmına ısıtma işlemi uygulanabilmektedir. Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Dövme Alüminyum Alaşımlarının Adlandırılması

Dört rakamlı sayısal simgenin ilk rakamı, hangi temel alaşım elementini içeren alüminyum alaşımı olduğunu belirtir. 1XXX dizisi saf alüminyum (%99.00) gösterir. Son iki rakam % 99 değerinin noktadan sonraki rakamlarını belirtir. Soldan ikinci rakam ise, özel olarak denetlenen katkı elementlerin sayısını belirtir ve 1'den 9'a kadar değişebilir. 2XXX'den 8XXX'e kadar olan alüminyum alaşımlarında ilk rakam alaşım türünü, ikinci

rakam değişimleri simgeler, son iki rakamın özel bir anlamı yoktur. Alaşımları dizideki diğer alaşımlardan ayıran sıra numarası gibi kullanılır (Oğuz, 1990).

Tablo 2.2’de çeşitli alüminyum serileri, ısıt işlemler durumları ve oluşturdıkları alaşımlar grupları verilmiştir. Genellikle dövme alüminyum alaşımların sınıflandırılması alaşımlar elementlerinin katkılarına göre yapılırken, aynı zamanda ısıt işlemler uygulanabilirliği (yaşlandırma) açısından da bu alaşımlar ele alınmaktadır.

Tablo 2.2. Dövme Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması (Öksüz, 1996)

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

2.2. 1xxx Serisi Alaşımlar

1xxx grubu alüminyum alaşımları saf ya da çok az alaşımlar elemanı bulunduran malzemeler olup; levha, folyo ve profil haline kolayca getirilebilirler (Yılmaz, 2002). Bu gruptaki alaşımlar yaşlanma sertleşmesi göstermezler ve bunlara sadece deformasyon sertleşmesi yolu ile kısmen mukavemet kazandırılabilir (Oğuz, 1990). Derin çekme işlemlerine de uygun olan bu alaşımların iyi korozyon özellikleri ve yüksek ısı ve elektrik dirençleri vardır. Şekillendirme ve işlenebilirlik kabiliyeti yüksek ama mukavemetleri düşüktür. Bu alaşımlar mimari uygulamalarda, ısı eşanjörlerinde, elektrik iletim levhalarında ve ambalajlama işlemlerinde kullanılmaktadır (Şaldır, 2003).

Tablo 2.3 ve 2.4’ de endüstride çok sık kullanım alanı olan AA1050 alaşımlarının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.3. AA1050 Alaşımlarının Kimyasal Bileşimi (<http://aluminium.matter.org.uk/>)

Alaşımlar Tipi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
AA1050	0.25	0.4	0.05	0.05	0.05	-	0.17	0.005	Kalan

Tablo 2.4. AA1050 Alaşımının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (<http://aluminium.matter.org.uk/>)

Alaşım Tipi	E Modülü (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)	Ergime Noktası (°C)	Elk.İlet. (%IACS)	Yoğunluğu (kg/m ³)
AA1050	69000	58	40	15	660	63.8	2.70

2.3. 2xxx Serisi Alaşımlar

2xxx serisi Al-Cu alaşımlarının temel alaşım elementi bakırdır. 2024 alaşımı bu gruba ait alaşımlar arasında mekanik mukavemeti en yüksek olandır. Bileşiminde %4.5 Cu yanında %1.5 Mg içerir. Bu alaşımın kullanım alanları uçak ve uzay yapılarıdır. Başlıca otomotiv, vagon, uçak, mühimmat sanayisinde, dişli ve bağlantı elemanlarında, voltaj yükselticilerinde, süspansiyon parçalarında, perçinlerde, vida mekanizmalarında yüksek dayanım ve hafifliğin gerekli olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Al-Cu alaşımları 490 °C'den hızla soğutularak çökeltme sertleşmesi işlemine tabi tutulurlar. Daha sonra oda sıcaklığında doğal yaşlanmaya maruz bırakılabildikleri gibi, mekanik mukavemetin daha da artırılması için 120 °C’de tavlanoarak yapay yaşlanmaya uğratılırlar (Öksüz, 1996).

Yaşlanma ısı işlemi sonunda bu alaşımlarda, alaşımsız çelik mukavemetinin üzerinde bir mukavemet değeri elde edilmektedir. Sertleştirilen alaşımın çekme dayanımıyla beraber islenme kabiliyeti de artar, fakat sünekliği azalır. Yaşlanan malzemelerde elektrik iletkenliği de azalmaktadır (Saldır, 2003). Bu malzemelerin bakır ilavesi nedeniyle korozyon direnci azdır. Tablo2.5’de ise, farklı Al-Cu alaşımlarının kimyasal bileşimleri verilmiştir (Öksüz, 1996).

Tablo 2.5. Farklı Al-Cu Alaşımlarının Kimyasal Bileşimleri

Alaşım Tipi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti+Zr	Al
AA2014	0.5-0.9	0.5	3.9-5.0	0.4-1.2	0.2-0.8	0.1	0.2	0.2	0.2	Kalan
AA2024	0.5	0.5	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.1	0.05	0.2	0.2	Kalan
AA2031	0.55-1.25	0.6-1.2	1.8-2.5	0.2	0.65-1.2	-	0.6-1.4	0.2	0.2	Kalan

2.4. 3xxx Serisi Alaşımlar

Bu serinin ana alaşım elementi manganezdır. Genel olarak bir alüminyum-manganez alaşımı %1.80 oranında manganez içerir. Sıcaklık düşüşüyle beraber manganezin çözünürlüğü de azalır. Isıl işlemle yaşlandırma sertleşmesi bu alaşım için mümkündür. Manganın etkisi alüminyumun çekme mukavemetini artırmaktadır (Şaldır, 2003).

Bu alaşım yüksek süneklik ve çok iyi korozyon özelliklerine sahiptir. 1xxx serisi alaşımlardan %20 daha fazla mukavemete sahiptirler. Bu alaşımlar, saf alüminyum ile yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları arasındaki boşluğu doldururlar. Zira %1.5 mertebesindeki bir mangan ilavesi, mukavemetin önemli miktarda (100 ila 170 N/mm²) artmasına, fakat sünekliğin ise az oranda azalmasına neden olur. Mangan çözünürlüğünün az olması bu alaşımların üretim yelpazesini kısıtlar. Bu seri grubunda en çok 3003 alaşımı (Tablo 2.6) retilmekte ve yağ tankları, gıda kutuları ve gaz boruları gibi korozyon direnci aranan alanlarda kullanılmaktadır (ksz, 1996).

Tablo 2.6. Al-Mn Alaşımlarının Kimyasal Bileşimleri

Alaşım Tipi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti+Zr	Al
AA3003	0.05	0.7	0.2	1.2	-	-	-	0.10	-	Kalan

2.5. 4xxx Serisi Alaşımlar

Bu serinin temel alaşım elemanı silisyumdur. Al-Si alaşımlarının en önemli özelliği düşük silisyum katkılarında ergime sıcaklığının düşük olmasıdır. Bu nedenle kaynak çubukları ve sert lehim levhalar için özellikle uygundurlar. Lehim teli, mimari uygulamalar ve radyatör dilimleri başlıca kullanım yerleridir (Sarsılmaz, 2008).

Alüminyumda silisyumun maksimum çözünme sınırı %1.65'dir. Ancak 4xxx serisi alaşımlarda %2,5'e kadar silisyumlu alaşım yapılır. Artan silisyum oranı ergime sıcaklık aralığını azaltır ve dklebilme yeteneğini arttırır. Yüksek silisyumlu alaşımların düşük termal genleşme katsayısı, yüksek korozyon direnci ve yüksek aşınma direnci vardır. Bu nedenle dövme motor pistonları 4032 alaşımlarından yapılır (şaldır, 2003).

Diğer taraftan bu alaşımlar ısııl işlem ile sertleştirmeye elverişsizdirler (ksz, 1996). nemli miktarlarda silisyum içeren alaşımlara anodik oksidasyon uygulandığında koyu gri renk alırlar, bu yüzden mimari uygulamalarda dekoratif amaçlı olarak kullanılırlar (Yılmaz, 2002).

2.6. 5xxx Serisi Alaşımlar

Bu alaşımlar magnezyumu ana katkı eleman olarak içerirler ve mekanik mukavemetleri de orta düzeyden yükseğe kadar geliştirilebilen malzemelerdir. Isıl işlemle sertleştirilebilme yetenekleri sınırlıdır (ksz, 1996).

Katı fazda magnezyum çözünürlüğü azalan sıcaklık ile hızla düşer. Ancak %5'den az magnezyum ve yeteri kadar silisyumu olmayan alaşımlar yaşlandırma ile sertleştirilemez. Genellikle soğuk şekil verme ile sertleştirilebilir alaşımlar elde edilir. 5xxx serisi alaşımlarda magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artarken süneklik azalır (Şaldır, 2003).

Yüksek çekme dayanımı, sertlik, aşınma direnci, deniz atmosferine karşı iyi korozyon direnci ve iyi kaynak edilebilirliği önemli özellikleridir. Soğuk şekil değişimine elverişli değildir (Yılmaz, 2002).

Mekanik mukavemetin artırılmasında ana etken olan Mg %0.8-4.5 arasında değişen miktarlarda kullanılır (Tablo 2.7). Alüminyum-magnezyum alaşımlarında, % magnezyum miktarı ne kadar fazla kullanılırsa çekme mukavemeti de o oranda yükselir. Bu alaşımlar çok iyi bir sünekliğe ve tam bir korozyon direncine sahip olduğundan deniz koşullarında, özellikle gemi ve bot yapı malzemeleri üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Oğuz, 1990).

Alüminyum-magnezyum alaşımları içinde 4XXX serisi sanayide çok talep görmektedirler. Bu serinin zengin alaşımlarında ötektik sıcaklık 450°C (840°F) ve Mg konsantrasyonu %14.9'dur (Büyükarıslan, 2006).

Tablo 2.7. Bazı 5xxx serisi Alaşımlarının Kimyasal Bileşimleri (Öksüz, 1996)

Alaşım Tipi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti+Zr	Al
AA5049	0.4	0.5	0.1	0.5-1.1	1.6-2.5	0.3	-	0.2	0.1	Kalan
AA5052	0.25	0.4	0.1	0.1	2.2-2.8	0.15-0.35	-	0.1	-	Kalan
AA5154	0.5	0.5	0.1	0.1-0.3	3.1-3.9	0.25	0.25	0.2	0.2	Kalan
AA5083	0.3	0.4	0.1	0.4-1	4.0-4.9	0.05	-	0.25	0.15	Kalan

2.7. 6xxx Serisi Alaşımlar

Kimyasal içerikleri Tablo 2.8'de verilen 6XXX serisine alaşımlar, silisyum ve magnezyumun birlikte oluşturdukları seriyi temsil etmektedir. Magnezyum ve silisyum birleşerek Mg_2Si bileşiğini oluşturur. Bu alaşımda sertleşme, Mg_2Si metaller arası bileşiğinin sıcaklık ile değişen çözünürlüğünden ileri gelmektedir. Bu bileşik alüminyum ile basit bir ötektik sistemi oluşturur (Şaldır, 2003).

6xxx serisi alaşımlar çözeltiye alınır ve suni olarak yaşlandırılırsa alüminyum matrisi içinde Mg_2Si partikülleri çöker. Böylece orta seviyede mukavemet ve sertlik elde

edilir. Fakat elde edilen mukavemet 2xxx ve 7xxx serisinde elde edilen değerlerden daha az olur (Öksüz, 1996).

Bu grupta en iyi ısıl işlem uygulanabilen ve yaygın olan alaşım 6061'dir. Bu alaşımların şekillendirme kabiliyeti, kaynak kabiliyeti, talaş kaldırma kabiliyeti ve korozyon direnci diğer yaşlandırılan alaşımlardan daha fazladır. Bu alaşımlar kararlı olmaları ve çözünme ısıl işlemi koşullarında çok iyi şekilenebilmeleri ile karakterize edilirler. Şekillendirme, su verme işleminden sonra malzeme üzerinde yürütülebilir ve gerekli mukavemet, malzemeyi daha sonra 160-180 °C'de çökelme ısıl işlemine tabii tutmak suretiyle temin edilir (Büyükarıslan, 2006).

Kimyasal bileşimlerine bağlı olarak, iyi mekanik özelliklerinden dolayı uçak ve uzay konstrüksiyonlarda ve donanımlarında, taşıma araçlarında, demiryolu taşıtlarında vb. sanayi sektörünün çeşitli alanlarında kullanılan bu alaşımlar, ayrıca ısıl işlemle sertleştirilen alaşımlar arasında soğuk şekillendirmeye elverişli alaşım grubudurlar (Öksüz, 1996).

Tablo 2.8. Bazı 6xxx Serisi Alaşımların Kimyasal Bileşimleri (<http://aluminium.matter.org.uk/>)

Alaşım Tipi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
AA 6061	0.4-0.8	0.7	0.15-0.4	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	-	0.25	0.15	Kalan
AA 6063	0.3-0.7	0.6	0.1	0.5	0.4-0.9	-	0.2	0.1	0.2	Kalan
AA 6082	0.7-1.3	0.5	0.1	0.4-0.1	0.5-1.2	0.25	0.1	0.2	0.2	Kalan
AA 6070	1.3	-	0.28	0.7	0.8	-	-	-	-	Kalan

2.8. 7xxx Serisi Alaşımlar

Bu grupta ana alaşım elemanı olan çinko küçük miktarda magnezyumla kullanıldığında çok yüksek mukavemetli ısıl işlem uygulanabilen alaşımlar meydana gelmektedir. Ana katkı maddesi olan çinko %5 civarında kullanılır ve alaşımlara çok yüksek çekme dayanımı kazandırır. Çinkonun ana alaşım elemanı olarak ve bir miktar Mg ile birlikte kullanılması malzemenin ısıl işlemle sertleştirilmesini sağlar. Bu alaşımlar tüm alüminyum alaşımları içinde en mukavemetli olanlarıdır ve II. dünya savaşı sırasında hava kuvvetlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Uçak gövdelerinin yapımında kullanılan 7075 çok yüksek mukavemet özelliği taşır. Al-Zn-Mg serisi alaşımlar orta mukavemetli ve çökelmeyle sertleştirilebilir konstrüksiyon malzemesidir. Al-Cu-Mg alaşımlarına nazaran daha iyi korozyon direnci gösterirler, fakat korozyon dirençleri Al-Mg ve Al-Mg-Si alaşımlarına nazaran daha azdır (Öksüz, 1996).

Bu alaşımlarda temel sertleştirici faz β ($MgZn_2$) fazıdır. İlave olarak $CuAl_2$ ve $CuMgAl_2$ bileşikleri de çökebilir (Oysu, 1996). Ayrıca tavan vinçleri, kamyon kasaları, vidalı makine parçaları, uçak, roket ve savunma sanayi parçaları başlıca kullanım yerleridir (Coşkun, 2001).

Çinkonun alaşımda kullanılmasıyla beraber malzemenin dökülebilirlik kabiliyeti düşmektedir. Çinkolu alaşımlar sıcak çatlama ve soğuma çökmesi meydana getirirler. %8'den yüksek alaşımlar gerilmeli korozyon çatlama göstermesine karşılık, diğer alaşım elementleri ile birlikte bulunması halinde dayanımı çok artmaktadır. Bu alaşımların imalatı zordur ve şekillendirme işlemi, ergitme ısıl işleminden hemen sonra yapılmalıdır (Sarsılmaz, 2008). Tablo 2.9'da bazı 7xxx serisi alaşımların kimyasal içerikleri verilmektedir.

Tablo 2.9. 7xxx Serisi Alaşımların Kimyasal Bileşimleri (<http://aluminium.matter.org.uk/>).

Alaşım Tipi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Zr	Al
AA 7010	0.12	0.15	1.5-2.0	0.10	2.1-2.6	0.05	0.05	5.7-6.7	0.11-0.17	Kalan
AA 7178	-	-	2.0	-	2.7	0.23	-	6.8	-	Kalan
AA 7049	-	-	1.6	-	2.4	0.16	-	7.7	-	Kalan
AA 7075	0.4	0.5	1.2-2.0	0.3	2.1-2.9	0.18	-	5.1-6.1	0.15	Kalan

2.9. 8xxx Serisi Alaşımlar

Son yıllarda özellikle uzay ve uçak sanayisi için düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli malzemeye duyulan talep, Al-Li alaşımlarını ön plana çıkarmıştır. Al-Li alaşımları düşük yoğunluğun yanında, yüksek elastisite modülü, yüksek yorulma direnci, düşük ve yüksek sıcaklıklarda tokluk özellikleri ile dikkat çekmektedir (Tülbentçi, 1990).

Lityumun alüminyum alaşımlarına ilavesinin başlıca nedeni, yoğunluğun azalması ve buna karşılık elastiklik modülündeki artışın sağlanmasıdır. Alüminyuma her %1 Li ilavesinde alaşımların yoğunluğu %3 azalırken elastiklik modülünü de %6 oranında artırmaktadır. Geleneksel olarak %(1.0-2.0) arasında lityum içeren alaşımlar ısıl işleme tabi tutulabilir. Hızlı katılaşma yöntemi ile %4 kadar Li ilave edilebilir, bu da yüksek mukavemete ve daha düşük ağırlığa neden olabilir (Öksüz, 1996).

Lityum içeren alüminyum alaşımlarının diğer geleneksel alüminyum alaşımlarına göre 3-4 kat daha yüksek olan üretim maliyetleri nedeniyle; aktif kullanım açısından bu alaşımlar, hem ekonomik hem de teknolojik açıdan geliştirilmeye çalışılmaktadır

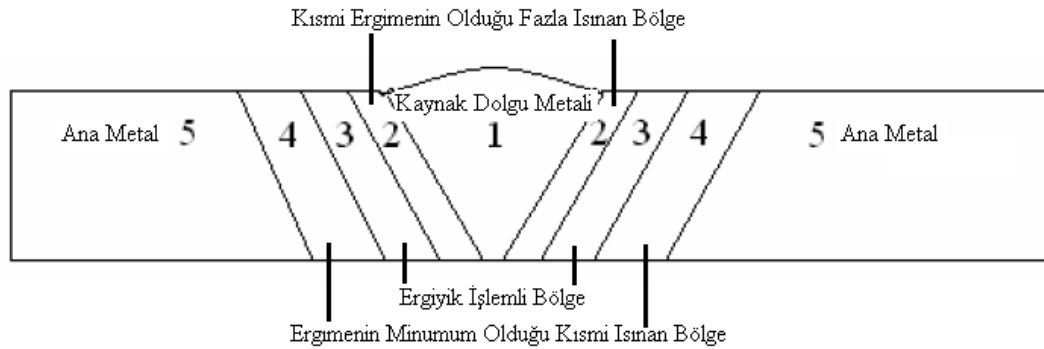
(Sarsılmaz, 2008). Bazı 8xxx serisi alaşımların kimyasal bileşimleri Tablo 2.10’da verilmiştir (Öksüz, 1996).

Tablo 2.10. Bazı 8xxx Serisi Alaşımların Kimyasal Bileşimleri

Alaşım Tipi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Al
AA 8001	-	0.6	-	-	-	-	1.1	-	Kalan
AA 8081	-	-	1.0	-	-	-	-	-	Kalan
AA 8280	1.5	-	1.0	-	-	-	0.45	-	Kalan

3. ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARININ KAYNAĞI

Dövme alüminyum alaşımlarından ısıtılma işlemi yapılamayan 1xxx, 3xxx ve 5xxx serileri, gaz korumalı ark işlemleri ile en kolay kaynatılabilen grupta yer almaktadırlar. Isıl işlem yapılabilen 2xxx ve 4xxx serisi alaşımlar özel ark kaynak teknikleri ile kaynatılabilirler. Yüksek mukavemetli ısıtılma işlemi uygulanabilen 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının 7075 ve 7178 serilerindeki kaynak işlemi problem oluşturmaktadır. Bu alaşımlarda, ısının tesiri altındaki bölgedeki (ITAB) sertlik, kaynatılan ana metale göre daha fazladır ve kaynak edildiklerinde, sıcak çatlama meydana gelme olasılığı yüksektir. Bu nedenle kaynakları tavsiye edilmez. Buna karşılık 7005 ve 7039 alaşımları kaynak için özel olarak geliştirilmişlerdir ve kaynak kabiliyetleri iyidir. Kaynaklı halde ısıtılma işlemi kabul eden orta ve yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının birleştirme yeteneğinin azalmasının esas nedeni, ana metalden başka Şekil 3.1’den de görüleceği üzere yapısal farklılıklar sergileyen 4 farklı bölgenin mevcut olması olarak tanımlanabilir. Bölgesel farklılıkların etkilerini yok etmek zordur. Kaynak işlemi sırasındaki ısı girdisi, dövme sertleşmesinin etkilerini ve uygulanan ısıtılma işlem özelliklerini kısmen veya tamamen yok eder. Bu durumda ITAB’da akma sınırı düşer. Özellikle 6xxx ve 7xxx serileri alaşımları kaynak edildiklerinde, 1. ve 3. bölgelerde çatlama meydana gelebilir. 2xxx serileri bu tür etkiye daha yatkın olup bu nedenle bunlarda normal olarak ergitme kaynağı önerilmez (Oğuz, 1990; Sarsılmaz, 2008).



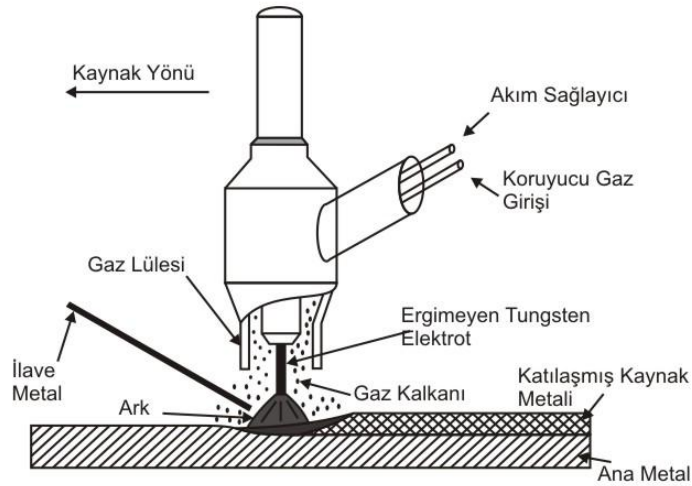
Şekil 3.1. Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Sonrası Bölgesel Dağılımı

3.1. TIG Kaynağı

Günümüzde TIG kaynak yöntemi, alüminyum ve alaşımlarının kaynağında geniş bir uygulama alanına sahiptir. TIG kaynak yöntemi; ergitme esaslı olup buna karşın dolgu

oranı düşük bir kaynak yöntemidir. Ancak ısı girdisi yerel olduğundan ısı iletimi yüksek olan alüminyum ve alaşımlarının kaynağında çarpılmaları en aza indirdiği için tercih edilen bir gazaltı kaynak yöntemidir (Ayvaz, 2011).

Genellikle alternatif akım (AC) alüminyum alaşımları, doğru akım (DC) ise demir alaşımları için kullanılmaktadır. İşlem elle veya otomatik bir şekilde yapılabilmektedir. Tungsten elektrot, ark işlemi için gerekli elektronların emisyonunu sağlamak amacıyla yeterince yüksek sıcaklıklara ısıtılır. Ark bölgesinde meydana gelen elektromanyetik alan sayesinde elektrot ve parça arasındaki koruyucu gazın bir kısmı iyonlaşır. Bu yüzden ark bölgesinde gaz iletken ya da plazma haline gelir. Elektrik arkı, iletken hale gelen asal gazdan akımın geçmesiyle üretilir (Şekil 3.2).



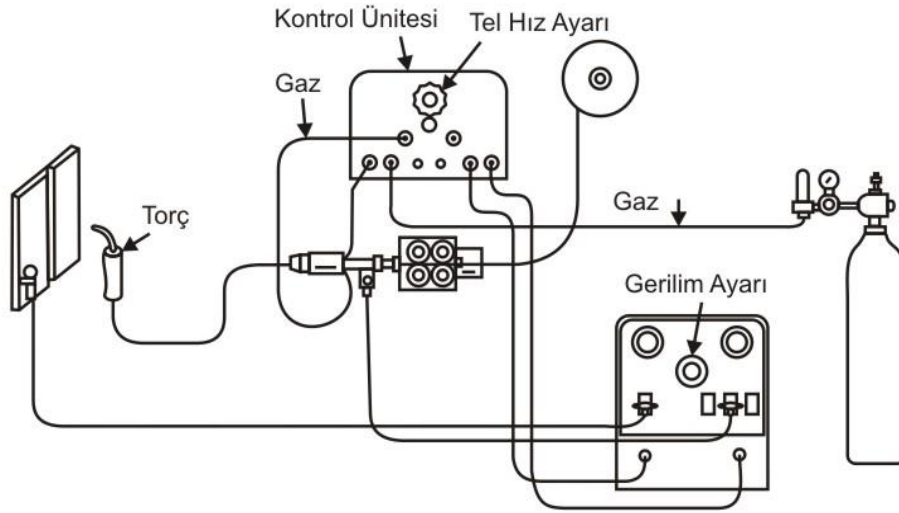
Şekil 3.2. TIG Kaynağının Şematik Resmi (Buytoz, 2004)

3.2. MIG Kaynağı

Şekil 3.3’ de MIG (Metal Inert Gaz) kaynak yönteminin şematik görüntüsü verilmiştir. Koruyucu gaz altında yapılan kaynak yöntemlerinden biri de MIG kaynak yöntemidir. Alüminyum ve alaşımlarının ergime kaynağının çoğu MIG kaynak yöntemiyle yapılır. Bu yöntemle ısının etkisi altında kalan bölge elektrik ark kaynağı ve oksii-asetilen gibi kaynak yöntemlerinkinden daha dardır ve kaynak hızı da daha yüksektir. Bu yöntemde doğru akım ters kutuplama (DATK) kullanılır. İmalatta 1.6 mm’ye kadar incelikte alüminyum malzemeler MIG kaynağı ile birleştirilebilir (Büyükarıslan, 2006).

MIG kaynağında torcun ucundan yarı otomatik ya da tam otomatik bir şekilde sürekli olarak gelen bir ilave metal (ergiyen elektrot) ile kaynak yapılmaktadır. MIG kaynağında ark, argon ve helyum gibi asal gaz atmosferi altında yanar. Kullanılan

koruyucu gazlar asal olduğu için tepkime oluşmaz. Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında, en iyi birleştirme kalitesi MIG kaynak yönteminde elde edilir. Argon korumasıyla; elektrik akımı, kaynak banyosunun önünde, ana metalin üstündeki oksit tabakasını parçalar. Bu temizleme etkisinin, ana metal levhasını terk eden elektronlar ya da levhaya çarpan asal gaz iyonları veya bu iki olayın birlikte gerçekleşmesinden ileri geldiği düşünülmektedir (Oysu, 1996).

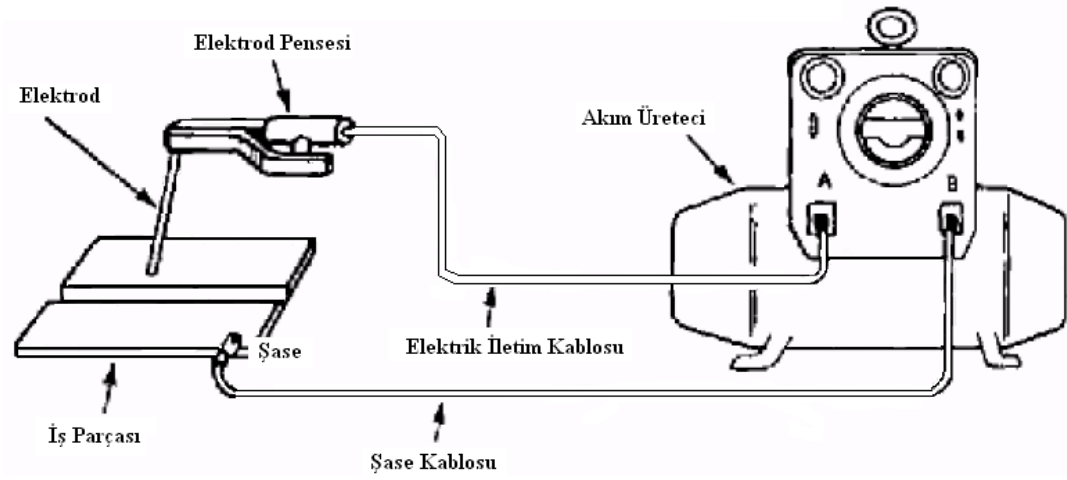


Şekil 3.3. MIG Kaynak Donanım Şeması

3.3. Elektrik Ark Kaynağı

Alüminyum ve alaşımlarının örtülü elektrotla elektrik ark kaynağı diğer yöntemlere göre bazı avantajlar sağladığı için yaygın bir kullanım alanı vardır. Bu avantajlar, kullanımı basit ve kuruluş maliyetinin oldukça düşük olmasıdır. Bu yöntemde, kaynak için uygun koşullardaki elektrik akımı, bu iş için geliştirilen kaynak makinesi tarafından sağlanır. Akım, kablolar yardımıyla iş parçası ve elektrot pensesine iletilir. Kaynakçı, elektrotu penseye takar ve iş parçasına temas ettirerek arkı oluşturur (Şekil 3.4). Arkın başlatılması, yanması, mesafesinin ayarı, söndürülmesi ve kaynak hızı gibi çeşitli özellikler kaynakçı tarafından ayarlanır. Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında kaynakçının deneyimi ve becerisi oldukça önemlidir. Çünkü ark çeliklerin kaynağında olduğu gibi kendini belli etmez ve ergime derecesinin düşük olması gibi özellikler kaynağı zorlaştırır. Bu yüzden kaynakçının bilgi ve becerisi alüminyum kaynağı için çok önem taşır (Şaldır, 2003).

Alüminyum ve alaşımlarının örtülü elektrotlarla ark kaynağında ark, iş parçası ve ergiyen elektrot arasında oluşur. Böylece ergiyen elektrot kaynak metaline haline geçer. Elektrot örtüsü aynı zamanda yanarak ergir. Bu sırada açığa çıkan gaz karışımı, ark bölgesini korur ve oluşan cürufun yoğunluğu kaynak metalinden az olduğu için, cüruf kaynak dikişinin üzerini örterek onu dış ortamın olumsuz etkilerinden korur. Bu yöntemde ısıtım işlemi yoluyla sertleşmeyen alüminyum alaşımlarını kaynak etmek mümkündür. Kaynak için doğru akım ters kutuplama (DATK) yöntemi kullanılır. Bu yöntem 2 mm'den kalın alüminyum ve alaşımlarının kaynağında kullanılır (Oğuz, 1990).



Şekil 3.4. Elektrik Ark Kaynağının Şematik Resmi

Alüminyum ve alaşımlarının kaynağını mümkün olduğu kadar yatay pozisyonda yapmaya çalışılmalıdır. Düşey ve tavan kaynaklarından mümkün olduğunca kaçınılmalıdır. Kaynak işleminden sonra 200-300°C'de çekiçlenirse iri taneli döküm yapısı ince taneli hadde yapısına dönüşür ve aynı zamanda dikisin mukavemeti yükselir. Yalnız büyük ve karmaşık parçalarda kaynak yerinin civarı 200°C'lik bir ön ısıtmaya tabi tutulmalıdır. Bakır (Cu) içeren Al alaşımları 150-200°C'lik ön ısıtmaya tabi tutulurlar. Kaynaktan sonra parçanın yavaş soğumaya bırakılması gerekmektedir (Anık, 1960).

3.4. Oksi-Asetilen Kaynağı

Alüminyum ve alaşımlarının gaz ergitme kaynağı en eski birleştirme yöntemlerinden biri olup, her tür hafif metale uygulanabilir. Bu yöntemde, oksii-asetilen alevi ısıyı bölgesel olarak yoğunlaştırabildiği için hidrojen-oksijen alevinden daha az çarpımalara yol açar. Oksii-asetilen alevinin en sıcak noktasında 3200°C'lik sıcaklık elde

edildiği için, yöntem kalın parçaların birleştirilmesinde kullanılabilir. Hidrojen-oksijen alevi de ince parçaların kaynağında kullanılabilir (2000°C). Hidrojen-oksijen alevi Al-Mg alaşımlarında gözenekliliğe yol açar. Magnezyum alaşımlarında, ergime akısını engelleyen oksitlenme meydana gelir. Hafif metallerin kaynağında hafif, yani karbürleyici alevle çalışır. Kesinlikle oksitleyici alevden kaçınılmalıdır (Oğuz, 1990).

Redükleyici asetileni fazla alev, oksit tabakasını çözmeye yetmediğinden bir dekapan kullanılması kesinlikle gereklidir. Dekapansız kaynak edilebilen döküm Al-Si alaşımları dışında, bütün hafif metal alaşımlarında dekapan kullanılması zorunludur. Kimyasal açıdan hafif metal dekapanları, alkali ve toprak-alkali metallerin (sodyum, potasyum, lityum) klorür ve flüorürlerinden oluşur (Oysu, 1996).

Alüminyum ve alaşımlarının gaz eritme kaynağı 0,75-25 cm' ye kadar parçaların kaynağında rahatlıkla kullanılmaktadır. Daha kalın parçaların bu kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde önemli problemler oluşturmaktadır. Örneğin alüminyum ısı iletme kabiliyeti yüksek olduğundan kaynak esnasında malzemede önemli derecede çarpılmalar oluşabilmektedir. 0.75 mm'den ince parçaların kaynağında ise genellikle TIG kaynak yöntemi kullanılır (Şaldır, 2003).

Alüminyum alaşımlarının gaz ergitme kaynağında en iyi sonucu oksit-asetilen verir. Bununla birlikte hidrojen-oksijen alevinde daha düşük sıcaklık oluşması nedeniyle 1 mm' den az kalınlıkta saçlarda kaynakçının isini kolaylaştırır. Ancak H-O alevi, Al-Mg alaşımlarında gözeneklere yol açar. Alüminyum alaşımlarının gaz ergitme kaynağında, nötr veya hafif karbürleyici alev kullanılır, yani üflece verilen asetilen daima oksijenden fazla olmalıdır. Bu yüzden asetilen mutlaka temiz ve tüp asetileni olmalıdır. Oksitleyici veya oksijeni fazla alevler alüminyum oksit oluşturdıklarından kullanılmamalıdır (Oysu, 1996).

Alüminyum atmosfer ortamında kaldığı sürece yüzeyinde oksit tabakası oluşur. Oksit tabakasının yoğunluğu alüminyumdan küçük olduğu için kaynak esnasında ergimiş banyonun üzerini örter ve kaynak çubuğundan ergiyerek düşen damlaların nüfuz etmesini engeller. Meydana gelen oksit tabakasının ergime sıcaklığı 2050°C'dir. Bu sıcaklık hem alüminyum hem de alüminyum alaşımlarından yüksek olduğundan, kaynak esnasında bu oksit tabakasının ortadan kaldırılması gerekecektir. Kaldırılması için gerekli sıcaklığa erişildiğinde esas metalin ergidiği görülmektedir. Alüminyumun ısı iletme yeteneği Fe'den 3 kat daha büyüktür. Bu nedenle kalın parçaların kaynağında işlemiden önce ön ısıtmanın yapılması gerekir. Alüminyumun ısıl genleşme katsayısı demire nazaran daha büyüktür. Bu

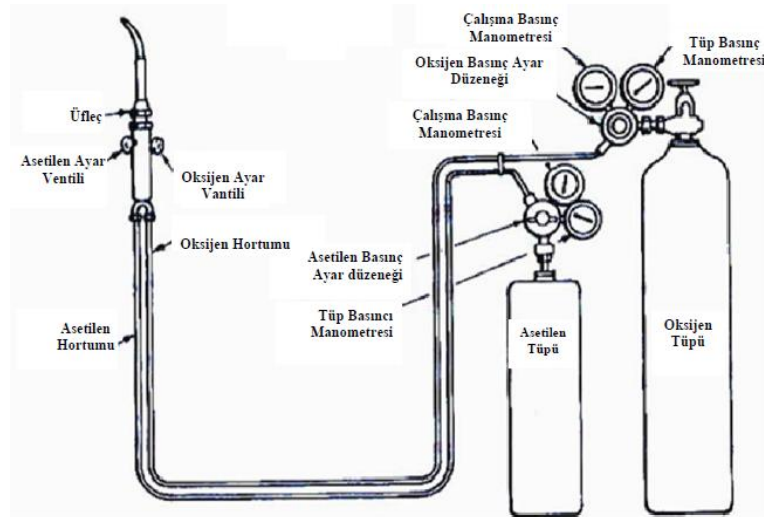
özellik kaynak esnasında alüminyumda şekil değişimine neden olur. Bu şekil değişikliği de iç gerilmelere yol açar. Şekil 3.5’de oksî-asetilen kaynağının şematik resmi verilmiştir (Oğuz, 1990).

Oksî-asetilen gaz ergitme kaynağının avantajları şöyle sayılabilir (Oğuz, 1990);

- Ucuz, basit ve kolay taşınabilir teçhizatlı olmaları,
- Kullanılması çok kolay bir üfleç ve bunun erişilmesi güç yerlerde ve zor pozisyonlarda iyi kullanılabilir olması,
- Ucuz dikiş ön hazırlığına gerek olmaması,
- Özellikle kalın sacların çok pasolu kaynağında kullanılması,
- Dikişlerin sıcak olarak çekiçlenebilmesi olanağı ki, böylece mükemmel düz ve kolay temizlenebilir yüzeyler elde edilmesidir.

Dezavantajları ise (Oğuz, 1990);

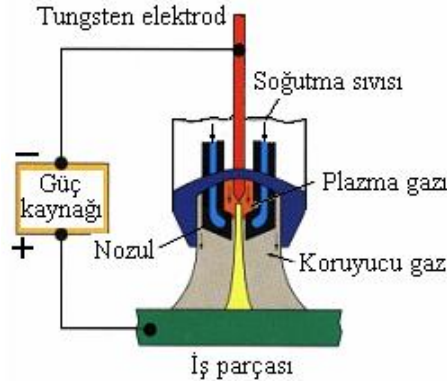
- Dikiş içine girmelere neden olabilecek bir dekapanın kullanılması,
- Bu dekapanın korozyona sebebiyet vermesi nedeniyle bunun artıklarının temizlenmesi gibi pahalı kaynak sonrası işlemler gerektirmesi,
- Dikişin her iki yanında ITAB’de, ıslah edilmiş veya sertleştirilmiş metal alaşımlarında iş parçası düzeyinde zayıf mukavemetli bölgeler oluşturması,
- Nihayet ergitme kaynağında meydana gelen büyük çarpılalar için pahalı düzeltme işlemlerinin gerekmesidir.



Şekil 3.5. Oksî-Asetilen Kaynağının Şematik Resmi

3.5. Plazma Ark Kaynağı

Plazma ark kaynağı çok yüksek bir sıcaklığa ısıtılarak iyonize olmuş ve elektrik iletkenliği kazanmış bir gaz olan plazma gazı sayesinde elektrik arkının tungsten elektrodun ucundan parçaya transfer edildiği ve böylece arkın oluşturulduğu bir koruyucu ark yöntemidir. Arkı oluşturan plazma ısısı malzemeyi ergitmektedir. Plazma kaynak mekanizması, tungsten elektrod ve iş parçası arasında oluşturulan ark şeklinde bakıldığında, TIG kaynak mekanizmasına benzemektedir. Ancak elektrodun torçtaki konumu, kaynağın mekanizması ve arkın iletim şekli ile tamamen farklılık göstermektedir. Plazma arkının şematik olarak görünüşü Şekil 3.6'da görülmektedir (Orhan, 2008).



Şekil 3.6. Plazma Arkının Şematik Görünümü

Plazma ark kaynağı, karbonlu çelikler, paslanmaz çelikler, alüminyum alaşımları ve bakır alaşımlarının kaynağında kullanılır. Plazma kaynağında akım şiddetine göre ayarlanan üç akım konumu kullanılır (Orhan, 2008). Bunlar;

Mikroplazma: Mikroplazma arkı, çok düşük kaynak akımlarında 0,1-15 A arasındaki çalışmalarda oluşur. Ark sütunu ancak 20 mm'ye kadar olan ark uzunluğunda kararlıdır. Mikroplazma, 0,1 mm'ye kadar olan malzemelerin kaynağında kullanılır.

Orta akım: Mikroplazma arkından daha yüksek olan akım değerlerinde, yani 15-200 A'lık akım aralığında plazma arkının gerçekleştirildiği konumdur. Bu plazma konumu TIG kaynağıyla benzerlik gösterir, fakat plazma kaynağında ark daraltılmıştır. Plazma gazı akış hızıyla kaynak havuzunun nüfuziyeti artırılabilir.

Anahtardeliği plazma: Plazma arkındaki akım değeri, 100 A üzerindeki çalışmaları kapsar. Artan kaynak akımı ve plazma gaz akışıyla, bir malzemede tam nüfuziyet elde etmek için, lazer ve elektron-ışın kaynağında olduğu gibi çok güçlü bir

plazma ışını meydana getirilir. Kaynak esnasında ergiyen metal malzemenin kesiti boyunca anahtar deliği şeklinde bir boşluk oluşturarak ilerler.

Elektrodun etrafından gelen argon gazı tungsten elektrod ve nozul arasındaki pilot ark sayesinde iyonize olmaktadır. Böylece iletken hale gelen plazma gazı nozulun dar uç kısmından geçerek dar bir sütun halinde parçaya iletilmektedir. Koruyucu gaz ise nozulun dış çevresinden kaynak bölgesine iletilerek kaynak banyosunu korumaktadır (Orhan, 2008).

3.6. Lazer Kaynağı

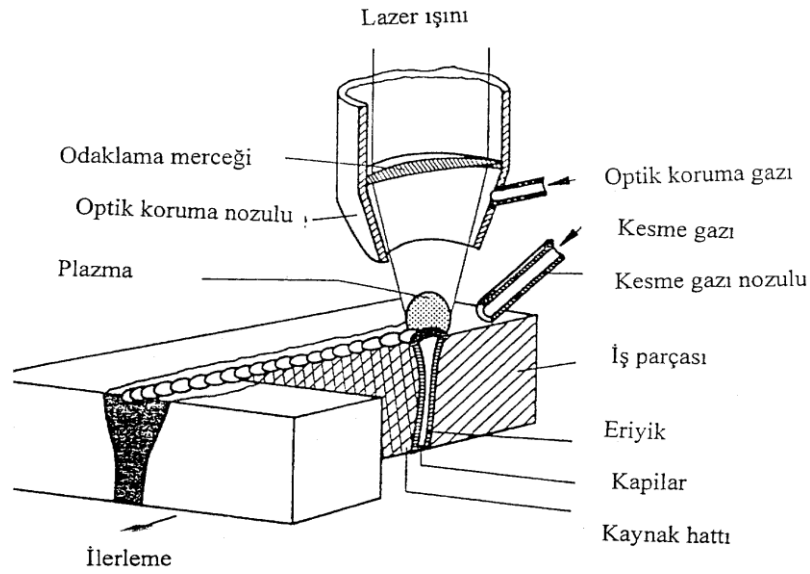
Lazerin İngilizce kelime anlamı “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” (uyarılmış ısın yayınımlı ile ışık yükseltilmesi veya uyarılmış atomlardan salınan radyasyonlar yardımıyla ışık yükseltilmesi) kelimelerinin baş harflerinden oluşur. Lazer kaynağı, lazer ışınının birkaç mikron mertebesinde iyi odaklanabilme yeteneğinden dolayı (3400°C) tungsten gibi yüksek sıcaklıklarda ergiyen metalleri rahatlıkla ergitebilmektedir. Lazer kaynağı, çok dar bir kaynak bölgesi oluşturduğu için birçok avantajı da beraberinde getirmektedir. Lazer ışının dar bir alana nüfuz etmesi, dar bir kaynak bölgesinin oluşmasına neden olur. Pratikte alüminyum alaşımlarının yüksek ısı iletme özelliğinden dolayı alüminyum alaşımlarının kaynağında önemli yer tutmaktadır. Ancak alüminyumun ışığı iyi yansıtma özelliğinin lazer ışınları enerjisinin kullanımını sınırladığından, alüminyum alaşımlarının lazer kaynağıyla birleştirilmesinde büyük güçlüklerle karşılaşilmektedir (Büyükarıslan, 2006).

Lazer ışınıyla kaynak, monokromatik (tek bir dalga boyu içeren) ışınların yüksek enerjilerinden yararlanılarak malzemelerin bir kısmının ergitilmesi ve buharlaşması esasına dayanmaktadır. Dikiş oluşumunun mekanizması elektron ışın kaynağına benzer şekildedir. Teknikte bu yöntemden kaynak işlemlerinin yanı sıra kesme, delme ve ısıl işlemlerde de yararlanılmaktadır. İşlemler karakteristik olarak, metal esaslı ve metal olmayan malzemelere uygulanabilmesi dışında, ısıdan etkilenen bölgelerin diğerleriyle karşılaştırılamayacak derecede dar olması ve ulaşılan yüksek hızları ile dikkat çekmektedirler.

Kaynak bölgesini oksidasyondan korumak için kullanılan gaz, ergiyik haldeki malzemeyi kaynak bölgesinden uzaklaştırmaması için daha düşük basınçla püskürtülür. Lazer ışınıyla kaynak metodunda en önemli ölçüt, ışının malzeme içinde tüm noktaları etkilemesidir. Lazer ışını bu durum sayesinde malzemenin içlerine kadar nüfuz ederek,

malzemenin et kalınlığı boyunca enerji geişı sağlanmasına imkan tanır. Bilindiği gibi ark kaynağında bu enerji geişı sadece yüzeysel olarak gerçekleşmektedir. Lazer ışınıyla kaynakta, distorsiyonsuz kaynak dikişı elde edilebildiği için daha hassas kaynak imkanı sağlanır (Haboudou ve diğ., 2003).

Kaynağın malzemeye nüfuziyeti, güç yoğunluğu ve kaynak hızına bağlıdır. Malzemeye uygulanan güç yoğunluğu artıkça ve kaynak hızı azaldıkça nüfuz derinliği artar. Malzemeye en uygun olan güç yoğunluğu ise denemeler sonucunda bulunur. Genellikle lazer kaynağı için gerekli işlem parametreleri seçilirken teoriler üzerinden, denemelerden ve geçmişte yapılan deneyimlerden faydalanılır. şekil 3.6’da lazer kaynağının şematik resmi görülmektedir (zcan ve diğ., 2004).



şekil 3.7. Lazer Işınıyla Kaynağın şematik Resmi

3.7. Elektron Işın Kaynağı

Teorik olarak, iş parasın yoğun bir yüksek hız elektron akısı tarafından bombardıman edildiği ve elektronların bütün kinetik enerjisinin darbe etkisiyle fiilen ısıya dönüştüğü bir ergime birleştirme sürecidir. Elektron işın kaynağı ile yüksek birleştirme verimi ve asgari distorsiyon elde edilebilir. Al alaşımlarının çoğu elektron işın kaynağı ile kaynak edilebilir. Ancak 6061, 2004 ve 7075 gibi ısıl işlem kabul eden bazı alaşımlarda çatlamaya rastlanabilir. Belli bir ısı girişı ile kaynak edilebilen kalınlıklar geniş lde değişir. Böylece belli bir makine 5083 alaşımından 130 mm, 2219 alaşımdan ise sadece 50 mm kalınlığı kaynak edebilir. Kt alın birleştirmesi 150 mm kalınlığa kadar kullanılmıştır. Kalın kesitlerin tek pasoda kaynağında bütün kalınlık genişliğince aynı kaynak genişliğini

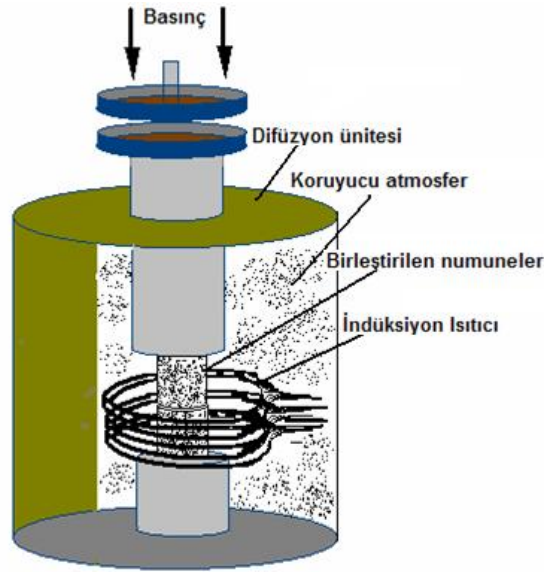
tutmak uygun olur. Böylece iyi bir kök ergimesi ve minimum kusur sağlanmış olur (Oğuz, 1990).

3.8. Difüzyon Kaynağı

Şekil 3.8’de difüzyon kaynak yönteminin şematik görüntüsü verilmiştir. Difüzyon kaynağı, bir katı hal birleştirme kaynağıdır. Birleştirilmek üzere eşleşmiş aynı veya farklı iki malzemenin ergime sıcaklıkları altındaki bir sıcaklıkta, malzemelerde tespit edilebilir plastik akmaya neden olmayacak bir basınç altında, malzeme çifti arasında metalik bağ oluşacak bir sürede tutulmasıyla yapılan kaynak yöntemi olarak tarif edilir (Orhan, 1996).

King ve Tanuma tarafından önerilen difüzyon mekanizması üç safhadan oluşmaktadır; Birinci aşamada, plastik deformasyon ve sürünme ile yüzey teması artırılır. İkinci aşamada, birinci safhada yok edilemeyen arakesit boşluklarını difüzyon yoluyla yok edilir. Burada baskın mekanizma tane sınırı difüzyonudur. Üçüncü aşamada ise, arakesitteki tane sınırları göçer ve temas alanı artar (Özdemir, 2002; Orhan, 1996).

Alüminyumun difüzyon kaynağında ara tabaka kullanılmayan difüzyon kaynaklarının çoğu 450-500°C arasında ve 4 saate kadar çıkan sürelerde yapılır. Fakat bu işlemde ara bölgede oluşan oksit tabakası birleşebilirliği olumsuz etkilemektedir. Bunun için sıvı faz difüzyon işlemi (TLP) tercih edilir. Bu yöntemde, ara bölgeye daha düşük ergime dereceli ilave metal yardımıyla oksit tabakanın oluşumu önlenabilmektedir.



Şekil 3.8. Difüzyon Kaynak Seti

3.9. Direnç Kaynağı

Direnç kaynağı, iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda basıncın uygulanmasıyla yapılan bir kaynak yöntemidir. Malzemeden geçen elektrik akımının doğurduğu ısı dışında, herhangi bir ısı uygulanmamaktadır. Isı, kaynak edilecek kısımlarda oluşur ve basınç kaynak makinesindeki elektrotlar ya da çeneler aracılığıyla uygulanır (Cerit, 1996).

Bazı alüminyum alaşımlarının direnç kaynağı diğerlerine göre daha kolaydır. Genelde diğer kaynak işlemleriyle kaynak edilebilen döküm alaşımları direnç kaynağı ile de kaynak edilebilir. Sürekli döküm ve kum döküm alaşımları başarıyla direnç kaynağı yapılabilirken kalıp dökümlerin bu metotla birleştirilmeleri zordur (Doğan, 2006).

Genellikle yüksek mukavemetli 2024 ve 7075 alaşımları kolaylıkla kaynak edilebilirlerse de daha düşük mukavemetli alaşımlara nazaran çatlak ve gözenekliliğe daha fazla yatkınlardır. Kaynak metalinde çekme çatlakları tamamen bakır ve çinko içeren alaşımlara (2024 ve 7075 gibi) özgüdür (Oğuz, 1990).

3.10. Ultrasonik Kaynak

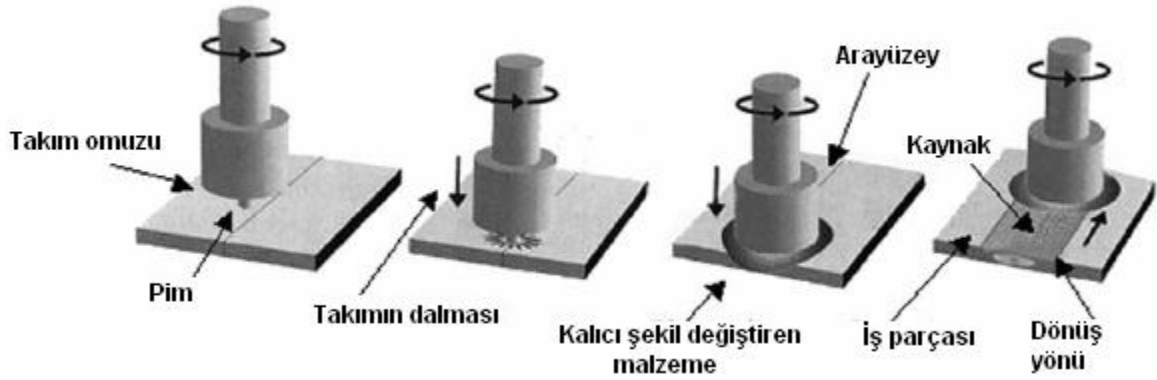
Ultrasonik kaynakta birleştirilecek parçalar, hareketli ultrasonik frekansla titreşen sonotrot ile sabit duran bir altlık arasına konur ve az bir kuvvetle bastırılır. Sonotrot tarafından oluşturulan ultrasonik titreşimler, yüzeye paralel olarak üstteki parçaya iletilir ve temas yüzeylerinde yani alt ve üst kaynak yerinde bağlı bir harekete neden olur. Ultrasonik dikiş kaynağında bindirilen saçlar dönen tekerlek şeklindeki sonotrotlar tarafından senkronize çalıştırılan altlık makaralarına bastırılır. Tekerlek şeklindeki sonotrotların levha titreşimleri üstteki iş parçasına iletilir (Doğan, 2006).

Bu yöntemle 0,004-1 mm arasındaki metaller kaynak edilebilir. Çok ince malzemeleri kalın malzemelerle birleştirme kolaylığını oluşturur. Kaynaklı parçada çarpılma olmaz. Genel olarak alaşımlar, sünek saf metallere göre bu yöntemle daha güç birleştirilebilirler (Oğuz, 1990).

3.11. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı temelde basittir. Öncelikle kaynak sırasında oluşan titreşim ve hareketleri engelleyebilmek için birleştirilecek levhaların bir mengene ya da tutucu pabuçlar yardımıyla iyice sabitlenmesi gerekir. Çünkü birleştirme esnasında iş parçaları yukarıya doğru, yana doğru kaymaya ve ileriye doğru itilmeye maruz

kalacaktır. Yöntemin uygulanabilmesi için sürtünme ısını ve karışımı sağlayabilecek karıştırıcı uca ihtiyaç vardır. Freze pensine bağlanan karıştırıcı uç önceden belirlenmiş bir devirde döndürülür ve kaynak yapılacak levhalara daldırılır. Özel tasarlanmış pime sahip karıştırıcı uç ve omuzu; düzlem boyunca dönme hareketi yaparak levhaları gerekli sürtünme ısına ulaştırır ve doğrusal hareketle de iki levha arasındaki birleşmeyi sağlar. Karıştırıcı uç takımı, iki görev üstlenmektedir. Bunlardan birisi malzemeyi ısıtarak gerekli sıcaklığına getirmek, diğeri ise doğrusal hareket temin edip karıştırma yaparak iki levhanın birleşmesini sağlamaktır. Şekil 3.9’da görüldüğü gibi karıştırıcı uç pimi etrafındaki malzeme, sürtünmeyle ısınıp yumuşayarak pimin ucundan arka yüzeye doğru karıştırılır ve karıştırılan malzeme soğuyarak katılaşır (Özarpa, 2005).



Şekil 3.9. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Aşamaları

Alüminyum yüzeyinde oluşan oksit tabakası da plastik deformasyonla kırılmaktadır. Bu yüzden yöntemin uygulanışı sırasında koruyucu gazı ihtiyaç duyulmaz. Tüm bu olaylar alaşımın ergime noktası altındaki bir sıcaklıkta gerçekleşir. Alüminyum alaşımları farklı kimyasal ve mekanik karakteristiklere sahiptir. Kaynak yapmadan önce, işlem değişkenlerinin mutlaka belirlenmesi gerekmektedir. Bunlar alaşım çiftlerine göre farklılıklar göstermektedir. Kaynak işlemi zor olan alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde, yöntemin performansı ve üstünlükleri sanayinin ilgisini çekerek, yapılan araştırmalar yaygınlaştırılmıştır (Sarsılmaz, 2008).

Bu kaynak yönteminin 1 mm’den daha az ve 35 mm’den daha kalın olan ve kaynak edilemez olarak düşünülen alüminyum alaşımlarına başarıyla uygulandığı ve araştırmacılar tarafından, kaynaklı malzemelerde çok iyi mekanik özelliklere ulaşıldığı belirtilmektedir (Özdemir, 2003).

Sürtünme karıştırma kaynağı süresince malzeme yüksek sıcaklıklarda yoğun kalıcı şekil değişimine (plastik deformasyona) uğramaktadır. Bunun sonucunda malzemenin içyapısında ince taneli ve yeniden kristalleşmiş tane yapıları meydana gelmektedir. İnce taneli mikroyapı da malzemenin iyi mekanik özellikler sergilemesine yol açmaktadır (Mishra, 2003).

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ark kaynağına oranla; işlem kolaylığı, dolgu malzemesi ve koruyucu gaz kullanımına ihtiyaç duyulmaması, kaynak dikişinde ince taneli yapı oluşumu, mekanik özellik kaybı olmaması sayesinde yüksek performans sağlamaktadır (Özarpa, 2005).

3.12. Sürtünme Kaynağı

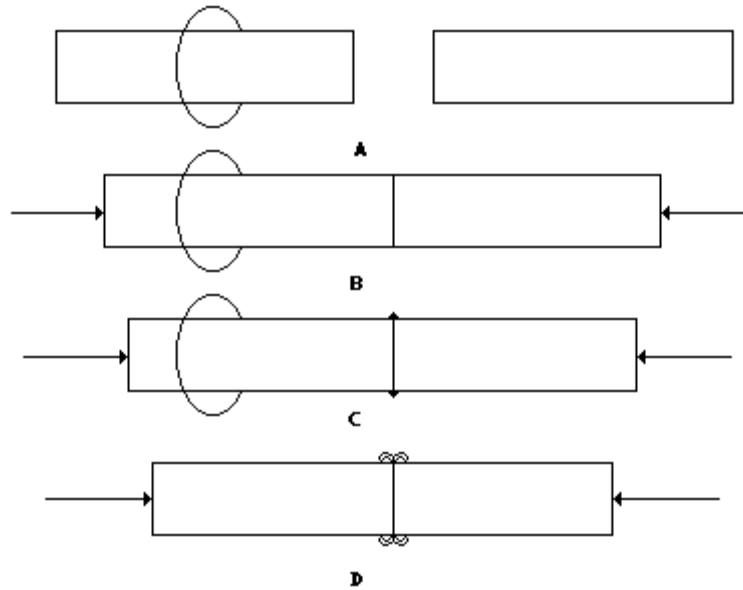
Biri sabit diğeri dönel harekete sahip iki parçanın ara yüzeylerinde oluşturulan sürtünme yolu ile mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi sonucunda ısıdan yararlanarak eksenel basınç altında ara yüzeyde plastik deformasyon oluşturularak yapılan bir katı hal kaynak yöntemidir. Sürtünme kaynağında sürtünme süresi boyunca sürtünen yüzeyler eksenel basınç altındadır. Isıtma veya sürtünme fazı olarak adlandırılan bu süreç birleşme bölgesinde plastik deformasyon sıcaklığına ulaşınca kadar devam eder. Bu sıcaklıkta dönme hareketi ani frenleme ile durdurulur ve eksenel basınç yaklaşık iki kat artırılarak yığma oluşturulur. Normal şartlar altında ara yüzey erimez. Çünkü oluşan sıcaklık malzemelerin ergime sıcaklığından daha düşüktür. Bu kaynak tekniğinde ilave metal ve koruyucu gaza gerek yoktur. Bu birleştirme yöntemi dairesel kesitli parçaların kaynağında yaygın bir kullanıma sahiptir ve kaynak işlemi otomatik olarak ta yapılmaktadır. Yöntem silindirik olmayan parçalar için de kullanılabilir. Alın kaynağı uygulamalarında parçalardan birinin dönme simetrisine sahip olması bu yöntem için yeterlidir. Sürtünme kaynağı, metal malzemeler ve kombinasyonlarıyla plastiklerin birleştirilmesi işlemleri için uygundur. Sürtünme kuvveti, temas yüzeylerinin büyüklüğüne ve işleniş tarzına bağlı olmayıp yüzeye dik gelen yük ile doğru orantılıdır (Orhan, 2003)

Sürtünme kaynağı ile kaynak yapma fikri eskilere dayanmaktadır. Ancak konu ile ilgili ilk patent 1891 yılında Amerikalı makinist I.H.Bevington tarafından alınmıştır. Daha sonraları konu ile ilgili 1924 yılında İngiltere ve Rusya, 1929 yılında Almanya patent almıştır. Başlangıçta boru ve plastiklerin kaynağında kullanılan bu teknikte, 1956 yılında Rus bilimci A.J. Chdicov iki metal çubuğu birleştirmeyi başarmıştır. Sürtünme kaynağı konusu ile ilgili gerçek bilimsel çalışmalar 1956 yılından sonra başlamıştır. Yöntemin

uygulama alanlarının geliştirilmesi doğrultusunda çalışmalar halen devam etmektedir. Özellikle yeni ve ileri malzemelerin üretilmesi ve bu malzemelerin mevcut kaynak yöntemleri ile kaynatılmasından doğan problemler, sürtünme kaynağı için geniş bir araştırma alanı olmuştur (Özdemir, 2002).

3.12.1. Sürtünme Kaynağının Mekanizması

Sürtünme kaynağı işlemini çeşitli safhalarda incelemek mümkündür. Sürtünme kaynağı işlemi dört temel basamakta meydana gelir: Birinci aşamada, parçalardan biri sabit diğeri dairesel harekete sahip (Şekil 3.10.a.) olacak şekilde aynı ekseninde bağlanır. İkinci aşamada, iki parçanın aksenal basınç altında yüzey teması sağlanır (Şekil 3.10.b.). Üçüncü aşamada, ara yüzeyde plastik deformasyon ve şişme (Şekil 3.10.c.) oluşturulur. Dördüncü aşamada, dönme hareketi durdurularak yığma basıncı uygulanır (Şekil 3.10.d.) (Jenning, 1971).



Şekil 3.10. Sürtünme Kaynağı Mekanizması

- Ellis (1994), sürtünme kaynağının üç aşamada gerçekleştiğini belirtmektedir. Bunlar;
1. Düşük aksenal basınç kuvveti altında yüzey temasının neden olduğu sürtünmenin yardımıyla plastik deformasyon oluşması,
 2. Aksenal basınç kuvvetinin artırılarak sürtünen yüzeyler arasında gerekli ısının oluşturulması,
 3. Sürtünme işleminin durdurulup birleşme bölgesinde yığma oluşturmastır.

Sürtünme kaynağıyla kaynak edilmiş malzemenin, birleşme bölgesinde dört farklı bölgenin oluştuğunu belirtmiştir. Bunlar; birleşme ara yüzeyindeki temas alanı, tamamen deformasyona uğramış bölge, kısmen deforme olmuş bölge ve deformasyona uğramamış bölge olarak adlandırılırlar. Sürtünme kaynağında erime bölgesinin olmayışı, ısının tesiri altındaki bölgenin (ITAB) darlığı ve kaynak çevresinde deforme olmuş malzemenin varlığı bu yöntemin en belirgin özelliklerini oluşturur. Birleşme kalitesi ise uygun malzeme seçimi, kaynak ağzı tasarımı, sürtünme süresi, sürtünme basınç kuvveti, devir sayısı, yığma basınç kuvveti ve yığma süresi gibi kaynak parametrelerine bağlıdır (Özdemir, 2002).

Sürtünme kaynağında, kaliteli bağlantının oluşumunun nedenleri aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

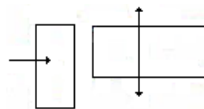
1. Sürtünme hareketi ile bütün oksit ve diğer tabakalar parçalanarak yüzeyden uzaklaştırılır. Sürtünen yüzeyler arasındaki sürekli temas, kaynak sırasında oksit filmlerinin oluşmasını engeller.
2. Sürtünme kaynağı sırasında kaynak boşluklarının büyük bir kısmı elimine olur.
3. Bağlantı bölgesi, hızlı bölgesel ısınma ve soğuma sonrası uygulanan yüksek basınçtan dolayı ince taneli bir yapıya sahip olur.
4. Isıtma bölgesel olduğundan dolayı bağlantıya bitişik olan ısıtılmamış geniş alanlar, ısıyı bölgesel olarak ısınmış alanlardan hızla çeker. Sonuçta da çok dar bir ITAB oluşur.

Sürtünme kaynağı sadece dönel simetriye sahip malzemelerde kullanılabileceği gibi, dönel simetrisi olmayan kesitlerin kaynağı için de kullanılabilir (Şekil 3.11). Bu yöntem aynanın istenilen pozisyonda durdurulması ile yapılır. Bu yöntemde parçaların merkezlenmesi büyük bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır (Yılmaz, 1993).



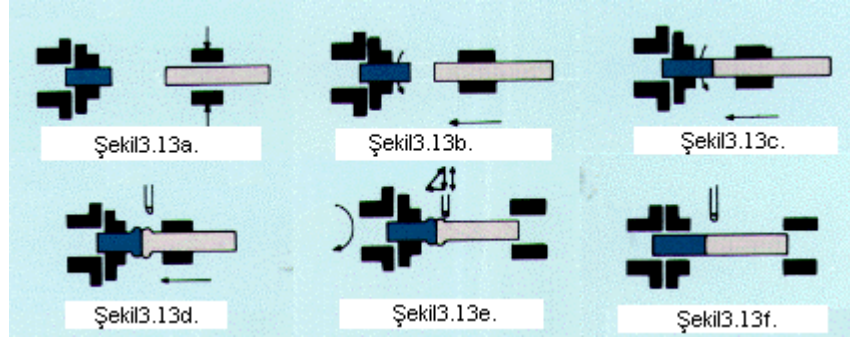
Şekil 3.11. Yörüngesel Hareketle Sürtünme Kaynağı

Lineer titreşim hareketinde ise; parçalardan biri uygulanan basınçla birlikte ileri geri titreşim hareketi yapar. Bu sayede gerekli ısı sağlanır (Şekil 3.12) (Yılmaz, 1993).



Şekil 3.12. Titreşim Hareketiyle Sürtünme Kaynağı

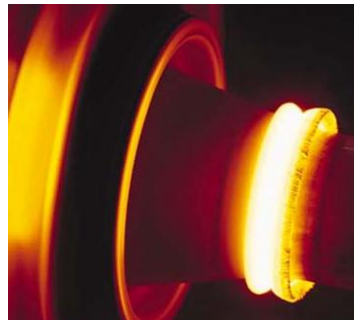
Sürtünme kaynağı sırasında parçaların temas yüzeyleri başlangıçtan bitime kadar basınç altındadır. Genellikle parçalardan en az birinin döndürülmesi ve yüzeylerin temas eden noktalarında meydana gelen yüksek basınç nedeniyle metal malzemelerin yüzeyinde bulunan yağ, kir, oksit, v.b. tabakalar yırtılarak parçaların doğrudan doğruya teması sağlanır. Sürtünme kaynağında işlem sırasını altı safhada açıklayabiliriz (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Sürtünme Kaynağının İşlem Safhaları

- Parçalarda biri sabit diğeri dairesel hareketli aynaya bağlanır.
- Eksenel basınç kuvveti ile yüzey teması sağlanır.
- Dönen parça daha önceden belirlenen devir sayısına çıkarılır.
- Ara yüzeyde yeterince sıcaklık oluşuncaya kadar sürtünme basınç kuvveti artırılarak uygulanır.
- Bu sıcaklıkta dönen parça durdurularak eksenel basınç kuvveti yaklaşık iki kat artırılarak yığılma oluşturulur.
- Ara yüzeyde oluşan yığılma uygun talaş kaldırma aparatı yardımı ile temizlenerek birleşme işlemi tamamlanır.

Parçaların teması esnasında oluşan ısı malzemelerin ergime sıcaklığından düşük ancak oldukça yüksek bir sıcaklığa karşılık gelir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Sürtünme Kaynağında Yığılma Bölgesi

3.12.2. Sürtünme Kaynağının Uygulanması

Birleştirilecek parçalar eksenel hareketli çenelere bağlanır ve ilave metal kullanılmadan basınç etkisiyle birleştirilir. Sürtünme sebebiyle alın yüzeylerinde ısınma meydana gelir. Uygun ısı sağlandığında malzeme hamurlaşır ve göreceli olarak uygulanan hareket durdurulur. Basınç artırılarak plastik hale gelen malzemede radyal doğrultuda yığılma oluşur. Kaynak bölgesinde oluşan bu yığılma parçaların kısılmasına sebep olur (Anık ve diğ., 1993; Gürleyik, 1989).

Kaynak sırasında birleşme bölgesinde oluşan yığılma (Şekil 3.15)'de, ya sürtünme kaynağı makinesinde veya buna bağlı ayrı bir tornalama tezgâhında alınmalıdır. Sürtünme kaynağında, kaynak anında uygulanan ikinci basınca dövme basıncı denir. Bu yöntemde başarılı bir birleşme için dönme hızının ve basınç kuvvetlerinin doğru biçimde ayarlanması gerekir (Tülbentçi, 1989).

Sürtünme kaynağı uygulanırken, kaynak esnasındaki mekanizmalar şu şekildedir:

1. Aşınma ve sürtünme ile ısı üretilmesi
2. Isının yayılması
3. Plastik deformasyon
4. Karşılıklı kimyasal difüzyon

Sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirilecek parçalardan biri dönen, diğeri dönmeyen eksenel olarak hareket edebilen çenelere bağlanır. İlave bir metal kullanılmaksızın basınç altında birleştirilir. Burada birleştirilecek olan parçaların yüzeyleri arasında birbirine bağlı bir hareket vardır. Bu harekette sürtünmeye neden olur. Söz konusu olan sürtünmeden, parçaların ısınması ve yeterli ısı sağlandığından bağlı hareketler durdurularak basınç kuvveti artırılır ve parçalar birleştirilir. Sürtünme ısı çok kısa eksenel mesafede, iş parçasının erime sınırı altında bir ısıya ulaşarak gelişir. Kaynak, ısınan bölgenin uygulanan basınç altında, kaynak sıcaklığına ulaştığında oluşur. Esasen, birleşme kullanılan metalin ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta meydana gelir. Söz konusu sürtünme ile sıcaklığı artan malzeme plastik hale gelerek plastik bir fışkırmaya görülür. Bu yöntem birleşme yüzeyinde karakteristik bir yığılma çapağı meydana getirir (Koçer, 1999). Yığılma basıncı;

$$P_{yığılma} = 2 \sim 3 P_{sürtünme} \dots\dots\dots(3.1)$$

denklemleri ile verilmektedir (Anık ve diğ., 1993).



Şekil 3.15. Sürtünme Kaynağında Oluşan Yığılma

3.12.3. Sürtünme Kaynak Değişkenleri

Sürtünme kaynağında birçok kaynak parametresi mevcuttur. Bunların kontrolünün optimum düzeyde olması kaynağın kalitesini artırır. Sürtünme kaynağıyla ilgili parametreler;

1. Dönme hızı (Çevresel Hız)
2. Eksenel Sürtünme Basınç Kuvveti
3. Sürtünme Süresi
4. Yığılma Süresi
5. Yığılma Basınç Kuvveti
6. Frenleme'dir.

Kaynak parametreleri malzemenin cinsine, kaynak yüzeyinin boyutlarına ve bağlantının kalitesine göre değişkendir (Anık ve diğ., 1993).

3.12.3.1. Dönme Hızı (Çevresel Hız)

Ellis (1976) kendi yaptığı çalışmalara ve literatüre dayanarak, ara yüzey sıcaklığı ve bağlantı kalitesi üzerinde en etkili parametrenin çevresel hız olduğunu öne sürmüştür. Çevresel hız, ITAB'ın genişliğine etki eder. Yüksek çevresel hız yüksek ara yüzey sıcaklığı üretirken, düşük çevresel hız yetersiz ısıtma sonucu kaynak bağlantısını olumsuz etkiler. Yüksek çevresel hıza bağlı olarak deformasyon hızının değişimi kaynak süresini kısaltır. Çelikler için çevresel hız 1,2 – 1,8 m/sn arasında önerilir. 1,2 m/sn'nin altındaki hızlarda düzensiz bir yığılma oluşur. Yüksek hızlarda ise kaynak bölgesi aşırı ısınır ve metalürjik dönüşümler meydana gelir. Yüksek hızlarda ITAB genişler ve kaynak zamanı uzar; güç girdisinde ise büyük değişiklik olmaz (Mühendis ve Makine Dergisi, 1977).

Ellis (1976), kaynak kalitesi için düşük dönme hızlarını tavsiye etmiş ve numune çapına bağlı olarak orta ve düşük karbonlu çelikler için aşağıdaki deneysel formülü önermiştir

$$n = (1.2 - 6.0) \times 10^4 / D (d/d) \dots\dots\dots(3.2)$$

n: Dönme Hızı (d/d)

D: Parçanın Çapı (mm)

3.12.3.2. Sürtünme Basınç Kuvveti

Sürtünme basınç kuvveti, numune geometrisi ve birleştirilecek malzeme çiftinin plastik şekil değiştirme yeteneğine bağlı olarak değişir. Sürtünme basıncı ara yüzeydeki oksit, yağ, kir ve yabancı tabakaları kaldırıp, yüzeylerin atmosfer ile ilişkisini kesebilecek ve yüzeylerde düzenli bir ısıtmayı sağlayacak büyüklükte seçilmelidir. Çünkü malzemedeki sıcaklığı ve gücü etkilediği için basınç önemlidir.

Alaşımız ve düşük alaşımlı çeliğe uygulanan basıncı iki katına çıkarmak gücü %50 artırır. Alaşımız ve düşük alaşımlı çelikte yapılan sürtünme kaynağı için güç gereksinimi, başlangıç durumu için 4.8 kw/cm²'dir. Daha hızlı enerji girişi ve yüksek basınç, ITAB'ın genişliğini etkiler. Metal yer değiştirme oranını hızlandırır. Böylece kaynak zamanı kısalarak paralel olmayan kenarlı ısı bandı oluşur. Sürtünme süresince gerekli olan basınç değeri malzemeye bağlıdır. Atmosfer etkilerini önleyebilmek için iki yüzeyin yakın teması sağlanmalıdır (Mühendis ve Makine Dergisi, 1977).

3.12.3.3. Sürtünme Süresi

Sürtünme süresi malzemenin cinsine göre değişir. Sürtünme süresi, yüzeylerdeki kalıntı ve pislikleri uzaklaştırabilecek, kaynak bölgesinin gerekli kaynak sıcaklığına en kısa zamanda ulaşmasını sağlayacak biçimde ayarlanmalıdır. Sürenin az veya çok tutulması malzemenin ısınmasını etkileyeceğinden kaynağın kalitesine tesir eder.

Optimumu aşan bir ısıtma süresi, düşük iletkenliğe ve daha fazla malzeme tüketimine yol açar. Uzun ısıtma, aşırı yığılmayla birlikte geniş bir ITAB'ın oluşmasına sebep olur. Uygun olmayan sürtünme süresi, düzensiz ısıtmayla beraber ara yüzeyde birleşmemiş bölgeler oluşmasına ve kirlenmelere yol açar. Yavaşlama zamanının değiştirilmesi toplam malzeme tüketimini değiştirmez. Bu değişiklikler bazı malzemelerin birleşme özellikleri üzerinde önemli etki yapar (Mühendis ve Makine Dergisi, 1982).

Ellis (1976), parametre optimizasyonla ilgili yapmış olduğu çalışmada sürtünme süresini, malzeme çapına bağlı olarak aşağıdaki şekilde formülize etmiştir:

$$t = 82.55 \times d \text{ (sn)} \dots\dots\dots(3.3)$$

t: Sürtünme Süresi (sn)

d: Malzeme Çapı (m)

3.12.3.4. Yığma Süresi

Yığma süresi, malzeme çifti ara yüzeyinde gerekli plastik deformasyonu oluşturmak ve sürtünme kaynağının oluşum mekanizmalarından biri olan difüzyonu hızlandırmak için yığma basınç kuvvetinin uygulandığı süredir. Bu konuda literatürde çalışma yapılmamıştır. Ancak parametre optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalarda, yığma süresi malzemenin soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu da kaynak edilecek parçanın çapına bağlı olarak genellikle sürtünme süresinin iki katı olacak şekilde hesaplanır. Yığma süresinin uygun zamandan az yada çok olması istenilen özelliklerdeki kaynağı elde etmemizi engeller (Özlü, 2002).

3.12.3.5. Yığma Basınç Kuvveti

Yığma basıncı malzemenin sıcak akma sınırına bağlıdır. Bu basınç aşırı malzeme yığılmasına sebep olacak kadar da yüksek ve elverişsiz şekillendirmeye, dolayısıyla yetersiz kaynaklanmaya sebep olacak kadar düşük olmamalıdır. Yığma basınç kuvveti, sürtünme periyodu sonrasında malzeme çifti arasında difüzyon mekanizmasını hızlandırmak amacıyla uygulanır.

Yığma basıncı, malzemelerin birleştirilmesinin iyi olması için bu malzemelerin sıcak dövme mukavemetlerinin altında olmamalıdır. Buna karşın yığma basıncı çok yüksek alınırsa aşırı metal deformasyonu oluşur ve bu aşırı yığılma sırasında kaynak bölgesinde metalik olmayan yapılar istenilmeyen enine bir akış göstererek yeniden şekillenirler. Bu durum kaynağın kırılma tokluğunu ve yorulma dayanımını olumsuz etkiler (Ellis 1977).

Genel olarak, yığma basınç kuvveti paslanmaz çelikler için sürtünme basınç kuvvetinin iki katı olarak önerilir. Düşük karbonlu çelikler için sürtünme basıncı 30-65 Mpa, yığma basıncı 75-140 Mpa iken, orta ve yüksek karbonlu çelikler için sürtünme basıncı 70-210 Mpa, yığma basınç kuvveti 100-420 Mpa arasında seçilir. Farklı iki malzemenin sürtünme kaynağında, yığma basıncını hesaplarken, üç önemli faktör ortaya çıkmaktadır. Bunlar:

1. Yığma işlemi, plastik şekil değiştirme kurallarına göre meydana gelmektedir.

2. Yığılma öncesi sürtünen yüzeyleri etkileyen ısı derinliği, plastik şekil değişim oranı ve derecesi ile saptanır. Sürtünme etkisiyle meydana gelen ısı derinliği, malzemenin uç formunda yapılacak gerekli değişikliklerle direkt olarak şekillendirilebilir.

3. Sürtünme kaynağı için kullanılan yığılma basıncı değerleri hesaplamaları diğer yığılma ile gerçekleştirilen kaynak metodları için de kullanılabilir (Seregin, 1975).

Metal malzemelerin deformasyonu, hidrodinamik analogi ile izah edilebilir. Yığılma süreci, iki dairesel düzlem arasındaki viskoz sıvının akışı ile tarif edilir. Kullanılan viskozite bağıntısı aşağıdaki Denklem 3.4'te verilmiştir (Seregin, 1975).

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp [b (z / h)^2] \dots\dots\dots(3.4)$$

Akışkan akışı, diferansiyel denklemlerinin integrasyonu ile hesaplanır (Seregin, 1975):

$$P_f = - v \cdot R^2 \cdot \mu_0 \cdot b / 4 \cdot h^3 \cdot [2 \cdot e^{-b} - \sqrt{\pi/b} \cdot \phi \cdot \sqrt{b}] \dots\dots\dots(3.5)$$

V: kaliteli bir kaynak bağlantısının üretimi için malzemenin yığılma hızı (mm/dak.)

R: Numunenin yarıçapı (mm)

h: Deformasyona uğrayan bölgenin derinliği (mm)

μ_0 : Sıvı modelin relatif viskozitesi (gr/sn)

ϵ : Numunenin şekil değiştirme oranı

b: Metallerin mekanik özelliklerini karakterize eden katsayı

$$b = \delta B_{(p)} / \delta B_{(0)} \dots\dots\dots(3.6)$$

$\delta B_{(0)}$: Numunenin temas bölgesindeki sıcaklıkta deforme olmuş metalin akma noktasıdır.

$\delta B_{(p)}$: Metallerin deformasyon bölgesinin sınırlarına karşılık gelen sıcaklıktaki akma noktasıdır. Sürtünme kaynağında bu sıcaklıklar 600-700°C civarındadır.

Kaliteli bir kaynak bağlantısının eldesi için yukarıdaki eşitlikler yerine konulduğunda gerekli sürtünme basınç kuvveti formülü elde edilir (Seregin,1975):

$$R^2.b.\delta B(0)$$

$$P_f = - \frac{R^2.b.\delta B(0)}{4.h^2. [2e^{-b} - \sqrt{\pi/b}.\phi.(\sqrt{b})]} \dots\dots\dots(3.7)$$

3.12.3.6. Frenleme

Gerekli kaynak sıcaklığı oluşturulduktan sonra sistemin ani olarak durdurulmasıdır. Frenleme malzemenin türüne bağlıdır. Fren ani uygulanırsa, moment düşer ve yığılma meydana gelir.

Ellis (1976), Sürekli tahrikli sürtünme kaynağında kullanılan parametrelerin optimizasyonu üzerine yapılan deneyleri dikkate alarak, malzeme cinsine göre Tablo 3.1’de verilen parametre değerlerini önermiştir.

Tablo 3.1. Sürtünme Kaynağında, Malzeme Cinsine Göre Seçilecek Parametre Değerleri

Malzeme	Çap (mm)	Sürtünme Kuvveti (N/mm ²)	Yığma Kuvveti (N/mm ²)	Sürtünme Süresi (sn)	Yığma Süresi (sn)	Çevresel Hız (M/sn)
Alaşımsız ve Düşük Alaşımlı Çelikler	20	20-80	80-200	1-100	250	0,5-5
C 60	20	50-80	150-250	3-6	2-3	3,5-6
42 CrMo 4	20	50-80	150-250	3-6	2-3	1,5-3
Yüksek Alaşımlı Çelikler	20	40-100	120-400	3-120	2-10	0,5-5
X5CrNi 18 8	20	60-80	250-300	6-10	2-3	1,5-3
S6-5-3	20	60-100	190-250	10-15	2-3	1,5-3
Y. Sıc. Dayanımlı Alaşımlar	20	60-180	180-600	5-150	2-15	0,5-5
Nimonic 80	20	60-100	180-400	5-10	2-3	1,5-3
Inconel 713 C	20	60-100	400-500	5-10	2-3	1,5-3
Hafif ve ağır metaller	20	10-80	20-250	1-8	2-5	0,5-4
E-Cu	20	10	20-60	1-6	2-5	4
TiAl6V4	20	20-30	60-80	2-8	2-5	1-4
Al 99.5	20	10-30	30-80	0,1-4	2-5	2-4
AlMgSiO.5	20	30-80	50-150	0,1-6	2-5	0,5-2
Pb	20	50-70	70-100	2-4	2-5	1,5-2

3.12.4. Sürtünme Kaynağının Kalitesini Etkileyen Faktörler

Sürtünme kaynağının kalitesini en çok etkileyen etkenleri şu şekilde inceleyebiliriz;

- Yüzeylerin bağıl hızları
- Uygulanan basınç

c.Malzeme özellikleri

d.Yüzey şartları

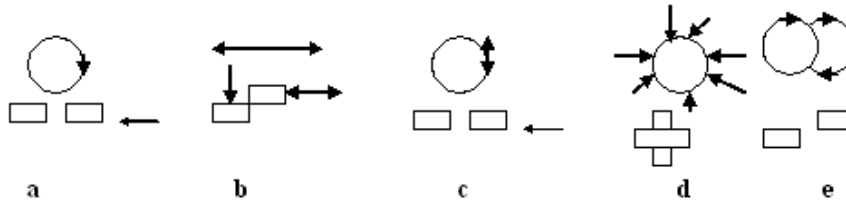
Bu faktörlerden a ve b kaynak tekniği, c ve d ise malzemelerle ilgilidir. Sürtünme kaynağı esnasında; izafi hız, uygulanan basınç ve kuvvetin uygulama süresi değiştirilebilir. Yüzey sıcaklığı, iyi bir kaynak için önemli bir parametredir ve kaynak şartları ile kaynak edilen malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Yüzey sıcaklığının ölçülmemesi veya kontrol edilmemesi kaynağın gözle incelenmesine engel değildir. Malzemenin yüzey ve hacim özellikleri, hem sürtünme kuvvetleri hem de malzemelerin yığılma özelliklerini etkiler (Koçer, 1999).

3.12.5. Sürtünme Kaynağı Yöntemleri

Kaynak bölgesinin yeterli ısıya ulaşması sonucu ortaya çıkan frenleme sistemi ve gerekli mekanik enerjiyi sağlayan donanım kaynak çeşitliliğini belirler. Sistem değişince makine ve teçhizatda değişir. Bu değişim son yıllarda oldukça ilerlemiştir. Sürtünme kaynağı enerji kullanımına göre 3, hareket çeşitliliğine göre de 5 gruba ayrılır (Bahrani, 1976).

Hareket şekline göre Şekil 3.16’da gösterildiği gibi sürtünme kaynak yöntemleri;

- a. Dairesel Hareketli Sürtünme Kaynağı
- b. Karşılıklı Doğrusal Hareketli Sürtünme Kaynağı
- c. Açısal Salınım Hareketli Sürtünme Kaynağı
- d. Radyal Hareketli Sürtünme Kaynağı
- e. Yörüngesel Hareketli Sürtünme Kaynağı, şeklinde sınıflandırılabilir.



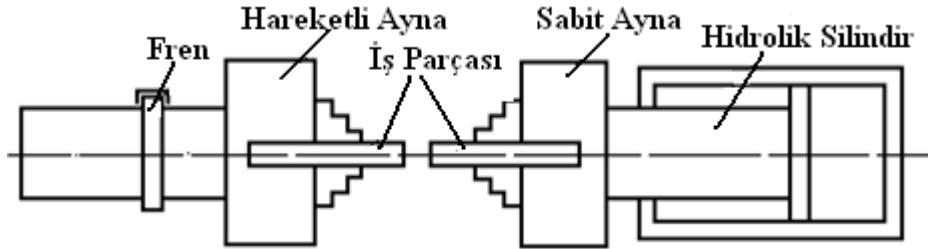
Şekil 3.16. Hareket Şekline Göre Sürtünme Kaynak Yöntemleri

Enerji kullanımına göre sürtünme kaynak yöntemleri şunlardır:

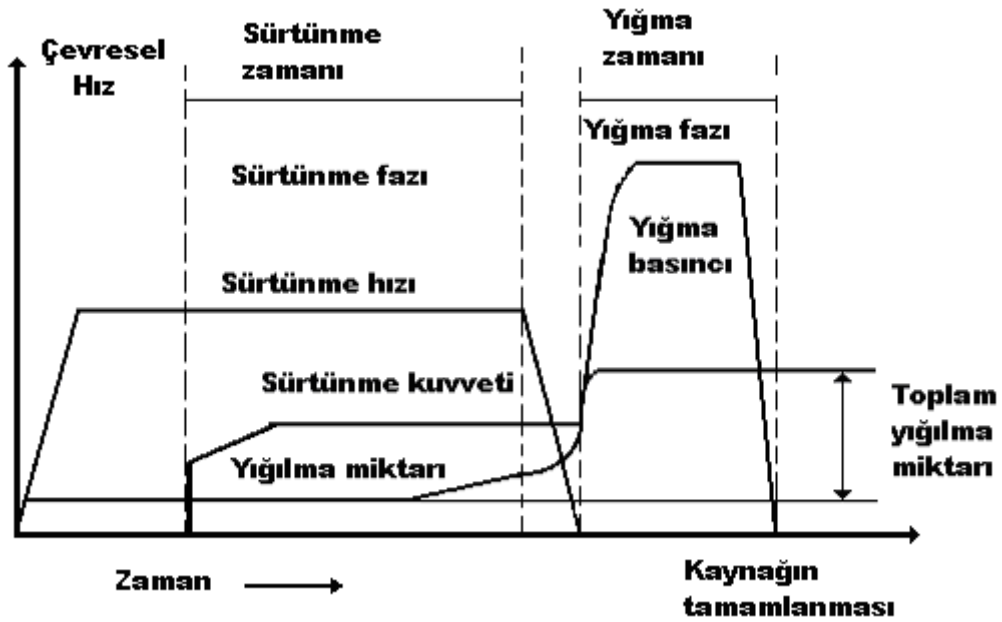
1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı
2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı
3. Hibrit Sürtünme Kaynağı

3.12.5.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Sürekli tahrikli sürtünme kaynağında parçalardan biri dairesel harekete sahip bir motor ünitesine bağlanır. Diğeri ise aynı ekseninde sabitlenir. Motor daha önceden belirlenen devir sayısında döndürülür ve sabit parçaya eksenel basınç kuvveti uygulanarak iki parça ara yüzeyinde temas sağlanır. Bu temas esnasında ısı oluşur. Ara yüzeyde yeterince sıcaklık ve plastik deformasyon oluşuncaya kadar işlem devam ettirilir. Sonra, dönen parça ani frenleme ile durdurulur ve ara yüzey yeterince yığılma oluşuncaya kadar yığılma kuvveti uygulanarak işlem tamamlanır. Şekil 3.17’de sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinin şeması ve Şekil 3.19’da ise sürekli tahrikli sürtünme kaynağının kaynak parametreleri görülmektedir.



Şekil 3.17. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynak Makinesinin Şematik Yapısı



Şekil 3.18. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı Kaynak Parametreleri

Sürekli tahrikli sürtünme kaynağında kaynağı kontrol eden altı önemli kaynak parametresi vardır.

- a. Çevresel Hız
- b. Sürtünme Süresi
- c. Sürtünme
- d. Basınç Kuvveti
- e. Yığma Basınç kuvveti
- f. Yığma Süresi

Bu kaynak yöntemi üç aşamada meydana gelmektedir.

- 1. İlk sürtünme
- 2. Isınma
- 3. Yığma

1. Aşama: Bu aşamada döndürme momenti hızla artarak bir maksimuma ulaşır ve aşama sonunda azalır. Momentin hızla artışı sonra yavaş yavaş düşüşü, parçaların yüzeyindeki pürüzlerin kilitlenmesine ve kopmasına neden olur. Sürtünme nedeniyle oluşan ısı ara yüzeydeki malzemenin yumuşamasına sebebiyet verir.

2. Aşama: Bu aşamada, moment sabit kalır. Malzemelerde deformasyon yaşanması ile ısı yumuşaması bir denge meydana getirir. Malzemeler yığılmaya izin verecek kadar ısınırlar.

3. Aşama: Bu aşamada ise yığılma yer alır. Yığılma tahrik sisteminin ayrılıp frenlemelerinin başladığı anda devreye girer. Tahrik mili ayarlanan frenleme süresi ile yavaşlar. Frenleme süresi malzemenin türüne bağlıdır. Fren ani uygulanırsa, moment aniden düşer ve yığılma meydana gelir. Eksenel kuvvet sabit kaldığı zaman, frenleme süresinin uzatılması, yavaşlama hızını düşürerek yükleme değerini artırır. Eğer bu aşamada eksenel kuvvet arttırılırsa, frenleme süresi kısalmış ancak, uygulanan kuvvet daha büyük olduğu için maksimum değeri yükselmeye devam eder. Sürtünmenin artması burulmalı yığılmayı artırır. Bu aşama, tahrik mili durdurduktan kısa bir süre sonra sona erer. Basma ve yığma dönemi de dördüncü bir parametre olarak kabul edilebilir.

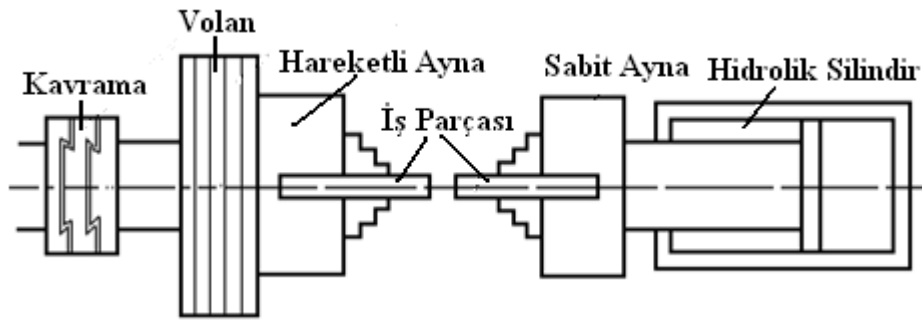
Yığma aşaması, kaynak çevrimi içerisinde daha yüksek olan basınç uygulandığı anda başlar. Bu sebeple yığma aşaması gerçekte durma aşamasının başlangıcından başlar. Kuvvet, genellikle ya ayna frenlendiği anda ya da ayna durduğunda yani durma safhasının sonunda arttırılır. Bu iki uygulama arasındaki fark birincisinde, sürtünmede bir artışın olmasıdır. Birinci uygulamada ayna yavaşlatıldığında kuvvet arttırılır, döndürme momenti sıfıra düşmeden önce ikinci bir maksimum değere ulaşır. Bu hal, bir burulma kuvveti oluşturur. İkinci uygulamada, yani kuvvetin durdurma sonunda artırıldığı aşamada, hızlı

frenleme sebebiyle durdurma safhasının çok hızlı olması halinde sürtünme kuvveti artmaz. Ancak, yığılma safhasının ilerlemesiyle azalmaya başlar. Bu durumda burulma kuvveti oluşmaz ve yığılma yalnızca baskı kuvvetinden etkilenir (Özlü,2002).

3.12.5.2. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı

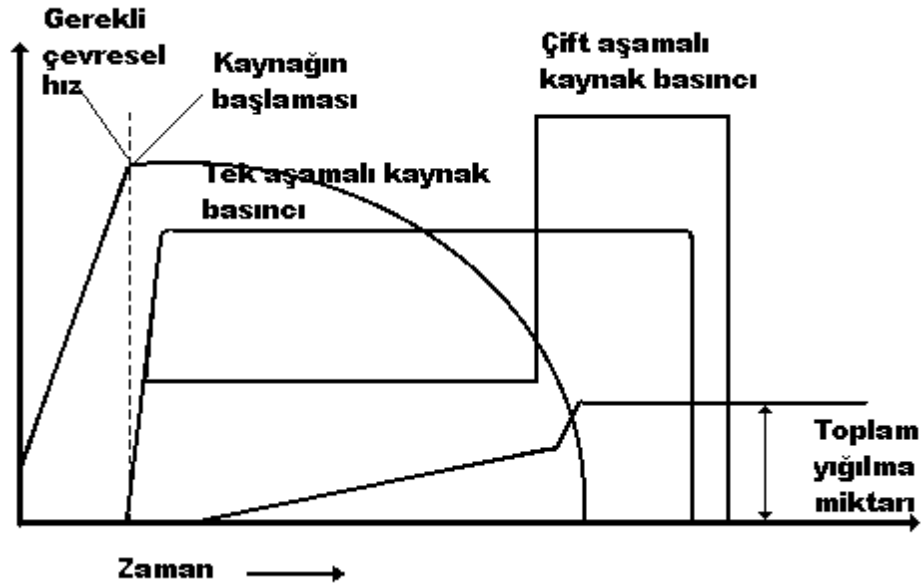
Bu yöntemde, atalet kaynağı da denilmektedir. Sistem hemen hemen sürekli tahrikli sürtünme kaynağı ile aynı mekanizmaya sahiptir. Yalnız burada dönen parçaya tutunan mil bir volana bağlanmıştır.

Volan belirlenen bir hıza ivmelendirilir. Böylece dönme enerjisinden kazanılan kinetik enerji volan üzerinde toplanmış olur. Tahrik motoru ile dönen parça arasındaki bağlantı kesildiğinde volan üzerinde depolanmış olunan enerji boşalana kadar sürtünme kaynağı yapılır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynak Makinesinin Şematik Yapısı

Kaynak kuvveti aksenal olarak uygulandığında dönmesi serbest bırakılan parça diğer parça ile birlikte döner. Bu arada volan enerjisi parça ara yüzeyinde sürtünmeye harcanır. Volan hızı azalırken kaynak bölgesi ısınır ve bu ısı yayılır. Volan tamamen durduktan sonra basınç etki ettirilir. Bu yöntemle bazı kaynak uygulamalarında ısı daha az yayılabilir. Volan tahrikli sürtünme kaynağının kaynak parametreleri Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağında Kaynak Parametreleri

3.12.6. Sürtünme Kaynağının Avantajları

- Sürtünme kaynağı birleştirilmelerinde sarf edilen enerji diğer metotlara göre daha azdır.
- Kaynak sırasında bölgesel ısıtma ve ergime derecelerinin altında bir sıcaklıkta kaynak yapıldığı için farklı metallerin kaynağını yapmak mümkündür.
- Sürtünme kaynağında, kaynaklanan bölgenin dayanımı, birleştirilen malzemelerin dayanımına denk, bazı hallerde yüksek olabilir.
- Ergitme kaynağı yöntemlerinin uygulanamadığı malzemelerde, başarı ile kullanılabilir.
- Birleştirme sıcaklığı düşük, kaynak süresi kısa ve birleşme kuvvet altında yapılmaktadır.
- Sürtünme sonucunda oluşan ısı bölgesel olduğu için kaynak dikişinin her iki tarafında ısıdan etkilenen bölge dardır ve her hangi bir dönüşüm oluşmaz.
- Bu metot katı hal kaynak yöntemi olduğu için kaynak bölgesi pas, kir, oksit, vs. içermez.
- Sürtünmenin etkisiyle tüm oksit ve diğer yabancı maddeler yüzeyden uzaklaştırılır. Ayrıca kaynak öncesi bir temizleme gerektirmez.
- Kaynak süresi içerisindeki yığılma kaynak dikişini havanın zararlı etkilerinden korur.
- Isıtma ve soğutma fazlarının hızlı teşekkül etmesinden dolayı, birleşme bölgesinde

ince taneli bir mikroyapı oluşur. Bu da malzemenin mukavemetini artırır.

- İlave metal kullanılmadığı için, bütün kesitte düzgün bir kaynak kalitesi sağlanabilir.
- Kaynak sırasında sıçrama, duman, ışınlama ve çevreyi kötü etkileme söz konusu değildir.
- Kaynak parametreleri kesin olarak kontrol edilebilir.
- Çoğu zaman ana malzeme gevrekleşmez.
- ITAB küçüktür. Bu sebeple kaynakta oluşan metalürjik değişim küçük bir değerdedir.
- Değişik kesitteki simetrik parçaların kaynakla birleştirilmeleri mümkündür.
- Sürtünme kaynağı metodunda kaynak parametreleri çok iyi gözlenir.
- Birleşme bölgesindeki sertlik değerlerinin artışı çok küçüktür.
- Kaynak parametrelerinin kontrolü oldukça kolaydır.
- Birleşme esnasında parçalar katı olduğundan, kaynak dikişi mükemmel görünümlüdür.
- Kaynağın süresi ve ayrıca makineye bağlama ve ayırma zamanları çok kısadır.

3.12.7. Sürtünme Kaynağının Dezavantajları

- Düşük sıcaklıkta eriyen fazların veya metaller arası fazlar oluşur.
- Oksijene büyük ilgi vardır.
- Gevrekleşme söz konusudur.
- Su verilmiş veya suyu alınmış malzemelerde mukavemet düşer.
- Özellikle yüksek karbonlu çeliklerde sertleşme oluşur.
- Genelde birleştirilen parçalar silindirik ve eksenine etrafında dönebilen parçalardır.
- Kaynak sonunda parçalar eksenel kısalmaya uğradığı için, malzeme sarfıyatı olmaktadır.
- Büyük parçalarda ısıtmanın homojen olmaması nedeniyle birleşme zordur.
- Kesit alanının artması motor gücü ve yığma basıncı değerlerinin artmasına sebep olur.
- Sürtünme kaynağı makine ve donanımlarının maliyeti yüksektir.
- İş parçasının boyutları sürtünme kaynak makinesinin boyutları ile sınırlıdır.

4. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Konuyla ilgili yapılan çalışmaların birçoğu aşağıda verilmiştir. Bu çalışmalar; AA 6061 ve AA 7075 malzemelerinin kullanımlarına ve sürtünme kaynağı yapılan farklı malzemelerin literatür çalışma sonuçları şeklinde verilmiştir.

Mutombo ve Toit yaptıkları çalışmada; alüminyum alaşımlı 6061-T651 malzemeyi, ER5183 dolgu alaşımı kullanarak tam otomatik gaz altı kaynağı ile birleştirmişler ve bu kaynaklı malzemenin korozyon yorulma davranışını incelemişlerdir. Sonuç olarak kaynak metali ve ısıdan etkilenen bölge arasındaki ara yüzeyde birleşmenin başarısız olduğunu ve buna bağlı olarak yorulma ömründe azalmanın olduğunu tespit etmişlerdir (Mutombo, 2011).

Dong ve Liu AZ31B magnezyum alaşımlı malzeme ve AA 6061 arasında Fe kullanılarak hibrid lazer ve tungsten asal gaz (TIG) kaynak tekniği ile birleşimini incelemişler. Sonuçlar olarak Fe ilavesinin kayma mukavemeti gelişimine katkıda bulunduğunu ancak kesme gücünü olumsuz etkilediğini tespit etmişlerdir (Dong, 2012).

Oppenheim ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada; 6061-T6 ve 7249-T76 alüminyum alaşımlarının mekaniksel ve fiziksel özelliklerini araştırmışlardır. Al 6061-T6 ve Al 7249-T76 malzemelerinin ısıtma işlemlere maruz kaldığını belirtmişler. Sonuç olarak soğutma oranlarının ve yaş sertleştirme işlemlerinin malzemeler üzerindeki olumsuz etkilerini tespit etmek için işlemin fiziksel ve mekaniksel özelliklerini belirlemişlerdir (Oppenheim ve diğ., 2007)

Gang ve arkadaşları, 7075 alüminyum alaşımının hidrostatik basınç altında halka sıkıştırma işlemini araştırmak için sayısal simülasyon ve deneysel araştırma yapmışlar. Bunun için yüksek hidrostatik basınç altında halka sıkıştırmak için bir kalıp setini tasarlayarak üretmişlerdir. Sonuçta; hidrostatik basınç belirli bir aralıkta arttıkça sıkıştırma limitinin doğrusal arttığını tespit etmişlerdir (Gang ve diğ., 2006).

Sang ve Se'nin 2012 yılında yayınlanan çalışmalarında; düşük hızlı elektrikli araçların süspansiyon parçaları için bir dövme alüminyum alaşım olan AA 6061 alaşımlı malzemelerin Thixoformed yöntemiyle termomekanik şekillendirme özelliklerini incelemişlerdir. AA 6061 malzemesinin mekanik özelliklerini araştırmak için, malzemenin dikkatli bir şekilde kesildiğini ve çekme testi uygulandığını belirtmişler. Çalışmanın

sonucunda; bu çalışma için en iyi malzemenin AA 6061 dövme alüminyumun olduğunu tespit etmişlerdir (Sang, 2002).

Chayong ve Kapranos, 7075 alüminyum alaşımlarının Thix şekillendirilmelerini incelediklerinde, ticari olarak çekilmiş yüksek performanslı 7075 alüminyum alaşımının etkili olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. Thixoformed işleminde iki adımlı üç aşamalı indüksiyonlu ısıtmayı kullanarak, sonuçta; özellikle mukavemet için yarı-katı halde mikro çevrili ince küresel katı tanelerin oluştuğunu gözlemlemişlerdir (Chayong, 2005).

Herba ve Queen yaptıkları çalışmada; 6061 malzemesine partikül takviye etkisi ile ekstrüzyon modellemesini incelemişler. Malzemeye ön ısıtma uygulanarak doğrudan ekstrüzyon ve sürtünme işlemi yaptıkları ve bu işlemin gayet başarılı olduğunu tespit etmişlerdir (Herba, 2004).

Baradeswaran ve Elaya'nın 2013 yılındaki çalışmalarında; Al 7075-B₄C kompozit malzemenin tribolojik ve mekanik özelliklerine B₄C'nin etkisini incelemişlerdir. Al 7075 kompozitlerin sertlik, çekme, basma, eğilme ve aşınma davranışı için test edildiğinde, artan B₄C parçacıklarının kompozit malzemenin aşınma direncini ve sertliğini arttırdığını tespit etmişlerdir (Baradeswaran, 2013).

Maalekian ve diğ., çelik çubukların sürtünme kaynağında ısı üretiminin karşılaştırmalı analizini incelemişler ve dört farklı yöntem uygulayarak kaynaklı numunenin sıcaklık gradyanına bağlı olarak üç boyutlu termomekanik sınırlı element analizini uygulamışlardır. Sonuç olarak sürtünme kaynağındaki plastik deformasyona bağlı olarak kaynak arayüzeyinde ısının arttığını tespit etmişlerdir (Maalekian ve diğ., 2008).

Luo ve diğ., sürekli tahrikli sürtünme kaynak yönteminde kaynaklı yanıp sönen sönümlleme-tüp bezinin kontrolünü yapmak için yeni bir karma entegre bir yaklaşım geliştirmişler ve modelle birlikte sönümlleme-tüp yöntemindeki iç sürtünme kaynağından oluşan sorunların büyük oranla ortadan kalktığını tespit etmişlerdir (Luo ve diğ., 2009).

Şahin ve diğ., sürtünme kaynaklı AISI 1040 malzemenin mekanik özelliklerinin karakterizasyonunu incelemişler ve sürtünme kaynaklı numunelere çekme testi, yorulma testi, çentik darbe testi ve sertlik testleri uygulayarak elde edilen sonuçları tartışmışlardır. Sonuç olarak kaynaklı numunelerin mekanik test sonuçlarının ana malzemenin değerlerinden % 95 oranında yüksek olduğunu ve artan deformasyona bağlı olarak ara yüzeyde sertliğin arttığını tespit etmişlerdir (Sahin ve diğ., 2007).

Sahin, deneysel olarak östenitik paslanmaz çelik parçaların sürekli sürtünme kaynağı ile birleştirildikten sonra mikro-yapısal özelliklerini ve kaynak edilebilir

özelliklerini araştırmışlar, ayrıca farklı basınç ve farklı zaman parametrelerini kullanarak optimum parametreler elde etmek için deney parçalarına güçlü gerilim, yorgunluk ve çentik darbe testlerini uygulayıp, arabirim sertlik ve mikro yapısını incelemişler daha sonra elde edilen sonuçları daha önceki çalışmalar ile karşılaştırmışlardır (Sahin, 2007).

Meshram ve diğ., Fe, Cu, Ti ve Ni gibi farklı saf metallerin (Fe-Ti, Cu-Ti, Fe-Cu, Fe-Ni ve Cu-Ni) birleşme işlemlerini incelemişler, daha sonra bu işlemin temel mekanizmasını anlamak için bu metalleri ticari olarak saf biçimde alıp sürekli tahrikli sürtünme kaynağı uygulayarak mikro ve çekme özelliklerinin zamana bağlı etkisini incelemişler. Sonuç olarak artan etkileşim süresi ile malzemelerin mekanik özelliklerinin ve mukavemet gücünün azalmasına yol açtığını tespit etmişlerdir (Meshram ve diğ., 2007).

Winiczenko ve diğ., sfero döküm-östenitik paslanmaz çelik, sfero dökme demir-saf Armco demir ve sfero dökme demir-düşük karbonlu çelik malzemelerin ara katmanlı sürtünme kaynak yöntemini incelemişler, çekme gücünü, geleneksel bir çekme makinesi kullanarak, sertliği arayüzü üzerinden ölçmüşlerdir. Kırık yüzey ve birleşmeleri elektron mikroskobu (SEM) ve transmisyon ışık stereoskopu (TEM)'nde incelemişler; sonuç olarak sürtünmeli kaynak işleminin Cr, Ni oranına ve ara yüzey C atomlarının konsatrasyonuna bağlı olduğunu tespit etmişlerdir (Winiczenko ve diğ., 2012).

Sahin, yüksek hız çeliği ve orta karbonlu çeliğin sürtünme kaynağı ile birleştirme işlemini incelemişler; kurulum deneysel olarak tasarlanmış ve eşit çapa sahip olan bileşenler arasında sürtünme kaynağı elde etmek için üretilmiştir. Kurulum sürekli tahrikli olarak tasarlanmıştır. Deneylerde yüksek hız çeliği (HSS-S 6-5-2) ve orta karbonlu çelik (AISI 1040) kullanılmıştır. Kaynak sonrası ekleme yani kaynak bölgesine 650° C de tavlama işlemi uygulanmış, eklemler için en uygun kaynak parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra ekleme, güçlü gerilim, yorgunluk ve çentik darbe testlerini uygulayıp sonuçları malzemelerin gerilme mukavemetleri ile karşılaştırmışlar. Elde edilen sonuçları daha önceki çalışmalar ile mukayese etmişlerdir (Sahin, 2005)

Şahin ve diğ., plastik olarak deforme olmuş çeliklerin sürtünme kaynağı ile birleştirme işlemini incelemişler. Parçalar aynı veya farklı çaplarda plastik bir şekilde deforme olan, ama aynı malzemeden farklı işlem parametreleriyle kaynaklı olduğunu gözlemlemişler (Sahin ve diğ., 2003).

Seli ve diğ., hafif çelik ve alüminyuma sürtünme kaynağı uygulamış, mekanik değerlendirme ve termal modelleme işlemlerini yapmışlardır. Bu çalışmada, hafif çelik ve

alüminyum kaynaklı çubukların mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak kaynaklı parçanın çekme direncini ölçerek önceki verilerle karşılaştırmışlardır (Seli ve diğ., 2010).

Faes ve diğ., boru hatlarının otomatik kaynağı için yeni bir kaynak yönteminin gelişimini araştırmışlardır. Friex denilen bu metodun, tanınmış sürtünme kaynak işleminin yeni bir çeşidi olduğunu ve halka kaynağı gerçekleştirebilmek için gerekli olan ısı üretimini, kaynak yapılacak boru arasında döndürülerek elde edilen bu işlemin çalışma prensiplerini açıklamışlar; sonuç olarak dönme hızının kaynağa etkisini ve kaynak halkasının kalınlığını tartışmışlardır (Faes ve diğ., 2009).

Paventhane ve diğ., alüminyum alaşımlı ve paslanmaz çelik malzemelerin sürtünme kaynağı parametrelerinin tahmini ve optimizasyonu için araştırma yapmışlar. Sonuç olarak bu araştırmayı, bir girişim sürtünme çekme dayanımını tahmin etmek ve ampirik ilişkileri geliştirmek için yapıldığını söylemişlerdir. AA 6082 alüminyum alaşım ve AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kaynak işlemi parametrelerinin optimize olarak uygulandığını tespit etmişlerdir (Paventhane ve diğ., 2011).

Duck Park ve diğ., metal matriks kompozitler (MMK) ile hibrid Al₂O₃ takviyeli alüminyum kompozit malzemelerin sürtünme kaynağında kaynak parametreleri ve birleştirme verimliliği arasındaki ilişkiyi karşılaştırmak için bu çalışmayı yapmışlardır. Sonuç olarak dönme hızının etkisinin sürtünme kaynak işleminde verimliliği önemli derecede etkilediğini tespit etmişlerdir (Duck Park ve diğ., 2011).

Bu çalışmada, birbirinden farklı AA 7075 ile AA 6061 malzeme çiftinin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliği incelenecektir. Bu amaçla yukarıda bahsedilen literatür çalışmaları göz önünde bulundurulmuştur.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Çalışmanın Amacı

Çağımızda teknolojinin hızlı gelişimi, sanayinin temel girdisi olan malzeme ve malzeme bilimindeki gelişimini de beraberinde getirmiştir. Kimyasal bileşimlerine bağlı olarak, iyi mekanik özelliklerinden dolayı uçak ve uzay konstrüksiyonlarda ve donanımlarında, taşıma araçlarında, demiryolu taşıtlarında vb. sanayi sektörünün çeşitli alanlarında kullanılan ve ısıtılma işlemle sertleştirilen alaşımlar arasında soğuk şekillendirmeye elverişli alaşım grubu olan AA 6061 malzemesidir. Ana katkı maddesi olan çinko %5 civarında kullanılır ve alaşımlara çok yüksek çekme dayanımı kazandırır. Çinkonun ana alaşım elemanı olarak ve bir miktar Mg ile birlikte kullanılması, malzemenin ısıtılma işlemle sertleştirilmesini sağlar. Bu alaşımlar tüm alüminyum alaşımları içinde en mukavemetli olanlarıdır ve II. dünya savaşı sırasında hava kuvvetlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Uçak gövdelerinin yapımında kullanılan AA 7075 çok yüksek mukavemet özelliği taşır.

Araştırmaların büyük çoğunluğu Al ve alaşımlarının üretimi ve özellikleri ile ilgilenirken, çok az bir kısmı bu tür malzemelerin birleştirilmesi üzerine çalışmakta, ancak üzerinde çalışılan birleştirme yöntemleri; mühendislik uygulamalarından ziyade uygulamalarla sınırlı kalmaktadır. Deneysel çalışmaların çoğunluğunu iki grupta kategorize etmek mümkündür. Bunlar; ergitme kaynak yöntemleri ve katı hal kaynak yöntemleridir.

Ergitme kaynak yöntemleri ile yapılan birleştirmelerde bazı problemler mevcuttur. Bunların en önemlileri; yüksek viskozite ve düşük akıcılıktır. Sıvı kaynak banyosunda, ana metal kendi içinde karışırken takviye ergiyik banyosunda ana metalden ayrılmaktadır. Bu da matris takviye dağılımında heterojenliklere neden olmaktadır. Bu da kaynak kabiliyetini düşürerek zayıf bağlantıların oluşmasına sebep olmaktadır.

Ergitme kaynaklı birleştirmelerdeki bir diğer problem, katılaşmanın kontrolsüz gerçekleşmesidir. Kaynak işlemi esnasında ve sonrasında takviye fazı şiddetli bir şekilde katılaşmayı reddetmektedir. Sonuçta mikroyapıda mikro segragasyonlar ve heterojenlikler ortaya çıkmaktadır. Bunun sonucu olarak da birleştirme kalitesi düşük olmaktadır.

Ergitme kaynaklı birleştirmelerdeki problemlerden bir diğeri de kaynak esnasında istenmeyen reaksiyonların oluşmasıdır. Ergitme kaynaklarında, yüksek sıcaklık nedeniyle ana malzemenin özellikleri etkilenir. Erimiş malzemedde havanın ve dış etmenlerin etkisiyle zararlı kimyasal reaksiyonlar oluşmaktadır.

Ergitme kaynak yöntemlerinde oluşması muhtemel birleştirme problemlerden dolayı; Al ve alaşımları katı hal birleştirme yöntemleri ile birleştirmenin daha avantajlı olduğunu son araştırmalar ortaya koymuştur.

Bu çalışmada ergitme kaynağı ile birleştirilmesi çok özel şartlarda yapılabilen hadde ürünü ticari AA 6061 ve AA 7075 malzeme çiftinin, bir katı hal birleştirme yöntemi olan, sürtünme kaynağıyla normal ortamda optimum birleşme şartlarını belirlemek için yapılmıştır. Farklı sürtünme kaynak parametrelerinde birleştirilen AA 6061 ve AA 7075 malzeme çiftinin kaynak işleminin sonrası deney numunelerinin mikrosertlik ve mikroyapı değışiklikleri incelendi. Farklı sürtünme kaynak parametrelerinin etkisi incelendi.

5.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Deney çalışmalarında kullanılan AA 6061 ve AA 7075 malzeme çifti, Eskişehir Hava İkmal Tesisleri'nden hazır olarak temin edildi. Bu malzemelere ait kimyasal analizler Tablo 5.1. ve Tablo 5.2.'de verilmiştir. Ayrıca Tablo 5.3.'te deneyde kullanılan malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.1. AA 6061 Alaşımın Kimyasal Analizi

Al	Fe	Si	Ti	Mn	Zn	Cu	Mg	Ni	Cr	Diğeri
95.8-98.6	Max 0.7	0.4 - 0.8	Max 0.15	Max 0.15	Max 0.25	0.15 - 0.4	0.8 - 1.2	Max 0.05	0.04 - 0.35	Max 0.15

Tablo 5.2. AA 7075 Alaşımın Kimyasal Analizi

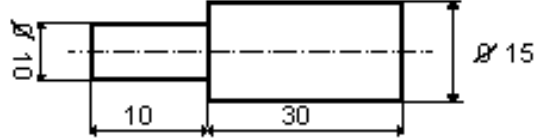
Al	Fe	Si	Ti	Mn	Zn	Cu	Mg	Ni	Cr	Diğeri
87.1 - 91.4	Max 0.5	Max 0.4	Max 0.2	Max 0.3	5.1 - 6.1	1.2 - 2	2.1 - 2.9	Max 0.05	0.18 - 0.28	Max 0.15

Tablo 5.3. Deney Malzemelerin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

Malzeme	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Akma Dayanımı (MPa)	Elastikte Modülü (GPa)	Sertlik (HV)	Özgöl Ağırlık (kg/m ³)	Elektriksel İletkenlik (% IACS)	Isıl İletkenlik (W m ⁻¹ K ⁻¹)
AA6061	235	21	140	70	75	2700	40	155
AA7075	570	10	505	72	150	2810	33	134

5.3. Sürtünme Kaynağı Deneylerinin Yapılışı

Deney çalışmalarında kullanılan AA 6061 ve AA 7075 malzeme boyutları, sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesine uygun olarak Şekil 5.1.'deki ölçülerde torna tezgahında işlenerek imal edildi.

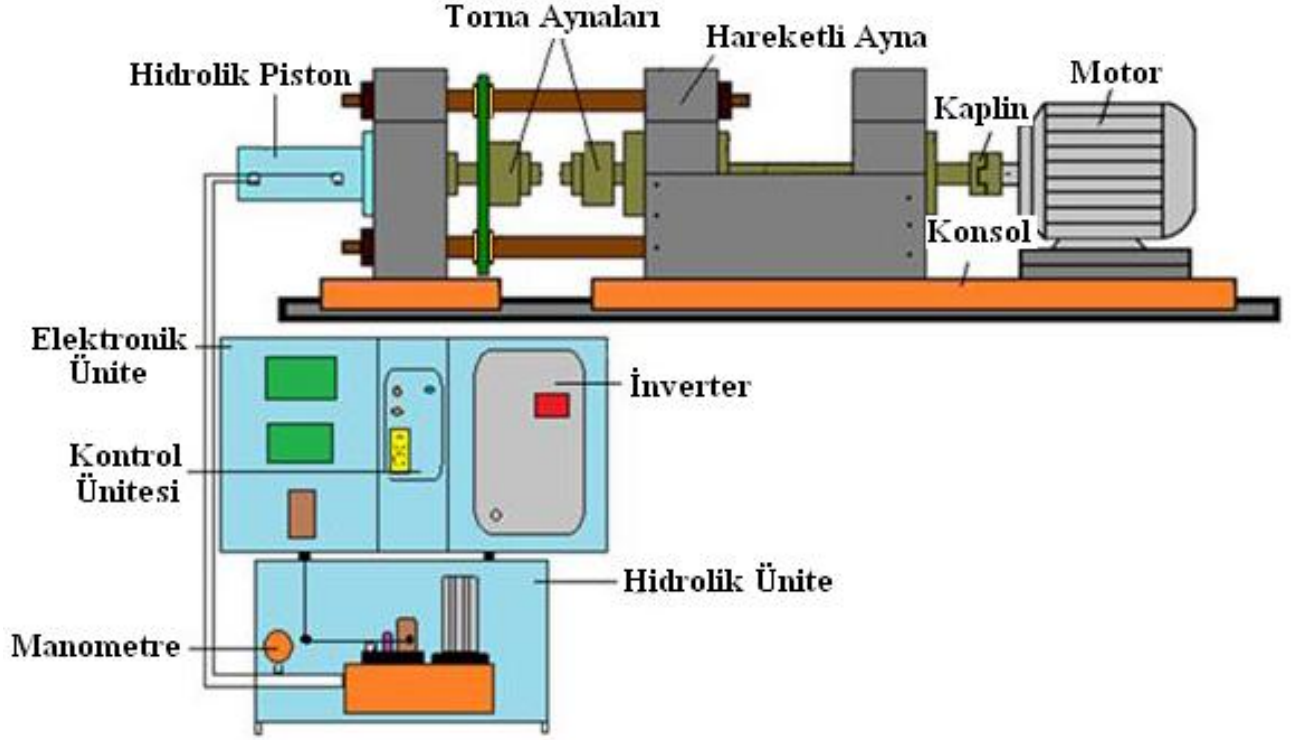


Şekil 5.1. Sürtünme Kaynağı Yapılacak Numune

Sürtünme kaynakları, Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü atölyesinde bulunan sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde yapıldı (Şekil 5.2.). Ayrıca sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesin şematik resmi Şekil 5.3'te görülmektedir.



Şekil 5.2. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynak Makinesi



Şekil 5.3. Sürtünme Kaynak Makinesinin Şematik Resmi

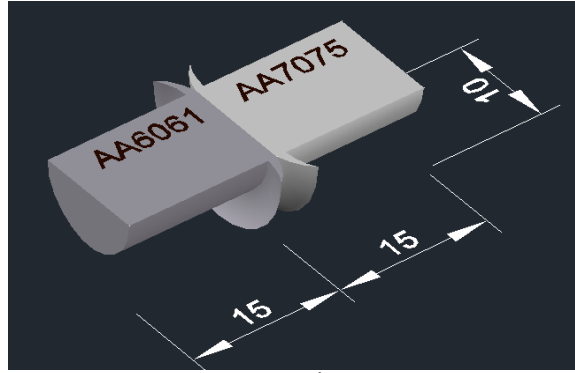
Sürtünme kaynağı uygulanacak AA 6061 ve AA 7075 malzeme çiftlerinin, birleştirme yüzeyleri 320-600-1000 ve 1200 mesh'lik zımparalarla temizlenerek yüzey pürüzlüğü minimuma indirildi. Amaç yüzey temaslarının iyi olması ve mükemmel birleşmenin sağlanmasıdır (Özdemir, 2002). Kaynak yapılacak malzeme çiftleri Tablo 5.4.'te verilmiştir.

Tablo 5.4. Sürtünme Kaynak Parametreleri

Numune No	Malzeme Çiftleri	Kaynak Parametreleri				
		Dönme Hızı (d/d)	Sürtünme Basıncı (MPa)	Sürtünme Süresi (sn)	Yığma Basıncı (MPa)	Yığma Süresi (sn)
1	AA 6061 - AA 7075	1800	25	8	40	4
2	AA 6061 - AA 7075	2000	20	8	40	4
3	AA 6061 - AA 7075	2000	25	8	40	4
4	AA 6061 - AA 7075	2200	20	8	40	4
5	AA 6061 - AA 7075	2200	25	8	40	4

5.4. Metalografik İncelemeler

Sürtünme kaynağıyla birleştirilen kaynak numuneleri, kaynak sonrası bağlantı kalitesini tespit etmek için birleşme bölgesinde metalografik incelemeler yapıldı. Bu amaçla kaynak numuneleri birleşme yüzeyine dik doğrultuda kesildi (Şekil 5.4). Kesilen bu yüzeyler 80-120-320-500-800-1000 ve 1200 meshlik zımparalardan geçirildikten sonra demir dışı malzemeler için kullanılan 1 μm 'luk elmas pasta ile parlatıldı. Numuneler daha sonra Keller dağlayıcıyla dağlandı (Geçkinli, 1989).



Şekil 5.4. Metalografik İnceleme Numunesi

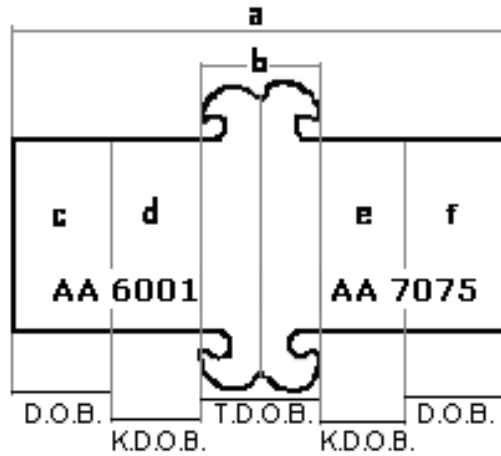
Dağlanan numunelerin, Canon marka dijital fotoğraf makinesi ile makro resimler çekildi. Optik mikroskop resimleri ise, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarındaki Nikon MA-200 marka mikroskobunda çekildi (Şekil 5.5). Ayrıca sürtünme kaynaklı numunelerin farklı bölgelerinden, İnönü Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Birimi Elektron Mikroskop Laboratuvarındaki Jeol-5600 marka Scanning Electron Microscope (SEM) ile yüzey ve noktasal Enerji dağılımlı x-ışınları analizleri (EDS) yapıldı.



Şekil 5.5. Nikon MA-200 Optik Mikroskop

Sürtünme kaynağından sonra numunelerin birleşme arayüzeylerinin mikroyapı fotoğraflarının ortak özellik olarak ana malzemeler, birleşme arayüzeyleri ve ısıdan etkilenen bölgelerin oluşmuş olmasıdır. Oluşan bu bölgeler Şekil 5.6.'daki gibi karakterize edilerek incelemeler yapılmıştır. Şekil 5.6.'ya göre;

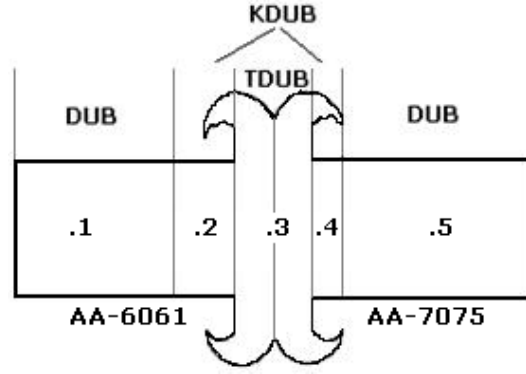
- a: Kaynak numunesinin genel görünüşü
- b: Tamamen Deforme Olmuş Bölge (TDOB)
- c: Deforme Olmamış Bölge (DOB) (AA 6061 tarafı)
- d: Kısmen Deforme Olmuş Bölge (KDOB) (AA 6061 tarafı)
- e: Kısmen Deforme Olmuş Bölge (KDOB) (AA 7075 tarafı)
- f: Deforme Olmamış Bölge (DOB) (AA 7075 tarafı)



Şekil 5.6. Numunelerinin Şematik İncelenmesi

5.5. Mikrosertlik Ölçümleri

Kaynak sonrası numunelerden 100 μm 'lık arayla aynı eksen üzerinden alınan mikrosertlik değerleri her bölge için ortalama olarak Şekil 5.7'deki gibi yapıldı. Mikrosertlik ölçümleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarındaki, "Durascan-20" marka mikrosertlik ölçme cihazında (Şekil 5.8) 100gr'lık yük uygulanarak Hv cinsinden yapılmıştır.



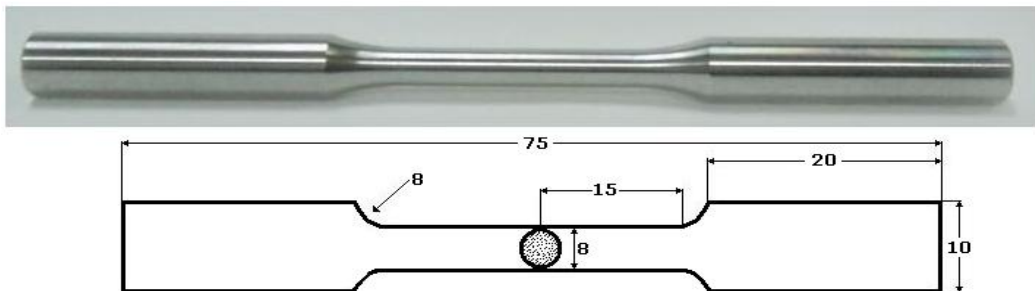
Şekil 5.7. Mikrosertlik Değerlerinin Ölçümü



Şekil 5.8. Durascan-20 Mikrosertlik Ölçüm Cihazı

5.6. Çekme Deneylerinin Ölçümleri

Sürtünme kaynağı yapılan numunelere çekme testleri uygulamak için Şekil 5.9'daki gibi standartlara uygun çekme testi numuneleri hazırlandı. Hazırlanan çekme testi numunelerine uygulama, 5 mm/dk'lık deformasyon hızlarıyla Shimadzu AG-X marka 50 kN kapasiteli çekme test cihazında yapıldı (Şekil 5.10). Test cihazından elde edilen veriler Trapezium-X yazılımı yardımı ile Kuvvet-Uzama ve Gerilme-% Uzama eğrilerine dönüştürüldü. Çekme testleri ASTM C 633 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.9. Çekme Numunesi(ASTM C 633)



Şekil 5.10. Shimadzu AG-X Çekme Testi Cihazı

Kırık yüzey numuneleri için de İnönü Üniversitesi Merkezi Laboratuar Birimi Elektron Mikroskop Laboratuarındaki Jeol-5600 marka Scanning Electron Microscope (SEM) ile yüzey fotoğrafları çekildi (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Jeol-5600 SEM Mikroskobu

6. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

6.1. Metalografik İncelemeler

Sürtünme kaynak sonrası numunelerin birleşme arayüzeyleri makro olarak gözlemlendiğinde tüm numune çiftlerinde tam bir birleşmenin yaklaşık olarak sağlandığı tespit edildi.

Sürtünme kaynak sonrası numunelerin makro incelemeleri gözlemlendiğinde tüm numune çiftlerinde boyca kısalmaların olduğu tespit edildi. Boyca kısalmaların ne kadar olduğu kumpas yardımıyla ölçülerek Tablo 6.1’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Numunelerinin Boyca Kısalma Miktarı

Numune No	Boyca Kısalma (mm)
1	2,3
2	2,6
3	3,1
4	3,3
5	3,5

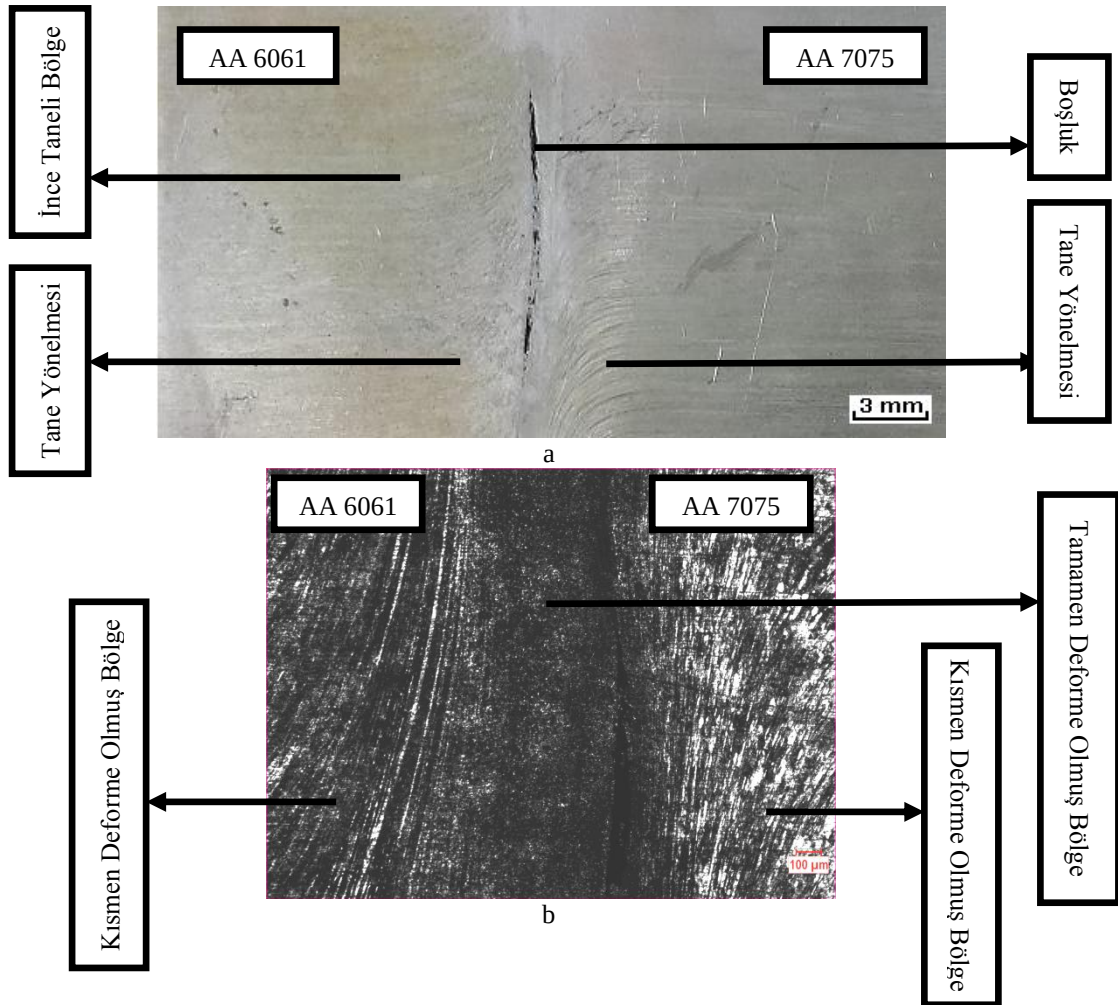
Numunelerdeki boyca kısalmaların doğrusal bir artış gösterdiği gözlenmektedir. Bu durumun en büyük nedenlerinden biri olarak sürtünme kaynak parametrelerinden olan dönme hızıdır. Artan dönme hızına bağlı olarak malzeme çiftlerindeki deformasyonun artışı göze çarpmaktadır. Aynı dönme hızlarına sahip numunelerde ise boyca kısalmanın artışını yüksek sürtünme basıncının olduğu tespit edildi. Çünkü aynı kaynak parametrelerine sahip olan 2 ve 3 nolu numunelerle 4 ve 5 nolu numuneler arasındaki tek farklılığın 5 MPa’lık sürtünme basıncı olduğu görülmektedir.

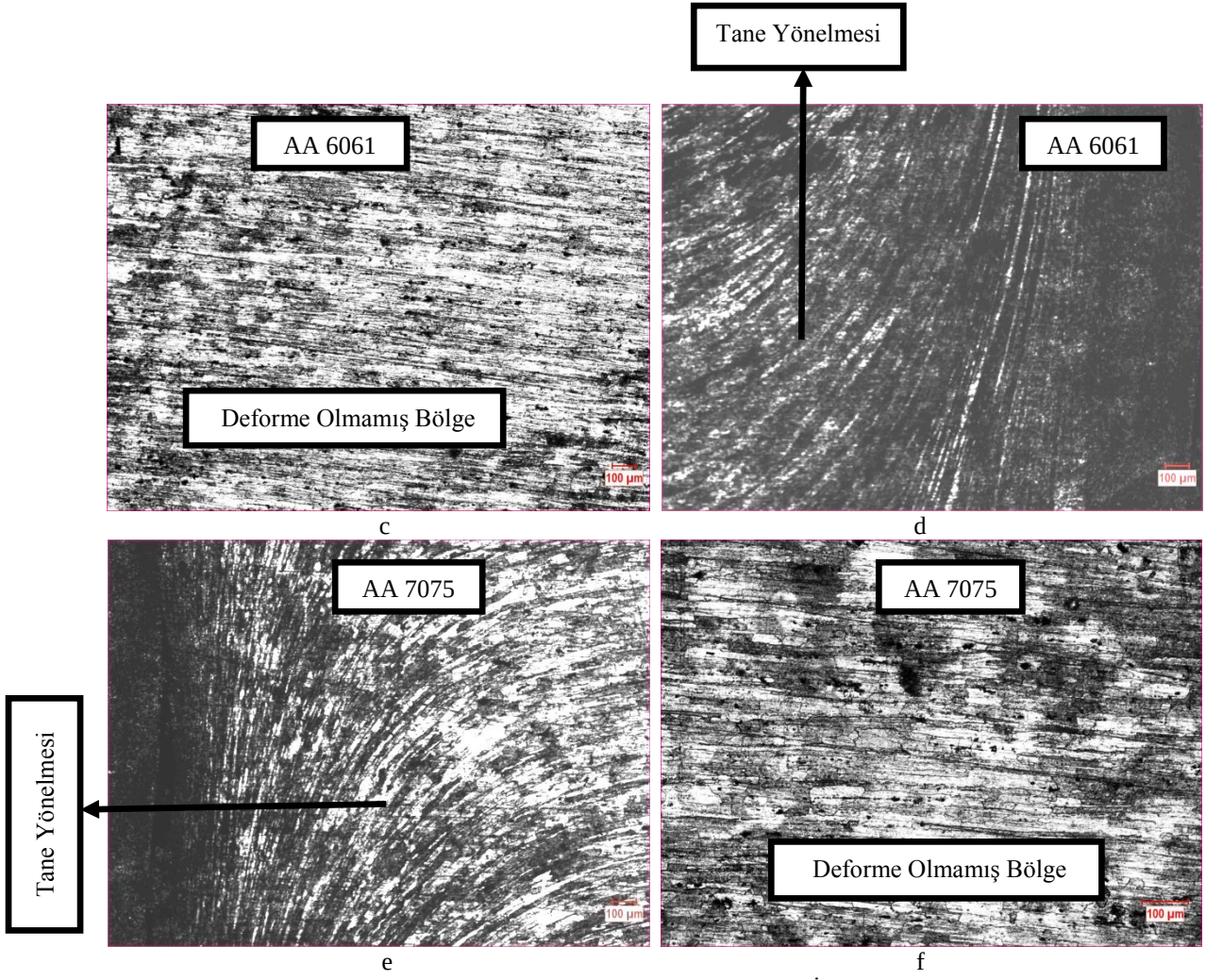
Malzeme çiftleri arasında deformasyonun en çok AA 6061 tarafında olduğu görüldü. Bunun nedeni olarak AA 7075 malzemesinin AA 6061’e göre yüksek sertlik ve yüksek çekme-akma dayanımlarının olduğu tespit edildi.

6.1.1. 1 Nolu Numunenin Metalografik İncelemesi

1 nolu numuneye ait optik mikroskop resimleri Şekil 6.1’de görülmektedir. Şekil 6.1.a incelendiğinde birleşme bölgesinin tamamen oluşmadığı arayüzeydeki büyük boşluktan anlaşılmaktadır. Birleşme tam olarak gerçekleşmediğinde oluşan bu durum, 1

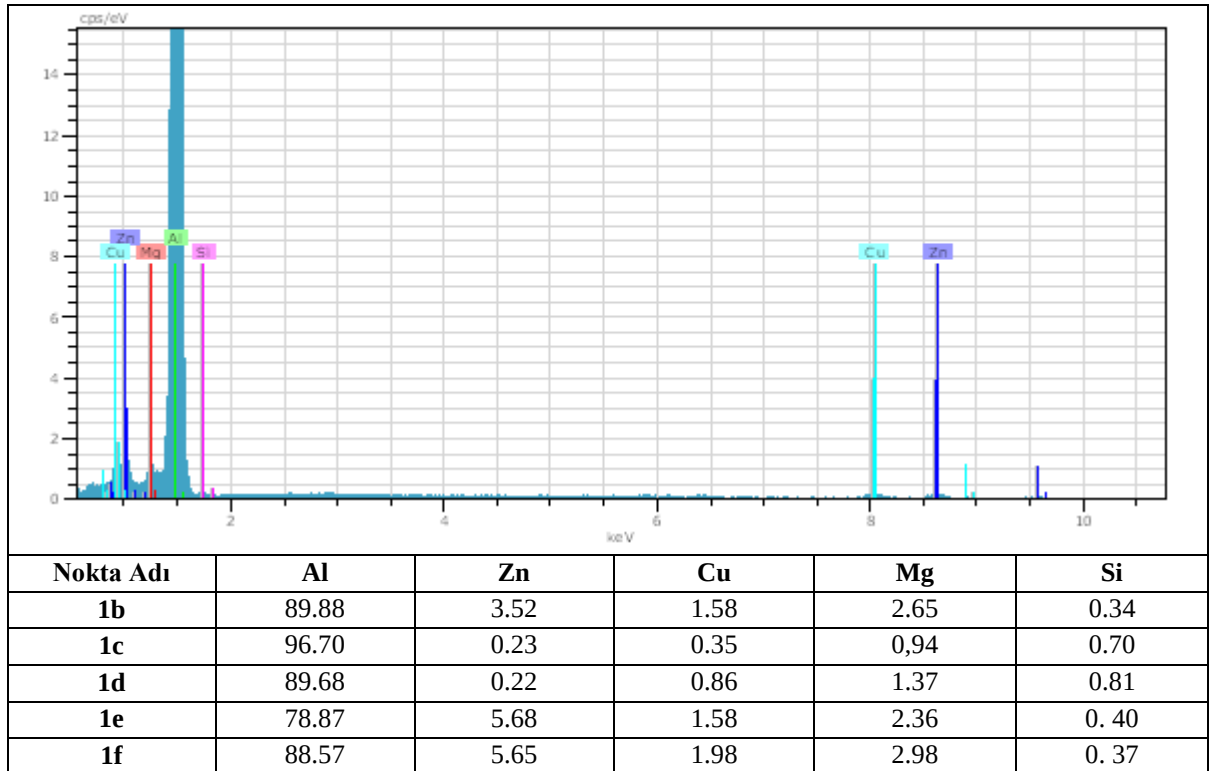
1 nolu numuneye ait olan düşük dönme hızından kaynaklanmaktadır. Literatür çalışmalarının çoğunda, özellikle demir dışı malzemeler için en az 2000 devir/dakika'lık dönme hızının kullanılması da bunu doğrulamaktadır. Şekil 6.1.b incelendiğinde ise mikron düzeyinde de olsa kısmen bir birleşme gerçekleşmiştir. Ancak bu birleşme tam manasıyla arayüzeyin orta bölgesinde gerçekleşmemiştir. Sadece malzeme uçlarında gerçekleşen birleşmenin yığılma süresine bağlı olarak çok az bir bölgede gerçekleşmiştir. Şekil 6.1.d ve e resimleri detaylı incelendiğinde yığılma basıncına bağlı olarak tane yönelmelerini görmekteyiz. Tane yönelmelerine en etkin sürtünme kaynak parametresi sürtünme basıncıdır. 1 nolu numune için kullanılan 25 MPa'lık sürtünme basıncı, düşük dönme hızına rağmen malzeme çiftlerindeki tane yönelmelerini net olarak göstermektedir. Şekil 6.1.c ve f resimlerinde ise ana yapının olduğu gibi varlığını ve mevcut durumunu koruduğu gözlemlendi. Ayrıca 1 nolu numunenin üzerinden alınan EDS analizleri Tablo 6.2'de gösterilmiştir.





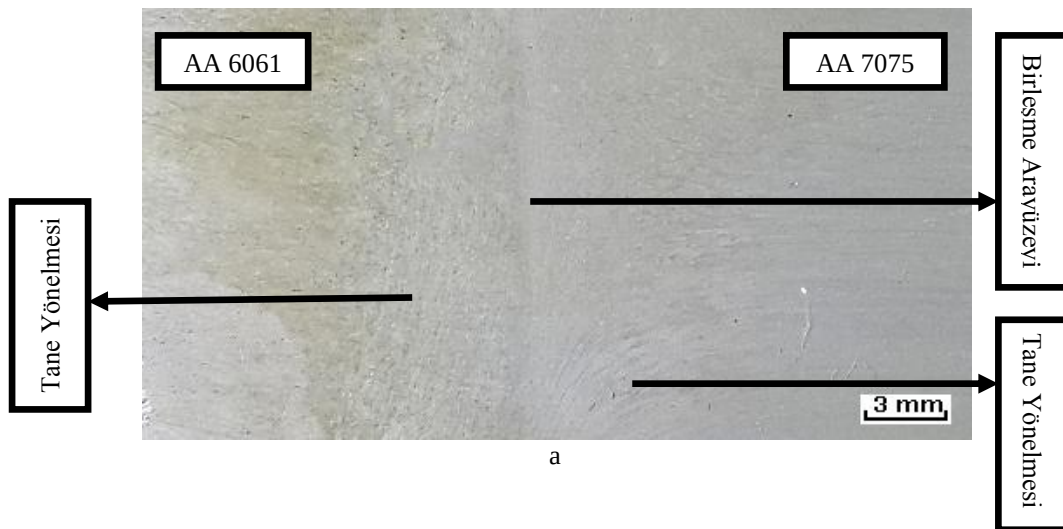
Şekil 6.1. 1 Nolu Numunenin Metalografik İncelenmesi

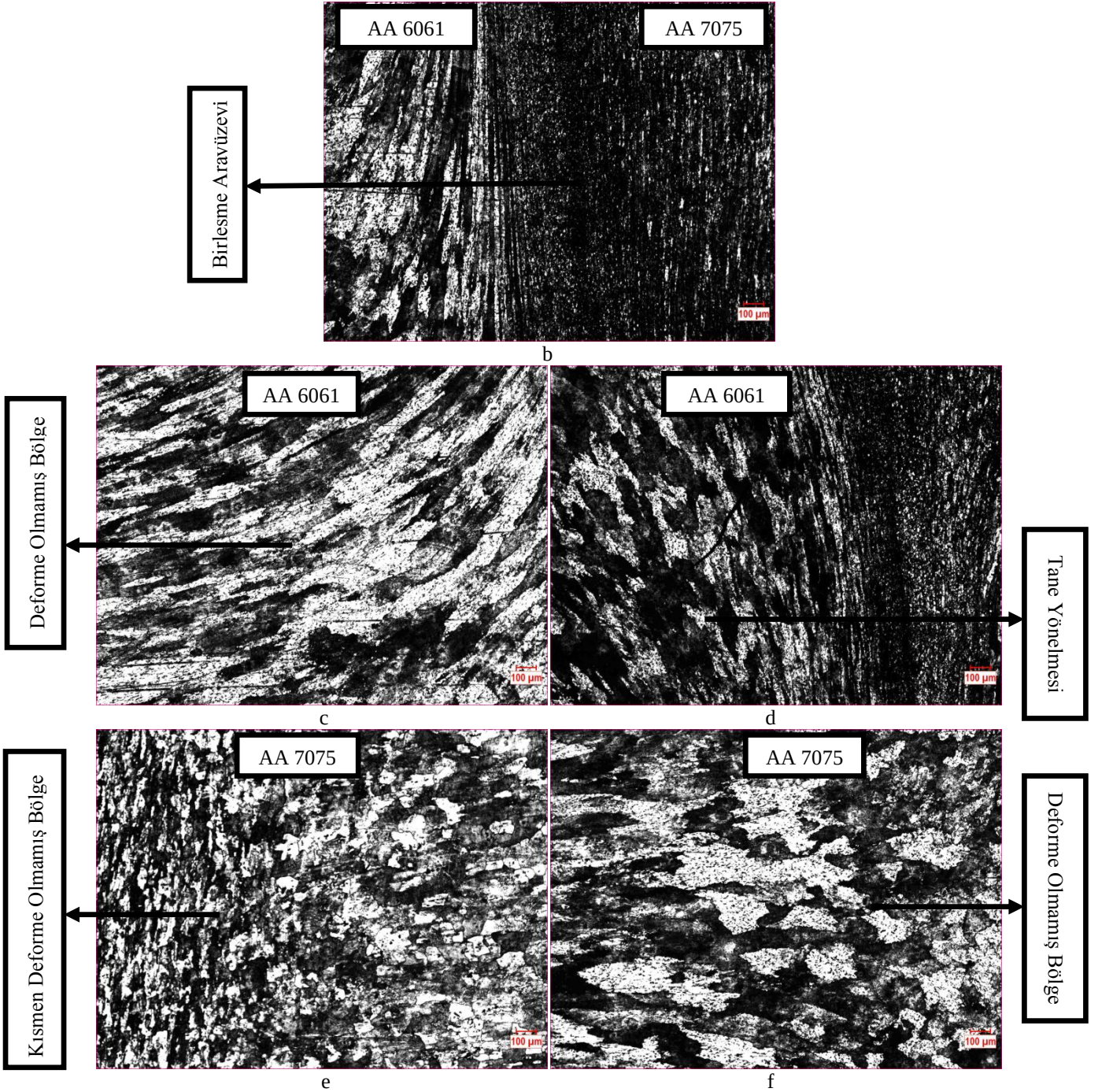
Tablo 6.2. 1 Nolu Numunenin EDS Analizleri



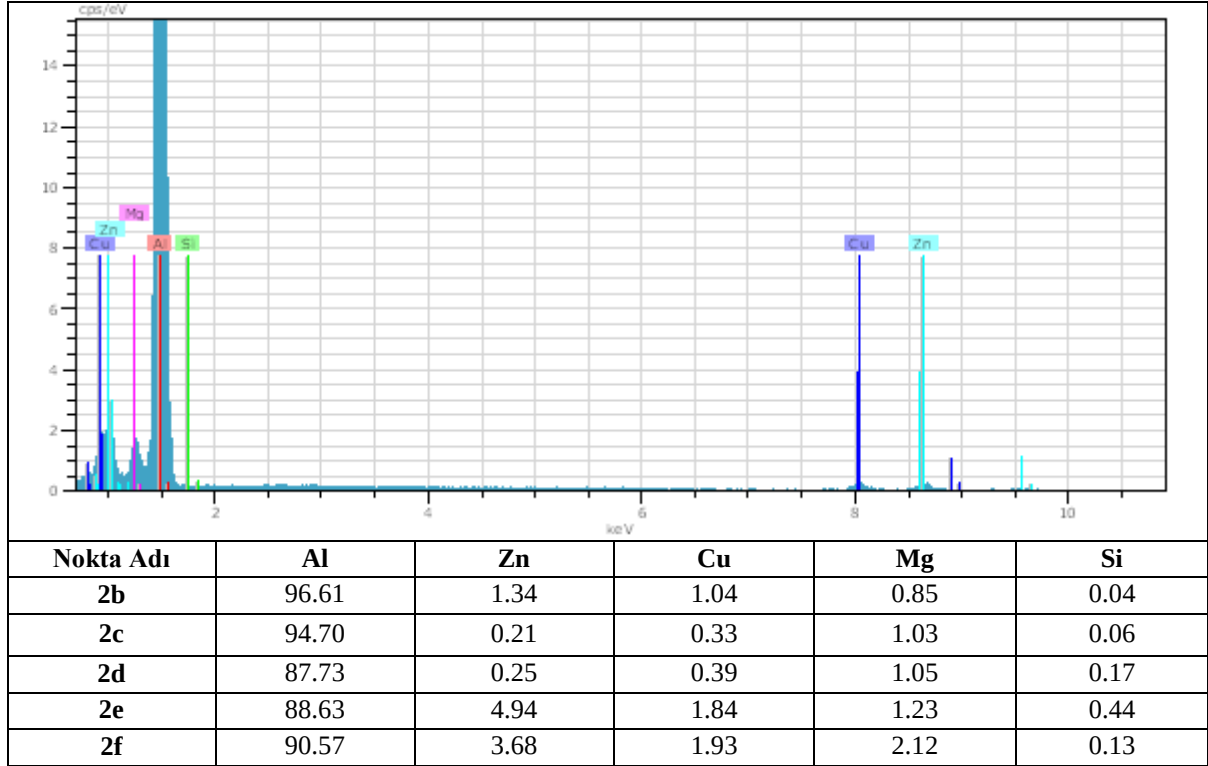
6.1.2. 2 Nolu Numunenin Metalografik İncelemesi

2 nolu numuneye ait optik mikroskop resimleri Şekil 6.2’de görülmektedir. Şekil 6.2.a detaylı olarak incelendiğinde birleşme bölgesinin tüm arayüzey boyunca olduğu görülmektedir. Birleşme tam olarak gerçekleştiğinden 1 nolu numunede görülen boşluklar 2 nolu numunenin arayüzeyinde görülmemektedir. Bu durum 2000 devir/dakika’lık dönme hızının malzeme çiftlerinin birleşmesi için yeterli olduğunu göstermektedir. Şekil 6.2.b incelendiğinde arayüzeydeki birleşmenin tam manasıyla gerçekleştiği görülmektedir. Oluşan bu birleşme tüm arayüzey düşey doğrultusu boyuncadır. Kısmen deforme olmuş bölgelere ait olan Şekil 6.2.d ve e resimleri incelendiğinde AA 6061 tarafında yığma basıncının etkisiyle tane yönelimleri tam manasıyla görünürken AA 7075 tarafında bu durum net olarak görülmemektedir. Bu durum 20 MPa’lık sürtünme basıncının AA 7075 için yeterli olmadığını göstermektedir. Deforme olmamış bölge olan c ve f alanına ait Şekil 6.2.c ve f resimler incelendiğinde AA 6061 malzemesine ait c alanında kısmen tane yönelimlerin varlığı söz konusudur. Bu durum AA 6061 malzemesinin mekanik özellikleri ve kimyasal yapısındaki alüminyum oranının fazlalığından kaynaklanmaktadır. Ancak aynı durum AA 7075 tarafındaki deforme olmamış bölgede ana yapının orijinal mikroyapı varlığını koruduğu gözlemlendi. Bu durumu da AA 7075 malzemesinin üstün mekanik özelliklerine bağlamak mümkündür. Ayrıca 2 nolu numunenin üzerinden alınan EDS analizleri Tablo 6.3’de gösterilmiştir.





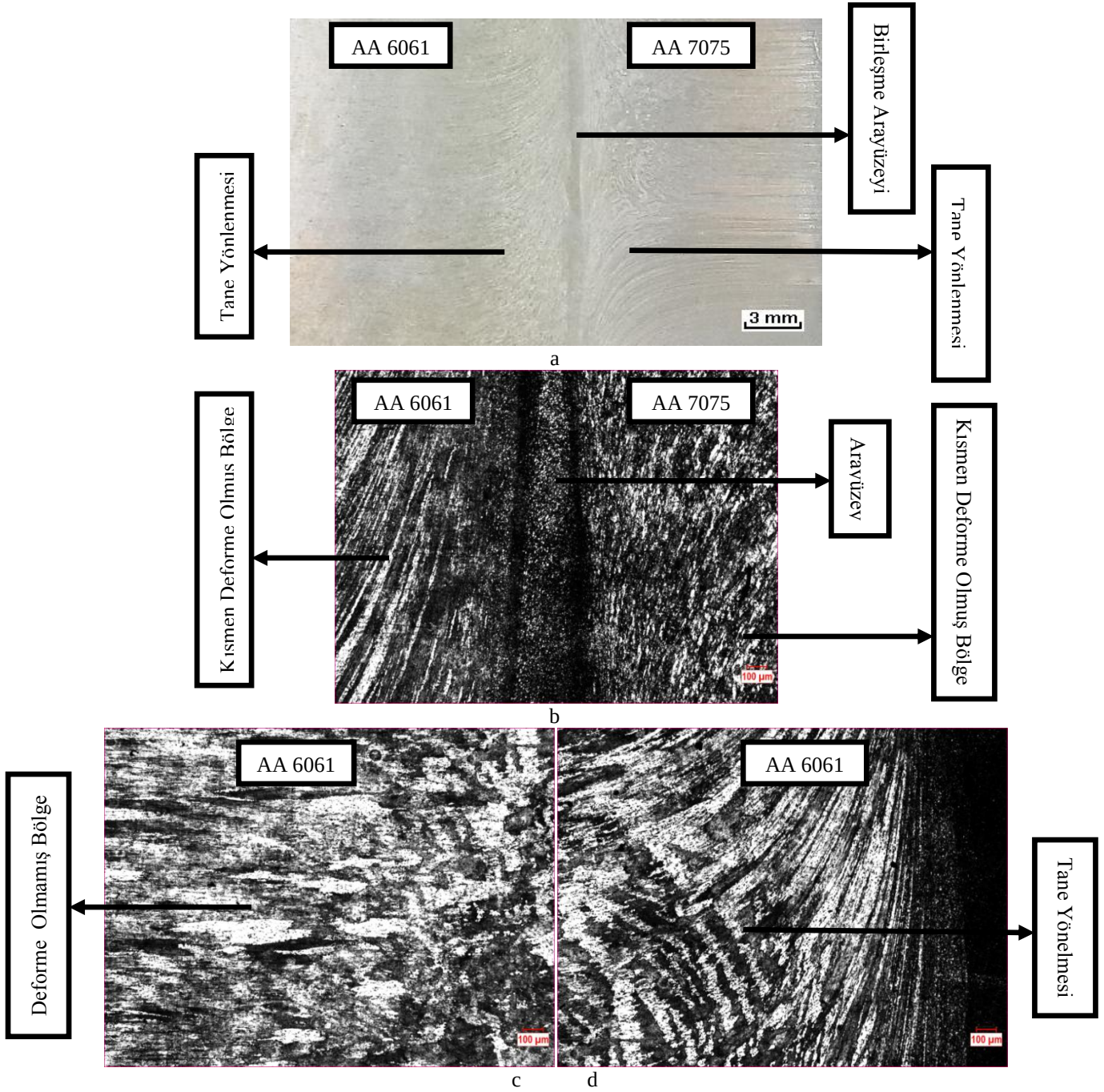
Şekil 6.2. 2 Nolu Numunenin Metalografik İncelenmesi

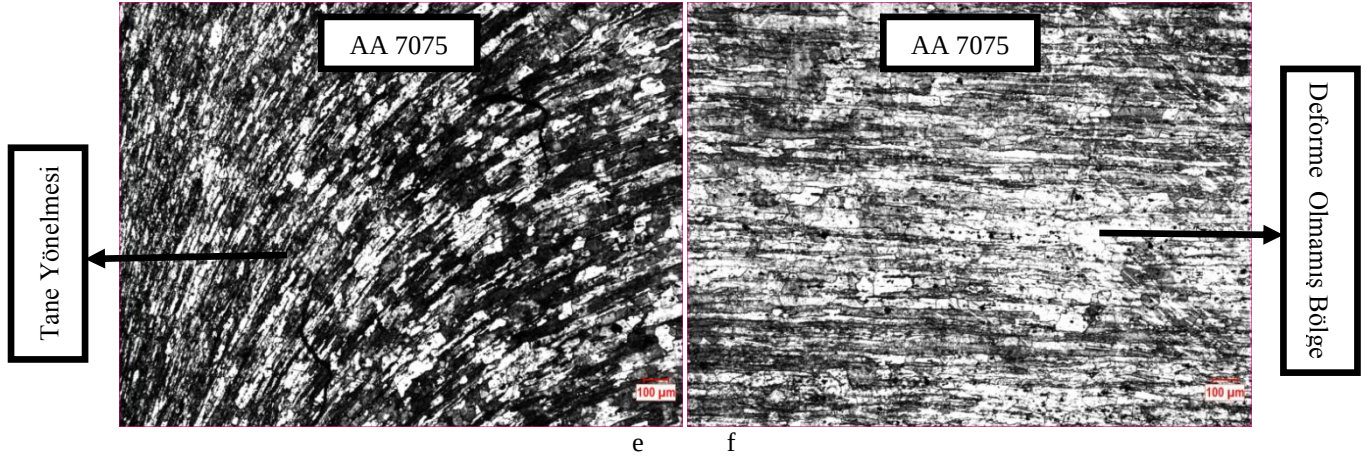
Tablo 6.3. 2 Nolu Numunenin EDS Analizleri

6.1.3. 3 Nolu Numunenin Metalografik İncelemesi

Şekil 6.3'te 3 nolu numuneye ait optik mikroskop resimleri görülmektedir. 2000 devir/dakika dönme hızında ve 25 MPa'lık sürtünme basıncı altında sürtünme kaynağı yapılan 3 nolu numunenin tamamını gösteren Şekil 6.3.a incelendiğinde birleşme bölgesinin düşey olarak tüm arayüzey boyunca olduğu görülmektedir. 3 nolu numunede birleşme tam olarak gerçekleşmiş, boşluk yada çatlak gibi olumsuz durumlar gözlenmemektedir. 2000 devir/dakika'lık dönme hızının malzeme çiftlerinin birleşmesi için oldukça yeterli olduğu tespit edildi. Tamamen deforme olmuş bölgeye ait olan Şekil 6.3.b resminde tam bir birleşmeye sahip arayüzey görülmektedir. Resmin düşey doğrultusu boyunca görülen arayüzeyin ortalama genişliği yaklaşık 200 μm civarındadır. Ayrıca arayüzeyin bu kadar geniş olmasını diğer iki numuneden farklı olarak yüksek çevresel hız ve sürtünme basıncı gibi kaynak parametrelerine bağlamak mümkündür. 3 nolu numunenin tamamen deforme olan bölgesinde karşılıklı malzeme difüzyonu da söz konusudur. AA 6061 malzemesinin kısmen deforme olmuş bölgesine ait olan Şekil 6.3.d resminde arayüzeye yakın yerlerde tane yöneliminin yaklaşık 90° civarında olduğu izlenmektedir. Bu durumu da 2 nolu numuneden farklı olarak artan sürtünme basıncına bağlamak mümkündür. AA 7075 malzemesinin kısmen deforme olmuş bölgesine ait olan Şekil 6.3.e

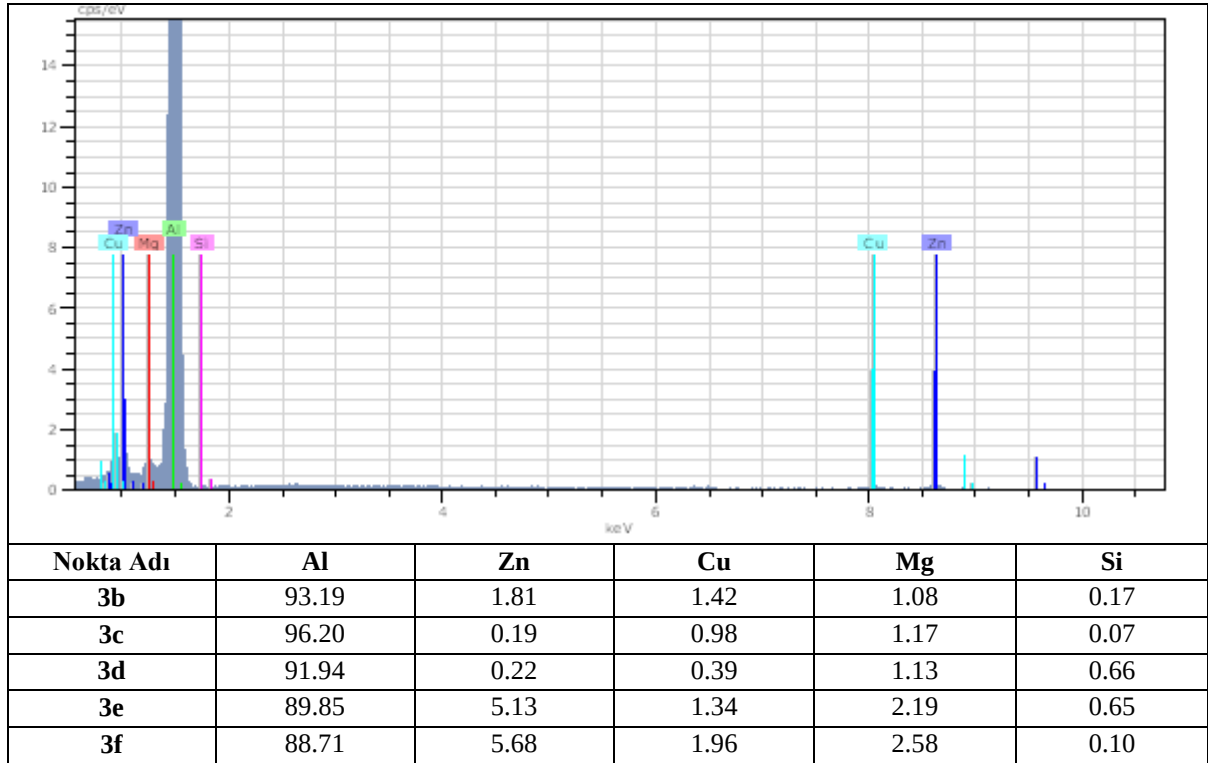
resminde diğ er numunelere göre tane yönelmelerinin miktarı ve açısının arttığı izlendi. Bu durumu 2000 devir/dakika'lık dönme hızına ve 25 MPa'lık sürtünme basıncına bağlamak mümkündür. Deforme olmamış bölgelere ait Şekil 6.3.c ve f resimler incelendiğinde her iki malzemeninde kısmen tane yönelmelerin varlığı söz konusudur. Ancak genelde ise bu durumun orijinal ana mikroyapı varlığı izlendi. Ayrıca 3 nolu numunenin üzerinden alınan EDS analizleri Tablo 6.4'de gösterilmiştir.





Şekil 6.3. 3 Nolu Numunenin Metalografik İncelenmesi

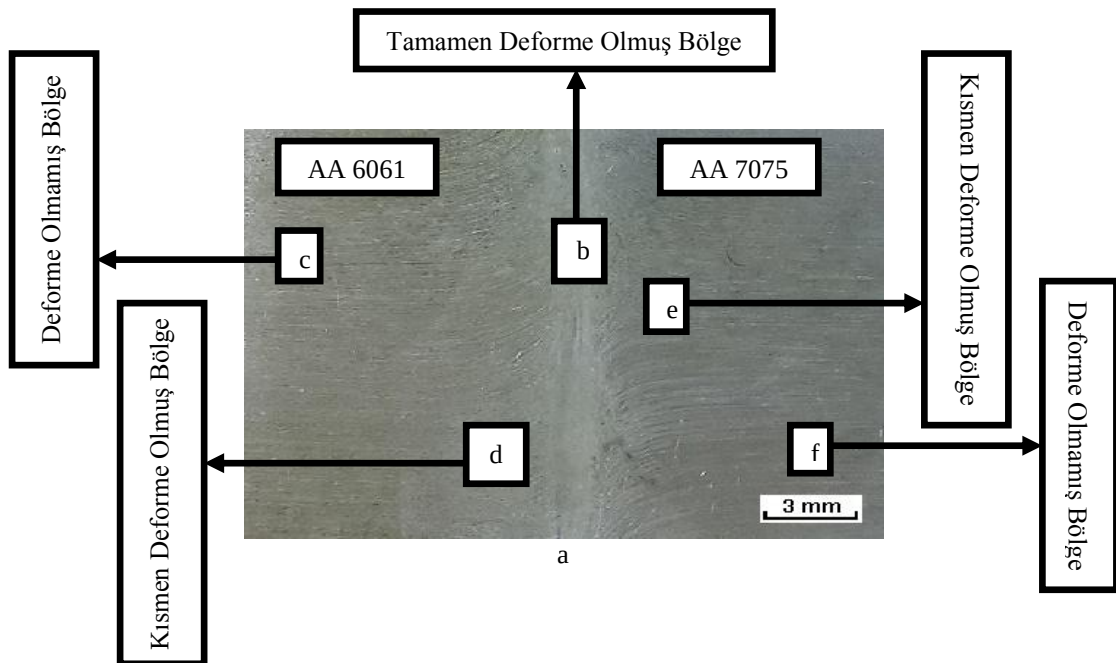
Tablo 6.4. 3 Nolu Numunenin EDS Analizleri

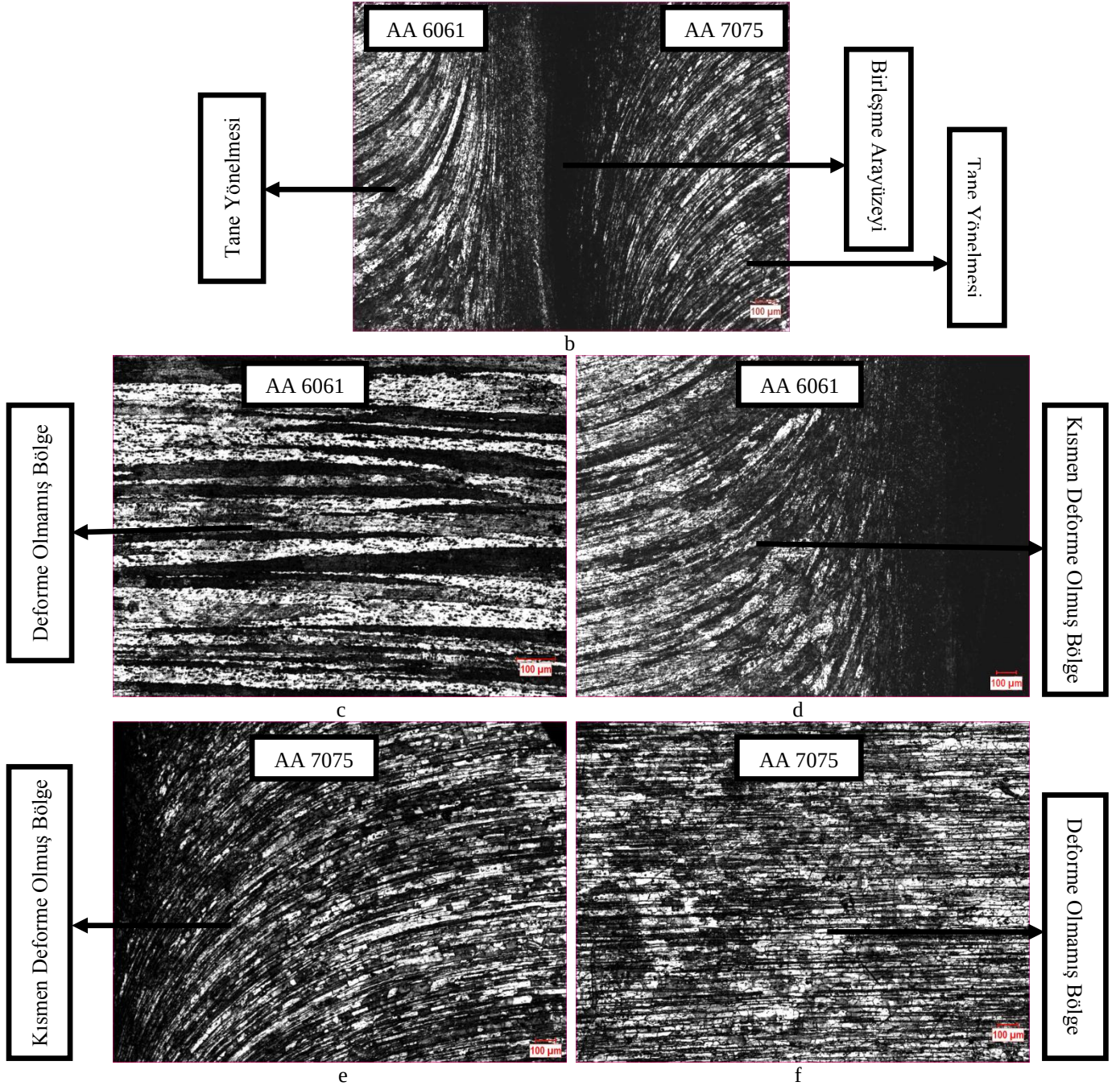


6.1.4. 4 Nolu Numunenin Metalografik İncelemesi

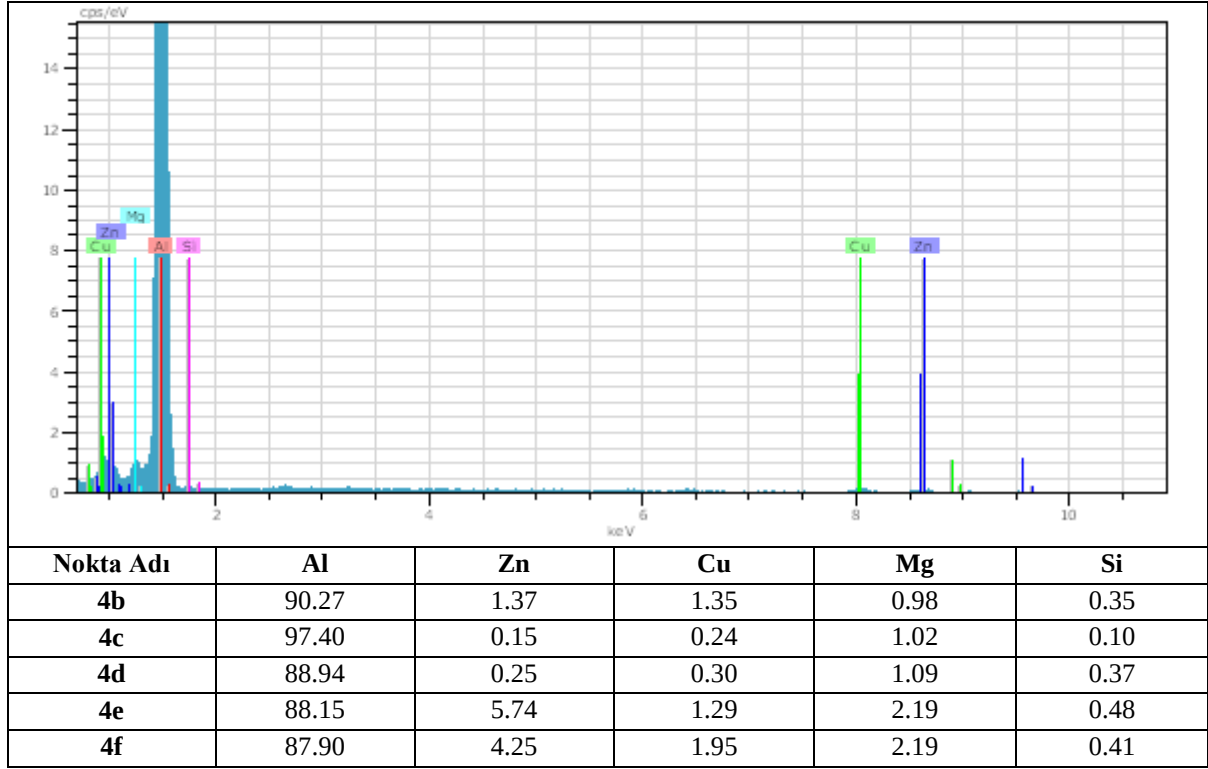
Şekil 6.4'te 4 nolu numuneye ait optik mikroskop resimleri görülmektedir. 2200 devir/dakika dönme hızında ve 20 MPa'lık sürtünme basıncı altında sürtünme kaynağı yapılan 4 nolu numunenin tamamını gösteren Şekil 6.4.a incelendiğinde birleşme tamamen gerçekleşmiş ve bu bölgenin arayüzey boyunca tam olarak oluştuğu görülmektedir. 4 nolu numunede de birleşme arayüzeyinde boşluk yada çatlak gibi olumsuz durumlar gözlenmemiştir. 4 nolu numunenin tamamen deforme olmuş bölgesine ait olan Şekil 6.4.b resminde tam bir birleşmeye sahip arayüzey görülmektedir. 4 nolu numunede görülen

arayüzeyin ortalama genişliği yaklaşık olarak 100 µm civarındadır. Ancak bu birleşme yüzeyinin ortalarında daha az bir mesafeye denk gelmektedir. Artan devir sayısının arayüzeyde birleşme mesafesini düşürdüğünü söylemek mümkündür. Ancak arayüzeyin yığılma basıncının etkisiyle flaşların oluştuğu alt ve üst bölgelerde ise arayüzey mesafesinin 100 µm'den fazla olduğu görülmektedir. Bu durum AA 7075 malzemesine göre düşük fiziksel özelliklere sahip AA 6061 malzemesi tarafında daha fazladır. 4 nolu numunenin tamamen deforme olan bölgesinde karşılıklı malzeme difüzyonu da söz konusudur. Ancak bu durum 3 nolu numunedeki kadar değildir. AA 6061 malzemesinin kısmen deforme olmuş bölgesine ait olan Şekil 6.4.d ve f resimlerinde ise arayüzeye yakın yerlerde tane yönelmelerinin AA 6061 tarafında daha az iken AA 7075 tarafında yaklaşık 90° civarında olduğu izlenmektedir. Bu durumu da AA 6061 malzemesinin AA 7075 malzemesine göre daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip olmasındandır. Bu olumsuz durumu 3 nolu numuneden farklı olarak artan sürtünme basıncına bağlamak mümkündür. AA 6061 ve AA 7075 malzemelerinin deforme olmamış bölgelerine ait Şekil 6.4.c ve f resimler incelendiğinde her iki malzemenin de kısmen tane yönelmelerin varlığı söz konusudur. Bu durum Şekil 6.4.c'de de görüleceği üzere AA 6061 tarafında daha fazladır. Bu durumu da AA 6061 malzemesinin AA 7075 malzemesine göre yarı değerindeki çekme dayanımı ve sertliği ile ilgilidir. Ancak genelde olarak deforme olmamış bölgelerde ana mikroyapının orijinale yakın olduğu izlendi. Ayrıca 4 nolu numunenin üzerinden alınan EDS analizleri Tablo 6.5'de gösterilmiştir.





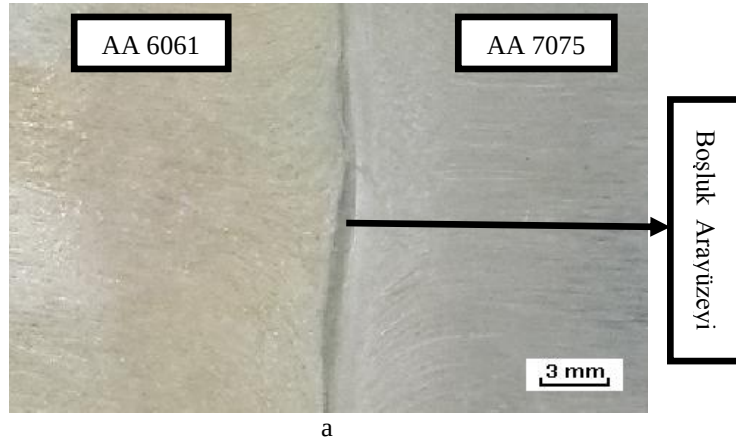
Şekil 6.4. 4 Nolu Numunenin Metalografik İncelenmesi

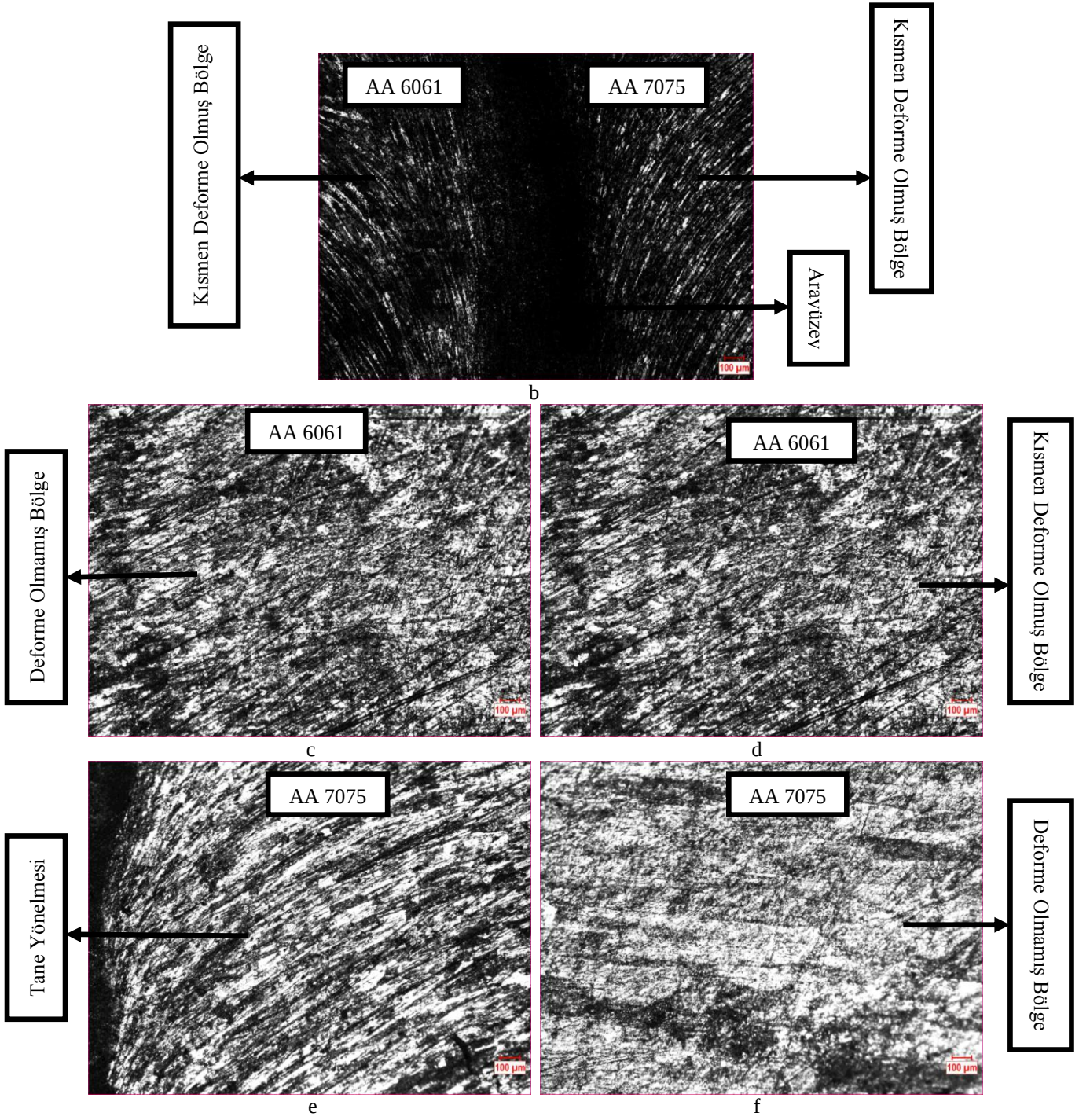
Tablo 6.5. 4 Nolu Numunenin EDS Analizleri

6.1.5. 5 Nolu Numunenin Metalografik İncelemesi

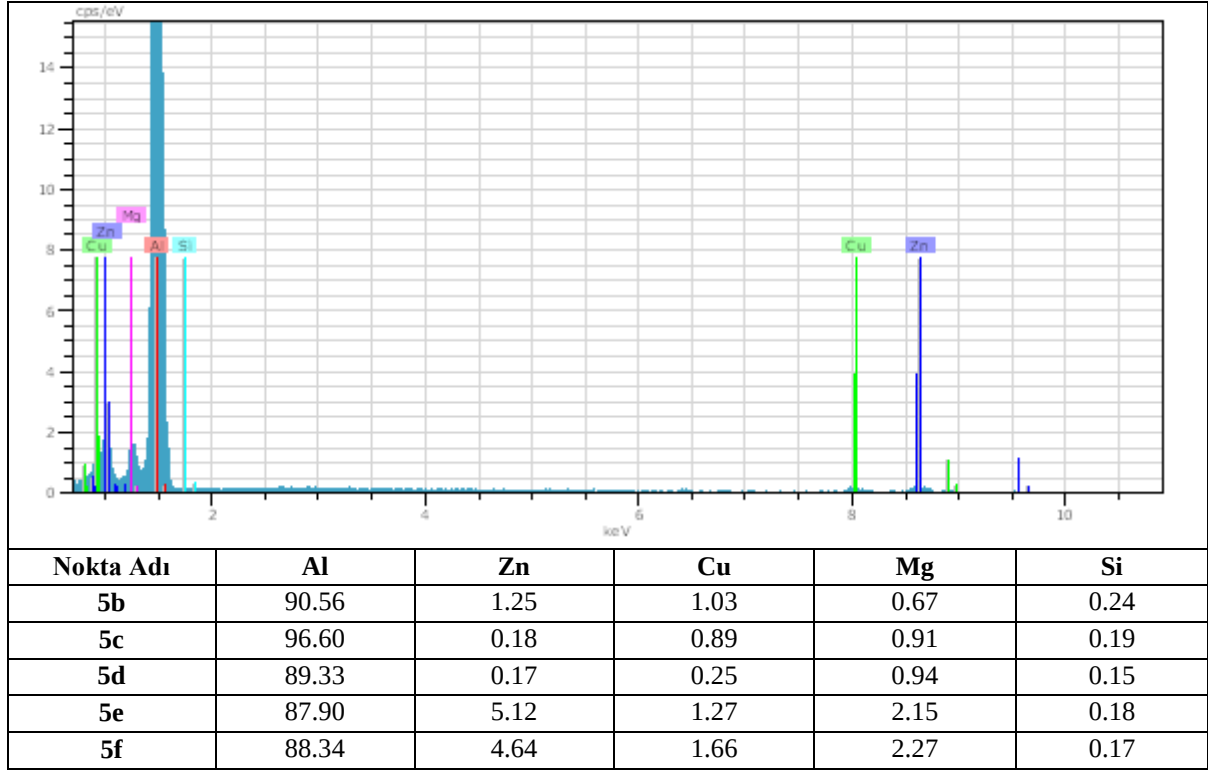
5 nolu numuneye ait optik mikroskop resimleri Şekil 6.5'te görülmektedir. 2200 devir/dakika dönme hızında ve 25 MPa'lık sürtünme basıncı altında sürtünme kaynağı yapılan 5 nolu numunenin tamamını gösteren Şekil 6.5.a incelendiğinde birleşme kısmen gerçekleşmiş ve çatlakla boşlukların arayüzeyin tamamında görüldüğü tespit edildi. Dönme hızının ve ardından sürtünme basıncının birlikte yüksek değere sahip olmasından dolayı birleşmenin olduğu ancak daha sonra yapılan deneylerle bu alandaki mukavemetin birleşme kalitesi için çokta önemli bir değere ulaşmadığı tespit edildi. 5 nolu numunede birleşme arayüzeyinde boşluk ve çatlak gibi olumsuz durumlar en çok izlenen numune olarak gözlenmiştir. Kısmen birleşme gerçekleşmişse de, oluşan bu bölgenin arayüzey mukavemeti oldukça düşüktür. Bu durumun en önemli sebebi; yüksek dönme hızıyla bir arada olan aşırı sürtünme basıncının, birlikte olan etkisidir. 5 nolu numunenin Şekil 6.5.b'deki tamamen deforme olmuş bölgesine ait resimde tam bir birleşmeye sahip arayüzey görülmemektedir. Arayüzeyin ortasındaki büyük boşluklar oldukça göze çarpmaktadır. Kısmen oluşan birleşmelerdeki arayüzeyin ortalama genişliği yaklaşık olarak 100 μm civarındadır. Ancak bu birleşme yüzeyinin ortalarında değil de malzeme çiftlerin arayüzey kenarlarına (flanş) denk gelmektedir. Ayrıca artan devir sayısının

arayüzeyde birleşme mesafesini düşürdüğü görülmektedir. Ancak arayüzeyin yığma basıncının etkisiyle flaşların olduğu alt ve üst bölgelerde ise arayüzey mesafesinin 100 μm 'den fazla olduğu görülmektedir. Bu durum AA 7075 malzemesine göre düşük fiziksel özelliklere sahip AA 6061 malzemesi tarafında daha fazla olduğu görüldü. AA 6061 malzemesinin kısmen deforme olmuş bölgesine ait olan Şekil 6.5.d resminde tane yönelmelerinin tam olarak görülmediği izlendi. Ancak Şekil 6.5.e resminde ise arayüzeye yakın yerlerde tane yönelmelerinin AA 7075 tarafında daha fazla olduğu izlenmektedir. Bu durum yüksek dönme hızından dolayı mekanik özellikleri AA 7075 malzemesine göre daha düşük olan AA 6061 malzemesinin tarafında deformasyonun çok daha fazla olmasına AA 7075 malzemesinin ise zorlanarak tane yönelmelerine yol açmasına neden olmaktadır. Bu olumsuz durumu 2 ve 3 nolu numuneden farklı olarak artan devir sayısına bağlamak mümkündür. AA 6061 ve AA 7075 malzemelerinin deforme olmamış bölgelerine ait Şekil 6.5.c ve f resimler incelendiğinde her iki malzemenin de kısmen tane yönelmelerin varlığı söz konusudur. Şekil 6.5.c'de de görüleceği üzere AA 6061 tarafındaki deformasyonun daha fazla olduğu görülmektedir. Genelde olarak deforme olmamış bölgelerde ana yapının var olan mikroyapı özelliklerini koruduğu gözlemlendi. Ayrıca 5 nolu numunenin üzerinden alınan EDS analizleri Tablo 6.6'da gösterilmiştir.





Şekil 6.5. 5 Nolu Numunenin Metalografik İncelenmesi

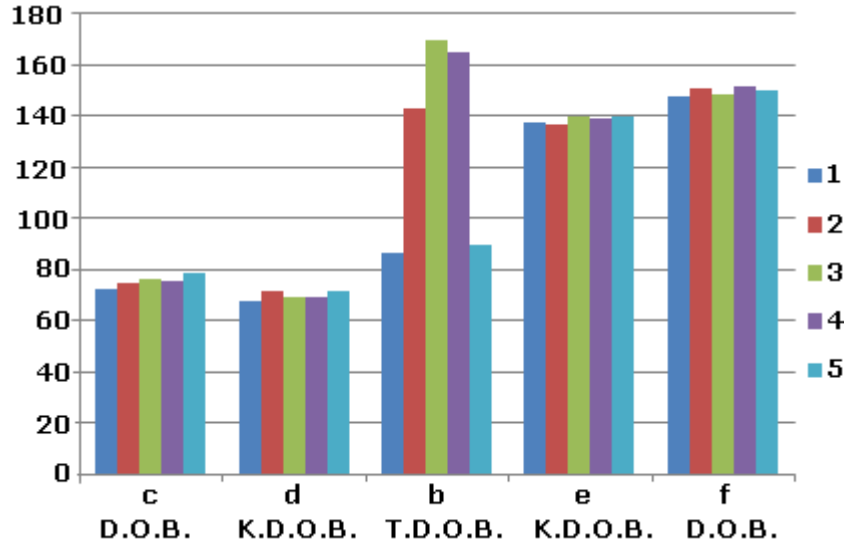
Tablo 6.6. 5 Nolu Numunenin EDS Analizleri

6.2. Deney Numunelerinin Mikrosertlik Sonuçları

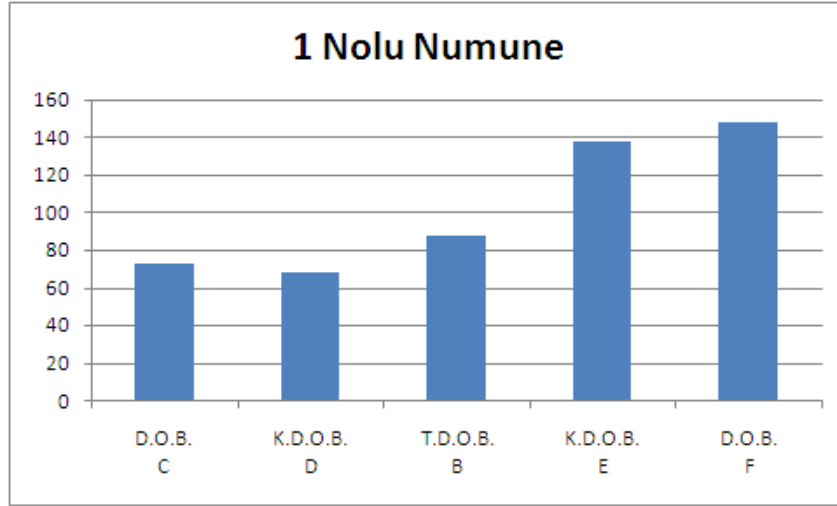
Sürtünme kaynağı ile birleştirilen numunelerin mikrosertlik değerleri ortalama olarak bölgesel bir şekilde Tablo 6.2’de grafikleri ise Şekil 6.6’da verilmiştir. Genel olarak tüm numunelerde tamamen deforme olmuş bölgede ve özellikle arayüzeyde belirgin bir sertlik artışı görülmektedir. Ancak 1 ve 5 nolu numunelerde birleşmenin tam olmaması nedeniyle bu numunelerdeki artış çok az olmaktadır. 2, 3 ve 4 nolu numunelerdeki artışın ise tamamen doğrusal olduğu gözlemlendi. Kısmen deforme olmuş bölgedeki mikrosertlik değerleri incelendiğinde ana malzemenin mikrosertliğine göre bir düşüş olduğu gözlemlendi. Deforme olmamış bölgedeki mikrosertlik değerlerinin ise yaklaşık olarak orijinal yapıyla aynı olduğu tespit edildi. En iyi mikrosertlik değeri olarak sonucun 3 ve 4 nolu numunelerde olduğu gözlemlendi. Bu durumda uygun Dönme Hızı-Sürtünme Basıncı ilişkisinden kaynaklandığı tespit edildi. Ayrıca Şekil 6.7.-11 arasında her bir numunenin mikrosertlik grafikleri verilmiştir.

Tablo 6.7. Deney Numunelerinin Bölgesel Ortalama Mikrosertlik Değerleri

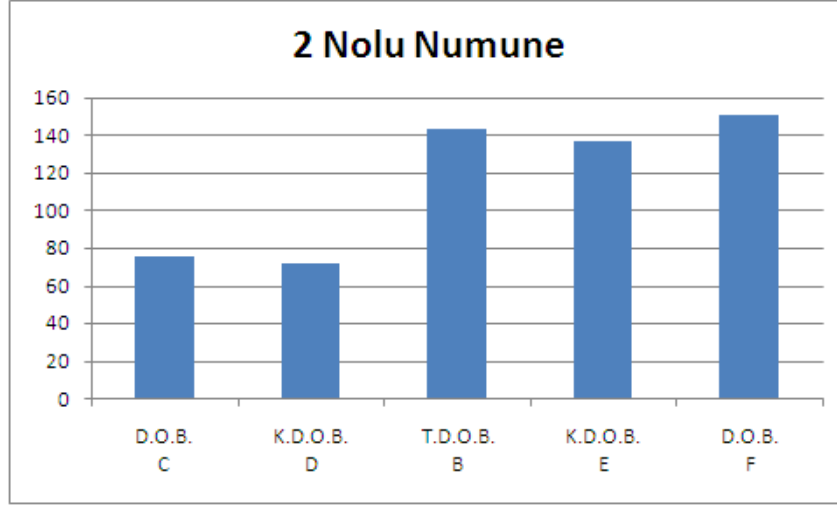
Numune No	D.O.B. (c)	K.D.O.B. (d)	T.D.O.B. (b)	K.D.O.B. (e)	D.O.B. (f)
1	73	68	87	138	148
2	75	72	143	137	151
3	77	70	170	140	149
4	76	70	165	139	152
5	79	72	90	140	150



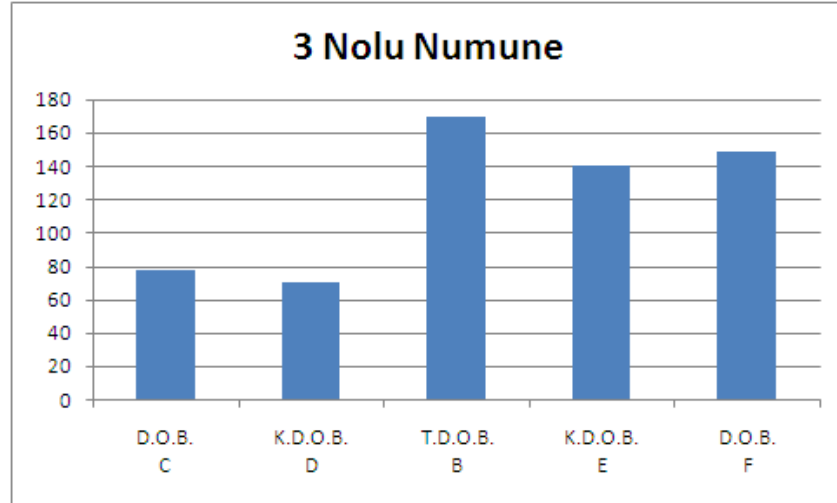
Şekil 6.6. Numunelerin Bölgesel Ortalama Mikrosertlik Grafiği



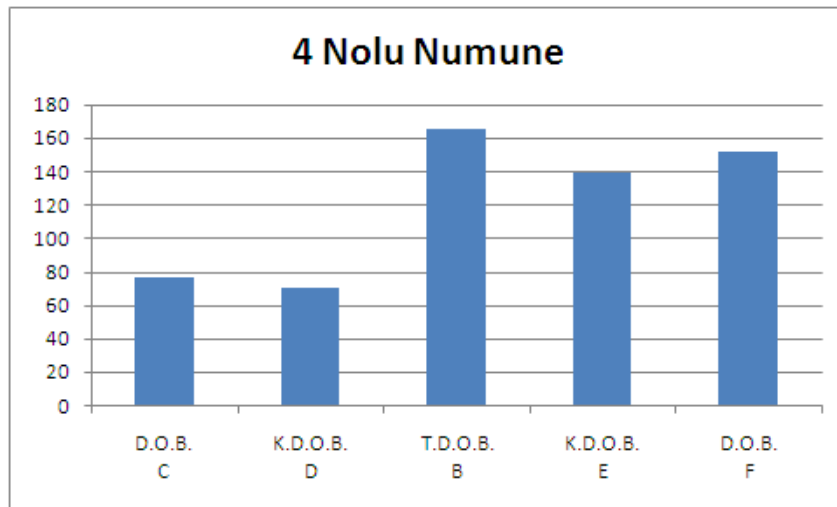
Şekil 6.7. 1 Nolu Numunenin Mikrosertlik Grafiği



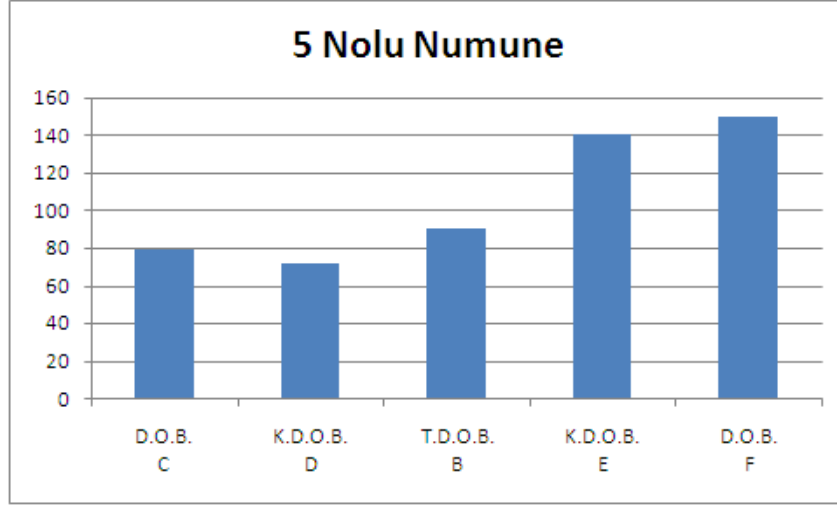
Şekil 6.8. 2 Nolu Numunenin Mikrosertlik Grafiği



Şekil 6.9. 3 Nolu Numunenin Mikrosertlik Grafiği



Şekil 6.10. 4 Nolu Numunenin Mikrosertlik Grafiği

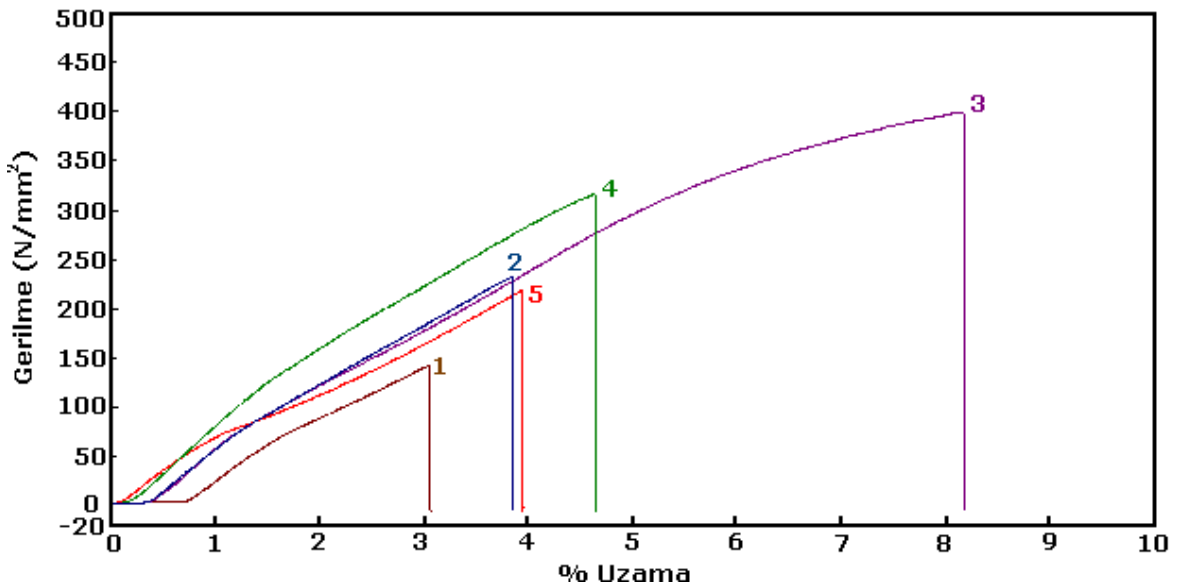


Şekil 6.11. 5 Nolu Numunenin Mikrosertlik Grafiği

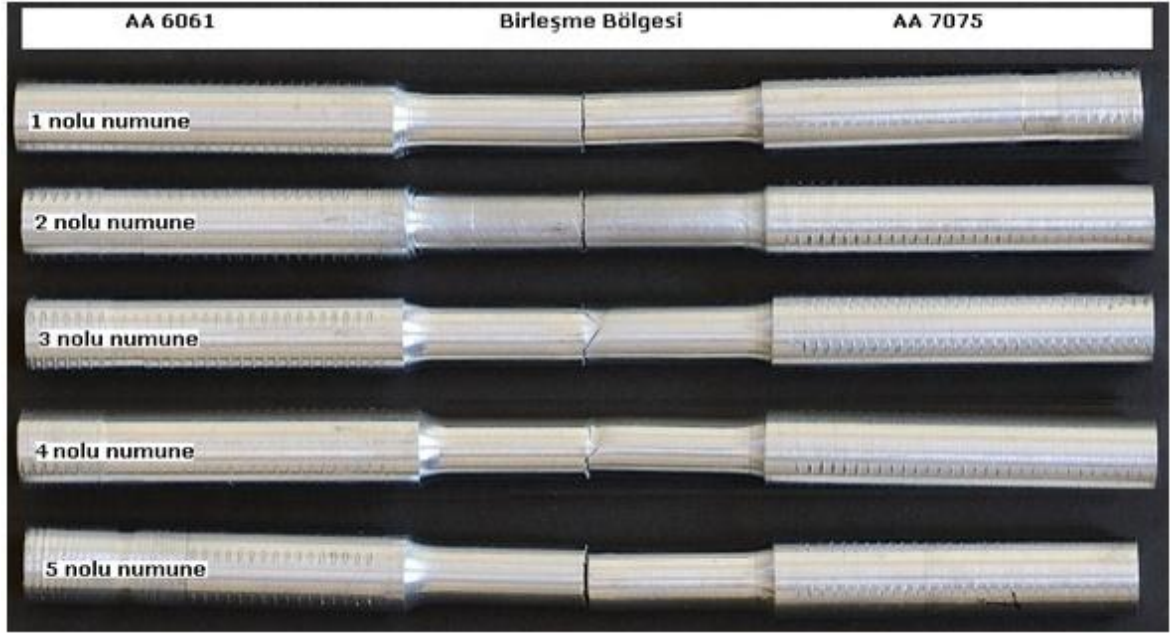
6.3. Deney Numunelerinin Çekme Testi Sonuçları

Sürtünme kaynağı yapılan numunelere ASTM C 633 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen çekme testleri 5 mm/dk'lık deformasyon hızlarıyla yapılan Gerilme-% Uzama eğrileri Şekil 6.12'deki gibidir.

Çekme testine tabi tutulan bütün numuneler; gevrek bir şekilde aniden kırılma göstermişlerdir. Gevrek kırılmaya maruz kalan sürtünme kaynaklı 5 numunenin tamamı da AA 6061 tarafındaki “d” alanı olarak gösterilen kısmen deforme olan bölgede kopmalar oluştu (Şekil 6.13). Bu durumunda en önemli nedeni olarak AA 6061 tarafındaki kısmen deforme olmuş bölgedeki mikrosertliğin düşük olmasındandır.

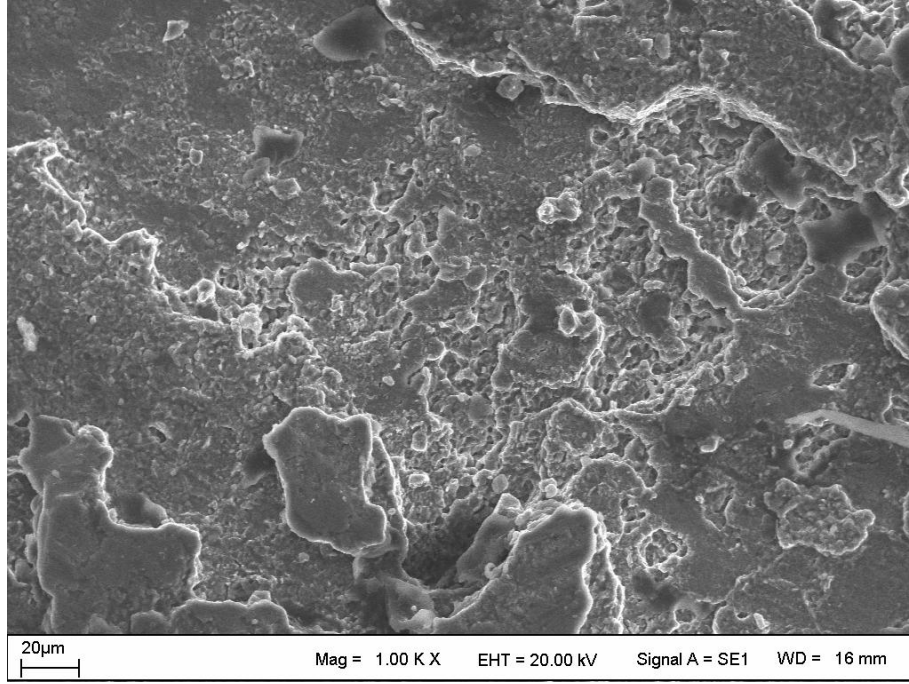


Şekil 6.12. Numunelerin Gerilme-% Uzama Grafiği

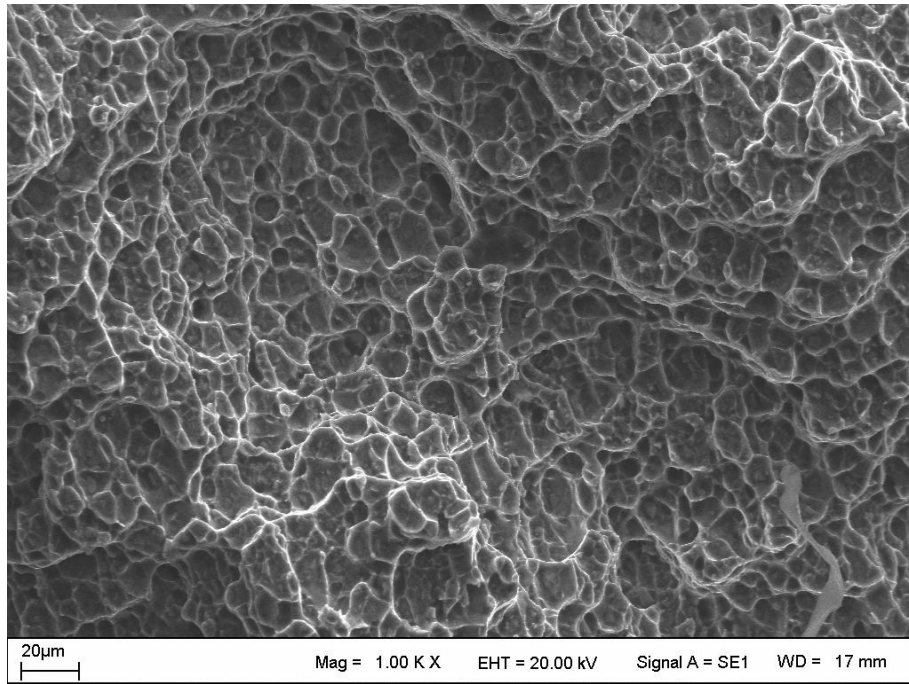


Şekil 6.13. Çekme Testi Sonrası Makro Görüntüler

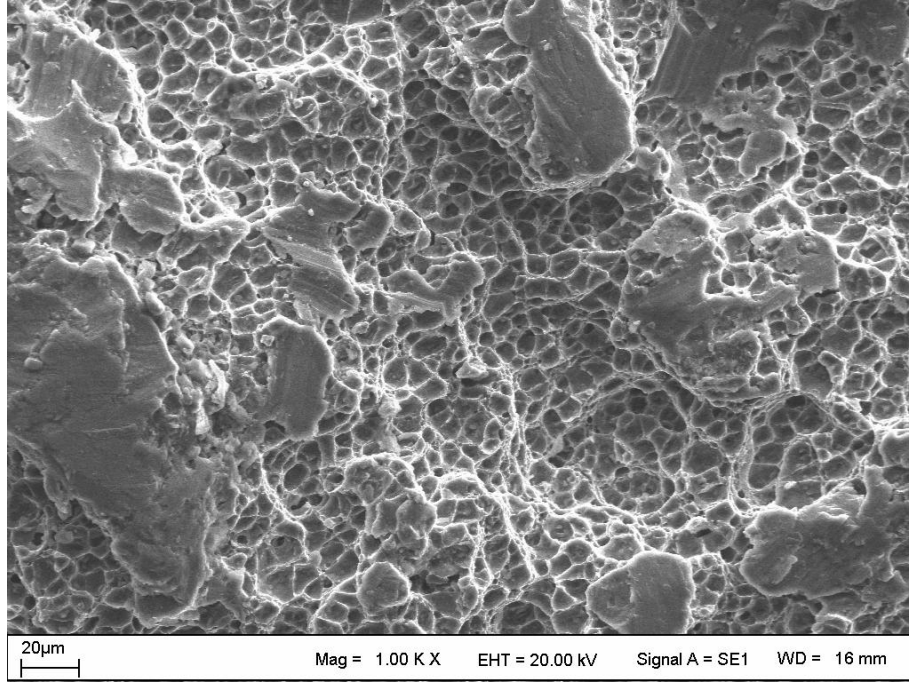
Çekme testi sonrasında Gerilme - % Uzama grafiğinde en iyi sonucu veren 3 ve 4 nolu numunelere ait karşılıklı çekme deney numuneleri kırılma yüzeylerinden alınan SEM resimleri Şekil 6.14. - 17’de gösterilmektedir. SEM resimleri incelendiğinde AA 6061 malzemesinin deforme olmayan tarafındaki mikrosertliğin kısmen deforme olmuş bölgedekinden fazla olmasından dolayı kırık yüzeyde bunu görmek mümkündür. Ayrıca dönme hızı ve sürtünme basıncı gibi kaynak değişkenlerinin oluşturdukları ısı etkisiyle kırık yüzeyde intermetalik bileşiklerin varlığından söz edebiliriz.



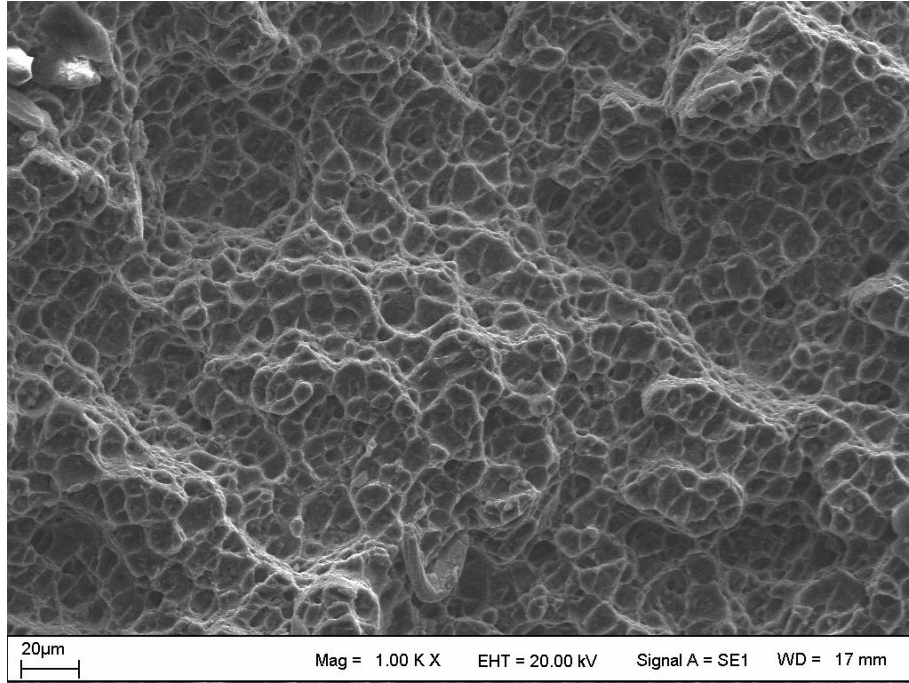
Şekil 6.14. 3 Nolu Numunenin AA 7075 Tarafındaki Kırık Yüzey Resmi



Şekil 6.15. 3 Nolu Numunenin AA 6061 Tarafındaki Kırık Yüzey Resmi



Şekil 6.16. 4 Nolu Numunenin AA 7075 Tarafındaki Kırık Yüzey Resmi



Şekil 6.17. 4 Nolu Numunenin AA 6061 Tarafındaki Kırık Yüzey Resmi

7. GENEL SONUÇLAR

Farklı kaynak parametreleriyle birleştirilen AA 6061 ve AA 7075 malzeme çiftinin sürtünme kaynak işlemi sonrası deney numunelerinin mikroyapı ve mekanik incelemeleri sonucu değişiklikler inceleildi. İncelemeler sonucu aşağıdaki genel sonuçlar tespit edildi.

- Sürtünme kaynak sonrası numune çiftlerinde birleşmenin yaklaşık olarak sağlandığı tespit edildi.
- Sürtünme kaynak sonrası numune çiftlerinde boyca kısalmaların olduğu tespit edildi.
- Boyca kısalmanın en büyük nedenlerinden biri dönme hızıdır.
- Numunelerdeki boyca kısalmaların doğrusal bir artış gösterdiği tespit edildi.
- Artan dönme hızına bağlı olarak malzeme çiftlerindeki deformasyonun arttığı tespit edildi.
- Aynı dönme hızlarına sahip numunelerde ise boyca kısalmanın artışını yüksek sürtünme basıncının sağladığı tespit edildi.
- Malzeme çiftleri arasında deformasyonun en çok AA 6061 tarafında olduğu görüldü. Bunun nedeni olarak AA 7075 malzemesinin AA 6061'e göre yüksek sertlik ve yüksek çekme-akma dayanımlarının olduğu tespit edildi.
- Düşük dönme hızına sahip 1 nolu numunede birleşmenin tam olarak gerçekleşmediği tespit edildi.
- Özellikle kısmen ve tamamen deforme olmuş bölgelerdeki tane yönelmelerinin en etkin kaynak parametresinin sürtünme basıncı olduğu tespit edildi.
- 2000 devir/dakika'lık dönme hızının malzeme çiftlerinin birleşmesi için yeterli olduğu tespit edildi.
- AA 6061 tarafında yığılma basıncının etkisiyle tane yönelmeleri tam manasıyla görünürken AA 7075 tarafında bu durum net olarak görülmediği, sebep olarakta 20 MPa'lık sürtünme basıncının AA 7075 için yeterli olmadığı tespit edildi.
- AA 6061 malzemesinin mekanik özellikleri ve kimyasal yapısındaki alüminyum oranının fazlalığından düşük kaynak parametrelerine rağmen tane yönelmelerinin oluştuğu tespit edildi.
- 3 nolu numunenin arayüzeyin ortalama genişliği yaklaşık 200 µm civarında olduğu ve mikroyapı ve mekanik sonuçlara göre en iyi numune olduğu tespit edildi.

- 3 nolu numunenin tamamen deforme olan bölgesinde karşılıklı malzeme difüzyonunun olduğu tespit edildi.
- 3 nolu numunenin birleşme arayüzeyine yakın yerlerde tane yönelmenin yaklaşık 90° civarında olduğu izlendi. Bu durumu da artan sürtünme basıncına bağlı olduğu tespit edildi.
- 3 nolu numunenin AA 7075 malzemesinin kısmen deforme olmuş bölgesinde tane yönelmelerinin miktarı ve açısının arttığı izlendi. Bu durumun 2000 devir/dakika'lık dönme hızına ve 25 MPa'lık sürtünme basıncına bağlı olduğu tespit edildi.
- AA 6061 malzemesinin AA 7075 malzemesine göre daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olmasından dolayı arayüzeye yakın yerlerde tane yönelmelerinin AA 6061 tarafında daha az iken AA 7075 tarafında daha fazla olduğu tespit edildi.
- 5 nolu numunede birleşme arayüzeyindeki boşluk ve çatlakların en fazla numune olduğu tespit edildi.
- 5 nolu numunede kısmen birleşme gerçekleşmişse de, oluşan arayüzeyin mukavemeti oldukça düşük olmasının sebebi de yüksek dönme hızı ve aşırı sürtünme basıncının, bir arada etkisinin olduğu tespit edildi.
- Genel olarak tüm numunelerde tamamen deforme olmuş bölgede ve özellikle arayüzeyde belirgin bir sertlik artışı olduğu tespit edildi.
- 1 ve 5 nolu numunelerde birleşmenin tam olmaması nedeniyle bu numunelerdeki mikrosertlik artışının çok az olduğu tespit edildi.
- 2, 3 ve 4 nolu numunelerdeki mikrosertlik artışının doğrusal olduğu tespit edildi.
- Kısmen deforme olmuş bölgedeki mikrosertlik değerlerinin ana malzemenin mikrosertliğine göre bir düşüş gösterdiği tespit edildi.
- Deforme olmamış bölgedeki mikrosertlik değerlerinin ise yaklaşık olarak orijinal malzeme yapılarındaki değerlerle aynı olduğu tespit edildi.
- En iyi mikrosertlik değeri olarak sonucun 3 ve 4 nolu numunelerde olduğu tespit edildi.
- Ortalama mikrosertlik değeri olarak en yüksek sonucun 3 nolu numunede olduğu tespit edildi.
- Çekme testine tabi tutulan bütün numuneler; gevrek davranış göstererek aniden kırıldığı tespit edildi.
- AA 6061 tarafındaki kısmen deforme olmuş bölgedeki mikrosertliğin düşük olmasından dolayı çekme testi sonucunda kırılmaların bu bölgede olduğu tespit edildi.

- Çekme testi sonrasında Gerilme - % Uzama grafiğinde en iyi sonucu 3 ve 4 nolu numunelerin verdiği tespit edildi
- Dönme hızı ve sürtünme basıncı gibi kaynak parametrelerinin meydana getirdiği ısının etkisiyle arayüzeyde intermetalik bileşikler oluşturduğu tespit edildi.

8. KAYNAKLAR

1. Anık, S., (1960), “Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynağı”, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
2. Anık, S., Anık E.S., Vural, M., (1993), “1000 Soruda Kaynak Teknolojisi”, El Kitabı, Cilt:1, Sayfa:204-215, İstanbul.
3. Ayvaz, M., Çetinel, H., (2011), “Farklı Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynak Yöntemi ile Kaynatılması ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Sayı:7, Cilt:1, Sayfa:39-46.
4. Bahrani, A.S., Crossland, B., (1976), “Friction Welding”, Charts Mechanical Engineering, Pages:61-66.
5. Baradeswaran, A., Elaya, A., (2013), “Influence of B₄C on the Tribological and Mechanical Properties of Al 7075–B₄C Composites” Composites, Volume:54 (B), Pages:146–152.
6. Buytoz, S., (2004), “AISI 4340 Çeliğin Nitrürasyon ve GTA Kaynak Yöntemi ile Yüzey Modifikasyonu İşlemleri Sonrası Mekaniksel Davranışlarının Araştırılması”, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Elazığ.
7. Büyükarıslan, S., (2006), “Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş Alüminyum Alaşımlarının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
8. Cerit A.M., (1996), “Üretim ve Tasarım”, Makine Mühendisliği El Kitabı, Makine Mühendisleri Odası Yayınları; Yayın No:170, Cilt:2, İstanbul.
9. Chayong, S., Kapranos, P., (2005), “Thixoforming 7075 Aluminum Alloys” Materials Science and Engineering, Volume:390 (A), Pages:3–12.
10. Coşkun, A.O., (2001), “5000 Serisi Alüminyum Magnezyum Alaşımlarının Döküm ve Termomekaniksel Prosesleri”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

11. am, G., (2002), “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Uygulamaları”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 9. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s:450-458, Denizli.
12. Doğan, S., (2006), “AA5754-H22 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında İşlem Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkileri”, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
13. Dong, Q.X., Liu, L., (2012), ”Fusion Welding of Fe-added Lap Joints Between AZ31B Magnesium Alloy and 6061 Aluminum Alloy by Hybrid Laser Tungsten Inert Gas Welding Technique” Materials and Design, Volume:33, Pages:436–443.
14. Duck Park, I., Tae Lee, C., Soo Kim, H., Jin Choi, W., Chang Kang, M., (2011), “Structural Considerations in Friction Welding of Hybrid Al₂O₃-Reinforced Aluminium Composites” Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume:21, Pages:42-46.
15. Ellis, C.R.G., (1976), “Recent Industrial Developments in Friction Welding”, Welding Journals, Pages:582-589.
16. Ellis I., M.B.D., Gittos, M.F., (1994), “Joining of Aluminum Based Metal Matrix Composites”, Initial Studies, Member Report: 501, Welding Institute, Abington.
17. Faes, Koen., Dhooge, A., Baets, P. D., Donckt, E. V. D., Waele, W, D., (2009), “Parameter Optimisation for Automatic Pipeline Girth Welding Using a New Friction Welding Method” Materials and Design, Volume:30, Pages:581–589.
18. Gang, L., Li, L.W., Shi, J.Y., Zhong, R.W., (2006), “Compressive Formability of 7075 Aluminum Alloy Rings Under Hydrostatic Pressure”, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume:16, Pages:1103-1109.
19. Geçkinli, A.E., (1989), “Metalografi”, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
20. Gürleyik, M., (1989), “Sürtünme Kaynağı Yapılan Döküm Alaşımları”, II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitapçığı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Sayfa:231-241, İstanbul.

21. Haboudou, A., Peyre, P., Vannes, A.B. and Peix, G., (2003), "Reduction of Porosity Content Generated During Nd:YAG Laser Welding of A356 and AA5083 Aluminum Alloys", Materials Science and Engineering A, Volume:363 (1-2), Pages:40-52.
22. Herba, E.M., Queen, M.H.J., (2004), "Influence of Particulate Reinforcements on 6061 Materials in Extrusion Modeling" Materials Science and Engineering, Volume:372 (A), Pages:1-14.
23. Jennings, P., (1971), "Some Properties of Dissimilar Metal Joints Made by Friction Welding", Welding Institute, Abinghton Hall, Pages: 147-153, Cambridge.
24. Koçer, S., (1999), "Katı Hal Kaynak Yöntemleri", Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Semineri, Elazığ.
25. Luo, J., Ye, Y.H., Xu, J.J., Luo, J.Y., Chen, S.M., Wang, X.C., Liu, K.W., (2009), "A New Mixed-Integrated Approach to Control Welded Flashes Forming Process of Damping-Tube-Gland in Continuous Drive Friction Welding" Materials and Design, Volume:30, Pages: 353–358.
26. Maalekian, M., Kozeschnik, E., Brantner, H.P., Cerjak, H., (2008), "Comparative Analysis of Heat Generation in Friction Welding of Steel Bars" Acta Materialia, Volume:56, Pages: 2843–2855.
27. Meshram, S.D., Mohandas, T., Madhusudhan Reddy, G., (2007), "Friction Welding of Dissimilar Pure Metals," Journal of Materials Processing Technology, Volume:184, Pages: 330–337.
28. Mishra, R.S., Ma, Z.Y., (2005), "Friction Stir Welding and Processing", Materials Science and Engineering, Volume:50 (1-2), Pages:1-78.
29. Mutombo, K., Toit, M., (2011), "Corrosion Fatigue Behaviour of Aluminium Alloy 6061-T651 Welded Using Fully Automatic Gas Metal Arc Welding and ER 5183 Filler Alloy" International Journal of Fatigue, Volume:33, Pages:1539–1547.
30. Mühendis ve Makine Dergisi, (Şubat 1977), Cilt:21, Sayı:241.
31. Mühendis ve Makine Dergisi, (Temmuz-Aralık 1982), Cilt:24, Sayı:279.
32. Oğuz, B., (1990), "Demirdışı Metallerin Kaynağı Metalurji-Uygulama", Oerlikon Yayınları, İstanbul.

33. Oppenheim, T., Tewfic, T., Klee, V., Lomeli, S., Dahir, V., Youngren, P., Aizpuru, N., Clark, R., Lee, E.W., Ogren, J., Es-Said, O.S., (2007), "On the Correlation of Mechanical and Physical Properties of 6061-T6 and 7249-T76 Aluminum Alloys" Engineering Failure Analysis, Volume:14, Pages:218-225.
34. Orhan, A., (2003), "Al Matrisli Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Sürtünme Kaynak Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması", Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
35. Orhan, A., (2008), "Gaz Tungsten Ark Kaynak Yöntemiyle Üretilen Fe Esaslı Kaplama Tabakalarının Aşınma ve Mikroyapı Karakteristiklerinin Araştırılması", Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
36. Orhan, N., (1996), "Difüzyon Kaynağı İçin Yeni Bir Model ve Duplex Alaşımlara Uygulanması", Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
37. Oysu, M., (1996), "7075 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan MIG Kaynağının Mekanik Özelliklere ve Gerilmeli Korozyon (GKÇ) Direncine Olan Etkilerinin Araştırılması", Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli.
38. Öksüz, C., (1996), "Yüksek Mukavemetli (2024, 6061, 7075) Alüminyum Alaşımlarının Jominy Yöntemi ile Suverme Duyarlılığı", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
39. Özarpa, C., (2005), "Al 2024-0 ve Al 5754-H22 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya.
40. Özcan, M., Tarakçıoğlu, N. ve Kahramanlı, Ş., (2004), "Saç Malzemelerin Lazer Kaynak Parametreleri", Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Teknik Online Dergi, Cilt:3, Sayı:1.
41. Özdemir, M., (2003), "Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Alüminyum Alaşımlarının Kaynaklanabilirliği", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
42. Özdemir, N., (2002), "Tane Küçültülmüş Düşük Alaşımlı Yüksek Karbonlu Çeliklerin Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması", Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.

43. Özlü, M., (2002), “Transmisyon Çelik ile Martenzitik Paslanmaz Çeliğin Sürtünme Kaynağı”, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
44. Paventhan, R., Lakshminarayanan, P. R., Balasubramanian, V., (2011), ” Prediction and Optimization of Friction Welding Parameters for Joining Aluminium Alloy and Stainless Steel” Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume:21, Pages:1480-1485.
45. Sahin, M., (2005), “Joining With Friction Welding of High-Speed Steel and Medium-Carbon Steel” Journal of Materials Processing Technology, Volume:168, Pages: 202–210.
46. Sahin, M., (2007), “Evaluation of the Joint-Interface Properties of Austenitic-Stainless Steels (AISI 304) Joined by Friction Welding” Materials and Design, Volume:28, pages: 2244–2250.
47. Sahin, M., Akata, H.E., (2003), “Joining with Friction Welding of Plastically Deformed Steel” Journal of Materials Processing Technology, Volume:142, Pages: 239–246.
48. Sahin, M., Akata, H.E., Gulmez, T., (2007), “Characterization of Mechanical Properties in AISI 1040 Parts Welded by Friction Welding” Materials Characterization, Volume:58, Pages:1033-1038.
49. Sang, Y.L., Se, I.O., (2002), “Thixoforming Characteristics of Thermo-Mechanically Treated AA 6061 Alloy for Suspension Parts of Electric Vehicles” Journal of Materials Processing Technology, Volume:130-131, Pages:587-593.
50. Sarsılmaz, F., (2008), “Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş AA7075/AA6061 Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
51. Seli, H., Ismail, A. I. Md., Rachman, E., Ahmad, Z. A., (2010), “ Mechanical Evaluation and Thermal Modelling of Friction Welding of Mild Steel and Aluminium” Journal of Materials Processing Technology, Volume: 210, Pages:1209–1216
52. Seregin, S.A., Sabatsev, V.P., (1975), “The Friction Welding Joining of Plastically Deformed Steel, Welding Productions, Pages:34-35.
53. Şaldır, R., (2003), “Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti”, Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Muğla.

54. Tülbentçi, K., (1990), “Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynağı”, Bhler Yayınları, İstanbul.
55. Tülbentçi, K., Yılmaz, M., (1989), “Farklı Takım eliklerinin Katı Hal Kaynağı” II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitapçığı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Sayfa:303-314, İstanbul.
56. Winiczenko, R., Kaczorowski, M., (2012), ”Friction welding of Ductile Cast Iron Using Interlayers” Materials and Design, Volume:34, Pages:444–451.
57. Yılmaz, B., (2002), “Alüminyum Alaşımlarında Faz Yapılarının Mekanik zelliklere Etkisi”, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
58. Yılmaz, M., (1993), “Farklı Takım eliklerinin Sürtünme Kaynağında Kaynak Bölgesinin İncelenmesi”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 1998 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği bölümünü kazandı. 2002 yılında aynı bölümden mezun oldu. Vatani görevini 2002-2003 yılları arasında Ağrı ilinde yaptı.

Farklı iş kollarında bir süre çalıştıktan sonra 2010 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metalürji Eğitimi Anabilim dalında Yüksek lisans programına başladı. Aynı yıl Tunceli Merkez Endüstri Meslek Lisesine Metal öğretmeni olarak atandı. 1 yıl çalıştıktan sonra Diyarbakır Ergani Endüstri Meslek Lisesine geçiş yaptı. Halen aynı okulda Metal öğretmeni olarak görev yapmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.