

**AA 2024 AI ALAŞIMININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA  
(SKK) KAYNAK PARAMETRELERİNİN BİRLEŞMEYE  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**Hasan KAFALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENDÜSTRİYEL TEKNOLOJİ EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2009  
ANKARA**

Hasan KAFALI tarafından hazırlanan “AA 2024 Al Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında (SKK) Kaynak Parametrelerinin Birleşmeye Etkilerinin İncelenmesi” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç Dr. Aydın ŞIK, Endüstriyel Teknoloji Eğitimi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Adem KURT .....  
Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç Dr. Aydın ŞIK .....  
Endüstriyel Teknoloji Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mahmut İZCİLER .....  
Endüstriyel Teknoloji Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Tarih: 29//09/2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL .....  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hasan KAFALI

**AA 2024 AL ALAŞIMININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA  
(SKK) KAYNAK PARAMETRELERİNİN BİRLEŞMEYE ETKİLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hasan KAFALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Eylül 2009**

**ÖZET**

**Bu çalışmada sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle birleştirilen AA2024 alüminyum levhaların kaynak bölgelerinin değişik parametrelerle mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi teknolojiyle beraber gelişimi sürekli devam eden ve kaynak dünyası içinde doksanlı yıllarda kullanılmaya başlanan bir katı hal kaynak yöntemidir. Birçok yönden sağladığı üstünlükler ile özellikle günümüzde alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Kaynak işlemi sırasında karıştırıcı ucun devir hızı, karıştırıcı ucun omuz genişliği ve kaynağın ilerleme hızı değişken parametreler olarak seçilmiştir. Karıştırıcı ucun devir sayısı sabitken kaynak ilerleme hızı farklı değerlerde seçilmiş ve kaynak ilerleme hızı sabitken de karıştırıcı uç devir sayısı değiştirilmiştir. Bu işlemler üç ayrı omuz genişliğinde de tekrarlanmıştır.**

**Kaynaklı birleştirmelerde metalografik ve mekanik testler yapılarak kaynak ilerleme ve karıştırıcı uç devir sayısı değişimin, birleşme bölgesinin metalürjik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.**

**Bilim Kodu :705.3.019**

**Anahtar Kelimeler :Sürtünme karıştırma kaynağı, mekanik özellikler, alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı.**

**Sayfa Adedi :94**

**Tez Yöneticisi :Yrd. Doç. Dr. Aydın ŞIK**

**THE STUDY INTO THE EFFECTS OF WELDED PARAMETERS ON  
JOINTURE IN THE PROCESS OF A 2024 ALUMINUM ALLOYS  
FRICTION STIR WELDING**

**(M.Sc. Thesis)**

**Hasan Kafalı**

**GAZİ UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
September 2009**

**ABSTRACT**

**In this study, the microstructure of aluminium sheets with different parameter which were joined through stir friction welding were examined. The way of stir friction welding, started to use in 1990's, is a solid phase way and is continuously developing with technology. Especially today, because of its superiorities with many sides, stir friction welding is used for aluminium and its alloys' welding. During welding, rotatinal speed of welding stir tool, the shoulder width of welding stir tool and welding speed were chosen asvariable parameters. While rotational speed of welding stir tool was constant, welding speed was chosen in a different speed and while welding speed was constant, the rotational speed of welding stir tool was chosen in different speed. These were repeated for all three shoulder widths.**

**Through metallographic and mechanic tests on welding, the influences of different speed of welding and rotational welding speed on metallurgy and mechanic properties of junction section were examined.**

**Science Code :705.3.019**

**Key words :Friction stir welding, mechanic properties , friction stir welding of aluminium alloys.**

**Page Number :94**

**Adviser :Yrd. Doç. Dr. Aydın ŞIK**

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Danıőmanım Yrd. Doç. Dr. Aydın Şık'a lisans ve yüksek lisansta ders aldığım hocalarıma, deneysel çalıőmalarımda bana yardımcı olan arkadaşlarıma, hocalarıma, birlikte çalıőtıęım ustalara ve atölye sahiplerine, bana olan desteklerini hiç esirgemeyen dostlarıma ve aileme sonsuz teőekkürü bir borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI.....	3
2.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Tanıtımı .....	3
2.1.1 Havacılık endüstrisi.....	9
2.1.2. Otomotiv endüstrisinde .....	10
2.1.3. İnşaat endüstrisi.....	12
2.1.4. Elektrik endüstrisi .....	13
2.1.5. Diğer endüstri sektörleri.....	13
2.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri.....	13
2.2.1. Mekanik özellikler .....	16
2.2.2. Fiziksel özellikler .....	17
2.2.3. Şekil değiştirme kabiliyeti.....	17
2.2.4. Kimyasal özellikler .....	28
2.2.5. Korozyon özellikleri .....	19
2.3. 1xxx, 3xxx, 5xxx Serisi Alaşımlar .....	21

**Sayfa**

2.3.1. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlar (2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi).....	21
3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAK KABİLİYETİ .....	24
3.1. Oksit .....	25
3.2. Hidrojen Çözünürlüğü.....	26
3.3. Isı Özellikleri.....	26
4. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI .....	29
4.1. Kaynak Metalürjisi.....	33
4.2. Kaynak Bölgesinin Mekanik Özellikleri.....	35
4.3. Kaynak Parametrelerinin Mekanik Özellikler ve Mikro Yapıya Etkisi.....	37
4.3.1. Malzemenin kalınlığı .....	37
4.3.2. Karıştırıcı ucun malzemesi ve tasarımı .....	38
4.3.3. Kaynak ilerleme ve devir hızı .....	45
4.3.4. Kaynak pozisyonu ve birleştirme geometrileri .....	47
4.4. Uygulama Alanları .....	50
4.5. Yöntemin Üstünlükleri.....	51
4.6. Yöntemin Sınırlamaları.....	54
4.7. Yorulma Deneyi.....	55
4.7.1. Yorulma deneyi türleri .....	58
4.7.2. Yorulma deneyi cihazları .....	60
4.8. Çekme Deneyi.....	62
5. MATERYAL VE METOD .....	64
5.1 Kaynak Yöntemlerinin Uygulanması.....	65

	<b>Sayfa</b>
5.1.1 Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK).....	65
5.1.2. Deney numunesi çıkartma planları.....	67
5.2. Eğme Yorulma Deney Numuneleri.....	68
5.2.1. Eğme yorulma deneyi sonuçları.....	69
5.3. Çekme Dayanımı Deneyi.....	73
5.3.1. Çekme dayanımı deney sonuçları .....	74
5.4. Mikroyapı Deney Sonuçları .....	79
6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	86
KAYNAKLAR .....	89
ÖZGEÇMİŞ .....	94

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Al-alaşımlarının çeşitli uygulamalarda avantaj ve dezavantajları .....	7
Çizelge 2.2. Alüminyumun genel özellikleri .....	15
Çizelge 2.3. Saf alüminyumun oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri.....	17
Çizelge 2.4. EN 573-3'e göre 2xxx serisi alüminyum alaşımları .....	23
Çizelge 5.1 Kullanılan Al 2024 malzemesinin kimyasal özellikleri.....	64
Çizelge 5.2 Kullanılan Al 2024 malzemesinin mekanik özellikleri .....	64
Çizelge 5.3. Deney malzemesinin fiziksel özellikleri.....	64
Çizelge 5.4. Deney grupları çizelgesi .....	66
Çizelge 5.5. Eğme yorulma dayanım deneyinde kullanılacak kaynak parametreleri .....	69
Çizelge 5. 6. Mikroyapı incelemesinde kullanılan kaynak parametreleri.....	79

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Alüminyumun soğuk pekleşmesi.....	18
Şekil 2.2. Temel alüminyum alaşımları .....	19
Şekil 2.3. Cu – Al alaşım sisteminin alüminyumca zengin kısmını gösterir faz diyagramı.....	22
Şekil 4.1. Sürtünme karıştırma kaynağı gösterimi .....	29
Şekil 4.2. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü. I: Isının tesiri altındaki bölge (ITAB), II: Termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (TEB), III: Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge.....	30
Şekil 4.3. Sürtünme karıştırma kaynağı sürecinde pimin ve levhaların sıcaklık değişimleri .....	31
Şekil 4.4. Pim karıştırma etkisinin kaynak dikişine etkisinin enine görüntüsü .....	39
Şekil 4.5. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan klasik bir karışma prensibi görüntüsü.....	40
Şekil 4.6. Kaynak işlemlerinde kullanılan sürtünme karıştırma aparatları Whorl konfigürasyonlar .....	41
Şekil 4.7. a) MX Triflute™ ve b) Flared-Triflute™ tasarımları .....	42
Şekil 4.8. Flared Triflute probe ile yapılmış olan bindirme kaynağında kaynak ara yüzeyinin görünümü.....	43
Şekil 4.9. Skew-Stir Metodunun çalışma prensibi .....	44
Şekil 4.10. Whorl™ ve MX Triflute™ takımlarının omuz profilleri .....	44
Şekil.4.11. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi .....	47
Şekil 4.12. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanarak yapılan birleştirmeler Küt alın b) Birleştirilmiş ek ve bindirme c) Bindirme d) Çoklu bindirme e) İki pasolu T- köşe f) Tek pasolu T- köşe g) Dış köşe h) iç köşe .....	49
Şekil 4.13. Sürtünme karıştırma kaynağının boru kaynaklarında uygulaması.....	49

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.14. Sürtünme karıştırma kaynağında bindirme kaynağının şematik olarak gösterimi.....	50
Şekil 4.15. Eğilmeli yorulma cihazının şematik olarak gösterimi .....	57
Şekil 4.16. Demir ve demir dışı malzemelere ait tipik S – N diyagramı .....	60
Şekil 5.1. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan pimlerin ölçüleri.....	65
Şekil 5.2. EN 288-3' e göre numunelerin levhadaki dağılım planı.....	67
Şekil 5.3. Kaynak edilmemiş levhadan çıkartılan eğme yorulma deney numunesi...	68
Şekil 5.4 Kaynaklı malzemelerden çıkartılan eğme yorulma deney numunesi .....	68
Şekil 5.5. Deney numunelerine uygulanan yorulma dayanımlarının karşılaştırılması .....	72
Şekil 5.6. EN 895'e göre çekme dayanımı numunesinin boyutları.....	73
Şekil 5.7. 930 dev/dak. dönme, (10-15-20 mm) omuz çapı ve (80-120-180 mm/dak.) kaynak hızı değişkenleri ile birleştirilmiş numunelerin ana malzemeye göre göstermiş olduğu akma ve çekme dayanım değeri .....	74
Şekil 5.8. 1450 dev/dak. dönme, (10-15-20 mm) omuz çapı ve (80-120-180 mm/dak.) kaynak hızı değişkenleri ile birleştirilmiş numunelerin ana malzemeye göre göstermiş olduğu akma ve çekme dayanım değeri .....	75
Şekil 5.9. 2280 dev/dak. dönme, (10-15-20 mm) omuz çapı ve (80-120-180 mm/dak.) kaynak hızı değişkenleri ile birleştirilmiş numunelerin ana malzemeye göre göstermiş olduğu akma ve çekme dayanım değeri .....	76
Şekil 5.10. 930-1450-2280 dev/dak devir ile dönen pimin, (80-120-180 mm/dak) ilerleme ve (10-15-20 mm) çaptaki omuz genişliği ile birleştirilen numunelerin referans numuneye göre uzama miktarı.....	78

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. Alüminyum ekstrüzyon panellerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi.....	8
Resim 2.2. Sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak üretilmiş tekerlek jant.....	10
Resim 2.3. Alüminyum alaşım jantın üretilme aşamaları.....	10
Resim 2.4. Japonya 'da sürtünme karıştırma kaynağının kullanıldığı hızlı tren ve bu yöntem ile kaynağı yapılan Al-paneller .....	12
Resim 4.1. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması.....	31
Resim 4.2. Çift taraftan sürtünme kaynağı yapılarak birleştirilmiş 75 mm kalınlığındaki 6082 al -alaşımı levhaları.....	32
Resim 4.3. Dairesel hareketten dolayı oluşan soğan halkaları.....	33
Resim 4.4. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan içyapının şematik görünümü.....	34
Resim 4.5. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Al-alaşımının kaynak bölgesinin kesiti .....	36
Resim 4.6. Sürtünme karıştırma kaynağında düz yüzeyli batıcı uç kullanımından dolayı oluşan tünel şeklinde porozite ve batma derinliğinin iyi ayarlanmamasından kaynaklanan karıştırılmamış bölge, soğuk birleşme bölgesi, A) Kaynak dikişinin kesit görünüşü B) Hataların detaylı görünüşü .....	36
Resim 4.7. Sürtünme karıştırma kaynağında elde edilen kaynak yüzey kaliteleri a) istikrarlı batıcı uç ilerlemesi ve b) istikrarsız batıcı uç ilerlemesi ....	37
Resim 4.8. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde pimin eğik konumda daldırılması.....	38
Resim 4.9. a) MX Triflute™ pimin esin kaynağı deniz kabuklarıdır ve b) MX Triflute™ serisi pimin Şekil ve şematik çalışma şekli.....	42
Şekil 4.10. A-Skew ucunun resmi.....	44
Resim 4.11. 800 dev/dak. kaynak hızı ile SKK kaynak metali mikro yapıları a) 6.25 mm/dak, b) 10 mm/dak, c) 16 mm/dak, d) 20 mm/ dak.....	46

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 4.12. T ve L profillerinde sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması.....	50
Resim 4.13. Kaynak yüzey görünümleri a) Ark kaynağı ve b) Sürtünme karıştırma kaynağı.....	53
Resim 4.14. Kaynak bölgesi kesitleri a) Ark kaynağı ve b) Sürtünme karıştırma kaynağı .....	53
Resim 5.1. Ana malzemedan çıkarılan eğme yorulma deneyi numunesinin kopmuş hali .....	70
Resim 5.2. Kaynaklı malzemedan çıkarılan eğme yorulma deneyi numunesinin kopmuş hali .....	70
Resim 5.3. Numunelerin kopma bölgeleri .....	70
Resim 5.4. a) Ana malzeme (10X), b) Ana malzeme (40X).....	80
Resim 5.5. 930 dev/dak dönme-180 mm/dak ilerleme-20 mm omuz genişliği değişkenleri ile birleştirilen numunelerin mikroyapı görüntüleri. a) Numunede oluşan çatlak (10X) b) Karıştırıcı uç alt boşluğu (5X) c) Kaynak edilmiş bölge ile ana metal arasında yönelen taneler (5X) d) Karışım bölgesinde küçülen taneler (40X) .....	80
Resim 5.6. 1450 dev/dak dönme-180 mm/dak ilerleme- 20 mm omuz genişliği değişkenleri ile birleştirilen numunelerin mikroyapı görüntüleri. a) Kaynak bölgesi görüntüsü (40X ) b) Karıştırıcı pimin altında kalan bölgede oluşan kaynak boşluğu görüntüsü (5X) c) Numunenin birleşme bölgesi (10X) .....	82
Resim 5.7. 2280 dev/dak dönme-180 mm/dak ilerleme-20 mm omuz genişliği değişkenleri ile birleştirilen numunelerin mikroyapı görüntüleri. a) Birleşme bölgesi (10X), b) Kaynak bölgesi (40X), c) Kaynak alt bölgesi (5X), d) TEB ile ana malzeme arasındaki geçiş bölgesi (5X) .....	84



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>ASTM</b>	Amerikan test ve malzemeler derneği
<b>IACS</b>	Metal ve alaşımlar için kullanılan elektrik iletkenliği birimi
<b>ITAB</b>	Isı tesiri altında kalan bölge
<b>KYM</b>	Yüzey merkezli kübik yapı (kristal kafes sistemlerinde)
<b>NASA</b>	Ulusal havacılık ve uzay dairesi
<b>SKK</b>	Sürtünme karıştırma kaynağı
<b>TEB</b>	Termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge
<b>TWI</b>	İngiliz kaynak enstitüsü

## 1. GİRİŞ

Herhangi bir malzemenin başka bir malzeme ile birleştirilmesi veya kaynak edilmesi mühendislik uygulamalarında daima ihtiyaç duyulan işlemlerden biridir. Birleştirme işlemi, kaynak, lehimleme, yapıştırma ve mekanik bağlantı gibi pek çok işlemi kapsayan genel bir terimdir. Bu işlemlerin bir veya daha fazlası basit ürünlerin imalatında kullanılır. Birleştirmenin rolü, otomobil ve uçaklar gibi pek çok farklı birleştirme işlemleriyle montaj edilen daha karmaşık yapıdaki parçaların üretiminde daha önemlidir. Bir malzemenin kaynak edilebilirliği, o malzemenin daha yaygın olarak kullanılmasını sağlayan ve o malzemedeki parça üretim yönteminin tayin edilmesinde önemli rol oynayan bir özelliğidir. Yeni geliştirilmiş malzemeler genellikle modern birleştirme tekniklerine ihtiyaç duyarlar. Yeni teknolojik ürünlere olan talebin her geçen gün artması yeni birleştirme tekniklerinin de geliştirilmesini sağlamaktadır. Son yıllarda alaşımların geliştirilmesiyle birlikte bu malzemelerin kaynağı ile ilgili olarak büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Benzer şekilde sürtünme karıştırma kaynağı konusunda gerçekleştirilen gelişmeler Al-alaşımı gibi klasik kaynak yöntemleri ile kaynağı sorunlu olan malzemelerde üretim sistemlerini büyük oranda etkilemiş ve etkilemeye devam etmektedir.

Birleştirme işlemleri, birleştirmede kullanılan dolgu malzemesine, dışarıdan uygulanan ısı ve basınç ve birleştirilecek malzemelerin durumuna göre sınıflandırılabilir. Katı hal birleştirme (basınç kaynağı) işlemlerinde dolgu malzemesi kullanılmaz. Birleştirme difüzyon kaynağındaki gibi dışarıdan uygulanan basınç ve ısı veya sürtünme kaynağındaki gibi işlem esnasında oluşan sürtünme ısı ve basınç ile sağlanır. Oksi-asetilen, ark ve direnç kaynağı gibi sıvı hal (ergitme kaynağı) işlemleri birleştirilecek malzemelerin kısmen erimesini içerir. Bu işlemler oksi-asetilen ve ark kaynağındaki gibi ısı ve direnç kaynağındaki gibi ısı ve basınç uygulamalarına ihtiyaç duyarlar. Isı kaynağı kimyasal, elektriksel veya optik (lazer gibi) olabilir. Son yıllarda geliştirilen bir katı hal (basınç) kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemi, difüzyon kaynağı gibi bir katı hal birleştirme kaynağı olup, birleştirme bölgesinde iç yapıyı önemli oranda

değiştirmedinden, ergitme kaynağı güç olan Al-alaşımların alın birleştirilmesinde başarıyla kullanılmış ve Al-alaşımı levhaların alın ve bindirme kaynağında sıvı hal (ergitme) kaynak metodlarından daha iyi sonuçlar alınmıştır. Yöntem uçak, uzay, gemi, otomotiv sektöründe, gıda depolama elemanları ve radyoaktif atık madde taşıyıcılarının üretiminde kullanılan 2000, 5000, 6000, 7000 ve 8000 serisi Alaşımlarının yanı sıra Cu-alaşımlarının, Ti-alaşımlarının ve bazı elik alaşımlarının birleştirilmesinde uygulama alanı bulmaktadır. Bu kaynak yönteminde kaynaklanan malzemelerde ergime söz konusu değildir. Aynı Şekilde pirinç levhaların bindirme ve alın kaynağı da bu yöntem ile başarılı bir Şekilde gerçekleştirilebilir. Ayrıca bu yöntem, Mg-alaşımları ve yumuşak çelikler gibi malzemelerin kaynağında kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Son yıllarda geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağının nokta kaynağı uygulaması bu yöntemin yeni bir versiyonu olup, perçin ve elektrik direnç nokta kaynağına alternatif oluşturmuştur [Güçlüer, 2007].

## 2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

### 2.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Tanıtımı

Yer kabuğunda en çok bulunan ikinci metalsel element olan ve günümüz endüstrisinde çelikten sonra en fazla kullanılan alüminyum ve alüminyum alaşımları; hafif olmaları, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, artırılabilen mukavemet özellikleri ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle mühendis ve tasarımcılar için günümüzde önemli bir malzeme konumundadır. Aynı zamanda da yer kabuğunda en çok bulunan üçüncü elementtir. Alüminyum hammaddesi olan boksitin bilinen rezervleri, tüketim hızına göre 3000 yıl yetecek miktardadır. Tüketim hızının çok üstünde yeni boksit rezervleri de bulunmaktadır. Ülkemizde, 1960'lardan itibaren, özellikle dayanıklı tüketim mallarının üretimine başlanması ve otomotiv sektöründeki gelişmeler, alüminyuma olan talebi arttırmıştır. Bugün dünyada; 730.000.000 ton/yıl ile ilk sırada yer alan demir-çelikten sonra 22.000.000 ton/yıl ile alüminyum, en çok üretilen ikinci metal konumundadır. Yarattığı katma değer açısından ise, 150.000.000 ton demir-çeliğe eşdeğerdir. Alüminyum metalinde muhtelif alaşımlandırma ve farklı ısı işlem şartı ile farklı fiziksel ve mekanik özellikler elde etmek mümkündür. Dört yüze yakın sayıda Al-alaşımı geliştirilmiştir. Alüminyum alaşım tekniğinin gelişmesiyle geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. Yüksek elektrik ve ısı iletkenliğine sahip olması, atmosferik korozyon direnci, şekillendirme kolaylığı, yüksek çekme mukavemetine sahip alüminyum alaşımlarının meydana getirebilmesi ve hafif olması en büyük avantajıdır. Teknolojik gelişmeler ve alüminyumun özelliğinden kaynaklanan avantajı nedeniyle de alüminyumun kullanıldığı alanların hızla artması beklenmektedir [Tanrıöver 2008].

Ülkemizde, hammaddeden başlayarak uç ürünlere kadar üretim yapabilen tek birincil alüminyum üretim tesisi olan Seydişehir Alüminyum Tesisleri, 1970'li yıllarda alüminyuma olan talep 18.000 ton/yıl iken 60.000 ton/yıl kapasiteyle kurulmuştur. Bugün yurt içi tüketimi 200.000 ton/yıl seviyesine, sektördeki büyük-küçük 1500'e yakın alüminyum firmasıyla alüminyum işleme kapasitesi 350.000-400.000 ton'a ulaşmıştır [İzto, 2009].

Alüminyumun sahip olduğu özelliklerin birleşimi onu son derece faydalı bir mühendislik malzemesi haline getirir. Alüminyum düşük yoğunluğu nedeniyle özellikle taşıt parçaları yapımında tercih edilir. Saf haldeki alüminyum düşük dayanımına rağmen, alaşımlandırılarak dayanımı 690 MPa'ya kadar çıkabilir. Alüminyumun nispeten düşük fiyatı ve birçok faydalı özellikleri onu sanayi için önemli bir metal haline getirmiştir [Kınıkoğlu, 2001].

Alüminyumun endüstri alanına girişi, kurşun ve çinkoya oranla daha sonra girmiş ise de, endüstri alanındaki hızlı gelişme ve mekanik özellikleri iyi olan malzemeye ihtiyaç talebi alüminyumu demirden sonra ikinci sıraya çıkarmıştır [Çam, 2002].

Alüminyumun yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$  olup çelik ( $7,83 \text{ g/cm}^3$ ) ve bakır ( $8,93 \text{ g/cm}^3$ ) yoğunluğunun yaklaşık üçte biri kadardır. Mukavemeti çelikten düşük olsa da, kesit artırılarak çeliğe eş değer mukavemet sağlanmaktadır. Birçok konstrüksiyonda alüminyum alaşımlarının kullanılması ağırlıkta düşme yaptığı için avantaj sağlamaktadır. Doğru yapılan bir yapı tasarımında alaşımsız çelik yerine alüminyum kullanmak konstrüksiyon üzerine % 50 den fazla hafifleme sağlar.

Korozyon dayanıklılığı ve konstrüksiyona hafiflik kazandırdığı için otomobil, kamyon, tren, deniz taşıtı gibi nakliye araçlarında hem döküm hem de dövme alaşımlar kullanılmaktadır. Alüminyum kullanımının yaklaşık %25'i taşıt araçlarının üretimine aittir. Taşıt araçları ne kadar hafif olursa, hareket etmeleri için daha az enerjiye ihtiyaç duyulur. Böylece aracın ağırlığını azaltarak yakıt tüketimini düşürmekte, buna karşın yük kapasitesini artırmaktadır. Günümüzde yaklaşık olarak bir otomobilde 50 kg alüminyum kullanılmaktadır. Bu sayede, yaklaşık 100 kg demir-çelik ve bakırdan tasarruf sağlanmaktadır. Yapılan hesaplar sonucunda alüminyum kullanılan bir otomobilin, yeterince alüminyum kullanılmamış otomobile göre ekonomik ömrü boyunca 1500 Lt daha az yakıt harcadığı tespit edilmiştir. Avrupa'da tüketilen alüminyumun yaklaşık üçte biri ulaşım sektörü tarafından kullanılmaktadır.

Bir uçağın ağırlıkça ortalama %70'i alüminyumdan oluşmaktadır. Alüminyum alaşımlarının hafifliğinin yanı sıra sağlamlığın ile de havacılık sektörünün gelişmesine büyük katkı sağlamıştır. Alüminyum (alüminyum-bakır) alaşımlarından sonra gelecekte en önemli uçak malzemesi alüminyum-lityum alaşımları olacaktır. Alüminyum-lityum alaşımları ile uçakların %15 hafiflemesi mümkündür Alüminyum olmasaydı modern hava taşımacılığında ve uzay sanayinden bahsedilmeyeceği açıktır. Günümüzde kullanılan hava araçlarının gövde yapılarının büyük bir kısmı alüminyum alaşımları kullanılarak imal edilmektedir [TMMOB, 2004, Yurdakul ve ark. 2002].

Alüminyum hava, su, tuzlu su, Petro-Kimyasal ve birçok kimyasal sistem ortamlarında yüksek korozyon dirençleri gösterir. Deniz araçlarında, alüminyum süper yapı sistemleri ile ağırlık merkezi daha aşağıya çekilmekte ve böylece araçların dengesi artırılmakta ve daha çok kullanım hacmi sağlanmaktadır [TMMOB, 2004].

Alüminyum hafif bir metal olma özelliği ile uçak ve uzay araçları dahil bütün taşıt araçlarında ve inşaat sektöründe; iletkenlik özelliği ile elektrik-elektronik araçların yapımında (elektrik kablosu, elektrik nakil hatları v.b.) tercih edilmektedir. Alüminyumun parlak ve şık görüntüsünden yararlanılarak dekoratif amaçlı süs ve ev eşyaları yapımında kullanılmaktadır. Yüksek dayanıklılık/ağırlık rasyosu sayesinde cephe kaplamalarında tercih edilir. Özellikle ulaştırma, inşaat ve ambalaj sektörlerinde olmak üzere, yeni teknolojilerin de etkisiyle kullanımı sürekli artan alüminyum, 21. Yüzyılın metali olarak görülmektedir. Aşağıda kullanım oranları görülmektedir [İzto, 2009].

- İnşaat : % 25
- Ulaşım : % 24
- Ambalaj : % 15
- Elektrik-Elektronik: % 10
- Genel Mühendislik : % 9
- Mobilya, Ofis Eşyaları: %6

- Demir Çelik, Metalurji: %3
- Kimya ve Tarım Ürünleri Sanayi: %1
- Diğer: %7

Alüminyum zehirleyici olmadığından ve bakteri çoğalmasını azalttığından gıda ve ilaç sanayinde ambalaj malzemesi olarak kullanılmaktadır. Alüminyumun homojen yapısı, ince folyo şeklinde üretilebilmesi, hava geçirmezliği ve kolay şekillenebilmesi onu ideal bir ambalaj malzemesi yapar. Daha fazla miktarlardaki diğer ikame ambalaj malzemeleriyle sağlanan korumayı, alüminyum birkaç mikron kalınlıkla çok daha etkin bir şekilde sağlamaktadır.

Alüminyum ambalajın su, gaz, buhar, ışık ve mikro organizma geçişini engellemesi, hava değişimlerinden ve çevreden etkilenmemesi bu niteliklerin arandığı gıda ve ilaç sektöründe ihtiyacı karşıladığı gibi, mor ötesi ve kızıl ötesi ışınlarla karşı koruyucu olması yeni geliştirilen ürünlere de hitap edebilmesine olanak sağlamaktadır.

Alüminyum, binaların çatı ve cephe kaplamalarında, çatı ve pencerelerinde, merdivenlerde, çatı iskeletlerinde ve sera, köprü, kule, depolama tankı vb. yapımında yüksek yansıtma, mükemmel atmosferik direnç ve hafifliği nedeniyle büyük miktarlarda kullanılır. Çeliğe nazaran alüminyum pahalı olmasına rağmen, yapılarda mimari tasarım, hafiflik, korozyon direnci gibi avantajlar sağladığı hallerde alüminyum tercih edilir, İnşaat sektörü için yılda Avrupa da 1,2 milyon ton, ABD'de 1,05 milyon ton, Japonya'da 0,92 milyon ton alüminyum kullanılmaktadır. Hem elektrik iletiminde hem de motor, jeneratör, transformatör gibi cihazların muhtelif kısımlarında alüminyum kullanılmaktadır. Elektrik iletkenliği bakırdan düşük olmasına rağmen aynı ağırlıktaki bakırdan iki katı daha fazla elektrik akımı sağlar. Eş ağırlıktaki tellerde alüminyum telin kesit alanı, bakır telden daha yüksek olduğu için alüminyum tel daha fazla elektrik iletir. Alüminyum son derece iletken bir metaldir. Bu nedenle, tüm alüminyum kullanımının Avrupa'da %10'u, ABD'de % 9'u, Japonya'da %7'si elektrik ve elektronik sektöründe kullanılmaktadır. Alüminyumun bu alanda en çok kullanıldığı yer, elektrik nakil hatlarıdır. Çelik özlü alüminyum

iletkenler, yüksek voltajlı elektrik nakil hatlarında tercih edilen tek malzeme olmuştur. Alüminyum, yeraltı kablolarında, elektrik borularında ve bobin sarımında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Elektronikte, alüminyum kullanım yerleri arasında, şaseler, yongalar, transistör soğutucuları, veri kayıt diskleri ve elektronik cihazların kasaları bulunmaktadır [TMMOB, 2004].

Petrol, lastik, tekstil, kâğıt, kömür madeni gibi sanayi sektörüne ait makine ve teçhizatla alüminyum yaygın olarak kullanılmaktadır. Makine elamanları uygulamalarında, yüksek dayanım/ağırlık oranı, korozyon dayanımı ve işleme kolaylığı alüminyumun üstün özellikleridir. Hafifliği nedeniyle, büyük ve tek parçaların üretimi mümkün olur. Karmaşık kesitli parçaların üretiminde, alüminyum ekstrüzyonu büyük avantajlar sağlar. Çizelge 2.1'de Al-alışımlarının çeşitli uygulamalarda avantaj ve dezavantajları listelenmiştir.

Çizelge 2.1. Al-alışımlarının çeşitli uygulamalarda avantaj ve dezavantajları [Anık ve ark., 1994]

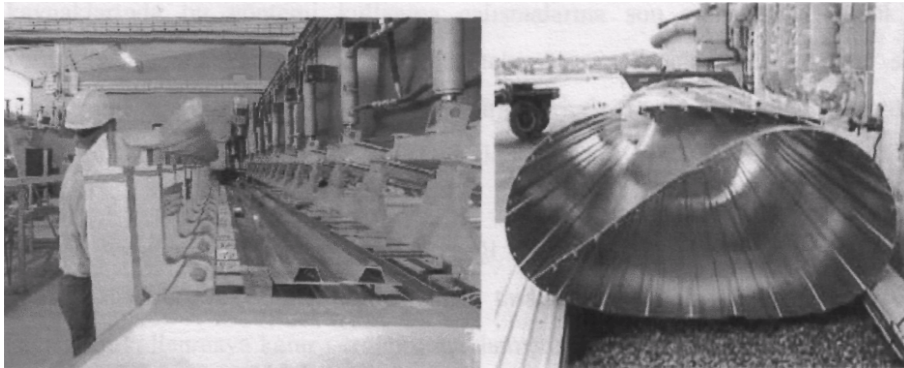
Uygulama	Avantajlar	Dezavantajlar
Elektriksel güç iletimi	Kolay bağlantı, Düşük özgül ağırlık, Maliyet	Mekanik dayanım
Taşıma araçları gövdeleri	Düşük özgül ağırlık, Korozyon dayanımı, Kolay montaj, Onarım ve bakım kolaylığı	Maliyet
Kapı ve pencereler	Kolay fabrikasyon, Korozyon dayanımı, Modülerlik, Maliyet	
Jantlar	Düşük özgül ağırlık, Yüksek ısı iletkenlik, Görünüm, Korozyon dayanımı	Maliyet Yetersiz mekanik dayanım
Otomobil gövdeleri	Görünüm, İşlenebilirlik, Korozyon dayanımı	Düşük darbe dayanımı
Yiyecek kapları	Antitoksik oluşu, Korozyon dayanımı, İşlenebilirlik, Kolay yeniden, Değerlendirme	Maliyet
Araç motorları için pistonlar	Düşük özgül ağırlık, Yüksek ısı iletkenlik, Uygun üretim maliyeti	Isıl genleşme

Geçen 40 yıl içinde alüminyum köpük üretimiyle ilgili birçok çalışma yapılmış olup birçok metot denenmiştir. Alüminyum köpük ürünlerinin en önemli kullanım alanları taşımacılık sektöründe araçların konstrüksiyonunda, yapısal parçalar ve enerji soğutumlu parçalardır. Alüminyum köpük kullanımı yüksek mukavemeti, korozyon direnci, ısıya dayanıklılığı, enerji, ses, titreşim soğurması gibi birçok üstün özelliği



sayesinde kullanımında hızlı bir artış gösterecektir. Otomotivde alüminyum köpük kullanımının üç önemli avantajı vardır. Bunlar enerji soğurması, hafif konstrüksiyon ve yalıtkan bir malzeme olmasıdır. Ayrıca araçların motor kısmında hem ısıya dayanıklı hem de ses ve ısı yalıtkanlığı olan alüminyum köpük potansiyel bir malzemedir. Diğer bir kullanım sahası da rijitlik/ağırlık oranının önemli olduğu havacılık sektörüdür. Alüminyum köpükten üretilmiş plaka ve sandviç paneller, özellikle çok pahalı olan bal-peteği yapıları kompozit malzemelere alternatif bir malzemedir. Denizcilikte alüminyum köpük kullanımı yine hafiflik ve korozyon direnci nedeniyle oldukça avantajlı bir malzemedir. Alüminyum köpük inşaat sahasında tercih edilecek bir malzemedir. Binalarda giydirme cephelerde, ara bölmelerde, çatı kaplamalarında iyi bir yalıtım malzemesi olması nedeniyle kullanılmaktadır [TMMOB, 2004]. Aşağıda kullanım alanlarına dair listeleme yapılmıştır.

- Alüminyum ekstrüzyonları
- Tekne elemanları
- Helikopter platformu
- İç kısımdaki yetecek yatacak yerler
- Deniz üssü yapılar
- Gemi direkleri
- Soğuk hava tesisleri



Resim 2.1. Alüminyum ekstrüzyon panellerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi [Çam, 2003]

Binalarda kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinden Resim 2.1'de örnek uygulamalar gösterilmiştir.

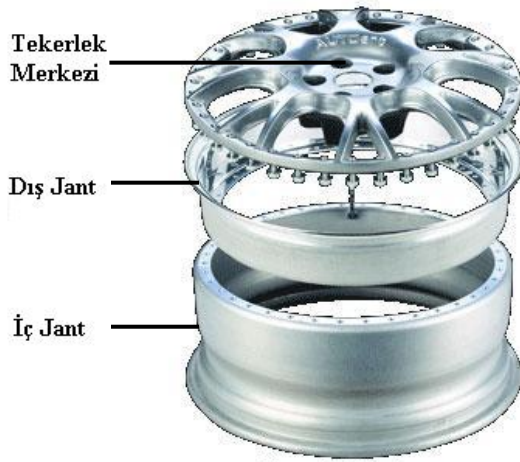
### **2.1.1 Havacılık endüstrisi**

1993 yılında NASA, Lockheed Martin Laboratuvarlarından, Space Shuttle External Tank projesinde (uzay mekiklerinin yakıt tanklarında) AA 2219 alüminyum alaşımı yerine kullanılmak üzere daha yüksek mukavemetli, düşük yoğunluk ve hafiflikte bir malzeme geliştirilmesi için talepte bulunmuştur. Bunun üzerine Al-Li 2195 olarak bilinen çok daha hafif yeni bir alüminyum alaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu alaşım sayesinde dış tank projesinin (yakıt tankı) ağırlığı yaklaşık 3500 kg azaltılmıştır. Yeni düşük ağırlıklı Al-Li 2195 alaşımının ergitme kaynağı çok zor olmakta ve kaynak bölgesinin mukavemeti göz ardı edilemeyecek kadar düşmektedir. Dolayısıyla, bu uygulama için mukavemet düşüşünün daha düşük seviyede olduğu bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı ideal bir birleştirme yöntemidir. Günümüzde, Al-Li 2195 alaşımından üretilen uzay mekiklerinin yakıt tanklarının son kubbe kısımlarının kaynağında bu yöntem başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [Ataoglu, 2002, Çam, 2005].

Sürtünme karıştırma kaynağı yolcu uçakları gibi hafif alüminyum iskeletli yapılarda büyük potansiyel arz etmektedir. Boeing Şirketi, ince alın, bindirme ve T birleştirmeleri ile çeşitli havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılacak kalın alın kaynaklarında bu yöntemi kullanma çalışmalarına son zamanlarda büyük hız vermiştir. Şu ana kadar, uçakların iniş takımlarının kapaklarında ve bazı savaş uçaklarının kaportasında ince T birleştirmelerinde (sandviç montaj) sürtünme karıştırma kaynağı uygulanmış ve test uçuşları başarı ile sonuçlanmıştır. Eclipse Aviation Corporation da, üreteceği özel jetlerde perçinleme ve yapıştırma yerine; maliyet ve montaj zamanından tasarruf amacıyla sürtünme karıştırma kaynağını kullanmaya karar verdiğini açıklamıştır. Bu, belki de sürtünme karıştırma kaynağının ilk büyük havacılık denemesi olacaktır. Bu günlerde deneme uçuşlarının yapılması beklenmekte ve sonuçlarına göre imalatta kullanmaya elverişli olup olmadığına karar verilecektir [Doğan, 2006].

### 2.1.2. Otomotiv endüstrisinde

Otomotiv sektöründe alüminyum kullanımının hızla artması yakıt ve ağırlık tasarrufunda daha etkili araçların üretilmesine yol açmıştır. Süspansiyon kolları gibi küçük çaptaki parçalar bu yöntem ile Japonya 'da üretilmektedir. Ayrıca araçlar için alaşım jantların üretiminde de kullanılmaktadır. Üretilen otomobil jantlarından bir örnek Resim 2.2, Resim 2.3'de gösterilmiştir.



Resim 2.2. Sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak üretilmiş tekerlek jant



Resim 2.3. Alüminyum alaşım jantın üretilme aşamaları [Sti.nasa, 2009]

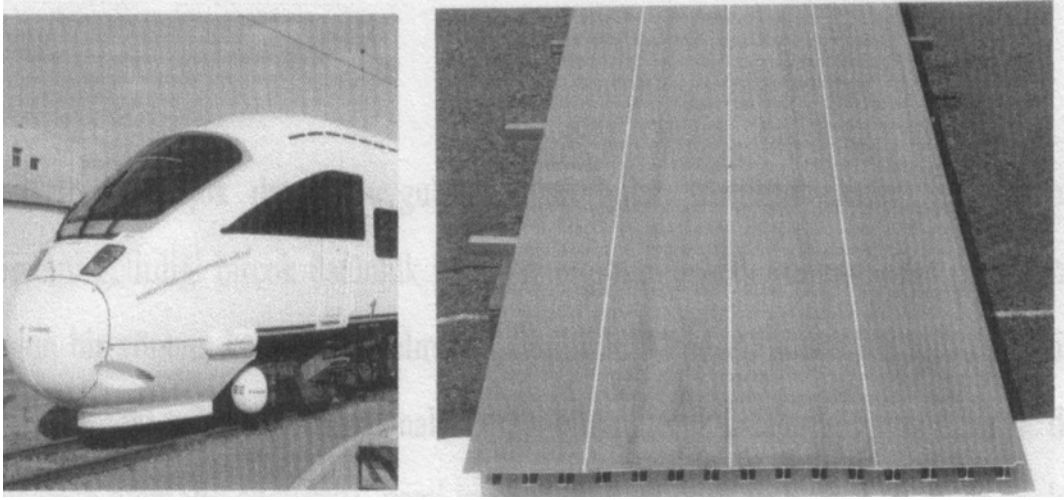
Ulaşım sektöründe alüminyum ekstrüzyonlarının birleştirilmesinde vidalama, perçinleme, yapıştırma, bağlama ve kaynak gibi birçok birleştirme metodu kullanılmaktadır. Bunlardan kaynak metodu ürünün yüksek mukavemetli olması istendiği durumlarda kullanılır [Çam, 2003].

Yöntem, ayrıca alüminyum esaslı arabalarda iç kapı panellerinin yapımında da uygulanmıştır, Amerika'da Smith Corporation sürtünme karıştırma kaynak yöntemini kullanarak ilk prototip motor tezgahlarını geliştirmiştir. Yine aynı yıllarda Amerika'da Tower Automotive, Simulform olarak adlandırılan şasi parçalarının bağlantısı için bağlantı elemanları ve özel gövde yapıları üretmiştir.

Halen, otomotiv endüstrisindeki yüksek üretim oranları, rekabetçi üretim ortamları ve düşük maliyet gereksinimleri geleneksel olan diğer birleştirme tekniklerinin uygulanmasına neden olmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı otomotiv parçalarında, alüminyum birleştirmelerde kayda değer bir potansiyel artışı sağlamakla beraber otomotiv sektöründe kullanılabilirliği sınırlıdır. Otomotiv endüstrisindeki yoğun üretim nedeniyle, bu yeni teknolojiyi uygulamaya geçirmek için bir hayli zamana ihtiyaç duyulması beklenmektedir. Kaynak teknolojisindeki gelişme hızlandığında artırılmış üretim için büyük potansiyel, özel parçaların büyük oranda üretiminin sağlanması sonucunda açığa çıkacaktır. Yüksek kalite ve yükseltilmiş kaynak mukavemeti, ağırlık azaltımını mümkün hale getirecektir. Özellikle, Mg-alaşımlarının otomotiv sektöründe bu yeni kaynak teknolojisi sayesinde kullanımı ile ağırlıktan tasarruf daha da artırılabilir [Doğan, 2006].

Modern yolcu treni vagonlarının imalatında, alüminyum ekstrüzyonlardan üretilen petek paneller daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu panellerde, uzun Al-alaşım ekstrüzyonlar aralarına sıklık artırıcı destekler yerleştirilerek birleştirilmektedir. Bu sayede, hem çarpışmalarda emniyet hem de bükme kuvvetlerine dayanım artırılmaktadır. Klasik ergitme kaynağı, özellikle yüksek mukavemetli Al-alaşımlarında ITAB bölgesinde aşırı mukavemet kaybına sebep olduğu için, son yıllarda Almanya ve İngiltere'de meydana gelen hızlı tren kazalarında daha dayanıklı kaynaklara ihtiyaç duyulduğu gerçeği ortaya çıktı. Sürtünme karıştırma kaynağı,

kaynak bölgesinde daha düşük seviyelerde mukavemet kaybına neden olduğundan cazip bir alternatif oluşturduğu için son yıllarda Avrupa ve Japonya 'da hızlı tren vagonlarının üretiminde bu kaynak teknolojisi ile imal edilen Al-alaşımı petek paneller kullanılmaya başlanmıştır Resim 2.4te gösterilmiştir.



Resim 2.4. Japonya 'da sürtünme karıştırma kaynağının kullanıldığı hızlı tren ve bu yöntem ile kaynağı yapılan Al-paneller [Doğan, 2006]

### 2.1.3. İnşaat endüstrisi

- Alüminyum köprüler
- Alüminyum, kurşun veya titanyumdan yapılmış ön cephe panelleri
- Cam çerçeveleri
- Alüminyum nakil boruları
- Güç fabrikaları kimya endüstrisi için alüminyum reaktörler
- Sıcaklık değişimleri ve hava şartlandırıcıları
- Boru üretimi

#### 2.1.4. Elektrik endüstrisi

- Elektrik motorları
- Motor dağıtma çubukları
- Elektrik kondüktörleri

#### 2.1.5. Diğer endüstri sektörleri

- Buzdolabı panelleri
- Pişirme ekipmanları ve mutfaklar
- Beyaz eşyalar
- Gaz tankları ve gaz merdivenleri [Kayabaş, 2003].

#### 2.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri

- Hafiflik: Demirin özgül ağırlığı  $7.87 \text{ gr/cm}^3$  bakırın özgül ağırlığı  $8.93 \text{ gr/cm}^3$  ve çinkonun özgül ağırlığı  $7.14 \text{ gr/cm}^3$  iken alüminyumun özgül ağırlığı  $2.69 \text{ gr./cm}^3$ 'dür.
- Mekanik dayanım: Alaşımlandırılarak değişik mekanik dayanım değerlerine ulaşmak olanaklıdır.
- Dayanım / ağırlık oranı: Yüksek mekanik dayanımına karşın hafif olması, başta uzay ve uçak endüstrisi olmak üzere birçok endüstri kolunda tercih edilmesine neden olur.
- Korozyon dayanımı: Yüzeyinde oluşan oksit filmi nedeni ile korozyon dayanımı yüksektir.
- Isıl iletkenlik: Maliyet ve ağırlık değerleri ile birlikte ele alındığında diğer metallerden daha yüksek ısıl iletkenlik değerine sahiptir.
- Yansıtıcılık: Işık, radyo dalgaları ve kızılötesi ışınımına karşı koruyucu olarak kullanılabilir.
- Elektriksel iletkenlik: Elektriksel iletkenlik değeri aynı miktardaki bakırın %63'ü kadardır.

- Kıvılcımsızlık: Kıvılcım oluşturmadığı için yakıcı atmosfer ve patlayıcı maddelerle güven içinde kullanılabilir.
- Estetik görünüm: Doğal rengi ve parlaklığının yanı sıra çeşitli yüzey işlemleri uygulanarak değişik renk ve görünümde malzemeler elde edilebilir.
- Döküm kolaylığı: Çeşitli döküm yöntemleri ile karmaşık parçalar bile kolaylıkla dökülebilir.
- Antitoksit oluşu: Gıda sektöründen ilaç sektörüne kadar birçok sektörde ambalaj malzemesi olarak kullanılabilir.
- Maliyet: Birincil üretimdeki yüksek enerji girdisinden ötürü pahalı bir metaldir.
- Fiyatı: Londra Metal Borsası tarafından saptanır.
- Yeniden değerlendirilebilirlik: Ekonomik ömrünü doldurmuş ve proses sürecinde hurdaya çıkmış malzemeler başlangıçtaki metalurjik özelliklerini büyük ölçüde yitirmeden, birincil üretimin %5'i kadar bir maliyetle yeniden kullanılabilir.

Alüminyumun en önemli özellikleri özgül ağırlığının küçük olması, elektriği ve ısıyı çok iyi iletmesi, yumuşak ve sünek olması ile bazı alaşımlarının çökelme yoluyla sertleşebilmesi sayılabilir. Alüminyumun ergime sıcaklığı düşük, buna karşılık kendini çekmesi çok fazladır, bu nedenle saf alüminyum yerine alaşımları tercih edilir [Gürler, 2000].

Alüminyum saflık dercesine göre sınıflandırılabilir. Mekanik özellikleri Si, Fe, Ti, Cu ve Zn gibi elementlerin etkisi ile yükselmesine karşın kimyasal maddelere olan dayanıklılığı azalır; mekanik özellikler alüminyuma uygulanan şekil verme işlemine bağlı olarak da büyük ölçüde değişir [Kurtuluş, 2001].

Çizelge 2.2. Alüminyumun genel özellikleri [TMMOB, 2004, Gürler, 2000, Tülbentçi, 1990]

Atom No	13
Atom Ağırlığı	26,97 g/mol
Çekme Mukavemeti	40 - 80 MPa
Akma Mukavemeti	10-30MPa
Sertlik (HB 2,5)	12-20HB
Elastik Modül	$7,2 \times 10^4$ MPa
Kayma Modülü	$2,7 \times 10^5$ kg/cm <sup>3</sup>
Erime Sıcaklığı	660°C
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	150-300°C
Buharlaşma Noktası	2450°C
Isısal Genleşme	$23,6 \times 10^{-6}$ (20-100°C)
Özgül Isısı	0,224 cal/g(100°C)
Yoğunluk (25°C)	2,7 g/cm <sup>3</sup>
Kristal Kafes Sistemi	KYM(a=4,091 Å)
Sıcaklık tesiri ile uzama	
0°C - 50°C	1,17mm
0°C - 100°C	2,38 mm
0°C - 200°C	4,94 mm
0°C - 400°C	10,60 mm
0°C - 500°C	13,70 mm
% Uzama	60
Kopma Uzaması	%30-40
Katılaşırken Kendini Çekme Miktarı	% 1,7 – 1,8
Katı Halden Sıvı Hale Geçerken Meydana Gelen Hacim Büyümesi	% 6,5
Çentik Darbe Tokluğu	10kg/cm <sup>2</sup>
Elektrik İletkenliği	% 64,94 IACS
Elektrik Direnci	$26548 \times 10^{-4}$ ohm/cm 20°C'de

Alüminyum soğuk ve sıcak olarak şekillendirilebilir. Soğuk şekillendirme yeniden billurlaşma sıcaklığının altında sıcak şekillendirme ise bu sıcaklığın üzerinde yapılır. Soğuk şekillendirmede taneler bozulmuş olarak kalır. Sıcak şekillendirmede ise taneler bozulmadan önceki durumuna gelirler. Alüminyum oda sıcaklığında soğuk şekil değiştirdiğinde, çekme ve akma mukavemeti yükselir. Buna karşılık uzama ve şekil değiştirme miktarı soğuk haddeleme derecesine bağlı olarak azalır. Sert (soğuk şekillendirilmiş) alüminyum, yumuşak alüminyumdan daha az korozyon



mukavemetine sahiptir. Alüminyumun sıcak şekil değiştirme sıcaklığı 300-450°C arasındadır [Gürler, 2000].

Alüminyum, %99 - 99,5 - 99,8 - 99,99 saflık derecesinde üretilir; %99,99 saflıktaki alüminyum yüksek nitelikte saf alüminyum olarak tanımlanır ve burada fiziksel ve mekanik özellikler belirli bir şekilde kendini gösterir. Bu alüminyum yumuşaktır ve kolay işlenebilir, ısı ve elektriği iyi iletir, ışığı iyi yansıtır ve korozyona karşı çok dayanıklıdır. Alüminyumun oksijene karşı ilgisi çok fazladır; hava ile temas neticesinde, çok kısa zamanda oksijenle birleşerek alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) oluşturur ve bunun sonucunda yüzey gri renkli, gayet sıkı bir oksit tabakası ile örtülür ve bu tabaka, su ile yıkanarak çıkartılamaz; alüminyumun bu özelliği kullanma sahasını çok genişletmiştir [Kurtuluş, 2001].

Alüminyum diğer metallere göre daha yüksek ışık yansıtma ve ısı yayınımlı kabiliyetine sahiptir. Yüksek saflıkta alüminyum levha %80'den fazla ışık yansıtabilir. Alüminyum folyolar ısı yalıtkan malzemesi olarak kullanılırlar. Daha büyük dalga uzunlukları radyant enerji yansıtma kabiliyeti dolayısıyla radyo ve radar donanımında refrakterler ve dalga gaydları gibi işlerde kullanım alanı bulur.

Ultraviyole ışığı yüksek yansıtması nedeniyle güneş ışınlarının zararlı etkilerine karşı koruyucu olarak alüminyum boyaları kullanılmaktadır. Diğer taraftan, ergime derecesinin düşük olmasından dolayı, alüminyum yüksek sıcaklıklardaki performansı iyi değildir ve düşük sertliğinden dolayı zayıf aşınma direncine sahiptir [Donald, 2002].

### **2.2.1. Mekanik özellikler**

Çizelge 2.3'de saf alüminyumun oda sıcaklığındaki çekme deney sonuçları görülmektedir. Metalin saflığı azaldıkça katı eriyik sertleşmesine bağlı olarak mukavemet artmakta ve süneklik azalmaktadır. Saf alüminyum ve alüminyum alaşımlarının elastisite modülü Gpa ve Poisan oranları 0,33 civarındadır. Metal sıcaklığı arttıkça saf alüminyumun akma mukavemeti ve elastisite modülü azalır.

Çizelge 2.3. Saf alüminyumun oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri [Tülbentçi, 1990]

% Saflık	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama
99,99	10	45	50
99,8	20	60	45
99,6	30	70	43

Çeşitli alüminyum alaşımlarının ısıtılma işlem sonucu istenilen şekilde mukavemet, tokluk, sertlik ve diğer mekanik özellikleri geliştirebilir. Mekanik özelliklerin böyle değişebilir olması alüminyum alaşımlarının kullanım alanlarını genişletmektedir.

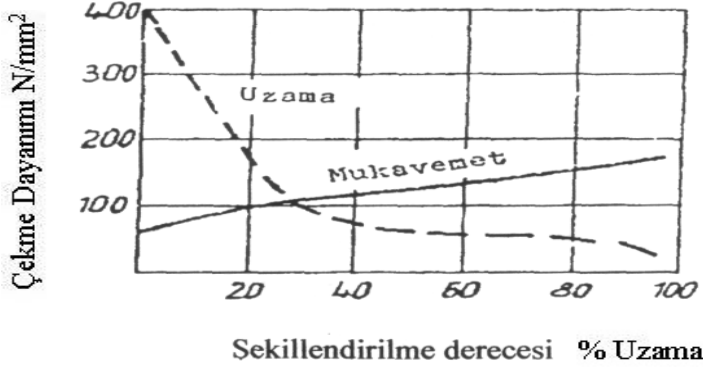
### 2.2.2. Fiziksel özellikler

Alüminyum kübik yüzey merkezli (YMK) kafes yapısında katılaştır ve ergiyene kadar kafes yapısı değişmez. Bu YMK kafes yapısı metale yüksek süneklik kazandırır. Katı alüminyumun yoğunluğu oda sıcaklığında  $2,7 \text{ g/cm}^3$  değerindedir. Ergime sıcaklığı  $660^\circ\text{C}$ 'dir.  $660^\circ\text{C}$ 'deki alüminyumun yoğunluğu  $2,34 \text{ g/cm}^3$  olur. Sıvının sıcaklığı arttıkça yoğunluk azalır.  $750^\circ\text{C}$ 'deki  $2,34 \text{ g/cm}^3$  olan sıvı yoğunluğu  $850^\circ\text{C}$ 'de  $2,32 \text{ g/cm}^3$  değerine düşer [Tülbentçi, 1990]. Saf alüminyumun sıcaklığı arttıkça termal genleşme katsayısı ve elektrik öz direnci artarken ısı iletim katsayısı azalır.

### 2.2.3. Şekil değiştirme kabiliyeti

Saf alüminyumun, soğuk ve sıcakta şekil değiştirme kabiliyeti çok iyidir. Alüminyum ve alaşımları, soğuk şekil verme sırasındaki pekleşme gösterirler. Saf alüminyumun soğuk şekil değiştirme derecesine bağlı olarak, çekme mukavemeti ve uzama miktarındaki değişimi Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Alaşımların özelliklerinin

değişimi, alaşım elementlerinin cinsine ve miktarına bağlı olarak değişir, alüminyumun sıcak zorlanmasında, çekme mukavemeti sıcaklık ile düzgün olarak azalmaktadır.



Şekil 2.1. Alüminyumun soğuk pekleşmesi [Kayabaş, 2003]

#### 2.2.4. Kimyasal özellikler

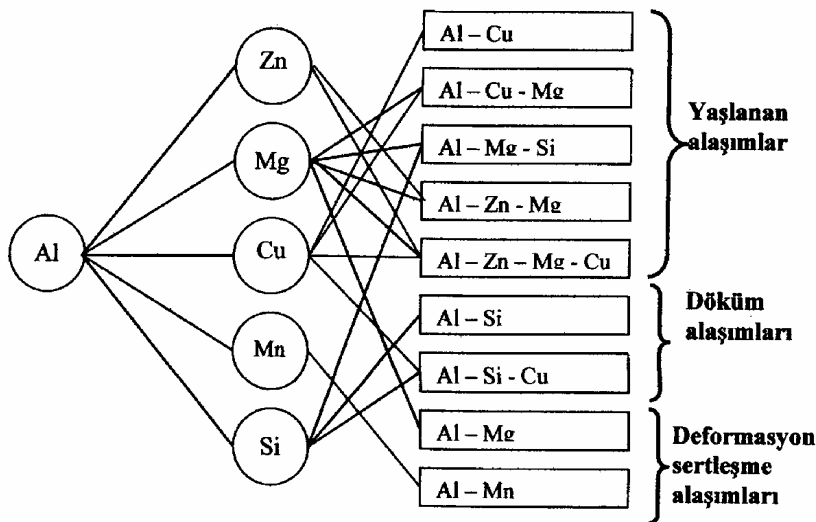
Alüminyum yüksek bir kimyasal aktiviteye sahiptir. Oksijen, halojenler, kükürt ve karbon ile bileşiklerinin teşekkül enerjisi çok yüksektir. Alüminyum havada ince fakat çok sıkı bir alüminyum oksit tabakası ile kaplanır. Elektron mikroskobu ile yapılan araştırmalar bu örtünün çok sık ve gözeneksiz olduğunu göstermektedir. Bu örtü, metali oksitlenmenin devam etmesine karşı korur. Malzemeye yüksek bir korozyon direnci kazandırır. Ancak bazı asitler ve tuzlar bu oksit tabakasını çözer. Alüminyum bu maddelere karşı dayanıklı değildir. Yüzeydeki oksit tabakası suni olarak kuvvetlendirilir. Metal anot olarak galvanik bir banyoya asılır. Devreden geçen elektrik akımı ile parça oksit tabakası kuvvetlendirilir. Bu işleme eloksal işlemi denir. Oksit filminin kırılması halinde hemen yeniden oluşur [Kurtuluş, 2001]. Metalik parlak alüminyumun yüzeyindeki koruyucu oksit tabakası takriben 0,2 mm kalınlığındadır. Alüminyum havada, ergime noktasının (650°C) hemen altına ısıtılırsa oksitlenme devam eder. Alüminyum ergime noktası üzerindeki sıcaklıklarda daha hızlı oksitlenir. İnce taneli metal havada ısıtılınca çok kuvvetli oksitlenir. Alüminyumda magnezyum, kalsiyum, sodyum, silisyum ve bakırın varlığı oksidasyon eğilimini kuvvetlendirir. Özellikle Al-Mg alaşımları ısıtılınca kolayca

oksitlenir ve yüzeylerinde gevrek bir oksidasyon tabakası meydana gelir. Alüminyum, oksijenle reaksiyonu kuvvetli bir ekzotermiktir ve birçok metalin oksitlenmesinden çok daha fazla ısı verir (400 kcal/g.mol). Alüminyum hidrojen ile reaksiyona girmektedir. Alüminyum hidrojeni kolayca çözmektedir.

### 2.2.5. Korozyon özellikleri

Her ne kadar alüminyumun oksijene büyük eğilimi varsa da, korozyona dayanımı göreceli olarak yüksektir. Bunu sağlayan da, metalin yüzeyinde oluşup onu daha ileri bir oksitlenmeden koruyan yoğun, nüfuz ettirmez oksit filmidir. Alüminyumun oksidi çok sert olduğundan, oksit tabakası aşınmaya mukavemeti artırır. Bu bakımdan alüminyumun oksijene eğilimi faydalı olmaktadır. Bu yüksek eğilimi dolayısıyla alüminyum, çeliklerde deoksidan olarak kullanılır.

Alaşım elementlerinin ilk görevi yüksek uzama kabiliyeti ve korozyona dayanıklılık gibi faydalı özellikleri kötü yönde etkilenmeden saf alüminyumun, düşük akma sınırını yükseltmektedir. Alüminyuma katılan başlıca alaşım elementleri, magnezyum, manganez, silisyum, bakır, çinko ve bazı hallerde nikel ve titanyumdur Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2. Temel alüminyum alaşımları [Kayabaş, 2003]

Alaşım elementleri alüminyum içinde üç farklı halde bulunur;

- Alüminyum içinde katı halde çözünebilirler,
- Katı halde alüminyumda çözünmeyip veya sınırlı miktarda çözünüp, mekanik bir karışım oluştururlar,
- Bileşik oluştururlar[Gürler, 2000].

Yüzey merkezli kübik alüminyum kristal kafesi yapısına, ancak çok küçük oranlarda bu elementlerden alabilir ve karışım kristali teşkil edebilir. Yabancı atomlar kristal kafes içerisinde kaymaya karşı direnci artırır; yani akma sınırını yükseltirler, şekil değiştirme kabiliyeti fazla etkilenmez.

Alaşım elementlerinin miktarının artması ile bunların, alüminyum içinde çözülmeyen kırılgan metaller arası bileşikler ve ara fazlar oluşturur ve böylece mukavemet daha da yükselir ama şekil değiştirme kabiliyeti azalır [Kurtuluş, 2001].

Alüminyum karışım kristalleri yüksek sıcaklıklarda oda sıcaklığına göre daha fazla element çözüdürürler. Bu nedenle soğuma sırasında ikincil ayrışmalar ortaya çıkar. Böylece birçok alüminyum alaşımını sertleşme kabiliyetine sahip olur ve alaşımsız çeliklerin sertliğine erişerek hafif inşaat konstrüksiyonlarında kullanılabilirler [Kaluç, 2003].

Alüminyum ve alaşımları iki ana gruba ayrılır; dövme alaşımları ve dökme alaşımları. Dövme alaşımları sac, folyo, çubuk, tel boru, profil gibi şekillerde olan malzemelerdir. Bunlar kütük, blok halinde döküldükten sonra sıcak şekillendirme (ekstrüzyon, dövme, haddeleme vb.) ve soğuk şekillendirme (hadde, çekme vb.) yöntemleri ile bitmiş hale getirilir. Dökme alaşımlar ise ergitme işleminde sonra kum, kokil, savurma, hassas döküm yöntemlerinden biri ile bitmiş parça haline getirilen malzemelerdir [Tülbentçi, 1990, Çetinkaya, 2002].

### 2.3. 1xxx, 3xxx, 5xxx Serisi Alaşımlar

1xxx serisi alaşımlar minimum % 99,0 alüminyum, empürite olarak da silisyum ve demir içerirler. Bu alaşımlar yüksek oranda haddelenerek levha veya folyo haline getirilerek kullanılırlar. 1100 alaşımlarının tavllanmış durumda çekme mukavemeti 90 MPa dır. Başlıca elektrik ve kimya sektörlerinde kullanılmaktadır.

3xxx serisi alaşımlarının en önemli alaşımı 3003 tür. Bu alaşım 1100 alaşımına % 1,25 mangan ilavesi ile oluşturulur. 3003 alaşımının tavllanmış durumda çekme dayanımı 110 MPa dır. Bu serinin alaşımları iyi işlenebilirliğin gerektirdiği yerlerde kullanılabilen genel amaçlı alaşımlardır. Manganlı alaşımlar mimari uygulamalarda tercih edilirler.

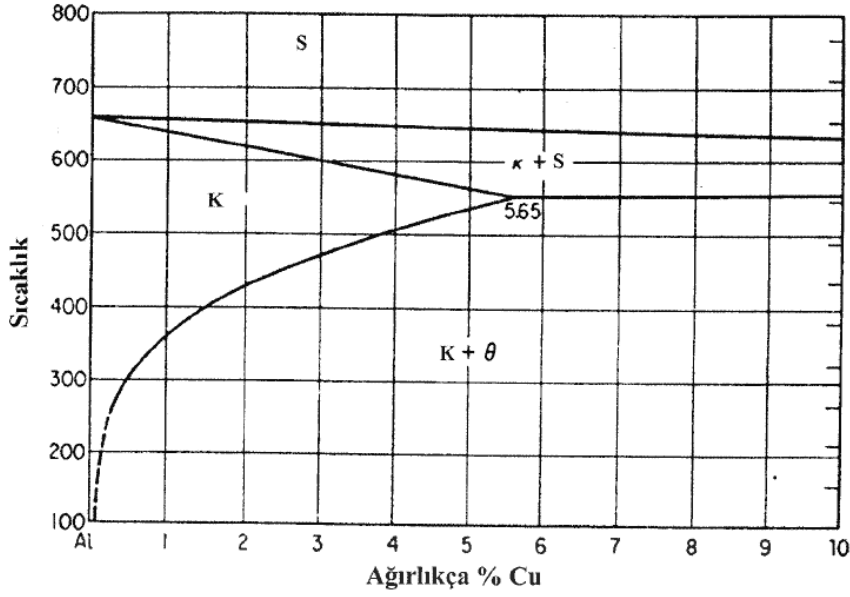
5xxx serisi alaşımlarının ana alaşım elementi olan magnezyum katı eriyik mukavemetleşmesi sağlar ve miktarı % 5' e kadar çıkabilir. Bu serinin endüstride kullanılan en önemli alaşımı 5052'dir. Bu alaşım % 52,5 Mg, % 0,2 Cr içerir ve tavllanmış durumdaki çekme dayanımı 193 MPa'dır. Magnezyumlu alaşımlar özellikle denizcilik sektöründe tercih edilirler.

#### 2.3.1. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlar ( 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi )

Kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleri sonrasında mekanik özellikleri geliştirilebilen alaşımlara verilen genel isimdir. Örnek olarak 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alaşımlar çözelti tavlamasına tabii tutulduktan sonra su verilerek ya da çok hızlı soğutulularak dayançları arttırılabilir, oda sıcaklığında deforme edilerek dayançları daha ileri seviyeye taşınabilir. Isıl işlemin getirdiği en önemli dezavantaj ise malzemenin işlenebilirliğini azaltmasıdır.

2xxx serisi alaşımlarının birçoğuna bakırın yanında magnezyum ve düşük miktarda diğer elementler eklenir. 2xxx serisi alaşımları birim ağırlık dayanımının yüksek olması gereken uçak sanayi gibi alanlarda kullanılır. Bu alaşımlar katı eriyik mukavemetlenmesi ve çökelti sertleşmesiyle dayanım kazanırlar. Endüstriyel

uygulama alanı bulabilmiş en önemli alaşım 2024 alaşımıdır. 2024-T6 alaşımı % 4,5 bakır, %1,5 magnezyum ve % 0,6 mangan bulundurur ve çekme dayanımı 442 MPa' dır. Şekil 2.3'te Cu – Al alaşım sisteminin alüminyumca zengin kısmını gösterir faz diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Cu – Al alaşım sisteminin alüminyumca zengin kısmını gösterir faz diyagramı [Taban, 2004]

6xxx serisi alaşımlarının  $Mg_2Si$  intermetalik bileşikleri, çökelti sertleştirilmesi ile dayanım artışı sağlar. En yaygın kullanılan alaşım 6061 alaşımıdır ve bu alaşım % 1 magnezyum, % 0,6 silisyum % 0,3 bakır içerir. 6061 alaşımının çekme mukavemeti 290 MPa'dır. Bu seri, otomotiv sektöründe genel amaçlı yapı elemanı olarak kullanılır. 7xxx serisi alaşımlar, temel çökelti  $MgZn_2$  intermetalik bileşiğinden oluşur. Çinkonun ve magnezyumun alüminyum içerisinde yüksek çözünürlüğü yüksek yoğunluklu çözeltilerin oluşmasını, bu da dayanımın oldukça yükselmesini sağlar. Bu serinin en önemli alaşımı 7075' tir. Bu çalışmada incelenecek olan alaşım da 7075' tir. Bu alaşım % 5,6 çinko, % 2,5 magnezyum, %1,6 bakır, % 0,25 krom ihtiva eder. 7075-T6 alaşımının çekme dayanımı 504 MPa' dır. Bu seri yüksek dayanımın gerekli olduğu yerlerde kullanılır [Saracoğlu, 2007].

Çizelge 2.4. EN 573-3'e göre 2xxx serisi alüminyum alaşımları [Taban, 2004]

Alaşım Gösterimi	Alaşım Simgesi	Kimyasal Sembol	Kimyasal Bileşim (%)															
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Uyartı	Ti	Dğerleri Herbiri	Dğerleri Toplam	Alüminyum (min)	
EN AW-2001		EN AW-AlCu5,5MgMn	0,20	0,20	5,2-6,0	0,15-0,50	0,20-0,45	0,10	0,05	0,10	0,05	0,10	0,05	0,20	0,05	0,05	0,05	Kalam
EN AW-2007		EN AW-AlCu4PbMgMn	0,8	0,8	3,3-4,6	0,50-1,0	0,40-1,8	0,10	0,20	0,8	0,20	0,10	0,20	0,20	0,10	0,30	0,15	Kalam
EN AW-2011		EN AW-AlCu6BFe	0,40	0,7	5,0-6,0	-	-	-	-	0,30	-	-	-	-	0,05	0,15	0,15	Kalam
EN AW-2011A		EN AW-AlCu6BFe(A)	0,40	0,50	4,5-6,0	-	-	-	-	0,30	-	-	-	-	0,05	0,15	0,15	Kalam
EN AW-2014		EN AW-Cu4SiMg	0,50-1,2	0,7	3,9-5,0	0,40-1,2	0,20-0,8	0,10	-	0,25	-	-	0,15	0,05	0,15	0,15	0,15	Kalam
EN AW-2014A		EN AW-AlCu4SiMg(A)	0,50-0,9	0,50	3,9-5,0	0,40-1,2	0,20-0,8	0,10	0,10	0,25	-	-	0,20 Zr + Ti	0,05	0,15	0,15	0,15	Kalam
EN AW-2214		EN AW-AlCu4SiMg(B)	0,50-1,2	0,30	3,9-5,0	0,40-1,2	0,20-0,8	0,10	-	0,25	-	-	0,15	0,05	0,15	0,15	0,15	Kalam
EN AW-2017A		EN AW-AlCu4MgSi(A)	0,20-0,8	0,7	3,5-4,5	0,40-1,0	0,40-1,0	0,10	-	0,25	-	-	0,25 Zr + Ti	-	0,05	0,15	0,15	Kalam
EN AW-2117		EN AW-AlCu2,5Mg	0,8	0,7	2,2-3,0	0,20	0,20	0,10	-	0,25	-	-	-	-	0,05	0,15	0,15	Kalam
EN AW-2618A		EN AW-AlCu2Mg1,5Ni	0,15-0,25	0,9-1,4	1,8-2,7	0,25	1,2-1,8	-	0,8-1,4	0,15	-	-	0,25 Zr + Ti	0,20	0,05	0,15	0,15	Kalam
EN AW-2219		EN AW-AlCu6Mn	0,20	0,30	5,8-6,8	0,20-0,40	0,20	-	-	0,10	-	-	0,05-0,15	0,02-0,10	0,05	0,15	0,15	Kalam
EN AW-2319		EN AW-AlCu6Mn(A)	0,20	0,30	5,8-6,8	0,20-0,40	0,20	-	-	0,10	-	-	0,05-0,15	0,10-0,20	0,05	0,15	0,15	Kalam
EN AW-2024		EN AW-AlCu4Mg1	0,50	0,50	3,8-4,9	0,30-0,9	1,2-1,8	0,10	-	0,25	-	-	-	0,15	0,05	0,15	0,15	Kalam
EN AW-2124		EN AW-AlCu4Mg(A)	0,20	0,30	3,8-4,9	0,30-0,9	1,2-1,8	0,10	-	0,25	-	-	-	0,15	0,05	0,15	0,15	Kalam
EN AW-2030		EN AW-AlCu4PbMg	0,8	0,7	3,3-4,5	0,20-1,0	0,50-1,3	0,10	-	0,50	-	-	0,20Bi; 0,8-1,5Pb	0,20	0,10	0,30	0,30	Kalam
EN AW-2031		EN AW-AlCu2,5NiMg	0,50-1,3	0,6-1,2	1,8-2,8	0,50-1,0	1,6-1,2	-	0,6-1,4	0,20	-	-	-	0,20	0,05	0,15	0,15	Kalam
EN AW-2091		EN AW-AlCu2Li2Mg1,5	0,20	0,30	1,8-2,5	0,10	1,1-1,9	0,10	-	0,25	-	-	0,04-0,16Zr	0,10	0,05	0,15	0,15	Kalam



### 3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAK KABİLİYETİ

Üretim yöntemi olarak kaynak uygulanarak inşa edilmiş bir yapının, üretilmiş bir makine parçasının veya tamir edilmiş hasarlı bir parçanın kullanma emniyeti ve kalitesi sadece kullanılan ek kaynak metalinin cinsine ve diğer bir deyişle seçimine bağlı değildir. Bir kaynak bağlantısının özelliğine etkiyen faktörlerin en önemlisi kaynak işlemi sırasında oluşan yüksek sıcaklığın yerel dağılımı ve değişimi karşısında esas metalin davranışdır. Sıcaklığın reaksiyonlar üzerine olan etkisi bilinen bir gerçektir; genel olarak tüm reaksiyonların oluşum ve gelişim hızı ile metallerin birbiri içinde çözülme kabiliyeti yükselen sıcaklıkla artar. Örneğin, çökeltme sonucu elde edilmiş olan bir takım özellikler yüksek sıcaklıklarda kaybolur. Bu durum özellikle çökeltme sertleşmesi ile sertleştirilmiş alüminyum ve alaşımlarının kaynağında karşılaşılan metalurjik bir olaydır. Genel olarak kaynak işlemi, gerektirdiği yüksek sıcaklık derecesinden dolayı metalin iç yapısına ve bazı hallerde de kimyasal bileşimine etki etmekte ve sonuçta malzemenin özellikleri değişmektedir [Taban, 2004].

Alüminyum alaşımlarının kaynağı, az karbonlu çelikler ile karşılaştırıldığında bazı zorluklar göstermesine rağmen, gerekli önlemler alınarak uygun bir kaynak bağlantısı elde etmek mümkündür. Alüminyum ve alaşımlarının kaynak kabiliyetini şu hususlar sınırlar [Donald, 2002];

Bazı alüminyum alaşımlarında, kaynak esnasında uygulanan ısı çevrim, ana katı çözelti içinde bulunan alaşım elementlerinin, erimiş bölge veya esas metalde çökeltmesine neden olarak bağlantıyı mekanik ve kimyasal özelliklerinin esas metalden farklı olmasına yol açar. Alüminyumun düşük sıcaklıkta erimesi ve eriyen metalin tav rengi göstermemesi kaynak işlemini güçleştirmektedir. Kaynak bölgesinin kaynak sıcaklığına erişip erişmediği ancak çok tecrübeli kaynakçılar tarafından fark edilmektedir. Alüminyumun ısı iletkenliğinin yüksek olması; kaynak bölgesinde yerel sıcaklık yoğunlaştırmasını zorlamakta ve birçok hallerde ön tavi gerekli kılmaktadır [Anık, 1994].

### 3.1. Oksit

Alüminyumun yüzeyindeki sıkı oksit tabakası, kaynak sıcaklığında erimeyerek kaynak dikişine elektrodun erimesiyle geçer ve bağlantının sürekliliğini sağlayan damlacıkların bağ oluşturmaya engel olur. Bunun yanı sıra kaynak banyosu içinde kalıp katılan oksit tabakası, kaynak birleştirmesinin mukavemetini azaltır [Ataoğlu, 2002].

Tabii oksit, asal gaz kaynak arkları veya tozlar vasıtasıyla giderilebilecek niteliktedir. Bununla beraber daha kalın oksit, mekanik veya kimyasal araçlarla kaynak öncesinde giderilmelidir. Alüminyum oksit, esas metalin ergime sıcaklığından çok daha yüksek olan 2050°C civarında ergir. Kaynakta esas metalin oksitten çok daha önce eriyeceği aşıkardır. İnce oksit tabakaları gaz altı kaynak arkı veya dekapan tarafından uzaklaştırılır. Kalın oksit tabakaları ile kaplanmış parçaların kaynağında; kaynağa başlamadan önce, yüzeydeki alüminyum-oksit tabakası kaynak bölgesinden frezeleme yoluyla veya paslanmaz çelik fırça ile fırçalayarak tamamen temizlenmelidir. Bu temizleme işlemi hem külfetli olmakta, hem de maliyeti artırmaktadır. Oksidi gidermek için klorür ve flüorür ihtiva eden tozların kullanıldığı bazı birleştirme işlemlerinde kullanım sırasında korozyon problemi ihtimalinden kaçınmak için birleştirme işleminden sonra bu tozlardan birleştirme yeri arındırılmalıdır. Bu nedenle toz kullanılmaksızın oksidi giderebilen asal gaz ark kaynak (MIG) işlemlerinin kullanımı geniş ölçüde ön plana çıkar [Senyen, 2002].

Kaynak ağzı yüzeyleri ve kaynağa yakın bölgeler (kaynak ağzının en az 50 mm yakını) temiz, yağsız ve kuru olmalıdır, iyi bir depolama ve mekanik işlemler sonrası kaynak yüzeylerinin özel bir yağ çözücü ile temizlenmesi, bu tür hazırlık işlerini kolaylaştırır. Bunların yanında, alüminyum malzemelerin kaynağında kullanılan el aletleri yalnız bu malzemeler için kullanılmalıdır. Alüminyum malzemeler çok yansıtıcı bir yüzeye sahip olduğu için, kaynak esnasında oluşan ultraviyole radyasyon yanıklarından korunmak için koruyucu giysiler giymek zorunludur [Tülbentçi, 1990].

### 3.2. Hidrojen Çözünürlüğü

Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında, kaynağı etkileyen en önemli problemlerden biri de hidrojen gazının kaynak bölgesine çeşitli yollarla nüfuz ederek, kaynak dikişinde porozite oluşturmaktadır. Katı haldeki alüminyumda hidrojen çözünürlüğü yoktur. Alüminyum eridiği zaman ortamdaki atomik hidrojeni kolaylıkla absorbe eder. Ark ortamına giren H<sub>2</sub> gazı atomik hidrojen (H) haline geçer ve kaynak banyosu tarafından emilir. Kaynak banyosu katılaşmaya başladığında ise hidrojen yayınması başlar. Fakat banyonun hızla katılaşmasından dolayı yayınan gazın ancak bir miktarı atmosfer ortamına çıkar. Kaynak banyosundan dışarıya çıkamayan hidrojen gazı gözenek halinde kaynak dikişinde sıkışıp kalır.

Kaynak banyosuna atomik hidrojen, kaynak banyosu içerisinde bulunan yağdan ve nemden oluşur. Bunlar ana metal ve kaynak teli üzerinde hatta koruma gazında (nem) olabilir. Özellikle 5xxx serisi Al-Mg alaşımları bu oksitlere karşı çok hassastır. Bu oksitler ısıtılmak suretiyle giderilemez. Bu nedenle bu tip kaynak telleri kuru ortamlarda depolanmalıdır [Senyen, 2002].

### 3.3. Isı Özellikleri

Alüminyum ve alaşımlarının yüksek ısı iletim katsayıları nedeniyle ısıyı çeliğe nazaran 5-6 misli daha fazla iletirler. Bu nedenle kaynak sırasında daha yüksek bir ısı girdisi gerekir. Alüminyum, ısıl genişmesinin çeliğe göre iki kat fazla olması, katılaşma sırasında %6 hacim daralmasına neden olur. Bu özellikler kaynak banyo hacminin ve kaynak sonrasında deformasyonun fazla olmasına neden olur. Alüminyumun kaynağında soğuk bölgelere doğru hızlı ısı kaçışını dengelemek amacıyla parça kaynak tan önce en az 250°C'de tavlansınarak ısıya doyurulmalıdır ve sürekli kaynak yapılarak bu sıcaklık muhafaza edilmelidir [Eryürek ve Barlas, 1998].

Yüksek silisyumlu (%12-13) dökme alüminyum alaşımları hariç, alüminyum ve alaşımlarında termal (ısı) genişleme katsayısı çeliğin yaklaşık iki katıdır. Alüminyum kaynağında, ergiyik katılaşırken %6,6 oranında hacimsel bir büzülme göstererek bu

malzemenin kaynağında büyük ölçüde kendini çekme, çarpılma (distorsiyon) problemlerine ve iç gerilmelere bağlı çatlamalara yol açar [Çalışkan, 1994].

İyi bir kaynak kalitesi için, alüminyumun kaynak öncesi temizliği gereklidir. Kaynatılacak parçaların yüzeyinde bulunabilecek; gres, petrol yağlar, toz ve kir kaynağın içersinde boşluklar oluşmasına neden olur. Ayrıca alüminyumun yüzeyinde bulunan oksit tabakası kirlilik yaratır. Örneğin; 1100 ve 3003 gibi ana metaller fabrikasyon olarak ince bir oksit tabakaya sahiptirler. Yüzeyde bulunan pislik, toz, kir gibi maddeler yıkama ile temizlenirler ve kaynak yapılacak yüzeyde nem kalmaması için kurutulurlar. Gresin ve yağın çıkarılması, toksin olmayan çözücüler emdirilmiş bezlerin pis tonlanması ile yapılır. Oksit tabakaları, tel fırça, kazıyıcı veya ege ile giderilmelidir.

Alüminyum dökümlerde kaynaktan önce dikkatli bir ön ısıtma gerekir ve kaynaktan sonra yavaş soğumaya bırakılmalıdır. Metal çevresindeki sıcaklıklarda büyük farklılıklar vardır. Kaynak bölgesindeki sıcaklık artışı kaynağı güçleştirir. Alüminyum yüksek genleşme katsayısına ve büyük miktarda kendini çekme özelliğine sahip olduğu için kısmi ısıtmalardan sonra dikişte kuvvetli kaynak gerilmeleri meydana gelir. Bu gerilmeler dikiş çevresinde çatlaklara neden olur. Bu sebeplerden dolayı belirli yerlerden bağlandıktan sonra düzenli şekilde ısıtılmalıdır. Ön ısıtma sıcaklığı 370°C'nin altında olmalıdır. Döküm alaşımlarda iç gerilmelere mani olmak için 300-400°C'lik bir ön ısıtma mecburiyeti vardır.

Alüminyumun kaynağı bütün pozisyonlarda yapılabilir. Buna rağmen tavan kaynağı güçtür. Dikey kaynak pozisyonları genellikle 60-35 mm kalınlığındaki malzemelere uygulanır. Yanma meydana geldiği için daha ince malzemelere uygulanmaz. Alüminyumun kaynak sonrası temizliği çok önemlidir. Eğer ıslaklık varsa, özellikle gaz kaynağında kaynak tozu kalıntıları alüminyumu aşındırır. Küçük parçalar % 10 sülfürik asitli soğuk bir banyoya daldırılarak 10-13 dakika temizlenir ve ya 66°C 'de %5 sülfürik asitli soğuk banyo içerisine 5-10 dakika daldırılır. Asit soğuk veya sıcak suyla tekrar temizlenir. Aynı zamanda artıkların ortadan kaldırılması için buhar ile temizleme yapılır. Özellikle banyoya daldırılmayacak kadar büyük parçaların

temizliğinde buhar kullanılır. Yapışmış parçaları ortadan kaldırmak için de fırçalama yapılır [Şandır, 2002].

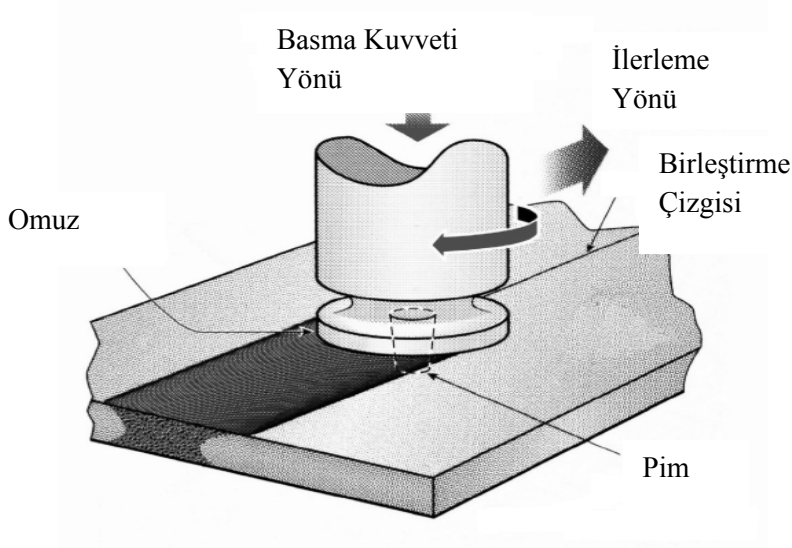
Sonuç olarak, alüminyum ve alaşımlarının kaynağında, iyi bir kaynak kabiliyetinin sağlanması;

- Kaynak edilen malzemenin alaşım grubunun ve özelliklerinin iyi seçilmesi,
- İyi bir temizleme işleminin uygulanması,
- Uygun bir tasarımın yapılması,
- Yerde bir kaynak sırasının takip edilmesi,
- Elverişli bir kaynak yönteminin ve tekniğinin seçilmesi ile sağlanabilir.

#### 4. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Bu kaynak yöntemi alın altına sabitlenmiş iki levhaya yüksek devirde dönen omuzlu bir pim daldırılarak kaynak yapılmak istenen uzunluk boyunca belirli bir hızda ilerletilmesinden ibarettir. Sürtünme karıştırma kaynağı, sürtünme kaynak yönteminin geliştirilmiş bir başka yöntemidir. Bilindiği gibi sürtünme kaynağı genellikle silindirik kesitli malzemelere uygulanan ergitmesiz kaynak yöntemidir. Herhangi bir boşluk, çatlak veya deformasyon meydana gelmeksizin güvenli bir kaynak yapmanın çok zor olduğu birçok malzemeyi kaynakla birleştirmeyi basitleştirmiştir [Kurt, 2004].

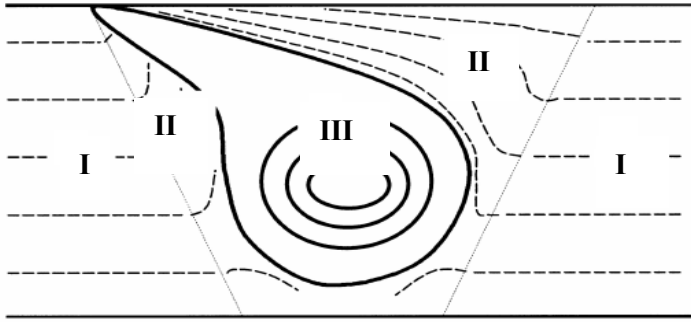
Sürtünme karıştırma kaynağı birleştirme prensibi oldukça basit olup, süreç sırasında aşınmayan ve tükenmeyen bir karıştırıcı uç kullanılmaktadır. Karıştırıcı uç pim ve omuz olarak tanımlanan iki kısımdan oluşmaktadır. Yapılacak kaynak tipine göre pim özel olarak tasarlanmalıdır. Omuz ise pime göre çapça daha büyük ve sürtünme karıştırma kaynağı için gerekli ısı girdisini süreç sırasında sağlamaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Sürtünme karıştırma kaynağı gösterimi [Deniz, 2006]

Şekil 4.1.'de sürtünme karıştırma kaynağı için tasarlanmış bir takımın alın kaynağı ile kaynak işleminin şematik görüntüsü görülmektedir.

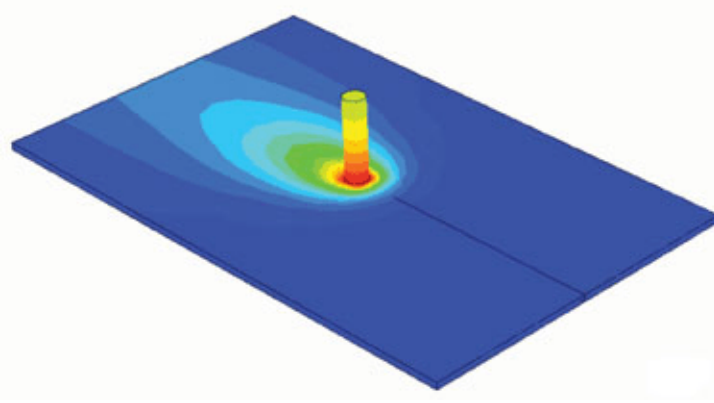
Şekil 4.2'de Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 4.2. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü. I: Isının tesiri altındaki bölge (ITAB), II: Termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (TEB), III: Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge [Deniz, 2006]

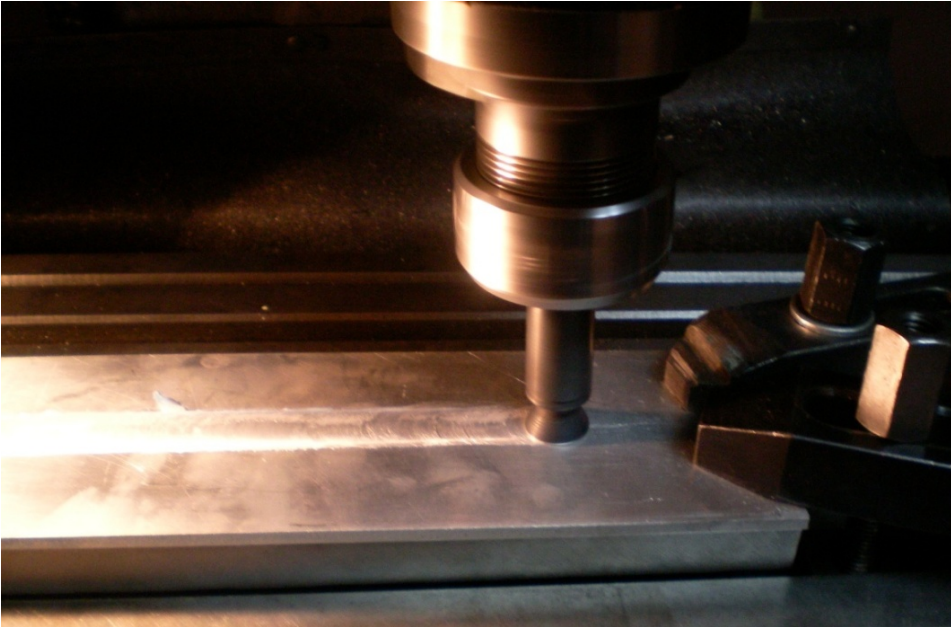
Sürtünme karıştırma kaynağında, karıştırıcı aparatın iş parçasına dalması ve sürtünmesi sonucunda bölgesel olarak ısı girdisi oluşmaktadır. Sürtünme karıştırma aparatı ile iş parçası arasında oluşan sürtünmeden dolayı kaynak bölgesindeki malzeme yumuşamakta ve plastik şekil değişimi gerçekleşmektedir. Karıştırıcı aparatın iki temel fonksiyonu vardır, birincisi karıştırıcı ucun iş parçasına sürtünmesi ile birleşme için gerekli ısı girdisinin sağlanması, ikincisi ise yumuşayan malzemenin birleştirme bölgesinde karıştırılarak plastik deformasyonunun sağlanmasıdır. Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı iki farklı şekilde olabilir. Kaynakla birleştirilecek olan parçaların hareketi söz konusu olabileceği gibi, takımın dönme ve ilerleme hareketi de mümkün olabilir. Karıştırıcı uç kaynak yapılacak iş parçasına daldırılarak kaynak yapılacak malzeme (levha) boyunca kalıpcı freze tezgahına istenen ilerleme verilir. Pim malzemeye temas ettiğinde sürtünme kaynağındaki duruma benzer durum oluşarak temas noktasında ısı, sürtünmenin etkisi ile hızla artar ve malzemenin plastik şekil değişimine neden olur. Karıştırılan malzeme

soğuyarak katılaştır ve birleşme olayı gerçekleşir. Şekil 4.2’de de uygulama esnasındaki sıcaklık değişimleri örneklendirilmektedir.



Şekil 4.3. Sürtünme karıştırma kaynağı sürecinde pim ve levhaların sıcaklık değişimleri

Aşağıda sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması görülmektedir.

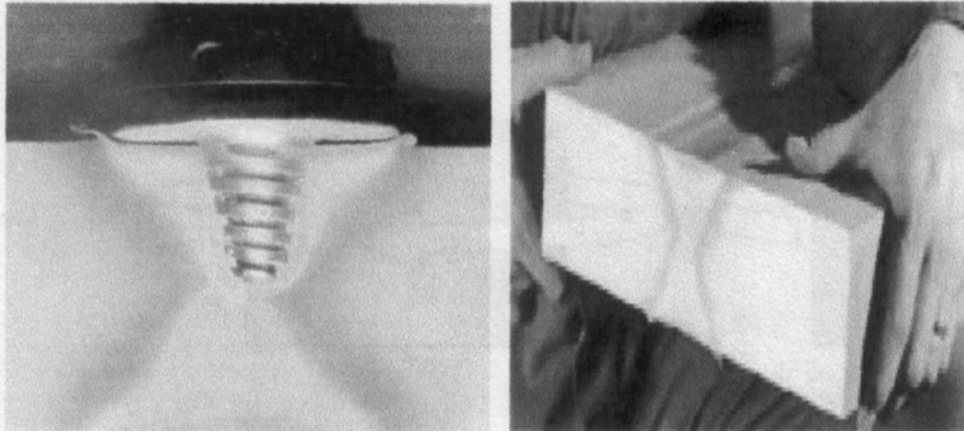


Resim 4.1. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması

Resim 4.1’de 4,5 mm kalınlığındaki 2024 alüminyum levhaların sürtünme karıştırma kaynağıyla alına alına birleştirilmesi görülmektedir.



Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirme işlemi pimin eğik konumda levhalara daldırılması ile yapılabilmektedir. Bu kaynak yöntemi ile tek pasoda 50 mm kalınlığa kadar Al-alaşımı levhaların alın kaynağı yapılabilmektedir. Ayrıca çift taraftan kaynak yaparak kalın parçaların da birleştirilmeleri mümkündür. Bu şekilde, 75 mm kalınlığındaki 6082 Al-alaşımı levhalar çift taraftan kaynak edilerek başarı ile birleştirilmiştir [Kayabaş, 2003].



Resim 4.2. Çift taraftan sürtünme kaynağı yapılarak birleştirilmiş 75 mm kalınlığındaki 6082 al -alaşımı levhaları [Çam, 2005]

Herhangi bir pim geometrisi için, sürtünme karıştırma kaynağını etkileyen üç temel parametre vardır. Bunlar;

- Pimin dönme hızı,
- Pimin (tezgah tablasının) ilerleme hızı,
- Pimin batma derinliği.

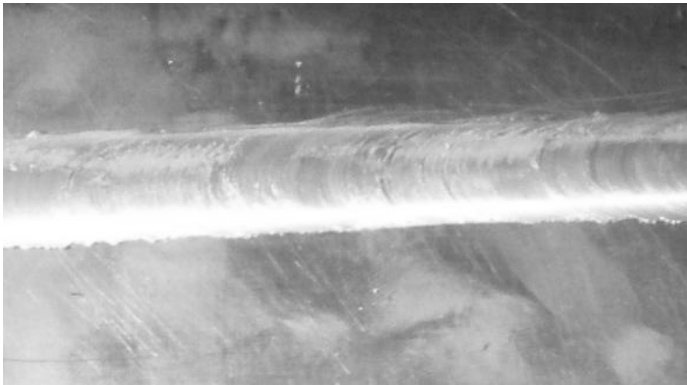
Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi, ark kaynağına oranla, işlem kolaylığı, dolgu malzemesi ve koruyucu gaz kullanımına ihtiyaç duyulmaması, kaynak bölgesinde ince taneli yapı oluşumu, mekanik özellik kaybı olmaması sayesinde yüksek performans gösteren birleştirme elde edilir. Hatasız kaynak dikişi elde edilmesi ve düşük distorsiyon ve düşük kalıntı gerilimleri oluşması gibi avantajları olan bir kaynak yöntemidir [Lockwood ve Reynolds, 2003].

Temiz ve çevreci bir kaynak yöntemi olması yöntemin uygulama alanını genişletmektedir. İşlem radyasyon, toksit gazlar gibi olumsuz sonuçlar yaratmamaktadır [Çam, 2005].

#### 4.1. Kaynak Metalürjisi

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi bir katı hal kaynak yöntemi olduğundan kaynak dikişinde ergime meydana gelmez. Yüksek ısı olmadığından ısıdan etkilenen bölge de oldukça dardır. Ergitme kaynak yöntemleriyle elde edilen kaynak dikişlerinden farklı bir kaynak dikişi ve metalurjik yapı elde edilir [Özdemir, 2003].

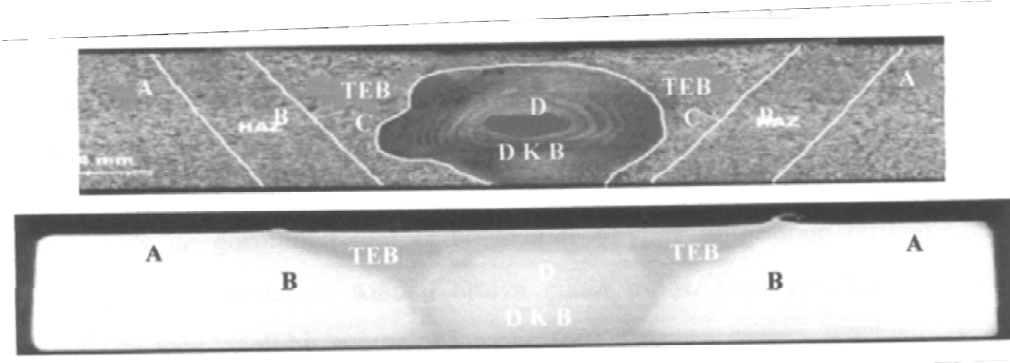
Tipik olarak soğan halkaları, ağaçlardaki yaş halkaları gibi pek çok konsantrik halkalar oluşmaktadır ve kaynak metalinin biçimi çok değişken olarak oluşmaktadır ve bu biçim kaynak edilen alaşım türüne, kaynak işlem parametrelerine bağlıdır. Soğan halkalarının bu oluşumlarını, ısıdan etkilenmiş bölgenin duvarlarından akan ve soğumuş malzemenin görünümü veya yansıması olarak ifade etmek olasıdır. Soğan halkalarının oluşumunun nedeni olarak, takımın dönme sırasında ileri doğru hareketi ile ilgili Resim 4.3'te oluşan soğan halkaları görülmektedir.



Resim 4.3. Dairesel hareketten dolayı oluşan soğan halkaları

Bu nedenle kaynak bölgesindeki karışma tam ve dikkatli bir şekilde olmalıdır. Kaynak metalinin çapı, takım ucunda bulunan pimin çapından çok az büyük

olmasına karşın omuz çapından bir hayli dar olarak oluşur. Oluşan kaynak nüfuziyetlidir ancak bu parça kalınlığına ve pim derinliğine bağlı olarak değişir [Kayabaş, 2003]



Resim 4.4. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü [Kayabaş, 2003]

Şekil 4.4'te **A**: ısıdan etkilenmeyen bölge, **B**: ısının tesiri altındaki bölge (ITAB), **C**: termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (TEB), **D**: dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) görülmektedir [Lockwood ve Reynolds, 2003, Kayabaş, 2003, Özdemir 2003, Yavuz ve Çam, 2001]

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde kaynak bölgesi dört farklı bölgeden oluşmaktadır.

**A Bölgesi**: Kaynak işlemlerinden etkilenmeyen bölgedir. Esas metal olup hadde yapısındadır. Bu bölgede plastik şekil değiştirme olmaz. Malzemenin mikro yapı ve özelliklerinin değişmediği ana metal bölgesidir [Özdemir, 2003].

**B Bölgesi**: Ark kaynağındaki ITAB'a benzer dikişten uzakta ısının tesiri altındaki bölge (ITAB). Artık kaynak gerilmeleri ve ısı değişimleri gibi etkilerle özelliklerin değişebileceği bir bölgedir. Yaşlanmış veya mekanik yaşlandırılmış alaşımlarda bu bölge sert değildir. Bu bölgedeki malzeme karıştırma esnasında meydana gelen ısıdan etkilenir ve malzemenin mikro yapı ve özellikleri değişir.

*C Bölgesi:* Dikişle bitişik termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge (TEB). Plastik deformasyon gözlenir. Termo-mekanik olarak etkilenme gerçekleşir. Bu etkileşimde yeniden kristalizasyona neden olur ve ısının tesiriyle ince taneli bir yapı oluşmaktadır. Karıştırma esnasında oluşan ısı, bu bölgenin mikro yapı ve özelliklerini değiştirir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen alüminyumun termo-mekanik etkilenen bölgesinde yeniden kristalleşme görülmez.

*D Bölgesi:* Kaynak metalidir. Dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bölge (DKB) olarak adlandırılmaktadır. Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgenin dinamik toparlanma sonucu oluştuğu kabul edilir. Kaynak metalinin mikro yapısında da alaşım türü, ısıl işlem, tane boyutu ile beraber bir değişim olabilmektedir. Kaynak metalinin boyutları nüfuziyete etki eder. Şekil 4.5'te de görüldüğü gibi D bölgesinde kaynak bölgesinde biriken yüksek orandaki plastik genişleme sonucu ortaya çıkan mikro yapı yeniden kristalleşen bölgede çok ince taneli bir yapıya neden olur [James ve ark., 2003].

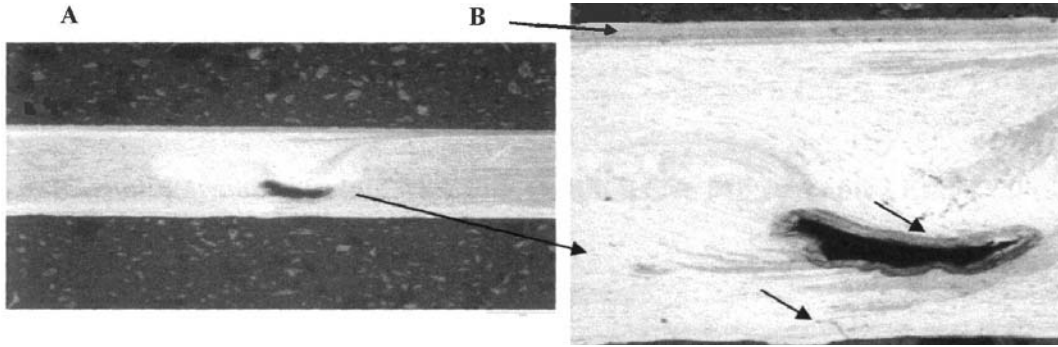
#### **4.2. Kaynak Bölgesinin Mekanik Özellikleri**

Ergitme kaynakları ile karşılaştırıldığında, sürtünme karıştırma kaynaklı alüminyum alaşımlı birleştirmeler iyi bir kaynak profiline, düzgün ve temiz bir yüzeye sahiptir. Pimin omzunun dönmesi sonucu, bu metot ile elde edilen kaynağın üst yüzeyleri makine ile işlenmiş gibidir ki bu da yorulma ömrünü artırmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı ile en uygun kaynak parametreleri kullanarak Al ve alaşımlarında hatasız kaynak dikişi elde edilebilir. Resim 4.5'te bu yöntem ile elde edilmiş hata içermeyen bir alüminyum alaşımında kaynak dikişinin kesiti görülmektedir [Çam, 2005, Yavuz ve Çam, 2001].



Resim 4.5. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Al-alaşımının kaynak bölgesinin kesiti [Ataoğlu, 2002]

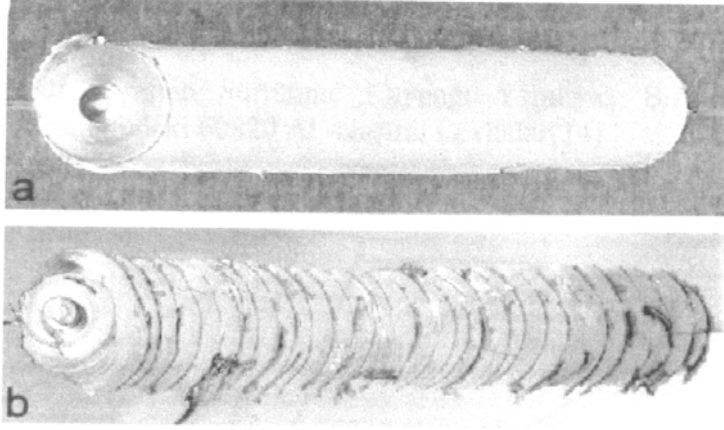
Kaynak dikişi ve ısıdan etkilenmiş bölge bu kaynak yönteminde mevcuttur ve bu bölgelerdeki homojen olmayan içyapı kaçınılmazdır. İçyapının ve tane büyüklüğünün homojen olmayışı, sürtünme karıştırma kaynaklı birleştirmelerin korozyon davranışını, ana malzemeden farklı kılar [Ataoğlu, 2002].



Resim 4.6. Sürtünme karıştırma kaynağında düz yüzeyle batıcı uç kullanımından dolayı oluşan tünel şeklinde porozite ve batma derinliğinin iyi ayarlanmamasından kaynaklanan karıştırılmamış bölge, soğuk birleşme bölgesi, A) Kaynak dikişinin kesit görünüşü B) Hataların detaylı görünüşü [Çam, 2002, Dong ve ark., 1999]

Resim 4.6'da Sürtünme karıştırma kaynağında düz yüzeyle batıcı uç kullanımından kaynaklanan hatalar görülmektedir. Kaynak yüzeyindeki pürüzlülük ve pim omzunun bıraktığı izler çentik etkisi yapar bu da Resim 4.7'de görülmektedir. Buda kaynak yüzey kalitesini düşürür. Bu faktörler, birleştirmenin yorulma ömründe azalmaya

neden olur. Fakat değişik kaynak yöntemleri arasında yorulma dayanımını en az olumsuz yönde etkileyen yöntem sürtünme karıştırma kaynağıdır [Çam, 2003].



Resim 4.7. Sürtünme karıştırma kaynağında elde edilen kaynak yüzey kaliteleri. a) istikrarlı batıcı uç ilerlemesi ve b) istikrarsız batıcı uç ilerlemesi [Ataoğlu, 2002]

Bu hata, batıcı ucun kaynak yapılacak levhaya uygun bir şekilde daldırılmaması ve pim omzunun yüzeye temasının düzgün yapılamamasından kaynaklanmaktadır [Ataoğlu, 2002]. Ayrıca pimin kaynak yapılacak levhalar üzerinde gereğinden fazla sürede kalması ve levhaların aşırı ısınması ile de bu süreksizlikler görölmektedir.

### 4.3. Kaynak Parametrelerinin Mekanik Özellikler ve Mikro Yapıya Etkisi

#### 4.3.1. Malzemenin kalınlığı

Kaynak için kullanılan profillerin kalınlıkları 1,2 mm den 75 mm 'ye kadar çıkabilmekte ve tek paso ile sürekli kaynak bağlantısı elde etmek mümkün olmaktadır. Farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirme işlemi pimin eğik konumda levhalara daldırılması ile yapılmaktadır bu olay Şekil 4.9'de görölmektedir.



Resim 4.8. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde pimin eğik konumda daldırılması

#### 4.3.2. Karıştırıcı ucun malzemesi ve tasarımı

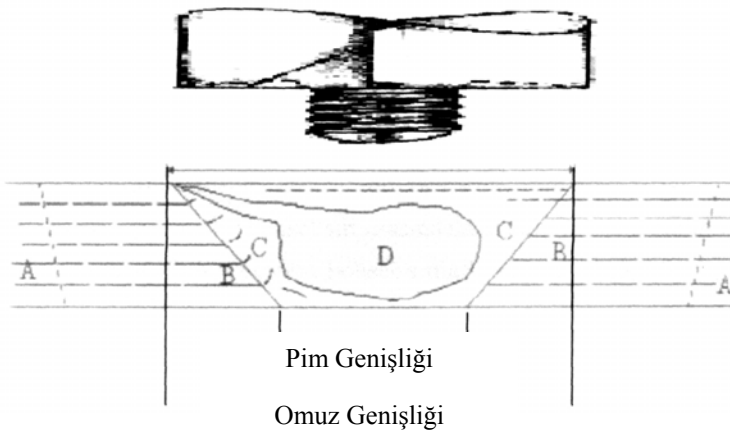
Sürtünme karıştırma kaynak tekniğinde birleştirme kalitesini etkileyen en önemli faktör, karıştırıcı ucun tasarım profili ve diş formudur. Bu faktöre bağlı olarak birleştirme kalitesi değişmektedir. Bu nedenle en uygun ve ideal sonuçları verecek özelliklere sahip bir karıştırıcı ucu seçmek oldukça önemlidir. Özellikle takım malzemesi analizi; düşük alaşımlı çeliklerden yüksek hız çeliğine kadar değişebilmektedir [Taban, 2004].

Sürtünme karıştırma kaynağında özel hazırlanmış pimler kullanılır. İki malzeme arasında boyuna hareketle yüksek kalitede alın ve bindirme kaynakları elde edilir. Sürtünme karıştırma kaynağı takımları genelde profilli pimlerden yapılır. Pim üzerinde istenen çaplarda omuz mevcuttur. Karıştırıcı uç birleşme bölgesi içine daldırıldığında geniş çaplı omuz diye tarif edilecek metal kısım birleştirilecek yüzeylere önce bir temas yapar. Karıştırıcı ucun girme derinliği kaynak nüfuziyeti olarak da söylenebilir. Omzun malzemeye teması kaynak bölgesine ilave bir ısı

sağlamak yanında yumuşayan metalin kaynaklama işlemi sırasında etrafa saçılmasını da engeller. Omuz malzemeye temas ettikten sonra yumuşayan bölge, karıştırıcı uçun geometrisine uygun olarak kesik koni şeklindeki karıştırıcı ucu içine alır. Isıl olarak yumuşayan metal karıştırıcı uca doğru giderek daralan ancak üst yüzeyde omuz ile temas eden daha geniş bir görünüm arz eder. Karıştırıcı uçtan omuza kadar olan bölgedeki kombine sürtünme ısı, gömülmüş olan karıştırıcının çevresi ile malzeme üst yüzeyi ile omuzun temas ettiği temas yüzeyinde yumuşamış bir metal oluşturur. Karıştırıcı uç çevresinde malzeme akışı karıştırıcı uç arkasında ise malzeme ile dönen uç arasında izafi bir dönüş meydana gelmektedir [Kayabaş, 2003].

Sürtünme karıştırma kaynak uçları yüksek sıcaklıklarda iyi statik ve dinamik özellikleri olan aşınmaya dayanıklı malzemeden üretilir. Tek pasoda pim değiştirilmeden 5 mm kalınlığındaki alüminyum parçaları 1000 m kaynak edilecek şekilde tasarlanır ve imal edilir [Anık, 1994].

Pimin karıştırma etkisi değişik tipteki malzemeler üzerinde enine kesitlerinden kolayca görülebilir. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi (Kaynak dikişi+DKB+ITAB) yapılarında gözenek ve boşluk bulunmaması; sürtünme karıştırma kaynağının tipik özelliğidir [Kaluç, 1998].

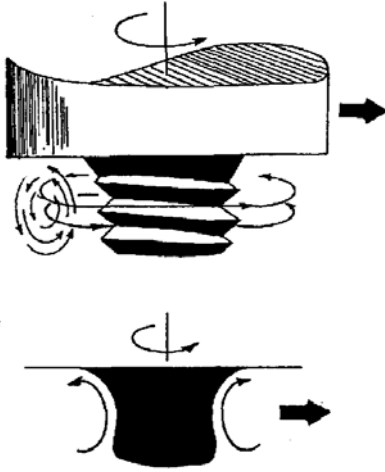


Şekil 4.4. Pim karıştırma etkisinin kaynak dikişine etkisinin enine görüntüsü [Özdemir, 2003]



Bu kaynak yöntemi geliştirildiğinde ilk kullanılan batıcı uçlar yüzeyine helisel dış açılmış uzunluğu kaynak edilecek levha kalınlığından biraz kısa silindirik pimlerdi. Fakat son yıllarda sürtünmeden açığa çıkan ısı ile akıcı kıvama gelen malzemenin kaynak bölgesinde kalmasını geliştirmek için çok değişik pim dizaynları geliştirilmiştir. Karıştırıcı ucun profil dizaynı, kaynak bölgesindeki metal akış yolunu kolaylaştıracak bir dizayn şekli düşünülerek yapılmalıdır. Karıştırıcı uç helisel bir vida dış formuna sahip olup, uç profil kesiti değişik şekillerde tasarlanabilmektedir [Özdemir, 2003].

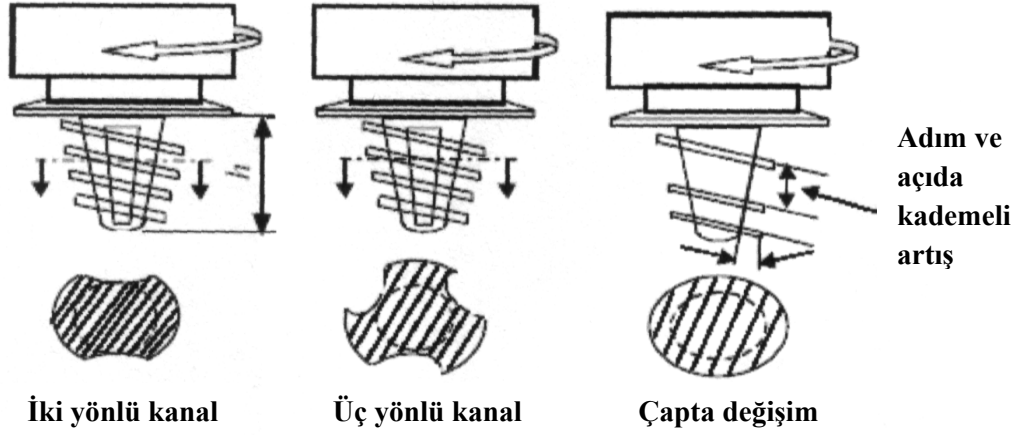
Şekil 4.5'te sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan klasik bir takım biçimi ve alüminyumun karışması prensibi görülmektedir.



Şekil 4.5. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan klasik bir karışma prensibi görüntüsü [Taban, 2004]

#### Whorl™ serisi pimler (Batıcı uçlar)

Denemeler sonunda, Whorl™ konfigürasyonları belirlenmiştir (Şekil 4.6). Kesik koni şeklindeki Whorl™ pim (probe), plastik akışa uğrayan metali aşağıya doğru yönlendirmek için helisel sırtlı profiller ihtiva etmektedir.

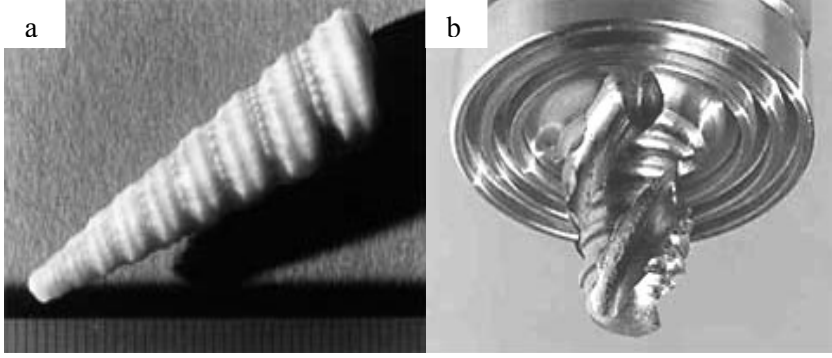


Şekil 4.6. Kaynak işlemlerinde kullanılan sürtünme karıştırma aparatları Whorl konfigürasyonlar [Küleççi, 2003]

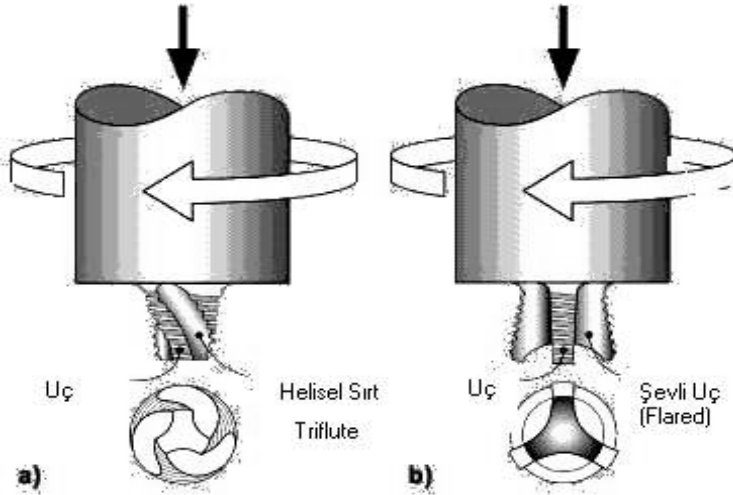
Whorl™ konsepti dairesel olmayan probe kesitleri sağlar. Bu nedenle, malzemenin daha kolay akmasına imkan vermek için pimin yer değiştirme miktarı, dönme miktarından daha az olması gerekmektedir [Küleççi, 2003].

#### Mx Triflute™ ve Flared-Triflute™ serisi pimler (Batıcı uçlar)

Multi-Helix takımların (MX Triflute™) yivlerinin çevresinde helisel sırtların bulunması takımın hacmini düşürmekle beraber malzeme akışına yardım eder ve yüzeydeki oksitleri dağıtır (Resim 4.9 a ve b). Alın kaynağında kullanılan, Whorl™ ve Triflute™ uçları kesik piramit şeklindedir ve yüzeylerinde aşağıya doğru delme etkisini kolaylaştırmak maksadıyla kaba işlenmiş helisel sırtlar ve oluklar bulunmaktadır. Bu girintili köşe şekilleri ucun hacmini azaltır ve statik hacim oranı için uygun olan karıştırma hacmini sağlar. Daha iyi bir hacim oranı ile malzemenin akış yolu daha iyi olur ve böylece uç daha etkili çalışır. Ayrıca özellikle ucun etrafındaki kaba işlenmiş helisel sırtlarda bulunan girintili köşe özellikleri kaynak bölgesindeki yüzey oksitlerinin parçalanmasına ve dağıtılmasına yardımcı olur.

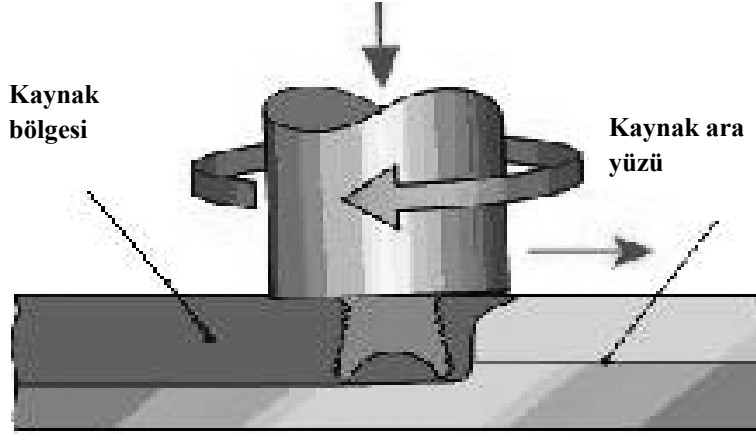


Resim 4.9. a) MX Triflute™ pimin esin kaynağı deniz kabuklarıdır ve b) MX Triflute™ serisi pimin Şekil ve şematik çalışma şekli [Çam, 2005]



Şekil 4.7. a) MX Triflute™ ve b) Flared-Triflute™ tasarımları [Çam, 2005]

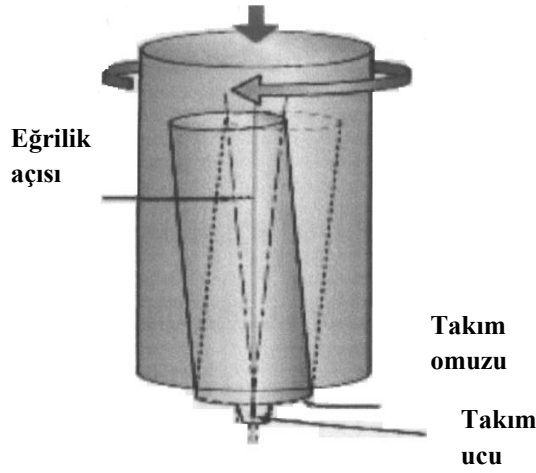
Bindirme kaynağında ise uç, daha geniş kaynak bölgesi sağlamak ve kaynak yapılan ara yüzeylerde daha büyük levha kalınlıklarından dolayı oluşabilecek problemleri önlemek maksadıyla daha farklı tasarlanmıştır (Şekil 4.8). Bindirme kaynağında pim yüzeyi kaynak ara yüzeyine zorunlu olarak diktir ve alttaki levhaya yeteri kadar nüfuz edebilmesi ana amaçtır. Kaynak ara yüzeyinin üst yüzeyden mesafesi ve ucun girintilerinin kaynağın kenarıyla kesiştiği açı çok önemlidir. Bu özellik, yorulma ile doğrudan bağlantılıdır. Ucun karakteristiği, süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki farkın artırmasıyla ucun etrafındaki ve aşağısındaki akış yolunun büyümesidir.



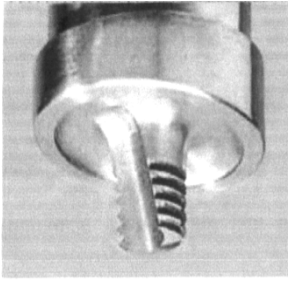
Şekil 4.8. Flared Triflute probe ile yapılmış olan bindirme kaynağında kaynak ara yüzünün görünümü [Çam, 2005]

#### Skew-Stir™ ve A-Skew™ serisi pimler (Batıcı uçlar)

Sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması için geliştirilen Skew-Stir™ serisi pim, pim ekseninin iş mili eksenine göre biraz eğim verilmesi ile diğer pimlerden ayrılır. Skew-Stir™ serisi pimler, dinamik süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki oranı pimin eğik hareketi ile artırmaktadırlar. Bu oran, boşluk oluşumunu gidermede veya azaltmada ve işlem verimliliğini yükseltmede önemli bir faktördür. Omuz yüzeyi, eğik takım eksenine belirli bir eğim oluşturmaktadır (Şekil 4.9). Omuz yüzeyi, plakanın üst kısmına bağlı olarak sabit durmaktadır. Omuz, iş parçası üzerinde iken dairesel hareket yapar. Takımın odak noktası, iş parçası yüzeyine veya iş parçasının herhangi bir noktası üzerine geldiğinde, omuzun temas yüzeyi esken dışı bir yörüngede hareket eder. Ayrıca, omuzun bu yörünge hareketi, omuzun eğrilik açısına ve odak noktası ile levhanın üst yüzeyi arasındaki mesafeye bağlıdır. Eğrilik açısı ve aradaki mesafe arttıkça, omuzun hareket sahası da artacaktır [Çam, 2003].



Şekil 4.9. Skew-Stir Metodunun çalışma prensibi [Kayabaş, 2003]



Resim 4.10. A-Skew ucunun resmi [Çam, 2003]

Resim 4.10'da A-Skew ucunun resmi görülmektedir. Yeni jenerasyon Whorl™ ve MX Triflute™ takımlarının omuzları (shoulder) da özel profillere sahiptir. Omuz profilleri, omuz ile iş parçası arasında daha iyi bir temas yüzeyi sağlamak amacıyla kullanılır. Sürtünme teması ile akan malzemenin kaynak bölgesinden ayrılması önlenmektedir Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.10. Whorl™ ve MX Triflute™ takımlarının omuz profilleri [Kayabaş, 2003]

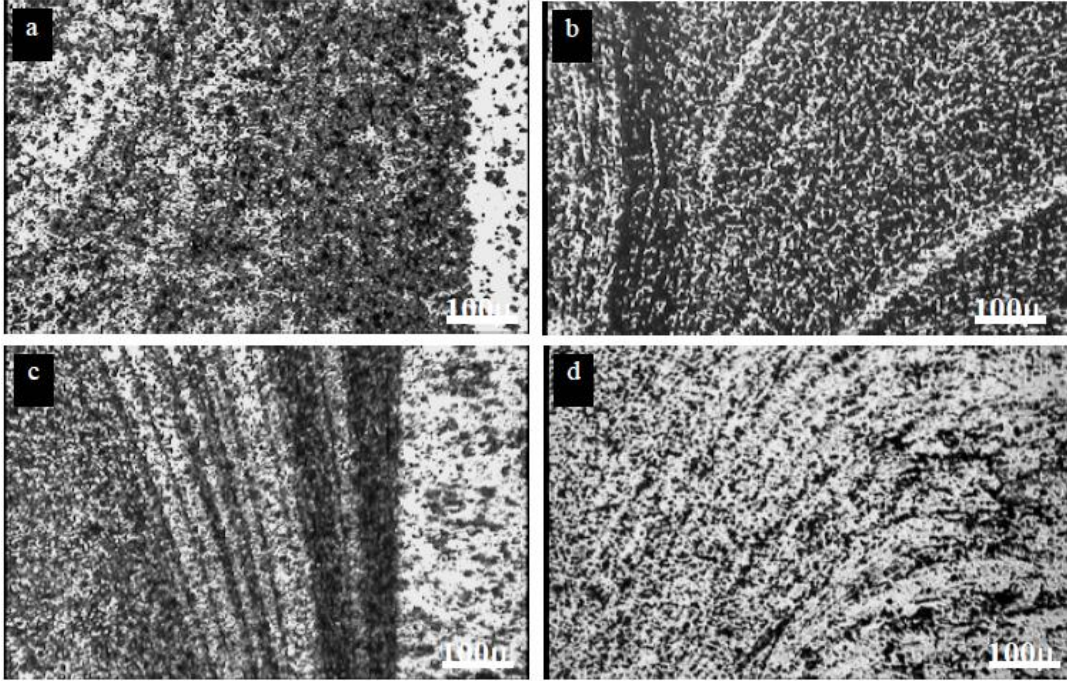
### 4.3.3. Kaynak ilerleme ve devir hızı

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde, kaynak parametresi (değişken) olarak adlandırılan pimin dönme hızı ve pimin ilerleme hızı oranının kaynak performansını etkileyen önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir [Çam, 2003].

Yüksek ilerleme ve dönme hızı kullanıldığında kaynak bölgesinde sertlik düşüşü daha az olmaktadır. Bunun sebebi, yüksek hızla yapılan kaynaklardaki yüksek soğuma hızlarından dolayı mukavemetlendirici partiküllerin kısmen tekrar çökmesidir. Düşük kaynak hızı kullanılarak yapılan birleştirmelerde kaynak bölgesindeki sertlik düşüşünün daha fazla olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Bu kaynaklarda, sertlik kaynak dikişinde ITAB'dan biraz yüksektir ve minimum sertlik termo-mekanik olarak etkilenen bölge civarındaki ITAB'dadır [Çam, 2003].

Kaynak hızı, parça boyutuna ve alaşım cinsine göre farklılık göstermektedir. Örneğin 5 mm kalınlığındaki 6082-T6 alüminyum alaşımının kaynağında, 800 dev/dakikada kaynak hızı 610 mm/dakika, 30 mm kalınlığında bir levhanın tam nüfuziyeti kaynağında ise kaynak hızı yaklaşık olarak 180 mm/dakika olmaktadır [Kaluç, 1998].

Resim 4.12'de 800 dev/dak. kaynak hızı ile SKK kaynak metali mikro yapıları a) 6.25 mm/dak, b) 10 mm/dak, c) 16 mm/dak, d) 20 mm/dak Sürtünme kaynağında kaynak hızı ısı girdisi miktarında çok önemli olduğundan kaynak hızına bağlı olarak hem mikro yapı hem de sertlik ve çekme gibi mekanik özelliklerde de etkili olmaktadır. Artan kaynak hızı ile kaynak metalinin yönlenmesi artmakta ancak düşük kaynak hızında kaynak metali yönlenmesi fazla belirgin görülmemektedir. Yapılan bir çalışmada 800 dev/dak. devir hızı ile kaynak hızı, 16.5 mm/dak.'den 20 mm/dak ya ulaştığında yönlenme daha homojen bir dağılım göstermektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı için uygun bir kaynak metali karışım ve yönlenmesi 20 mm/dak kaynak hızındaki numunelerde görülmektedir (Resim 4.11) [Kurt ve ark., 2003].



Resim 4.11. 800 dev/dak. kaynak hızı ile SKK kaynak metali mikro yapıları a) 6.25 mm/dak, b) 10 mm/dak, c) 16 mm/dak, d) 20 mm/dak [Kurt ve ark., 2004]

Birleştirme yüzeyleri uygulanan sürtünme basıncının sabit olmasına rağmen kaynak hızına göre farklılıklar göstermiştir. Sürtünme karıştırma kaynağında ısı girdisini etkileyen en önemli parametre karıştırıcı devir sayısı ve karıştırıcı ucun omuz çapıdır. Omuz çapı arttıkça sürtünme yüzeyi ve buna bağlı olarak meydana gelen ısı miktarı artacaktır. Kaynak ilerleme hızı ise birim alana düşen miktarı etkileyecektir. İlerleme hızı arttıkça birim alana düşen ısı miktarı da azalacaktır. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının artması ısı girdisini azaltacağından artan kaynak hızı ile kaynak metali sertliği de değişmektedir. Sertlik miktarındaki değişim çok fazla olmamakla birlikte karıştırıcı ucun karıştırdığı karışım bölgesinde daha az ve bu merkezden esas metal tarafına doğru sertlik artmakta ve karıştırıcı ucun omuz kısmından sonra esas metal sertliğinde ölçülmektedir [Kurt ve ark., 2004].

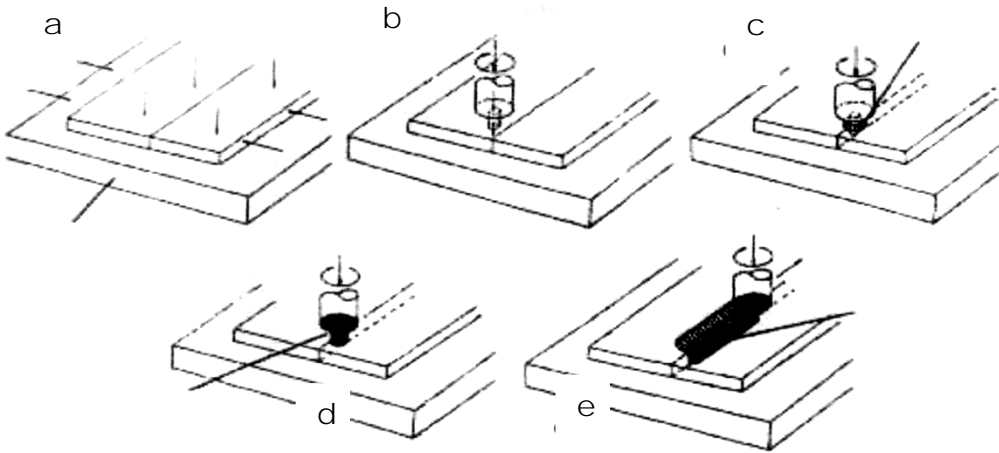
Yapılan bir çalışmada 5083 alüminyum alaşımında 1200dev/dak. devir hızında, kaynak ilerleme hızının 80-180 mm/dak. doğru arttıkça kaynak bölgesinin gerilim direncinde bir düşüş olduğu gösterilmiştir. Bu düşüş kaynak yüzeyi pürüzsüz

örneklerde %4, kaynak yüzey kalitesi düşük pürüzlü yüzeylerde %19 olarak tespit edilmiştir [James ve ark., 2003].

#### 4.3.4. Kaynak pozisyonu ve birleştirme geometrileri

Sürtünme karıştırma tekniği ile 1,2 - 75 mm kalınlıktaki alüminyum ve alaşımları ve 25 mm kalınlığına kadar titanyum ve çeliklerin birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu teknik ile 5mm kalınlığa kadar olan alüminyum levhalar tek pasoda %100 nüfuziyet ile birleştirilmektedir [Özdemir, 2003].

Bir sürtünme karıştırma kaynağı yapmak için kaynaklanacak parçalar düz bir metal plaka üzerine yerleştirilir (Şekil 4.11) ve bir kuvvet uygulaması karşısında birbirinden ayrılmayacak şekilde birbirine sıkıca birleştirilir.



Şekil.4.11. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi [Kurt ve ark., 2003]

- Kaynaklanacak parçalar düz bir metal plaka üzerinde birbirine tam olarak birleştirilir.
- Özel uçlu silindirik omuzlu bir kalem iki parçanın birleşme eksenine konumlandırılır.
- Kalem belirli bir devirde döndürülür ve birleşme eksenine bastırılır.

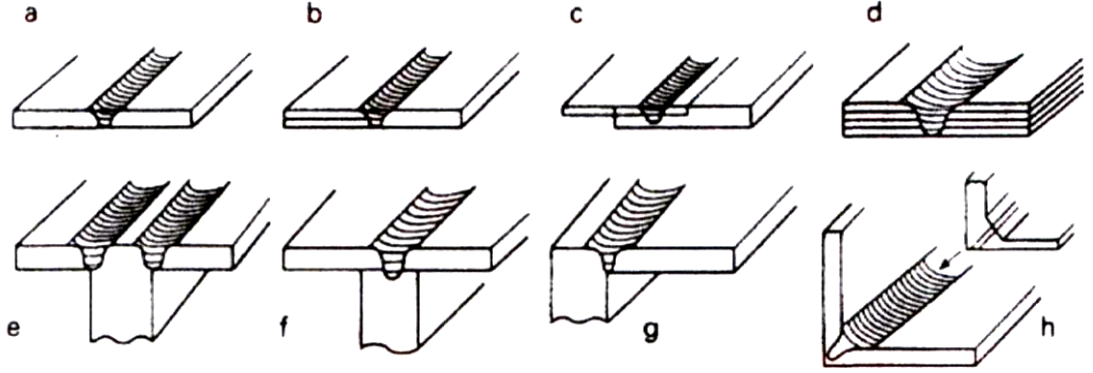


- d. Sürtünme ile oluşan ısının yumuşattığı metal, kalem omuzu işleme yüzeyine temas edinceye kadar dairesel şekilde hareket ettirilir.
- e. Kalem eksen boyunca ileri veya tersine yönde ilerlemeye başladığı zaman yumuşamış olan metal kalem ilerledikçe önden itibaren kalemin arkasına doğru dönerek karışmakta ve ısı kaynağı uzaklaştıkça soğumaktadır [Kurt ve ark., 2003].

Sürtünme karıştırma kaynağında uygulanabilir birleştirme türleri; küt alın, bindirme, T-köşe, dış ve iç köşe, boyuna ve çevresel birleştirmelerdir (Şekil 4.) Ayrıca bu yöntem yerçekiminin etkisi olmadığından tüm pozisyonlarda rahatlıkla uygulanabilir.

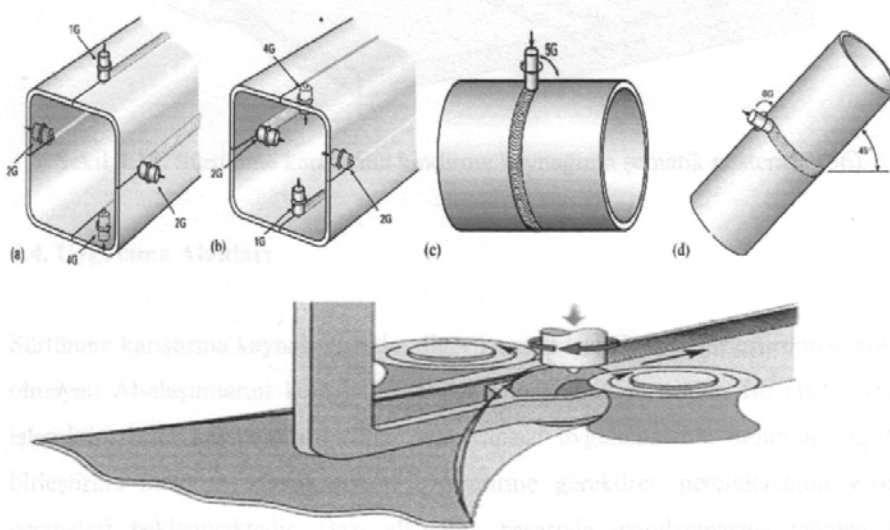
Birleştirme karakteristiklerini belirleyen üç faktör vardır. Bunlar sırasıyla pimin devir hızı, pimin ilerleme hızı ve pimin batma derinliğidir. Bunlardan ilk ikisi rahatlıkla kontrol edilebilir. Fakat pimin batma derinliği kritik bir faktör olup kontrol edilmesi güçtür. Batma derinliğinin kaynak işlemi süresince sabit kalması gerekmektedir. Fakat özellikle uzun levhaların birleştirme işlemlerinde yüzeylerin çok düzgün olmaması durumunda bunu sağlamak mümkün olmayabilir. Bu yüzden kaynak öncesi yüzey hazırlama oldukça kritik olup, bu hususta özen gösterilmesi gerekmektedir [Çam, 2005].

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde en önemli konu, yüksek kaynak kalitesi ve güvenilirliğidir. Kaynak operasyonu hassastır ve oluşacak hatalar mekanik olarak saptanabildiği için daha duyarlıdır. Bu bağlamda, kaynak parametrelerinin seçimi çok önemli olmaktadır. Kaynak parametreleri; kaynak dikiş kalitesine, metal alaşımın türüne, parça boyutlarına, çevresel mil hızına bağlıdır. Ortam şartları da kaynağa etki eden bir faktördür.

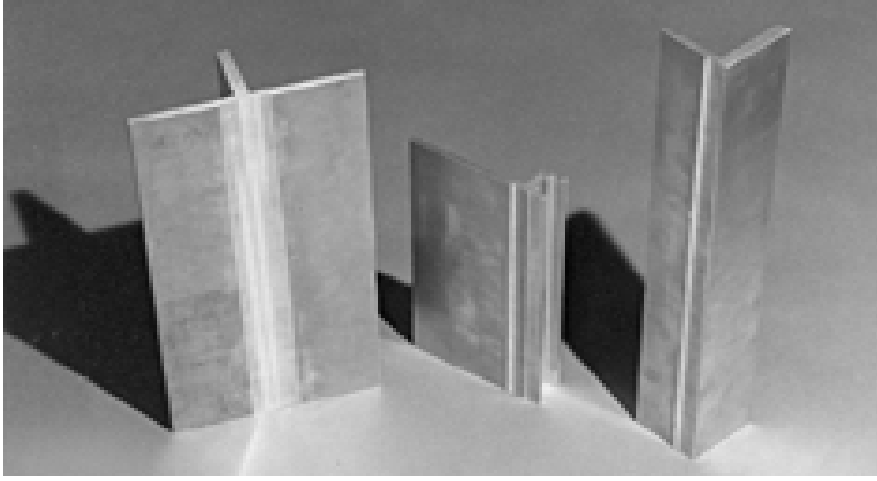


Şekil 4.12. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanarak yapılan birleştirmeler Küt alın b) Birleştirilmiş ek ve bindirme c) Bindirme d) Çoklu bindirme e) İki pasolu T- köşe f) Tek pasolu T- köşe g) Dış köşe h) iç köşe [Çakır, 2008]

Bu kaynak yöntemi ile düz ve çeşitli profillerdeki sac ve levhaların alın ve bindirme kaynağı yapılabilmektedir. Al-alaşımı veya mukavemeti düşük diğer malzemelerden T ve L profillerin üretiminde ve boru bağlantı kaynaklarında da bu yöntem kullanılabilir (Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.).

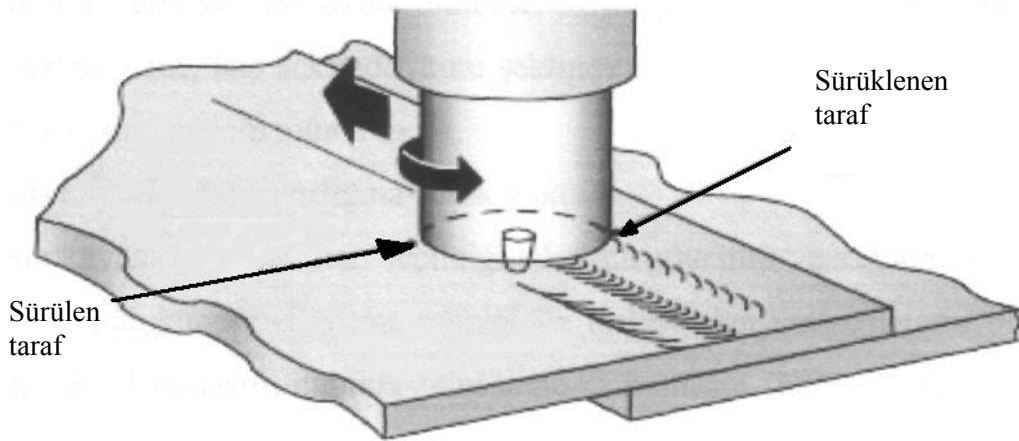


Şekil 4.13. Sürtünme karıştırma kaynağının boru kaynaklarında uygulaması [Doğan, 2006]



Resim 4.12. T ve L profillerinde sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması [Dilek, 2006]

Bu kaynak metodu ile düz ve çeşitli profillerdeki sac ve levhaların alın ve bindirme kaynağı yapılabilmektedir. Şekil 4.14'te sürtünme karıştırma bindirme kaynağının yapılışını şematik olarak göstermektedir.



Şekil 4.14. Sürtünme karıştırma kaynağında bindirme kaynağının şematik olarak gösterimi [Çam, 2003]

#### 4.4. Uygulama Alanları

Sürtünme karıştırma kaynak metodu, diğer kaynak işlemleriyle birleştirilmesi kolay olmayan Al-alaşımını kolaylıkla kaynak yapma imkanı sağlar. Bu alın kaynak

işleminin, lazer kaynağıyla birlikte yeni yapısal uygulamalarda minimum ağırlık birleştirme metotları olarak üst üste bindirme gerektiren perçinlemenin yerine geçmeleri beklenmektedir. Bazı alanlarda başarıyla uygulanmasına rağmen bu kaynak işleminin endüstriyel uygulamasının artması için özellikle işlem parametrelerinin ve birleştirme performansının iyi anlaşılması araştırılmalıdır [Ataoğlu, 2002].

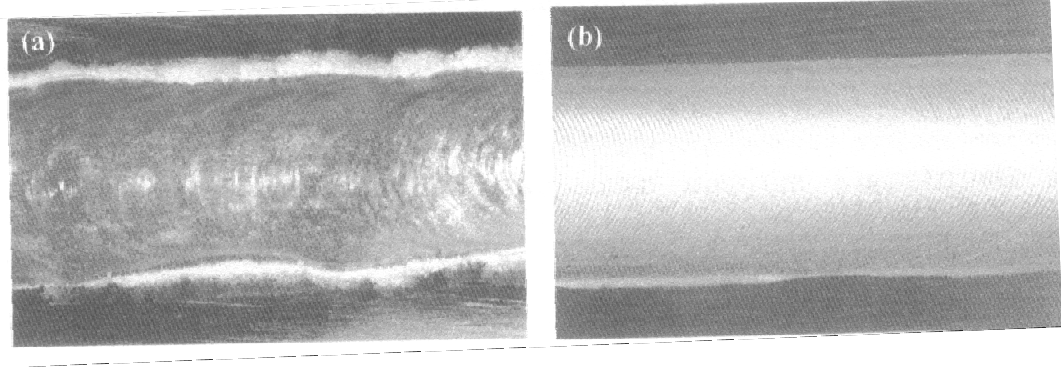
#### 4.5. Yöntemin Üstünlükleri

- Uygun maliyet: Kaynak operasyonu, enerji tasarrufu sağlayan basit bir işlemdir.
- Farklı özelliklerdeki malzemelerin birleştirilmesinde uygundur. Ergitme kaynakları ile birleştirilemeyen malzemeler ve kompozitler bu teknik ile birleştirilebilir
- Al-alaşımının yüzeyinde bulunan ince oksit tabakasını temizlemeye gerek yoktur. Yöntem bir katı hal kaynak tekniği olduğu için, alüminyum alaşımını birleştirmede, sıvılaşıma ve ya katılaşıma çatlakları oluşmaz
- Kaynak işlemi; dolgu telleri ve gazdan korunan kaynak banyosu gerektirmez.
- Özel profilden bağlantı kenarları önemsizdir.
- Bütün pozisyonlara ve ideal olarak teknik otomasyona uygundur.
- Çatlamaya duyarlılıklarından dolayı ergitme kaynağı yapılamayan alaşımlar kaynak yapılabilir.
- Normalde pratikte mümkün olmayan veya çıkarma veya dökümde maliyeti arttıran uzun, geniş, haç şeklinde, kutu şeklinde ve üretimden geldiği şekildeki gibi birçok bileşimin kaynağı mümkündür.
- Hassas kaynak ağız hazırlığına gerek yoktur.
- Uygun kaynak parametreleri seçildiği takdirde güvenilir ve sağlam bir birleştirme elde etmek mümkündür.
- Koruyucu gaz ve ek metale gerek yoktur. İnsan sağlığına zararlı kaynak dumanı ve radyasyonun olumsuzluklarıyla karşılaşılmaz
- Sıçrama olmaksızın düz yüzey elde edilebilir.
- Kaynak, ark olmaksızın yapıldığı için manyetik üfleme yoktur.
- Enerji verimliliği yüksek bir kaynak yöntemidir.
- Kaynaktan hemen sonra oksit tabakasının kaldırılmasına gerek yoktur.

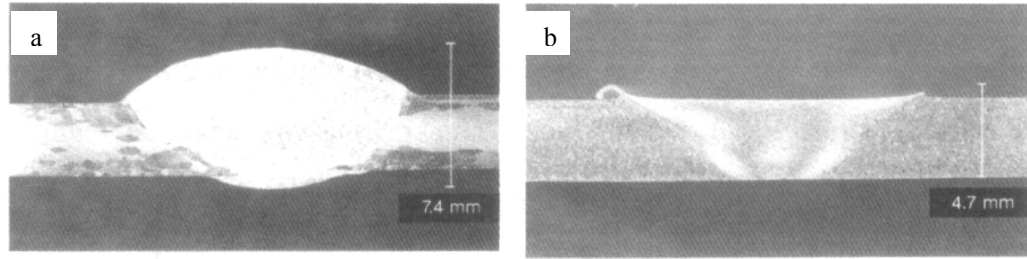
- Yüksek bağlantı mukavemetleri ısıtılarak elde edilir.
- Kaynak metali içinde buharlaşma olmadığı için alaşım elementi kaybı olmaz ve malzemenin alaşım içeriği aynı kalır. Katı-faz kaynağı oluşumu alaşımın metalürjik özelliklerini saklamasına olanak tanır.
- Otomasyona ve robotik uygulamaya çok uygundur.
- Aynı karıştırıcı uç ile tipik olarak 1000 m kaynak yapılabilir.
- Kaynak dikişi çok uzun olsa bile, distorsiyon miktarı çok az görülür [Çam, 2005, Özdemir, 2003 , Doğan, 2006, Kaluç ve Özsoy, 2002].

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin Al-alaşımında uygulanabilirliği üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırma sonuçları göstermektedir ki, bu yöntem gerek yaşlandırma sertleştirilmesi yapılan gerekse yaşlandırma sertleştirilmesi yapılamayan (1xxx ve 5xxx serileri gibi ısıtılma duyarlı olmayan) Al-alaşımında başarı ile kullanılabilir. Bu yöntem ile elde edilen birleştirmelerin yüzey kalitesi ark kaynağı ile elde edilen birleştirmelerden çok daha yüksektir, Resim 4.13 ve Resim 4.14’de ark ve sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Al-alaşımı levhaların kaynak bölgelerinin kesitini göstermektedir. Bu yöntem ile elde edilen birleştirmelerin kaynak performansı, klasik kaynak yöntemleri ile yapılan kaynaklara nazaran daha iyidir [Kımkıoğlu 2001, Yavuz 2001].

Ayrıca, sürtünme karıştırma kaynağında pimin ilerleme hızını artırarak bu mukavemet düşüşünün daha da azaltılması ve pimin çapının küçük seçilmesi ile mekanik özelliklerin etkilendiği bölgenin eninin küçültülmesi mümkündür. Buna ilaveten, bu yöntem ile kaynak edilen 5454 alaşımının korozyon performansının da oldukça iyi olduğu tespit edilmiştir. Hatta geleneksel kaynak yöntemleri ile kaynağı çok güç olan 7075 alaşımı bile bu yöntem ile başarılı bir şekilde birleştirilmiş ve elde edilen birleştirmeler oldukça iyi mekanik özellikler göstermiştir [Ataoglu, 2002].



Resim 4.13. Kaynak yüzey görüntüleri a) Ark kaynağı ve b) Sürtünme karıştırma kaynağı [Ataoğlu, 2002]



Resim 4.14. Kaynak bölgesi kesitleri a) Ark kaynağı ve b) Sürtünme karıştırma kaynağı [Çam, 2003]

Al-alaşımları dışında, ergitme kaynak yöntemleri ile kaynağı mümkün olmayan veya güç olan Al-Li gibi bazı alaşımlar ve 0,8 mm kalınlığındaki çinko sacların kaynağında bu yöntem başarı ile uygulanmıştır. Ayrıca, düşük karbonlu yumuşak çeliklerin, Mg-alaşımlarının, Ti-alaşımlarının, saf Cu ve pirinç gibi Cu-alaşımlarının, düşük sertlikteki östenitik paslanmaz çeliklerin ve ergime derecesi birbirine yakın farklı iki malzemenin kaynağında da bu yöntem başarı ile uygulanabilir. Özel amaçlı sürtünme karıştırma kaynağı makinelerinde 50 mm kalınlığındaki saf bakır levha 100 mm/dak kaynak hızında mükemmel kalitede kaynak edilmiştir.

Sürtünme karıştırma kaynağı, en az çinko ve kurşun levhalarda olduğu kadar, magnezyum alaşımlarında da başarı ile uygulanabilmektedir. İngiliz Kaynak Enstitüsünde (TWI) 9.5mm kalınlığındaki magnezyum AZ61A alaşımında yapılan ilk deneyler başarı ile sonuçlanmıştır. Japonya'da yapılan bir çalışmada da, 6 mm

kalınlığındaki AZ31 magnezyum alaşımı üzerinde yapılan ileri laboratuvar deneylerinde, kaynak esnasında ince yeniden kristalleşmiş tane yapısının oluşmasından dolayı, numunelerin mukavemeti ile baz malzemenin mukavemet değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan titanyum alaşımlarında sürtünme karıştırma kaynağı denemeleri ilk olarak Tİ-6A1-4V alaşımında başarı ile gerçekleştirilmiş ve diğer alaşımlar üzerinde çalışmalar başlatılmıştır. Yüksek korozyon dayanımından dolayı petrol boru hattı şebekeleri ve su üstü platformlarında rakipsiz olan bu alaşımın sürtünme karıştırma kaynağının bu uygulamalarda kullanılabilirliği konusunda araştırmalar sürdürülmektedir [Çam, 2003].

#### 4.6. Yöntemin Sınırlamaları

- Bazı alaşımlı saclarda tek pasolu kaynak hızı, diğer mekanikleşmiş ark kaynağı tekniğinden daha yavaştır. 5 mm kalınlığındaki 6xxx serisi alüminyum için maksimum 750 mm/dakikalık bir hızla çalışılabilmektedir.
- Her kaynak sonunda takımın piminin girdiği delik kapatılmalıdır. Bunun için alternatif kaynak tekniklerinden olan konik tapa sürtünme kaynağı kullanılmalıdır.
- Levhanın bir ucundan diğerine kaynak isteniyorsa, ileri geri hareket eden tablolara gereksinim vardır.
- İş parçaları tablaya bağlandığından dolayı ekipmanların taşınması zordur. Birleştirilecek parçalar oldukça düzgün sabitlenmelidir. Sabitleme işi için hidrolik baskı pabuçları veya mengeneler kullanılmalıdır.
- %100 nüfuziyet isteniyorsa parçalar ters çevrilip arka tarafından da kaynak yapılmalıdır.
- Kaynak öncesi yüzey hazırlama kritik olup, bu hususta özen gösterilmesi gerekmektedir [Şandır, 2002].

Ticari uygulamalar için yonteme adapte olan ilk endüstriyel sektörlerden ikisi gemi inşaatı ve deniz endüstrisidir, balıkçı gemilerinin derin dondurucularının oluklu alüminyum panellerinde kullanılmıştır. Bu kaynak yöntemindeki minimum distorsiyon ve yüksek verimlilik, teknik ve ekonomik yönden sert panel üretiminde

bu yöntemi cazip kılmaktadır. Bu yöntem ile Japonya'da alüminyum petek paneller ve deniz suyunun korozyon etkisine dayanıklı panellerin üretimleri yapılmaktadır. Yüksek hız feribotlarında kullanılan standart boydaki alüminyum ekstrüzyon panelleri sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmektedir. Ergitme kaynaklarına kıyasla ısı girdisinin düşük olması panellerdeki distorsiyon ve kalıntı gerilmelerini minimum düzeyde olmasını sağlamaktadır. Norveç'te bulunan Hydro Marina Alüminyum firmasında son üç yılda 70 km uzunluğunda alüminyum ekstrüzyon paneli sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir [Kaluç, 2002].

#### **4.7. Yorulma Deneyi**

Birçok makine parçası ve yapı elemanı kullanılma esnasında tekrarlanan gerilmeler (yükler) ve titreşimler altında çalışmaktadırlar. Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen, belirli bir tekrarlanma sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takip eden kopma olayına neden olurlar. “yorulma” adı verilen bu olay ilk defa 1850 - 1860 yılları arasında Wöhler tarafından incelenmiş ve teknoloji ilerledikçe mühendislik uygulamalarında daha fazla önem kazanmıştır. Otomotiv ve uçak endüstrisindeki parçalar ile kompresör, pompa, türbin gibi makinelerin parçalarında görülen mekanik hasarların yaklaşık % 90'ı yorulma sonucunda olmaktadır.

Yorulma olayına, parçaya sadece dışarıdan uygulanan mekanik kuvvetler değil, ısı genleşme ve büzölmelerden doğan ısısal gerilmeler de neden olabilmektedir. Yorulma olayında çatlama genellikle yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar. Çatlak teşekkülü için genellikle şu üç ana faktör gereklidir:

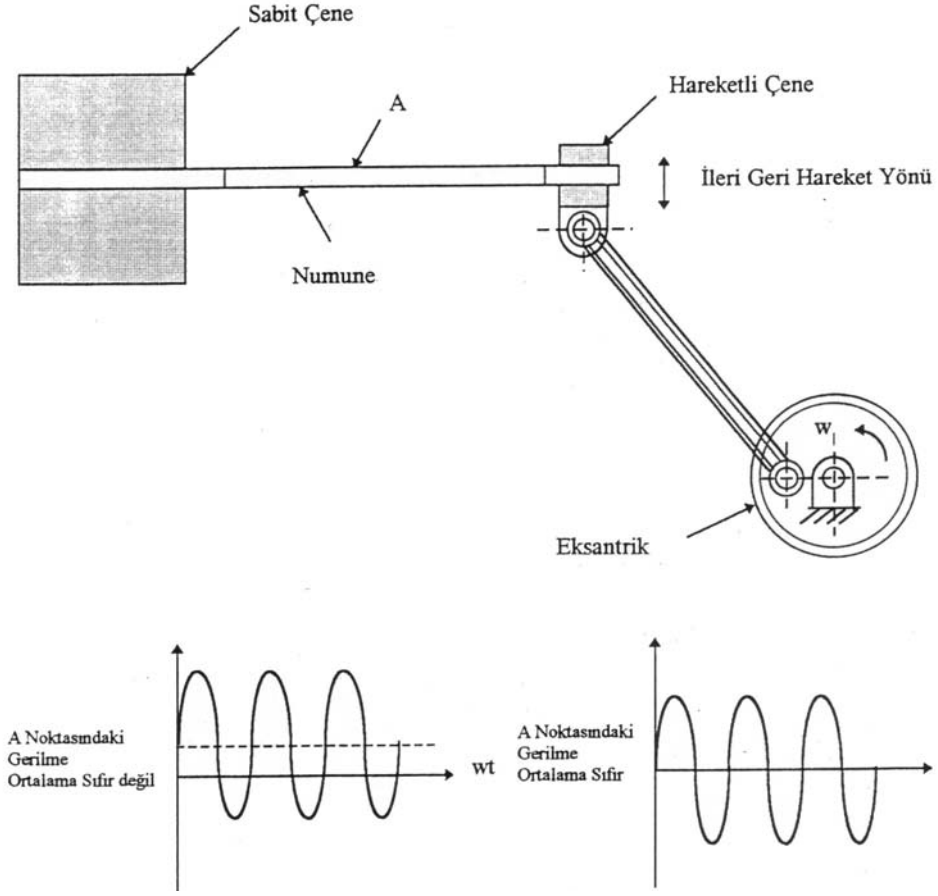
- a. Yeteri derecede yüksek bir maksimum çekme gerilmesi,
- b. Uygulanan gerilmenin oldukça geniş değişimi veya dalgalanması,
- c. Uygulanan gerilmenin yeteri kadar büyük tekrarlanma sayısı.



Bu ana faktörlerin yanında çok sayıda, yan faktörler de sayılabilir; örneğin yüzey kalitesi, korozyon, sıcaklık, aşırı yükleme, kalıcı iç gerilmeler, bileşik gerilmeler, gerilim konsantrasyonu, frekans, mikro yapı (tane boyutu, faz dağılımı, inklüzyonlar, v.s.) gibi.

Yukarıda sayılan faktörler göz önünde bulundurulacak olursa, metalik parçanın yorulma direncini ve yorulma ömrünü arttırmak için, etkili faktörleri en zararsız halde bulunduracak çok iyi bir tasarıma gerek vardır. Ancak küçük bir yorulma deneyi numunesi üzerinde yapılan deney sonuçlarını karmaşık bir parça veya konstrüksiyon dizaynında kullanmak oldukça güçtür. Laboratuarda, standart boyut ve belirli yüzey özelliğindeki numuneye, belirli türde sabit gerilmeler uygulanarak deney yapılır. Endüstride kullanılan parçada ise koşulların hepsi değişiklik gösterirler. Karmaşık olmalarından dolayı bu koşulların analizi de güçtür. Bu nedenlerle yorulma deneyi sonuçları, mühendislik uygulamalarında çekme deneyi sonuçları gibi kesin ve tam güvenilir şekilde kullanılamazlar. Yorulma deneyi sonuçları belirli koşullar için fikir verir ve benzer koşulların bulunabileceği parça tasarımında gerekli önlemlerin alınmasında yardımcı olur.

Faktörlerin çok sayıda olmaları ve karmaşık etkilerde bulunmaları, uzun yıllar yorulma deneyi ile ilgili standartların hazırlanamamasına neden olmuştur. Değişik araştırmacı ve araştırma merkezleri özel cihazlar ve özel numuneler kullanarak konuyla ilgili çalışmalarını sürdürmüşlerdir. Son yıllarda bazı ülkelerde hazırlanan standartlar da yine belirli koşullar için sınırlandırılmışlardır. Şekil 4.15'te Eğilmeli yorulma cihazının şematik olarak test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Eğilmeli yorulma cihazının şematik olarak gösterimi [Şık, 2002]

Yorulma deneyi sonuçlarının bir anlam verebilmesi için aşağıdaki bilgilerin belirtilmesi gerekir;

1. Malzeme özellikleri:

- a. Malzeme cinsi,
- b. Malzemenin piyasaya sunulmuş durumu (örneğin levha, çubuk, döküm gibi),
- c. Ergitme ve döküm koşulları,
- d. Son mekanik işlemler ve ısı işlemler,
- e. Kimyasal bileşim,
- f. Yüzey durumu ve kalitesi (örneğin haddelenmiş durumda, yüzeyi taşlanmış, yüzeyi parlatılmış gibi)

2. Deney numunesinin şekil ve boyutları.
3. Deney cihazının tipi, çalışma prensibi ve deneyin yapılışı esnasında uygulanan gerilme ile frekans.
4. Deneyin yapıldığı ortamın koşulları ve sıcaklığı.
5. Bazı hallerde malzemenin diğer mekanik özellikleri ile metalografik yapısı.

Son yıllarda özellikle önemli parçaların yorulma özelliklerini elde edebilmek için, standart bir deney numunesi yerine, parçanın kendisi özel cihazlarda çalışma koşullarına benzer koşullarda deneye tabi tutulmaktadır. Böylece daha güvenilir sonuçlara varılmaktadır.

#### **4.7.1. Yorulma deneyi türleri**

Çalışma esnasında bir parçaya gelecek gerilme değişik tür ve şiddette olabilir. Ancak yorulma deneylerinde, malzemelerin tekrarlanan dinamik zorlamalar karşısında göstereceği direnç hakkında kantitatif bilgiler edinebilmek için, uygulamada en sık rastlanan belirli gerilme türleri ele alınmıştır. Bu tür gerilmelerin düzgün periyotlarla uygulanması halinde elde edilen sonuçlar kriter kabul edilerek teknik yorumlar yapılabilmektedir.

**Yorulma Ömrü:** Yorulma ömrü, bir malzemeye tekrarlı gerilim ( $\sigma$ ) uygulandığında malzemenin ne kadar süreyle hizmet vereceğini bildirir. Ömrü süresince 100.000 devir yapmak zorunda olan bir takım çeliği tasarlanırsa, o zaman parça 620 MPa'dan daha az bir uygulama gerilimine maruz kalacak şekilde tasarlanmalıdır. Malzeme yüzeyinde yüzey pürüzlülüğü arttıkça yorulma ömrü de buna bağlı olarak azalacaktır [Güleç, 1983].

**Yorulma Sınırı:** Yorulma sınırı, tercih bir kriter olarak yorulma ile kopmanın asla olmadığı gerilimdir. Yorulma sınırında uygulanan gerilim (S) ve devir sayısı (N) eğrisi paralel olur. Takım çeliğinin kapmasını önlemek için uygulanan gerilimin 414 Mpa'dan daha az olacak şekilde tasarlanmalıdır.

Yorulma Dayanımı: Pek çok alüminyum alaşımını da içeren bazı malzemeler gerçek yorulma sınırına sahip değildir. Bu malzemeler için minimum yorulma ömrü belirlenebilir; bu durumda yorulma dayanımı, bu zaman periyodunda yorulmanın olmadığı yorulma dayanımının altındaki gerilimdir. Pek çok alüminyum alaşımlarında yorulma dayanımı için 500 milyon devir esas alınır [Şık, 2002].

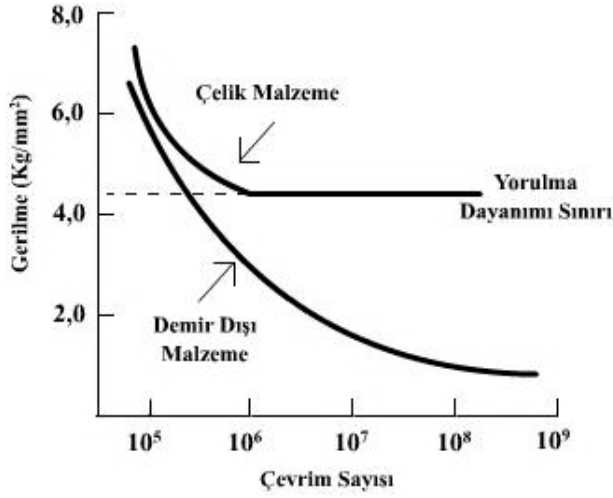
Deneyde kullanılan gerilme türü, yorulma deneyine de adını vermektedir. Gerilme türüne göre başlıca yorulma deneyi türleri şunlardır :

- Eksenel gerilmeli yorulma deneyi,
- Eğme gerilmeli yorulma deneyi,
- Burma gerilmeli yorulma deneyi,
- Bileşik gerilmeli yorulma deneyi.

#### S - N diyagramı (Wöhler diyagramı)

Bu diyagram, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösteren bağıntıyı verir. S - N eğrisinin çizilmesi için genellikle 8 ila 12 benzer numune kullanılır. Ortalama gerilme ( $S_m$ ) tüm deneylerde sabit kalmak üzere numunelerin herbirine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin çatlamasına (veya kırılmasına,) kadar geçen çevrim sayısı (N) tesbit edilir. Küçük gerilmeler için çatlamamanın görüleceği çevrim sayısı çok büyük olacağından, önceden belirlenen çevrim sayısına kadar deney devam ettirilerek malzemenin davranışı izlenir. Deneylerin tümünde gerilme genliği ( $S_a$ ) deney süresince sabit tutulur.

Gerilme eksenini olan ordinatta genellikle doğrusal, bazı hallerde ise logaritmik skala kullanılır ve bu ekseninde ya max. gerilme ( $S_{max}$ ), ya min. gerilme ( $S_{min}$ ) veya gerilme genliğinden ( $S_a$ ) biri kaydedilir. Çevrim sayısı eksenini olan apsiste ise genellikle logaritmik skala kullanılır. S - N eğrileri  $10^6$  çevrimden sonra genellikle apsis eksenine asimptotik bir durum gösterirler. Şekil 4.30'da görüldüğü gibi Demir ve demir dışı malzemelere ait tipik S - N diyagramı eğrileri oluşmaktadır.



Şekil 4.16. Demir ve demir dışı malzemelere ait tipik S – N diyagramı [Stephans, 2000; Şık, 2002]

#### 4.7.2. Yorulma deneyi cihazları

Yorulma deneyinde kullanılan cihazlar çok çeşitli olmalarına rağmen, bu cihazları numuneye uyguladıkları gerilme türü açısından 4 ana grupta toplamak mümkündür;

1. Eksenel çekme - basma gerilmeleri uygulayan cihazlar
2. Eğme gerilmeleri uygulayan cihazlar
  - Düzlemsel eğme gerilmesi uygulayanlar
  - Dönen eğme gerilmesi uygulayanlar
3. Burma gerilmesi uygulayan cihazlar
4. Bileşik gerilme uygulayan cihazlar

Yukarıda belirtilen her bir grup için değişik firma ve araştırma merkezlerince farklı cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihaz grupları içinde en çok kullanılanı, çalışma prensibi en basit olan eğme gerilmesi uygulayan cihazlardır. Bunlar içinde düzlemsel eğme gerilmesi uygulayanlar genellikle yassı ürünler için kullanılmaktadır. Malzemesi deneye tabi tutulacak parça çalışma esnasında ne tür gerilmelere uğrayacaksa, o tür gerilmelerin uygulandığı deney cihazının seçilmesi gerekir. Aksi takdirde elde edilen sonuçlar güvenli olamaz.

Yorulma deneyi cihazları, çalışma prensiplerine göre de mekanik, elektromekanik, manyetik, hidrolik ve elektrohidrolik cihazlar diye sınıflandırılabilirler. Yorulma deneyi cihazlarının tümünde en önemli özellik deney süresince istenen türde ve istenen mertebede gerilmenin sağlanabilmesidir. Deney süresince, uygulanan yükte meydana gelecek değişim, cihazın çalışma kapasitesinin % 2'sini aşmamalıdır. Cihazlarda uygulanan kuvvetleri gösterebilecek ve kontrolünü sağlayabilecek düzen bulunmalıdır. Deney cihazlarında çevrim sayısını kaydeden sayaç bulunmalıdır. Sayaç, numune kırıldığı anda otomatikman durabilecek özelliğe sahip olmalıdır.

Kullanılacak numune tipi ve boyutu genellikle cihazın tipine, kapasitesine ve boyutuna bağlıdır. Son yıllara kadar değişik araştırmacılar kullandıkları cihaza uygun farklı numune tipleri geliştirmişlerdir. Son yıllarda hazırlanan standartlarla numune tipleri için bazı genel kurallar geliştirilmiştir. Numune boyutları için aşağıdaki genel kurallar ön koşuldur.

1. Numune öylesine tasarlanmalıdır ki çatlama, numunenin daraltılmış kesitinde olsun.
2. Numunenin daraltılmış kesiti öylesine seçilmelidir ki maksimum gerilmenin mutlak değeri deney cihazının çalışma kapasitesinin en az % 25'inde, minimum gerilmenin mutlak değeri ise cihazın çalışma kapasitesinin en az % 2,5'inde oluşsun.
3. Numune boyutları öylesine seçilmelidir ki numunenin doğal frekansı, cihazın frekansının en az iki misli olsun.

Numunenin alındığı parçanın dikdörtgen veya dairesel kesitli olmasına göre ASTM standardındaki numune şekilleri değişmektedir [Alsaran, 1997].

Malzemede Yorulma Olayına Etki Eden Faktörler;

- Malzeme cinsinin, bileşiminin ve yapısının etkisi,
- Yüzey özelliklerinin etkisi,
- Çentik etkisi,

- Gerilmelerin etkisi,
- Korozyonun etkisi,
- Sıcaklığın etkisi,
- Frekansın (deney hızının) etkisi.
- Yorulma testi bir parçanın ne kadar süreyle dayanabileceğini veya kopma olmaksızın uygulanabilecek maksimum yüklemeleri belirler.

#### 4.8. Çekme Deneyi

Çekme deneyi malzemelerin mukavemeti hakkında esas tasarım bilgilerini saptamak ve malzemelerin özelliklere göre sınıflandırılmasını sağlamak amacı ile geniş çapta kullanılır. Çekme deneyi standartlara göre hazırlanmış deney numunesinin tek ekseninde, belirli bir hızla ve sabit sıcaklıkta koparılmaya kadar çekilmesidir. Deney sırasında, standart numuneye devamlı olarak artan bir çekme kuvveti uygulandığında, aynı esnada da numunenin uzaması kaydedilir.

Çekme deneyi sonucunda numunenin temsil ettiği malzemeye ait aşağıdaki mekanik özellikler bulunabilir.

- Elastisite modülü
- Elastik sınırı
- Rezilyans
- Akma gerilmesi
- Çekme dayanımı
- Tokluk
- % uzama
- % kesit daralması

Çekme deneyine tabi tutulan numunenin yukarıda belirtilen özelliklerin sıhhatli bir şekilde ortaya çıkarılabilmesi için, alındığı malzemeyi tam olarak temsil edebilmesi

şarttır. Ayrıca aşağıdaki hususların bilinmesi de, sonuçların irdelenmesi bakımından gereklidir.

Numunenin alındığı malzemenin imalat şekline göre;

- Döküm
- Kaynak
- Sıcak dövme veya haddeleme
- Soğuk dövme veya haddeleme
- İmalat şekline göre yönlendirme
- Tatbik edilen ısı işlemleri

Deney sonuçlarının irdelenmesinde, numunenin alındığı malzemenin durumu yanında, alınan numunede de şu hususları bilinmesi faydalıdır:

- Numunenin alındığı bölgeler
- Numunenin alınış şekli
- Numunenin hazırlanış şekli

Çekme deneyine tabi tutulacak numunelerin şekil ve boyutları standartlarda belirtilmektedir. Deney sonuçlarının belirli bir standarda uyma zorunluluğu vardır. Sonuçlar, numune boyut ve biçimine göre değişiklik arz edebilir. Numuneler iki kısımdan ibarettir. Numunenin baş kısımları: Yük tatbik edilmek için tutulan kısımlardır ve diğer bölgeye göre daha büyük boyutludur. Numunenin orta kısmı: Yük tatbik edildiğinde deformasyonun yer alması arzu edilen daha küçük boyutlu bölgedir. Deney sonuçları bu kısımda yapılan ölçmelerle tespit edilir. Numunenin bu kısmında, kesit ile uzunluk arasında belli bir ilişki vardır.



## 5. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, Al-alaşımı (AA 2024) olan 4,5 mm kalınlığındaki levhalara farklı parametrelerde sürtünme karıştırma kaynak yöntemi uygulanarak levhalar birleştirilmiştir. Kaynak yapılan numuneler; görsel incelemeye tabi tutulmuş ve numunelerin eğme yorulma ve çekme özelliklerini saptamak amacı ile standartlara uygun olarak hazırlanmıştır. Çizelge 5.1’de kimyasal özellikleri, Çizelge 5.2’de mekanik özellikleri ve Çizelge 5.3’te ise fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.3 Kullanılan Al 2024 malzemesinin kimyasal özellikleri

	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
ETİAL-24 2024	0,50	0,50	3,80- 4,90	0,30- 0,90	1,20- 1,80	0,25	0,15	0,10

Çizelge 5.4. Kullanılan Al 2024 malzemesinin mekanik özellikleri

	Isıl işlem	Akma Dayanımı (Kg/mm <sup>2</sup> )	Çekme Dayanımı (Kg/mm <sup>2</sup> )	% uzama (50 mm) mm/mm	Sertlik (HB) (Kg/mm <sup>2</sup> )	Kesme Dayanımı (Kg/mm <sup>2</sup> )
ETİAL-24 2024	O	11	22,5	12	120	28,5

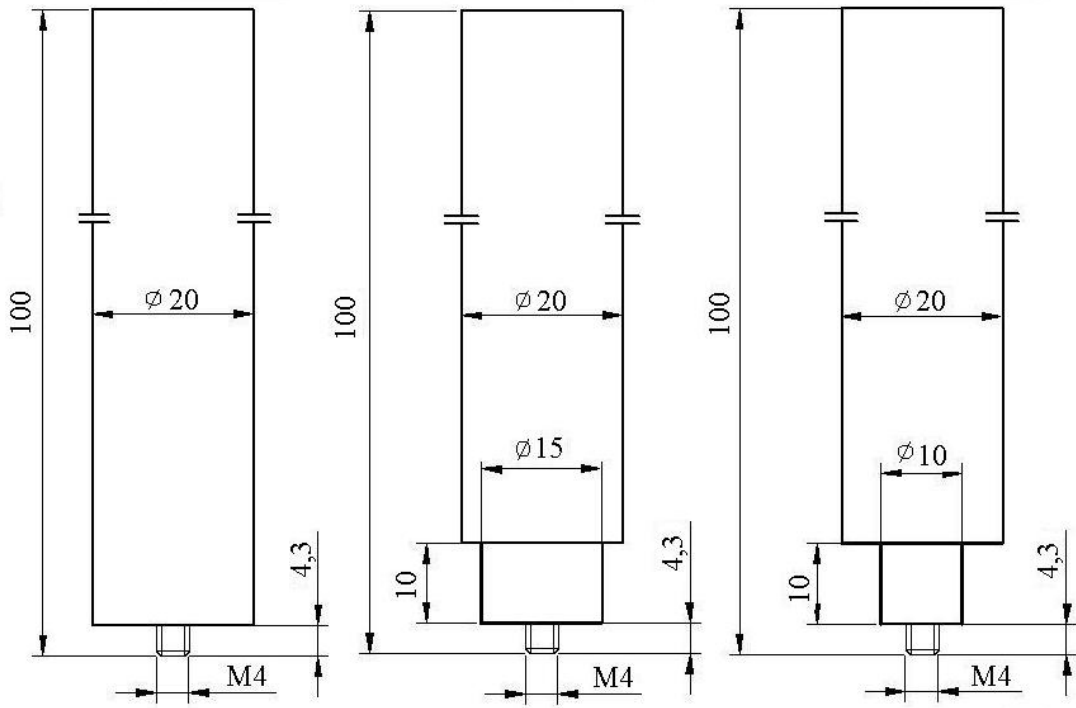
Çizelge 5.5. Deney malzemesinin fiziksel özellikleri

	Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Elastisite Modülü (Kg/mm <sup>2</sup> )	Isısal İletkenlik Cal/cmS <sup>0</sup> C	Genleşme katsayısı (20-100 <sup>0</sup> C) 1/ <sup>0</sup> C	Elektriksel Direnci (20 <sup>0</sup> C) Ohm mm <sup>2</sup> /m
ETİAL-24 2024	2,77	7300	0,29	2x10 <sup>-6</sup>	0,057

## 5.1 Kaynak Yöntemlerinin Uygulanması

### 5.1.1 Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK)

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi uygulanarak yapılan deneylerde kullanılan karıştırıcı; 2344 sıcak iş takım çeliğinden Şekil 5.1’de verilen ölçülere göre yapılmıştır. Frezeyle bağlanan kısım: çapı 20 mm ve omuz ölçüleri 10-15-20 mm olarak 3 adet hazırlanmıştır. Boyu 100 mm olan pim vidaya uçlarına M4 paftası ile çekilerek helisel diş açılmıştır. 4,5 mm kalınlığındaki AA 2024 levhalar alın altına kaynak edildiğinden pim uç boyları 4,3 mm olarak hazırlanmıştır.



Şekil 5.3. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan pimlerin ölçüleri

Sürtünme karıştırma kaynağı yarı otomatik bir freze yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağına tabi tutulan levhalar kaynaklanacak kenarları alın altına temas edecek tarzda freze tezgahı tablasına bağlama pabuçları yardımıyla bağlanmıştır. 2344 sıcak iş takım çeliği malzemeden özel olarak torna edilmiş 20 mm anma çaplı sürtünme aparatı frezenin düşey miline monte edilerek sürtünme

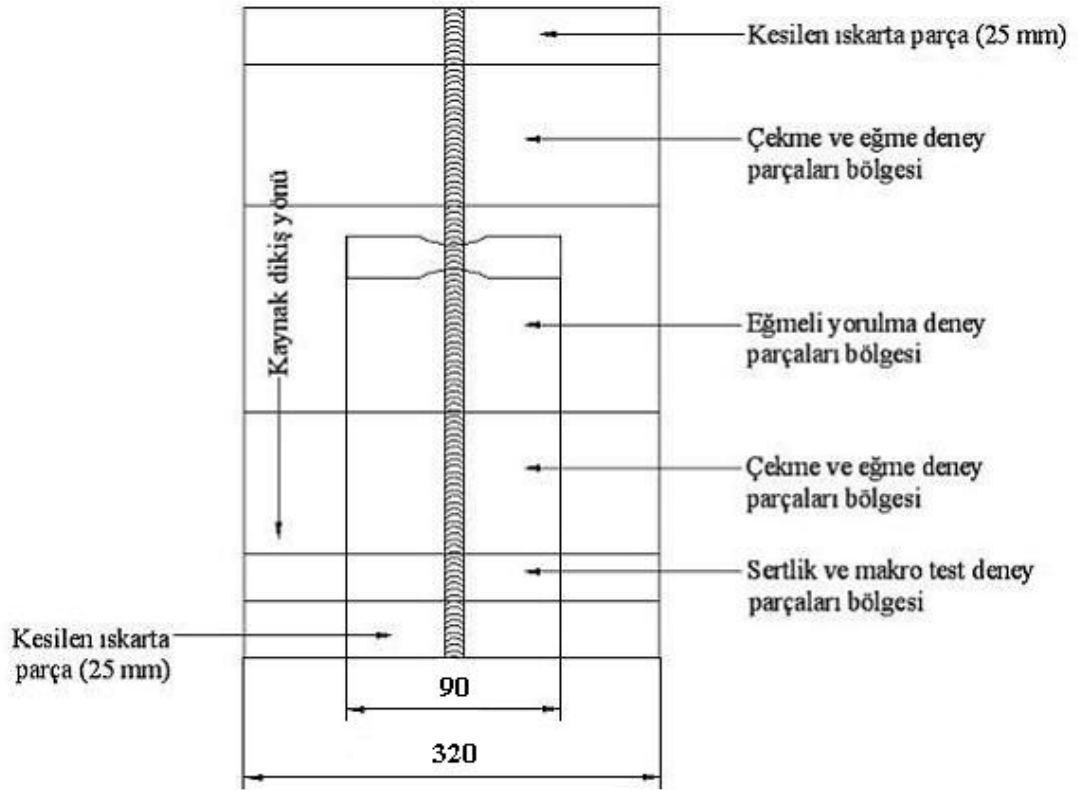
karıştırma kaynağı dik eksenle 2° açı yapacak şekilde Çizelge 5.4'deki kaynak parametreleri kullanılarak 2024 alüminyum alaşımı levhalara uygulanmıştır.

Çizelge 5.4. Deney grupları çizelgesi

Deney grupları	Pim devir sayısı (dev/dak)	Omuz çapı (mm)	İlerleme hızı (mm/dak)
1	930	10	80
2			120
3			180
4		15	80
5			120
6			180
7		20	80
8			120
9			180
10	1450	10	80
11			120
12			180
13		15	80
14			120
15			180
16		20	80
17			120
18			180
19	2280	10	80
20			120
21			180
22		15	80
23			120
24			180
25		20	80
26			120
27			180

### 5.1.2. Deney numunesi çıkartma planları

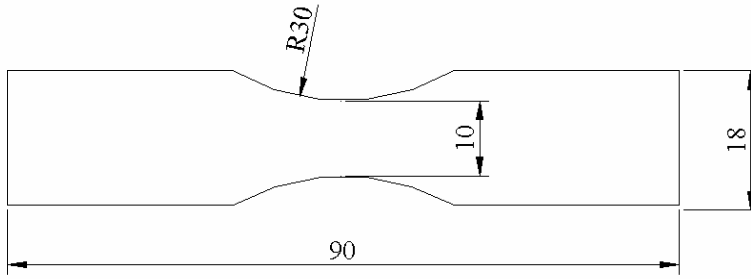
Deney numunelerinin hazırlanacağı bağlantılarda uygulanan kaynak işlemi sonrası görülebilecek yüzeysel hataları saptamak amacı ile görsel muayene yapılmıştır. Bu muayenede “ANSI/AWS D9.1-90 Sheet Metal Welding Code” esas alınmıştır. Kaynak işlemlerinden sonra numuneler ilgili standartlarda belirtildiği gibi normal soğuma koşullarında soğumaya bırakılmıştır. Görsel muayeneden geçen bu levhalardan yapılacak deney planına göre EN-288-3’e uygun deney numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 5.2.’de kaynağın başlangıç ve bitiminde oluşabilecek hataların engellenebilmesi için kaynaklı levhaların başlangıç ve bitiminden 25 mm’lik kısımları kesilerek atılmıştır.



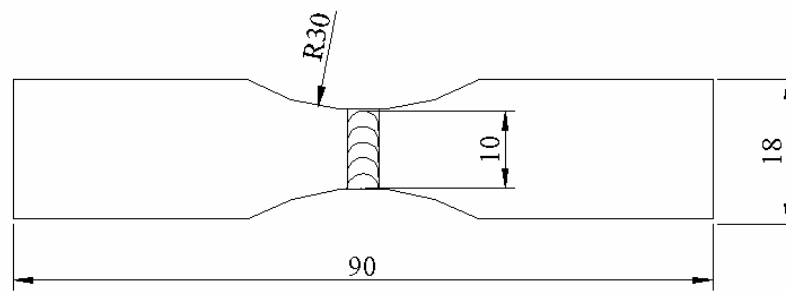
Şekil 5.4. EN 288-3’ e göre numunelerin levhadaki dağılım planı

## 5.2. Eğme Yorulma Deney Numuneleri

Bu çalışmada kullanılan deney numuneleri, kaynak edildikten sonra yorulma deney makinesinin özelliklerine uygun her bir kaynak yöntemi için ve kaynak yapılmamış ana malzemeden standart boyutlarda 8 adet hazırlanmıştır. Kullanılan numunelerin boyutları kaynak yapılmamış ana malzeme için Şekil 5.3 ve kaynak yapılmış numunelerde Şekil 5.4.'te gösterilmiştir. Elde edilen değerler ve Wöhler eğrileri en yüksek gerilmeye karşılık çevrim sayısı logaritmik işaretlenerek çizilmiştir. Tüm deneylerde sınır çevrim sayısı olarak literatürde tavsiye edilen  $N=2 \times 10^6$  alınmıştır [Şık, 2005].



Şekil 5.3. Kaynak edilmemiş levhadan çıkartılan eğme yorulma deney numunesi



Şekil 5.4 Kaynaklı malzemelerden çıkartılan eğme yorulma deney numunesi

Çizelge 5.5'te 20 mm çap ve 120 mm/dak kaynak hızı ve değişik devirlerde birleştirilen numunelerin eğme yorulma dayanım deneyi uygulaması çizelgesi gösterilmiştir.

Çizelge 5.5. Eğme yorulma dayanım deneylerinde kullanılan kaynak parametreleri

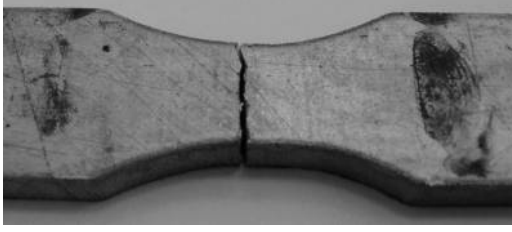
Deney Grupları	Devir Sayısı (dev/dak)	Kaynak İlerleme Hızı (mm/dak)	Omuz Genişlikleri (mm)
1	930	120	20
2	1450	120	20
3	2280	120	20

### 5.2.1. Eğme yorulma deneyi sonuçları

Bu çalışmada farklı parametrelerle yapılan kaynaklı numunelerden sadece Çizelge 5.5' teki deney gruplarına eğme yorulma dayanımı deneyi uygulanmıştır. Bilindiği üzere yorulma dayanımları süre bakımından uzun sürmektedir. Bu nedenle Çizelge 5.5'te belirtilen deney numunelerine yorulma dayanımı deneyi uygulanmıştır.

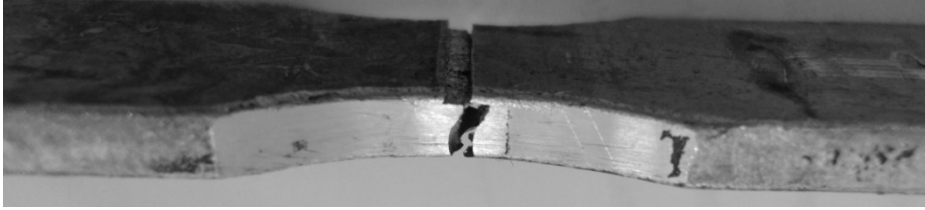
Kaynak numunelerine uygulanan eğme yorulma deneylerinde numunelerin kırılma yerleri ısıdan etkilenmiş bölgeden (ITAB) başlayarak ilerlediği ve kaynak dikişinin hemen yanında kopmanın olduğu görülmüştür. Kopmanın ITAB'da olması kaynak dikişlerinin hatasız olduğunu göstermektedir.

Ana malzemenin eğme yorulma dayanımı kaynaklı numunelere göre yüksek çıkmıştır. Kaynak yapılmayan numunelere uygulanan yorulma dayanımı sonrasında kırılan deney numuneleri incelenerek yorulma çatlağının olduğu yer saptanmıştır. Şekil 5.5'te ana metalden alınmış numunelerin yorulma deneyi sonrası kırılma şekli gösterilmiştir.

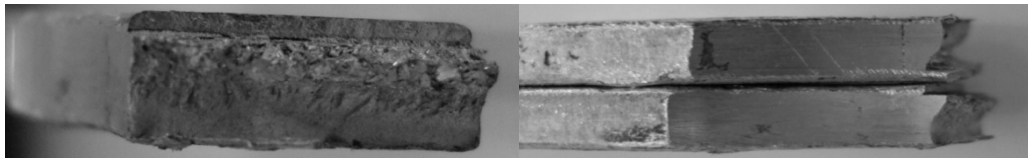


Resim 5.1. Ana malzemedan çıkarılan eğme yorulma deneyi numunesinin kopmuş hali

Ana metale ait numunelerde (Şekil 5.1) yorulma çatlama kesitin dar olduğu bölgede meydana gelmiş olup elde edilen bu sonuç ise literatürdeki araştırmaları doğrular niteliktedir.



Resim 5.2. Kaynaklı malzemedan çıkarılan eğme yorulma deneyi numunesinin kopmuş hali



Resim 5.3. Numunelerin kopma bölgeleri

Resim 5.2.'de kaynaklı bağlantıların nerelerde koptuğu görülmektedir. Kaynaklı bağlantıların kırılma bölgesi incelendiğinde kırılmanın bağlantının en zayıf ve hassas bölgesi olan ısıdan etkilenmiş bölgede veya kaynak dikişi ortak sınırında kırıldığı saptanmıştır. Bu oluşumda gayet normal olup bu konuda çalışan Şık'ın sonuçları ile uyum halindedir [Şık, 2006]. Resim 5.3'de ise kaynak numunelerinin kırılma

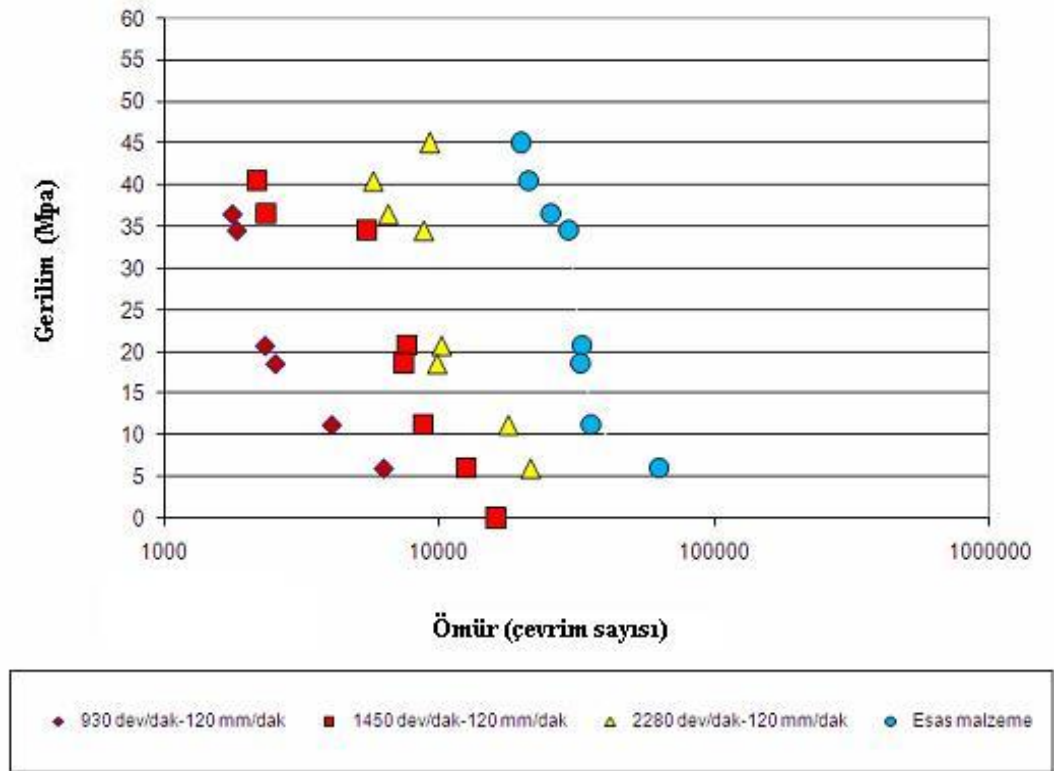
bölgeleri görülmektedir. Kaynak dikişinden kopan numuneler ise değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Resim 5.2 ve Resim 5.3’de sürtünme karıştırma kaynaklı numuneden çıkartılan yorulma deneyi sonrası kırılma şekli verilmiştir. Bu tür bağlantıların kırılma bölgesi incelendiğinde kırılmanın bağlantının en zayıf ve hassas bölgesi olan ısıdan etkilenmiş bölgede olduğu saptanmıştır. Resim 5.2’de görüldüğü gibi kopma çentikli olan bölgede olmamıştır. Buda kaynağın sağlam yapıldığını göstermektedir. Çentik yorulmada en büyük etken olmasına rağmen çentikli kısımda kopma meydana gelmemiştir. Bu oluşum da gayet normal olup bu konuda çalışan Kurt ve arkadaşları ile Çakır ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmalarda deney sonuçları ile uyum halindedir. Kaynak dikişinde kopan numuneler ise değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Şekil 5.5’te Al-2024 Alüminyumun, ana malzeme, 930 dev/dak dönme-120 mm/dak ilerleme, 1450 dev/dak dönme-120 mm/dak ilerleme ve 2280 dev/dak dönme-120 mm/dak ilerleme hızlarında yapılan kaynak numunelerinin yorulma dayanımı deneyleri karşılaştırmalı olarak tek diyagramda verilmiştir.

Yüksek ilerleme ve yüksek dönme hızı ve takım omuz genişliği büyük olan pimler kullanıldığında (2280 dev/dak dönme-120 mm/dak. ilerleme-20mm omuz genişliği) kaynak bölgesinde çekme ve akma dayanımı düşüşü daha az olmaktadır. Bunun sebebi, yüksek hızla yapılan kaynaklardaki (2280 dev/dak dönme-120 mm/dak. ilerleme) yüksek soğuma hızlarından dolayı mukavemetlendirici partiküllerin kısmen tekrar çökmesidir. Düşük dönme hızı ve yüksek kaynak ilerleme hızı kullanılarak yapılan birleştirmelerde (930 dev/dak. dönme-120 mm/dak. ilerleme) kaynak bölgesindeki akma-çekme dayanımı düşüşünün daha fazla olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Bu da, numunelerin yeteri kadar sürtünme ısı elde edilmeden birleştiğinin dolayısıyla plastik şekil değişiminin uygun sıcaklık değerine ulaşmadan meydana geldiğini göstermektedir. Aynı zamanda; karıştırıcının homojen karıştırmaması sonucu düşük mukavemetli birleştirme meydana getirmektedir.





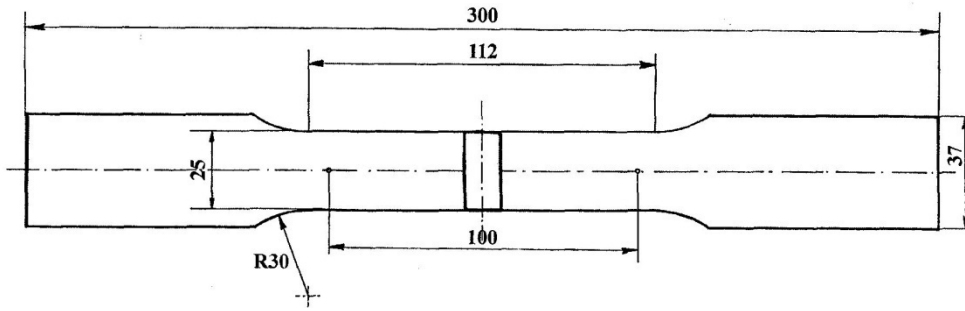
Şekil 5.5. Deney numunelerine uygulanan yorulma dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 5.5'te en yüksek yorulma dayanımı ana malzemede çıkmıştır (62954 çevrim). Bu da beklenen bir durumdur. Kaynaklı numunelerde ise en yüksek yorulma dayanımı 2280 dev/dak dönme-120 mm/dak ilerleme hızlarında birleştirilen numunelerde (21452 çevrim), en düşük yorulma dayanımı değeri ise; 930 dev/dak dönme-120 mm/dak ilerleme hızlarında birleştirilen numunelerde görülmüştür (6320 çevrim).

Kaynak ilerleme hızı sabitken, devir sayısı 930 dev/dak'dan 2280 dev/dak'ya çıkarıldığında kaynaklı bağlantının yorulma dayanımı artmıştır. Bu artışın nedeni; kaynak devir hızının artırılmasıyla kaynak bölgesine giren ısı miktarının artması ve böylece, yüksek ilerleme hızıyla yapılan kaynaklarda (2280 dev/dak dönme-120 mm/dak. ilerleme) yeterli ısı meydana gelecek, plastik şekil değiştirme de istenen seviyede olacaktır.

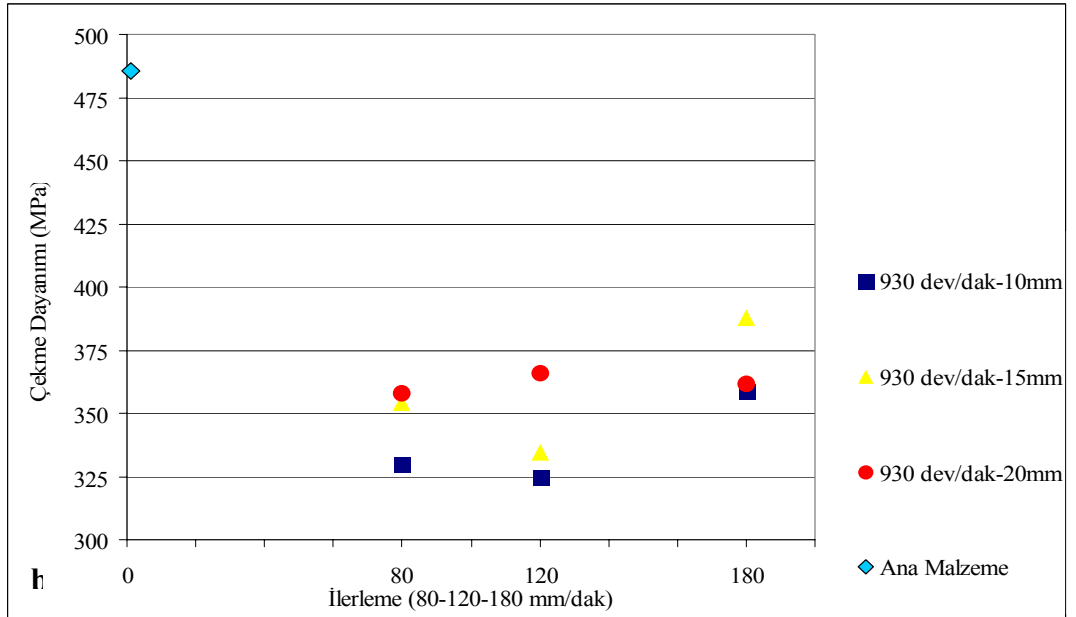
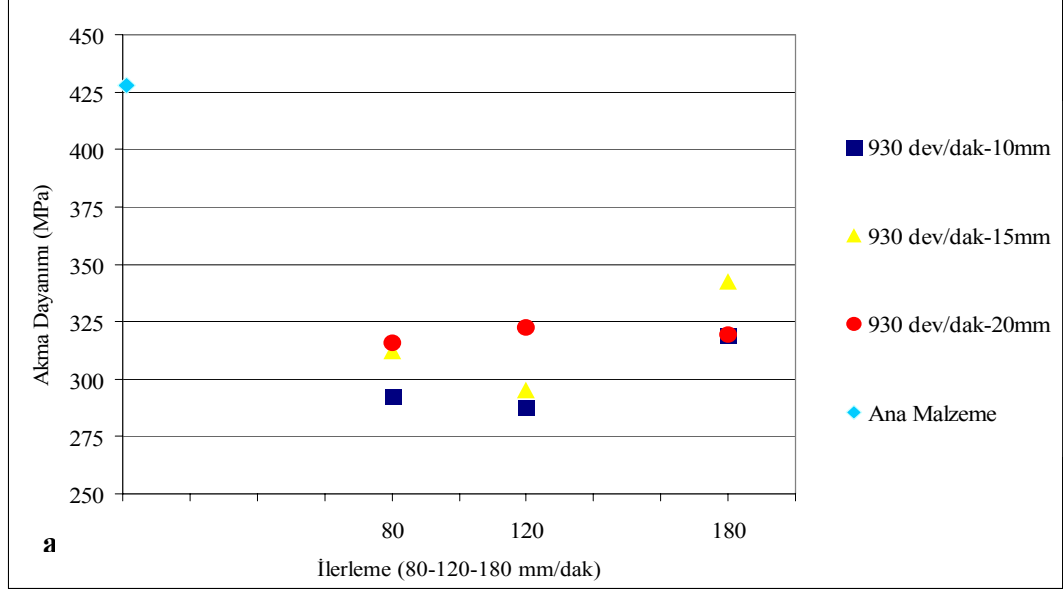
### 5.3. Çekme Dayanımı Deneyi

Çekme dayanımı deneyine tabi tutulacak numunelerin şekil ve boyutları Şekil 5.6’da EN 895’e göre hazırlanarak verilmiştir. Deney sonuçlarının belirli bir standarda uyma zorunluluğu vardır. Sonuçlar, numune boyut ve biçimine göre değişiklik arz edebilir. Numuneler iki kısımdan ibarettir. Numunenin baş kısımları; yük tatbik edilmek için tutulan kısımlardır ve diğer bölgeye göre daha büyük boyutludur. Numunenin orta kısmı; yük tatbik edildiğinde deformasyonun yer alması arzu edilen daha küçük boyutlu bölgedir. Deney sonuçları bu kısımda yapılan ölçmelerle tespit edilir. Numunenin bu kısmında, kesit ile uzunluk arasında belli bir ilişki vardır.

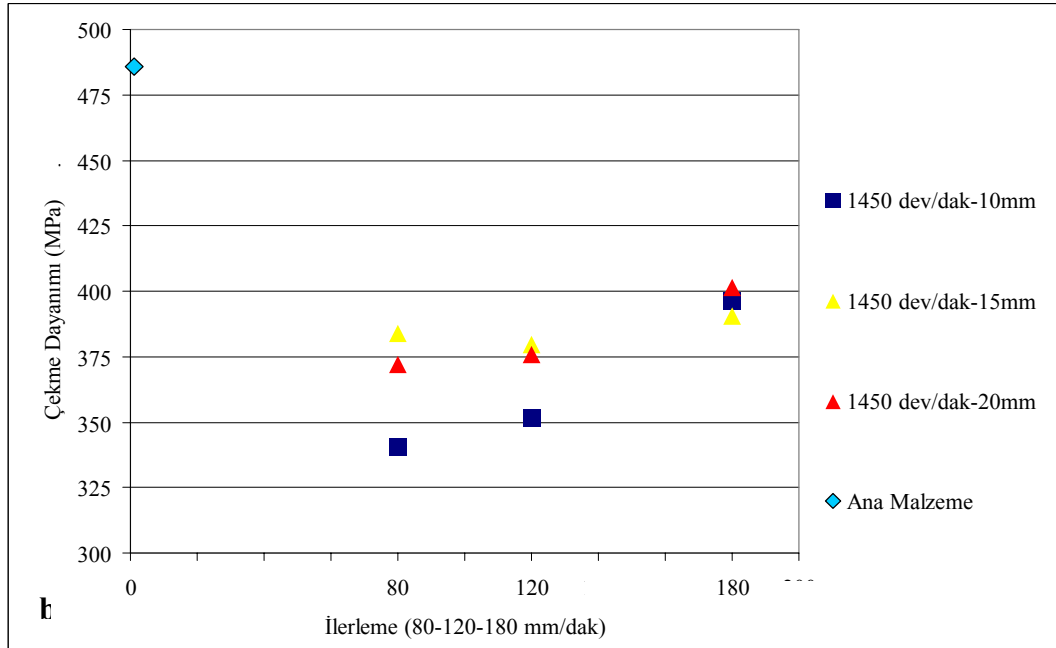
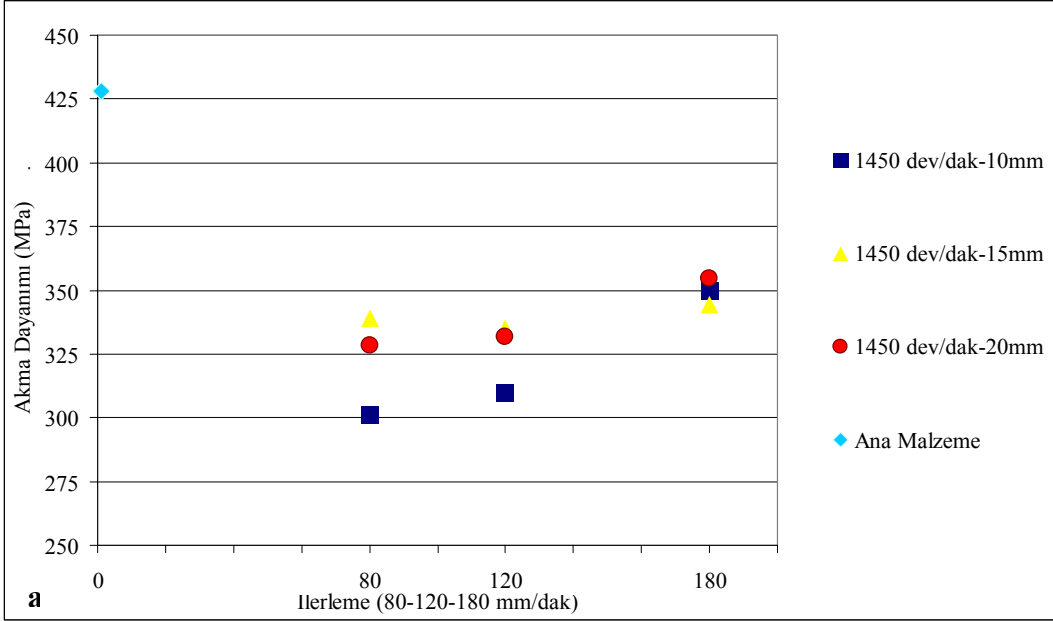


Şekil 5.6. EN 895’e göre çekme dayanımı numunesinin boyutları

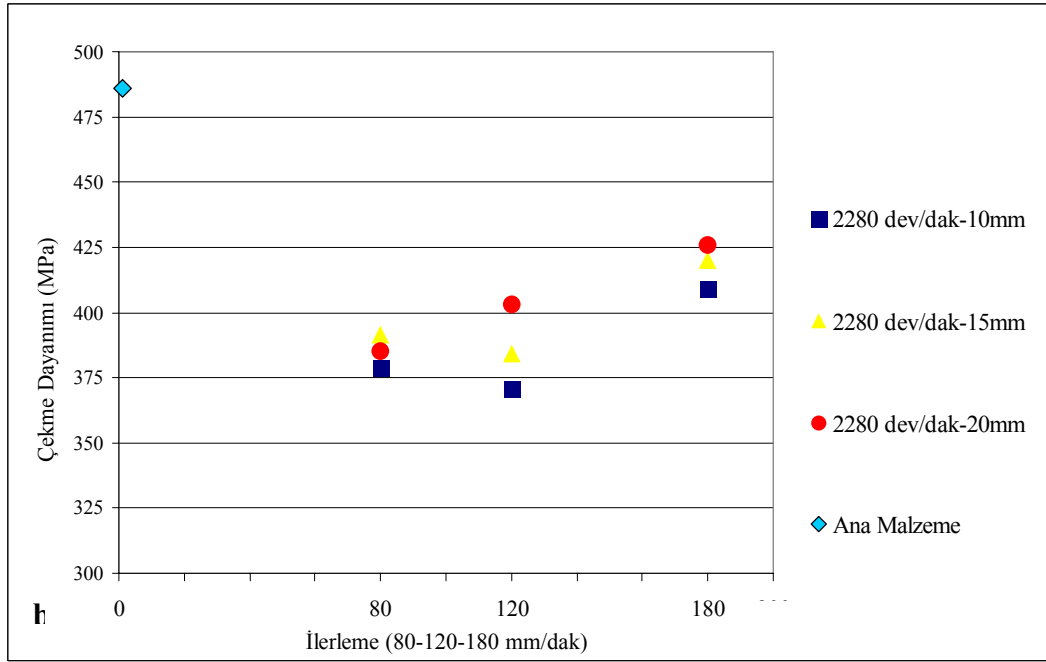
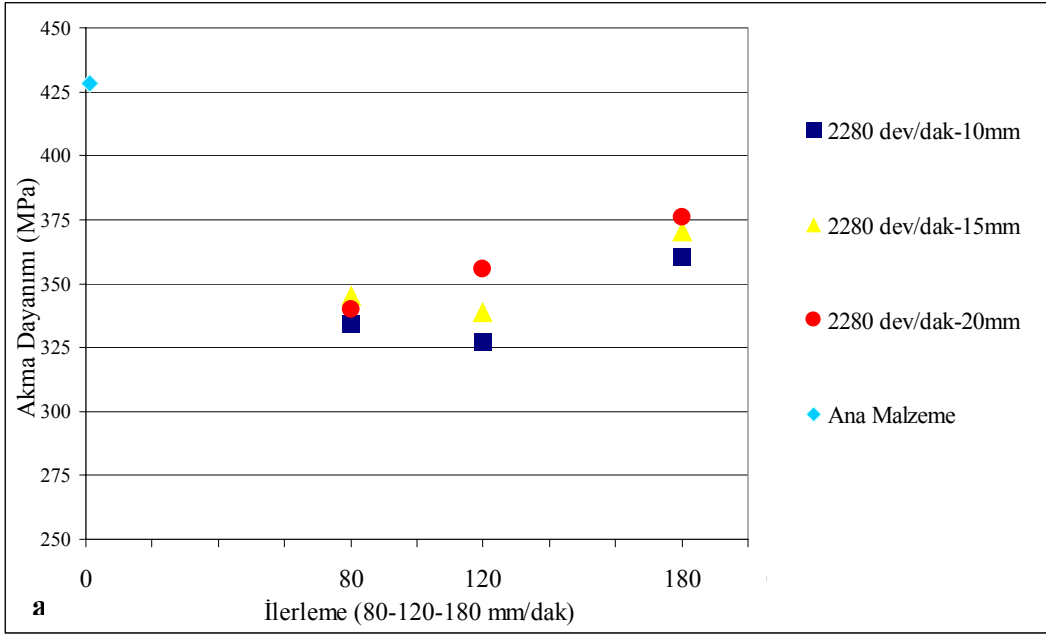
### 5.3.1. Çekme dayanımı deney sonuçları



Şekil 5.7. Ana malzeme ve 930 dev/dak. dönme-(10-15-20 mm) omuz çapı-(80-120-180 mm/dak) kaynak hızı ile birleştirilmiş numunelerin akma (a) ve çekme dayanımı (b) değerleri

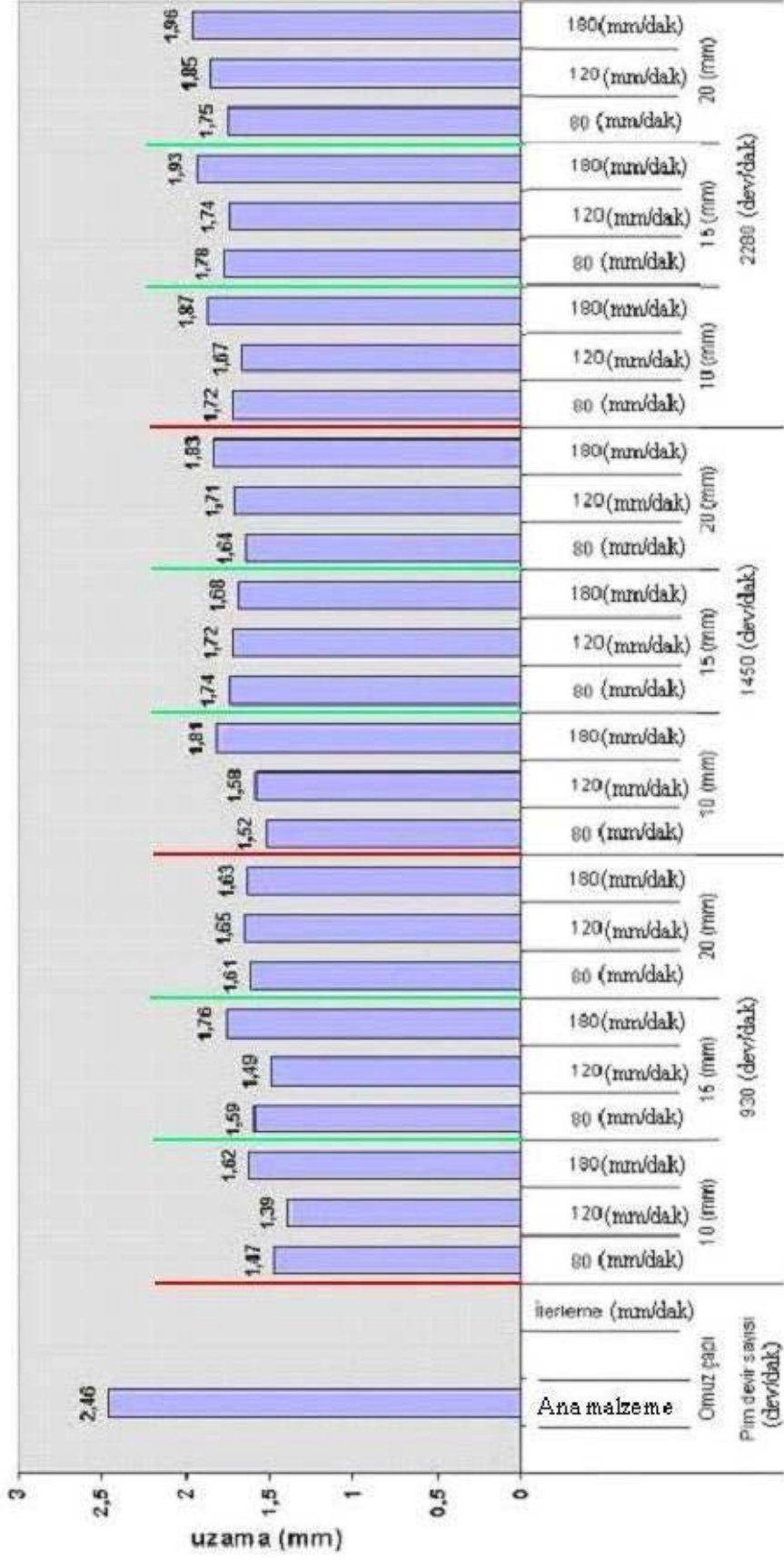


Şekil 5.8. 1450 dev/dak. dönme, (10-15-20 mm) omuz çapı ve (80-120-180 mm/dak). kaynak hızı değişkenleri ile birleştirilmiş numunelerin ana malzemeye göre göstermiş olduğu akma (a) ve çekme (b) dayanım değeri



Şekil 5.9. 2280 dev/dak. dönme, (10-15-20 mm) omuz çapı ve (80-120-180 mm/dak.) kaynak hızı değişkenleri ile birleştirilmiş numunelerin ana malzemeye göre göstermiş olduğu akma (a) ve çekme (b) dayanım değeri

Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da gösterildiği gibi en yüksek çekme dayanımı, akma dayanımı değerleri ana malzemeden elde edilmiştir (Çekme dayanım değeri 485,72 MPa ve Akma dayanım değeri 428,06 MPa çıkmıştır). Aynı şekilde elde edilen bilgiler ışığında da sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen levhalardan en yüksek çekme ve akma dayanım değeri 2280 dev/dak dönen ve 180 mm/dak. kaynak hızı ile 20 mm omuz genişliğindeki pimle birleştirilen numunelerden elde edilmiştir (425,83 MPa Çekme ve 375,78 MPa Akma dayanımı değeri). En düşük çekme ve akma dayanım değeri 930 dev/dak dönen ve 120 mm/dak. kaynak hızı ile 10 mm omuz genişliğindeki pimle birleştirilen numunelerden elde edilmiştir (324,95 MPa Çekme ve 287,66 MPa Akma dayanımı değeri). Yapılan yüzey sıcaklık ölçümlerinde geniş çaptaki omuza sahip malzemenin yüzey sıcaklığını artırdığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi geniş omuzdaki sürtünme yüzey alanının diğerlerine göre daha fazla olmasıyla birim zamanda malzemeye giren ısı akışının da bu oranda artmasıdır [Sarsılmaz ve ark., 2008]. Sürtünme kaynağında kaynak ilerleme hızı; ısı girdisi miktarını etkileyen önemli bir parametre olduğundan kaynak ilerleme hızına bağlı olarak hem mikro yapı hem de sertlik ve çekme gibi mekanik özelliklerde de etkili olmaktadır [Kurt ve ark., 2004 ]. Uygun sürtünme ısıyı oluşturan omuz çapı kullanıldığında artan ilerleme hızı çekme dayanımını arttırmıştır. Bu numuneler için omuz çapının küçük olması, sürtünen alanın az olması dolayısıyla yavaş ısınma (ön hazırlık ısı denilebilir) ve yavaş soğuma meydana geldiği söylenebilir. Bu nedenle nispeten daha yavaş ilerleme hızı (80 mm/dak. kaynak hızı) ile birleştirilmiş numunelerin ön hazırlık ısı meydana gelme süresi daha uzun olmakta, bu da numunelerin ITAB ve TEB’lerin genişlemesine sebep olmaktadır. Yüksek hızla yapılan kaynaklardaki yüksek soğuma hızlarından dolayı mukavemetlendirici partiküllerin kısmen tekrar çökeldiği bilinmektedir. Bu olayın da mukavemet özelliklerine olumsuz etki ettiği söylenebilir.



Şekil 5.10. (930-1450-2280 dev/dak) devir ile dönen pimin, (80-120-180) mm/dak ilerleme ve (10-15-20 mm) çaptaki omuz genişliği ile birleştirilen numunelerin ana malzemeye göre uzama miktarı

Şekil 5.10'da da gösterildiği gibi, numunelerin uzama değerleri de yine akma ve çekme sonuçlarına paralellik göstererek yüksek devirde (2280 dev/dak) ve yüksek ilerleme hızlarında (180 mm/dak) ve büyük omuz çapında (20 mm) birleştirilmiş numunede en iyi uzama değerini vermiştir. Ana malzemedeki uzama değeri 2,46 mm iken en yüksek uzama miktarı 1,96 mm olmuştur. Bu da ana malzemenin %79,67'si kadar bir uzamaya ulaştığını göstermektedir. En düşük uzama değeri ise 1,39 mm olmuştur. Bu da yine akma ve çekme değerleri ile paralellik göstererek 930 dev/dak dönme, 120 mm/dak kaynak hızı ve 10 mm omuz çapı ile birleştirilmiş numuneden elde edilmiştir. Bu sonuç ana malzemenin %56,5'i kadar uzama elde edilmiştir.

#### 5.4. Mikroyapı Deney Sonuçları

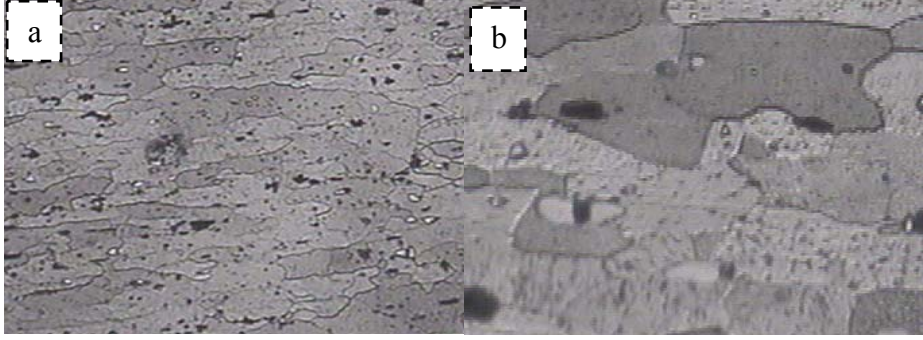
Elde edilen kaynaklı malzemelerin mikroyapı incelemeleri için, malzemelerden alınan numuneler sırasıyla 240-400-600-800-1200 kum zımpara kademelerinden sonra 6µm, 3µm ve 1µm'lik elmas pasta ile parlatılmış; mikroyapı fotoğrafları optik mikroskop ile incelenerek gerekli fotoğraflar çekilmiştir. Seçilen numuneler Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Mikroyapı incelemesinde kullanılan kaynak parametreleri

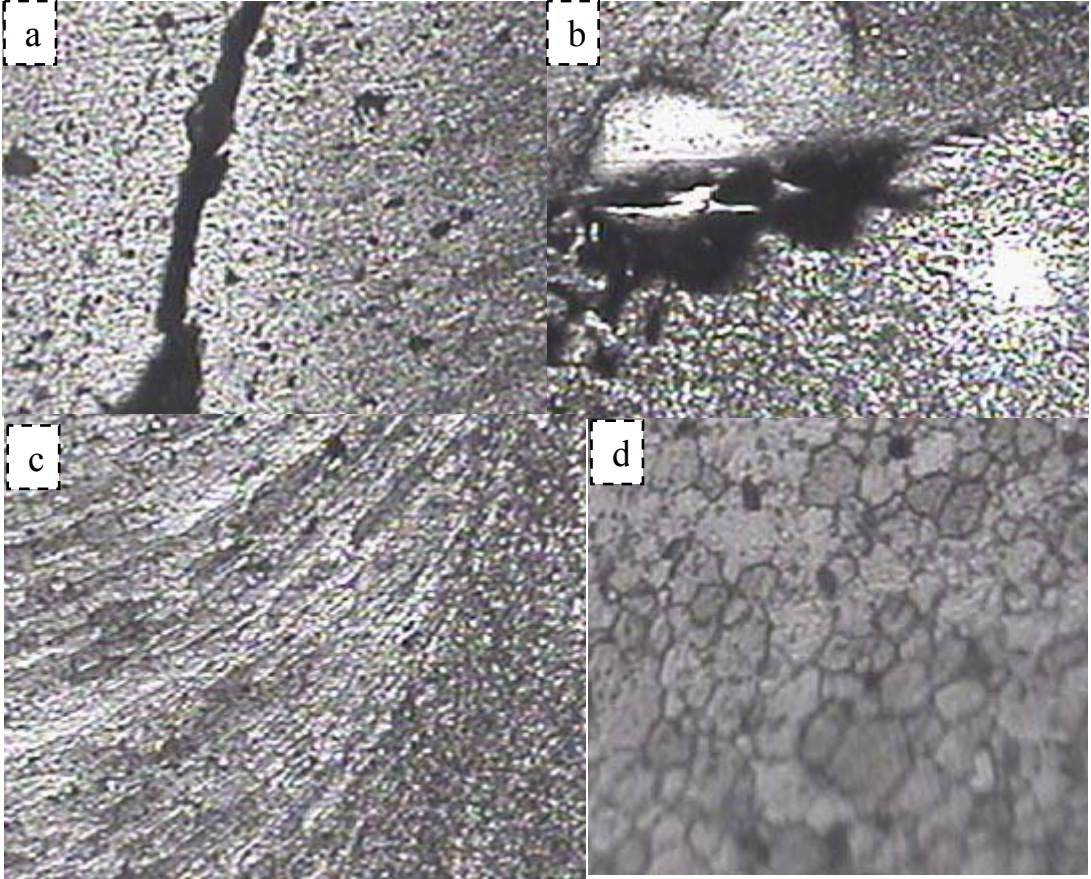
Deney Grupları	Devir Sayısı (dev/dak)	Kaynak İlerleme Hızı (mm/dak)	Omuz Genişlikleri (mm)
1.	930	180	20
2.	1450	180	20
3.	2280	180	20

Çalışmalar en iyi sonuçları veren 20 mm çaplı numunelerle sınırlandırılmıştır. Resim 5.4'te ana malzemenin 10X ve 40X fotoğrafı görülmektedir.





Resim 5.4. a) Ana malzeme (10X), b) Ana malzeme (40X)



Resim 5.5. 930 dev/dak dönme-180 mm/dak ilerleme-20 mm omuz genişliği değişkenleri ile birleştirilen numunelerin mikroyapı görüntüleri. a) Numunede oluşan çatlak (10X), b) Karıştırıcı uç alt boşluğu (5X), c) Kaynak edilmiş bölge ile ana metal arasında yönelen taneler (5X), d) Karışım bölgesinde küçülen taneler (40X)

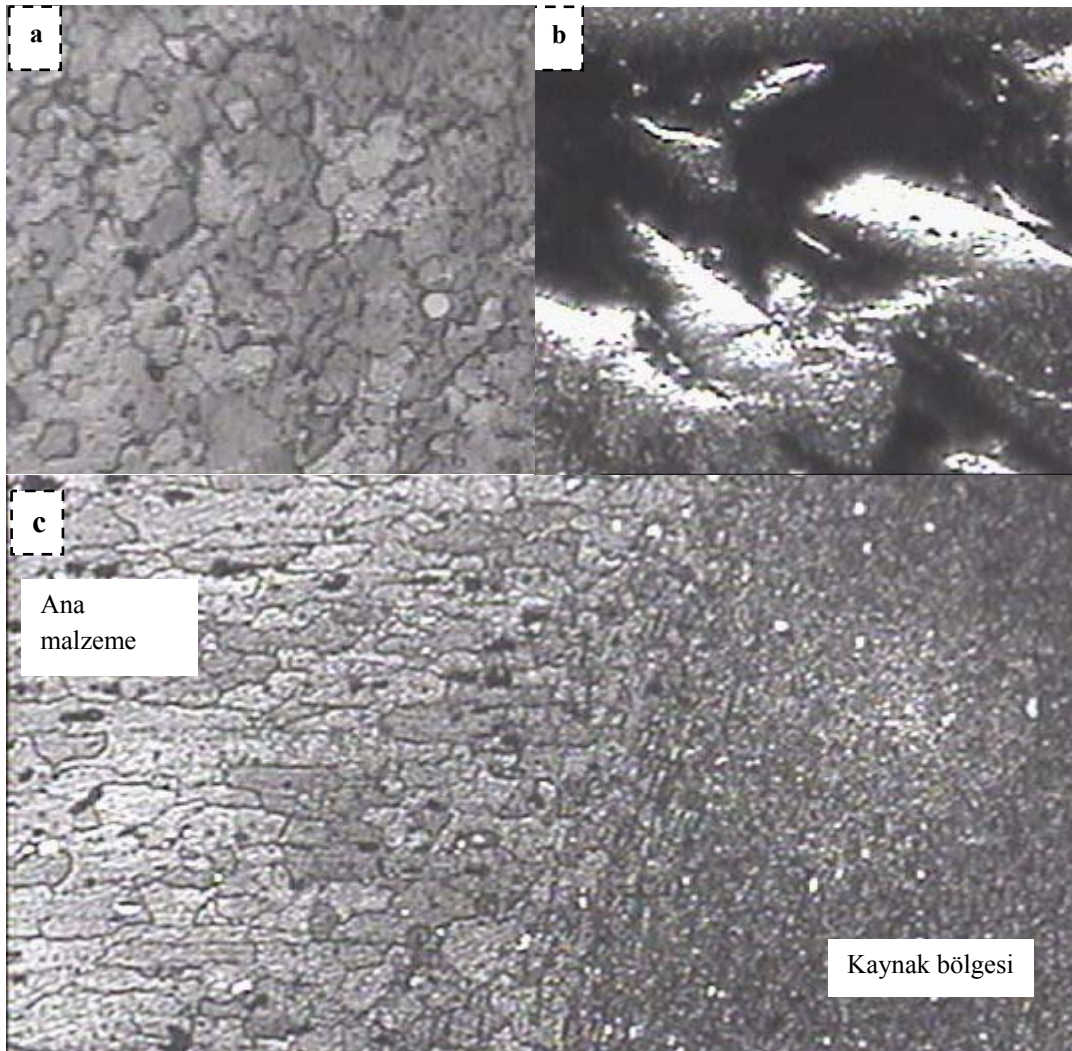
Resim 5.5.a'da oluşan çatlak, kaynağın dayanımını oldukça düşürmektedir. Bu boşluk; yeterli ısının oluşmaması, yeterli karıştırmanın oluşmaması ve yeterli seviyede plastik şekil değişiminin olmaması gibi sebeplerden dolayı oluşmaktadır. Mikroyapı incelenirken 930 dev/dak dönme hızı ile birleştirilmiş numunelerde çatlak ve boşluklara rastlanmıştır. Bu boşluk ve çatlaklar 930 dev/dak dönme, 180 mm/dak ilerleme ve 20 mm omuz genişliği değişkenleri ile birleştirilmiş numunelerin akma ve çekme dayanım değerlerinin düşük çıkmasına sebep olmuştur.

Resim 5.5. b'de karıştırıcı pimin helisel dişlerinin dönüşü esnasında oluşan boşluk görülmektedir. Bu boşluğun, pimin malzemeyi yukarı doğru çekerek karıştırması nedeniyle oluşturduğu düşünülmektedir. Oluşan bu boşluk numunelerin mekanik özelliklerine olumsuz etki etmektedir.

Resim 5.5. c'de termo mekanik olarak etkilenen bölgede (TEB) oluşan deformasyon bantları görülmektedir. Kaynak esnasında, kaynak merkezinde yüksek sıcaklık ve dönmenin sonucunda ekstrüze (yönlendirerek sıkıştırılan) edilen malzeme bu bölgede yüksek bir deformasyona maruz kalmaktadır. Bu aşırı deformasyonun ve yüksek sıcaklığın etkisiyle, tane yapıları yassılaşıyor ve yönlenebilir hale gelmektedir. Bu yönlenebilir tane grupları, TEB'de deformasyon bantlarının oluşmasına neden olmaktadır.

Resim 5.5. d'de kaynak karışım bölgesi görülmektedir. Buraya Dinamik olarak yeniden Kristalleşen Bölge de denmektedir. DKB ve TEB'e nazaran daha ince taneli bir yapı oluşumu meydana gelmektedir.

SKK ile birleştirilen bütün numunelerde esas metalin tane yapısı, kaynak edilmiş bölgede özellikle karıştırıcı ucun dış çapından itibaren önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Yumuşayan ve karıştırıcının etkisi ile tane yapısının karıştırma yönüne doğru yönlendiren karıştırıcı uç kaynak metalini oluştururken, omuzun altında kalan metal yeniden kristalleşerek, termo-mekanik olarak yeniden kristalleşen bölgeyi oluşturmaktadır [Çakır, 2008].



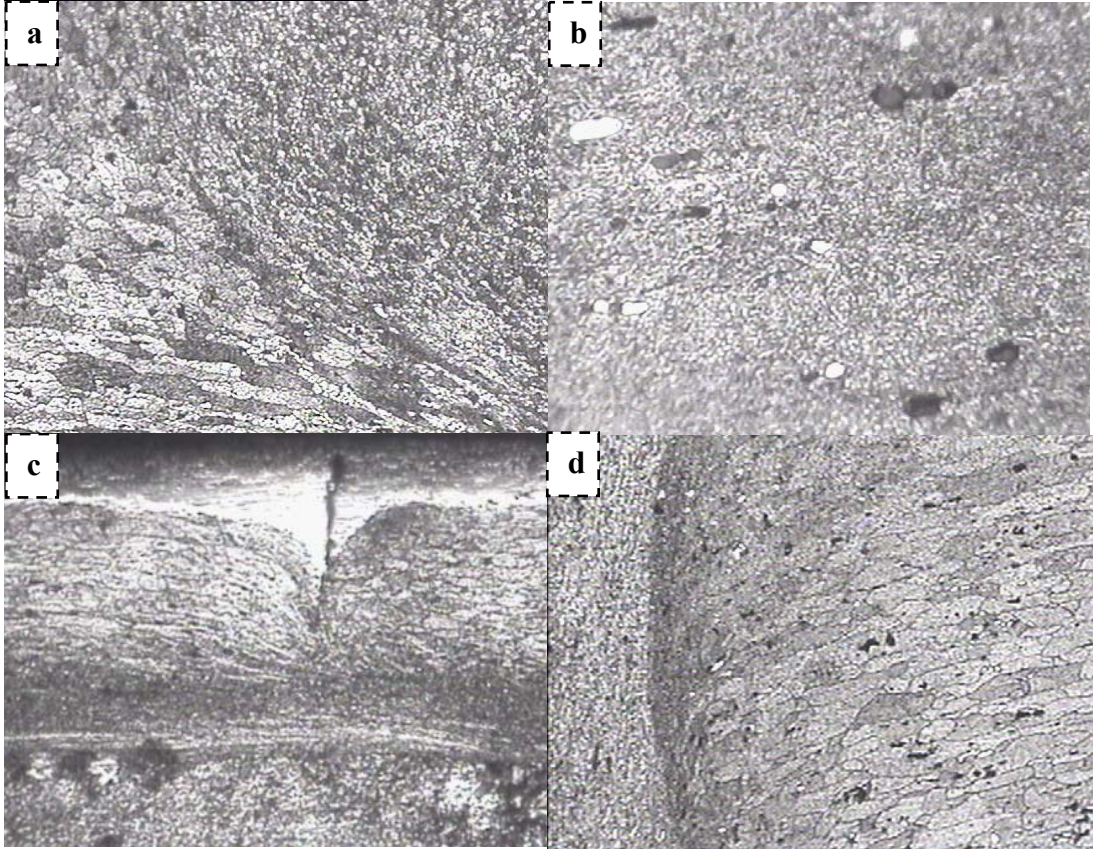
Resim 5.6. 1450 dev/dak dönme-180 mm/dak ilerleme-20 mm omuz genişliği değişkenleri ile birleştirilen numunelerin mikroyapı görüntüleri. a) Kaynak bölgesi görüntüsü (40X ), b) Karıştırıcı pimin altında kalan bölgede oluşan kaynak boşluğu görüntüsü (5X), c) Numunenin birleşme bölgesi (10X)

Resim 5.6.a'da kaynak karışım bölgesi görülmektedir (40X). Buraya DKB de denmektedir. DKB bölgesinde TEB bölgesine nazaran daha ince taneli bir yapı oluşumu meydana gelmektedir. Bu görüntüde ile Şekil 5.14-b'deki esas malzemenin 40X görüntüsü karşılaştırıldığında küçülmenin meydana geldiği görülmektedir.

Resim 5.6.b'de kaynak alt bölgesi görülmektedir. Karıştırıcı dönme esnasında dönme sonucu metali yukarı çekerek karıştırmaktadır. Dönme ve karıştırma esnasında yeterli ısı ve karışım olmadan birleştirilen numunelerde bu tür boşluklara

rastlanmaktadır. Oluşan boşluk neticesinde numunelerin çekme, akma dayanım değerlerinde ve uzama miktarında düşüş gözlenmektedir. 1450 dev/dak dönme, 180 mm/dak ilerleme ve 20 mm omuz genişliği değişkenleri birleştirilmiş numunelerin akma ve çekme dayanım değerlerini, ayrıca uzama değerlerini sadece yüksek ısının ITAB ve TEB'leri genişleterek düşürmediği gözlemlenmektedir. Düşük ısının da yeterli plastik şekil değişimi oluşumunu engellediği söylenebilmektedir. Karıştırıcı ucun altında kalan bölgede oluşan bu boşluk kaynak dayanımını düşüren en büyük etmenlerden biridir.

Resim 5.6. c'de ise görülen deformasyon bantları termo mekanik olarak etkilenen bölgede meydana gelmiştir. Kaynak yapıldığı an, kaynak dikişinde yüksek sıcaklık ve dönme sonucu ekstrüze edilen malzeme bu bölgede yüksek bir deformasyon oluşturmaktadır. Oluşan bu aşırı deformasyon ve yüksek sıcaklığın etkisi ile tane yapıları yassılaşıyor ve yönlenebilmektedir. Yönlenebilen tane grupları, mekanik olarak etkilenen bölgede deformasyon bantlarının oluşmasına sebep olmaktadır. Kaynak yapılan numunelerin tamamında ana metalin tane yapısı karıştırıcının karıştırdığı bölgede değişime uğramaktadır. Tane sınırlarının ise çok belirgin olmadığı görülmektedir. Bu da dayanımı arttıran elementlerin nispeten daha homojen dağıldığını göstermektedir.



Resim 5.7. 2280 dev/dak dönme-180 mm/dak ilerleme-20 mm omuz genişliği değişkenleri ile birleştirilen numunelerin mikroyapı görüntüleri. a) Birleşme bölgesi, (10X), b) Kaynak bölgesi (40X), c) Kaynak alt bölgesi (5X), d) TEB ile ana malzeme arasındaki geçiş bölgesi (5X)

Resim 5.7.a'da termo mekanik olarak etkilenen bölge (TEB) görülmektedir. Kaynak esnasında, kaynak dikişinde yüksek bir deformasyon oluşmaktadır. Bu aşırı deformasyonun ve yüksek sıcaklığın etkisiyle, tane yapıları yassılaşıyor ve yönlenebilir ve bu yönlenebilir tane grupları, TEB bölgesinde deformasyon bantlarını meydana getirmektedir. Tane sınırları ise çok net olarak görülmemektedir. Bu da yapıyı oluşturan elementlerin homojen olduğunu göstermektedir.

Resim 5.7.b'de kaynak karışım bölgesi görülmektedir. Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge, termo mekanik olarak etkilenen bölgeye nazaran daha ince taneli bir yapı oluşumu meydana gelmektedir.

Resim 5.7.c'de iki levhanın alt birleşme yeri görülmektedir. Karıştırıcı ucun altında kalan bölgede herhangi bir birleşme olmamıştır. Bu nedenle bu bölgede oluşan boşluk kaynağın mekanik özelliklerine olumsuz etki etmektedir.

Resim 5.7.d'de termo mekanik olarak etkilenen bölgede (TEB) oluşan deformasyon bantları görülmektedir. Kaynak esnasında oluşan deformasyonun ve yüksek sıcaklığın etkisiyle, tane yapıları yassılaşılarak yönlenme meydana getirmektedir. Bu yönlenme TEB'de deformasyon bantlarını oluşturmaktadır.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kullanılan sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi bir katı hal (basınç) kaynak yöntemi olup, Al-alaşımaları gibi ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri güç malzemelerin kaynağında başarı ile uygulanmıştır.

1. Al-2024-0 alaşımı levhalar başarılı bir şekilde sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle alın altına birleştirilmiştir.
2. Bu çalışmada en iyi akma ve çekme dayanım değerleri ile uzama değeri 2280 dev/dak dönme-180 mm/dak ilerleme-20 mm karıştırıcı pim omuz genişliği değişkenlerinden elde edilmiştir.
3. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunelerin, kaynak dikişi görüntüsünün, diğer kaynak yöntemlerine göre çok daha düzgün olduğu ve herhangi bir temizlik v.b. işleme gerek olmadığı görülmüştür.
4. Kaynak ilerleme hızının yüksek olduğu işlemlerde yapılan birleştirmelerin çekme ve yorulma direncinde nispeten daha düşük ilerlemedeki parametreleriyle yapılan kaynaklara göre daha iyi olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni de yüksek ilerleme hızlarında malzemeye daha düşük miktarlarda ısı girmesiyle birlikte malzeme daha hızlı soğumaktadır.
5. Yüksek dönme hızı akma ve çekme dayanımı için genelde daha yüksek sonuçlar çıkmasına sebep olmuştur. Yüksek dönme hızının yüksek ilerleme hızlarıyla birleştiği değişkenlerde daha iyi sonuçlar alınmıştır. Fakat yüksek dönme hızı ve düşük ilerleme hızlarında çekme ve akma dayanım değerleri düşüş göstermektedir.
6. Kaynak numunelerine uygulanan eğme yorulma deneylerinde numunelerin kırılma yerleri ısının etkisi altındaki bölgeden (ITAB) başlayarak ilerlediği ve

kaynak dikişinin hemen yanında kopma olduğu görülmüştür. Burada kopmasının kaynak dikişinin sağlam olduğunu göstermiştir.

7. Kaynak ilerleme hızı sabitken, devir sayısı 930 dev/dak'dan 2280 dev/dak'ya çıkarıldığında kaynaklı bağlantının yorulma dayanımı artmıştır. Bu artışın nedeni; kaynak devir hızının artırılmasıyla kaynak bölgesine giren ısı miktarının artması ve böylece yüksek hızla yapılan kaynaklardaki (2280 dev/dak dönme-120 mm/dak. ilerleme) yüksek soğuma hızlarından dolayı mukavemetlendirici partiküllerin kısmen tekrar çökmesidir.
8. Çekme numunelerinin geneline bakıldığında devir sayısı sabitken ilerleme hızının ve karıştırıcı omuz genişliğinin artmasıyla kaynaklı parçaların mukavemet değerlerinde artış gözlenmiştir.
9. Çekme numunelerinde ilerleme hızı sabitken karıştırıcı omuz genişliğinin ve devirin artmasıyla kaynaklı parçaların mukavemet değerlerinde artış gözlenmiştir.
10. Çekme numunelerinde karıştırıcı omuz genişliği sabitken karıştırıcı ilerleme hızının ve devir sayısının artmasıyla kaynaklı parçaların mukavemet değerlerinde genelde artış gözlenmiştir.
11. Sürtünme karıştırma kaynaklarında, karıştırıcı ucun eğikliğinden ( $2^{\circ}$ ) dolayı kaynak bölgesinde çapak oluşumu az olmuştur.

Bundan sonra yapılacak bilimsel çalışmalar için aşağıdaki önerilerin yapılması uygun bulunmuştur.

1. Levhalar aynı işlem parametrelerinde çift taraflı birleştirilerek mekanik testlere tabi tutulabilir.



2. Pim batma derinliği parametre olarak alınıp; deneyler yapılarak sonuçlar incelenebilir.
3. Farklı metaller birleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Anık, S., Dikicioğlu, A., Vural, M., "Koruyucu gaz altında kaynak ve Alüminyumun MIG kaynağı", *Kaynak tekniği yayınları*, **1**: 30-45, İstanbul (1994).
2. Ataoğlu, H., "Sürtünme karıştırma kaynaklı alüminyum alaşımlarının iç yapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek lisans tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya, 1-50 (2002).
3. Alsaran, A., "Kaynaklı parçaların yorulması", *Atatürk Üniversitesi, Fen Bil. Enst, Yüks. Lis. Tezi*, Erzurum, 43 (1997).
4. Çakır, M., Kurt, A., Ateş, H., "Toz Metal Al Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Devir Sayısının Kaynaklanabilirliğe Etkisi" *Mühendis ve Makine*, 49, (580): 6-41 (2008).
5. Çalışkan, Ö., "Alüminyum ve alaşımlarının kaynaklara birliği ve bunlara uygulanan kaynak yöntemleri", Yüksek lisan tezi, *Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-138 (1994).
6. Çam, G., Sürtünme karıştırma kaynağı ve uygulamaları, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi **9. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı**, 450-458 (2002).
7. Çam G., "Al-Alaşımları İçin Geliştirilen Yeni Kaynak Yöntemleri", *TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 46, 541, 30-38, (2005).
8. Çam, G., "Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler", *TMMOB Makine Mühendisleri Odası "Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve Sergisi"*, Kocaeli, 47-62 (2003).
9. Çetinkaya, C., Tekeli, S., Kurtuluş, O., "Alüminyum alaşımlarının kaynaklanabilirliği ve kaynak parametrelerinin mekanik özellikler ve mikro yapıya etkisi", *Politeknik Dergisi*, 5 (4):321-333 (2002).
10. Dilek, M., "Mechanical properties of different aluminium alloys joined by friction stir welding", Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* Adana, 3 (2006).
11. Dong, P. Lu., F., Hong, Cao, J.K. Z., Proc. Of the *1<sup>st</sup> Int Symp. On Friction Stir Welding*, , Thousand Oaks, CA, USA, 51-53 (1999).
12. Deniz M, "alüminyum alaşımı ve pirinç levhaların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle bindirme kaynağı ve mekanik özelliklerinin

- incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* Hatay, 12-14 (2006).
13. Doğan, S., “AA 5754 –H12 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında İşlem Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkileri” Osmangazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, 62,63,71-73 (2006).
  14. Donald R. Askeland, "Demir dışı alaşımlar", Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Doç. Dr. Mehmet Erdoğan, 62, *Nobel Yayıncılık*, 265-273 (2002).
  15. Eryürek, İ.Barlas, "Gazaltı (MIG/MAG) Kaynağı", *ASKAYNAK*, 1.Baskı, İstanbul, 1-60 (1998).
  16. Güçlüer, S., “Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle alın kaynağı yapılmış al-5086 h32 levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay, 1-2 (2007).
  17. Güleç, Ş., Aran, A., “Çelik ve dökme demirlerin yorulma dayanımı”, *TÜBİTAK Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü*, MBEAE Matbaası-Gebze, 62-66 (1983).
  18. Gürler, M., "Alüminyum alaşımlarının sürtünme kaynak özellikleri", Doktora tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 11-40 (2000).
  19. İnternet: “II. Alüminyum Sempozyumu ve Sergisi Sonuç Bildirgesi” [http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi133/d133\\_0912.pdf](http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi133/d133_0912.pdf) (25.08.2009).
  20. İnternet: Araştırma ve Meslekleri Geliştirme Müdürlüğü “Bol ve Kullanışlı Bir Madde: Alüminyum” [http://www.izto.org.tr/nr/rdonlyres/7475bda1-95b7-4855-b351-9adce4362afe/4474/nurel\\_aluminyum.pdf](http://www.izto.org.tr/nr/rdonlyres/7475bda1-95b7-4855-b351-9adce4362afe/4474/nurel_aluminyum.pdf) (25.08.2009).
  21. İnternet: NASA Design Strengthens Welds “Originating Technology/NASA Contribution” [http://www.sti.nasa.gov/tto/Spinoff2008/ip\\_4.html](http://www.sti.nasa.gov/tto/Spinoff2008/ip_4.html) (25.08.2009).
  22. James, M.N, Hattingh, D.G., Bradley, G.R., "Weld tool travel speed effects on fatigue life of friction stir welds in 5083 aluminium" *International Journal of Fatigue*, (25) : 1389-1398 (2003).
  23. Kaluç, E., Bozduman, B., "Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynak Yöntemi", *Makine Magazin*,27, 54-61 (1998).
  24. Kaluç, E., Mert, Ş., "Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler", *TMMOB Makine Mühendisleri Odası "Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve Sergisi*, Kocaeli, 103-114 (2003).

25. Kaluç, E., Özsoy, M., "Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının esasları" *Mühendis ve Makine*, 513 (2002).
26. Kayabaş, Ö., "Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Yapılan Alüminyumun Kaynağında Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" Bitirme Projesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 13, 27-29, 46, (2003).
27. Kurtuluş, O., "Alüminyum ve alaşımlarının kaynaklanabilirliği ve değişik parametrelerin mekanik özellikler ile mikro yapı üzerine etkisi", Yüksek lisans tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-56 (2001).
28. Külekçi, M. K., Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joints of AlCu<sub>4</sub>SiMg Aluminium Alloy", *Metallic Materials - Kovove Materialy*, 41/2,20-28, (2003).
29. Kınıkoğlu, N. G., "Mühendislik alaşımları", Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, *Literatür Yayıncılık, Dağıtım*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 492-507 (2001).
30. Kurt, A., Özdemir, M., Boz, M., "Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi" *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*19 No 2, 191-197 (2004).
31. Kurt, A., Özdemir, M., Boz, M., "Alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi", *TMMOB Makine Mühendisleri Odası "Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve Sergisi"*, Kocaeli, 89-99 (2003).
32. Külekçi M, K., "Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joints of AlCu<sub>4</sub>SiMg Aliminium Alloy", *Metallic Materials – Kovove Materialy*", 41/2,20-28, (2003).
33. Lockwood, W, D., Reynolds, A.P., "Simulation of the global response of a friction stir weld using local constitutive behavior" *Materials Science&Engineenng*, A339, 35-42 (2003).
34. Özdemir, M., "Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile alüminyum malzemelerin kaynaklanabilirliği", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-65 (2003).
35. Saracoğlu. E., "Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağının İncelenmesi" Bitirme Projesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği* İzmir, 2-3 (2007).

36. Sarsılmaz, F., Özdemir, N., Özel, S., “Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen Aa6061/aa7075 Çiftinde Karıştırıcı Uç Omuz Genişliğinin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi” *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergisi* Cilt 7, Sayı:1, 51-61 (2008).
37. Senyen, C, "Alüminyum alaşımlarının kaynağında dikkat edilecek hususlar", *Makine&Metal Teknolojisi*, 121:51-63 (2002).
38. Stephans, R.I., Fatemi, A., Stephans, R.R., Fuchs, H.O, “Metal fatigue in engineering, second edition”, *John Wiley&Sons, INC.,USA*,73-75 (2001).
39. Şandır, R., "Alüminyum ve alaşımlarının kaynak kabiliyeti", Yüksek lisans tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-150 (2002).
40. Şık, A., “Otomobil saclarının mig-mag kaynağında gaz karışımlarının bağlantılarının mekanik özelliklerine etkisi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*,15-107(2002).
41. Şık, A., “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Alimünyum Levhaların Eğme ve Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi” *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 9 (2): 12-17 (2005).
42. Şık, A., “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Yapılan Alüminyum Kaynağında Kaynak Bölgesinin Eğmeli Yorulma Dayanımının İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 2 (9): 125-130 (2006).
43. Taban, E., “5XXX Serisi Al Alaşımlarının Tig Mig ve Sürtünene Eleman ile Birleştirme Kaynaklı Bağlantılarının Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli 10, 16, 40-41, 115, 116, 157, (2004).
44. Tanrıöver, L., “Aa5052/2024 Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ , 7 (2008).
45. TMMOB Metalürji Mühendisleri Odası Alüminyum Komisyonu, "Alüminyum Raporu", Metalürji, *TMMOB Metalürji Mühendisleri Yayın Organı*, (137): 14-45 (2004).
46. Tülbentçi, K., "Alüminyum ve alaşımlarının kaynağı", *Bönler Yayını*, İstanbul, 98 (1990).
47. Yavuz H., ve Çam G., “Yeni Bir Kaynak Teknolojisi: Sürtünme Karıştırma Kaynağı”, *Endüstri ve Otomasyon*, S 51, 18-202 (2001).

48. Yurdakul M., Özbay, O., İç, T. Y., “Havacılık Alanında Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Seçimi” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 17, (2): 1-23, (2002).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KAFALI, Hasan  
Uyruğu : TC  
Doğum tarihi ve yeri : 14.06.1980 Adana  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (322) 743 21 10  
Faks : 0 (322) 743 21 10  
e-mail : [hastori1980@hotmail.com](mailto:hastori1980@hotmail.com)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi /Endüstriyel Teknoloji Eğitimi	2004
Lise	Karşıyaka Endüstri Meslek Lisesi	1997

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2004–2005	Tim Teknoloji-İşleme Kalite	Kontrol ve Proses Sorumlusu
2005-2007	Mudurnu YİBO (MEB)	Teknoloji ve Tasarım Öğretmeni
2007–2009	Oruçlu İO (MEB)	Teknoloji ve Tasarım Öğretmeni
2009-	Oruçlu İO (MEB)	Müdür yardımcısı

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, basketbol ve voleybol oynamak, otomobil kullanmak.