



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE  
BİRLEŞTİRİLEN 2000 SERİSİ  
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN  
YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Tayfun SAYACA

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2010



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE  
BİRLEŞTİRİLEN 2000 SERİSİ  
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN  
YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Tayfun SAYACA

Prof.Dr. Ali BAYRAM  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE  
BİRLEŞTİRİLEN 2000 SERİSİ  
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN  
YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Tayfun SAYACA

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez 30.03.2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Ali BAYRAM  
Danışman

Prof.Dr.Agah UĞUZ  
Jüri Üyesi

Prof.Dr. Recep EREN  
Jüri Üyesi

**ÖZET****SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN  
2000 SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN  
YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ****Tayfun SAYACA****Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü****Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı****( Yüksek Lisans Tezi / Tez Danışmanı: Prof.Dr. Ali BAYRAM )****Bursa , 2010**

Bu çalışmada sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak birleştirilen 2014 tipi alüminyum alaşımı eğilme yorulma davranışı incelendi. Numuneler 3 dönme hızı ve 3 ilerleme hızı ile 9 kombinasyon oluşturularak üretildi. Bunun sonucunda temel malzemenin de inceleneceği dikkate alınarak toplam 10 deney grubu oluşturuldu.

Çalışmanın hedefi, alüminyum alaşımlarından farklı parametrelerde yapılmış sürtünme karıştırma kaynağı numunelerinin eğilme yorulmasından dolayı oluşan hasarı incelemeye yöneliktir.

Bu elemanlardaki yükleme ve gerilme sekline benzer bir yorulma yapabilmek için çalışmanın amacına uygun olarak düzlemsel eğme gerilmeli yorulma makinesi tasarlanmış ve imal edilmiştir.

Öncelikle tüm malzeme gruplarındaki numunelerini yorulma deneyleri yapılmıştır. Daha sonra elde edilen sonuçlar ile yorulma analizi için S- N diyagramları Wöhler eğrileri oluşturulmuştur.

Hasar kriteri ve yorulma ömür sınırı olarak, ortalama  $N = 10^6$  çevrimine karşılık gelen eğilme gerilmesi alınmıştır.

**Anahtar Kelimeler: Sürtünme Karıştırma Kaynağı/Yorulma/2014 Alüminyum Alaşımı**

**ABSTRACT**

**INVESTIGATION OF THE BENDING FATIGUE BEHAVIOUR OF THE  
2000 SERIES ALUMINIUM ALLOY  
WHICH IS WELDED WITH FRICTION STIR WELDING**

**Tayfun SAYACA**

**Uludağ University, Institute of Science, Department of Mechanical  
Engineering**

**( Ph. D. Thesis / Supervisor: Prof. Dr. Ali BAYRAM)**

**Bursa – Turkey 2010**

In this study the bending fatigue behaviour of 2014 type aluminium alloy which welded with friction stir welding has been investigated, 9 combination with 3 speed of rotational speed and advancing rate was used

The aim of this study is the aluminium alloy which is welded with friction stir welding to find the ways to decrease the damage caused by bending fatigue

To create a similar fatigue as to loading and stress type in these elements, a plane bending stress fatigue machine is projected and produced in order to reach the goal of the study.

Before all else samples which in the all material groups bending fatigue done. Afterwards experimental data which is got from fatigue test results that are done use and S – N diagrams (Wohler curves) are drawn.

The bending stress which is equivalent to an average of  $N = 10^6$  cycle is accepted as damage criteria and fatigue limit.

**Key Words: Friction Stir Welding/Fatigue/2014 Aluminium Alloy**

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAY SAYFASI.	II
ÖZET	III
ABSTRACT	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÇİZELGELER DİZİNİ	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
SİMGELER DİZİNİ	XI
GİRİŞ	1
<b>1. KAYNAK ÖZETLERİ</b>	<b>4</b>
<b>2. MATERYEL ve YÖNTEM</b>	<b>10</b>
<b>2.1. YORULMA OLAYI</b>	<b>11</b>
2.1.1. Yorulma Nicelikleri	11
2.1.2. Yorulma Olayının Tarihsel Gelişimi	12
2.1.3. Yorulma Mekanizması	13
2.1.3.1. Yorulma mekanizmasının atomik yapısı	13
2.1.3.2. Yorulma mekanizmasının fiziksel yapısı	14
2.1.4. Yorulmaya Etki Eden Etmenler	16
2.1.4.1. Çevre	17
2.1.4.2. Yükleme şekli	18
2.1.4.3. Malzemeye bağlı faktörler	19
2.1.4.4. Parça büyüklüğü	20
2.1.4.5. Yüzey pürüzlülüğü	20
2.1.4.6. Yüzey durumu	21
2.1.4.7. Yüzey içyapısı	22
2.1.4.8. Çentik hassasiyeti	22
2.1.5. Yükleme Durumu	22
2.1.5.1. Yorulma Yükleme Tipleri (Tarzı)	23
2.1.5.2. Yorulma Yükleme Tipleri (Şekli)	27
2.1.6. Yorulma Deneyi	27
2.1.6.1. Yorulma deney cihazları	27
2.1.6.2. Wöhler eğrileri	28
2.1.6.3. Yorulma gerilmesi oranı yorulma yükü modu	30
2.1.6.4. Yorulma deney cihazı özellikleri	31
2.1.6.5. Yorulma deneyi gerilme tipleri	31
2.1.6.6. Eksenel gerilmeli yorulma deneyi	32
2.1.6.7. Eğilme gerilmeli yorulma deneyi	33
2.1.6.8. Burma gerilmeli yorulma deneyi	35
2.1.7. Yorulma Deneyi Uygulama Şekilleri	36
2.1.8. Yorulma Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	36

2.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemi	38
2.2.1. Kaynak Metalürjisi	40
2.2.2. Kaynak Parametrelerinin Etkisi	44
2.2.2.1. Sürtünme Basıncı ve Yığma Basıncı	44
2.2.2.2. Sürtünme ve Yığma Süreleri	44
2.2.2.3. Malzeme Kalınlığı	45
2.2.2.4. Karıştırıcı Uç Malzemesi ve Dizaynı	45
2.2.2.5. Takım İlerleme Hızı ve Takım Devir Sayısı	46
2.2.2.6. Kaynak Pozisyonu ve Birleştirme Geometriği	47
2.2.3. İşlemin Hazırlanma Süreci	47
2.2.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulandığı Malzemeler	48
2.2.4.1. Bakır alaşımları	48
2.2.4.2. Titanyum alaşımları	49
2.2.4.3. Çelikler	49
2.2.4.4. Magnezyum alaşımları	50
2.2.4.5. Farklı alaşım ve metaller	50
2.2.4.6. Plastikler	52
2.2.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Kullanım Alanlar	53
2.2.5.1. Uzay ve havacılık endüstrisinde kullanım	53
2.2.5.2. Gemi endüstrisinde kullanım	54
2.2.5.3. Otomotiv endüstrisinde kullanım	55
2.2.5.4. Demiryolu taşımacılığı endüstrisinde kullanım	55
2.2.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları	56
2.3. Alüminyum	58
2.3.1. Alüminyum (Temel Özellikleri)	58
2.3.1.1. Dayanım/Yoğunluk Oranı	59
2.3.1.2. Elektrik iletkenliği/Yoğunluk oranı	59
2.3.1.3. Korozyon dayanımı	59
2.3.2. Alüminyumun Bazı Fiziksel Özellikleri	60
2.3.3. Alüminyum Üretim	61
2.3.3.1. Bayer prosesi	61
2.3.3.2. Alüminadan alüminyum üretimi	63
2.3.4. Alüminyum Alaşımları	65
2.3.4.1. Dövülebilen alüminyum alaşım grupları	65
2.3.4.2. Döküm alüminyum alaşım grupları	66
2.3.4.3. Alaşım Elementlerinin Etkisi	69
2.3.5. Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri	69
2.3.4.1. Homojenleştirme	70
2.3.4.2. Tavlama	70
2.3.4.3. Gerilim giderme tavlaması	71
2.3.4.1. Çözelti ısıl işlemi	71
2.3.4.2. Yaşlandırma işlemi	71
2.3.6. Alüminyumun Kullanılma Alanları	72
2.4. Yorulma Cihazı	73

2.4.1. Yorulma Cihazı Mekanik Kısım	75
2.4.2. Yorulma Cihazı Elektronik Kısım	78
2.4.3. Uygulama Hali	80
2.5. Numunelerin Hazırlanması	81
2.5.1. Malzeme Seçim	81
2.5.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulaması	82
2.5.2.1. Parametrelerin belirlenmesi	83
2.5.2.2. Teknik donanım	84
2.5.2.3. Takımlar	84
2.5.2.1. Kaynaklı birleştirmeler	85
2.6. Yorulma Davranışının İncelenmesi	89
<b>3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA</b>	92
SONUÇ	111
KAYNAKLAR	112



<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b>		<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1	Yorulma Gerilmesi Oranı	30
Çizelge 2.2	Al Fiziksel Özellikler	59
Çizelge 2.3	Alüminyum Isıl İşlem İşlemleri	66
Çizelge 2.4	Kullanılan 2014 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Kompozisyonu	81
Çizelge 2.5	Kullanılan 2014 Alüminyum Alaşımının Fiziksel Özellikleri	82
Çizelge 2.6	Kaynaklı Parametre Deney Grupları	83
Çizelge 2.7	Numune Numaralandırılması	91
Çizelge 3.1	Deney Sonuçları	93

<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b>		Sayfa
Şekil 1.1	Yorulma deney cihazı şematik gösterimi	6
Şekil 2.1	Yorulma tane sınırları	14
Şekil 2.2	Kayma kuşağının çatlama büyümesi	15
Şekil 2.3	Yorulma Kopması Yüzeyi	16
Şekil 2.4	Yorulmayı Etkileyen Faktörler	17
Şekil 2.5	Yükleme Durumu Tipleri	23
Şekil 2.6	Zaman Göre Statik Gerilme	23
Şekil 2.7	Wöhler Diyagram Modelleri	25
Şekil 2.8	Ortalama Gerilme	26
Şekil 2.9	Wöhler Eğrileri	28
Şekil 2.10a	Eksenel Gerilmeli Yorulma Cihazı	32
Şekil 2.10b	Eksenel Gerilmeli Yorulma Cihazı Şematik	32
Şekil 2.11	Schenk Tipi Yorulma Cihazı	34
Şekil 2.12	Moore Tipi Yorulma	34
Şekil 2.13a	Ankastre giriş türü	35
Şekil 2.13b	Sabit eğme momentli	35
Şekil 2.14	Burma Gerilmeli Yorulma Cihazı	35
Şekil 2.15	Sürtünme Karıştırma Kaynak Mekanizması	39
Şekil 2.16a	Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulama Şekli	39
Şekil 2.16b	Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulama Şekli	40
Şekil 2.17	Sürtünme Karıştırma Kaynak Bölgesi	41
Şekil 2.18	Kaynak Bölgesinin Metalürjik Yapısı	42
Şekil 2.19	Malzeme Kalınlığı	45
Şekil 2.20	Bayer Prosesinde Al Üretimi	62
Şekil 2.21	Alüminadan Alüminyum Üretimi	63
Şekil 2.22	Yorulma Test Cihazı Şematik Gösterimi	74
Şekil 2.23	Yorulma Test Cihazı	75
Şekil 2.24	Mil – Yatak Bağlantıları	76
Şekil 2.25	Genlik Kontrol Mekanizması	76
Şekil 2.26	Numune Bağlama Aparatları	77
Şekil 2.27	Kontrol Paneli	78

Şekil 2.28	Çevrim Sayacı	78
Şekil 2.29	Algıyacıklar	79
Şekil 2.30	Pano	79
Şekil 2.31	Freze Tezgahı	85
Şekil 2.32	Takım Geometrisi	86
Şekil 2.33	Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulaması	87
Şekil 2.34	Takımın İlerlemesi	88
Şekil 2.35	Kaynaklı Birleştirilmeler	88
Şekil 2.36	Kaynak Dikişi	89
Şekil 3.1	Numunelerin Wöhler Eğrileri	94
Şekil 3.2	2140 dev/dak'ya göre İlerleme Değişimi Sonucundaki Davranışları	95
Şekil 3.3	1520 dev/dak'ya göre İlerleme Değişimi Sonucundaki Davranışları	96
Şekil 3.4	1070 dev/dak'ya göre İlerleme Değişimi Sonucundaki Davranışları	97
Şekil 3.5	Parametre Değişimine Bağlı Olarak Yorulma Değerleri	98
Şekil 3.6	Kaynak Merkezi görünümü	99
Şekil 3.7	Kaynak Merkezi Termo-Mekanik (İ.A.) X100	100
Şekil 3.8	Termo-Mekanik Etkilenmiş Alan X100	100
Şekil 3.9	Isıdan Etkilenmiş Alan X100	101
Şekil 3.10	2014 Serisi Alüminyum Mikro yapısı X100	101
Şekil 3.11	Kaynak Merkezi Termo-Mekanik (Ç.A.) X100	101
Şekil 3.12	112 mm/dak İlerleme Hızlarında Kaynak Merkezi Mikro yapısı	102
Şekil 3.13	80 mm/dak İlerleme Hızlarında Kaynak Merkezi Mikro yapısı	102
Şekil 3.14	40 mm/dak İlerleme Hızlarında Kaynak Merkezi Mikroyapısı	103
Şekil 3.15	1520/112 Nolu Numunenin Kaynak Yapısı	103
Şekil 3.16	Yorulma Kopması	104
Şekil 3.17	Kaynak Dikişinde Kopma	104
Şekil 3.19	2140/112 Nolu numune için kırılma yüzeyi (X60)	105
Şekil 3.20	2140/112 Nolu numune için kırılma yüzeyi (X400)	106
Şekil 3.21	2140/112 Nolu numune için kırılma yüzeyi (X1000)	106
Şekil 3.22	2140/112 Nolu numune için kırılma yüzeyi (X2500)	107
Şekil 3.23	2140/112 Nolu numune için kırılma yüzeyi (X5000)	107
Şekil 3.24	Kırılma Yüzeyleri (X60)	108
Şekil 3.25	Kırılma Yüzeyleri (X400)	109

Şekil 3.26	Kırılma Yüzeyleri (X1000)	109
Şekil 3.27	Kırılma Yüzeyleri (X2500)	110
Şekil 3.28	Kırılma Yüzeyleri (X5000)	110

**SİMGELER LİSTESİ**

<b><u>Simge</u></b>	<b><u>Adı</u></b>	<b><u>Birimi</u></b>
S	Eğilme gerilmesi	MPa
N	Tekrar sayısı	(-)
a	Ferrit	(-)
Y	Ostenit	(-)
R	Gerilim oranı	(-)
TEM	Transmission Elektron Mikroskobu	(-)
FEM	Finite Element Model	(-)
R <sub>d</sub>	Şekil değiştirme oranı	(-)
Matched™	Sayısal program paketi	(-)
SAMCEF™	Ticari sonlu elemanlar paket programı	(-)
ALCAO	Aluminum Company of America	(-)
ANSI	American National Standards Institute	(-)
G <sub>m</sub>	Toplam gerilme	MPa
G <sub>or</sub>	Ortalama gerilme	MPa
G <sub>a</sub>	Değişken gerilme genliği	MPa
da/dN	Çatlak ilerleme hızı	m/devir
K	Gerilim şiddeti faktörü	MN / m <sup>3/2</sup>
C	Deneysel sabitler	(-)
M	Deneysel sabitler	(-)
da	Çatlak boyu	m
dN	Belirli bir gerilim altında malzeme kırılıncaya kadar geçen süre içerisindeki tekrar sayısı	Çevrim Sayısı
JJ	Gerilme dağılımı	MPa
<3a	Gerilme genliği	MPa
J	Ortalama gerilme	MPa
n	Deney sayısı	(-)
$\sigma_i$	Sıralamadaki her bir gerilme değeri	MPa
d	Standart sapma	(-)
r	Katsayıların dağılım oranıdır	(-)
$F_f(x)$	Hasar olasılığı	(-)
$F_s(x)$	Hasarsız ömrünü sürdürme olasılığıdır	(-)
a	Şekil parametresi ( boyutsuz ) ve Weibull doğrusunun eğimidir	(-)
P	Weibull doğrusunun x eksenini kestiği noktada bulunan yerleşim parametresidir veya ömür dağılımındaki ölçüm parametresidir	(-)
P	Sıra ortalaması	(-)

$\dot{I}$	Hasar sıra numarası	(-)
n	Her testteki numunelerin toplam sayısı	(-)
TS - EN	Türk Standartları Enstitüsü	(-)
ASTM	Amerikan Standartları Enstitüsü	(-)
$J_{tu}$	Maksimum çekme mukavemeti	MPa
Fmax	Maksimum kuvvet	N
A	Kesit alanı	mm <sup>2</sup>
$J_{ty}$	Akma mukavemeti	MPa
$J_e$	Maksimum eğilme gerilmesi	MPa
F <sub>e</sub>	Maksimum eğme yükü	N
L	Destek mesafesi	mm
B	Numune genişliği	mm
H	Numune kalınlığı	mm
l	Moment kolu	mm
f	Genlik	mm
E	Elastikiyet modülü	daN/cm <sup>2</sup>
I	Atalet momenti	cm <sup>4</sup>

## GİRİŞ

Günden güne büyüyen kişisel ihtiyaçlara paralel olarak endüstrinin de yeni proseslere, tasarımlara, imal usullerine ve malzemelere gereksinimi artmaktadır. Günümüzde hız emniyet ve ekonomiklik üçgeninin imalat üzerinde yaratmış olduğu rekabet kavramı endüstrideki müteşebbislerin dikkatini yeniliklere yoğunlaştırmasına neden olmuştur. Bu noktada yeni malzemeler maddesi içerisinde değerlendirilebilecek alaşımli alüminyumlar da önemli bir köşeyi şimdiden yerleşmiştir. Yüzyıllar boyunca doğadan elde edilmesinin zor oluşu sebebiyle ancak 20. yy başında endüstriyel açıdan kullanıma olanak bulmuştur. Bu sebeple çokta uzun bir tarihe sahip olmayan saf alüminyum için bile durum böyle iken alaşımli alüminyum tipleri için ise daha yolun başında olduğunun söylenmesi garip sayılmaz. Saf alüminyumun göre malzemelere karşı ciddi avantajlara sahip olduğu yoğunluk, sıvama ve korozyon gibi birçok özellik dışında saf alüminyum malzemenin çeşitli metalürjik oluşumlar ile yeni alaşımli düzenlemelerinin yapılması ile Otomotiv, Hava taşımacılığı ve hatta Uzay endüstrisi gibi dünya ekonomisinin lokomotifi sayılan iş kollarında birçok problemi çözmüş ve çözmektedir.

Endüstride çeşitli elemanlar olarak kullanımı sırasında Alüminyum ve alaşımlarında kaynaklı bağlantılara da ihtiyaç duymaktadır. Alüminyum ve alaşımları, parçaların birlikte eritildiği ya da sıkıştırıldığı işlemleriyle birleştirilir.

Genelde yöntem, çelik kaynağında kullanılan yöntemle benzer; ancak, alüminyumun özellikleri nedeniyle ortaya çıkan bazı farklar vardır.

Alüminyumun üzerinde sert, dayanıklı ve erime noktası yüksek bir oksit tabakası bulunur. Bu, korozyona ve başka dış etkilere karşı iyi bir koruyucudur. Ancak, alüminyum kaynağının tutması için, önce, bu tabakanın kaldırılması gerekir. Bu ve benzeri sıkıntılar göze alındığında gene endüstrinin yeni yeni karşılaştığı bir kaynak yöntem olan Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi piyasada daha fazla karşılaşılan adı ile friksiyon kaynağı öne çıkıyor. Geleneksel ergitmeli kaynak yöntemleriyle kaynağı güç olan özellikle yaşlanma sertleştirilmesine tabi tutulmuş alüminyum alaşımlarının

kaynağında başarıyla kullanılmıştır. Bir katı hal birleştirme işlemi olan sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak konstrüksiyonu güç olan malzemelerin birleştirme işlemleri için kısa kaynak süresi, minimum yüzey hazırlama ve otomasyon kolaylığı gibi kendine özgü avantajlarından dolayı uygun bir alternatif kaynak yöntemidir (ÇAM 2003a).

Tabii kaynak yöntemlerinin gelişimi ile ciddi noktalara kadar gelmesine karşın hala çeşitli parametrelerin sağlanamaması sebebiyle kaynak emniyetinde aksaklıklar gözlenmektedir. Üzerine gelen çeşitli zorlamalara dayanamayan kaynak aksaklıkları sebebiyle ciddi sıkıntılar oluşabiliyor. Endüstride genel olarak plastik şekil verme şartları göz önünde bulunarak yapılan güvenlik testlerine karşın asıl ciddi sıkıntılar çıkaran ve neredeyse karşılaşılan aksaklıkların % 80 inin sebebi olan elastik sınırlar içinde yapılan zorlamaları içine alan yorulma olayı emniyet anlamındaki incelemelerde göz ardı edilmektedir. En azından yakın tarihlerde bu durum bir nebze olsun değişmiş ve değişmektedir. Münferit olaylar, şikâyetler ve diğer durumların farkında olan sektör yöneticileri bu konu ile ilgili çeşitli mesailer harcamaktadır.

Yorulma olayı az önce bahsettiğimiz gibi klasik ve basit bir tanımla belirli bir frekansta malzeme için elastik sayılabilecek bir gerilmede zorlanması ve bu zorlama sonucunda çekme limitinin çok altında bir değerde kopma olayının gerçekleşmesidir. Bu durumu gidermek tamamı ile mümkün değildir. Fakat yapılabilecek ön çalışma ve araştırmalar ile bu sınırlar belirlenebilir ve bu durum ile ilgili sorunlar daha oluşmadan önce rahatlıkla giderilebilir. Bu konu ile ilgili farklı zorlama tipleri ve uygulama yönleri dikkate alarak çeşitli kontrollere sahip yorulma analizi imkânı veren cihaz tasarımlarına gidilmiştir. Eğilme gerilmelerine zorlanan teçhizat ve elemanların yorulma verilerinin elde edilmesini sağlayan sistemler ile yorulma üzerine daha sıklıkla çalışmalar ile karşılaşmak mümkündür.

Bu tip gerilmeleri inceleme imkânı bulduğumuz iki tipte yorulma cihazı piyasada daha çok kullanılmaktadır. Eksenel ve dönele yönde kuvvetin uygulanmasına göre ayrılmaktadırlar.

İncelemelerimiz sonucun alaşımli alüminyum; sürtünme karıştırma kaynağı ve eksenel eğilme konularını bir pota da eritme suretiyle bir tez çalışması yapmaya karar



verildi. Bunun için 2014 serisi bakır alaşımına sahip alaşımlı alüminyum seçildi. Literatür çalışmaları sonrasında çökelme sertleşmesine uğrayabilen 2014 H0 tercih edildi. Sürtünme karıştırma kaynağı ile çeşitli parametreler ışığı ile birleştirilecek olan 2014 HO alüminyum alaşımı imalatını gerçekleştirilen ankastre tipte aksel eğilme uygulamasına imkân veren deney test cihazı ile belirli şartlarda yorulma davranışı incelendi. Elde edilen değerler ile Wöhler eğrileri oluşturuldu ve sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş olunan 2014 HO alüminyum alaşımının yorulma davranışı analiz edildi.

## 1. KAYNAK ÖZETLERİ

Değişken gerilmelere maruz moment aktaran hareketli parçaların buharlı makinelerin gelişmesi ile birlikte yaygın olarak kullanılması, tekrarlı değişken yüklere maruz kalan bu parçalarda hasarların ortaya çıkmasını kaçınılmaz kılmıştır.

Bu sebeple yorulma hasarını önlemeye yönelik çalışmalar yapılmış ve halende yapılmaya devam etmektedir. Yorulma hasarını önlemek veya yorulma ömrünü artırmak için uygulanmakta olan değişik önlemler mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları malzemenin içyapısında değişiklik meydana getirecek ısı işlemlerden, normalizasyon, yüzey sertleştirme, komple sertleştirme ve ostemperleme gibi işlemlerdir. Diğer yöntemler ise malzeme yüzeyinde kalıcı deformasyon gerilmesi oluşturacak olan bilyeli dövme ve yüzey ezme işlemleridir.

Yorulma hasarını önleme veya yorulma ömrünü artırma yöntemini belirlerken kırılma mekaniğinin çok iyi bilinmesi olayın çözümüne büyük katkı yapacaktır. Bu nedenle yorulma olayını kendi içinde geniş bir incelemeye tabi tutarak olayın gelişimini safha safha incelemek gerekir (DEĞER 1995).

D. E. Berg ve P. C. Klimas, düşey eksenli rüzgar türbini kanatlarının yapımında kullanılan, kimyasal kompozisyonu; 0.4 % Si, 0.7 % Mg olan 6063 alüminyum alaşımının yorulma karakteristiğini incelemiştir. Yorulma analizi için iki çeşit parametre ölçülmüştür. (1) Gerilim değerine karşı kırılma için gerekli titreşim sayısı (S-N). (2) Yorulma çatlak ilerleme oranı (da / dN) (mm / cycle). Yorulma çatlak ilerleme oranı (da / dN) ; 0.09, 0.3, 0.5 yük oranlarında (R) ölçülmüştür. Düzlemsel eğme yorulması testleri, 6063 alüminyum alaşımından elde edilmiş yüz adet kanat numunesi üzerinde uygulanmıştır. Deney sonuçları Goodman diyagramı çizilerek yorumlanmıştır. Sonuç olarak S -N diyagramlarına bakıldığında; yüksek gerilme değerlerinde numunelerin yorulma ömrünün kısaldığı, düşük gerilme değerlerinde ise kırılma için gerekli titreşim sayısı (N)'in arttığı tespit edilmiştir. Kırılan yüzeyler scanning elektron mikroskopunda incelenmiş; çatlakların öncelikli olarak tane sınırlarında oluştuğu, taneler arası bölgelerde ise kırılan yüzeylerin çoğunlukta olduğu tespit edilmiştir.

Malzemelere yapılan ekstrüzyon uygulamalarının, mikro yapıdaki iri tanelerin ve tane sınırı özelliklerinin taneler arası kırılmayı tetiklediği saptanmıştır (BERG 1989) .

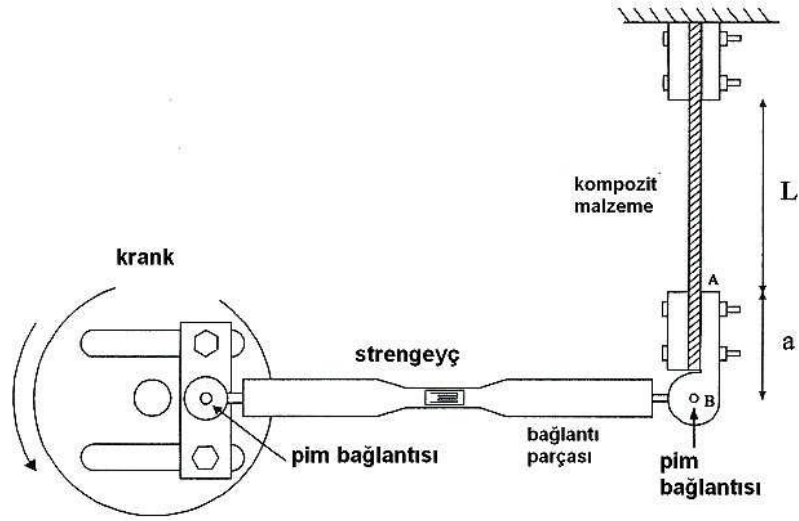
K. M. Gruenberg, B. A. Craig, B. M. Hillbery, R. J. Bucci ve A. J. Hinkle, 2024 T3 alüminyum alaşımlarının, kırılma yükü testlerinden elde edilen sonuçlara göre malzemelerin aşınmadan önceki yorulma ömürlerinin tahmini üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu araştırmanın amacı yorulma ömrü üzerinde korozyonun etkisini ölçmek için kolay ve pratik bir yöntem geliştirmektir. Bu çalışma için, üç farklı grupta üretilmiş 2024 T 3 alüminyum alaşımının kırılma yükü numuneleri üç aşamada korozyona maruz bırakılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla bütün kırılma yükü testleri tek eksenli, genişim ölçer bağlanmış test makinesinde, 15 test korozyonlu numuneler, 6 test korozyonsuz numuneler için gerçekleştirilmiştir.

Her bir test durumu için 5 adet numune denenmiştir. Korozyona maruz bırakılmış numunelerin kırılma yükü sonuçları ve yorulma ömrü sonuçları arasında, çatlak boyu değişiminin etkisi ile bir bağıntı geliştirilerek ömür tahmini çalışması yapılmıştır. Geliştirilen ömür tahmini tekniği ile elde edilen sonuçların deneysel çalışmalarla elde edilen ömür süresinden ortalama % 20 daha kısa olduğu gözlenmiştir. Bu araştırma sayesinde geliştirilen ömür tahmini metodu, hava araçlarının dizaynı için kullanılacak malzemenin ölçümü, üreticiler için farklı alaşımların ölçümü ya da hava araçlarının bakım zaman aralıkları için çok önemli bir yöntem olduğu değerlendirilmiştir (GRUENBERG 2004).

W. V. Paepegem ve J. Degrieck, fiber takviyeli kompozit malzemelerin yorulma dayanımları üzerine çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışma esnasında çalışmanın amacına uygun düzlemsel eğme gerilmeli yorulma test makinesi tasarlanmıştır. Deneysel çalışma esnasında kullanılan motorun devir sayısı 185 d/dak dır. Güç, V kayışıyla ikinci bir kasnağa iletilmiştir. Bu esnada kullanılan frekans 2.23 Hz dir. Bu deneysel çalışmada genlik değiştirilebilen bir parametredir. Bu mekanizma ile sıfırdan maksimuma doğru, tek yönde veya her iki yönde eğme gerçekleştirilebilmektedir.

Burada şekil değiştirme oranı(  $R_d$  ),  $R_d = U_{min}/U_{max}$  olarak tanımlanmakta ve tek yönde yükleme yapıldığı için  $U_{max} = 32.3 \text{ mm}$  ,  $U_{min} = 0$  ve dolayısıyla  $R_d = 0$

olmaktadır. Eğilme yorulması için Şekil 1.1 gösterilen test düzeneği kullanılmıştır. Daha sonra, hem sayısal bir program paketi ( Matched™) hem de ticari bir sonlu elemanlar paket programı( SAMCEF™) kullanılarak elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Sonuçta bu çalışmadaki deneysel veriler ve bahsedilen yazılımlardan elde edilen sonuçlar, birçok kompozit yapının yorulma hasarlarını modellemeyi ve geriye kalan rijitliklerini tahmin etmeyi sağlamaktadır (PAEPEGEM ve DEGRİECK 2001).



Şekil 1.1 Yorulma Deney Cihazı Şematik Gösterimi (PAEPEGEM ve DEGRİECK 2001)

T. S. Srivatsan , D. Kolar ve P. Magnusen , kimyasal kompozisyonu; 0.036 % Si , 0.0825 % Fe , 4.315 % Cu , 0.578 % Mn , 1.395 % Mg , 0.008 % Zn olan 2524 –T351 alüminyum alaşımının titreşim yorulmasını ve kırılma davranışını incelemişlerdir. Alüminyum test numuneleri hadde yönünde ve hadde yönüne dik kesilerek hazırlanmış plakalar şeklindedir.

Her iki grup test numunesi hem çekme testine hemde yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Kırılma için bütün mekaniki testler 100kN'luk yükleme ünitesi ile donatılmış, tam otomatik servo-hidrolik test makinesi ile yapılmıştır. Çekme testleri laboratuvar ortamında; çevre sıcaklığında 27C°'de, kriyojenik sıcaklıkta -54C°'de ve artan sıcaklıkta 94C°'de gerçekleştirilmiştir. Ayarlanabilir gerilme genlikli yüksek titreşimli yorulma restleri; çevre sıcaklığında 27C°'de, kriyojenik sıcaklıkta -54C° 'de ve artan

sıcaklıkta 94C'de , gerilim oranı(  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  ) 0.1' de gerçekleştirilmiştir. Yorulan numunelerin kırılma yüzeyleri, scanning elektron mikroskobunda baskın olan makro kırılma modunu belirlemek ve kırılma yüzeyi üzerindeki değişiklikleri belirlemek için incelenmiştir. Çekme testleri incelendiğinde; test sıcaklığındaki artışın hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin akma dayanımı üzerinde herhangi bir etki meydana getirmezken, hadde yönünde kesilmiş numunelerin akma dayanımı üzerinde marjinal bir azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Hadde yönünde kesilmiş numunelerin akma dayanımındaki maksimum azalma %9 olarak ölçülmüştür. Test sıcaklığındaki artışın hem hadde yönünde hem de hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin maksimum çekme dayanımını azalttığı tespit edilmiştir. Yorulma testleri incelendiğinde; gerilme genliğindeki azalmaların hem hadde yönünde hem de hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin yorulma ömürlerini artırdığı gözlemlenmiştir. Sıcaklık artışının hem hadde yönünde hem de hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin yorulma ömürlerini azalttığı tespit edilmiştir (SRİVATSAN 2002).

Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi iki malzemenin birbirine bir karıştırıcı uç vasıtasıyla birleştirme işlemidir. Alüminyum alaşımların birleştirilmesinde kullanılan ve uygulama alanı giderek yaygınlaşan bir metottur. Sürtünme karıştırma kaynağı farklı alaşımların birleştirilmesinde ve ürün kaynağında üstün metalürjik özellik ve dayanıklılık göstermektedir. Birçok uzay uygulamasında sürtünme ve sürtünme karıştırma kaynak yöntemi kullanılarak diğer birleştirme elemanları ortadan kalkabilir. Sürtünme karıştırma kaynağı sayesinde ucuz bileşimli malzemeler tasarlanabilir ve önemli maliyet azalmaları olabilir.

Cederqvist ve Reynolds, alüminyum malzemelerin, bindirme bağlantılarının sürtünme karıştırma kaynağını etkileyen faktörlerini incelemiştir. Sürtünme kaynağı katı hal birleştirme işlemi olup, bindirme kaynağında kullanılmak üzere sürtünme kaynağının geliştirilmesi tekniğinden faydalanmak ve yeni uygulamalar bulunmasına imkân sağlamak için çalışma yapmışlardır. Sürtünme karıştırma kaynağı ve bindirme kaynakları üzerinde kesişim morfolojisi ve mekanik özelliklerinin de dâhil edildiği bir araştırma yapmışlardır. İki malzeme Al2024 T3 ve Al7075 T6 olarak havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan malzemeleri birleştirmişlerdir. Kaynak parametrelerine

kaynak hızı, dönme hızı, kısmi öneme sahip takım ölçüleri dâhil edilmiştir. Metalografik kesitlerin değerlendirilmesi ve kopma noktaları incelemesini yapmışlardır. Yapılan çalışma ile tüm kaynaklarda kritik ara safha yüzlerinin mevcut olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte bu ara yüzlerin giderilmesi için ikinci bir kaynak pasosu eklenerek giderildiği sonucuna varmışlardır. Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan bindirme kaynağının, mukavemet olarak diğer kaynakların (punta ve perçin kaynağı) yerini ileride alabileceği bu çalışma ile ortaya konmuştur (CEDERQVIST ve REYNODLS 2002).

1990' lı yılların başında geliştirilen ve bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) (friction stir welding), geleneksel ergitme kaynak işlemleriyle kaynağı güç olan veya mümkün olmayan özellikle yaslandırma sertleştirmesine tabi tutulmuş Al-alaşımlarının kaynağında başarıyla kullanılabilir (ATAOĞLU, MISTIKOĞLU ve ÇAM 2003).

Kaynak kabiliyeti, bir malzemenin yaygın olarak kullanılmasını etkileyen önemli özelliklerden biridir. Bir malzemenin kaynak konstrüksiyonuna uygun olması diğer bir deyişle bir malzemenin kaynak işleminin kolaylıkla ve ekonomik olarak yapılabilir olması o malzemenin yaygın olarak kullanılabilmesini sağlar. Bazı istisnaları hariç (7075 alaşımı gibi), ticari olarak ark kaynağı gibi ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilebilse de, Al alaşımları kaynak edilmesi güç malzemelerdir.

Ergitme kaynak yöntemleri (ark, lazer ve elektron kaynağı) ve bir basınç kaynağı türü olan difüzyon kaynağı gibi bilinen kaynak yöntemleri ile Al alaşımlarının kaynaklarında çeşitli sorunlar bulunmaktadır. Bu sorunlar arasında, vakum ortamında yapılan elektron kaynağı hariç tüm diğer ergitme kaynaklarında porozite (gaz boşluğu) oluşumu, kaynak dikişi ve ısı etkili bölgede (IEB) çatlak oluşumu ve mukavemet düşüşü sayılabilir. Ticari olarak Ti alaşımlarına başarıyla uygulanan katı hal kaynak yöntemlerinden difüzyon kaynağı da yüzeylerindeki kararlı oksit tabakasından dolayı Al alaşımlarına ekonomik olarak uygulanamamaktadır. (ÇAM 2002).

Ergitme kaynak yöntemleri ile Al alaşımlarının (özellikle yaslandırma sertleştirilmesi yapılmış olan Al alaşımlarının) kaynağında aşırı derecede çatlak ve porozite oluşumu gibi problemler mevcuttur. Bu problemlerden çatlak oluşumunun nedeni, Al alaşımlarının katılma sıcaklık aralıklarının geniş olması ve ısıl genleşme katsayılarının yüksek olmasıdır. Ark kaynağındaki yüksek ısı girdisi, bu malzemelerin ısıl genleşmelerinin yüksek olması ve katılma sıcaklık aralıklarının geniş olması sonucu, özellikle çatlama daha duyarlı yaslandırma sertleştirilmesi yapılmış Al alaşımlarında kaynak dikişinde çatlak oluşumuna neden olur. Ayrıca, ark kaynağındaki yüksek ısı girdisi, özellikle yüksek mukavemetli Al alaşımlarında IEB' de tane sınırlarında düşük ergitme sıcaklıklı fazların oluşumuna ve dolayısıyla bu bölgede tane sınırlarında katılma esnasında çatlama yol açabilir. İkinci problem olan kaynak dikişinde porozite oluşumunun nedeni ise; alüminyumun sıvı halde hidrojen çözünürlüğünün katı haldekenden çok daha yüksek olmasıdır. Vakum ortamında yapılan elektron huzmesi kaynağı yöntemi porozite açısından en avantajlı ergitme (sıvı hal) kaynak yöntemidir. Fakat yüksek sıcaklıkların söz konusu olduğu elektron kaynağında, vakum ortamında yapıldığı için düşük buharlaşma sıcaklığına sahip alaşım elementleri içeren Al-alaşımlarında kaynak dikişinde alaşım elementi kaybı, dolayısıyla mukavemet düşüşü söz konusu olabilmektedir (ATAOĞLU, MISTIKOĞLU ve ÇAM 2003).

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde, maliyet arttırıcı bir faktör olan elektrot ve koruyucu gaz kullanımı söz konusu değildir. İş kazalarına yol açabilecek ark oluşumu, radyasyon, toksik gaz çıkışı veya insan gözüne zararlı lazer ısını gibi olumsuz durumlar bu yöntemde mevcut olmadığı için temiz ve çevreci bir prosestir. Ayrıca, toplam ısı girdisinin düşük olduğu bir katı hal kaynak yöntemi olduğundan ergitme kaynaklarında karşılaşılan çatlak ve porozite oluşumu söz konusu değildir. Al alaşımlarının tüm kaynak yöntemlerinde karşılaşılan kaynak bölgesindeki mukavemet kaybı bu yöntemde düşük ısı girdisinden dolayı daha düşük seviyededir (ÇAM 2003).

## 2. MATERYEL VE YÖNTEM

### 2.1. YORULMA OLAYI

Buharlı makinelerin geliştirilmesi, mekanik çalışan ve hareketli parça sayısı fazla olan araçların yaygın bir şekilde, taşımacılık dâhil, çoğu yerde kullanılmaya başlanmasıyla tekrarlı değişen yüklere maruz kalan parçalarda hasarların ortaya çıkması genel bir hadise şeklini almıştır (FROST, MARSH VE POOK, 1974).

Uçak, gaz türbini motorları gibi çoğu yük taşıyan sistemler, genellikle zor çalışma koşulları altındadırlar. Bu yapı tipi dayanıklılık, yüksek güvenilirlik, düşük ağırlık ve yüksek performans gerektirir (HERMAN SHEN 1999).

Hareketli parçaların, içten ve dıştan yanmalı motorların gelişimi ile birlikte yaygın olarak kullanılması tekrarlı, sabit ve değişken yüklere maruz kalması sonucu kalıcı hasarlara uğradığı bir gerçektir

Metal malzemelerde de yorulma hâdisesi kaçınılmazdır. Ancak metal malzemelerde meydana gelen yorulma tam geri dönüşlü değildir. Yorulmaya başlamış bir metali, gerekli tedbir alınmaksızın, ne kadar süre çalışmadan bekletirseniz bekletiniz (dinlendiriniz), çok az miktarda kendini toplama hâli hariç tekrar çalışmaya başladığı andan itibaren yorulma kaldığı yerden devam edecektir.

Uygulamada tekrar eden veya çevrimli yüklere maruz kalan parçalar, tek bir statik gerilme uygulaması halinde dayanabilecekleri gerilmenin çok daha altındaki bir gerilemede koparlar. Tekrar eden veya çevrimli gerilme altında meydana gelen bu kopmalara veya hasarlara yorulma kopması adı verilir. Miller, bağlantı çubukları ve dişli gibi hareketli parçalarında karşılaşılan durumlar buna örnek gösterilebilir. Makinelerdeki hasarların yaklaşık %80 nin bu konudan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Yorulma kırılması gevrek türde olduğundan nerede ve ne zaman olacağını önceden kestirmek zordur. Yorulma kopmaları, yapı parçası içerisindeki hesaplanan gerilmeler elastik bölgede (Hooke Eğrisi) bulunmasına rağmen, meydana gelir.

Ancak bu olay genellikle düzensiz bir gerilme dağılımı söz konusu olduğu durumlarda ortaya çıkar(WEISSBACH 1998).

Yorulma ASTM'E de şu şekilde kabul görülmüş bir tarifile anlatılmıştır. Bazı nokta veya noktalardaki tekrarlı gerilme veya uzama şartlarına maruz malzemelerde görülen, yeterli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine veya tamamen kırılmaya sebep olan sınırlandırılmış sürekli gelişen kalıcı yapı değişikliği olayıdır (DEĞER 1995).

- Buradan Yorulmanın Şartlarını;
- Olayın sürekli gelişmesi,
- Lokalize olması,
- Çatlakların büyümesi
- Sonuçta kırığın ortaya çıkması şeklinde belirleyebiliriz.

### 2.1.1. Yorulma Nicelikleri

Yorulmayı tam anlayabilmek adına birkaç nicelikten ve bunların yaratmış olduğu farklılıktan da bahsetmekte fayda vardır.

**Değişken zorlama;** yükün veya gerilmenin zamana göre yönünü ve değerini değiştirdiği zorlamalardır. Değişken zorlamada malzemenin iç bünyesinde meydana gelen değişiklikler, N ile simgelenen yük değişme sayısına bağlıdır. Bu bakımdan alçak ve yüksek yük değişme sayılarına tekabül etmek üzere değişken zorlamalar iki bölgeye ayrılır. Kesin bir değer olmamakla beraber  $N \leq 10^4$  olduğu bölge alçak yük değişme sayılarını (Low Cycle),  $N > 10^4$  olduğu bölge yüksek yük değişme sayılarını (High Cycle) kapsar. Alçak yük değişme sayısında meydana gelen kopma, statik kopma gibidir. Dolayısıyla, yukarıda bahsedilen ve statik kopmadan tamamen farklı olan yorulma, yüksek yük değişme sayılarının etkisi altında meydana gelen olaydır.

**Darbeli zorlama;** yükün ani olarak tatbik edildiği zorlamadır. Her iki zorlamada da malzemenin iç bünyesinde meydana gelen ve kopmasına yol açan değişiklikler farklıdır.

**Statik zorlama;** teorik olarak tek değişkenli olup mukavemet değeri yalnızca yüke bağlıdır.

**Yorulma mukavemeti;** teorik olarak yük ve yük tekrar sayısına bağlıdır. Malzemenin kırılmadan sonsuza kadar dayanabildiği, belli bir orta gerilme etrafında değişen en büyük gerilme genliğidir. Belirli bir N yük değişme sayısında, kopma olmaması şartı ile elemana tatbik edilen maksimum gerilme genliğidir.

**Eleman Ömrü;** değişken zorlamaya maruz kalan elemanın kopuncaya kadar geçen zamandır. Ömür, yorulma olayında yük değişme sayısı N ile ifade edilir.

**Sürekli mukavemet sınırı;** Çok büyük, pratik bakımdan sonsuz olarak kabul edilen  $N_0$  yük değişme sayısında kopma olmaksızın elemana uygulanan maksimum gerilme genliğidir. Çeliklerde  $N_0=10^6$  ila  $10^8$  değerleri arasında değişir. Pratik bakımdan bir görüş birliği sağlamak amacı ile  $N_0$  değerinin  $10^7$  olarak alınması tavsiye edilmektedir (AKKURT 1977).

### 2.1.2. Yorulma Olayının Tarihsel Gelişimi

Mühendisleri endişeye sevk eden bu durum, ilk defa 1830 yılında W.A.Albert tarafından denenmiştir. Ancak tekrarlı değişen gerilmelerden kaynaklanan ilk büyük hasar 1840'lı yıllarda demiryolu endüstrisinde görülmüştür. Demiryolu vagonları akslarında kesit değişikliğinin olduğu kısımlarda kırılmaların çok fazla olduğu dikkati çekmiştir (FROST, MARSH ve POOK, 1974).

Kırılmanın görüldüğü parçaların görevlerini belirli bir süre yerine getirdiği düşünülerek, tekrarlı olarak uygulanan yüklere karşı malzemenin dayanım gücünün azaldığı ve bunun sonucu olarak da yorulduğu fikri ilk defa 1840 ve 1850 'li yıllarda ortaya atılmıştır.

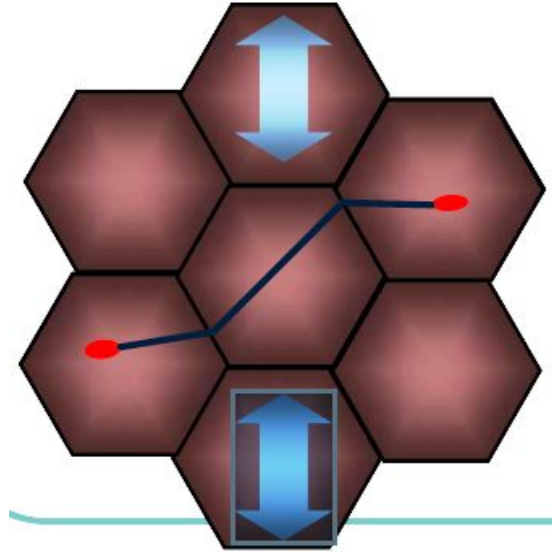
Yorulma ile ilgili ilk sistematik çalışmalar Almanya’da 1850–1860 yılları arasında “Agust Wöhler” tarafından yapılmıştır. Demir yolu vagonlarının aksları üzerinde yapılan bu sistematik çalışmalarda Wöhler, kendi geliştirdiği yorulma deneyi cihazını kullanmıştır. Metal malzemeler üzerinde yapılan deneylerde, uygulanan yüklerin büyüklüğü üzerinde durulmuştur. Deney sonuçlarından yararlanılarak yorulma olayında uygulanan maksimum gerilmeden ziyade gerilme aralığının önemli olduğu sonucuna varılmıştır. İlk defa Wöhler tarafından gerilme – çevrim sayısı (S-N) diyagramları kullanılarak belirli bir gerilme değerinin altındaki değerlerde numunelerin kırılmadığı gösterilmiştir (MOORE ve KOMMERS 1972).

1850 ve 1865 yılları arasında “Hodgkinson ve Fairbairn” tarafından kiriş sistemleri üzerinde tekrarlı eğme deneyleri yapılmıştır. Statik yükleme durumunda 120 KN altında kırılma meydana gelirken, tekrarlı yükleme halinde 30 KN ‘luk yük kırılmaya yeterli olmuştur. 1870 ve 1890 ‘lı yıllarda yapılan Wöhlerin klasik çalışmaları genişletilerek değişik araştırmacılar tarafından sürdürülmüştür. 1900 ‘lü yıllarda yorulma mekanizmasının anlaşılmasında optik mikroskop kullanılmıştır. Mikro çatlakların meydana gelmesinden lokalize kayma doğrultuları ve kayma bantlarının önemli olduğu gözlenmiştir (FUCHS ve STEPHENS 1980).

### **2.1.3 Yorulma Mekanizması**

#### **2.1.3.1 Yorulma Mekanizmasının Atomik Yapısı**

Yorulma olayının gelişimini malzeme yapısında değişiklikler bazında inceleyecek olur isek; Öncelikli olarak değişken gerilmenin dislokasyon hareketlerine neden olduğunu görürüz. Bu durum tane içinde bir kayma bandı gelişimine neden olacaktır. Bu kayma bandı tane sınırlarında bir çatlak meydana getirecektir. Şekil 2.1 de Şematik olarak bir gösterim bulunmaktadır. Yorulma limitinin üzerinde de bu durum çatlak kırığı tane sınırlarında ve içerisinde büyümeye devam etmesine yorulma kopması olarak nitelendirilen kopmanın gerçekleşmesine neden olacaktır (WILLIAM 2002).



Şekil 2.1 Yorulma Tane Sınırları (WILLIAM 2002)

### 2.1.3.2 Yorulma Mekanizmasının Fiziksel Yapısı

Fiziksel olarak yorulma mekanizmasını değerlendirdiğimizde yorulma olayını 4 evrede toplamak mümkündür.

- Çatlak Başlaması
- Kayma Kuşağı Çatlağı Büyümesi
- Yüksek Çekme Gerilmeli Düzlemler Üzerinde Çatlak Büyümesi
- Yorulma Kırılması

**Çatlak Başlaması;** Genellikle yüksek gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerde veya kristal yapıdaki hatalı noktalardan çatlak başlar. Yorulma hasarının başlamasını gösteren evredir. Genellikle yüksek gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerde veya kristal yapıdaki hatalı noktalardan çatlak oluşumu başlangıç gösterir.

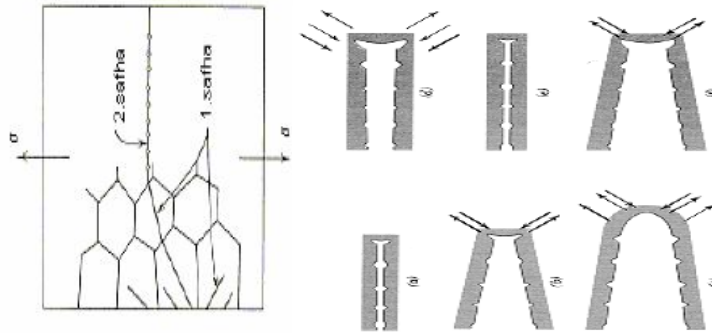
Yüzeydeki herhangi bir tasarım veya üretim hatası gerilmeleri yoğunlaştırır ve yorulma çatlaklarının oluşmasını kolaylaştırır. Çatlak başlamasının nedeni yoğruk şekil değiştirmenin tam geri dönüşümlü bir süreç olmamasıdır.

**Kayma Kuşağı Çatlama Büyümesi;** Çatlak genellikle yüzeyden başlayıp, kayma hatları ile orta kısımlara iletilir. Ayrıca, malzeme içinde mikro çatlaklar var ise ve çatlak

ucunda oluşan gerilme yığılması çatlağı ilerletebilecek seviyede ise çatlak ilerler. Uygulanan gerilme çatlağın ilerlemesi için yeterli değilse malzeme yorulmaz. Gerilme çatlağın ilerlemesini sağlayacak kadar büyük ise çatlak gevşek yerlerden ilerler. Böylece yıpranma yavaş yavaş tüm kesite yayılır. Ayrıca büyük ve haber verici bir uzama veya büzülme görülmez.

Bir yönde ve daha sonra diğer yönde tekrar eden yoğruk şekilde değiştirmeler metal numunenin yüzeyinde kayma kuşağı çıkıntıları ve kayma kuşağı girintilerinin oluşmasında ve aynı zamanda kalıcı kayma kuşakları üzerinde hasarlar meydana gelmesine yol açar. Şekil 2.2’ de benzeri çatlamlar görülmektedir.

Kalıcı kayma kuşakları üzerindeki yüzey düzensizlikleri ve hasarlar, yüzeyde veya yüzey yakınlarında çatlakların oluşmasına neden olur. Bu çatlaklar, yüksek kesme gerilmelerine maruz kalan numunelerde numune içine ilerler (WILLIAM 2002).



Şekil 2.2 Kayma Kuşağının Çatlama Büyümesi (WILLIAM 2002).

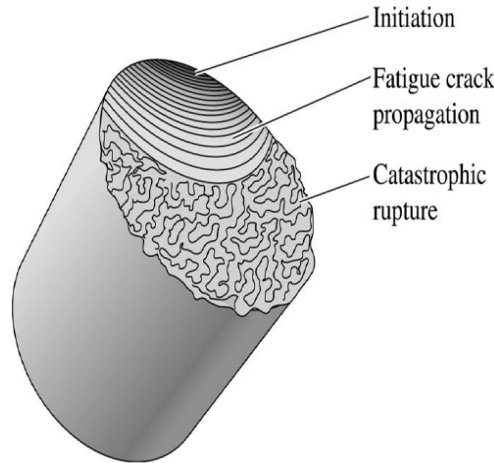
**Yüksek Çekme Gerilmeli Düzlemler Üzerinde Çatlak Büyümesi;** I. Basamakta çok kristalli bir metaldeki çatlak, yönünün numunedeki en büyük çekme gerilmesi yönüne dik bir yöne çevirmeden önce sadece birkaç tane boyu ilerler.

Bu safhadan sonra başlayan çatlak büyümesinin II. Basamağında iyice belirginleşen çatlak nispeten hızlı ilerler ve çatlak ilerledikçe metal numunenin kesiti üzerinde yorulma çizgileri oluşur. Yorulma kopması çözümlenirken, yorulma çatlağı başlangıcını ve yönünü belirlemede bu çizgilerden yararlanır.

**Yorulma Kopması;** Yıpranma nedeniyle ayrışma yeter derecede ilerledikten sonra kesidin geri kalan kısmı yükü taşıyamaz hale gelir ve malzeme aniden kopar.

Sonunda, çatlak çok geniş bir alanı kaplayıp yüzeyin geri kalan kısmı uygulanan yükü taşıyamaz hale gelince numune sünek kopmaya benzerlik gösteren bir şekilde kopar. Şekil 2.3 de yorulma kopması yüzeyi görülmektedir.

Yorulma kırılmaları sünek kırılmalara benzerse de yorulma kırılmasında çatlak ilerlemesi sünek kırılmadan farklı olup, çatlak her bir yükleme periyodunda ancak belirli bir miktar ilerler. Yorulma kırılması gevrek türde olduğundan nerede ve ne zaman olacağını önceden kestirmek zordur.



Şekil 2.3 Yorulma Kopması Yüzeyi (WILLIAM 2002).

#### 2.1.4 Yorulmaya etki eden etmenler

Yorulmayı etkileyen faktörleri aşağıdaki şekilde gruplandırmakta fayda vardır. Bu etmenlerden ortam (çevre), yükleme durumu (gerilme yoğunlaşması), malzemeye bağlı faktörler arasından yüzey durumu ve yüzey pürüzlüğü gibi faktörler yorulmaya yaptıkları etki bakımından biraz daha öne çıkmaktadır Şekil 2.4 te yorulmayı kategorisel olarak görebilmekteyiz. (WILLIAM 2002).



Şekil 2.4 Yorulmayı Etkileyen Faktörler (KARAGÖZ ve AKAGÜNDÜZ 2001)

#### 2.1.4.1 Çevre

Çevre etmeninde dikkate alınması gereken 2 ana başlık Sıcaklık, Korozyon (Yenim) yorulmalarıdır.

Yorulma dayanımı sıcaklık düştükçe artar. Fakat, oda sıcaklıklarının altında, çeliklerin yorulma olgusundaki çentik duyarlılığı sıcaklık düştükçe artar. Oda sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklarda yorulma, yüksek sıcaklık yorulması adını alır. Bu sıcaklıklarda sıcaklık arttıkça genellikle yorulma dayanımı düşer. Sıcaklık 400 °C üzerine ulaştığında yorulma yerine sürünme devreye girer (KARAGÖZ ve AKAGÜNDÜZ 2001).

Eleman bir kuvvet tekrarına zorlanırsa ve aynı zamanda oksitlenmeyi kolaylaştıran bir ortamda bulunursa, yorulma sınırlarında bir alçalma olur. Bu azalan sınırlara korozyon yorulması sınırları denir. Bu tip yorulma etmeni yenmek için uygun malzeme seçimi ve yenime uğrayacak yüzeyler için çinko veya kadmiyum kaplama ideal bir seçim olacaktır.

Yüksek sıcaklık altında çalışan malzemelerin çoğunda, yorulma çatlakının başlaması için az sayıda çevrim yeterli olmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki yorulma çevriminde, daha büyük şekil değişimleri meydana gelmektedir. Coffin ve

Tavernelli'nin karbon çelikleri üzerine yaptığı araştırmada: 400 °C'ye artan sıcaklıklarda yorulma belirtileri görüldüğü, bunun üzerindeki sıcaklıklarda ise yorulma mukavemetinde bir iyileştirme görülmektedir. Bu durum, malzemede meydana gelen deformasyon yaşanmasından kaynaklanmaktadır. Bazı malzemelerde, optimum sıcaklık ve frekansta, zorlanma yaşanması meydana gelmekte olup, plastik deformasyonların azalması sonucu, akma mukavemeti ve çekme mukavemeti artmaktadır.

Pek çok yapı alaşımına radyasyon etkisi, alaşımın mukavemetini artırıcı olmakla beraber sünekliğini azaltıcı yöndedir. Yüksek sıcaklıklar, bazı alaşımlar için dikkate alınacak büyüklüktedir.

#### **2.1.4.2 Yükleme Şekli**

Kullanılan elemanda gerilme birikmesi varsa, yorulma kırılması bakımından tehlike artar. İçinde çatlak, köpük bulunan parçalarla, kesit değiştiren ve üzerinde kertik olan parçalara dikkat edilmelidir. Elastik sınır dışında (elastik sınırı aşmış) yüklenmiş ve boşaltılmış elemanlarda veya soğuk şekillendirilmiş parçaların içinde bir takım gerilmeler kalmaktadır. Bu gerilmelere artık gerilmeler denir. İçinde artık gerilme bulunan elemanların yorulma dayanımı düşer. Parça kesitinde çentik, delik ve ani değişimlerin bulunması önemli ölçüde azaltılmaktadır. Kama yuvaları, vida dişleri, pres geçmeler ve delikler gibi geometrik süreksizlikler nedeniyle oluşan gerilme yığılımları sonucunda makine parçalarında yorulma çatlaklarının bulunması kaçınılmazdır. Mühendislik uygulamalarında yorulma dayanımının saptanması gerçekçi bir yaklaşımla gerilme yığılımlarını göz önünde bulundurmakla yapılır.

Gerilme gradyanı parça kesitinde gerilmenin genel olarak değişimidir. Örneğin eğilme ve burulma zorlamalarında elastik şekil değişimi bölgesinde doğrusal olarak azalarak tarafsız ekseninde sıfır değerine ulaşır (KARAGÖZ ve AKAGÜNDÜZ, 2001).



### 2.1.4.3 Malzemeye Bağlı Faktörler

Çeliğin kimyasal bileşiminin yorulma karakteristikleri üzerine belirli bir etkisi bulunmaktadır. Çekme kuvvetini arttıran bütün faktörler yorulma mukavemetinin daha büyük değerler açmasına yol açar. Özellikle çelikteki karbon miktarını arttırmakla daha büyük bir yorulma mukavemeti elde edilebilir. Çelikteki fosfor miktarının artırılması, yorulma mukavemeti üzerinde olumlu yönde etki yapar.

Kükürt bulunması ise metal olmayan inklüzyonlar meydana getirdiği için yorulma sınırını düşürür. Bununla beraber kükürtün en fazla % 0,1 oranında yumuşak çelikte bulunmasının yorulma karakteristikleri bakımından bir zararı yoktur. Yüksek nikelli ve kromlu çelik alaşımlarının önemli şu özellikleri vardır.

- Bu alaşımlar yüksek bir korozyon yorulma mukavemetine sahiptirler.
- Çentik etkisi ile bunların yorulma mukavemetlerinde, diğer çelik alaşımlarına göre daha az miktarda azalma olur. Başka bir deyişle, bunların çentiğe karşı daha düşük duyarlılığı vardır.

Alaşım elementleri malzemenin statik çekme dayanımını artırırken yorulma ömrünü de arttırmaktadır. Isıl işlem uygulanacak çelik parçalarda alaşım elementlerinin en önemli rolü çeliklerin su alma derinliklerini arttırarak, sertliğin yüzeyden itibaren daha derin kısımlara kadar artmasını sağlamak ve dolayısıyla yorulma dayanımını arttırmaktır.

#### **2.1.4.4 Parça Büyüklüğü**

Genellikle, çelik parçanın büyüklüğü arttıkça yorulma dayanımı düşer. Yorulma deneylerinde deney çubuğunun çapı 6 mm' yi aştığında küçük çaplılara oranla yorulma kesitinin % 20 'ye dek bir azalma görülür (TEKİN 1986).

Büyüklüğün yorulma özelliğini olumsuz yönde etkilemesinin iki temel nedeni vardır. Birincisi yüzey alanı arttığından yüzey kusurlarının bulunma olasılığı artmaktadır. İkincisi ise, bükme ve burma yüklemelerinde çap arttıkça gerilim eğimi de artmakta ve bu nedenle çelikte gerilimli bölgelerin sayısı artabilmektedir (ÇÖKELEK 2001).

#### **2.1.4.5 Yüzey Pürüzlülüğü**

Yorulma dayanımı üzerinde etkili olan faktörlerden biriside parçanın yüzey pürüzlülüğünün etkisidir. Yüzey pürüzlülükleri ve yüzeyde oluşan boşluklar genellikle parçanın üretiminden sonraki haddeme, ekstrüzyon, dövme, talaş kaldırma ve takım izleri gibi durumda ortaya çıkmaktadır.

Genel olarak, metal numunenin yüzey düzgünlüğü artıkça yorulma dayanımı da artar. Kaba yüzeyler yorulma çatlak oluşumunu kolaylaştıran gerilme yükseltici bölgeler meydana getirir. Genellikle, taşlanmış ve parlatılmış çelik yüzeylerdeki koşut parlatma çizgileri ana çekme gerilimi yönünde ise yorulma dayanımı en yüksek değerine ulaşır. Yüzeylerdeki çentik ve keskin köşelerin yorulma özelliklerini olumsuz yönde etkilemesinin nedeni bunların yüksek çekme gerilmesi yoğunluklu bölgeler oluşturmasıdır. Yorulma kırılmasının çoğunun bu tür yerlerden başlaması hep bu nedenden dolayıdır.

#### 2.1.4.6 Yüzey Durumu

Kesit üzerindeki çentikler delikler veya keskin köşeler yorulma dayanımını büyük miktarda düşürürler. Tasarımda gerilme artırıcı bölgeler ortadan kaldırılarak yorulma kopması ihtimali azaltılabilir.

Yorulma kopmaların çoğu metal yüzeyinde başladığından, yüzey durumundaki her değişiklik metalin yorulma ömrünü de etkileyecektir. Örneğin çeliklere uygulanan karbürleme veya nitrürleme gibi yüzey sertleştirme işlemleri yorulma ömrünü arttırmaktadır. Öte yandan, çelik yüzeyini yumuşatan karbon giderme ısıl işlemi yorulma ömrünü düşürmektedir.

Bu etkiden söz edilirken yalnız yüzey durumu olarak değil, aynı zamanda tasarım etmeni gibi de düşünülmelidir. Çeliklerde görülen yorulma kırılmalarının birçoğu yüzey düzensizliklerinden başlamaktadır. Bu nedenle, yorulma özelliği yüzeydeki çentik, girinti, çıkıntı, keskin köşe vs gibi tasarımdan ya da yüzey işlemlerinden kaynaklanan kusurlara karşı çok duyarlıdır.

Yorulma olayı sonunda meydana gelen çatlaklar yüzeyden başladığına göre cismin yüzey durumunun yorulma mukavemeti üzerine önemli etkileri vardır. Bu durumun yani çatlağın yüzeyden başlamasının başlıca nedenleri şunlardır:

- Yüzeyde metalin bir takım fabrikasyon çizgileri vardır. Bunlar, uygulanan kuvvetin doğrultusunun çizgilerin doğrultusuna paralel olması halinde, çentik etkisi meydana getirirler. Bu durumdan dolayı cismin yüzeyinde gerilmeler daha büyük değer almaktadır.
- Cismin yüzeyi doğal olarak iç bölgelere göre daha düşük bir mukavemete sahiptir.
- Yüzey genellikle korozyon etkisine maruz kalmıştır.

#### **2.1.4.7 Yüzey İçyapısı**

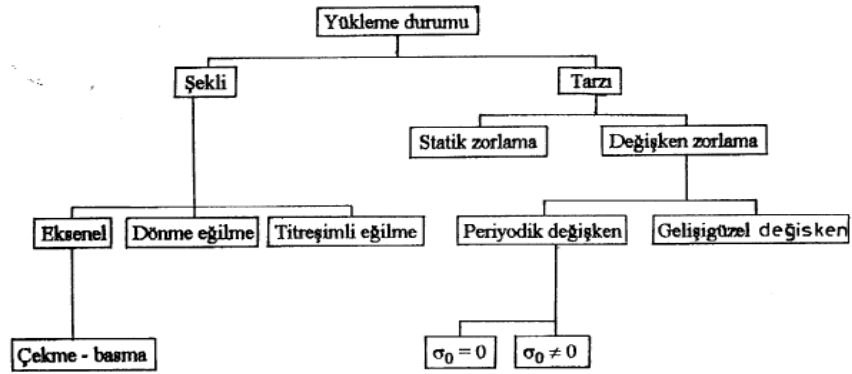
Tüm özelliklerde olduğu gibi, yorulma dayanımı da içyapının eş dağılımlığını bozan her etmenden etkilenir. Bu bakımdan yüzeyin kimyasal bileşimini ve içyapısını değiştirerek yorulma dayanımını düşüren her durumdan kaçınılması gerekir. Örneğin Karbonsuzlaşma çelik yüzeyler çekme gerilimi altına gireceğinden, yorulma kesitini düşürür. Buna karşın, yüzeyde basma gerilimi yaratabilen her etmen yorulma kesitini artırır. Gerek karbonlama ve özellikle de nitrüleme bu nedenle çeliklerin yorulma dayanımını artırır.

#### **2.1.4.8 Çentik Hassasiyeti**

Gerilmeye maruz malzemede yorulma çatlakları, gerilmenin en yüksek olduğu yüzeyde başlar. Yüzeydeki herhangi bir tasarım veya üretim hatası gerilmeleri yoğunlaştırır ve yorulma çatlaklarının oluşmasını kolaylaştırır.

#### **2.1.5 Yükleme Durumu**

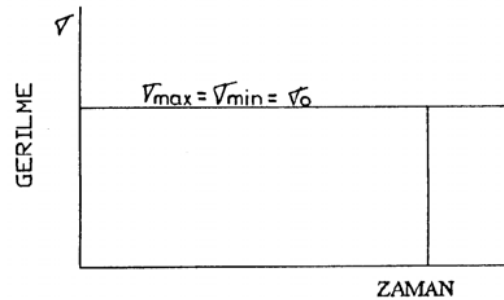
Yorulma olayının incelenmesi sırasında yükleme durumunun tespiti çok önemlidir. Yükleme durumunu temel olarak Şekil ve Tarz başlıkları altında incelemek mümkündür. Bu incelemenin alt gruplarını Şekil 2.5 verilen tabloda görölmektedir.



Şekil 2.5 Yüklem Durumu Tipleri (KARAGÖZ ve AKAGÜNDÜZ 2001)

### 2.1.5.1 Yorulma Yüklem Tipleri (Tarzı)

**Statik Gerilme;** elemanı zorlayan kuvvet veya momentin ve yahut da elemanın kesitinde meydana gelen gerilmelerin zamana göre sabit kaldığı, yani hiç değişmediği zorlanma şeklidir. Şekil 2.6 'da bu durum grafiksel olarak ifade edilmektedir.



Şekil 2.6 Zaman Göre Statik Gerilme (AKKURT 1977).

Diğer tanımlama ile statik gerilme sırasında Yükün (kuvvet) yönü, şiddeti veya doğrultusu değişmiyordur. Örnek, binalar statik yüke maruzdur.

Dinamik yüklem; Yükün (kuvvet) yönü, şiddeti veya doğrultusu değişiyorsa, buna dinamik yüklem denir. Örnek, Otomobilde güç ve hareket ileten şaft gibi makine elemanları dinamik yüklere maruzdur.

Elemanı zorlayan kuvvet veya momentin veyahut da elemanın kesitinde meydana gelen gerilmelerin zamana göre maksimum  $F_{\max}$ ,  $M_{\max}$ ,  $\sigma_{\max}$  ve minimum  $F_{\min}$ ,  $M_{\min}$ ,  $\sigma_{\min}$  değerler arasında değiştiği zorlama şekli olarakta anlatmak mümkündür.

Değişken zorlamada gerilmelerin değişimi göz önüne alınır, pratikte kullanım açısından yeni bir kavrama ihtiyacımız vardır. Bu kavram ortalama gerilme halidir.

Ortalama Gerilme;

$$\sigma_o = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 \quad (2.1)$$

Gerilme Genliği;

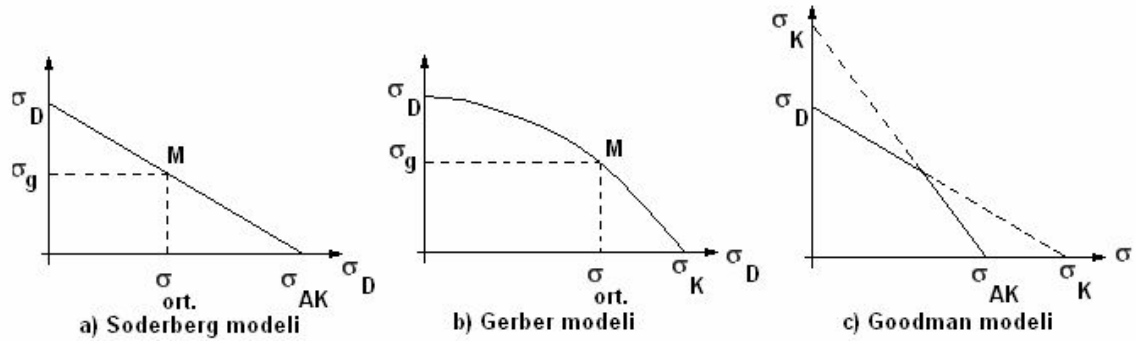
$$\sigma_d = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 \quad (2.2)$$

Üste bulunan iki ifade şekli değişken gerilmelerin, sabit bir  $\sigma_o$  değerinin üzerine değişken bir  $\sigma_d$  değerinin eklenerek meydana geldiğini göstermektedir (Akkurt ve Kent, 1975).

( $\sigma_o$ ) ortalama gerilmeleri pozitif veya negatif bir değer olabilir. ( $\sigma_o$ ) ortalama gerilmeleri statik gerilmeler ile karıştırılmamalıdır. Cıvatalar, yaylar gibi birçok makine elemanları, belirli bir ön gerilme ile takılırlar. Bu ön gerilme statik bir gerilmedir.

Ortalama gerilmenin kendisi yorulma hasarına neden olmamasına rağmen, yorulma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve bir parçanın yorulma ömrü tahmin edileceği zaman göz önüne alınmalıdır. Yorulma olayını çekme ortalama gerilmesi hızlandırırken, basma ortalama gerilmesi yavaşlatır (AKKURT 1977).

Yukarıda ifade edilen  $\sigma_{DN}$  ve  $\sigma_D$  gibi yorulma sınırları  $\sigma_o = 0$ , yani tam değişken zorlama hali için geçerlidir.  $\sigma_o \neq 0$ , genel değişken zorlama hali için ayrıca yorulma sınırları tayin edilmez. Ancak deney yolu ile  $\sigma_{DN}$  ve  $\sigma_D$ 'nin üzerine  $\sigma_o$ 'ın etkisi incelenir ve bu sonuçlar genel değişken zorlamaya maruz kalan elemanların hesabında kullanılır.



Şekil 2.7 Wöhler Diyagram Modelleri (ONARAN 1999)

Değişken ve dalgalı bölgeler için saptanmış bir sıra Wöhler eğrisinden elde edilen sonuçlar “Yorulma Dayanımı Diyagramları” nda toplu olarak verilebilir. Şekil 2.7’de bu grafikleri görmekteyiz. Bu diyagramlar her zorlama şekli için ortalama gerilme, gerilme genliği, alt gerilme ve üst gerilme arasındaki bağıntıları grafik olarak gösterir. “Smith Yorulma Dayanımı Diyagramı” da denilen bu diyagramlarda yatay eksene ortalama gerilmeler, dikey eksene de her bir ortalama gerilmeye ait yorulma dayanımının alt ve üst gerilmeleri taşınır. Değişik ortalama gerilmeler için bulunan noktaların birleştirilmesiyle alt ve üst gerilmelerin sınır çizgileri elde edilir. Alt ve üst gerilmelerin oluşturduğu sınır çizgileri arasında kalan bölgede kırılma oluşmaz, dışında ise oluşur. Bu eğriler yardımıyla uygulamada belirli bir ortalama gerilme üzerine kırılma oluşturmadan eklenebilecek değişken gerilme genlik sınırı tayin edilir (ONARAN 1999)

Bir üsteki ifade şekli değişken gerilmelerin, sabit bir  $\sigma_0$  değerinin üzerine değişken bir  $\sigma_d$  değerinin eklenerek meydana geldiğini göstermektedir. ( $\sigma_0$ ) ortalama gerilmeleri pozitif veya negatif bir değer olabilir. ( $\sigma_0$ ) ortalama gerilmeleri statik gerilmeler ile karıştırılmamalıdır. Ortalama gerilme Şekil 2.8’de olduğu gibi bir grafik sayesinde ifade edilebilmektedir. Cıvatalar, yaylar gibi birçok makine elemanları, belirli bir ön gerilme ile takılırlar. Bu ön gerilme statik bir gerilmedir. Elemanlar dış kuvvetlerin etkisi ile değişken zorlamalara maruz kaldığı takdirde zorlamayı karakterize eden ortalama gerilme, ön gerilmeden farklıdır.

Sabit genlikli değişken gerilmeler, sabit kısmı olan  $\sigma_0$  değerine göre genel değişken ve tam değişken olmak üzere iki gruba ayrılır (ONARAN 1999).

Tam değişken zorlama;

$$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} \quad \sigma_0 = 0$$

$$\sigma_0 = \sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$$

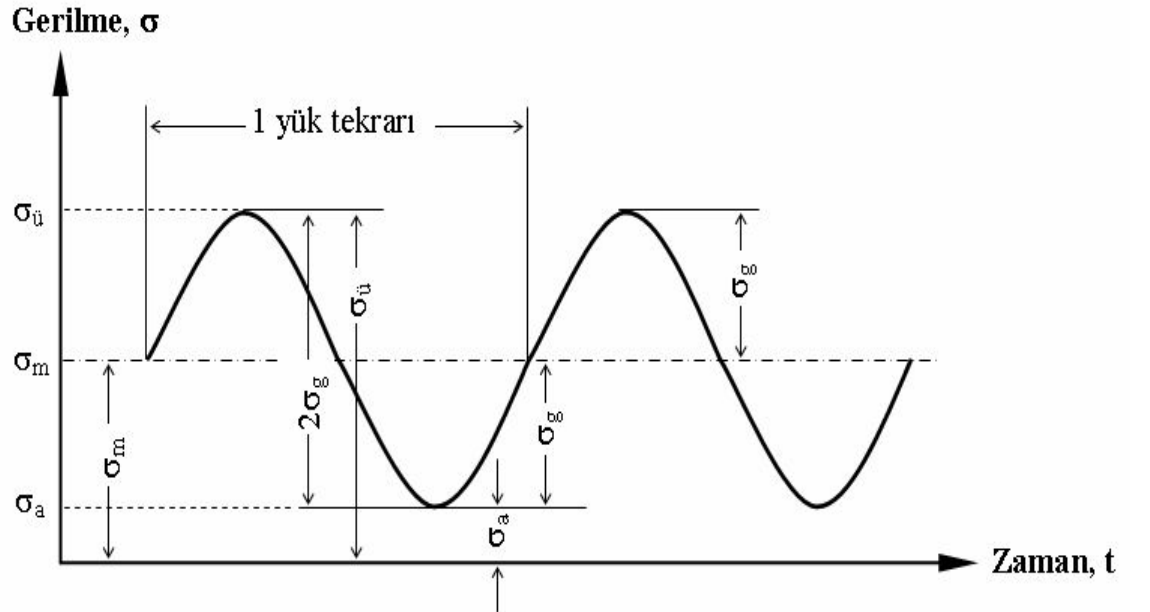
Gerilmelerin değişimi, gerilme oranı

$R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$  ile ifade edilir.

Buna göre statik zorlamada  $R = +1$

Genel değişken zorlamada  $+1 < R < -1$

Tam değişken zorlamada  $R = -1$  Değerlerini alır.



$\sigma_m$ : Orta gerilme	$\sigma_a$ : Alt gerilme	$\sigma_u$ : Üst gerilme
$\sigma_g$ : Gerilme genliği	$N$ : Yük tekrar sayısı	$N_s$ : Sınır yük tekrar sayısı
$\sigma_G$ : Belli bir S değeri için yorulma dayanımını temsil eden gerilme genliği		
$2\sigma_g$ : Gerilme alanı	$\sigma_y$ : Yorulma dayanımı	$\sigma_y/R_m$ = Yorulma dayanımı oranı
$2\sigma_g = \sigma_u - \sigma_a$	$\sigma_y =  \sigma_G $	
$\sigma_{çby}$ : Yorulma dayanımı (çeki-bası yüklemesinde)	$\sigma_{ey}$ : Yorulma dayanımı (eğme yüklemesinde)	$\tau_y$ : Yorulma dayanımı (burma yüklemesinde)

Şekil 2.8 Ortalama Gerilme (ONARAN 1999)



### 2.1.5.2 Yorulma Yükleme Tipleri (Şekli)

Yorulma, çeşitli yüklemelerde oluşabilir, bunlar; basma-çekme, eğilme ve burulma veya bunların birlikte olması durumunda meydana gelir.

- Eksenel
- Dönme Eğilme
- Titreşimli Eğilme

Kategorileri altında toplanan yorulma yükleme tiplerinden baz alınarak yorulma deney cihazları oluşturulmuştur.

### 2.1.6 Yorulma Deneyi

Bir metal numunesini değişken gerilmelerin etkisine maruz bırakabilmek için yorulma deneyi aletleri denilen özel cihazlar gerekmektedir. Bu aletlerde bulunan tertibat sayesinde cisme uygulanan gerilmeler iki sınır arasında zamanın sinüsoidal bir fonksiyonu olarak devamlı olarak değişebilmektedir.

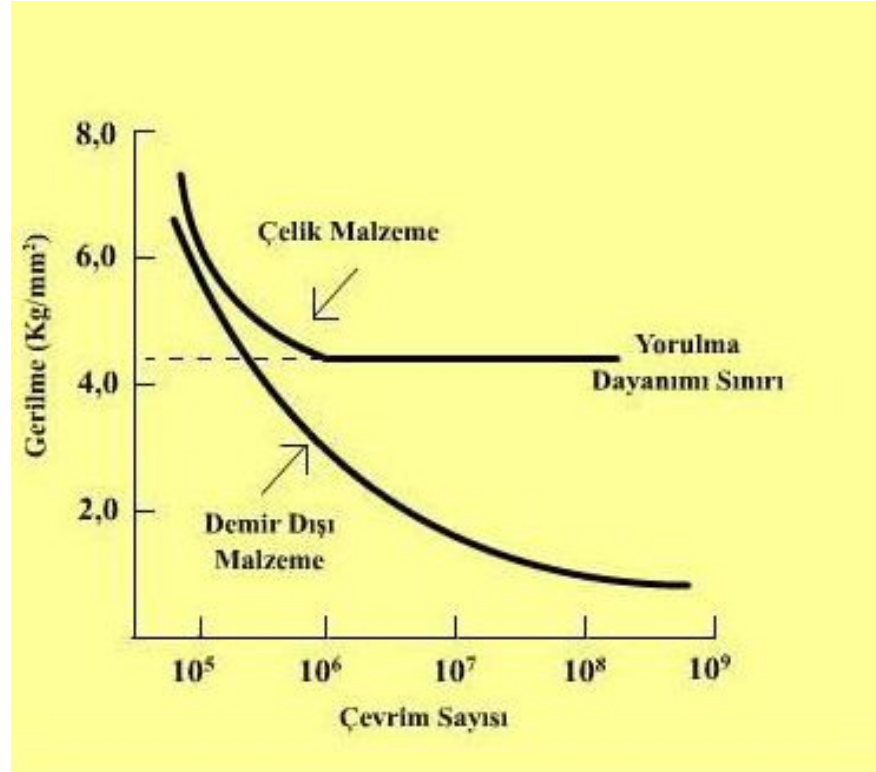
Yorulma deneylerinde  $\sigma_{min}$  ve  $\sigma_{max}$  seçildikten sonra bu sınırlar arasında belirli bir frekansla yükleme işlemleri yapılmaktadır. Cihazda bulunan sayaçtan yapılan toplam yükleme sayısı her an bilinmektedir. Yorulma deneyleri muhtelif türde cihazlar yardımıyla yapılır.

#### 2.1.6.1 Yorulma Deney Cihazları

Yorulma Cihazları ile ilgili bahsedilmesi gereken diğer bir konuda yukarıda bahsettiğimizi saykıl sayısı-çevrim sayısı nicelikleri arasından hareketle kurulan bir ilişkidir.

Bu ilişki sonucunda deney sonrası oluşan yorulma değerlerinin daha nitelikli şekilde incelenmesine olanak sağlayan WÖHLER eğrileri hazırlanır. Şekil 2.9'da örnek olarak kabul edilebilecek bir Wöhler eğrilerini ifade eden diyagram görülmektedir.

Bu diyagram, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösteren bağıntıyı verir.



Şekil 2.9 Wöhler Eğrileri (KUMRU 2007)

### 2.1.6.2 Wöhler Eğrileri

Bir malzemenin yorulma performansı, verilen maksimum gerilme seviyesinde numunenin kırılıncaya kadar ki gerekli çevrim sayısı olarak açıklanır. Ayrıca, yorulma performansı ortalama gerilme veya yorulma gerilmesi oranı  $R$  ile açıklanır. Bu tip testlerin sonuçları, maksimum yorulma gerilmesine karşılık 10 tabanına göre yarı logaritmik ölçek üzerindeki hasar çevrimleri olarak tanımlanır. Bu çizim S/N eğrisi olarak adlandırılır. Düşük gerilmelerde yorulma ömrü önemli ölçüde artar ve bazı durumlarda yorulma ömrü sonsuz olabilir. Bu durumda genellikle yüksek çevrimli yorulmadan (HFC) bahsedilir. Bu durumun oluştuğu gerilmeye 'yorulma dayanım sınırı' denilir (www.aero.iitb.ac.in:8081).

S/N eğrisi aşağıdaki şekilde açıklanabilir [17];

$$S = \sigma_{TU} (m B \log N + b)$$

Bu formülde ;

S : Maksimum yorulma mukavemetini

N : Hasara neden olan çevrim sayısını

$\sigma_{TU}$  : Ortalama statik mukavemet

m ve b : Sabitler

( 2.3 )

Sabit (m) sayısı eğim, (b) sayısı ise S/N eğrisinin kestiği gerilme olarak açıklanır. (m) nin düşük ve (b) nin yüksek değeri yüksek yorulma mukavemetini ifade eder.

Yorulma ile ilgili ilk sistematik çalışmalar Almanya'da 1850–1860 yılları arasında gerçekleştiren August Wöhlerdir. İlk çalışmalarını demir yolu vagonlarının aksları üzerinde yorulma üzerine yapmıştır. Bu deney sırasında Wöhler, kendi geliştirdiği yorulma deneyi cihazını kullanmıştır.

Metal malzemeler üzerinde yapılan deneylerde, uygulanan yüklerin büyüklüğü üzerinde durulmuştur. Deney sonuçlarından yararlanılarak yorulma olayında uygulanan maksimum gerilmeden ziyade gerilme aralığının önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

İlk defa Wöhler tarafından gerilme – çevrim sayısı(S-N) diyagramları kullanılarak belirli bir gerilme değerinin altındaki değerlerde numunelerin kırılmadığı gösterilmiştir.

### 2.1.6.3 Yorulma Gerilmesi Oranı Yorulma Yüğü Modu

Çizelge 2.1 Yorulma Gerilmesi Oranı (SAKİN 2004).

Yorulma Gerilmesi Oranı	Yorulma Yüğü Modu
$R=1$	Statik
$R=0$	Çekme-Yüksüz
$0<R<1$	Çekme-Çekme
$R=-1$	Çekme-Basma, Tam Değişken
$-1<R<0$	Çekme- Basma

Yapılan araştırmalar sonucunda tam belirlenmiş bir yorulma testi ve numune boyutları bulunamamıştır. Çünkü makine parçasının yorulma ömrünü etkileyen pek çok faktör vardır ve yorulma çatlağının başlangıç ve yayılma aşamaları süresince farklı durumlar hedeflenir. Bu yüzden tekrarlı yüklemeye maruz çalışmakta olan makine parçasının yorulma ömrünü belirlemek için, mümkün olduğunca gerçek koşulların oluşturulması ve her deneysel durumda belirli bir koşulun sabit tutulup diğerlerinin değiştirilmesinden dolayı, her bir duruma uyan sayısız değişik test düzeneği ortaya çıkmaktadır.

Günümüzde kullanılan yorulma deney makineleri çekme, çekme-basma, döner eğme, ileri-geri eğme ve burma yanında bileşik zorlamaları da mümkün kılmaktadır. Kabul görmüş yorulma yüğü moduna göre çizelge 2.1'de yorulma gerilmesi oranı ifade edilmiştir. Yorulma deneylerinin esas gayesi malzeme veya makine parçalarının uygulanan yüklemeye karşı göstereceği performansını tespit etmektir. Deneyde kullanılan gerilme türü yorulma deneyine de adını vermektedir (SAKİN 2004).

#### 2.1.6.4 Yorulma Deneyi Cihazı Özellikleri

- Bu cihazlar da numuneler genellikle gerçek işletme şartlarına uygun zorlamalar altındaki parçaya uygun, kullanılacak cihazın tipine kapasite ve boyutuna bağlı olarak seçilir ve makineye bağlanır.
- Çalışma esnasında eksen kaçıklığı olmamalıdır.
- Yükleme aralığı seçilip yük uygulanmaya başlanır. Her numuneye farklı yük aralığı uygulanır.
- Deney esnasında numunede ısınma olmamalıdır.
- Çatlak oluşumu belli aralıklarla kontrol edilir
- Çatlamanın olduğu sayı saykıl sayısı olarak nitelendirilir.
- Yorulma dayanım sınırı 106, bazen 107 saykıl tamamlandığında deney bırakılır.

#### 2.6.1.5 Yorulma Deneyi Gerilme Tipleri

Bu cihazlar gerilme türlerine göre ana 4 grupta toplanırlar;

- Eksenel Çekme-Basma Gerilmeli
- Eğme Gerilmeli
- Düzlemsel Eğme Gerilmeli
- Dönen Eğme Gerilmeli
- Burma Gerilmeli
- Bileşik Gerilmeli

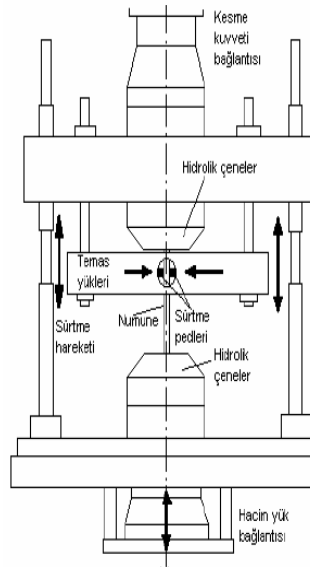
Günümüzde kullanılan yorulma deney makineleri çekme, çekme-basma, çevresel eğme, ileri-geri eğme ve burma yanında bileşik zorlamaları da mümkün kılmaktadır.

Bu makinelerin deney devir ve frekansları, yapılarına bağlı olarak 500...15000 d/d (8...250 Hz) arasındadır (TAUSCHER 1983).

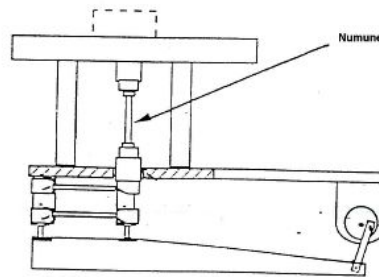
Yorulma testleri, malzemenin yorulma özelliklerini belirlemek amacıyla genellikle basit numunelerle yapılır.

### 2.1.6.6 Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi

Bu tür yorulma deneyinde numuneye uzunluğu boyunca değişken çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Gerilme numune kesitinde homojen olarak dağılır. Eksenel yükler mekanik, hidrolik, elektromekanik sistemler ile uygulanabilir. Bu tip yükleme uygulayan cihazın şematik gösterimlerini 2.10a ve 2.10b görmek mümkündür. Bu tür yorulma deneyinde numuneye uzunluğu boyunca değişken çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Gerilme numune kesitinde homojen olarak dağılır. Eksenel yükler mekanik, hidrolik, elektromekanik sistemler ile uygulanabilir (KAYALI, ENSARİ VE DİKEÇ 1983).



Şekil 2.10a Eksenel Gerilmeli Yorulma Cihazı (KAYALI, ENSARİ VE DİKEÇ 1983).



Şekil 2.10b Eksenel Gerilmeli Yorulma Cihazı Şematik (KAYALI, ENSARİ VE DİKEÇ 1983).

### 2.1.6.7 Eğilme Gerilmeli Yorulma Deneyi

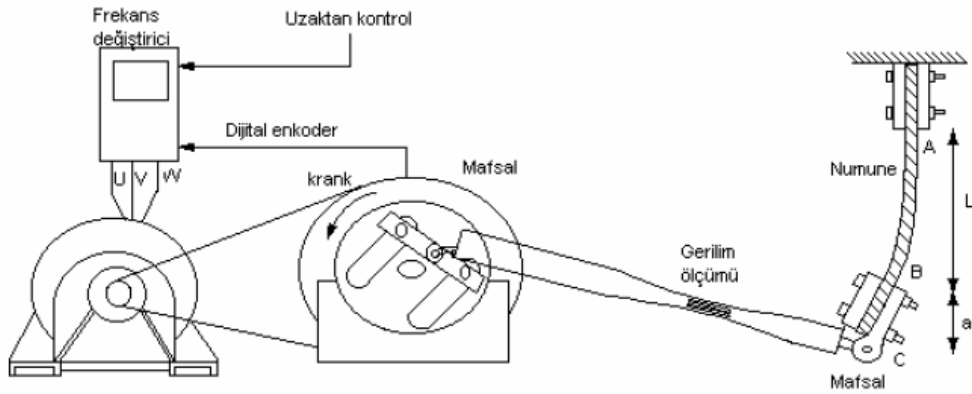
Eğmenin türüne bağlı olarak;

- Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi,
- Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi, olarak iki gruba ayrılır.

Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi türünde, numune nötr (tarafsız) bir düzleme göre tekrarlanan eğme gerilmelerinin etkisi altındadır. Numune hareketsiz olup eğme yükü hareketlidir

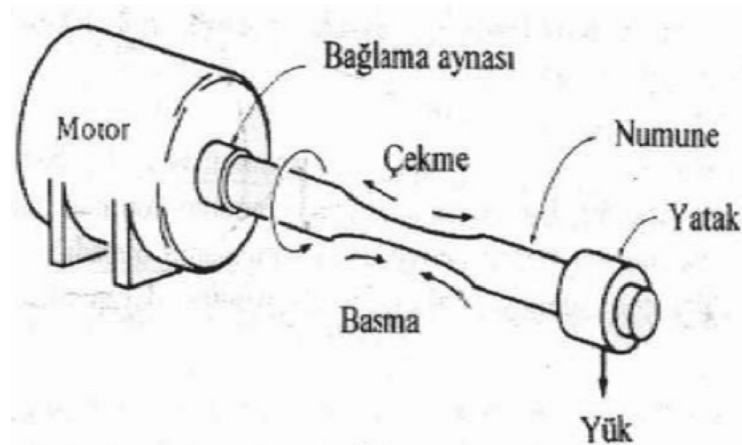
Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyinde ise numune devamlı dönen ve Nötr bir eksene göre tekrarlanan eğme gerilmesine maruz bırakılır. Bu tür yorulma deneyi ilk defa Wöhler tarafından geliştirilmiş ve demir yolu vagon akslarının yorulma dayanımı denemiştir (KAYALI, ENSARİ VE DİKEÇ 1983).

**Düzlemsel Eğme Gerilmeli Yorulma (Schenk Tipi);** Kompozit malzemeler ve alüminyum numunelerin incelenmesi amacıyla sabit olarak bağlanan numunenin bir ucuna krank veya eksantriğe bağlı bir kol yardımıyla değişken yükleme yapabilmek için f adı ile adlandırılan özel bir tasarım yapılmıştır. Bu tasarımda numunenin değişik şekillerde olabilmesi, döner mil deneyine göre önemli bir avantaj sağlar. Böylece düz metaller ve değişik kesite sahip çubuklar denenebilir. Yüzey temizlemesi de şart olmadığından numunelerin servis sırasında kullanılan doğal halleriyle denenmesi mümkündür. Eksantrik mile bağlı kolun uzunluğunun ayarlanmasıyla sabit ve alternatif yüklerin çeşitli kombinasyonları uygulanabilir. Bu tip sistemi Şekil 2.11 de görebilmekteyiz.



Şekil 2.11 Schenk Tipi Yorulma Cihazı (KAYALI, ENSARİ VE DİKEÇ 1983).

**Dönel eğme gerilmeli yorulma (Moore Tipi);** R. R. Moore tarafından geliştirilen bu sistemde, Şekil 2.12 de görüldüğü gibi iki milin uçlarına rijid olarak yerleştirilen numune sadece eğilmeye maruz kalmaktadır. Dönme esnasında üst kısmı daima basıya, alt kısmı da daima çekiye çalışan numune yüzeyinin her noktasında sinüzoidal değişen bir gerilme doğar. Yükleme statik olduğundan sabit bir yükleme yapılabilir ve ortalama gerilme sıfırdır.



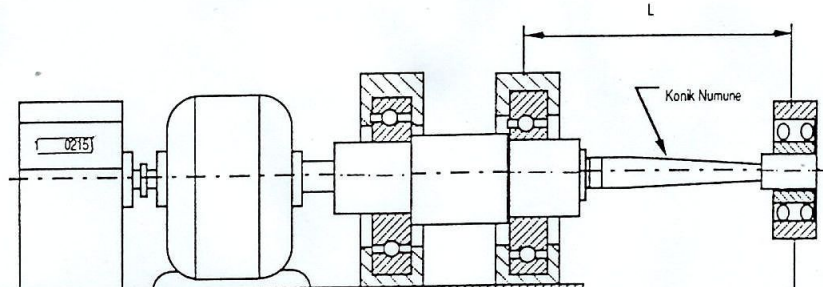
Şekil 2.12 Moore Tipi Yorulma (KAYALI, ENSARİ VE DİKEÇ 1983).

Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi cihazları yükün uygulama durumuna bağlı olarak iki gruba ayrılmıştır.

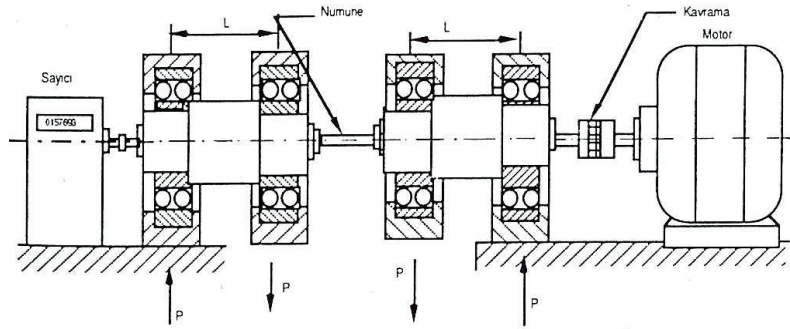
- Ankastre giriş türü (2.13a)
- Sabit eğme momentli (2.13b)



Bu tür gerilme cihazında hareket halindeki taşıtların akslarında meydana gelen gerilme değerleri sonucu oluşan yorulmalar incelenir.



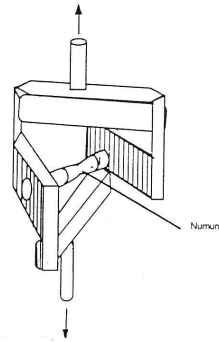
Şekil 2.13a Ankastré kiriş türü (KAYALI, ENSARİ VE DİKEÇ 1983).



Şekil 2.13b Sabit eğme momentli (KAYALI, ENSARİ VE DİKEÇ 1983).

### 2.1.6.8 Burma Gerilmeli Yorulma Deneyi

Deney numunesine sabit bir eksene göre tekrarlanan burma işlemi uygulanmaktadır. Araçların süspansiyon yaylarında ve çekme basma kuvvetlerinin uygulandığı bütün helisel yaylara bu tür burma gerilmeleri uygulanır. Şekil 2.14'de kuvvetlerin uygulama yönleri görülmektedir. (ESİN 1981).



Şekil 2.14 Burma Gerilmeli Yorulma Cihazı (ESİN 1981)

### 2.1.7 YORULMA DENEYİ UYGULAMA ŞEKİLLERİ

Yorulma deneylerinde kırılmanın meydana gelmesine kadar geçen süre esas alınarak yorulma deneyleri üç grupta incelenir;

- Yüksek çevrim sayılı,
- Küçük çevrim sayılı,
- Çok yüksek hızlı yorulma deneyleri.

Genel olarak uygulanan en büyük gerilme değeri malzemenin elastiklik sınırı altında ve yorulma ömrü yaklaşık 10<sup>7</sup> çevrim sayısından daha büyük ise bu tür yorulmaya yüksek çevrim sayılı yorulma denir. Ancak uygulanan gerilme malzemenin elastiklik sınırının üzerinde ve buna bağlı olarak küçük çevrim sayılarında hasar ortaya çıkıyor ise bu tür yorulmaya küçük çevrim sayılı yorulma denir.

### 2.1.8 YORULMA DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yorulma deneyinin sonuçları genellikle bir grafik halinde verilir. Deney esnasında uygulanan gerilme değeri ( S ) düşey eksen ve bu gerilme altında kırılıncaya kadar geçen süre içerisindeki çevrim sayısı ( N ) yatay eksen olmak üzere bir grafik çizilir.

Meydana getirilen bu grafiğe S-N eğrisi veya Wöhler diyagramı denilir. Her iki eksen verileri logaritması alınarak tam logaritmik skala veya sadece çevrim sayısı eksenine logaritmik değerler alınarak yarı logaritmik skala kullanılabilir.

Yorulma testi bir parçanın ne kadar süreyle dayanabileceğini veya kopma olmaksızın uygulanabilecek maksimum yüklemeleri belirler.

**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.

**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.

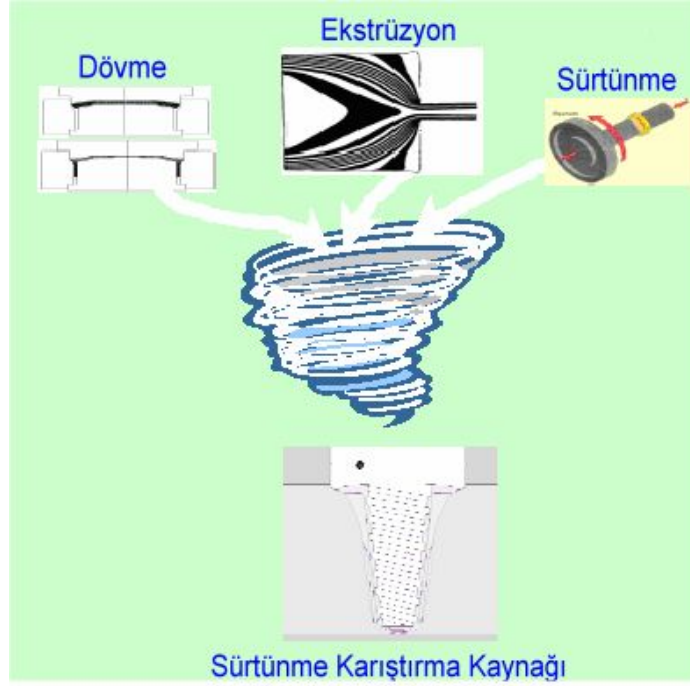
## 2.2. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Sürtünme karıştırma kaynağı, sürtünme kaynak yönteminin geliştirilmiş bir başka yöntemidir. Bilindiği gibi sürtünme kaynağı genellikle silindirik kesitli malzemelere uygulanan ergitmesiz kaynak yöntemidir (DAVİS ve THOMAS 1996).

Sürtünme-karıştırma kaynağı, son on yılda keşfedilmiş ve geliştirilmiş bir katı hal kaynak tekniğidir. Herhangi bir boşluk, çatlak veya deformasyon meydana gelmeksizin güvenli bir kaynak yapmanın çok zor olduğu birçok malzemeyi kaynaklamayı basitleştirmiştir. Birçok sanayi kuruluşu bu tekniği üretimlerinde kullanmak için pilot çalışmalar yürütmektedir (KURT, BOZ ve ÖZDEMİR 2005).

Sürtünme karıştırma kaynağı ile ilk örnekler TWI ( İngiliz Kaynak Enstitüsü) tarafından gerçekleştirilmiş patentli bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu yöntem genellikle bakır alüminyum gibi erime sıcaklığı düşük metallerin kaynağında kullanılır. Adından da anlaşılacağı gibi bu yöntemde malzeme sürtünme yolu ile ısıtılır ve karıştırma ile kaynaklanır. Kaynaklama sıcaklığı malzemenin erime sıcaklığının yarısıdır ve bu yöntemde herhangi bir erime gerçekleşmez. Malzeme ısının etkisi ile yumuşar ve kolay şekillendirilebilir bir sıcaklığa gelir ve yüksek devirli karıştırıcı uç ile birbirine kaynaklanır. Özellikle kaynak yapılması çoğu zaman zor olan alüminyum alaşımların birleştirilmesinde, sürtünme-karıştırma kaynağı başarılı bir performans göstermiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı düz ve bindirmeli alüminyum alaşım kaynakları için yeni ve başarılı bir kaynak tekniğidir.

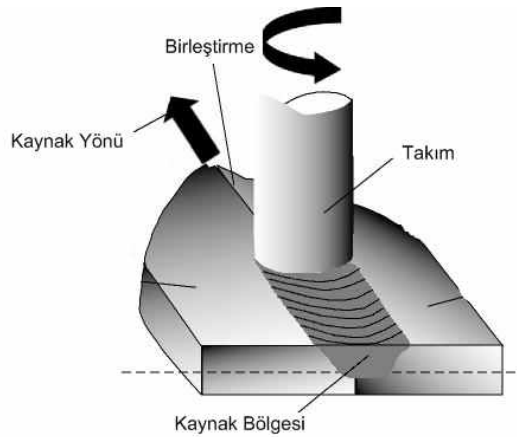
Sürtünme karıştırma kaynağındaki mekanizmayı uygulanması sırasında gerçekleşen işlemlerle tanımlamakta mümkündür. Bu birleştirme sırasında malzemelere şekil verme işlemleri için kullanılan ekstrüzyon dövme ve sürtünme gibi olaylarda görülmektedir. Şekil 2.15 bu durumu ifade etmektedir. (JOHNSEN 1999).



Şekil 2.15 Sürtünme Karıştırma Kaynak Mekanizması (KURT, BOZ ve ÖZDEMİR 2005)

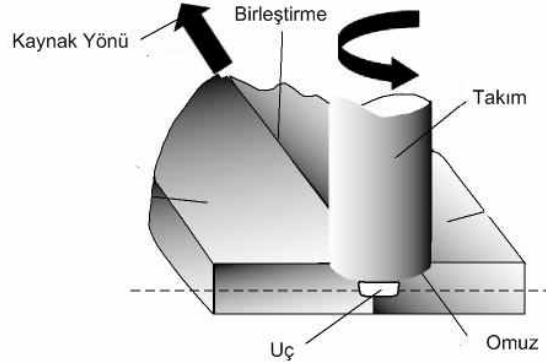
Sürtünme karıştırma kaynağı iyi kalitede birleşme ve bindirmeler veren bir katı hal birleştirme işlemidir (THOMAS ve NICHOLAS 1997).

Şekil 2,16a’de görüldüğü gibi omuz bölümü malzeme üzerine basınç ve sürtünme etkisi ile ısı uygular, girici uç ise kaynak bölgesini hamurlaşma sıcaklığında kaynaklayarak iki parçayı birleştirir ve Şekil 2.16b’ de görüldüğü gibi bu alanı terk eder.



Şekil 2.16a Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulama Şekli (THOMAS ve NICHOLAS 1997).

Karıştırıcı uç çok farklı şekillere sahip olabilir, dişli, konik, prizmatik vs. Kullanılacak uç genellikle kaynaklanacak malzemenin mekanik özelliklerine göre belirlenir.

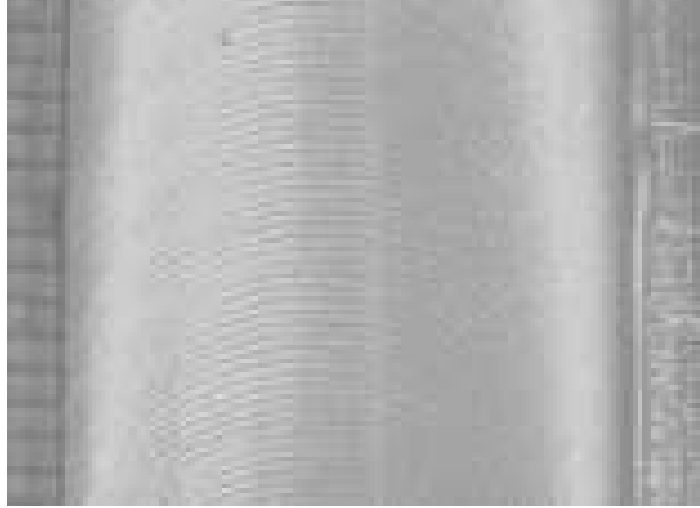


Şekil 2.16b Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulama Şekli (THOMAS ve NICHOLAS 1997).

### 2.2.1. Kaynak Metalürjisi

Sürtünme karıştırma kaynağı sonrası oluşan kaynak bölgesinde tipik bir soğan halkaları biçimine rastlanmaktadır ve kaynak metalinin biçimi çok değişken olarak oluşmaktadır. Bu biçim alaşım türüne ve kaynak işlemi için belirlenmiş takım hızı, ilerleme vb. parametrelere bağlı olarak değişmektedir.

SKK bölgesinin yatay kesiti incelendiğinde göze çarpan ilk oluşumlar muhtemelen soğan halkalarıdır. Bu girdap ile benzerlik gösteren desenlerinin aletin dönme düzlemine  $90^\circ$  lik düzlemde olduğunu anlamak oldukça güçtür. Bu yüzden bu konu ile alakalı bazı mekanizma teorileri ortaya atılmıştır. Biallas ve diğerleri ısı etkili bölgenin soğuk duvarlarından malzeme akısının yansıması yüzünden soğan halkalarının oluştuğunu açıklamışlardır. Threadgill ise soğan halkalarının oluşumunun aletin bir devirdeki ileri hareketi ile ilgili olduğunu savunmuştur. Şekil 2.17 de bahsedilen bu soğan halkalarına ulaşmaktayız. (KRISHNAN 2002).



Şekil 2.17 Sürtünme Karıştırma Kaynak Bölgesi (KRİSHNAN 2002)

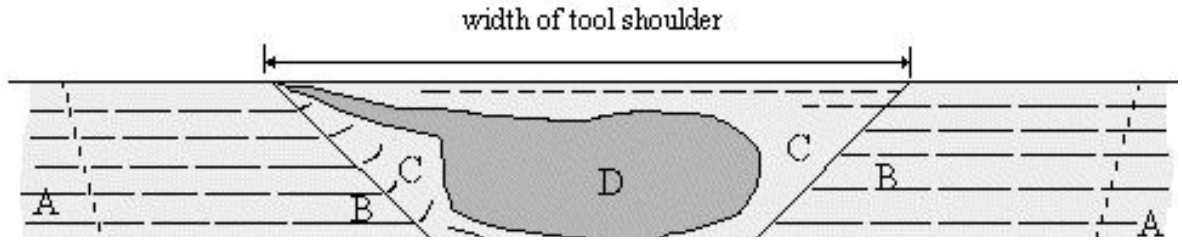
Yüzeyde ki yarım dairelerin durusu, takımın dönmesi ve ileri doğru hareketi sırasında kaynak için gerekli ısıyı sağlayıp, sıcak metali iterken kısa bir süre yüzeyde beklemiş gibi görünür. Bu yöntemin sürekli olusu, yarım daire halkalarının devamlılığını sağlar. İki halka arasındaki mesafe, aletin bir dönme sırasında aldığı yola eşittir. Sürtünme karıştırma kaynak yöntemindeki oluşum Colligan ve Reynolds tarafından ekstrüzyon yöntemindeki oluşuma benzetilir (MERT VE KALUC 2003).

Takımın her bir dönmesi sırasında malzeme yarım daire halka parçaları şeklinde takımın arkasına ve yan taraflara doğru itilir. Üste yakın kısımlarda karışma daha fazladır. Tüm bu sonuçlar, araştırmacıları, buradaki işlemin bir ekstrüzyon işlemi olduğu fikrine yönlendirir (MERT VE KALUC 2003).

Mikro yapının sınıflandırılması ile ilgili ilk çalışma P.C.Threadgill tarafından 1997'de yapılmış olup, bu çalışma alüminyum alaşımlardan uygun bilgi temelleri üzerine tesis edilmiştir. Daha sonra Dünya Malzeme Birleştirme Teknoloji Merkezi TWI, mevcut çalışmayı geliştirmiş, endüstride ve üniversitelerde birçok kişiyle irdeleme yapılmıştır. Ayrıca Sürtünme Karıştırma Kaynak Lisans Birliği tarafından da kabul edilmiştir

Bu kaynak yönteminde kaynak bölgesi dört farklı bölgeden oluşmaktadır. (Şekil 2.18)

SKK Temel Kaynak Bölgeleri (A: Etkilenmemiş – Ana malzeme, B: Isıdan etkilenmiş bölge (IEB), C: Termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge (TMEB), D: Dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bölge - weld nugget (DYKB))



Şekil 2.18 Kaynak Bölgesinin Metalürjik Yapısı (EREN 2005)

**Etkilenmemiş Malzeme (veya ana malzeme):** Bu bölge kaynaklı bölgeden uzak, deforme olmamış, mikro yapısı ve mekanik özellikleri değişmemiş olan malzeme bölgesidir. Ana malzeme veya ısıdan etkilenmeyen malzeme her ne kadar kaynak bölgesinden uzaksa da prosesin termal çevriminden etkilenir. Fakat bu mikro yapısal ya da mekanik özellikleri etkilemez. Isı etkili bölge kaynak merkezine yakındır ve termal çevrim mikro yapısını ve/veya mekanik özelliklerini değiştirir

**Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB):** Bu bölge, kaynak merkezine yakın bulunmaktadır. Malzeme, mikro yapı veya mekanik özelliklerin değişimini sağlayan termal çevrimden etkilenmektedir. Bununla birlikte bu alanda plastik deformasyon oluşmaz.

**Termo-Mekanik Olarak Etkilenmiş Bölge (TMEB):** Söz konusu bölgede, malzeme sürtünme karıştırma kaynak takımı tarafından plastik olarak deforme edilmiştir. Bundan dolayı ısı ayrıca malzeme üzerinde bazı etkiye sahiptir. Malzemenin alüminyum olması durumunda, bu bölgede rekristalizasyon olmaksızın önemli plastik şekil değişimi sağlamak mümkündür ve rekristalize olmuş bölge ve deforme olmuş TMEB arasında genellikle net bir sınır vardır. Bununla birlikte, diğer metaller üzerindeki çalışmalar da göstermiştir ki, alüminyum, çoğu diğer metallerden farklı bir tarz göstermektedir. Çünkü rekristalize olmadan yüksek sıcaklıkta aşırı bir deformasyon olabilmektedir.



Diğer metallerde, sınırlı rekristalizasyon bölgesi yoktur ve tüm TMEB rekristalizasyon olmuş gibi görünmektedir. Bu, termal olarak faz dönüşümüne uğramış malzemenin kesin doğruludur. Örnek olarak saf titanyum, b titanyum alaşımları, östenitik paslanmaz çelikler ve bakır. Ferritik çelikler ve a-b titanyum alaşımları (Ör: Ti-6Al-4V) gibi malzemelerde, termal faz transformasyonu yüzünden mikro yapıyı anlamak çok zordur ve bu IEB / TMEB sınırlarını hassas bir şekilde tanımlanmasını zorlaştırabilir. Termomekanik etkilenen bölgeden farklı olarak bu bölge plastik deformasyona uğramaz ve ısı etkili bölgenin özelliklerindeki değişiklikler diğer termal proseslerde gözlenenlerle kıyaslanabilir. Termomekanik etkilenen bölge hem plastik deformasyonun hem de termal etkinin sonucudur. Alüminyumda yüksek sıcaklıkta yeniden kristalleşme meydana gelmeden önemli plastik deformasyon oluşumu mümkündür.

Bu konuda çalışan araştırmacıların çoğu Termomekanik etkilenen bölgenin bir bölümünde dinamik olarak yeniden kristalleşen kısmın ( kaynak çekirdeği) kalan bölümde ise plastik deformasyona uğramış fakat yeniden kristalleşmemiş kısmın olduğunu belirtmektedirler. Sürtünme karıştırma kaynak tekniği ile kaynaklanmış diğer malzemelerde tipik olarak kaynak çekirdeği bulunmaz, Termomekanik etkilenen bölge tamamen yeniden kristalleşmiş olarak görülür.

**Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB):** Alüminyum alaşımlarında TMEB içerisindeki rekristalize olmuş bölgeye dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bölge (DYKB) denir. Takım omzunun hemen altındaki (TMEB nin bir parçası) alan, tane yapısının farklılığından dolayı, ayrı kategoride verilmesi önerilmiştir. Buradaki mikro yapı, omzun arka yüzeyi sürtünmesine, malzemenin soğuma süresiyle ilişkilidir. Bu bölge, TMEB'nin bir alt bölgesi olarak ayrı irdelenmesinde fayda vardır (EREN 2005).

## 2.2.2 Kaynak Parametrelerinin Etkisi

Sürtünme karıştırma kaynağı kontrolü gereken oldukça çok sayıda parametre içerir. Bu yöntemle ilgili değişkenler dönme hızı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, ilerleme süresi, yığma geciktirmesi süresi, yığma basıncı (dövme) ve yığma süresidir. Yapılan çalışmalarda yöntem üzerinde en etkili olan ve optimizasyonu gerektiren parametrelerin devir sayısı, sürtünme karıştırma süresi, ilerleme ve kullanılan uç olduğunu göstermiştir. Bu değerlerin dışında kaynatılacak malzeme şartlarına bağlı parametreler de söz konusudur.

### 2.2.2.1. Sürtünme Basıncı ve Yığma Basıncı

Sürtünme basıncı ve yığma basıncı, numune geometrisine ve yapıldığı malzemeye bağlıdır. Değişim dar bir aralıkta değildir. Basıncı değişkeni kaynak bölgesindeki sıcaklık veya aksel kılma ile kontrol edilebilir. Sürtünme basıncı temas eden yüzeylerden oksitleri uzaklaştırabilecek atmosfer ile ilişkisinin kesebilecek ve ara yüzeylerde dengeli bir ısınmayı sağlayabilecek değerde olmalıdır. Yığma basıncı ise malzemelerin sıcak akma sınır değerine bağlıdır. Aşırı kaynak yığılmasına sebep olacak kadar yüksek, yetersiz kaynamaya neden olacak kadar da düşük olmamalıdır. Farklı malzemelerin kaynağında sıcak akma sınırı düşük olan malzeme esas alınarak yığma basıncı tespit edilir. Genel olarak yumuşak çeliklerin sürtünme basıncı 30–65 MPa, yığma basıncı 75-140 MPa iken orta ve yüksek karbonlu çeliklerin kaynağında sürtünme basıncı 70-210 MPa, yığma basıncı ise 100-420 MPa arasındadır.

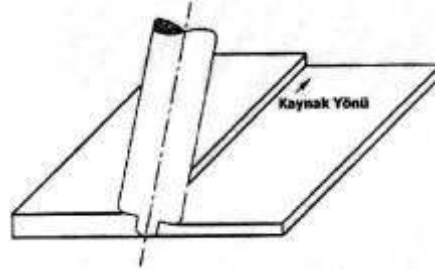
### 2.2.2.2 Sürtünme ve Yığma Süreleri

Sürtünme ve yığma süreleri malzemeye bağlıdır. Sürtünme süresi malzeme yüzeylerindeki pislik ve oksitleri temizleyebilecek gerekli plastisite için uniform bir kaynak bölgesi sıcaklığını sağlayabilecek düzeyde olmalıdır. Uygun bir kaynak bağlantısı için ısıtma süresi iyi tespit edilmelidir. Yetersiz ısıtma süresi kaynaktaki uygun plastisite değeri yakalayamadığı için birleşme yetersiz olacaktır. Aşırı ısıtma zamanı ise yığma basıncı sırasında fazla yığılmadan dolayı malzeme kaybına neden olacaktır.

### 2.2.2.3 Malzeme Kalınlığı

Bu kaynak yöntemi ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirme işlemi pimin eğik konumda levhalara daldırılması ile yapılabilmektedir. Ayrıca çift taraftan kaynak yaparak kalın parçalarında birleştirilmeleri mümkündür. Bu şekilde, 75mm kalınlığındaki 6082 Al alaşımı levhalar çift taraftan kaynak edilerek basarı ile birleştirilmiştir.

Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde batıcı pimin eğik konumda daldırılması ile Şekil 2.19 da şematik olarak görüldüğü şekilde farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi de sağlanabilmektedir (ÇAM 2002).



Şekil 2.19 Malzeme Kalınlığı (ÇAM 2002)

### 2.2.2.4. Karıştırıcı Uç Malzemesi ve Dizayını

Yöntemde, yüksek sıcaklıklarda aşınma direncine sahip malzemelerden üretilen, değişik tasarımlardaki, tükenmeyen döner takımlar kullanılır. Örneğin, Amerikan Deniz Kuvvetleri'nde ani saldırı ve hücum amaçlı ileri amfibik (hem karada hem suda hareket edebilen) aracın kaynak bağlantılarında H13 (X40CrMoV51) takım çeliğinden tek parça takımlar ve karıştırıcı uç kısmın malzeme olarak sıcakta yüksek mukavemete sahip olan MP 159 malzemesinden ve omuz kısmı ise H13 takım çeliğinden imal edilmiş ve iki parçalı olan takımlar kullanılmıştır.

Bu konudaki gelişmeler hızla devam etmektedir ve geliştirilen takım malzemeleri ile ilgili bilgilere ulaşmak oldukça zordur (MERT VE KALUÇ 2003).

Bu kaynak yöntemi geliştirildiğinde ilk kullanılan batıcı uçlar; yüzeyine helisel diş 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 (ÇAM 2003b).

Kaynağı zor veya daha kalın malzemelerde, plastik Sekil değiştiren kısmın, karıştırıcı uç kısım etrafındaki akısı, göz önünde tutulması gereken önemli bir noktadır. Eğer, oldukça geniş çapta karıştırıcı uç kısımlar gerekli ise çok geniş hacimli malzeme hareketi olacaktır. Takımlar, plastik Sekil değiştirebilen malzemenin, karıştırıcı uç kısım etrafındaki akısını artıracak şekilde geliştirilmelidir. Oldukça geniş hacimli karıştırıcı uç kısımlar, içi bos olarak tasarlanmıştır. Kullanılan karıştırıcı uç kısım profilleri, sürtünme karıştırma kaynak yönteminin kalitesini artırmak için vidaya benzer yivli veya sarmal yivli, mikser veya pervane şekilli olarak geliştirilmiştir. Mikser tip içi bos karıştırıcı uç kısma sahip takım, plastik sekil değiştiren malzemenin, karıştırıcı uç kısmın içinden geçmesine olanak sağlar. Benzer çaptaki dolu takımlar ile karşılaştırıldığında, daha az miktarda malzeme yer değiştirir (MERT VE KALUÇ 2003).

#### **2.2.2.5. Takım İlerleme Hızı ve Takım Devir Sayısı**

Sürtünme karıştırma kaynağında iki parametre çok önemlidir. Bunlar saat yönünde veya saat yönünün tersi yönde takımın devir sayısı ( $n$ , dev/dk) ve kaynak hattı boyunca takımın ilerleme hızıdır ( $V$ , mm/dk). Takımın dönmesi dönen pim etrafındaki malzemenin karışmasına sebep olur, takımın dönmesi karışan malzemeyi pimin önünden arkasına taşır ve kaynak prosesi sonlanır. Yüksek kaynak hızlarında asıl problem yeterli birleşmenin olmadığı soğuk kaynaktan kaçınmanın sağlanmasıdır.

Takımın yüksek devir sayılarında sürtünmenin fazla olması sebebiyle yüksek ısılar üretilir ve malzemenin daha kuvvetli karışmasına sebep olur (MİSHRA 2005).

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynaklanma hızının değişmesi malzeme sertliğini de değiştirmektedir. Artan kaynak ilerleme hızlarında sertlik değerleri de artmaktadır. Bunun nedeni yüksek kaynak hızlarında malzemeye aktarılan ısı girdisinin azalmasıdır.

#### **2.2.2.6. Kaynak Pozisyonu ve Birleştirme Geometrileri**

Sürtünen karıştırma kaynağında uygulanabilir birleştirme türleri; küt alın, bindirme, T-köse, dış ve iç köse, boyuna ve çevresel birleştirmelerdir. Ayrıca bu yöntem yerçekiminin etkisi olmadığından tüm pozisyonlarda rahatlıkla uygulanabilir.

Bu kaynak yöntemi ile düz ve çeşitli profillerdeki sac ve levhaların alın ve bindirme kaynağı yapılabilir. Al-alışımı veya mukavemeti düşük diğer malzemelerden T ve L profillerin üretiminde ve boru bağlantı kaynaklarında da bu yöntem kullanılabilir (ÇAM 2003b).

#### **2.2.3. İşlemin Hazırlanma Süreci**

Bir sürtünme karıştırma kaynağı yapmak için birleştirilecek olan parçalar, kaynak esnasında yana yukarıya ve ileriye doğru hareket etmelerini önlemek için bir destek parçasının üzerine sıkıca bağlanmalı ve sabitlenmelidir. Birleştirme esnasında iş parçaları yukarıya doğru kalkmaya, yana doğru kaymaya ve ileriye doğru itilmeye çalışacaktır. Bu sabitleme işlemi çeşitli hidrolik baskı pabuçları ile de yapılabilir. Ayrıca birleştirme hattında geometrik bozuklukların önüne geçilebilmesi için karıştırıcı ucun her iki yanında ve önünde baskı bilyesi kullanmakta mümkündür. Ucu özel olarak imal edilmiş silindirik kademeli bir karıştırıcı ucun dönmekte olan bir karıştırıcısı yavaşça birleşme hattı üzerine bastırılır.

Karıştırıcı ucun boyu istenilen kaynak derinliği ile aynıdır. Dönen karıştırıcının ucu işlenen yüzeye temas ettiği zaman meydana gelen sürtünme, karıştırıcı ucun temas ettiği noktayı aniden ısıtır ve böylece malzemenin mekanik direncini azaltır. Uygulanan kuvvet altında karıştırıcı uç malzemeyi, karıştırıcı uç omuzu da izlenen yüzeye temas edinceye kadar karıştırıcı uç ve onun hareket ettiği yönde zorlamakta ve yerinden

oyunmaktadır. Bu işlemde dönen karıştırıcı ucun meydana getirdiği sürtünme ısısı, karıştırıcı uç etrafında ve karıştırıcı uç omuzu altında yumuşamış bir metal tabakası oluşturur. Kaynak yapılacak parçaların veya karıştırıcının ileriye ve geriye hareket etmesi halinde, yumuşamış olan metal karıştırıcı ucun ön yüzü tarafından kaldırılır ve karıştırıcı ucun mekaniksel dönüşü yönünde ve bastırma hareketi ile karıştırıcı ucu arkasından dönerek sürüklenir.

Sonuç olarak karıştırıcı uç birleşme hattı içine girdikçe oluşan sürtünme birleşme yüzeylerini ısıtarak metali yumuşak hale çevirmekte, takiben birleşme hattını ezerek oksit filmi kırmakta, yumuşak metali karıştırarak birbirine birleştirmekte ve ileriye hareketi ile geride kalan birleşim soğuyarak katı hal kaynağı oluşturmaktadır. Tüm bunlar alaşımın ergime noktasının altında bir sıcaklıkta meydana gelir.

#### **2.2.4 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulandığı Malzemeler**

SKK; Al alaşımları, Cu alaşımları, Ti alaşımları, Mg alaşımları, çelikler, farklı alaşım ve metaller, plastiklerin kaynağında kullanılmaktadır.

##### **2.2.4.1 Bakır Alaşımları**

Çelik ve nikel alaşımlarına göre 10 ila 100 kat daha büyük olan yüksek termal yayılma gücü nedeniyle bakırın bilinen geleneksel kaynak yöntemleriyle kaynaklanması oldukça zordur. Bu sebepten dolayı bakırın kaynağı sırasında gerekli olan ısı girdisi çok yüksektir bu da oldukça düşük kaynak hızlarıyla sonuçlanır.

Sürtünme karıştırma kaynağı ile ise 1.5–50 mm kalınlıktaki bakır plakalarında uygulama başarıyla gerçekleştirilebilmektedir. İşlem sonrasında yapılan testlerde ise SKK uygulandığı bakır alaşımlarının çekme mukavemetlerinin ana malzeme ile benzer değerler verdiği görülmektedir.

SKK ile tungsten ark kaynağı ile yapılan birleştirmelerde elde edilen bazı özellikler benzerdir. Örneğin çözünmüş gaz (H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub>) miktarları her ikisinde de benzer olmasına

rağmen gaz tungsten ark kaynağında koruyucu gaz (helyum) kullanılırken SKK' da koruyucu gaz kullanılmamaktadır. SKK yapılmış bakır malzeme termal kararlılığı ile bakırın ve gaz tungsten ark kaynağı yapılmış bakırın termal kararlılığı benzerdir (MİSHRA 2005).

#### **2.2.4.2 Titanyum Alaşımları**

Her ne kadar birçok titanyum alaşımları gaz tungsten ark kaynağı gibi geleneksel ergitme prosesleri ile kaynak yapılabilse de kaynak sonrası ısıl işlem gerektirebilmektedir. Bu ilave işlem üretim maliyetini arttırmaktadır. Bir katı hal kaynak prosesi olan SKK' nın kaynak sonrası ısıl işleme olan ihtiyacı ortadan kaldırması beklenmektedir. Ne yazık ki titanyum alaşımlarının SKK ile ilgili bilgiler su an için yetersizdir.

İlk araştırmalar SKK' nın titanyum alaşımlarının birleştirilmesinde etkili bir kaynak yöntemi olduğunu gösterse de SKK sırasında mikro yapısal gelişimin anlaşılabilmesi için daha çok araştırma yapılması gerekmektedir (MİSHRA 2005).

#### **2.2.4.3 Çelikler**

Ergitme kaynağı proseslerine göre SKK' da ki düşük ısı girdisinin IEB' da daha az metalürjik değişiklik yapması ve kalın kesitli birleşmelerin kaynağında çok önemli olan çeliklerdeki distorsiyon ve kalıntı gerilmeyi minimize etmesi beklenmektedir.

Ayrıca çeliklerdeki hidrojen çatlak problemi ile SKK prosesinin katı hal kaynağı olusu sebebiyle karşılaşılmaz. Ek olarak katı hal SKK prosesinde, kaynakla ortaya çıkan kokulu gazlar da oluşmaz. Bu avantajlar SKK' nı çeliğin birleştirilmesinde birçok uygulama için avantajlı hale getirmektedir.

SKK' nın çeliklerde uygulanabilirliği üzerine yapılan araştırmalar SKK' nın farklı çelik tiplerinin birleştirilmesi uygulamalarında kullanılabilirliği açısından ümit vericidir.

Bunların yanında çeliklerin SKK'ında kullanılan uygun takım malzemelerinin seçimi kritik bir konudur. SKK için temel gereksinim takım ve is parçası malzemesi arasında sertlik ve yüksek sıcaklık özellikleri arasındaki uygun farkı korumaktır. Çünkü çelikler çok yüksek sertliğe ve yüksek sıcaklık özelliklerine sahiptir. Takım malzemesinin 1000°C ve üzerindeki sıcaklıklarda iyi aşınma direnci ve tokluk göstermesi önemlidir (MISHRA 2005).

#### 2.2.4.4 Magnezyum Alaşımları;

Magnezyum alaşımlarının SKK'nın kalitesi devir sayısı ve ilerleme hızı ile ilgilidir. Genellikle bir sıvı faz oluşumuyla sonuçlanmaz. Alüminyum alaşımlarının SKK'da olduğu gibi Mg alaşımlarının SKK'da da üç mikro yapısal bölge bulunmaktadır. Bunlar karıştırma bölgesi (kaynak metali), ısı etkili bölge ve termomekanik etkilenen bölgedir. Magnezyum alaşımlarının SKK'da karıştırma bölgesinde ince yeniden kristalleşmiş taneler meydana gelmektedir. Dökülmüş magnezyum alaşımlarında ise kaba  $\alpha$ -Mg fazı ve  $\beta$ Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> intermetalik bileşiği SKK dan sonra kaybolmaktadır.

Karıştırma bölgesinin sertliği genellikle bu bölgedeki ince tane yapısı yüzünden ana metalden daha serttir. Dövme magnezyum alaşımları AZ31B-H24 ve AZ61' de çekme değerlerinde azalma gözlenirken AZ91 gibi döküm magnezyum alaşımlarında çekme değerlerinde iyileşme vardır (MISHRA 2005).

#### 2.2.4.5 Farklı Alaşım ve Metaller

SKK farklı alaşım ve metallerin kaynaklanmasında kullanılan yeni bir kaynak yöntemi olarak tanımlanabilir. Farklı alüminyum alaşımlarının ya da bakır alaşımlarının birbirleriyle veya alüminyum alaşımlarının diğer metallerle kaynaklanması konularında çalışmalar yapılmaktadır. Çok sert bir alüminyum alaşımının çok yumuşak bir alüminyum alaşımıyla karıştırılması durumunda kaynak verimliliğinin azaldığı gözlenmektedir..

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi gerek yaşlandırma sertleştirilmesi yapılan gerekse yaşlandırma sertleştirilmesi yapılamayan (1 xxx ve 5xxx serileri gibi ısıtılma



duyarlı olmayan) Al-alaşımalarında başarı ile kullanılabilir. Bu yöntem ile elde edilen birleştirmelerin yüzey kalitesi ark kaynağı ile elde edilen birleştirmelerden çok daha yüksektir.

Buna ilaveten, bu yöntem ile kaynak edilen 5454 alüminyum alaşımının korozyon performansının da oldukça iyi olduğu tespit edilmiştir. Hatta geleneksel kaynak yöntemleri ile kaynağı çok güç olan 7075 alüminyum alaşımı bile bu yöntem ile başarılı bir şekilde birleştirilmiş ve elde edilen birleştirmeler oldukça iyi mekanik özellikler göstermiştir.

Bu kaynak yöntemi ile farklı kalınlardaki levhaların birleştirme işlemi pimin eğik konumda levhalara daldırılması ile yapılabilir. Bu kaynak yöntemi ile tek pasoda 50 mm kalınlığa kadar Al-alaşımındaki levhaların alın kaynağı yapılabilir. 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. Bu kaynak metodu ile düz ve çeşitli profillerdeki sac ve levhaların alın ve bindirme kaynağı yapılabilir. Al-alaşımı veya mukavemeti düşük diğer malzemelerden T ve L profillerin üretiminde ve boru bağlantı kaynaklarında da bu yöntem kullanılabilir.

Al-alaşımaları 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-Al 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.

Önceki çalışmalar göstermiştir ki; farklı metallerin ( alüminyumun bakıra kaynağı gibi ) SKK kusursuz bir kaynak ile sonuçlanmamaktadır. Fakat son zamanlarda yapılan bazı çalışmalarda alüminyumla çelik ve alüminyumla magnezyum gibi farklı metallerin SKK ile birleştirilmelerinde başarılı sonuçlar alınmıştır. Alüminyum/ çelik SKK

birleştirmelerinde alüminyum ve demir arasında çelik parçalar ve intermetalikler bulunmuştur

SKK yöntemi, 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 deneylerde, kaynak esnasında ince yeniden kristalleşmiş tane yapısının oluşmasından dolayı, numunelerin mukavemeti ile baz malzemenin mukavemet değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu saptanmıştır (MISHRA 2005).

#### **2.2.4.6 Plastikler**

Plastikler birçok uygulamada kullanılmaktadır ve verimli bir şekilde birleştirilmeleri önemlidir. Plastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı basit birkaç adımda yapılmaktadır. Dönen bir takım sıkıca bağlanmış iki is parçasının arasına dalmaktadır.

Pim ve is parçası arasındaki sürtünme malzemenin ısısının yükselmesine sebep olur ve takım birleşme hattı boyunca hareket eder. Malzeme takım etrafında hareket ederken kaynak bölgesinde karışır. Proses süresince birincil ısı üretimi takım ve is parçası arasındaki sürtünme ile olur. Bununla beraber polimerler, artan sıcaklıkla kendiliğinden yağlanma eğilimindedir bu nedenle sık sık dış ısı ilavesi gerekir.

Kaynaklı parça soğurken tüm kaynak boyunca uniform soğuma hızının yükseltilmesi çok önemlidir. Eğer dışarıdaki malzeme içeriğekine göre daha hızlı soğursa katı bir kabuk oluşur. İçerdeki tabakalar daha geç soğuduğu için malzeme büzülür ve kabuktan ayrılır (STRAND 2003).

### 2.2.5 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yönteminin Kullanım Alanları

Uzun sayılabilecek bir tarihe sahip olmamasına karşın bu kaynağın kullanım alanları hiçte azımsanacak bir seviyede değildir. Endüstriyel açıdan kullanımı günden güne artmaktadır. Uzay, havacılık, deniz taşımacılığı gibi yüksek gelirli sektörlerde bu konuda başı çekmektedir.

#### 2.2.5.1 Uzay ve Havacılık Endüstrisinde Kullanım

1993 yılında NASA, Lockheed Martin Laboratuvarlarından, Space Shuttle External Tank projesinde (uzay mekiklerinin yakıt tanklarında) AA2219 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 External 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 (ÇAM 2003b).

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 (EREN 2005).

Ayrıca bu tip endüstriler de kullanılan yüksek mekanik özelliklere sahip titanyum alaşımlarında sürtünme karıştırma kaynağı denemeleri başarı ile gerçekleştirilmiş ve çalışmalar devam etmektedir. 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 2003a)

#### **2.2.5.2 Gemi Endüstrisinde Kullanım**

Sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili ilk ticari uygulamalar, balıkçı gemilerinin derin dondurucularının oluklu alüminyum panellerinde kullanılarak başlamıştır. Bu kaynak yöntemindeki minimum çarpılma ve yüksek verimlilik, teknik ve ekonomik yönden sert panel üretiminde bu işlemi cazip kılmaktadır. Bu yöntem ile Japonya'da alüminyum petek paneller ve deniz suyunun korozyon etkisine dayanıklı panellerin üretimleri yapılmaktadır (ÇAM 2003a).

Yüksek hız feribotlarında kullanılan standart boydaki alüminyum ekstrüzyon panelleri sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmektedir. Ergitme kaynaklarına kıyasla ısı girdisinin düşük olması panellerdeki çarpılma ve kalıntı gerilmelerini minimum düzeyde olmasını sağlamaktadır. Norveç'te bulunan Hydro Marine Aluminum firmasında son üç yılda 70 kilometre uzunluğunda gösterilen alüminyum ekstrüzyon paneli sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir (ÇAM 2003b).

### 3.5.3 Otomotiv Endüstrisinde Kullanım

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. 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 azaltışını mümkün hale getirecektir. Özellikle, Mg-alaşımlarının otomotiv sektöründe bu yeni kaynak teknolojisi sayesinde kullanımı ile ağırlıktan tasarruf daha da artırılabilir (ÇAM 2003b).

### 3.5.4 Demiryolu Taşımacılığı Endüstrisinde Kullanım

Modern yolcu treni vagonlarının imalatında, alüminyum ekstrüzyonlardan üretilen petek paneller daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu panellerde, uzun Al – ekstrüzyonlar aralarına sıklık artırıcı destekler yerleştirilerek birleştirilmektedir. Bu sayede, hem çarpışmalarda emniyet hem de bükme kuvvetlerine dayanımı artırmaktadır. Klasik ergitme kaynağı, özellikle yüksek mukavemetli Al-alaşımlarındaki IEB 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 Alaşımı petek paneller kullanılmaya başlanmıştır. Eritme kaynak yöntemiyle kaynatılamayan malzemelerin SKK ile kaynatılabilmesi uygulama alanının genişlemesine sebep olmuştur (ÇAM 2003a).

### 2.2.6 Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları

Uygulaması zor bir yöntem olsa da sürtünme karıştırma kaynağı özellikle alüminyum ve alaşımlarının kaynağında avantaj sağlamaktadır. Yüksek et kalınlık alüminyum plakaları diğer kaynak yöntemlerine oranla daha hızlı ve kaliteli bir şekilde kaynaklamak mümkün olmaktadır. Çeliklerde ise bu kaynak yönteminin uygulanması, işlemin yüksek ısı ihtiyacı ve bu ısıya dayanabilen karıştırıcı uçun mevcut olmaması nedeni ile mümkün olamamaktadır.

Sürtünme karıştırma kaynağı uygulandığı malzeme için belli sınırlamalara sahipse de, bilinen diğer kaynak işlemlerine göre avantajlara da sahiptir. Sürtünme kaynağının avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Erimeyi kolaylaştıran malzeme (Flux dolgu malzemesi) ve koruyucu atmosfere gerek yoktur.
- Elektrik gücü ve toplam enerji gereksinimi diğer kaynak işlemlerinin sadece küçük bir oranı kadardır.
- İşlem diğer kaynak işlemlerine nazaran daha temizdir. Çok az atık vardır. Ark gaz çıkışı oluşmaz.
- Isıdan etkilenmiş olan alan çok dardır ve gözenek ölçüsü ana malzemenin gözenek ölçüsünden daha küçüktür.
- Farklı özellikteki malzemelerin birbirleri ile birleşmesine uygundur. Eritme kaynağı ile birleştirilemeyen malzeme ve kompozitler sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirler.
- Alüminyum alaşımların üzerinde bulunan ince oksitlenmeler temizlenmeden kaynak işlemine geçilebilir.
- Katı hal birleşme tekniği olduğundan, alüminyum alaşımları birleştirmede katılaşma ve sıvılaşma çatakları görülmez.

- Uygun kaynak parametreleri ve karıştırıcı uç kullanıldığında, diğer birleştirme teknikleri ile yapılanlardan daha iyi hale gelir. Çekme, yorulma ve kopma mukavemetleri daha yüksektir.
- 2000 ve 7000 seri alüminyum alaşımların birleştirilmesine uygundur.
- Karıştırıcı ucun HSS kalitesinde yapılması, çok fazla parçanın kaynağın yapılmasını sağlayabilir.
- Alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde plastik deformasyon sayesinde, ana metale göre kaynak metalinde daha ince taneli bir yapı ve kristalleşme meydana gelir.
- Sürtünme karıştırma kaynağında buharlaşma olmadığından, ana metalde eksilme olmaz.
- İnsan sağlığına zararlı kaynak dumanı, radyasyon v.b. etkileri karşılaşılmaz.
- Kaynak yapımında, eriyik metal ve ark oluşumu yoktur.
- Malzeme çarpılması azdır. Malzeme uzun olduğu sürece oluşur.
- Kullanılan aparata göre değişik kalınlıklardaki alüminyum alaşımları, tek bir karıştırıcı uç ile gerçekleştirilebilir.
- Kaynak metalinde gözenek problemi yoktur.
- İstenilen tüm kaynak pozisyonları için uygundur.
- Enerjiden tasarruf sağlayan kaynak tipidir.
- Eriyen ilave metal kullanmaya gerek yoktur.
- Koruyucu maske ve gaz kullanımına gerek yoktur.
- Kalifiye işçiliğe gerek duyulmaz.
- Kaynak sonrasında oluşan çapakların temizlenmesinde başka herhangi bir taşlama ve fırçalamaya gerek yoktur. (DOĞAN 2006)

## 2.3. ALÜMİNYUM

Ticari olarak alüminyum üretimi 1889 yılında başlamıştır. 1914 yılına kadar elektroliz dışı yöntemler ile üretilmiş olsa da çok pahalı bir metal olması sebebiyle endüstri de kullanımını alçak bir seviye de kalmıştır.

Elektroliz yöntemi ile üretim bulunduktan sonra ancak geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Günümüzde çelikten sonra en çok kullanılan metalik malzeme alüminyum ve alaşımlarıdır.

Alüminyum yer kabuğunda çok fazla bulunan bir elementtir. Toprağı oluşturan kil tabakaları esas olarak alüminyum silikat bileşiğidir. Yer kabuğunda demir yaklaşık %5 oranında bulunduğu halde alüminyum %8 oranında bulunur. Buna rağmen bu bileşikten alüminyum üretilemez. Alüminyum ancak bauxite mineralinden üretilir. Bauxite esas olarak monohidrat alüminyum oksittir ( $Al_2O_3 \cdot H_2O$ ). Bu mineralin içinde safsızlık olarak demir oksit, silis, kil ve titanyum oksit bulunur (YALÇIN ve GÜRÜ 2002).

### 2.3.1. Alüminyum (Temel Özellikler)

Saf Alüminyum parlak gümüş rengindedir. Alüminyumun hem sünebilirlik ve hem de dövülebilirlik özelliği iyidir. 0,008 mm kalınlığına kadar ince plaka yapılabilir. Yoğunluğu çeliğin yoğunluğunun yaklaşık üçte biri kadardır.



### **2.3.1.1. Dayanım/Yoğunluk Oranı**

2,70 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğunda olan alüminyum ve alaşımlarında dayanım/yoğunluk oranı oldukça yüksektir. Bu nedenle alüminyum, hafif olması istenilen uçak vb. yapılarda en uygun malzemeyi oluşturur.

### **2.3.1.2. Elektrik İletkenliği/Yoğunluk Oranı**

Alüminyumun önemli özelliklerinden biri, elektrik iletkenliğinin yüksek oluşudur. Bakırın yaklaşık %65' i kadar iletkenliğe sahiptir.

Bu nedenle elektrik iletkenliği/yoğunluk oranı, tüm metallere göre alüminyumda en yüksektir. Bu özelliği nedeniyle yüksek gerilim hatlarında bakırın yerini almaktadır.

### **2.3.1.3. Korozyon Dayanımı;**

Atmosfere ve diğer birçok ortama karşı alüminyumun korozyon dayanımı oldukça yüksektir. Alüminyum demirden daha aktif bir metal olmasına karşın korozyona daha dayanıklı oluşu alüminyum yüzeylerinde oluşan ince bir oksit tabakası ile açıklanmaktadır.

Kuru atmosferde alüminyum yüzeyinde yaklaşık 2,5–3 mm kalınlığında koruyucu bir oksit tabakası meydana gelmektedir. Ortamdaki nem oranı arttıkça bu tabakanın kalınlığı da artmakta ve neme doymuş ortamlarda iki katına kadar çıkabilmektedir. Eloksal ve benzeri anodik oksidasyon gibi yüzey işlemleriyle bu oksit tabakasının dayanımı daha da arttırılabilmektedir (SERFİÇELİ 2000).

Belirgin bu özelliklerine ilave olarak alüminyum ve alaşımlarının soğukta bile çok iyi şekil alabilir olması ve folyo gibi çok ince levha haline getirilebilmesi ve ısı iletme kabiliyetinin de yüksek olduğu da söylenebilir.

Bu üstünlüklerine karşın, saf halde çekme dayanımı ve akma sınırı değerlerinin düşük ve lehimle birleştirilmesinin zorluğu, talaşlı şekillenebilirliğinin iyi olmaması ve bazlara, hidroksitlere karşı dayanıksızlığı gibi iyi olmayan özellikleri vardır. Ancak alaşımlama yapılarak bu özelliklerde de düzeltme sağlanabilmektedir

### 2.3.2 ALÜMİNYUMUN BAZI FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Çizelge 2.2 de görülen değer interaktif olarak kullanım imkanı bulunan MATWEB internet sitesinden faydalanarak oluşturuldu.

Çizelge 2.2. Al Fiziksel Özellikler (<http://www.matweb.com/>)

<b>Yoğunluk</b>	2,70 g/cm <sup>3</sup>
<b>Erime Sıcaklığı</b>	660°C
<b>Erime Isısı</b>	386 kJ/kg
<b>Isıl Genleşme Katsayısı</b>	24*10 <sup>-6</sup> 1/K
<b>Özgül Isı</b>	0,90 kJ/kg.K
<b>Isı İletme Katsayısı</b>	229 W/m.K
<b>Elektriksel Rezistivite</b>	2,67*10 <sup>-8</sup> Ohm.m
<b>Çekme Gerilmesi</b>	62 MPa
<b>Elastisite Modülü</b>	65 GPa
<b>Sertlik</b>	15 Brinel (500 kg, 10 mm bilya)

### 2.3.3. ALÜMİNYUM ÜRETİMİ

#### 2.3.3.1. Bayer Prosesi

Alüminyum üretiminin yapıldığı temel cevher boksittir. Boksit cevherleri içinde bulunan en önemli mineraller Gibsit,  $\text{Al}(\text{OH})_3$  veya  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , ile diasporit ve böhmittir,

Alüminyum, tüm dünyada aynı yöntemle elde edilmektedir. Alüminyum eldesi, iki aşamada gerçekleşir. İşlem adımları Şekil 2.20 de gösterilmiştir

Birinci aşamada, Bayer metodu ile boksit cevherinden alümina elde edilir.

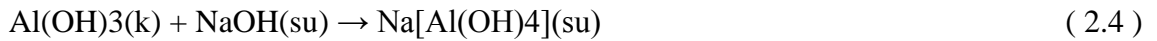
İkinci aşamada ise, elektroliz ile alümina'dan alüminyum elde edilir.

Alümina tesisleri, genellikle boksit cevherlerinin yanına kurulur. Madenden çıkarılan boksit cevheri, özel bir eriyiğin ilavesi ile alüminyum hidroksit eldesi gerçekleşir.

Bu işlem sonucunda oluşan erimeyen kalıntılar (kırmızı çamur) ayrılır ve alüminyum hidroksitin kalsinasyonu ile "alümina" (alüminyum oksit) elde edilir.

Boksitteki minerallerin cinsine göre  $150\text{-}250^\circ\text{C}$  de ve  $10\text{-}30$  atm basınç altında ve değişen NaOH konsantrasyonlarında işlenir.

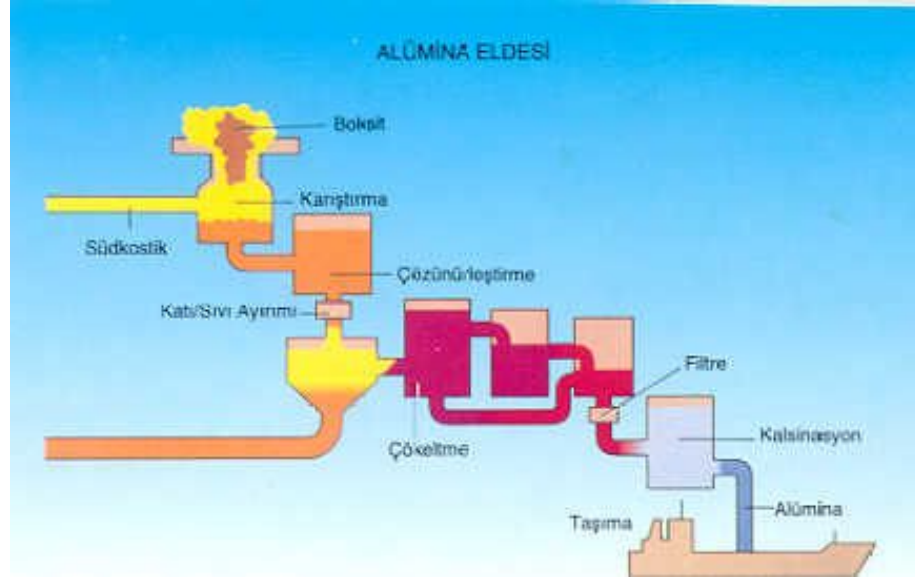
Cevherdeki alüminyum,



ve/veya



Reaksiyonlarına göre sodyum alüminat şeklinde çözeltili alınır. Boksit otoklavlarda basınç altında çözündürüldükten sonra katı-sıvı ayrımı için filtrasyon kademesine geçilir. Bu kademedeki kırmızı çamur adı verilen atık madde ayrıştırılır, çözeltili 60°C sıcaklığına kadar soğutulur ve çöktürme tanklarına gönderilir.



Şekil 2.20 Bayer Prosesinde Al Üretimi (ZEYTİN, 2000)

3000 m<sup>3</sup> büyüklüğüne kadar yapılabilen çöktürme tanklarında çözeltili devamlı karıştırılarak Al(OH)<sub>3</sub> çöktürülür. Toplam çöktürme işlemi 30 ila 70 saat içinde tamamlanmaktadır.

Çöktürme işlemi ile elde edilen Al(OH)<sub>3</sub> termik ayrışma işlemine tabi tutularak yani kalsinasyonla alüminaya (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dönüştürülür.



Kalsinasyon işlemi klasik olarak sıvı yakıt veya doğal gaz ile ısıtılan döner fırınlarda 1200–1250°C de gerçekleştirilir. Kalsinasyon sonucu elde edilen ürün alüminadır (ZEYTİN, 2000).

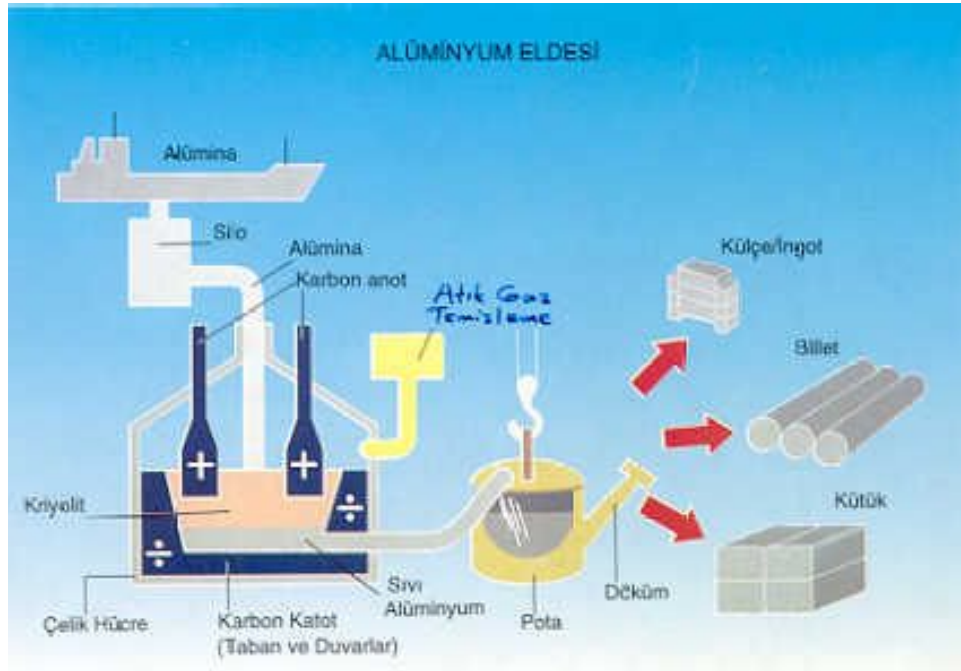
Bu arada elde edilen ürünün yaklaşık %50 si bacaya gider. 250–300°C sıcaklıklarda multisiklonlarda (toz tutucu) katı parçacıklar geri kazanılarak verim %95-98 miktarına yükseltilir.

### 2.3.3.2. Alüminadan Alüminyum Üretimi

Bundan sonraki aşama, alüminanın alüminyuma dönüştürülmesidir. Beyaz bir toz görünümündeki alümina, elektroliz işleminin yapılacağı hücre adı verilen özel yerlere alınır. Şekil 2.21’de şematik gösterimde işlem adımları görülmektedir.

Burada amaç, alüminyumu oksijenden ayırmaktır. Elektroliz işlemi için 4-5 volt gerilimde doğru akım uygulanır.

Dipte biriken alüminyumun alınması ile işlem tamamlanır.



Şekil 2.21 Alüminadan Alüminyum Üretimi (ZEYTİN, 2000)

Alüminadan alüminyum üretimi redüksiyon elektrolizi ile gerçekleştirilmektedir. 19.yüzyılın ortalarında Saint Claire Deville, alüminyum oksidin bir kriyolit tipi sıvı fazdan elektroliz yoluyla redüklenebileceğini gösterdikten sonra uygulamaya konan ve Hall-Heroult prosesi adı altında tanınan işlem genelde günümüzde halen uygulanmaktadır.

Banyonun tabanı ve kendisi karbon bloklardan yapılmıştır. Bu bölüm aynı zamanda hücrede katot görevini yapmaktadır. Buradan akım girişi alüminyum baradan olmakta ve banyo tabanınca katot barası olarak çelik kullanılmaktadır. Anot olarak karbon bloklar kullanılır.

Anotlara akım iletimi alüminyum baradan olup anotla bağlantı çelikten yapılmaktadır. Banyo tabanı ısı kaybını önlemek amacıyla refrakter malzeme ile izole edilmiştir. Banyonun tümü bir çelik çerçeve içinde bulunmaktadır. Elektrolit içinde çözülmüş olarak ortalama %5 civarında  $Al_2O_3$  içeren kriyolit ( $Na_3AlF_6$ ) eriyiğidir. Elektrolit sıcaklığı  $950-970^{\circ}C$  civarındadır. Bunun için gerekli ısıyı elektrik enerjisi sağlar. Anot, sıvı elektrolit içine daldırılmıştır.

Bu son katkılardan LİF iletkenliği artırıcı etki yapar ve yoğunluğun düşmesine etkilidir. Ergime sıcaklığında elektrolitin yoğunluğu  $2,1 \text{ g/cm}^3$  kadardır. Banyodan akım geçmeye başlamasıyla alüminyum oksit parçalanır. Sıvı halde edilen alüminyumun yoğunluğu  $2,3 \text{ g/cm}^3$  olduğundan elektrolitten daha ağırdır ve banyonun tabanında toplanarak aynı zamanda katot görevi yapar.

Genel olarak, ağırlıkça 4 birim boksitten 2 birim alümina ve 2 birim alüminadan da 1 birim alüminyum elde edilir. İlk zamanlarda üretilen birincil alüminyumun her tonu için 42.000 kwh olan enerji sarfiyatı, günümüzde ortalama 16.500 kwh değerine düşmüştür. Bu değer, en yeni teknoloji ile çalışıldığında 13.000 kwh/t olmaktadır. Yukarıda sözü edilen işlemler ile elde edilen alüminyum birincil alüminyum (primer alüminyum) olarak tanımlanır (ZEYTİN, 2000).

### 2.3.4 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyum esaslı malzemelerde, başlıca önemli alaşım elementleri Mg, Si, Zn ve Cu' dır. Bu elementler tek tek ya da birkaçı birlikte alaşımında belirli özelliklere ulaşmak için katılırlar. Alüminyum bu elementler ile yaptığı alaşımlar, mekanik özelliklerini iyileştirme açısından önem taşır. Bunlar dışında pek çok element ile alaşım yapabilme yeteneğine sahip olan alüminyum, bu üstünlüğü nedeniyle birçok alaşımıyla karşımıza çıkar.

Alüminyum alaşımları; plastik şekil verme yöntemleriyle şekillendirilmiş dövme alüminyum alaşımları, ergitme ve katılaştırma işlemleri ile şekillendirilmiş döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki grupta sınıflandırılır (WILLIAM 2002).

#### 2.3.4.1 Dövülebilen Alüminyum Alaşım Grupları

Ana alaşım elementi Alaşım sayısı

- Minimum % 99 Al 1XXX
- Bakır 2XXX
- Mangan 3XXX
- Silisyum 4XXX
- Magnezyum 5XXX
- Magnezyum+Silisyum 6XXX
- Çinko 7XXX
- Diğer elementler( Lityum dahil) 8XXX
- Kullanılmayan seri 9XXX

Dövülebilen alüminyum alaşımlarını tanımlamak için dört rakamlı bir işaret kullanılır. İlk rakam belirli alaşım elementlerini içeren alaşım grubunu belirtir. Son iki rakam alüminyum alaşımını tanımlar veya alüminyumun saflığını belirtir. İkinci rakam başlangıçtaki alaşım üzerinde yapılan değişiklikleri veya katışkı sınırlarını belirtir.

Dövülebilen alüminyum alaşımları için menevişleme işaretleri bir uzatma işareti ile ayrılmıştır (örneğin 1100-0). Bu işaretleri ifade ettikleri özelliklerine göre Çizelge 2.3 de görmekteyiz. Ana menevişleme işleminin alt grubu, harflerle belirtilen ana menevişlemeyi izleyen ek bir rakam daha alır (WILLIAM 2002). (örneğin 1100-H14)

Çizelge 2.3 Alüminyum Isıl İşlem İşlemleri

<b>F</b>	Üretildiği gibi. Deformasyon sertleşmesinin miktarı üzerinde bir denetim yok, mekanik özellikler sınırı yok
<b>O</b>	Tavlanmış ve yeniden kristallenmiş. En düşük dayanımı ve en yüksek süneklilik için menevişlenmiş.
<b>H</b>	Deformasyon sertleşmesi yapılmış.
<b>T</b>	F veya O' dan başka kararlı menevişler için ısıtım işlem görmüş

#### 2.3.4.2. Döküm Alüminyum Alaşım Grupları

Döküm alüminyum alaşımları ANSI' YE (American National Standards Institute) göre aşağıdaki gibi gruplandırılmıştır.

##### **Ana alaşım elementi Alaşım sayısı**

- Minimum % 99 Al 1XX.0
- Bakır 2XX.0
- Silisyum , bakır ve magnezyum 3XX.0
- Silisyum 4XX.0
- Magnezyum 5XX.0
- Kullanılmayan seri 6XX.0
- Çinko 7XX.0
- Kalay 8XX.0
- Diğer elementler 9XX.0



**Alüminyum-Bakır Alaşımları (2XXX serisi);** Duralüminyum olarak adlandırılan alaşımlar bu grup içerisinde yer alır. %2 – 6 oranında bakır içeren bu alaşımlar en yaygın kullanılan alüminyum alaşımıdır. Korozyona karşı direnci diğer alaşım gruplarına göre düşüktür. Ancak yüksek sertlik ve mukavemet gösterirler.

Temel alaşım elemanı bakır olan bu alaşımın optimum özellikleri için çökelme ısıl işlemi uygulanır. Al – Cu alaşımlarının yaslanma sırasında meydana gelen karmaşık değişikliklere rağmen diğer sistemlerden daha detaylı çalışılmıştır. İyi islenme özellikleri gereken yerlerde (2011), bağıl olarak artan sıcaklıklarda iyi sürünme dayanımıyla birlikte oda sıcaklığında yüksek çekme mukavemetine ve çok düşük sıcaklıklarda yüksek sağlamlığa sahip olması istenen yerlerde (2219), geniş olarak kullanılmaktadır.

Çoğunlukla araç ve uçak tekerlerinde, araçların süspansiyon parçalarında, uçak gövdelerinde ve 150 °C' ye kadar olan sıcaklıklarda dayanım gerektiren parçalarda kullanılır (WILLIAM 2002).

**Al-Si-Mg Alaşımları (3XXX serisi);** içyapısında %1,3'e kadar Si ve Mg eşit olarak bulunur. Az miktarda bakır, krom ya da kurşun, yaşlandırma durumunda korozyon direncini ve dayanımını artırmak amacıyla ilave edilir. Genellikle 3XXX serisi alaşımlar orta derecede dayanımla birlikte yüksek yumuşaklık ve mükemmel korozyon direnci gerektiğinde kullanılır. Yaprak şeklinde sunulan 3003 serisi yaygın olarak kullanılır. Vida, makine parçaları, mobilya ve köprü taşıma elemanları üretiminde kullanılır (WILLIAM 2002).

**Alüminyum-Silisyum alaşımları (4XXX serisi);** 4XXX serisi Al alaşımlarında ana alaşım elemanı silisyumdur. Si alüminyuma yeterli miktarlarda (%12'ye kadar) ilave edilerek alaşımı gevrekleştirmeden ergime derecesinin azalmasına neden olur. Bu nedenle, Al – Si alaşımları alüminyum birleştirmede esas metalin ergime sıcaklığından daha düşük ergime sıcaklıklarında sert lehim alaşımı olarak ve kaynak telinde kullanılır (WILLIAM 2002).

Tuzlu ortamlarda oluşan korozyona karşı yüksek dayanımları nedeniyle deniz ulaşımında kullanılan taşıtların yapımında kullanılmalarına olanak sağlar. Yaygın olarak kullanılan döküm alaşımlarıdır.

Bu gruptaki alaşımların çoğuna ısıtıl işlem uygulanamaz. 4032 alaşımı düşük ısıtıl genleşme katsayısı ve yüksek aşınma direncine sahiptir ve bu nedenle bu alaşım dövme motor pistonlarının üretimine uygundur.

**Alüminyum-Magnezyum Alaşımları (5XXX serisi);** Al içinde Mg oranı % 0,8'den % 5'e kadar değişen oranlarda kullanılır. Tavlanmamış durumdaki dayanım değerleri (%0,8 Mg içeren 5005 için) 40 MPa akma ve 125 MPa çekme ile (5456 için) 160 MPa akma ve 310 MPa çekme arasında değişir. Uzamalar bağıl olarak yüksektir. Döküm alaşımı olarak tanınırlar ve korozyon dirençlerinin yüksekliği otomotiv ve uçak üretiminde kullanılmalarına olanak sağlar. İyapılarında %10' a kadar magnezyum vardır. Ayrıca Damperli kamyon gövdeleri, petrol, süt ve tahıl taşımak için geniş tanklar ve özellikle düşük sıcaklıklarda depolama gerektiren basınçlı tanklar başlıca kullanım alanlarıdır (WILLIAM 2002).

**Alüminyum-Çinko Alaşımları (7XXX serisi);** İyapılarında %1–7,5 çinko ve %3,3 magnezyum vardır. Krom ve bakır dayanımı artırmak amacıyla alaşımına ilave edilebilir. Bu son ilaveler, kaynak yeteneğini olumsuz yönden etkiler. En yüksek dayanımlı alüminyum alaşımları bu grup içerisinde yer alırlar. Yapısal malzeme olarak uçak yapımında kullanılır (WILLIAM 2002).

### 2.3.4.3 Alaşım Elementlerinin Etkileri

**Bakir;** % 12 Cu' a dek dayancı arttırır, daha fazlası gevreklik yaratır; genellikle yüksek sıcaklık özellikleri ile islenebilirliği artar

**Çinko;** Dökülebilirliği düşürür; yüksek çinkolu alaşımlar sıcak çatlama ve soğuma çekmesi gösterirler; % 10 Zn' dan yüksek gerilim yenimi çatlama gösterir; diğer alaşım elementleri ile birlikte dayancı çok arttırır; %3 Zn' dan daha az çinko içeren ikili alüminyum alaşımlarda belirgin bir etkisi yoktur.

**Demir;** Alüminyum cevherlerinde doğal katişi olarak bulunur; az oranlarda bazı alaşımların sertlik ve dayancını arttırır; dökümleri sıcak çatlama eğilimlerini azaltır.

**Magnezyum;** Kati çözelti sertleşmesi yaratır; % 6' dan fazla magnezyum içeren alaşımlarda çökeltme sertleşmesi olur; dökümleri zordur.

**Mangan;** Dökülebilirliği arttırmak için demir ile birlikte kullanılır; metaller arası bileşiklerin özelliğini değiştirir; çekmeyi azaltır, alaşımların süreklilik ve tokluk özelliklerini arttırır.

**Silis;** Akışkanlığı arttırır; sıcak çatlama eğilimini azaltır; %13' den fazla silis içeren alaşımların islenmesi çok zordur; yenim direncini arttırır.

### 2.3.5 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ

Alüminyum ve alaşımlarına uygulanan ısı işlemlerin genel tipleri:

- Dokum yapıların kimyasal segregasyonunu azaltmak ve islenebilirliğini geliştirmek için on ısıtma veya homojenleştirme,
- Deformasyon sertleşmesi (pekleşme) ve ısı işlem görmüş alaşımlı yapıları yumuşatmak, gerilimleri gidermek ve özellikleri ve boyutları sabitleştirmek için tavlama,

- Alaşım elemanlarının katı çözeltilisini gerçekleştirmek ve mekanik özellikleri geliştirmek için çözelti ısıtma işlemi,
- Katı çözeltiden elemanların çökmesiyle sertleşme sağlamak için çökeltme ısıtma işlemleri olarak sayılabilir (KUMRU 2007).

### 2.3.5.1. Homojenleştirme

İngotlar yarı bitmiş şekillerde üretilmeden önce yaklaşık 450 – 600 °C civarındaki bir sıcaklıkta homojenize etmek gerekir. Bu işlem aşağıdaki amaçlarla yapılır;

- Mikrosegregasyon etkilerini azaltmak,
- Çalışma esnasında çatlamaya neden olabilen, dengesiz, düşük ergime noktasına sahip otektikleri kaldırmak,
- Katılma sırasında çözünmüş elementlerin aşırı konsantrasyonlarını kontrollü çökeltmek.

- 

Homojenleştirme, alaşım elementlerinin tane sınırlarından ve diğer çözelti zengini bölgelerden tane merkezlerine difüzyonu ile gerçekleşir. Tane boyutu (veya dentrit kol boşluğu) ve alaşım elementlerinin difüzyon hızına bağlı olarak gerekli süre değişir (KUMRU 2007).

### 2.3.5.2. Tavlama

Isıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alüminyum alaşımlarında soğuk deformasyonun etkisini ortadan kaldırmak amacıyla 300 – 450 °C sıcaklık aralığında tavlama işlemi yapılır. Malzemenin yumuşama derecesi, öncelikle tavlama sıcaklığına bağlıdır. Verilen bir malzemenin yumuşaması için gerekli zaman; düşük tavlama sıcaklıklarında saatlerden, yüksek sıcaklıklarda dakikalara kadar değişebilir. Alüminyum alaşımlarına uygulanan tavlama işlemleri hedeflenen amaca göre değişik şekillerde olabilir. Tavlama süresi ve sıcaklığı malzemenin ilk içyapısı ve ısıtma işlemine göre değiştiği gibi alaşımın çeşidine göre de değişir

### **2.3.5.3. Gerilim Giderme Tavlama**

Bu tavlama işlemi, ısıl işlem uygulanabilen işlenik alaşımlarda sadece deformasyon sertleşmesinden meydana gelen etkileri uzaklaştırmak için yapıldığından gerilim giderme tavlama olarak ifade edilmektedir. Bu işlemde tavlama sıcaklığı 345 °C' ye kadar olabilir. Tavlama işleminin sonucunda sadece toparlanma, kısmi rekristalizasyon veya tamamen rekristalizasyon da meydana gelebilir (KUMRU 2007).

### **2.3.5.4. Çözelti ısıl işlemi**

Bu işlemin ana amacı, alaşım elementlerinin çoğunun tam çözeltisini elde etmek olduğu için, tek fazlı bölgedeki bir sıcaklığa ideal olarak çıkarılmalıdır. Fakat bileşenlerin sıvılaşması ve süneklik ve diğer mekanik özellikler üzerinde kötü etkiler gibi aşırı ısınmaya neden olacak şekilde, alaşımları solidüs sıcaklığının üstünde ısıtmamak gerekir. Yeniden kristalize olmuş tanelerin tekrar kabaca büyümesini engellemek için, sıcak islenmiş ürünlerin çözelti ısıl işleminde ilave tedbirler gereklidir. Özellikle ekstrüzyon veya ekstrüzyon çeşitlerinden üretilmiş dövme parçalarda gereksiz bir şekilde yüksek sıcaklıklar ve aşırı uzun çözelti işlem süresinden kaçınılmalıdır (KUMRU 2007).

### **2.3.5.5. Yaşlandırma İşlemi**

Metallerde dengeli soğuma süresinde oluşan yapılar kararlı olup, belirli özelliklere sahiptirler. Denge diyagramları bileşim ve sıcaklığa bağlı olarak oluşan kararlı fazları ve faz dönüşüm sıcaklıklarını gösterirler. Bu durumda soğuma süresinde faz dönüşümleri zorlayıcı etki bulunmaksızın kendiliğinden tamamlanır. Ancak kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleri ile sağlanan aşırı koşullar altında (su içinde soğutma gibi) denge hali faz dönüşümleri kısmen veya tamamen önlenir. Bu koşullarda elde edilecek bazı denge dışı yarı kararlı fazlar üstün özelliklere sahip olabilirler.

Örneğin Al – Si ve Al – Mg alaşımları çökelme sertleşmesi sonucunda mekanik özelliklerde nispeten önemsiz değişiklikler gösterir. Buna karşılık Al – Cu alaşım sisteminde özelliklerde büyük değişiklikler gözlenir.

### 2.3.6 ALÜMİNYUMUN KULLANIM ALANLARI

Birçok üstün özelliklere sahip olan alüminyum ve alaşımları, metal üretim sektörünün hemen hemen her dalında kullanılmaktadır. Alüminyumun hafif oluşu nedeniyle en çok uçak ve diğer taşıt araçlarında kullanılır. Bunun yanında kablo, perçin, mutfak eşyası, boru üretimi ve son yıllarda gittikçe artan bir şekilde eloksal yapılarak pencere-kapı üretiminde kullanılmaktadır. Alüminyumun önemli bir kullanma alanı da, toz halinde boya içine katılarak metal yüzeylerin korozyondan korunması için kaplama malzemesi olmasıdır (WILLIAM 2002).

Özellikle çelik ve bakır yerine alüminyum ve alaşımlarının kullanılmasıyla makine üretim endüstrisinde, çeşitli konstrüksiyonlarda, ağırlıkların önemli ölçüde azaltılması sağlanmıştır. Bu yüzden alüminyum ve alaşımları, otomotivden inşaat sektörüne kadar endüstrinin çeşitli dallarında uygulama alanı bulmuş ve bu endüstrilerin vazgeçilmez bir temel girdisi durumuna gelmiştir.

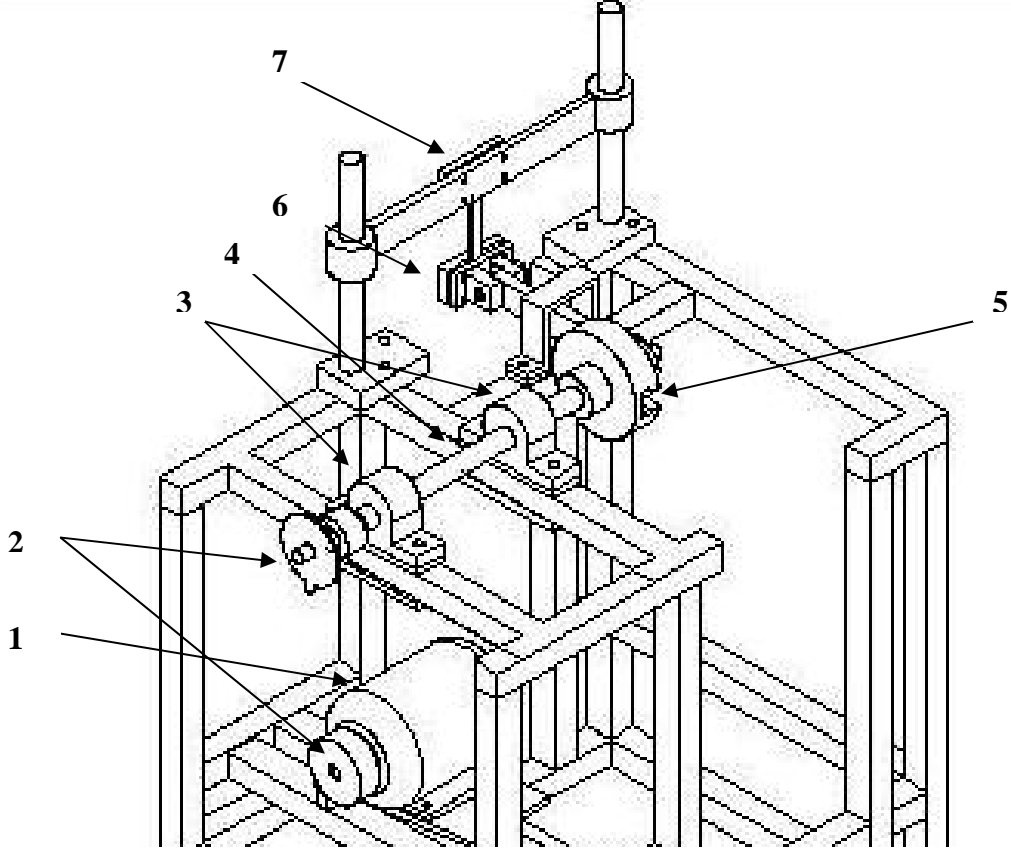
Tüketim alanının başında inşaat %27, taşıt araçları %25, ambalaj sanayi %15 ve elektrik %10 ile ilk dört sırayı almaktadır. Eloksal kaplama olarak adlandırılan anodik oksidasyon ile çeşitli renklerde üretilen alüminyumun, inşaat sektöründe değişik uygulama alanları bulunmaktadır. Pencere ve kapı ile dış cephe kaplamaları buna en güzel örnekleri oluşturur. Günümüzde üretilen 1 ton alüminyumun, 250 kilogramı ulaşım sektöründe kullanılmaktadır. Alüminyumun sağladığı hafiflik, ulaşım sektörünün hızlı olması gereken taşıtlarına önemli bir kolaylık sağlar. Bir otomobilde ortalama olarak 80 kg civarında alüminyum kullanımı söz konusudur. Aynı işlevi görecekt çelik ve alaşımlarından birinin yerine kullanılan bu miktardaki alüminyum, üretilen otomobilin toplam ağırlığının 160 kg azalmasını sağlar. Uçaklarda ağırlığın azaltılması daha büyük önem taşır (SERFİÇİLİ 2000).

## 2.4. YORULMA CİHAZI

Günlük hayatta yorulma olayının her an için etrafımızda gerçekleşiyor olduğu konusuna literatür araştırmalarımız sırasında bir çok kez rast geldik. Bu olay farklı tipte farklı yönde yüklemelerin tesir etmesiyle gerçekleşmektedir. Ama günümüzde bu probleme karşın bazı proseslerin uygulanması sonrası bu hataların önceden tespiti veyahut gerçekleşmemesi üzerine başarılı çalışmalar gerçekleştirilebiliyor. Bu sebeple konu hakkında birçok deney veya farklı prosesler uygulanmaktadır. Tasarım ve imalatı gerçekleştirilen bu sistemde ise yorulma analizi deplasman değişimi üzerinden incelenmekte. Uygulanan yükün malzeme özellikleri ve kuvvet gibi parametreler üzerinden maksimum olarak hesaplandığı genlik kontrollü adı verilen sistem yorulma analizini gerçekleştirilmesini sağlayan sistemler arasından sadece biridir.

Literatür çalışmalarımız sonrasında W. Paepegem ve J. Degrieck kompozitler üzerinde gerçekleştirdikleri yorulma çalışmaları uygulamış olduğu bir sistem tasarımına karar verildi. Eksenel eğilme tipi içerisinde değerlendirilen bu sistemde deney için kullanılacak numune ankastre tipte eğilmeye maruz bırakılacak şekilde bir ucundan sabit olarak bağlanır. Numunenin diğer ucu ise dönel hareketin sağlandığı motor-mil-volan mekanizmasının istenen genlikte bağlandığı bir kol ile hareketli mafsala bağlıdır. Bu sayede numuneye istenen genlikte salınım yapılarak yorulmaya zorlanabilir. Bu noktada malzeme boyutuna ve özelliklerine göre yorulma için belirlenecek max kuvvet çok önemlidir. Çünkü yorulmanın elastik sınırlar içinde gerçekleştirildiği unutulmamalıdır (PAEPEGEM ve DEGRİECK 2001)..

Şekil 2.22 de şematik olarak gösterilen yorulma test cihazımızın imal sürecine geçecek olur isek;



Şekil 2.22 Yorulma Test Cihazı Şematik Gösterimi

Deplasman kontrollü yorulma cihazımız ana olarak

1. Motor
2. Kayış-Kasnak Mekanizması
3. Yataklar
4. Ana Mil
5. Genlik Kontrol Sistemi (Volan)
6. Oynar Mafsal
7. Sabit Mafsal



Bu kısımları Mekanik ve Elektronik teçhizatlar olarak ayırmak imalat sürecini daha kolay için iyi bir yoldur. İmalat süreci sonunda oluşan cihaz Şekil 2.23’de görülmektedir.

#### 2.4.1. Yorulma Cihazı Mekanik Kısım

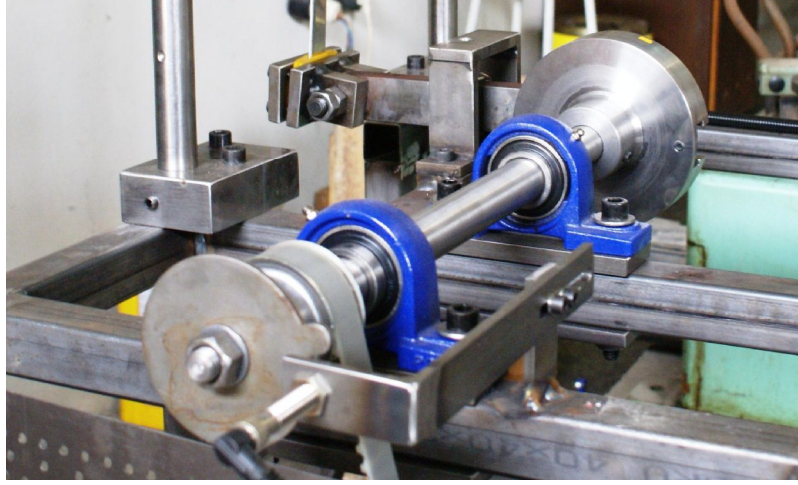


Şekil 2.23 Yorulma Test Cihazı

Cihazımızda 380 Volt ile çalışan bir elektrik motoru kullanılmaktadır. Fakat elektrik panosunda cihazda uygulanması istenen devirin ayarlanması sağlayan frekans invertörü ile gerçekleştirilen özel elektrik bağlantısı sayesinde normal şehir voltaj olan 220 voltluk değer ile cihazımızın çalışması mümkündür.

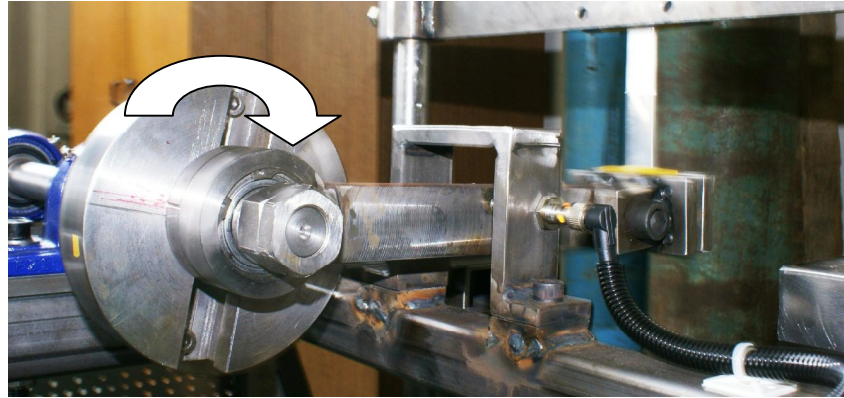
Ayrıca motorumuz sistemimize 0.75 kw (1 HP) kapasite bir güç sağlamakta ve bu güç sayesinde yaklaşık 3000 dev/dak bir dönüş verilebilmektedir.

Motordan alınan tahrik bir kayış kasnak mekanizması yardımıyla ana mile iletilmektedir. Triger kayışı ile sağlanan bu aktarımda kasnakların çaplarının oranlarının 110/70 olması ile motorumuzun sağlamış olduğu teorik olarak belirli 3000 dev/dak çevrim yaklaşık olarak 4500 dev/dak kadar çıkabilmektedir.



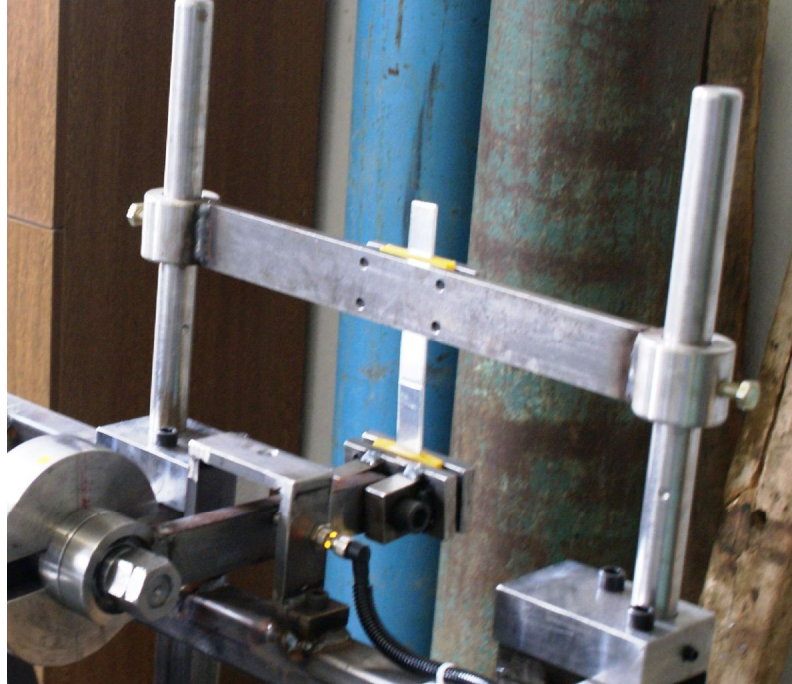
Şekil 2.24 Mil – Yatak Bağlantıları

Kayış kasnak mekanizmasından alınan tahrik Şekil 2.24 de görüldüğü gibi genlik kontrolünü sağlayan volana kadar bir ana bir milin üzerinde ilerler burada önemli noktalardan biri yüksek frekansta cihazın çalışabilmesi planlandığı için bu zorlamaları karşılayabilecek kalitede yatakların gerekliliğidir.



Şekil 2.25 Genlik Kontrol Mekanizması

Yorulma işlemlerimizdeki parametrelerimizi belirlediğimiz Şekil 2.25 te görülen volan ana milden aldığı tahriki üzerinde bulunan ayrı bir mil göbek bağlantısı ile salınımın yapılmasını sağlayan dönel yönde hareket yaparak iletimi gerçekleştirilen bir biyel koluna iletir. Buradaki volanın tasarımı sistemde yeri nedeniyle oldukça önemlidir. Çünkü cihazda gerçekleştirilecek yorulmanın kuvvet değeri buradan ayarlanmaktadır. Burada dönme eksenine dik yönde açılmış bir T kanal bulunmaktadır. Ayrıca bu bölümde karşılaşılabilecek güvenlik zafiyetlerine dikkat edilmelidir. Bu yüzden mil göbek bağlantısı üzerinde ki cıvatalar otoblokaj yapılmak suretiyle sıkıldı. Ayrıca yüksek devirde bu cıvatalarda yaşanabilecek problemler sonrasında mil-göbek bağlantısının çözülebileceği göz önüne alınarak T kanal içerisine stoper amacıyla M6 cıvatalar konuldu.



Şekil 2.26 Numune Bağlama Aparatları

Sabit ve hareketli mafsalsal arasına Şekil 2.26 gösterildiği şekilde bağlanan numune çekme ve basma yönünde genlik kontrolünü yapan sistemin merkezine göre ayarlanmış mesafe kadar salınım yapmaktadır.

## 2.4.2. YORULMA CİHAZI ELEKTRONİK KISIM



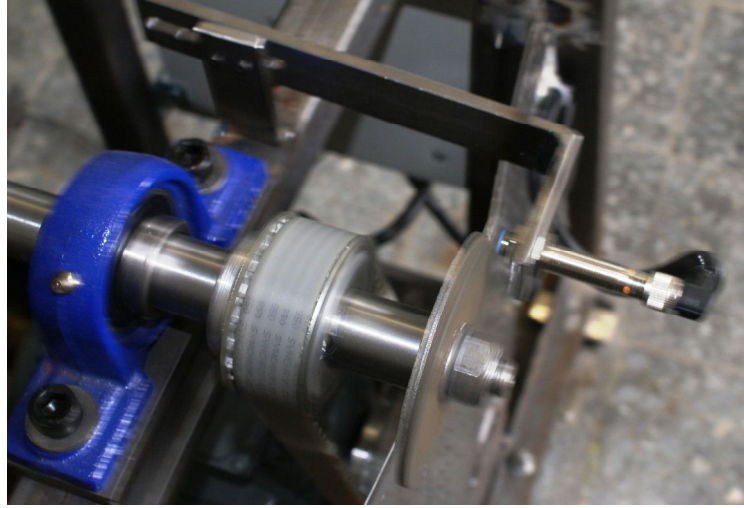
Şekil 2.27 Kontrol Paneli

Cihazın herkes tarafından kullanılması için Şekil 2.27 deki gibi basit bir kontrol paneli geliştirdi. Kontrol panelinde bulunan Şekil 2.28’de daha net görebileceğimiz sayaç sayesinde yorulmanın hangi sınırlar içinde gerçekleştiğini görme imkânı buluyoruz.  $10^7$  haneye kadar veriyi göstergesinden görüntüleyebilmekte.



Şekil 2.28 Çevrim Sayacı

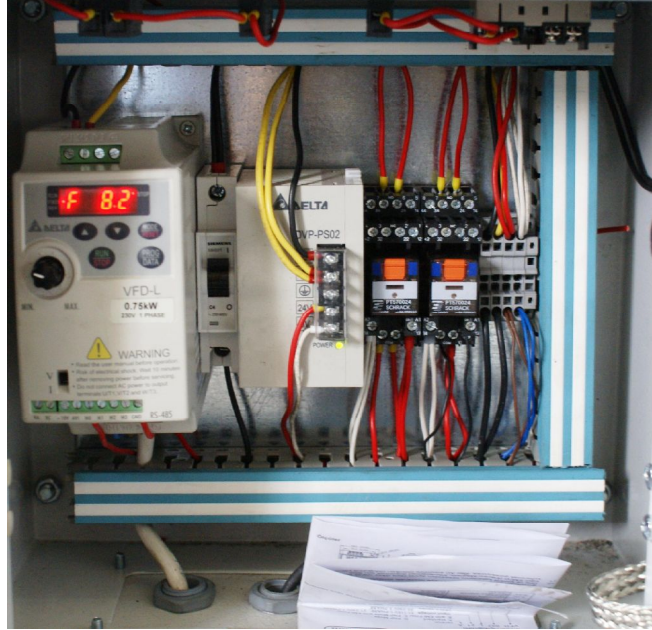
Sayaç pano yardımıyla cihazın üzerinde bulunan iki sensora bağlıdır. İlk sensor Şekil 2.29 da görülen cihazın ana tahrik miline bağlı olan bir parçadan verileri alır.  $360^\circ$  lik her bir dönüşü direk göstergeye iletmektedir.



Şekil 2.29 Algıyacıklar

Diğer sensor ise salınım sağlayan kolu görmektedir. Parçanın kopmasıyla düşen kolu fark eden sensor durumu panoya ileterek elektrik motorunun durması sağlıyor.

Bütün bu sistemi kontrol eden panonun şekli ise aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.30 Pano

Panomuzun içerisinde sistemimize ayrı bir özellik katan yukarıda bulunan Şekil 2.30'da solda yer alan frekans inventörü bulunmaktadır. Bu sayede sistemimizi 0–4500 dev/dak arasında istediğimiz devirde çalıştırabilmekteyiz. Ayrıca frekans inventörümüz sayesinde istediğimiz devire belli bir aralıkta ulaşıyoruz. Bu durum ani yüklemelerle

yorulma deneyi sırasında oluşabilecek sıkıntılar ile bir nebze hafifletiyor. Frekans inventörümüz teorik olarak kabul ettiğimiz 4500 dev/dak 0-50 arasında eşit aralıklara bölerek bu durumu sağlıyor ve bu şekilde istenilen devirde sistem çalıştırılıyor

### 2.4.3. UYGULAMA HALİ

Yüksek frekansta yorulma uygulaması yapması planlanan cihazın imalatı sonrasında çalışma şartlarının incelenmesi açısından bazı deneme uygulamaları gerçekleştirildi. Bu çalışmalar sırasında ilk dikkat edilen durum sürekli olarak aynı rejimi korumasının gerekliliği idi. Çünkü bu durumun sağlanması ile gerçekleştirilmesi planlanan prototip çalışmaların sonuçların doğru bir şekilde karşılaştırılması gerçekleştirilebilecekti. Bu sebeple yüksek frekansın cihazda oluşturabileceği denge sorunları ve elemanlarda meydana gelebilecek titreşimin kontrol altına alınması önemli bir konuydu. Bu yüzden öncelikle yorulma test cihazımızın yere tam olarak tutunması idi.

Bunun için açılal olarak gelen kollar yere altlarına kauçuk takozla konulacak şekilde betona M16 lık çelik dübellere yardımıyla ankrajlandı. Bu sayede cihazın yere tutunma alanı genişletilmek suretiyle dengesizlikler bir nebze giderildi.

Diğer bir hususta cihazın tasarımı sırasında özel olarak sehpanın alt kısmının bir hazne olarak tasarlanması konusudur. Bu bölgeye de titreşim sönümlenmesi açısından beton dökülmesi uygun bulundu. Fakat daha sonrasında cihazın yerinin planlanmasında olabilecek değişiklikler dikkate alınarak bu bölgeye beton dökülmesi yerine geçici süre çeşitli ağırlıklar konulmasına karar verildi

Cihaz ile ilgili ilk uygulamalar sırasında göze çarpan başka bir durumda kırılmaların sabit mafsala numunenin bağlandığı sınırdan gerçekleşmesiydi. Keskin köşeden oluşan bu sıkıntılar giderilmek için bu bölgelerde bir kısım değişiklikler ve en önemlisi 3 mm kalınlığında vulkolon mafsallara kauçuk yapıştırılması ile bu problem giderilmiş oldu.

## 2.5. NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

### 2.5.1. Malzeme Seçimi

Yorulma davranışları deneyleri için 2000 serisi alüminyum alaşımlarından '0' koşuldaki 2014 alaşımı seçildi. Bu tipteki alüminyumun seçiminde endüstriyel açıdan önemli kullanım alanlarına sahip olması ve sürtünme karıştırma kaynağı üzerine literatür çalışmalarında görmüş olduğumuz başarılı uygulamalara izin vermesi etkili oldu. 2014 alüminyum alaşımı yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet/sertlik ihtiyacını karşılayabilmektedir. Savunma sanayi, uçak ve uzay endüstrisi gibi özel kullanım alanlarına sahiptir. Bunlara karşılık kötü sayılabilecek tek özelliği de belirgin bir korozyon dayanımı olmamasıdır (WILLIAM 2002).

Çizelge 2.4. Kullanılan 2014 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Kompozisyonu

Element	Kimyasal Analiz Sonucu (%)
Si	0.83
Fe	0.35
Cu	4.16
Mn	0.74
Mg	0.45
Zn	0.10
Cr	0.05
Ni	0.01
Ti	0.02
Pb	0.01

Çizelge 2.5. Kullanılan 2014 Alüminyum Alaşımının Fiziksel Özellikleri

<b>Fiziksel Özellikleri</b>	<b>Metrik</b>
Sertlik Brinell	45
Çekme Mukavemeti	186 MPa
Akma Mukavemeti	96.5 MPa
Uzama % (Elongation)	% 18.0
Elastisite Modülü	72.4 GPa
Poisson Oranı	0.330
Yorulma Dayanımı	89.6 MPa

Bu konunun açıklık kazanması sonrasında deneysel parametreler sonucu doğacak deney sayıları ve sürtünme karıştırma kaynağı sırasında kullanılacak takımların özellikleri göz önüne alınarak Ankara'nın Ostim sanayi bölgesinde faaliyet gösteren Aca Metal Sanayi ve Tic.Ltd. Şti. alüminyumun tedariki sağlandı. Tedariği sağlanmış olan 2014 alüminyum alaşımının Çizelge 2.4 de kimyasal kompozisyonunu, Çizelge 2.5 te bu malzemenin fiziksel özelliklerini görmekteyiz. Bu çizelgeler tedarik sırasında temin edilen malzeme sertifikasına dayanılarak oluşturulmuştur. Kullanacağımız takımın boyutu dikkate alınca 3.25 mm kalınlığında ısıl işleme tabi tutulmamış alüminyum plakanın transferi gerçekleştirildi.



## 2.5.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulaması

### 2.5.2.1. Parametrelerin Belirlenmesi

Deney işlemlerimizin temel olarak farklı parametreler kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş alaşımli alüminyumların yorulma davranışlarının incelenmesi üzerine olması sebebiyle kaynak işlemleri öncesinde literatür bilgilerinin kılavuzluğunda farklar gözleyebileceğimize inandığımız parametreler belirlendi. Çizelge 2.6 'da belirlenen parametreler ile oluşturulan tabloyu görebiliriz.

Çizelge 2.6. Kaynak Parametrelerine Göre Deney Grupları

Grup No	Devir Sayısı (dev/dak)	Kaynak İlerleme Hızı (mm/dak)
1	2140	112
2	2140	80
3	2140	40
4	1520	112
5	1520	80
6	1520	40
7	1070	112
8	1070	80
9	1070	40

### 2.5.2.2. Teknik Donanım

Sürtünme karıştırma kaynakları için ile okulumuzun bünyesinde bulunan Şekil 2.31’de görülen konvansiyonel bir freze tezgahı kullanılmaktadır.

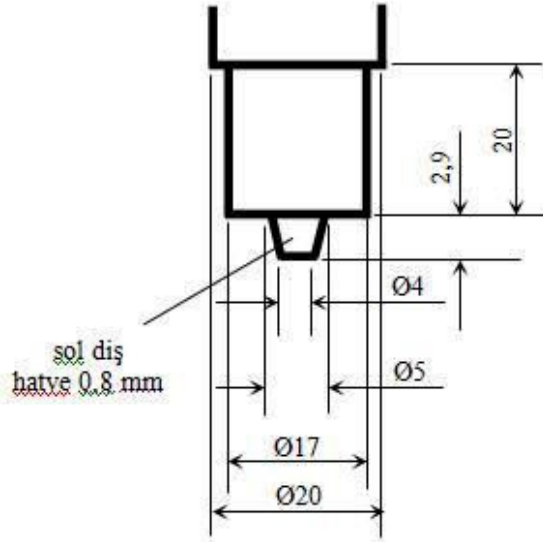


Şekil 2.31 Freze Tezgahı

### 2.5.2.3. Takımlar

Sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarında kaynak bölgesinde karışmanın uygun bir şekilde gerçekleştirilmesi için birleştirilecek malzemelerin mekanik ve kimyasal özelliklerini dikkate alarak özel bir takım tasarıma ihtiyaç duyulmaktadır. 2014 tipi alüminyum alaşımının birleştirilmesi için konik bir pime sahip 17 mm omuza sahip takım kullanıldı. Çeşitli ısıl işlemlere tabi tutulan takımımızın tasarımındaki en önemli husus kaynak bölgesine daldırma suretiyle karışımın yapılacağı pimin tasarımıdır. Bu hususta en önemli konu pimin yüksekliğidir. Bu hususta birleştirilecek bölgenin yüksekliğinden 0,1 ila 0,3 arasında bir farkın gerekliliği vardır. Diğer bir önemli noktada pimin başının 4 mm dip noktasının da 5 mm çapındadır ve pime 0.8 mm’ lik

hatveye sahip sol diş açılmıştır Şekil 2.32'de takımın sahip olduğu ölçüler görülmektedir.



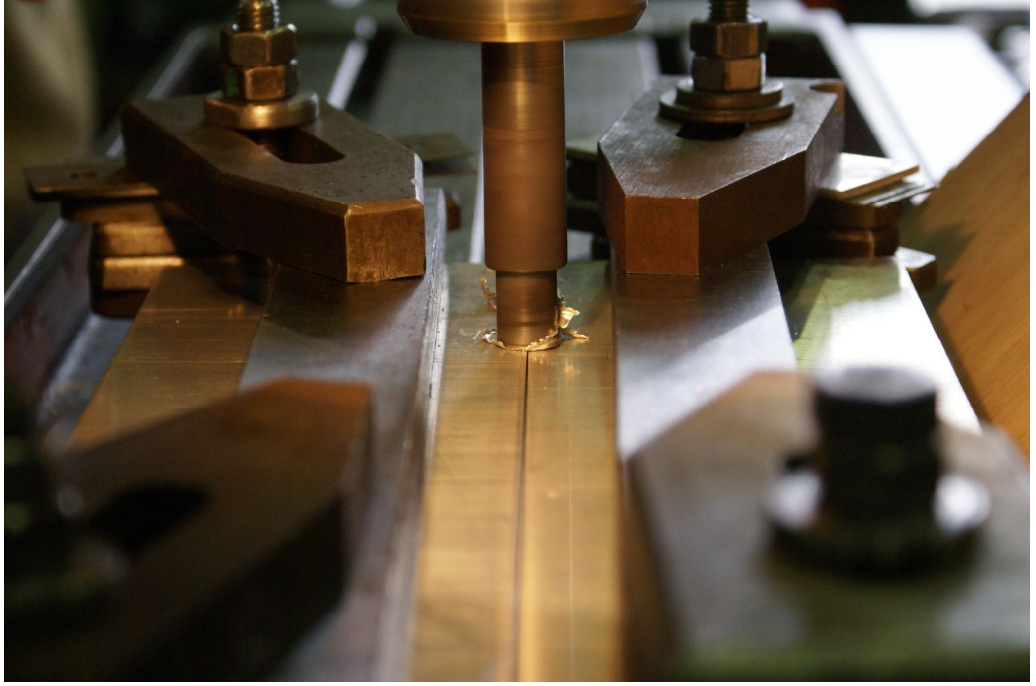
Şekil 2.32 Takım Geometrisi

#### 2.5.2.4. Kaynaklı Birleştirmeler

Kaynaklı birleştirmelerin tezgâha uygun şekilde bağlanmasının sağlanması ve deney sırasında kullanacağımız numunelerin uygun standartlarda oluşturulması gerekliliği ile her parametre grubu için 2014 plakalar uygun şekilde kesildi. Kaynak edilecek plakaların boyutları 360 X 100 mm olarak belirlenmiştir.

Kaynak sonrası kayıplar ve deney sırasında çıkacak aksaklıklarda sorun yaşamak sebebiyle kaynaklı birleştirmelerde %20'lik ekstra bir pay bırakıldı.

Bu tip birleştirme için parçaların tablaya kusursuz bir şekilde bağlanması gerekir. Şekil 2.33 de görüldüğü gibi kaynaklanacak yüzeylerin düzgün bir şekilde bitişmesi gerekir ayrıca işlem sırasında numunenin rijit yapısının korunması için uygun bağlama aparatlarına da ihtiyaç vardır.



Şekil 2.33 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulaması

Birleştirme işlemi esnasında ilk önemli husus takımın birleştirilme noktasına daldırılıp kaynaklanacak bu ortamı Sürtünme karıştırma kaynağı için uygun sıcaklığa getirmesidir.

Diğer bir hususta kaynak işleminde uygulanması gereken takımın malzeme üzerinde gerçekleştireceği baskı kuvvetidir. Bu çok dikkatli ayarlanması gereken noktadır. Sürekli olarak belli bir noktada sabit tutulması önemli bir esastır.

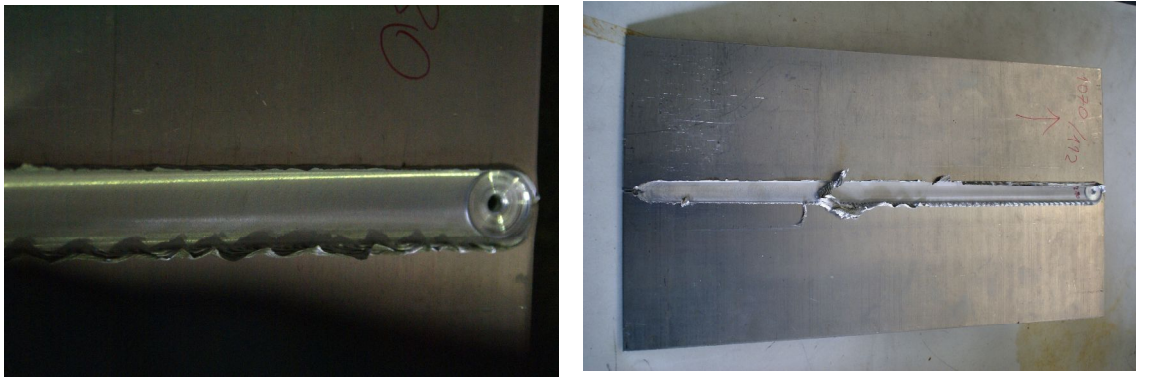
Takımımız bu işlem sırasında saat yönünde bir dönüş gerçekleştirerek üzerinde bulunan sol dişler sayesinde malzemeyi önüne yığması suretiyle bir bağlantı gerçekleştirecektir. Bu ilerleme Şekil 2.34’de net şekilde görülmektedir.



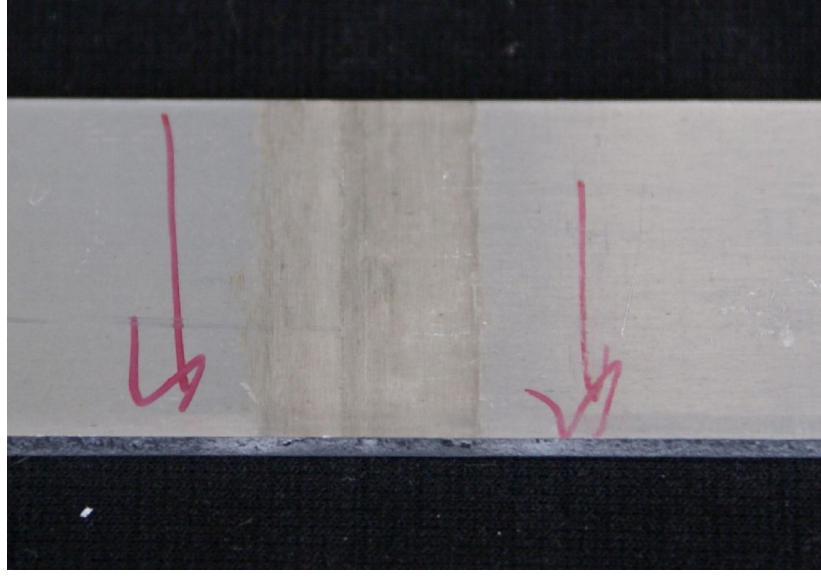
Şekil 2.34 Takımın İlerlemesi

Bütün işlemler sonucunda göze çarpan ilk husus parametrelere göre kaynaklı bölgede oluşan soğan halkalarının şekilleridir. Yüksek ilerleme hızlarında kaynaklı bölgenin yüzeyinde daha dağınık bir görüntü göze çarparken düşük ilerlemenin olduğu işlem sonunda daha sürekli bir yapı görülmüştür

Diğer yüzeyde ise kaynağın omuz genişliğinde bir hat oluşturduğu görülmektedir. Şekil 2.35 ve Şekil 2.36' da yer almakta olan resimlerde kaynak işlemi sonrasında oluşan kaynak dikişleri görülmektedir.



Şekil 2.35 Kaynaklı Birleştirilmeler



Şekil 2.36 Kaynak Dikişi

## 2.6. YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Bunun için önce cihazımızın özelliklerinin ve numunelerimizin nitel ve nicel değerlerinin bize sağlamış olduğu imkânları iyi belirleyip buradan cihazın çalışması ile ilgili normlar belirlenmiştir.

Deney sırasındaki normlarımızı şu şekilde sıralamak mümkündür.

1. Deneyler basma ve çekme yönünde eşit derecede deplasman uygulayarak numunemizin maksimum kuvvet üzerinden sehim yapmasını sağlayan genlik kontrollü eğilme cihazında gerçekleştirilmiştir.

2. Deneylerimiz sırasında numunede maksimum yükün oluşturulduğu yer dikkate alınarak numunemizin bu şekilde cihaza bağlanmıştır.

3. Testlerimiz sırasında 2014 serisi alüminyumunun  $\sigma_a$  değeri, numune boyutları ve bağlama uzunluğu dikkate alınarak elastik deformasyonun son noktasının 8,195 mm olduğu dikkate alınarak deneylerimiz için 2 mm, 4 mm, 6 mm ve 8 mm genlik değerleri belirlenmiştir.

4. Deneylerimizdeki devir sayısı olarak 1000 dev/dak alınmıştır. Bu sayede titreşim veya balans nedeniyle çıkabilecek deneysel veri sonuçlarında aksaklık önlenmiştir.

5. Deneyler sırasında laboratuvar şartları korunduğundan sıcaklık, nem gibi aşırı bir parametresel etkinin gerçekleşmemesi sağlanmıştır.

6. Numune boyutlarımız olarak 200X25 mm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir.

2014 Serisi Numunenin Nitelikleri

$$\sigma_a = 96.5 \text{ MPa}$$

$$l = 100 \text{ mm (Bağlama şekline göre kuvvet kolunun boyutu)}$$

$$B = 25 \text{ mm (Numunenin genişliği)}$$

$$H = 3.25 \text{ mm (Kesit Kalınlığı)}$$

$$E = 72,4 \text{ GPa}$$

$$\sigma_a = \frac{6 \cdot F_a \cdot I}{B \cdot H^2}$$

(2.7)

$$f = \frac{F_a \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

(2.8)

Buradaki nicelikleri genlik ile ilgili formüllerde yerine koyduğumuzda belirlenen genlikler için cihazımızın alaşımli alüminyum malzemeye uygulayacağı gerilme değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler yaklaşık olarak 20, 45, 55, 65 ve 85 MPa değerleri civarındadır.

Deneysel çalışmalarımız için aşağıdaki tabloda görüldüğü gibi 50 grup üzerinden yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 2.7 de numune grupları numaralandırmak suretiyle verilmiştir. Bu deneyler sonrası hem sürtünme karıştırma kaynağı parametrelerimizin niteliği hakkında karşılaştırma yapabileceğimiz verilere hem de belirlenen genlikler sayesinde farklı kuvvet tatbiklerinde kaynaklarımızın yorulma davranışlarını incelenmiştir. Bu sayede kaynaklı numunelerimizin yorulma davranışlarını analiz edebileceğimiz Wöhler eğrilerine ulaşabilmiştir.



Çizelge 2.7 Numune Numaralandırılması

<b>2014</b>	20MPa	45MPa	55MPa	65MPa	85MPa
2140/112	41	1	31	10	21
2140/80	42	2	32	11	22
2140/40	43	3	33	12	23
1520/112	44	4	34	13	24
1520/80	45	5	35	14	25
1520/40	46	6	36	15	26
1070/112	47	7	37	16	27
1070/80	48	8	38	17	28
1070/40	49	9	39	18	29
Temel Malzeme	50	19	40	20	30

### 3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

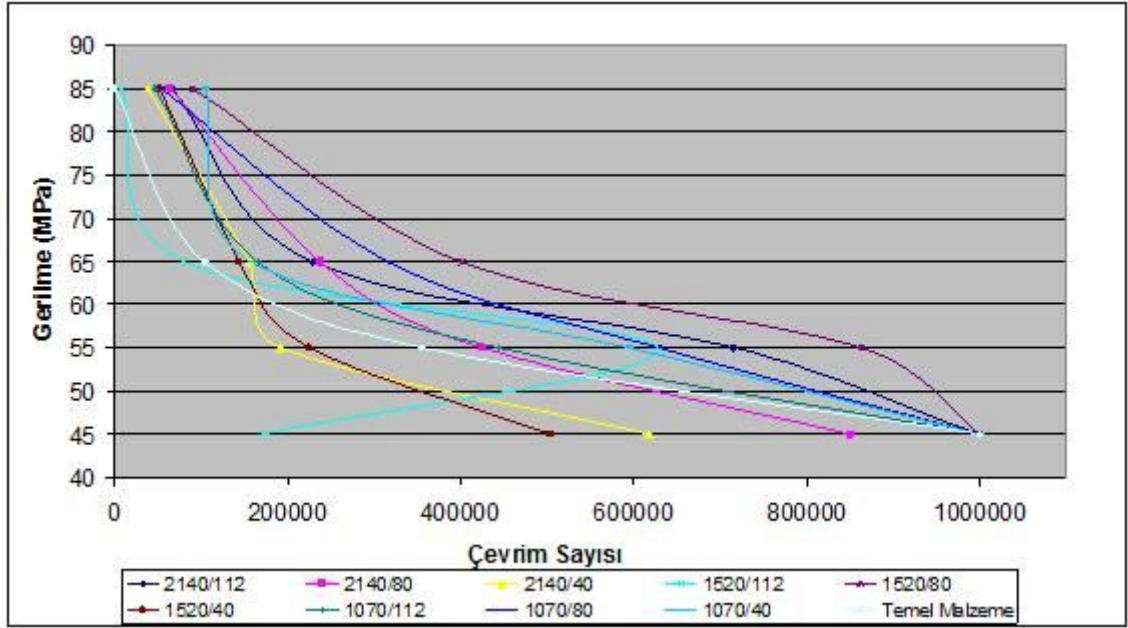
Deneysel çalışmalarımıza 4 mm deplasman üzerinden yaklaşık olarak belirlenmiş olan 45 MPa değeri ile başlandı. Bu değerde ilk çalışmamızı 2140 dev/dak takım dönme hızı ve 112 mm/dak ilerleme hızı parametreleri ile hazırlanmış numunemiz ile gerçekleştirildi. Bu uygulama sonrasında çevrim sayısı olarak  $10^6$  değerine ulaşıldı. Literatür çalışmalarımızda karşılaşılan ifadeler ve bu değer üzerinde gerçekleştirilen irdeme işlemleri sonrasında bulunan  $10^6$  değerinin bütün çalışmalar için sınır değer olarak belirlenerek bu değeri sonsuz ömür olarak adlandırılmasına karar verildi. Bu karar sonrasında 45 MPa içi yapılan deneylerin bir kısmında da kaynaklı numunelerimiz için  $10^6$  sayıda çevrime yani sonsuz ömre ulaşıldığı görüldü. Bu işlemler sonrasında sırasıyla 65 MPa, 85 MPa ve 55 MPa üzerinde deneylerimiz yapıldı ve kaydedildi. Başlangıçta belirlemiş olduğumuz 2 mm' lik deplasmana tekabül eden 20 MPa değer için yapılan çalışmalarda 45 MPa' da elde etmiş olduğumuz deneyimler yardımıyla başladık. 45 MPa' da sonsuz ömre ulaşılan parametreler için deney uygulamaları yapılmadı. Kalanlar üzerinde yapılan çalışmalarda 1520/112 lik parametre dışında tekrar  $10^6$  değerlerine ulaşıldı.

Kaynak bölgesi takımın hareketine göre ilerleme tarafı ve geri çekilme tarafı olarak ikiye ayrılmaktadır.. Kaynaklı birleştirmenin yorulma dayanımının incelendiği deneyler de yorulma kopmasının genellikle ilerleme tarafında gerçekleşmiştir. Bu bölgelerin iyice bilinmesi sonuçların irdelenmesinde yardımcı olacaktır.

Çizelge 3.1 Deney Sonuçları

<b>Numuneler</b>	<b>4 mm</b>	<b>5 mm</b>	<b>6 mm</b>	<b>8 mm</b>
<b>Kaynak/ İlerleme Hızı</b>	<b>45MPa</b>	<b>55MPa</b>	<b>65MPa</b>	<b>85MPa</b>
<b>2140/112</b>	10 <sup>6</sup>	<i>715544</i>	<i>229397</i>	<i>66671</i>
<b>2140/80</b>	<i>850747</i>	<i>424490</i>	<i>237628</i>	<i>65588</i>
<b>2140/40</b>	<i>618375</i>	<i>92272</i>	<i>156501</i>	<i>38837</i>
<b>1520/112</b>	<i>171402</i>	<i>626079</i>	<i>80255</i>	<i>8761</i>
<b>1520/80</b>	10 <sup>6</sup>	<i>863227</i>	<i>401235</i>	<i>89976</i>
<b>1520/40</b>	<i>504063</i>	<i>225579</i>	<i>144223</i>	<i>53220</i>
<b>1070/112</b>	10 <sup>6</sup>	<i>444601</i>	<i>165943</i>	<i>47960</i>
<b>1070/80</b>	10 <sup>6</sup>	<i>629526</i>	<i>315517</i>	<i>53818</i>
<b>1070/40</b>	10 <sup>6</sup>	<i>594192</i>	<i>158943</i>	<i>106403</i>
<b>Base</b>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	<i>355439</i>	<i>104712</i>

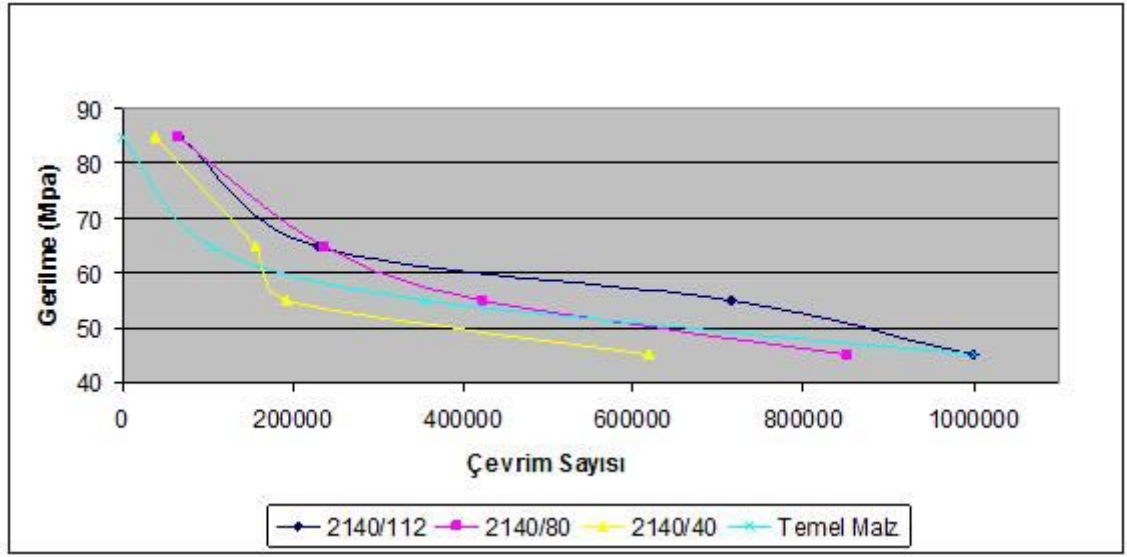
Gerçekleştirilmiş yorulma testlerinin sonuçlarının tamamı Çizelge 3.1 de görülmektedir. Çizelgede italik yazılan değerlerde yorulma kopması geri çekilme tarafında gerçekleşmiştir.



Şekil 3.1. Numunelerin Wöhler Eğrileri

Şekil 3.1 'deki gibi Wöhler eğrilerini oluşturmak mümkündür. Oluşan eğrilere göre kısa bir değerlendirme yapacak olursak genel olarak en iyi yorulma verilerine temel malzemede ulaşıldı. Bu durum literatür bilgilerimizden hareketle ulaşılması beklenen bir olgu idi. Bu karşın birçok gerilme değerinde 2140/112, 1520/80 ve 1070/80 gibi parametrelerde temel malzemenin yorulma özelliklerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Buna karşın 1520/112, 1520/40 ve 2140/40 gibi parametrelerde ise bu seviyede sonuçlara erişilememiştir.

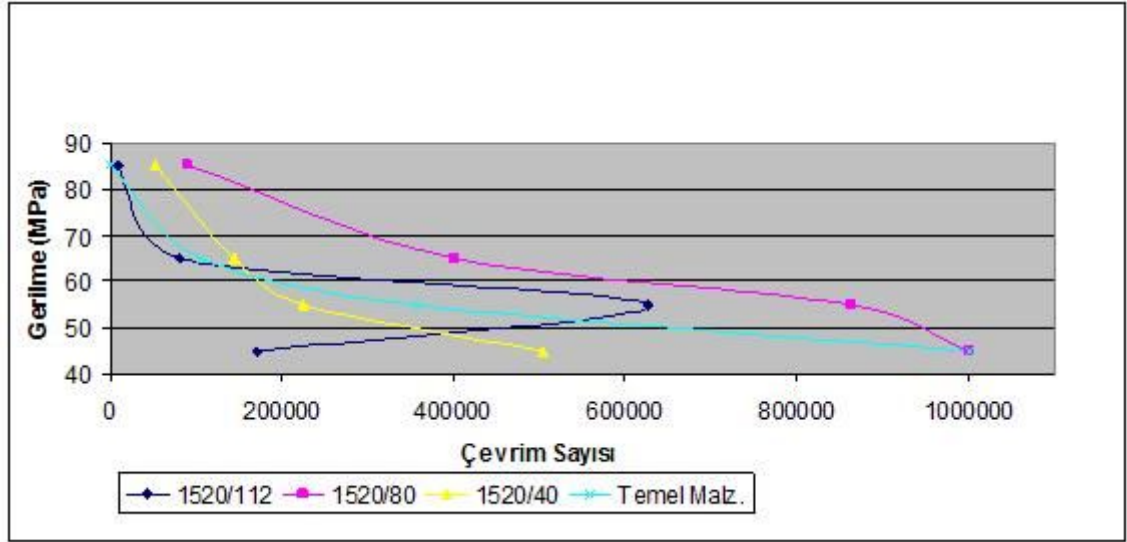
Bu durumun anlaşılması adına bazı ekstra çalışmalarda bulunulmuştur. Öncelikli olarak oluşturulan Wöhler eğrisini parametrelerimiz için daha küçük grafiklere indirgeyerek parametre değerlendirmesini öne çıkardık. Bununla beraber mikro yapı çalışmaları da yapılmıştır.



Şekil 3.2 2140 dev/dak'ya göre İlerleme Değişimi Sonucundaki Davranışları

Kaynaklı birleştirmeler sırasında takım devir hızı olarak 2140 d/dak seçilerek kaynaklanan numuneler için Wöhler eğrilerini indirgeyerek kendi içlerinde bir değerlendirme yapılmıştır. Şekil 3.2'de bu eğriyi görmekteyiz.

Bu durum sonrasında göze ilk çarpan ilerleme hızı değişimlerinin kaynaklı numunelerin yorulma davranışlarına ciddi etkileridir. Takımın ilerleme hızının artması ile 2140'lık devirde yorulma dayanımında artmaktadır. Örneğin 2140/40'lik parametre değerlerinde kaynak bölgesine sürtünme nedeniyle daha fazla ısı nüfuz etmesine karşın sırasıyla daha az ısınan 2140/112 ve 2140/80 de daha iyi sonuçlar edilmiştir. Bu konu ile daha iyi sonuçlara mikro yapı incelemesi sonrasında ulaşılabacaktır.



Şekil 3.3 1520 dev/dak'ya göre İlerleme Değişimi Sonucundaki Davranışları

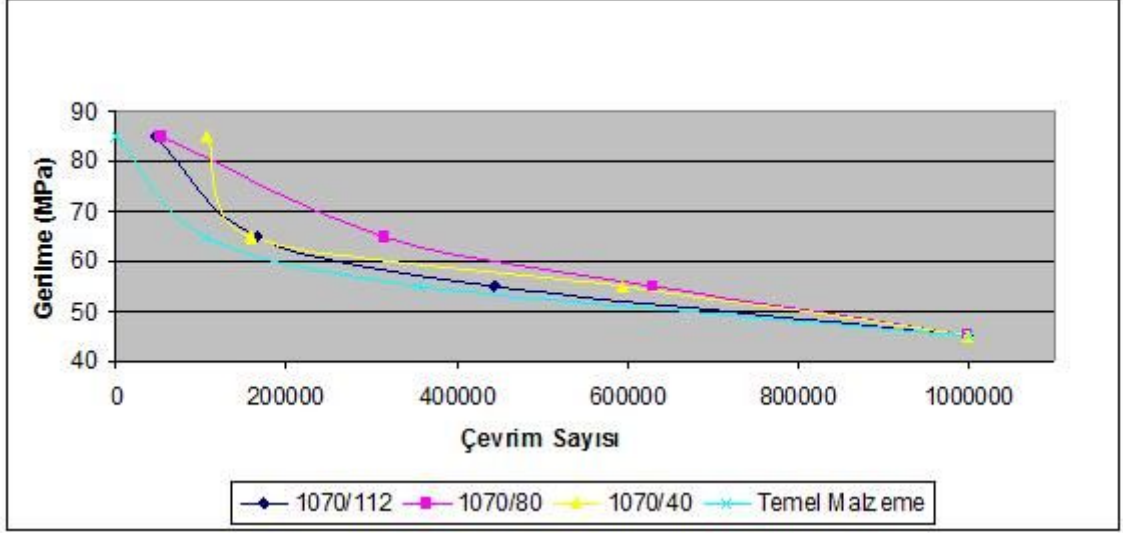
1520 devir/dak için yapılan irdelemeler sırasında parametrelere göre yorulma dayanımı değerlerinde bir karmaşa görüldü. Bunlar Şekil 3.3 yardımıyla tek tek ele alınarak incelendi.

İlk olarak en yüksek değerlere sahip olan 1520/80 ele alındı. Bu değerde neredeyse temel malzeme seviyesinde sonuçlara ulaşıldı. Hatta bazı gerilme seviyelerinde daha iyi sonuçlar bile elde edildi. İncelenen bütün parametreler sonrasında en optimum kaynak parametrelerinin de bu olduğu ortadadır.

1520/40 parametre değerlerine sahip numunelerle yapılan deney sonuçlarına gelecek olursak oda bir önceki 2140 d/dak sahip 40 mm/dak lık numune ile benzer bir özellik göstermektedir. Her ne kadar biraz daha iyi değerler sahip olsa da tahminimizce aşırı ısınma sonucu kaynak bölgesinde oluşmuş olan iri taneler nedeniyle dayanımı az olacaktır. Bu durumda mikro yapı incelemeleri sonrasında kesinliğe kavuşacaktır.

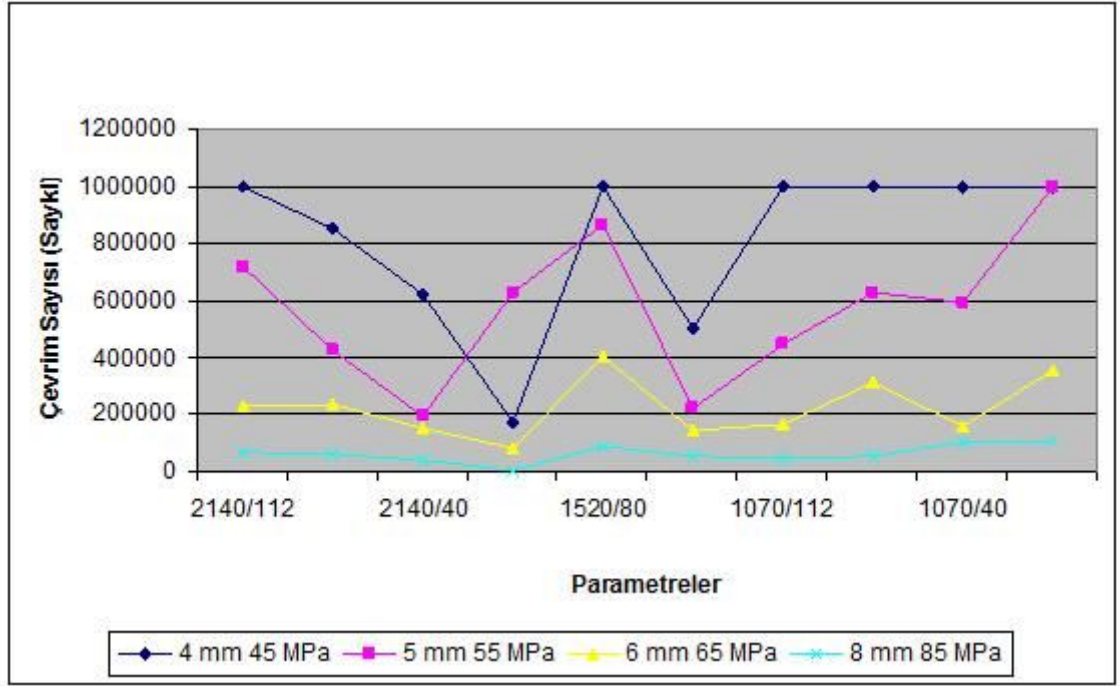
1520 d/dak devir sayısı için asıl problem 1520/112'lik numunelerde görüldü. Aynı gerilme değerleri için deney tekrarları yapılmasına rağmen kaynak bölgesinin yorulma dayanım değerleri diğer parametrelere göre çok daha geride kaldı. Bu parametre için sadece 55 MPa'lık gerilme değerinde iyi bir değere ulaşılabildi. Bu sorunun kaynaklı birleştirme işleminin yapılması sırasında takımın malzemeye yapması istenen baskıyı

özel bir mekanik sistem ile değil de operatörün yeteneklerine bırakılması nedeniyle olduğu öngörüsüne varıldı.



Şekil 3.4 1070 dev/dak'ya göre İlerleme Değişim Sonucundaki Davranışlar

1070 d/dak devir sayısında belirlemek için yapmış olduğumuz literatür çalışmalarında kaynaklı birleştirme oluşturmak için yeterli ısıyı oluşturamayacağı bilgisine ulaşıldı. Hızlı bir ilerleme değeri olan 112 mm/dak'lık numunelerin yorulma davranışı sonuçları bu bilgiyi doğrular nitelikte idi. Fakat ilerleme hızının azalmasından mütevellit kaynaklı birleşmenin yorulma dayanımı artmıştır.



Şekil 3.5 Parametre Değişimine Bağlı Olarak Yorulma Değerleri

Şekil 3.5 'de Wöhler diyagramlarından bağımsız olarak hazırlanmış olan diyagram da yorulma dayanım değerlerinin hangi parametre de hangi çevrim değerine sahip olduğunu ifade etmektedir.

Bu grafik sayesinde optimum sayılabilecek parametre değerini bulmak mümkündür.

Bu değerlerin incelenmesi sırasında yorumlarımıza yön vermek için dikkate alınacak bir başka hususta uygulanan parametrelere göre kaynak bölgesinin mikro yapısının nasıl oluştuğudur. Literatür bilgilerinden öğrendiğimiz kadar kaynak bölgesi sürtünme sonrası oluşan ısı ile mikro yapısal olarak farklı bölgelere sahip olmaktadır. Bundan dolayı her bir parametre için hazırlanan sürtünme karıştırma kaynaklarının mikroskop altında incelenmesine olanak verecek numuneler hazırlanmıştır. Öncelikle her parametre için seçilmiş olan numuneler laboratuvar da kaynak bölgeleri numunenin ortasına gelecek şekilde kesildi. Bundan sonra kesilen 9 grup numune cıvatalanması suretiyle birbirine bağlandı ve parlatma işlemine geçildi. Parlatma işlemi çok özen içinde gerçekleştirilmek zorunda eğer bu duruma gerekli özen gösterilmez ise mikroskop altında istenilen görüntü elde edilemeyebilir.



Mikro yapısal inceleme için yapılması gereken hususlardan biri de incelenecek bölgenin dağlanması işlemidir. Bu işlem için keller solüsyonu ihtiyacına gereksinim vardır. Keller solüsyonu yapısında Hidroflorik asit, Hidroklorik asit, Nitrik asit ve saf su bulunmaktadır. Tabi burada mühim bir konu da dağlama süresidir. Solüsyon kullanımının uzun tutulması bölgenin tanecik yapısında bozulmalara ve uygun görüntünün alınamaması gibi sorunlara neden olacağı için bu süre sınırlı tutulmalıdır. Numunemiz için uygulanan süre bundan hareketle 30 sn civarında sınırlı tutulmuştur.

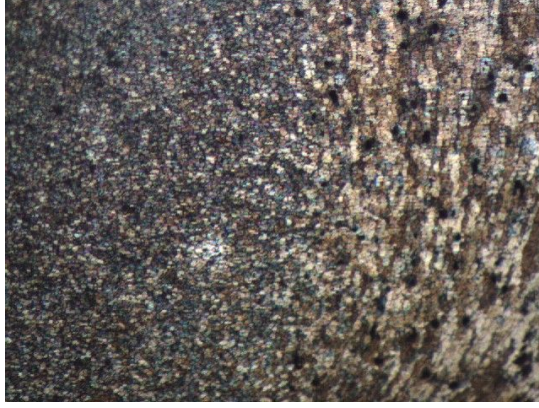
100 büyütme gerçekleştirilecek mikroskop altındaki çalışmalarımıza incelenecek bölgeleri iki farklı grup altında toplayarak başlanmıştır. Önceki çalışmalarımızda kaynak bölgesinin temelde ilerleme tarafı ve geri çekilme tarafı olarak ikiye ayırmıştık. Bu durumu aynen mikro yapı çalışmalarına da aktardık.

İncelemeler ilk olarak kaynak merkezinde başlamıştır. Bu bölgede literatürde de ifade edildiği gibi küçük taneli bir yapı görölmüştür. 2140/112 parametre özelliklerine sahip sürtünme karıştırma numunesine ait kaynak merkezi yapısını gösteren Şekil 3.6'de de bu küçük taneli yapıyı görmekteyiz.



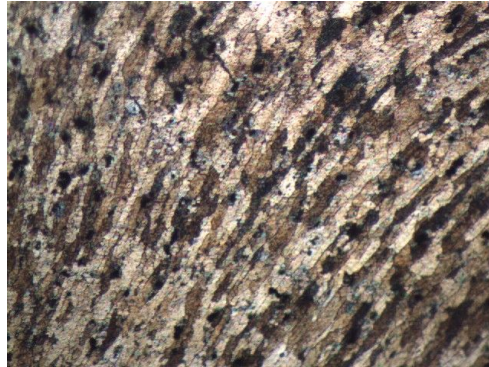
Şekil 3.6 Kaynak Merkezi görünümü

Kaynak merkezi görüntülenmesi sonrası incelemelerimiz ilerleme tarafına kaydırılmıştır. Bu inceleme sonrasında ilerleme tarafı olarak adlandırılan bu bölgedeki ilk karşılaşılan durum kaynak merkezi ile termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge arasında ayrımın direkt görüldüğü idi bu durum literatür bilgilerinde de bu şekilde ifade edilmektedir.



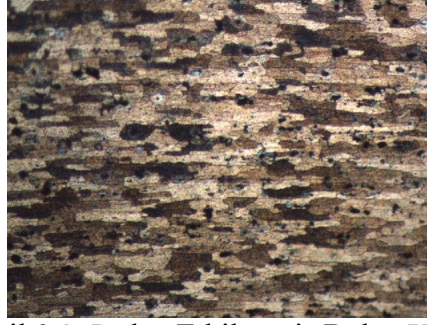
Şekil 3.7 Kaynak Merkezi Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge Ayırımı (İlerleme Tarafı) X100

Şekil 3.7’de kaynak merkezi ile termo-mekanik olarak ayırım gösteren bu bölgeyi görmek mümkündür. Kaynak merkezinden uzaklaşıp termo-mekanik alana girdiğimizde sürtünme karıştırma kaynak takımı tarafından malzemeye yapılan plastik deformasyonu görmek mümkündür. Literatür bilgilerimizden bu bölgede malzemenin tanecik yapısının rekristalize olmadan yüksek sıcaklık sonucu aşırı bir deformasyona uğradığı sonucuna varabiliriz. Şekil 3.8’ de bütünüyle termo-mekanik olarak etkilenmiş bölgeyi görmek mümkündür.



Şekil 3.8 Termo-Mekanik Etkilenmiş Alan X100

Termo-Mekanik olarak etkilenmiş bölgeden sonra karşımıza çıkan yapı ısıdan etkilenmiş bölgedir. Şekil 3.9’ da bu yapı görülmektedir. Bu bölge kaynaklı birleştirme uygulaması sırasında malzemenin maruz kaldığı mikro yapı ve mekanik özellik değişimini sağlayan termal çevrimden etkilenmesine karşı Termo-Mekanik olarak etkilenmiş alan gibi plastik deformasyona uğramaz. Bu sebeple Şekil 3.5 ‘de görüldüğü gibi temel malzeme olan alüminyum benzeri bir yapı gösterir.

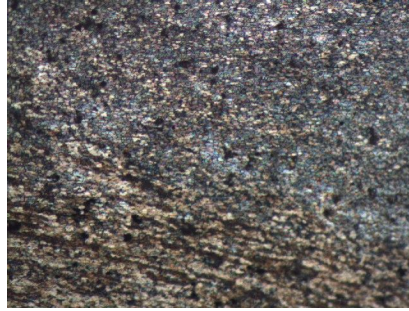


Şekil 3.9. Isıdan Etkilenmiş Bölge X100



Şekil 3.10 2014 Serisi Alüminyum Alaşımının Mikroyapısı X100

Geri çekilme tarafı için ise durum biraz farklıdır. Bu bölgede kaynak merkezi bölümü ile termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge arasında ilerleme tarafındaki benzeri kesin bir değişim göze çarpmamaktadır. Şekil 3.11’de görüldüğü gibi bir yapı vardır.



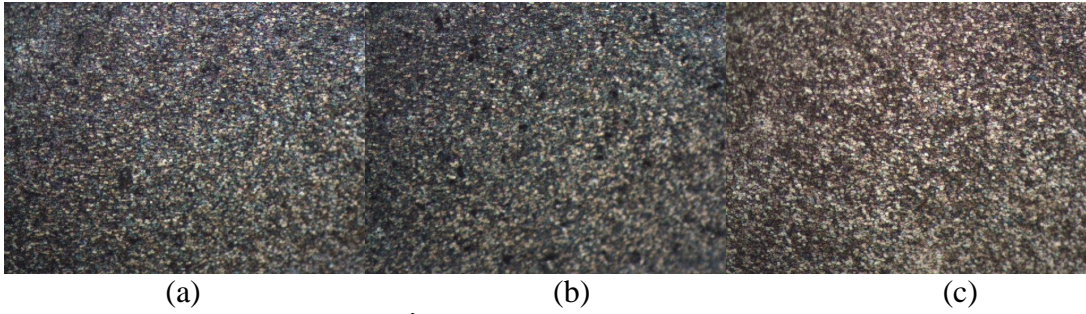
Şekil 3.11 Kaynak Merkezi Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge Ayırımı (Geri Çekilme Tarafı) X100

Kaynaklı birleştirmelerimizde mikro yapısal olarak oluşan bölgeleri tanıdıktan sonraki aşama bu bölgedeki oluşumlar arasındaki farkların sonuçlarımıza ne yönde yansımış olduğu durumudur. Mikro yapı görüntülerinden elde edeceğimiz veriler ile Wöhler eğrilerimizi daha net olarak açıklamak mümkün olacaktır.

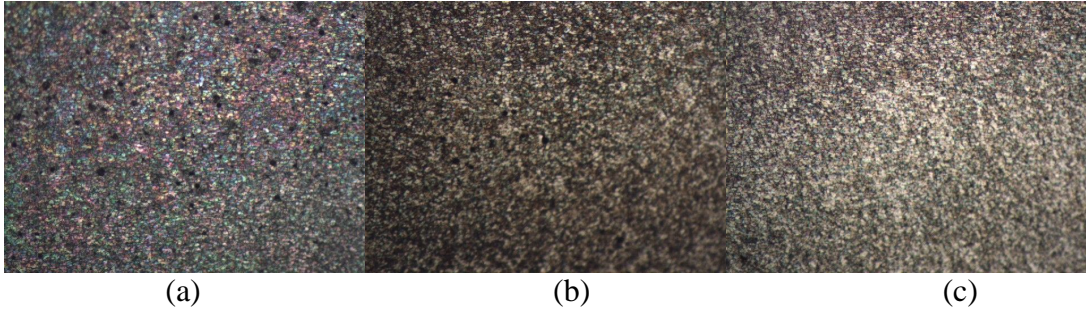
Bunun için öncelikli olarak X100 değerinde büyütme yapılmak suretiyle görüntülenmiş olan kaynak bölgelerimizin yapılarını incelememiz gerekir.

Takım ilerleme hızlarına göre gruplandırılmış olan Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 sayesinde bu durum incelenebilir.

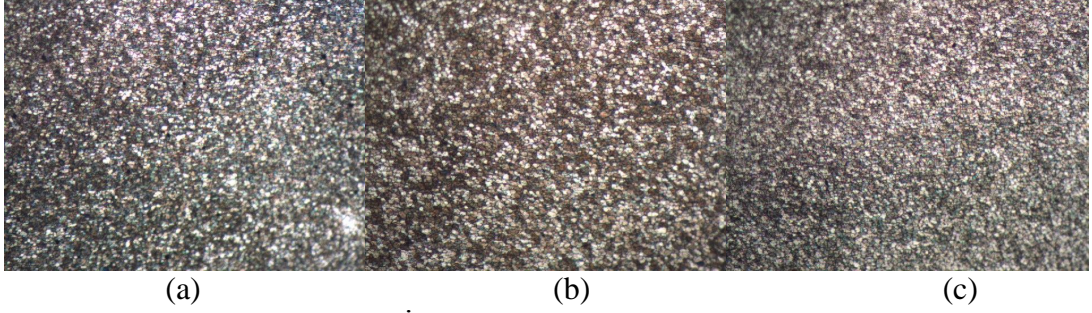
Genel sonuçların alınması buna mukabil Wöhler diyagramlarının oluşturması sonrasındaki yorulmalarda bahsetmiş olduğumuz ilk durum 2140 dev/dak takım dönme hızına sahip parametrelerdeki numunelerin durumu idi. Yapmış olduğumuz çıkarıma göre bu parametrede gerçekleşen yorulma dayanımı deneylerinde takımın ilerleme hızının düşmesine paralel olarak yorulma dayanımının çevrim sayısı da düşmekte idi. Mikro yapısal inceleme ile birlikte bu durumu destekler nitelikte verilere sahiptir. Şekil 3.12a Şekil 3.13a ve Şekil 3.14a 'da görülüyor ki tanecik yapısı ilerleme hızının düşmesine mukabil kaynak bölgesinin oluşturulmasını sağlayan ısının artması ile daha büyük tanelere sahip olmaktadır.



Şekil 3.12 112 mm/dak İlerleme Hızlarında Kaynak Merkezi Mikroyapısı  
(a) 2140 d/dak (b) 1520 d/dak (c) 1070 d/dak



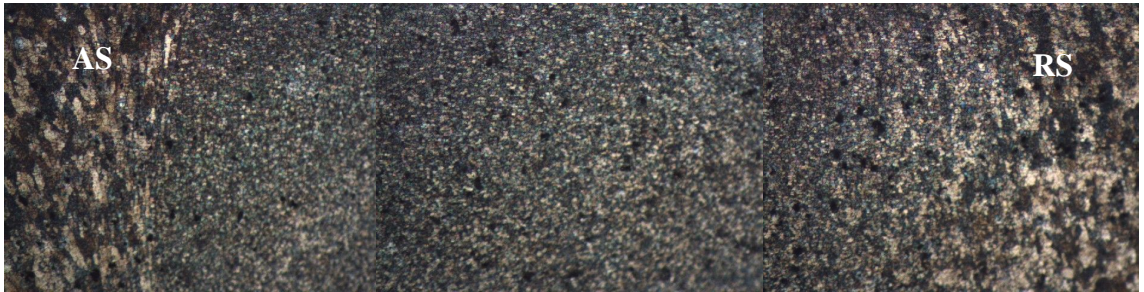
Şekil 3.13 80 mm/dak İlerleme Hızlarında Kaynak Merkezi Mikroyapısı  
(a) 2140 d/dak (b) 1520 d/dak (c) 1070 d/dak



Şekil 3. 14 40 mm/dak İlerleme Hızlarında Kaynak Merkezi Mikroyapısı  
(a) 2140 d/dak (b) 1520 d/dak (c) 1070 d/dak

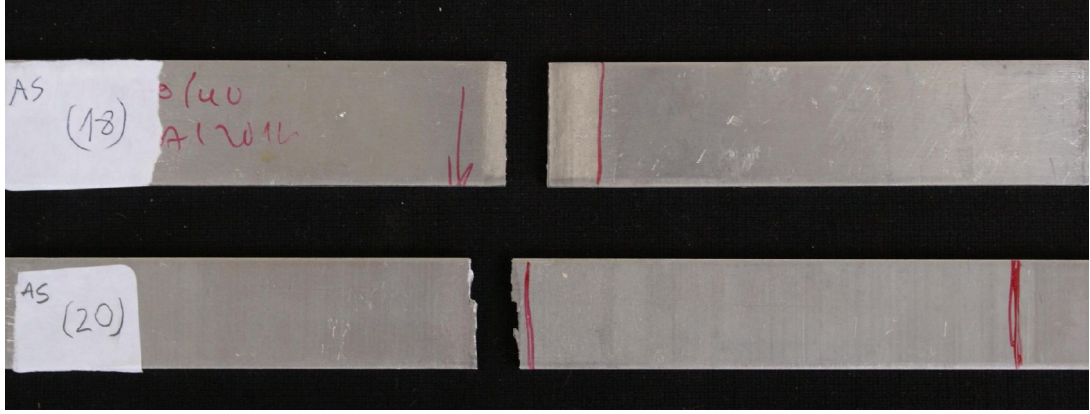
1520/80 ve 1070/80 parametrelili numuneler farklı takım hızlarına sahip olsalar da sonuçlar arasındaki fark pek de o kadar fazla bir değer değildi. Burada literatür bilgilerimizden kaynak parametrelerinin etkisi konusuna atıfta bulunacak olur isek; Takım ilerleme hızının kaynak bölgesine olan ısı nüfuziyeti üzerindeki etkisinin takım dönme hızına göre daha etkili olduğudur.

Değerlendirmeler sırasında 1520/112 parametrelerine sahip olan numunelerin sonuçlarının pek de umut edilen noktalarda olmadığını bahsi yapıldı ve bu durum hakkında mikro yapısal olarak gerçekleştirilecek çalışmalar sonrasında kesin bir bilgiye ulaşılabileceği söylendi. Bu tip numunenin mikro yapı incelemesi sonrasında görülen şu ki ince tanecikli bir yapıya hakim olan 2140/112 nolu tipteki birleştirmenin seviyesinin biraz altında bir ısıtma oluşmasına rağmen daha iri tanecikler kaynak yapısında göze çarpmakta. Bu yüzden bu tip kaynağın tüm bölgesinin incelenmesine gerek duyulmaktadır. Şekil 3.15 'de bahsedilen bu bölgeyi görmekteyiz.

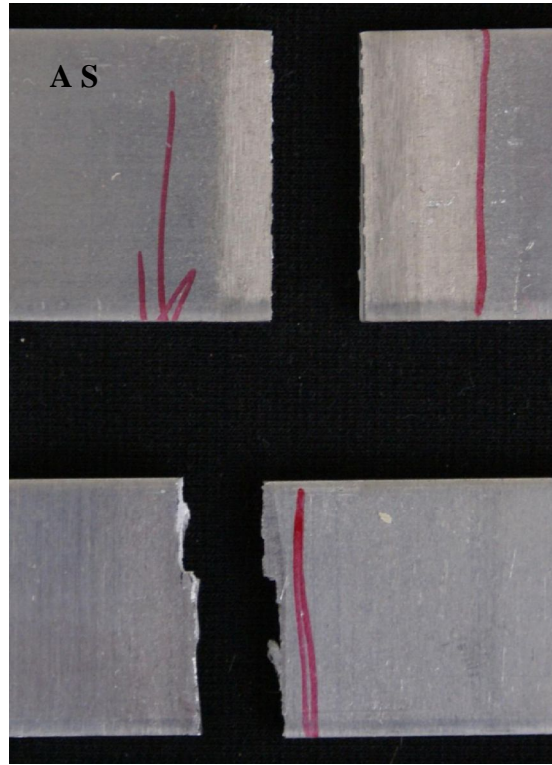


Şekil 3.15 1520/112 Nolu Numunenin Kaynak Yapısı

Mikro yapısal incelemeler sonrasında farklı parametrelere sahip sürtünme karıştırma numunelerin yorulma davranışları hakkında biraz daha fazla bilgiye sahip olmak için yorulma kopmalarında incelenmesi gerekir.



Şekil 3.16 Yorulma Kopması Bölgeleri



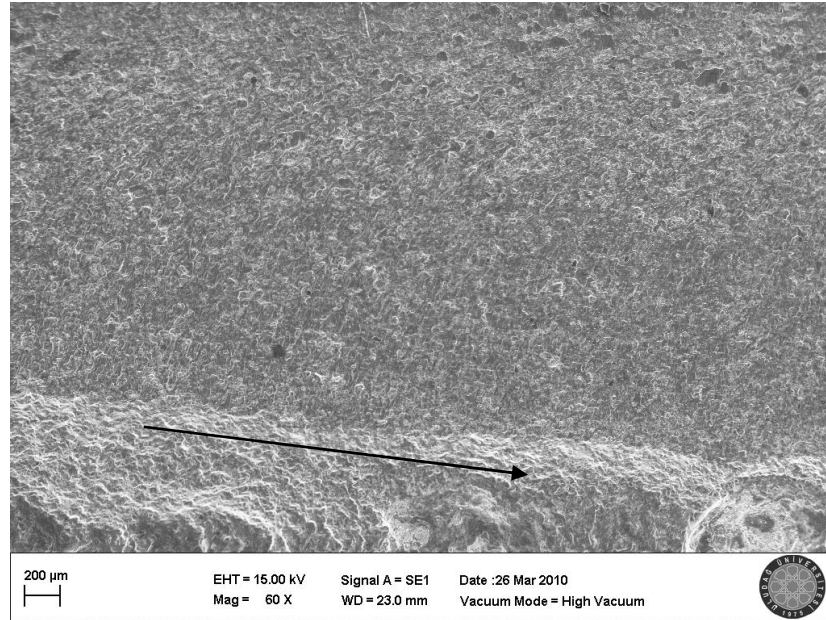
Şekil 3.17 Kaynak Dikişinde Kopma

Numunelerin belirli çevrim sayıları sonrası kırılmaları yukarıdaki Şekil 3.16 de görüldüğü gibidir. Şekil 3.17 'de 1070/40 parametre değerlerine sahip 18 nolu numunedeki kırılmayı görmekteyiz. Bu kırılma kaynak bölgesinin ilerleme tarafı olarak nitelendirilmiş bölgesi içerisinde gerçekleşmiştir. Şekil 3.16 'de 20 nolu numune de ise temel malzemenin yaşamış olduğu kırılmayı görmekteyiz. Bu iki kırılma da 65 MPa gerilme altında gerçekleşmiştir. Yüzeysel olarak görülen bu kırılmaların mikroskop altında incelenmesinde fayda vardır.

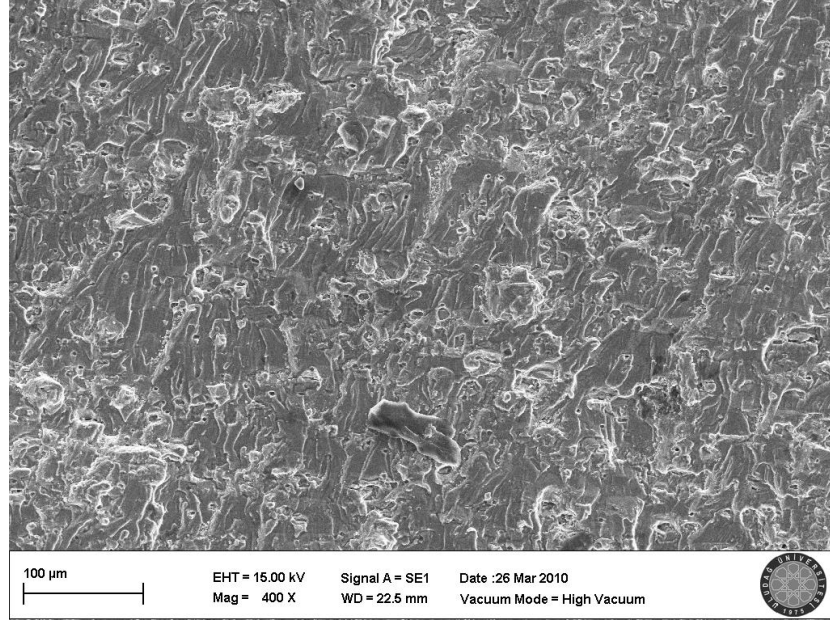
Bu amaçtan hareketle yorulma kırılma yüzeylerini incelemek adına 65 MPa 'lık gerilme değerinde yapılmış çalışmalardaki numuneler incelemeye alındı. Öncelikle bunların elektron mikroskobu altında incelenmesine olanak verilecek şekilde kesilerek hazırlanması gerekti. Laboratuvar ortamında yorulma sonrası ilerleme tarafında kalan kısımdan kesilme işlemi yapılarak numuneler bant yardımıyla birbirine bağlandı.

Elektron mikroskobu altındaki incelemelerde X60, X400, X1000, X2500 ve X5000 büyütme uygulandı.

İncelemelerimize 65 MPa altında 229387 çevrim sayısına kadar yorulma mukavemeti göstermiş olan 2140/112 parametrelili numune ile başladık. Bu tip numune de yorulma kırılması olayı geri çekilme bölgesinde gerçekleşmiştir. 60 kat büyümeye sahip yandaki görüntünün işaretli bölgesinde yorulma çatlakları görülmektedir. Şekil 3.18 ' de işaretli bir şekilde bu gösterilmektedir.

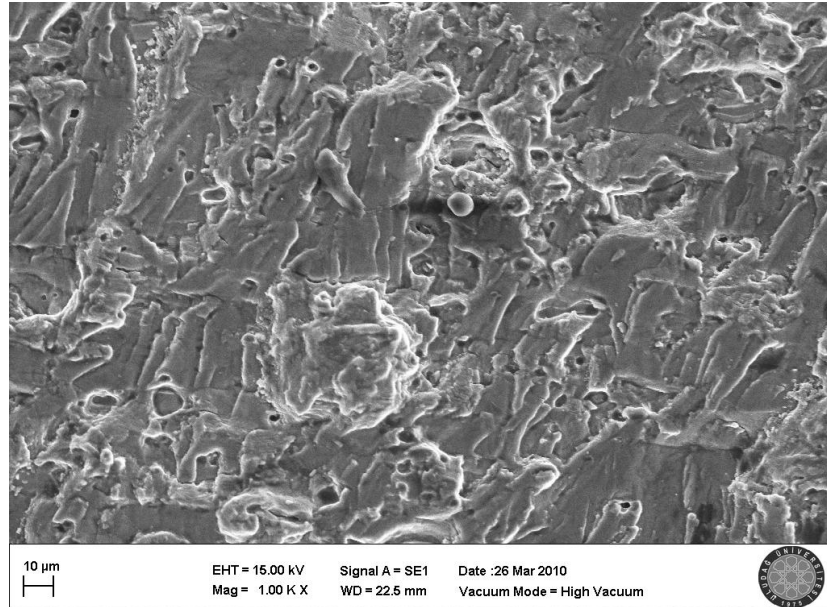


Şekil 3.18 2140/112 Nolu numune için kırılma yüzeyi (X60)



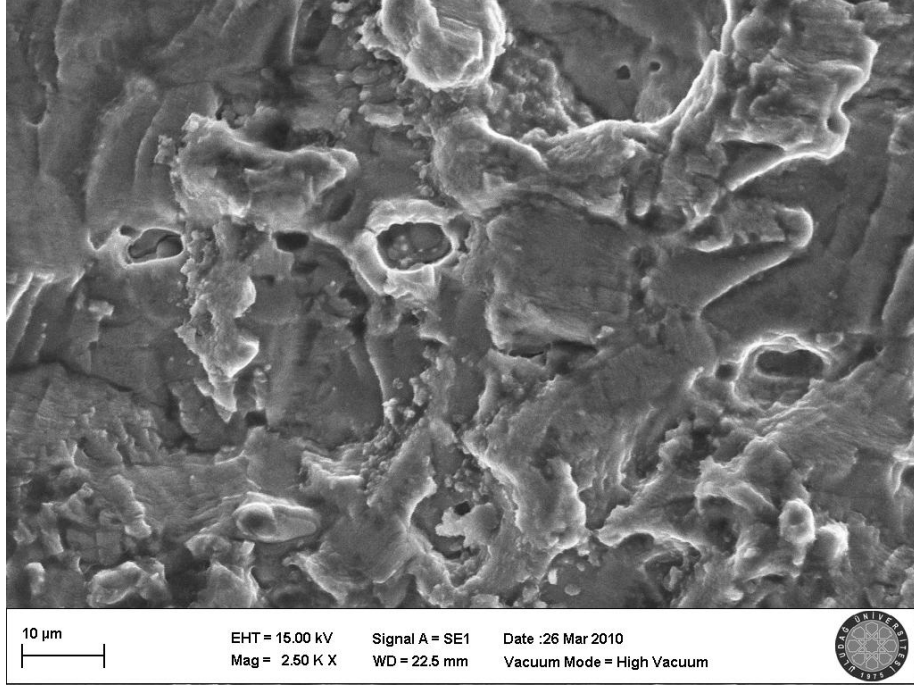
Şekil 3.19 2140/112 Nolu numune için kırılma yüzeyi (X400)

Şekil 3.19 daki gibi büyütmenin biraz daha artırılması ile bazı bölgelerdeki zoraki yorulma çatlakları ve kayma bölgeleri de göz önüne çıkmaktadır. 65 MPa altında zorlanmış 2140/112 parametrelerine sahip numunenin diğer elektron mikroskobu görüntülerini de Şekil 3.20, Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de görebilmekteyiz.

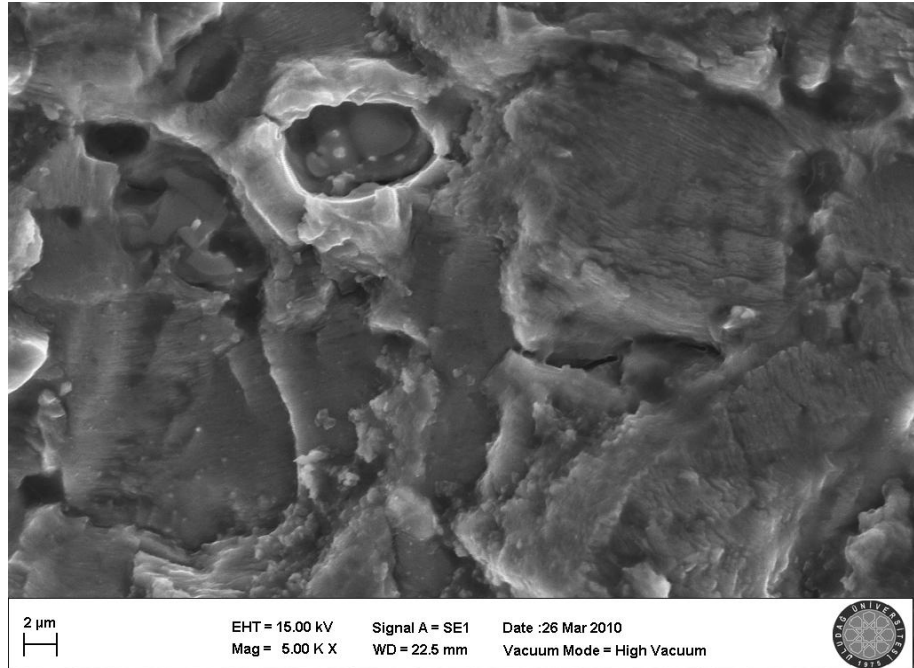


Şekil 3.20 2140/112 Nolu numune için kırılma yüzeyi (X1000)



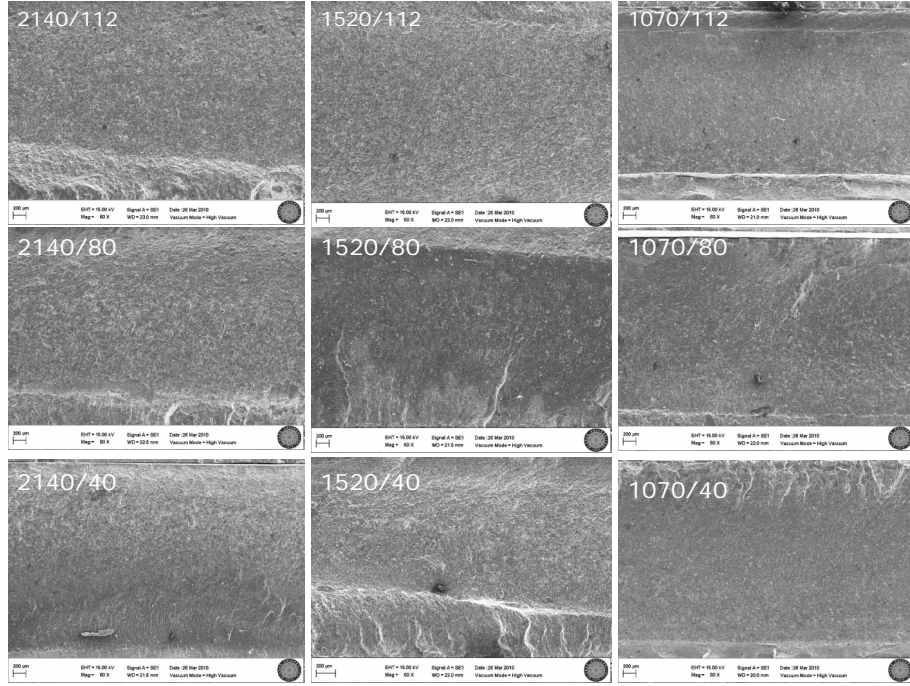


Şekil 3.21 2140/112 Nolu numune için kırılma yüzeyi (X2500)

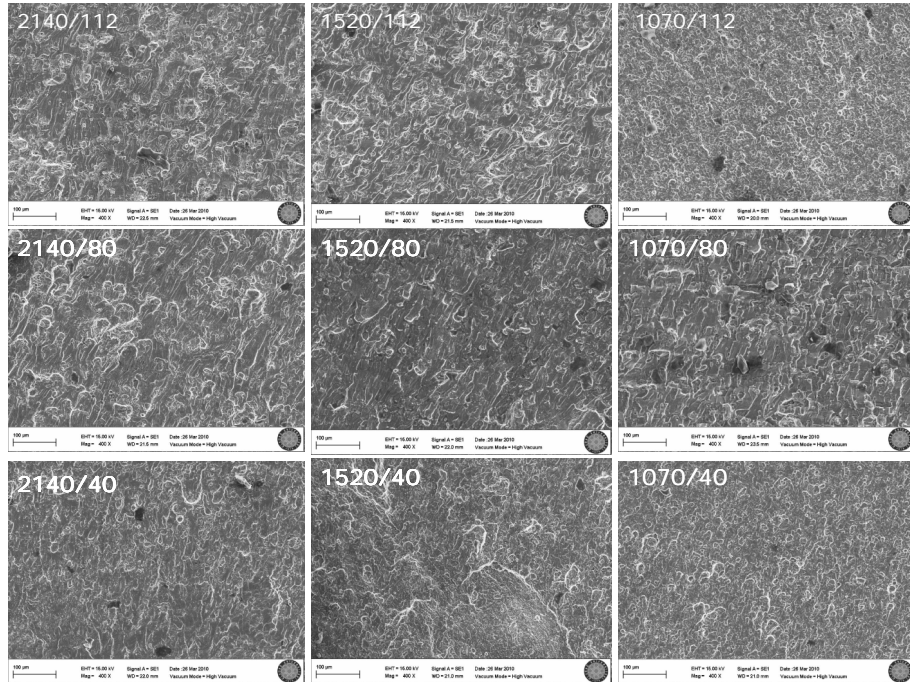


Şekil 3.22 2140/112 Nolu numune için kırılma yüzeyi (X5000)

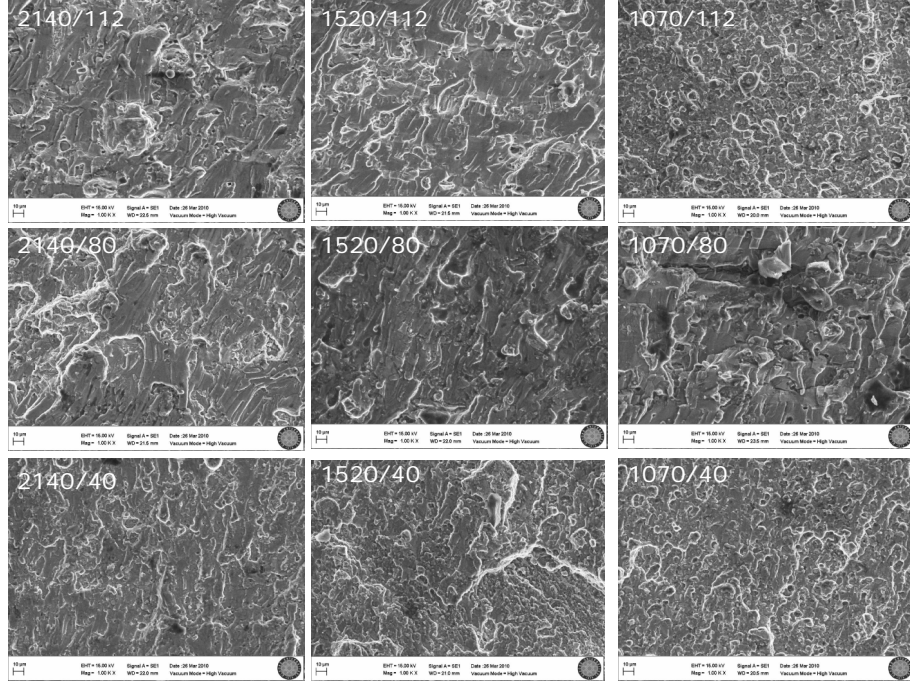
Diğer kırılma yüzeyi görüntülerini de Şekil 3.23, Şekil 3.24, Şekil 3.25, Şekil 3.26 ve Şekil 3.27 görmekteyiz. Bu görüntüleri kullanmak suretiyle de 65 MPa altında farklı parametreler altında oluşan yorulma kırılmalarını karşılaştırma imkanı bulabiliriz.



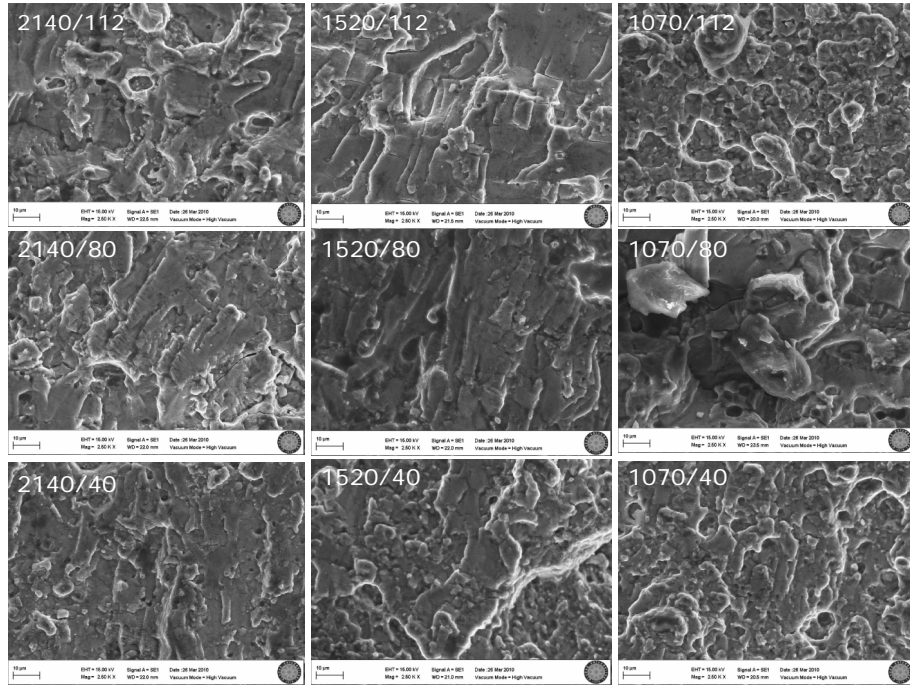
Şekil 3.23 Kırılma Yüzeyleri (X60)



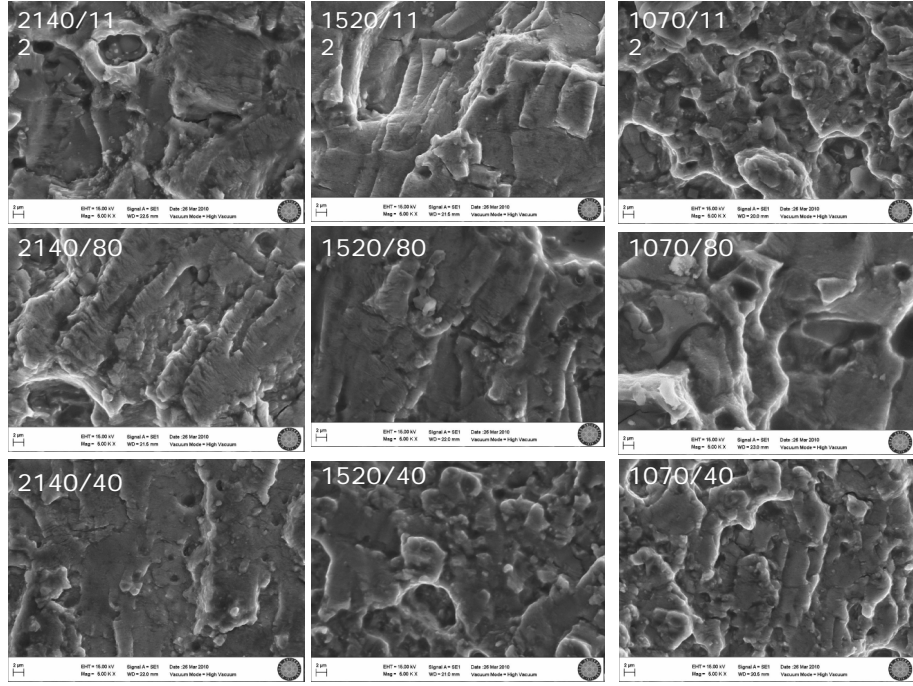
Şekil 3.24 Kırılma Yüzeyleri (X400)



Şekil 3.25 Kırılma Yüzeyleri (X1000)



Şekil 3.26 Kırılma Yüzeyleri (X2500)



Şekil 3.27 Kırılma Yüzeyleri (X5000)

## SONUÇ

Bu çalışmamızda ülkemiz endüstrisinde yeni tanınmaya başlayan kaynaklı birleştirme yöntemlerinden biri olan sürtünme karıştırma kaynağını inceleme fırsatı bulduk. Çalışmalarımızı bu tip birleştirmelerin yorulmaya karşı dayanımları üzerine yoğunlaştırmış olduk bu amaçla işe okulumuz adına daha sonraki yıllarda da tabii ki gerekli önem verildiği takdirde hizmet edebileceğine inandığımız bir yorulma cihazı imalatı ile başladık. Uzun bir işlem süreci sonrasında başlangıç adına yeterli olabilecek veri elde ettik ve kaynak bölgemizin yorulma davranışı hakkında çeşitli kazanımlarda bulunduk. Buradan hareketle sonuçları maddeler halinde yazacak olur isek;

1) Öncelikli olarak tasarımı ve imalata sağlanmış olan ankastre tipte eksenel eğme yorulması gerçekleştiren sistemimiz prototip olarak nitelendirebileceğimiz numunelerin hazırlanması ile çalışırılığı gözlemlendi. Deneysel çalışmalar sonrasında elde edilen tecrübeler yardımıyla yorulma cihazı ile ilgili gözlenen aksaklıkların çözümü ile ilgili fikirler ve sistemin gelişimi ile ilgili yeni inovatif bakış açıları geliştirildi.

2) 3.25 mm kalınlığındaki 2014 serisi Al-alajımı levhalar başarılı bir şekilde sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirildi. Farklı parametrelere göre birleştirilen numunelerin, başlangıç olarak kaynak dikişi görüntüsünün, diğer kaynak yöntemlerine göre çok daha düzgün olduğu görüldü.

3) Esas malzemenin eğmeli yorulma dayanımı kaynaklı numunelere göre yüksek çıktığı görüldü. Fakat buna rağmen bazı parametre değerlerinde temel malzeme seviyesinde sonuçlara ulaşıldı. Bu noktadan yaptığımız çıkarımlar ile sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili optimum parametreler belirlendi. 2140/112, 1520/80 ve 1070/80 incelemelerimiz sonrasında en uygun parametreler oldu.

4) Parametre değerlerinin daha iyi irdelenmesi adına mikro yapısal incelemelerde bulunuldu bu incelemeler sayesinde kaynak metalürjisindeki yapılar incelendi ve öncelikli çalışmalar ile tutarlılık gözlemlendi. Kaynak merkezi; Termomekanik olarak etkilenmiş alan; Isıdan etkilenmiş alan ve temel malzeme üzerine mikroskop altında

yüzlük büyütme sahip görünümler alındı. Yorulma davranışları eksenel tipte yorulma cihazı ile incelenmiş olan ve bunun sonrasında genel sonuçlara sahip olan numunelerin mikro yapısal verilerle birlikte irdelenmesi sağlandı.

5) Mikro yapı görünümleri sonrasında sürtünme karıştırma kaynağındaki sürtünme nedeniyle oluşan ısının etkileri ilgili bilgi sağlandı. Sağlanmış olan bu bilgiler daha önceki öngörülerimi destekler nitelikte olması sebebiyle bazı deney grupları ile ilgili genellemelerde bulunuldu. Bunun sonucu olarak ufak taneli kaynak yapılarının daha yüksek değerlerde yorulma dayanımına sahip olduğu görüldü.

6) Sürtünme karıştırma kaynak işlemi sırasında uygulama sistemimizden kaynaklanan bir zaaf nedeniyle kontrol edilemeyen bir parametrenin etkileri de 1520/112 nolu parametre değerli grubun mikro yapısal özellikleri ve genel sonuçları sebebiyle görüldü. Bu sayede sürtünme karıştırma kaynağında baskının ne kadar önemli olduğu ortaya çıktı.

7) Yorulma kırılması hakkında ve yorulma sonrası kırılma yüzeyinde neler olduğu ile ilgili daha fazla kazanım elde etmek adına elektron mikroskobu ile görüntü alınması sağlandı. 65 MPa kuvvet değerinde yapılmış olan yorulma zorlaması numunelerinden hazırlanan bir grubun elektron mikroskobunda görüntü alması gerçekleşti. Görüntü alınması X60, X400, X1000 ,X2500 ve X5000 değerlerinde gerçekleştirildi. Farklı büyütmeyle görüntü alınması sebebiyle kaynak bölgelerinde gerçekleşmiş olan yorulma çatlakları, ani kırılmalar ve kayma kuşağı gibi yorulma sonrasında oluşan yapıların görülmesi sağlandı.

AKKURT,M. Makine Konstrüksiyonunda Güvenirliğin Esasları. Makine Müh. Odası Yayını, No.106, İstanbul 1977

ATAOGLU,H.,MISTIKOGLU,S.,ÇAM,G.2003. Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Bir Al Alaşımının İy Yapı ve Mekanik Karakterizasyonu, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı

BERG,D.E.,KLİMAS,P.C.1989. Fatigue Characterization of a Wavt Blade Mateiral. Proceedings of the Eighth ASME Wind Energy Symposium, New Mexico, p.19-23.

CEDERQVIST,L.,REYNODLS,A.P. 2000. Factors Affecting the Properties of Friction Stir Welded Aluminum Lap Joints. Journal of Materials Processing Technolog,

ÇAM,G.2002. Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Uygulamaları, PAÜ Mühendislik Fakültesi 9. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, p.450-458

ÇAM,G.2003a.Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Uygulama Alanları. 3. Uluslar arası Teknolojiler Sempozyumu Bildiriler Kitabı. p.113–124.

ÇAM,G.2003b.Sürtünme Karıştırma Kaynağı Gelişmeler. TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler

ÇÖKELEK.M.2001. Islah Çeliklerinde Isıl İşlem Parametrelerinin Yorulma Limitine Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi

DAVİS,C.J.,THOMAS,W.M., 1996 Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys Welding Journal, Cambridge, U.KKurt A., Boz M., Özdemir M. Sürtünme p41-45

DE ER,M.1995.Perlitik-Ferlitik ve Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yorulma Dayan m Üzerine Mikro Yap ve Yüzey İ lemlerinin Etkisi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Ana Bilim Dal , Konya, ,

DOĞAN,S.2006. AA5754-H12 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında İşlem Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkileri Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi Eskişehir

ER,M. 2006 Yüksek Frekanslı, Genlik Ayarlı Eğilme Yorulması Test Cihazı Tasarımı ve 1100-H14 Alüminyum Levhasının Eğilme Yorulması Davranışının İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi Balıkesir

EREN,T.2005. AA 6063-T6 Borularının Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi Eylül KAYSERİ Erciyes Üniversitesi

FROST,N.E.,MARSH, K.J.,POOK,L.P.1974. Metal Fatigue.Oxford p54-65.

FUCHS,H.O.,STEPHENS,K.I. 1980. Metal Fatigue İn Engineering.N.York p135

GRUENBERG,K.M.,CRAIG,B.A.,HILLBERRY,B.M.,BUCCI,R.J.,HINKLE, A.J. 2004.Predicting Fatigue Life of Pre-corroded 2024-T3 Aluminum From Breakingload Tests. International Journal of Fatigue, 615–627).

HERMAN SHEN,M.H.1999. Reliability assessment of high cycle fatigue design of gas turbine blades using the probabilistic Goodman Diagram International Journal of Fatigue p.699–708

JOHNSEN,M.R. 1999 Friction Stir Welding Takes Off at Boeing, Welding Journal, Cambridge, U.K. February p35-39

KARAGÖZ,M.,AKAGÜNDÜZ.B. Yorulma Olayı ve Otomat Çeliğinde Yorulmanın Deneysel Olarak İncelenmesi

KRISHNAN, K.N., 2002, On the formation of onion rings in friction stir welds, Material Science and Engineering, 246-251

KUMRU,N.2007. Etial-141, 145 ve 160 Tipi Döküm Alüminyum ile Plaka Tipi Alüminyum Malzemelerden Yorulma Makinesi Tasarımı ve Eğilmeli Yorulma Davranışlarının İncelenmesi Doktora Tezi

MERT, S. VE KALUC, E., 2003, Surtunme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 103-115.

MISHRA, R.S. AND MA, Z.Y., 2005, Friction stir welding, Materials Science and Engineering, 78p.

MOORE,H.F.,KOMMERS,J.B.,1972 .The Fatigue Of Metals.N.York. p5–12

ONARAN, K., Malzeme Bilimi Bilim Teknik Yayınevi 1999

PAEPEGEM,W.V.,DEGRİECK,J. 2001.Experimental Set-up For and Numerical Modelling of Bending Fatigue Experiments on Plain Woven Glass/Epoxy Composites. Composite Structures, (1–8)

SAKİN,R.2004 Bilgisayar Destekli, Çok Numuneli Eğilme Yorulması Test Cihazı Tasarımı ve Cam-Fiber Takviyeli Polyester Kompozitlerde Eğilme Yorulması Davranışının İncelenmesi Doktora Tezi Mak. Yük. Müh. Balıkesir

SERFİÇELİ, Y., S., 2000, Malzeme Bilgisi, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, 181-186.

SRIVATSAN,T.S.,KOLAR,D.,MAGNUSEN,P. 2002. The Cyclic Fatigue And Final Fracture Behavior of Aluminium Alloy 2524. Materials and Design, 23, (129-139)

STRAND, S., 2003, Joining Plastics- Can Friction Stir Welding Compete, Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing&Coil Winding Technology Conference, 321-326S.



TAUSCHER, H.; (GULEC, S.; ARAN, A.), Celik ve Dokme Demirlerin Yorulma Dayanımı, Malzeme Davranısı, Bicim Etkisi ve Hesaplama Yontemleri” MBEAE MATBAASI-GEBZE 1983

THOMAS, W.M., NICHOLAS, E.D.1997 Friction Stir Welding for the Transportation Industries Materials and Design, p.269-273,.

WEISSBACH,W.1998. (ANIK, S.; ANIK, E. S.; VURAL, M.) Malzeme Bilgisi ve Muayenesi Birsen Yayınevi

WILLIAM,F.S.,(KINIKOĞLU.N).2002 Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Literatür Yayıncılık

YALÇIN,H.,GÜRÜ,M.2002 Malzeme Bilgisi Palme Yayıncılık

ZEYTİN,H.K.,2000, Alüminyum alasımları otomotiv endüstrisinde uygulamaları ve gelecegi, TÜBİTAK Marmara Arastırma Merkezi, 91s

Fatigue of Composition

[www.aero.iitb.ac.in:8081/awarman/composite\\_course/Chapter18.pdf](http://www.aero.iitb.ac.in:8081/awarman/composite_course/Chapter18.pdf).

MATWEB

<http://www.matweb.com/>

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Ali BAYRAM'A, sürtünme karıştırma kaynak yöntemi üzerine tecrübelerini paylaşan Araştırma Görevlisi Dr. Hakan AYDIN'A, makinenin imalatının sağlanmasına yardımcı olan öncelikli olarak Cemal ve Celal TUNAOĞLU kardeşlere ve sahibi buldukları MKT Kalıbın tüm personeline, numunelerin hazırlanması sırasında karşılaşılan ihtiyaçların ve problemlerin giderilmesinde yardımcı olan mühendislik bölümü atölye ve meslek yüksek okulu makine bölümü çalışanlarına, elektron mikroskobu ile yapılacak çalışmaları sırasında destekte bulunan Yrd. Doç. Dr. S. Kemal AKAY'A, yorulma cihazı imalatı öncesinde sağlamış olduğu literatür bilgileri nedeniyle Öğretim Görevlisi Dr. Raif SAKİN'E, bu süreçte her daim yanımda bulunan sevgili meslektaşım M. Tahir YILDIRIM'A ve son olarak da çalışmalarım süresince her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.