

**T4 VE T6 YAŞLANDIRMA İŞLEMLERİ  
UYGULANMIŞ 2014 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ  
FRETTE YORULMA DAVRANIŞI ÜZERİNE  
RELATİF KAYMA GENLİĞİNİN ETKİSİ**

**Mustafa ÖCAL**

**Yüksek Lisans Tezi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Doç. Dr. Recep SADELER**

**2011  
Her hakkı saklıdır**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

T4 ve T6 YAŞLANDIRMA İŞLEMLERİ UYGULANMIŞ 2014  
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ FRETTEK YORULMA DAVRANIŞI  
ÜZERİNE RELATİF KAYMA GENLİĞİNİN ETKİSİ

Mustafa ÖCAL

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZURUM  
2011

Her hakkı saklıdır



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**T4 VE T6 YAŞLANDIRMA İŞLEMLERİ UYGULANMIŞ 2014 ALÜMİNYUM  
ALAŞIMININ FRETİNG YORULMA DAVRANIŞI ÜZERİNE RELATİF KAYMA  
GENLİĞİNİN ETKİSİ**

Doç. Dr. Recep SADELER danışmanlığında, Mustafa ÖÇAL tarafından hazırlanan bu çalışma 25/07/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından. Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Recep SADELER

İmza

Üye : Doç. Dr. Yaşar TOTİK

İmza

Üye : Yrd. Doç. Dr. Turan ÇALBAN

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof.Dr.Ömer AKBULUT

**Enstitü Müdürü**

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### **T4 ve T6 YAŞLANDIRMA İŞLEMLERİ UYGULANMIŞ 2014 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ FRETTEG YORULMA DAVRANIŞI ÜZERİNE RELATİF KAYMA GENLİĞİNİN ETKİSİ**

Mustafa ÖCAL

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Recep SADELER

Fretting, temas halindeki iki eleman arasında meydana gelen küçük genlikli titreşimli bir kayma olayıdır. Fretting yorulması, içerisinde triboloji, temas mekanizmaları ve malzeme bilimi gibi birçok farklı disiplini barındıran ciddi bir mühendislik problemidir. Fretting yorulmasını etkileyen çok sayıda parametre mevcuttur. Bağlı kayma genliği (*relative slip*) değeri, en önemli parametrelerden birisidir. Birçok endüstri uygulamasında yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımları mühendislik ve yapısal uygulamalarda fretting yorulma hasarına maruz kalmaktadır. Bu çalışmada, doğal (T4) ve suni (T6) yaşlandırma işlemleri uygulanmış 2014 Alüminyum alaşımının farklı bir malzeme (AISI 1045 çeliği) ile temasından oluşan fretting yorulma davranışına kayma genliğinin etkisi incelendi.

Elde edilen sonuçlar, fretting yorulma ömrünü iyileştirmede suni yaşlandırma (T6) işleminin doğal yaşlandırma (T4) işlemine göre daha etkin olduğunu göstermektedir. Bu durum, düşük bağlı kayma genlik değerlerinde, (T6) işleminin fretting yorulma çatlağının oluşmasını engelleyecek daha kararlı bir mikro yapı bariyeri oluşturmasının bir sonucu olarak yorumlanabilir.

**2011, 83 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Fretting yorulması, Relatif Kayma Genliği, 2014 gurubu Alüminyum Alaşımı, Doğal (T4) ve Suni (T6) yaşlandırma.

## **ABSTRACT**

Master Thesis

# **INFLUENCE OF RELATIVE SLIP ON FRETTING FATIGUE BEHAVIOUR OF 2014 ALUMINIUM ALLOY WITH THE AGE-HARDENED CONDITIONS T4 AND T6**

Mustafa ÖCAL

Atatürk University  
Institute of Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor. Asst.Prof. Dr. Recep SADELER

Fretting is a cyclic relative tangential motion between two contacting surfaces. Fretting fatigue is a serious problem that involves many aspects of tribology, contact mechanics and materials science. There are many parameters effect the fretting fatigue event. Most important of these parameters is the relative slip amplitude. Most of the industrial and engineering applications, especially Aluminium and its'alloys be exposed of the damage of fretting fatigue . In this study, we investigate the effect of relative slip amplitude on 2014 Aluminium alloys'(Fabricated, T4 thermal processed, T6 Thermal Processed) fretting fatigue lifetime.

The datas obtained from the experiments showed us the artificial temper T6 is more effective to improve the fretting fatigue life when compared with natural temper T4. It may be attributed to a higher microstructural barrier to the fretting fatigue crack nucleation and initiation due to having lower values of relative slip in artificial temper T6.

**2011, 83 Pages**

**Keywords:** Fretting Fatigue, Relative Slip Amplitude, 2014 Aluminium Alloys, T4 Temper Process, T6 Temper Process.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı hazırlamamda değerli yardımını, anlayıŐ ve desteğini esirgemeyen, tım çalıŐmanın içinde bizzat bulunarak değerli bilgi birikimiyle beni aydınlatan ve yol gosteren tez yoneticim, değerli hocam Sayın Doç. Dr. Recep SADELER'e sonsuz teŐekkürü borç bilirim.

Deneysel çalıŐmalarımın her aşamasında yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen, Şu an doktora eğitimini sürdüren değerli arkadaşım Sayın Selçuk ATASOY'a, deneysel numunelerin hazırlanmasındaki yardım ve emeklerinden dolayı Sayın Makine Mühendisi Murat AKBULUT'a ve bu çalışma süresince bana tam destek olan ailem ve özellikle de eŐime içtenlikle teşekkür ederim.

Mustafa ÖCAL

Haziran 2011

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. KURAMSAL TEMELLER</b> .....	9
2.1. Alüminyum Alaşımları ve Endüstrideki Yeri .....	9
2.2. Alüminyum Elementinin Özellikleri .....	9
2.3. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	10
2.3.1. 1XXX serisi alüminyum alaşımları.....	11
2.3.2. 2XXX serisi alüminyum alaşımları .....	11
2.3.3. 3XXX serisi alüminyum alaşımları .....	12
2.3.4. 4XXX serisi alüminyum alaşımları .....	13
2.3.5. 5XXX serisi alüminyum alaşımları .....	13
2.3.6. 6XXX serisi alüminyum alaşımları .....	13
2.3.7. 7XXX serisi alüminyum alaşımları .....	14
2.3.8. 8XXX serisi alüminyum alaşımları .....	14
2.4. Isıl İşlem Sembolleri .....	14
2.5. Isıl İşlem Koşulları .....	15
2.6. Alüminyum ve Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler.....	15
2.6.1. Yaşlandırma ısıl işlemi .....	17
2.7. Fretting (Aşınmalı yorulma)'in Tanımı .....	27
2.7.1. Fretting aşınması .....	27
2.7.2. Fretting yorulması .....	29
2.8. Fretting Yorulma Kuramları.....	30
2.9. Temas (Kontakt) Mekaniği .....	31
2.10. Çatlak Oluşumu ve Gelişme Süreci .....	32
2.11. Fretting Yorulmasına Etki Eden Faktörler .....	34

2.11.1. Relatif (bağıl) kaymanın etkisi .....	35
2.11.2. Normal yükün (kontak basıncının) etkisi .....	37
2.11.3. Frekansın etkisi.....	39
2.11.4. Yüzey durumunun (yüzey pürüzlülüğü) etkisi.....	39
2.11.5. Çevrenin etkisi.....	40
2.11.6. Sürtünme katsayısının etkisi.....	41
2.12. Aşınma Mekanizmaları .....	41
2.12.1. Adhesiv aşınma .....	41
2.12.2. Abrasiv aşınma.....	43
2.13. Aşınmanın Bağlı Olduğu Faktörler .....	44
2.13.1. Malzemenin cinsi .....	44
2.13.2. Malzemenin mikro yapısı.....	45
2.13.3. Malzeme şekli ve boyutları .....	45
2.13.4. Ortamın etkisi .....	45
2.13.5. İşletme koşulları.....	46
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM .....</b>	<b>47</b>
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme .....	47
3.2. Numunelerin Hazırlanması.....	47
3.3. Fretting Test Sistemi.....	49
3.4. Yorulma Test Cihazı.....	52
3.4.1. Tekrarlanan eğilme deney düzeneği .....	53
3.5. Deneysel İşlemler .....	55
3.5.1. Ekstansometre kalibrasyon işlemi .....	60
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>62</b>
<b>5. SONUÇLAR.....</b>	<b>75</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>76</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>81</b>
EK 1.....	81
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Al	Alüminyum elementi
Fe	Demir elementi
HV	Vickers Sertlik değeri
HF	Hidroflorik Asit
HCl	Hidroklorik Asit
HNO <sub>3</sub>	Nitrik Asit
Mn	Mangan elementi
Si	Silisyum elementi
SiC	Silisyum Karbür
N <sub>f</sub>	Çevrim Sayısı
R <sub>a</sub>	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)
τ	Kesme gerilmesi
σ	Çeki-bası gerilmesi
δ	Kayma genliği
P	Normal yük (temas yükü)
μ <sub>f</sub>	Sürtünme katsayısı
S	Gerilme Genliği (MPa)

### Kısaltmalar

AA	Alüminyum Alaşımı
AISI	American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir Çelik Enstitüsü)
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
GP	Guinier Preston
MSSR	Modified Shear Stress Range (Düzeltilmiş kayma gerilmesi miktarı)
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SRF	Straight Ratio Fretting (Düz yorulmanın fretting yorulmasına oranı)
USB	Universal Serial Bus (Universal sei bağlantı noktası)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b>Şekil 1.1. (a)</b> Bir mil üzerinde rulman temas bölgesinde meydana gelen fretting hasarı <b>(b)</b> bir kaymalı yatağın arka kısmında gövdeye oturan yüzeyde meydana gelen fretting hasarı .....	2
<b>Şekil 2.1.</b> Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması .....	10
<b>Şekil 2.2.</b> Al- Cu faz diyagramı .....	18
<b>Şekil 2.3.</b> Yaşlandırma ısııl işleminde faz diyagramına göre işlem sıcaklıklarının gösterilmesi .....	19
<b>Şekil 2.4.</b> Al-Cu faz diyagramı ve Al %4 Cu alaşımının çözeltiye alma işlemi ve mikro yapı değişimleri .....	21
<b>Şekil 2.5.</b> Yaşlandırma ısııl işlemi aşamaları ve mikro yapıları.....	23
<b>Şekil 2.6.</b> Yaşlanma süresine bağlı olarak malzemenin sertlik veya mukavemetindeki değişimi .....	24
<b>Şekil 2.7.</b> Yaşlandırma sırasındaki çeşitli ara durumların gösterimi.....	24
<b>Şekil 2.8.</b> Çökeltiiler arasında oluşan yarım halka şeklindeki dislokasyonlar...	25
<b>Şekil 2.9.</b> Aşırı büyük çökeltiilerin dislokasyonlar tarafından kesilmesi .....	25
<b>Şekil 2.10.</b> Fretting aşınma evreleri .....	29
<b>Şekil 2.11.</b> Çatlak oluşumunun şematik gösterimi .....	32
<b>Şekil 2.12. ( a )</b> I. ve II. Bölgede çatlak yayılması <b>(b)</b> Bu tip bir çatlağın SEM görüntüsü.....	33
<b>Şekil 2.13.</b> Frettingi etkileyen faktörler.....	34
<b>Şekil 2.14.</b> Kayma genliğinin “Fretting Yorulma Ömrü” ve “Aşınma Oranı” üzerine etkisini gösterir grafik.....	36
<b>Şekil 2.15.</b> Adhesiv aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi.	42
<b>Şekil 2.16.</b> Üç elamanlı abrasiv aşınma .....	43
<b>Şekil 2.17.</b> İki elemanlı abrasiv aşınma .....	43
<b>Şekil 3.1.</b> Fretting yorulma numunesi boyutları.....	48
<b>Şekil 3.2.</b> Kontak pabucu boyutları.....	48

<b>Şekil 3.3.</b> Numune–pabuç–ekstansometre bağlantısı ve gerilme durumu şematik çizimi.....	50
<b>Şekil 3.4.</b> Yük hücresi- numune- pabuç- ekstansometre bağlantısı fotoğraf görüntüleri.....	50
<b>Şekil 3.5.</b> Yorulma Cihazı üzerinde numune–pabuç–ekstansometre bağlantısı fotoğraf görüntüsü.....	51
<b>Şekil 3.6.</b> Düzlemsel Eğilmeli yorulma test cihazı için sürtünmeli temas test düzeneği ve teknik detayları .....	51
<b>Şekil 3.7.</b> Düzlemsel Eğilmeli yorulma test cihazı için sürtünmeli temas test düzeneğinin üç boyutlu gösterimi .....	52
<b>Şekil 3.8.</b> Tekrarlanan eğilme test sisteminin şematik çizimi.....	53
<b>Şekil 3.9.</b> Fretting test sistemli düz eğilmeli yorulma test ünitesinin fotoğraf görüntüsü.....	54
<b>Şekil 3.10.</b> Gerilmeye maruz kalan numune kesiti alanı.....	55
<b>Şekil 3.11.</b> Suni yaşlandırma prosesi (T6) nin şematik diyagramı.....	56
<b>Şekil 3.12.</b> Doğal yaşlandırma prosesi (T4) nin şematik diyagramı.....	56
<b>Şekil 3.13.</b> Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	57
<b>Şekil 3.14.</b> PC kontrollü Beuhler-Omnimet Vickers sertlik ölçme cihazı.....	58
<b>Şekil 3.15.</b> Wheatstone köprüsü kurulumu .....	59
<b>Şekil 3.16.</b> Relatif kaymayı ölçen cihaz (Ekstansometre) .....	59
<b>Şekil 3.17.</b> Data-logger cihazı kurulum şeması .....	60
<b>Şekil 4.1.</b> Numunelerin mikro yapıları.....	63
<b>Şekil 4.2.</b> Yaşlandırılmış (T4 ve T6) ve işlemsiz 2014 Al alaşımı numunelerin fretting yorulma testlerinin karşılaştırması.....	64
<b>Şekil 4.3.</b> İşlemsiz 2014 Al alaşımı (F)'de relatif kayma genliğinin fretting çevrim sayısı ile değişimi .....	65
<b>Şekil 4.4.</b> Doğal yaşlandırılmış 2014 Al alaşımı (T4)'de relatif kayma genliğinin fretting çevrim sayısı ile değişimi.....	66
<b>Şekil 4.5.</b> Suni yaşlandırılmış 2014 Al alaşımı (T6)'de bağıl (relatif) kayma genliğinin fretting çevrim sayısı ile değişimi.....	67
<b>Şekil 4.6.</b> Gerilme genliği-Relatif kayma genliği değişimi.....	68

<b>Şekil 4.7.</b> Uygulanan gerilme genliği seviyeleri ile fretting izi (scar) üzerinden ölçülmüş olan ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) ilişkisi.....	69
<b>Şekil 4.8.</b> Fretting hasarının oluşumunu gösteren modelin şematik çizimi..	70
<b>Şekil 4.9.</b> Fretting yorulmasında çatlak oluşumu safhalarının şematik gösterimi .....	71
<b>Şekil 4.10.</b> Fretting alanında temas alanının dış kenarında meydana gelen çatlak görüntüsü.....	71
<b>Şekil 4.11.</b> 300 MPa Gerilme genliğinde İşlemsiz 2014 Alüminyum alaşımı numuneye ait a). kırılma ve b).fretting izlerinin SEM görüntüleri.	72
<b>Şekil 4.12.(a-b)</b> 150 MPa gerilme genliği altında, F- 2014 Al alaşımı numuneye ait kırılma ve fretting izlerinin SEM görüntüleri; <b>(c-d)</b> 150 MPa gerilme genliği altında T4 numunelerin, kırılma ve fretting izlerinin SEM görüntüleri; <b>(e-f)</b> 210 MPa gerilme genliği altında T6 numunelerin, kırılma ve fretting izlerinin SEM görüntüleri. ....	73

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 3.1.</b> 2014 Al alaşımı kimyasal bileşimi.....	47
<b>Çizelge 4.1.</b> Yaşlandırılmış numunelerin ölçülen sertlik değerleri.....	62
<b>Çizelge 1.</b> İşlemsiz 2014 Al alaşımında relatif kayma genliğinin fretting çevrim sayısı ile değişimini gösterir tablo değerleri.....	81
<b>Çizelge 2.</b> Doğal Yaşlandırılmış 2014 Al alaşımı (T4)'de relatif kayma genliğinin fretting çevrim sayısı ile değişimini gösterir tablo değerleri.....	81
<b>Çizelge 3.</b> Suni Yaşlandırılmış 2014 Al alaşımı (T6)'de relatif kayma genliğinin fretting çevrim sayısı ile değişimini gösterir tablo değerleri.....	82
<b>Çizelge 4.</b> Uygulanan gerilme genliği seviyeleri ile fretting izi (scar) üzerinden ölçülmüş olan ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) değerlerini gösteren çizelge.....	82
<b>Çizelge.5.</b> Gerilme genliklerine karşılık Fretting yorulma ömürlerininin değişimini gösterir çizelge.....	83

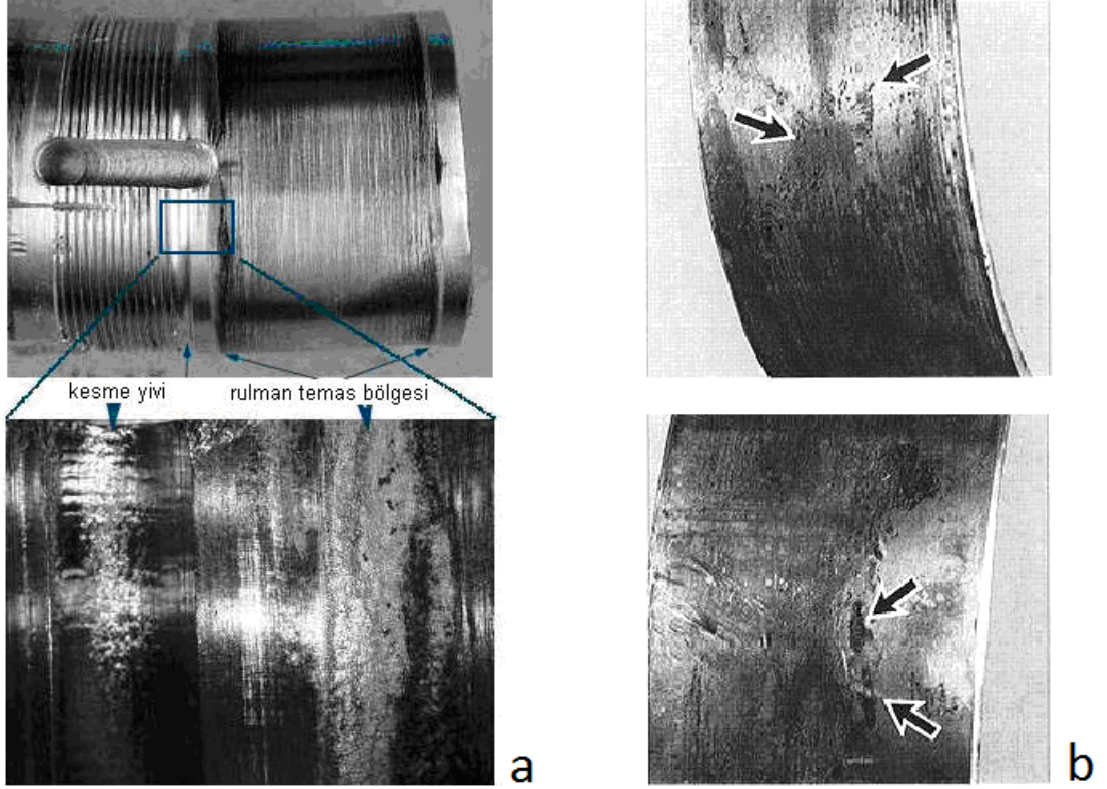
## 1. GİRİŞ

Fretting (yorulmalı aşınma), temas eden yüzeyler arasında titreşim veya elemanlardan birinin yorulma yüklemesine maruz kalmasından dolayı oluşan titreşimli bir kayma olayıdır. Fretting yorulması genellikle düşük bağıl kayma genliklerinde (20–30  $\mu\text{m}$ ) meydana gelir. Bu durum, temas halindeki elemanların çevrimsel dinamik yüklemeler altındaki küçük genlikli salınım hareketi ile ortaya çıktığı için, tasarımlarda yıkıcı etkiye sahip bir hasar türü oluşturur. Fretting yorulma hasarına özellikle; hava ulaşım araçları, trenler, gemiler, otomotiv sanayi, tarım makineleri, motorlar, yapım ekipmanları, ortopedik implantlar, yapay kalp ve roket motorlarında bulunan parçalarda sık olarak rastlanmaktadır. Fretting yorulması ile ortaya çıkan olumsuzluklar ciddi maddi harcamalara ve can kayıplarına neden olabilir. Dolayısıyla söz konusu bu hasarın birbiri ile temas halinde çalışan makine elemanlarında gerçekleşebileceği kabulünün yapıp, önlenmesi için gerekli mühendislik tedbirlerinin alınması gerekmektedir.

Fretting yorulma hasarının önlenmesi, iki önemli adımın atılması ile sağlanabilir. Değişik fretting şartları altında, masraflı deneyler yapılarak fretting yorulma hasarına etki eden mekanizmalar tanımlanmalıdır. İstenen şartlar için hasar mekanizmalarının tanımlanmasından sonra, fretting yorulma hasarından malzemeyi korumak için değişik metotlar öneren analitik yöntemler geliştirilmelidir.

Fretting yorulması içerisinde triboloji, temas mekanizmaları ve malzeme bilimi gibi disiplinleri barındıran ciddi bir mühendislik problemi olduğu için, fretting yorulmasına maruz kalan elemanların nasıl davranacağını tahmin etmek oldukça zordur. Fretting yorulma çatlağının oluşma ve yayılma safhaları, toplam yorulma ömrünün değişen yüzdelerini kapsar. Yorulma ömrünün ilk safhasında fretting yorulma çatlağının başladığı elemanlar için, çatlak yayılması bu sürecin önemli bir kısmını oluşturur ve fretting yorulma ömrü yalnızca çatlak yayılma modelleri ile tanımlanır. Diğer bir türde ise, çatlak oluşumu yorulma ömrünün önemli bir bölümünü teşkil eder. Bu durumda fretting yorulma şartlarında çatlak tespit edilir edilmez, söz konusu elemanlar

yenilenmelidir. Söz konusu çatlakların oluşumunu tam olarak öngören modellere ihtiyaç duyulur. Şekil 1.1.a–b’de sürtünmeli temas yorulmasının endüstriyel uygulamalarda oluşturduğu hasarlar için bazı örnekler verilmiştir.



**Şekil 1.1. (a)** Bir mil üzerinde rulman temas bölgesinde meydana gelen fretting hasarı **(b)** bir kaymalı yatağın arka kısmında gövdeye oturan yüzeyde meydana gelen fretting hasarı

Ohmae and Tsukizoe (1974) kayma genliğinin fretting üzerine etkisini araştırdılar. Bu araştırmada aşınma miktarı, sürtünme katsayısı ve elektrik temas direnci ölçülerek küçük genlik ile büyük genlik sonuçları karşılaştırılmıştır. Küçük genlikli fretting’de oksitlenme ile orta tipte aşınma meydana gelirken, büyük genlikli fretting’de oksidasyon ile birlikte adhezyon ve abrasiv fretting aşınması görülmektedir.

Dobromirski (1992) fretting yorulmasında birincil etkenler arasında kontak basıncı, relatif kayma genliği ve sürtünme katsayısı gibi faktörlerin yanı sıra 50 farklı değişkenin de rol aldığını rapor etmektedir.

Fretting yorulmasında relatif kayma genliğinin etkisi Nakazawa *et al.* (1994) tarafından incelenmiştir. Aslında konu ile ilgili yapılmış çok az çalışma vardır. Bu çalışmaların birkaçında relatif kayma genliğinin artışı ile yorulma dayanımı veya ömürde bir azalma olduğu rapor edilmektedir (Fenner and Field 1958; Sato and Fujii 1984; Mutoh *et al.* 1988). Yapılan diğer çalışmalarda ise, belirli bir kayma genliği değerinde yorulma dayanımı veya ömürde minimum değerlerin elde edildiği ifade edilmiştir (Nishioka and Hirakawa 1969; Gaul and Duquette 1980; Spink 1990; Gao *et al.* 1991). Bu yüzden, relatif kayma genliğinin, fretting yorulma ömrü üzerindeki etkisi henüz tam olarak netlik kazanamamıştır.

Nakazawa *et al.* (1994) yaptıkları çalışmada elde ettikleri grafik üzerinde relatif kayma genliğindeki artışla beraber fretting ömrünün keskince bir iniş sergilediğini ve tüm kontak basınçları altında bağıl kayma genliği değerinin yaklaşık 3 ile 8  $\mu\text{m}$  civarında asgari bir değerde kaldığını göstermişlerdir. Deneylerde kontak basıncı değeri 40 MPa iken geniş relatif kayma genliği aralıklarında, fretting yorulma çevriminin  $10^7$  çevrimin ötesine kolay bir şekilde geçebildiğini gözlemlemişlerdir. 80 MPa'nın üzerindeki kontak basıncı değerlerinde ise, fretting yorulma çevriminin relatif kayma genliğinin artışı ile beraber ancak aşama aşama artış eğilimi içine girdiğini rapor etmişlerdir. Aynı zamanda kontak basıncının artırılması ile, verilmiş bir kontak basıncı değerine karşılık gelen minimum fretting yorulma ömrünün düşüşe geçtiği ve relatif kayma genliğinin artış gösterdiği de vurgulanmıştır.

Fretting yorulmasının karmaşık yapısını ve fretting yorulma olayını anlamada önemli gelişmeler elde etmek için çok geniş tabanlı yapılan birçok çalışmada kontak basıncındaki artışın yorulma ömründe düşüşe neden olduğu rapor edilmiştir (Waterhouse 1968). Bazı çalışmalarda ise belli bir kontak basıncı değerinde fretting yorulma ömrünün minimum bir değere ulaştığı ifade edilmiştir (Lee *et al.* 2000).

Mühendis ve malzeme bilimcileri, fretting yorulması yüzey ile ilgili bir konu olduğu için, sert ve aşınma direnci yüksek yüzeylerin fretting hasarını azaltıcı etkiye sahip olduğuna inanırlar. Bu yüzden, geçmişte malzemenin fretting yorulma dayanımını



artırmak için temas yüzeylerinin özelliklerini değiştirecek pek çok yöntemi uygulamak için çaba sarf etmişlerdir. Fretting hasarını azaltmak için kullanılan pek çok yüzey modifikasyon metodu vardır (Li *et al.* 1988). Temas yüzeyinin durumu ve şartları, fretting hasarına karşı hassasiyeti belirleyen önemli faktörlerdir (Waterhouse 1992). Normal statik bir kuvvet uygulandığı zaman, yüzeyler arasında tekrarlı olarak küçük teğetsel relatif (bağıl) yer değiştirmeler olduğu zaman, fretting yorulma veya aşınması meydana gelir. Fretting yorulmasını etkileyen birçok faktör vardır. Yapılan çalışmada deneysel olarak farklı yüzey malzemesi kombinasyonlarında, fretting aşınması gözlenmiş ve sürtünmeli aşınma hacmi yeni bir metot ile tespit edilmiştir. Yüzey malzemelerinin fretting yorulma aşınması üzerine etkisi, farklı sürtünmeli aşınma boyutu, sürtünmeli aşınma hacmi ve aşınma izlerinin şekli tahmin edilerek belirlenmiştir (Endo and Marui 2002).

Literatürde araştırma sonuçları şunu göstermektedir ki; termomekanik yaşlandırma işlemleri Alüminyum alaşımlarının yorulma özellikleri üzerinde istikrarlı değerler vermemektedir. Bazı araştırmacılar (Broek and Bowles 1971; Ostermann 1971; Malakondaiah and Rama Rao 1977; Harendranath and Malik 1982; Sadeler *et al.* 2004; Ali 2005) termomekanik yaşlandırma işlemleriyle kayda değer bir gelişmenin elde edilebildiğini rapor etmektedirler. Aynı zamanda bazı araştırmacılar (Lyst 1968; Di Russo *et al.* 1973; Reimann and Brisbane 1973) ise termomekanik yaşlandırma işleminin herhangi bir etkisinin olmadığını veya zarar veren yönde bir etkisine rastlayamadıklarını rapor etmişlerdir.

Malakondaiah and Rama Rao (1977) ile Broek and Bowles (1971) ise Alüminyum alaşımları içinde çökelti yapısını termomekanik yaşlandırma işlemleriyle başarılı bir şekilde dengeleyerek yorulma değerlerinde %25'lik bir iyileştirme elde ettiklerini iddia etmektedirler. Ostermann (1971) ile Harendranath and Malik (1982) de aynı iyileştirmeyi 7000 serisi Alüminyum alaşımlarında elde ettiklerini ileri sürmüştür. Reimann and Brisbane (1973) ise Ostermann (1971)'in kullandığı aynı materyaller üzerinde yaptıkları çalışmalarda termomekanik yaşlandırma işleminin yorulma ömrü üzerinde herhangi bir etkisini gözlemleyemediklerini açıklamaktadırlar.

Chawla *et al.* (1998) ile Uygur ve Kulekci (2002) 2000 serisi Alüminyum alaşımlarının yorulma özellikleri üzerine yaptıkları çalışmada partiküllerin etkisini incelemişler. Büyük partiküllerin veya ara metalik partiküllerin yorulma çatlaklarının oluşmasında potansiyel bölgeler olduklarını gözlemlemişlerdir.

Nishida *et al.* (2003) yaptıkları çalışmada çelik ve alüminyum alaşımı pabuçların ayak yüksekliklerinin artırılması ile beraber maksimum relatif kayma genliğinde düşüş olduğunu tespit ettiler. Alüminyum alaşımı kontak pabucundaki maksimum relatif kayma genliğinin, çelik malzemeden olan temas pabucuna ait relatif kayma genliğinden daha küçük olduğunu gözlemlediler. Bu durum sebebi ile daha rijit temas pabuçlarıyla daha geniş relatif kayma genlikleri elde edildiği sonucuna vardılar. Bu yüzden kontak pabucu rijitliği fretting yorulması olayında önemli bir faktör olarak değerlendirilebilir.

Jin and Mall (2004)'in yaptıkları bir çalışmada fretting davranışında relatif kaymanın etkisini deneyler ve analizler yoluyla incelenmiştir. Deneylerin ilk serisinde bir kısım numuneye farklı gerilme genlikleri uygulanmış ve diğer serideki numunelere ise farklı fretting papuç yerdeğiştirmeleri sabit bir gerilme genliği altında tatbik edilmiştir. Bu şekilde fretting yorulma ömrü, relatif kayma genliği ve normal yük unsurlarını içeren bir fretting haritası geliştirildiler. Bu harita bahsedilen faktörler arası ilişkileri ve temas durumlarını (kısmi ve tam), ayrıca bu faktörlerin sebep olduğu hasar durumlarını belirlemede çok önemli bilgiler vermektedir (Jin and Mall 2004). Bu çalışmada pabuç üzerine teğetsel kuvvet uygulanarak “yer değiştirme” simülasyonu oluşturulmuştur. Uygulanan relatif kayma değerinin artışı ile başlarda MSSR (Düzeltilmiş kayma gerilmesi miktarı) değerinde bir artış ve yorulma ömründe düşüş olduğu gözlenmiş, bundan sonraki aşamada MSSR değerinin sabit seyredip yorulma ömrünün artış gösterdiği gözlenmiştir. Yorulma ömründeki bu yükselişe, artan aşınma miktarının sebep olduğunu rapor etmişlerdir.

Fouvry *et al.* (2004), tam kayma ve kısmi kayma karakteristiklerinin ana hatlarını geniş şekilde belirlemek için bir çalışma yürüttüler. Deneysel çalışmalardan elde ettikleri sonuçlara göre tam kayma rejiminde yüksek enerji gereksinimi ve yüksek aşınma

miktarı faktörleri ile karşılaştırırken, kısmi kaymada tam tersi bir durum düşük aşınma miktarı ve az enerji sarfiyatı değerleri tespit ettiler. Genellikle kısmi kayma olayına “yapışma-kayma” sınırında kırılmanın eşlik ettiğini gözlemlədiler. Elde ettikleri sonuçlardan vardıkları ortak görüşe göre; tam kayma rejimi yorulma ömrünü sonsuza (daha uzun ömür) götürme eğilimi içine girerken diğer taraftan kısmi kayma rejiminin daha düşük yorulma ömrüne sebep olduğu ve bileşenlerde kırılma ile sonuçlanacak hasarlara daha kısa sürelerde ortam yarattığını gördüler.

Fretting yorulmasında kontak basıncı düşük olduğunda yapışma bölgesi dar olur. Kontak basıncı bu değerin de altında olduğunda tüm alan sadece kayma rejimli olur. Kontak basıncı değerin de değişimi ile relatif kayma modu; a)- sadece kayma rejimli, b)- dar yapışma bandı + geniş kayma bandı, c)- geniş yapışma bandı + dar kayma bandı şeklinde değişir (Naidu and Raman 2005).

Sadeler (2006), yaptığı bir çalışmada 2014 Alüminyum alaşımı malzemenin fretting yorulma ömrü üzerine kontak basıncı etkisini incelemiş ve aşağıdaki sonuçlara varmıştır:

- 1- Çözeltiliye alma ve peşine yaşlandırma işlemi yorulma performansı açısından dikkate değer iyileştirmeler sunar. Bu iyileştirme ile hem dönel hem eğmeli yorulma mukavemeti kıyaslandığında işlemsizlere nazaran iyi sonuçlar elde edilebilir.
- 2- Düz yorulmaya göre, fretting yorulma ömründeki düşüş özellikle de yüksek gerilme genliklerinde çok yüksek oranlarda olmaktadır.
- 3- Kontak basıncında 20MPa ‘dan 80MPa’ya kadar gidildikçe yorulma ömründe bir değişiklik gözlenmemiştir. 100 MPa civarında bir kontak basıncı değerinde yorulma ömrü minimuma gitmiş, 150 MPa değerinde yorulma ömrü maksimuma gitmiştir. Bu davranışın sebebi sürtünme gerilmesi ve kayma genliğindeki değişiklikler ile çatlak büyümesinin gecikmesi ve farklı gerilme konsantrasyonlarından kaynaklanabilir.
- 4- Çatlaklar başlangıçta temas yüzeyine meyilli (açılı) hareket etmiş, daha sonra yüzeye (gerilme genliğine) dik pozisyonda kalarak hareketine devam etmiştir.

Madge *et al.* (2006) yaptıkları çalışmada kayma genliğinin fretting yorulması üzerine etkilerini incelerken şu sonuçlara vardılar:

1- Tam kaymada belirli bir kayma değerinden sonra yorulma ömründeki yükselişe geçiş sebeplerinin; a). Malzeme kaybına bağlı olarak temas yükündeki azalmaya ve buna bağlı olarak da yorulma gerilmelerindeki düşüğe, b). Hasar yığılımının bir bölgede değil de homojen olarak dağılmasına bağlı olduğu sonucuna vardılar.

2- Kısmi kayma rejiminde maksimum hasar yığıntısının temas kenarında küçük kayma miktarlarıyla dar bir alanda oluştuğunu gözlemlediler. Bununla birlikte, kayma miktarı artırılınca kısmi kayma rejiminde bu bölgenin sabit şekilde “yapışma-kayma” sınırına doğru yer değiştirerek genişlediğini gözlemlediler.

Madge ve arkadaşları bu çalışmada oluşturdukları hipoteze göre fretting yorulmasında tam kayma olayının çatlakların yayılımından önce yorulma hasarının oluşumunu ortadan kaldırdığı görüşünü savunmuşlardır. Düşük kayma genliklerinde yüksek oranlı yorulma hasarı ve düşük ömürle ortaya çıkan çatlaklar tespit edilirken geniş kayma genliklerinde ise aşınma kriterinin asıl hasar mekanizması olduğu ve yükün yeniden dağılımının faydalı etkileri ile hasar gören malzemenin ortamdan ayrılmasının yorulma ömrünü iyileştirdiği sonuçlarına varmışlardır.

Metalik biyo-malzemelerin yorulma özellikleri, ilgili mikro yapılar ve mikro yapı kontrol işlemlerine göre tanımlanmıştır. Mikro yapıların yorulma ve fretting yorulmasına etkisinin, havada ve insan vücudu sıvısı arasında birçok farklılık arz ettiği belirtilmiştir. Verilerdeki saçılma özelliği, bu konuda daha çok çalışma yapılması ihtiyacını göstermektedir (Niinomi 2006).

Fretting yorulma hatalarının mühendislik tasarım ve uygulamalarında neredeyse bir salgın halinde olduğu bilinmektedir. Şirketlerin ya da hükümetlerin ürünler için bir entegrasyon kılavuzunu, edinilen tecrübeler sonucunda yürürlüğe sokmasının gerekliliğine işaret edilmiştir. Birçok akademisyenin hala kırılma ve çatlak büyüme

problemlerini tam olarak tanımlayamamakta olduklarının altı çizilerek, fretting yorulması gibi negatif etkileri ortadan kaldırmaya yönelik çalışmalara fon ayrılması gerekliliği önemle vurgulanmıştır (Hoepfner 2006).

İki farklı (su verme ve temperleme) ısıl işlemin uygulandığı çelik saçlarda, çekme dayanımı, yorulma ömrü, sertlik ve mikro yapı özellikleri metalografik ve mekanik testler aracılığıyla belirlenmiştir. Çift fazlı çeliğin mikro yapısı ferrit ve martenzitten oluşmuş olup, düzlemsel eğilmeli yorulma dayanımı normal çelik ve temperlenmiş martenzit çeliğinden daha yüksek çıkmıştır. En yüksek yorulma dayanımı ortalama 870°C de ölçülmüştür. Mikro yapılar yorulma çatlak oluşumu ve yayılması taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Deney sonuçları, ısıl işlem görmüş çelik saçların yorulma ömrünün mikro yapıda bulunan martenzit miktarıyla doğru orantılı olduğunu göstermiştir (Akay vd 2009).

Üstün mekanik özellikleri, düşük maliyet, hafifliği ve güvenilirliğinden dolayı alüminyum alaşımları değişik parça ve elemanların imalatı için birçok endüstri kolunda yaygın olarak kullanılır. Bununla birlikte, yumuşak alaşım ve düşük aşınma dayanımlarından dolayı, alüminyum alaşımlarında yüzeylerin hasar görmesi daha kolaydır. Alüminyum alaşımları mühendislik ve yapısal uygulamalarda fretting yorulması hasarına maruz kalabilirler. Bu sebeple farklı ısıl işlemler uygulayarak alüminyum alaşımlarının mukavemet değerleri artırılabilir.

Bu çalışmada, T4 ve T6 yaşlandırma işlemleri uygulanmış 2014 Alüminyum alaşımının fretting yorulma davranışı üzerinde, relatif kayma genliğinin etkisi araştırılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Alüminyum Alaşımları ve Endüstrideki Yeri

Alüminyum doğada bol bulunduğu için yaygın bir kullanıma sahiptir. Alüminyum, yeryüzünde oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü element olmasına rağmen, endüstriyel çapta üretimi 1886 yılında elektroliz yönteminin kullanılmaya başlanması ile gerçekleşmiştir (Meyveci 2007). Alüminyum, endüstriyel kullanımda demir ve çelikten sonra ikinci sırayı almaktadır. 1900'lü yılların başlarında yaygın olarak kullanılmaya başlanan alüminyumun birçok üstün özellikleri sayesinde endüstride kullanım alanı her geçen gün artmaktadır (Doğan 1989; Aydın 2002). Alüminyum, taşıtlar, uzay mekiği, uçak, ambalaj ve paketleme, dekorasyon, iletişim, ısı yalıtımı ve daha pek çok alanda kullanılmaktadır. Alüminyum, üretiminden tüketimine kadar çevreyle dost ve geri dönüşümlü olması nedeniyle önemli bir avantaja sahiptir (Meyveci 2007).

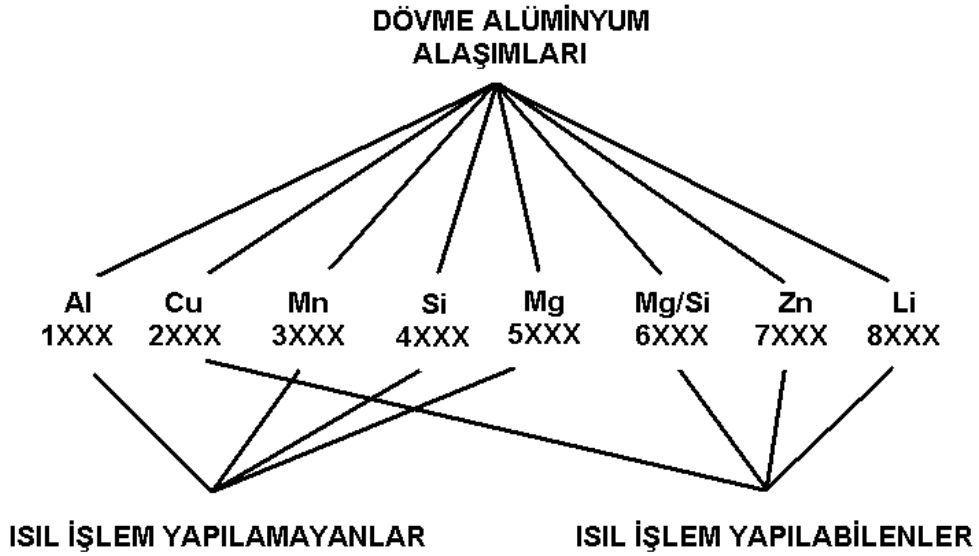
### 2.2. Alüminyum Elementinin Özellikleri

Alüminyum hafif metaller grubuna giren ve teknik alanda çok kullanılan bir metaldir. Özgül ağırlığı  $3.8 \text{ gr/cm}^3$ 'den küçük olan elemanlar hafif metaller grubuna girer. Hafif metaller sınıfında alüminyum, magnezyum, potasyum, lityum ve berilyum bulunur. Bunlardan özellikle alüminyum ve magnezyum en önemlileridir. Alüminyumun önemli olmasının sebebi hafif olmasıdır. Ayrıca yüksek elektrik ve ısıl iletkenliği atmosferik dayanıklılığı, imalat kolaylığı ve yüksek çekme mukavemetine sahip alaşımlar oluşturabilmesi diğer önemli avantajlarıdır.

Alüminyumun yüzeyinde oluşan kararlı  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tabakası korozyonu önler ve metali korur. Alüminyum saflaştıkça korozyon direnci ve iletkenliği artar. Ayrıca dayanımı soğuk işleme önemli ölçüde arttırılabilir (Karakışlak 1978; Doğan 1989).

### 2.3. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri alaşım elementlerine ve mikro yapısına bağlı olarak değişir. Alüminyuma katılan en önemli alaşım elementleri bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur. Alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları olarak iki gruba ayrılır. Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon kabiliyeti iyi olup kolayca şekillendirilebilirler. Alüminyum dövme ve döküm alaşımlarının büyük bir kısmına ısıtma işlemi uygulanabilmektedir. Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma şu şekildedir:



**Şekil 2.1.** Isıl işlem durumlarına göre dövme alaşımları (Daşcılar 2006).

Dövme alüminyum alaşımları dört basamaklı bir sayısal notasyonla belirtilir. Dört basamaklı sayısal simgenin ilk rakamı alaşımın hangi temel alaşım elementini içerdiğini gösterir. Son iki basamak alüminyumun saflığını gösterir. İkinci basamak orijinal alaşımın modifikasyonunu veya empürite sınırlarını gösterir (Erdoğan 2001). Şekil 2.1’de gösterildiği üzere 2XXX, 6XXX, 7XXX ve 8XXX gurubu Alüminyum alaşımları ısıtma işlemi uygulanabilen alaşımlardır. 1XXX, 3XXX,

4XXX gurubu Alüminyum alaşımları ise ısıl işlem uygulanamayan alaşımlardır. Bu alaşımlar sadece şekil değiştirme yolu ile sertleştirilebilirler.

### **2.3.1. 1XXX serisi alüminyum alaşımları**

1XXX serisi ticari olarak saf alüminyumu ifade eder ve en az %99 alüminyum içerir. Bu malzemelerin, şekillendirilmesi, elektrik iletkenlikleri ve korozyon dirençleri oldukça yüksektir. 1XXX serisinin son iki rakamı ise, %99 değerinden sonraki kısmı belirlemede kullanılır. Meyveci (2007) tarafından bildirildiğine göre, 1100 malzemesinin %99.00 oranında, 1050 malzemesinin %99.50 oranında ve 1060 malzemesinin ise %99.60 oranında saf alüminyum içerdiğini belirtir (Altenpohl 1998; Öz 2007). Genellikle elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılmaktadır.

### **2.3.2. 2XXX serisi alüminyum alaşımları**

Esas alaşım elementi bakırdır. Başta magnezyum olmak üzere diğer alaşım elementleri de bulunabilir, yüksek mukavemet istenen havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Alüminyum-bakır-magnezyum alaşımları, ilk olarak çökeltme sertleştirilmesi yapılabilen alaşımlardır. Çökeltme sertleştirilmesi yapılan ilk alaşım 2017 alaşımıdır. Bu alaşımlar yapı içerisinde özellikle %4 Cu, %0,6 Mg ve %0,7 Mn şeklinde bulunmaktadır. Yapı içerisinde ağırlıkça bulunan %4,4 Cu, %0,5 Mg, %0,8 Mn ve %0,8 Si' lu 2014 alaşımı yapay yaşlandırmaya 2017 alaşımından daha fazla tepki vermesi için daha sonra geliştirilmiştir. 2014 gurubu bugün en çok kullanılan Al-Cu-Mg alaşımlarından biridir. Yüksek dayanım, magnezyum içeriğini %0,5'den %1,5'e çıkarmakla elde edilmiştir. Meyveci (2007) tarafından bildirildiğine göre, magnezyumun, alüminyum-bakır alaşımlarına ilavesi alüminyum bakır alaşımlarında çökelti sertleşmesini oldukça hızlandırır ve yoğunlaştırır (Altenpohl 1998; Öz 2007).

**2014 Alaşımı :** (%4.5Cu-%0.8Si-%0.8Mn-%0.4Mg) Yüksek mukavemetin ve bununla ilgili olarak iyi işlenebilirliğin ve yüksek sertliğin istendiği durumlarda kullanılır. Uçak



teçhizatının yapımında geniş olarak kullanılır. 20°C'deki yoğunluğu 2.80 gr/cm<sup>3</sup>'tür. 260-480°C arasında sıcak çalışabilir. Tam tavlama için 412°C'de 2-3 saat bekletilir. Sonra saatte 10°C'lik bir soğuma hızıyla fırında soğutulur. İçerisindeki Bakır elementi en önemli alaşım elementidir, zira alaşıma sertlik kazandıran başlıca elementtir. Bu nedenle bakır içeren alüminyum alaşımlarını ısıtma işlemiyle çökelme sertleşmesi ile sertleştirmek mümkündür. Çökelme için gerekli zaman, alaşımın bileşimi ve sıcaklık ile ilişkilidir. Çökelmenin mekanik özelliklere yapacağı etki, çökelen faz miktarına, boyutlarına ve dağılımına bağlıdır (Sun 1998). Bakırdan sonra en önemli element silisyumdur. Alüminyum içerisinde en fazla %13 oranında bulunmalıdır. %13'den fazla silisyum içeren alüminyum alaşımlarının işlenmesi çok zor olmaktadır. Özellikle bakır, nikel ve magnezyum ile birlikte ilave edilirse ısıtma işlemiyle alaşım elde edilir. Alaşıma Mg ilavesi mukavemeti, haddelenebilme kabiliyetini ve işlenebilirliği artırır (Sun 1998). Mn ilavesi alaşımların süneklik ve tokluk özelliklerini artırır ve işlenebilirliği olumlu yönde etkiler (Aydın 2002). Çinko, sıcak yırtilmaya sebep olmasına rağmen diğer alaşım elementlerinden olan bakırın ilave edilmesiyle yetersiz olan bazı özellikler giderilmiş olur. Genellikle magnezyumla birlikte karıştırılarak ilave edildiğinde haddeme kabiliyetini arttırdığı gibi yüksek çekme ve darbe mukavemeti de kazandırır (Sun 1998).

### **2.3.3. 3XXX serisi alüminyum alaşımları**

Esas alaşım elementi mangandır. Boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda kullanılmaktadır. Alaşımda, düşük oranlarda yani %1,2 oranında mangan, dayanımı arttırmaktadır. Bu serideki, 3003, 3004 ve 3105 alaşımlarının, korozyon direnci ve işlenebilirliği yüksektir. 3XXX serisi alaşımlar, yaygın olarak çeşitli konstrüksiyonlarda, çatı sistemleri ve çatı kaplamaları gibi mimari alanlarda kullanılır (Altenpohl 1998; Öz 2007).

#### **2.3.4. 4XXX serisi alüminyum alaşımları**

Esas alaşım elementi silisyumdur. Termal genleşme katsayısı düşük, aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksek alaşımlardır. Kaynaklı yapılarda, levha üretiminde, otomobil parçaları üretiminde kullanılmaktadır. Meyveci (2007) tarafından bildirildiğine göre, 4XXX serisindeki alaşımlara, silisyum ilave edilerek, kaynak ve lehimleme işlemlerinde ergime noktası düşürülmekte, böylece alaşımın kaynak ve lehimleme kabiliyeti iyileştirilmektedir. Yapı içerisindeki Silisyum, alaşımın akıcılık özelliğini arttırarak özellikle döküm teknolojisinde, geometrisi karmaşık şekillerin üretilmesine imkân vermektedir. Alüminyum 4043 alaşımı, yaygın olarak kaynak dolgu teli olarak kullanılmaktadır (Altenpohl 1998; Öz 2007).

#### **2.3.5. 5XXX serisi alüminyum alaşımları**

Esas alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artar fakat süneklik azalır. Deniz suyu korozyonuna karşı direnci yüksek olduğundan, bu ortamda çalışacak yapıların imalatında, gemi iskeletleri, petrol platformları ve diğer denizcilik uygulamalarında, kaynak tellerinde kullanılır. Meyveci (2007) tarafından bildirildiğine göre, bu serideki alaşımların dayanımı, magnezyum miktarının oranına bağlı olarak değişir (Altenpohl 1998; Öz 2007).

#### **2.3.6. 6XXX serisi alüminyum alaşımları**

Esas alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Şekillendirilme kabiliyeti yüksek olan bu alaşımlar özellikle ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında sıklıkla kullanılır. Meyveci (2007) tarafından bildirildiğine göre, 6XXX alaşımlar, belirli oranlarda magnezyum ve silisyum içermesi nedeni ile  $Mg_2Si$  çökeltisi oluşturur. İyi derecede dayanım ve korozyon direncine sahiptir. AA 6061 alaşımı ise, düşük karbon çeliklerle mukayese edilebilecek akma dayanımına sahip, en yaygın kullanılan alaşımlardan biridir (Altenpohl 1998; Öz 2007).

### 2.3.7. 7XXX serisi alüminyum alaşımları

Bakır esas alaşım elementi olup, magnezyum, krom ve zirkonyum ilave alaşım elementleridir. 7XXX serisi, alüminyum alaşımlarının en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Uçak parçaları yapımı ve diğer yüksek dayanım istenen yerlerde kullanılır. Bu serinin en önemli alaşım elementi çinkodur. Meyveci (2007) tarafından bildirildiğine göre, 7XXX serisi, alüminyum–çinko– magnezyum alaşımları (örneğin 7005) ve alüminyum–çinko–magnezyum –bakır alaşımları (örneğin 7075 ve 7178) olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Minimum çekme dayanımı 580 MPa olan 7178 alaşımı, uçak yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bakır ile desteklenen 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının korozyon direnci, 1XXX, 3XXX, 5XXX veya 6XXX serisi alüminyum alaşımlarından daha düşüktür (Altenpohl 1998; Öz 2007).

### 2.3.8. 8XXX serisi alüminyum alaşımları

Al-Li alaşımları olarak anılırlar. Esas alaşım elementi lityum olup, kalay eklentisi de yapılabilmektedir. Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanan bu malzeme, iyi yorulma direnci ve iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Fakat diğer Al alaşımları ile karşılaştırıldığında üretim maliyetleri yüksektir (Eker 2008).

## 2.4. Isıl İşlem Sembolleri

**F:** Üretildiği şekilde; üzerinde hiçbir işlem yapılmamış işlem ve dökümler için kullanılır.

**O:** Tavlanmış ve yeniden kristalleştirilmiş; en düşük dayanım ve en yüksek sünekliğe sahip döküm ürünler için kullanılır.

**H:** Soğuk işlem ile sertleştirilmiş (yalnız işlem alaşımları için); soğuk işlemle deformasyon işlemine tabi tutulmuş alaşımı ifade eder (Doğan 1989; Topbaş 1993; Sarıtaş 1995; Sun 1998).

## 2.5. Isıl İşlem Koşulları

W, Solüsyona alma ısıl işlemi görmüş kararsız bir temper işlemidir. Yalnızca solüsyona alma ısıl işleminden sonra oda sıcaklığında kendi kendilerine yaşlanabilen alaşımlar için kullanılır. T, Kararlı bir temper elde etmek için alaşıma F, O veya H işleminden başka uygulanan temper işlemini gösterir. Kararlı temperi ifade eden T harfinden sonra 1'den 10'a kadar rakam kullanılır.

T1, Sıcak işlenmiş, fabrikasyon sıcaklığında soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış.

T2, Fabrikasyon sıcaklığında soğutulmuş, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırılmış.

T3, Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış soğuk işlenmiş ve doğal olarak yaşlandırılmış. (işlem dövme alaşımları için).

T4, Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış ve doğal olarak yaşlandırılmış. T5, Fabrikasyon sıcaklığında soğutulmuş ve yapay olarak yaşlandırılmıştır. T6, Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış ve yapay yaşlandırma uygulanmış.

T7, Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış ve dengeli duruma getirilmiş (döküm alaşımları için).

T8, Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırma uygulanmış (işlem alaşımları için).

T9, Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış, soğuk işlem uygulanmış yapay yaşlandırma uygulanmış.

T10, Yapay olarak yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş (işlem alaşımları için) (Brooks 1982; Doğan 1989; Sarıtaş 1995; Sun 1998; Aydın 2002, Meyveci 2007).

## 2.6. Alüminyum ve Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler

Isıl işlem, metallerde istenilen özellikleri geliştiren bir ısıtma işlemi veya işlemler zinciri olarak bilinmektedir. Bir diğer ifadeyle metallerin ısıtılmasını ve soğutulmasını gerektiren durumlarda ve kimyasal bileşiminde herhangi bir değişme yapmadan sadece mekanik özelliklerini istenilen şekilde olmasını sağlayan işlemler olarak tarif

edilebilir (Beton and Rollason 1958; Doğan 1989). Alüminyum alaşımlarına ilave edilen alaşım elementlerinin ısıtıl işlem uygulanması neticesinde dayanımı arttırdığı gibi bazı alaşım elementlerinin ilavesiyle de ısıtıl işleme tabi tutulmasına engel olmaktadır. Bu sebepten dolayı, ısıtıl işleme karşı gösterdikleri hassasiyete göre dövme veya dökme alüminyum alaşımları, ısıtıl işlem uygulanabilen veya ısıtıl işlem uygulanamayan alaşımlar olarak iki gruba ayrılmaktadır (Sun 1988; Doğan 1989; Yüksel 1991; Aydın 2002)

Isıtıl işlem yapılabilen alaşımların içinde bulunan elementler, yüksek sıcaklıklarda büyük ölçüde katı halde erime özelliklerine sahip olmakla beraber, düşük sıcaklıklarda katı halde eriyebilme özellikleri sınırlı kalmaktadır. Bu önemli neden alaşımın ısıtıl işlem yapılabilmesine imkân sağlamaktadır (Aydın 2002).

Dövme alaşımları arasında ısıtıl işleme tabi tutulabilenler grubuna dâhil olanlar: 2XXX, 6XXX ve 7XXX serileridir. 2011, 2014, 2017, 2018, 2024, 2025, 4032, 6151, 6061, 6063 ve 7075'dir (Doğan 1989; Aydın 2002).

Alüminyum alaşımlarına uygulanan sertleştirme amaçlı ısıtıl işleme sertlik artışı, ikinci faz çökeltilerinin ince ve homojen olarak matris içinde çökmesiyle sağlanır. Bu nedenle sertleştirme yöntemi "çökeltme sertleşmesi" olarak adlandırılmıştır. Demir dışı metallerin mukavemetini arttırmada kullanılan en önemli yöntemlerden birisi de çökeltme sertleşmesidir. Özellikle uçak sanayisinde kullanılan hafif alüminyum alaşımları çökeltme sertleşmesi ile sertleştirilmektedir. Bu işlem malzemenin sadece mekanik özelliklerini değil, aynı zamanda manyetik ve iletkenlik özelliklerini de etkilemektedir. Bu nedenle yaşlandırma ısıtıl işlemi, elektronik malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla da uygulanmaktadır (Çimenoglu vd 1989; Sun 1998).

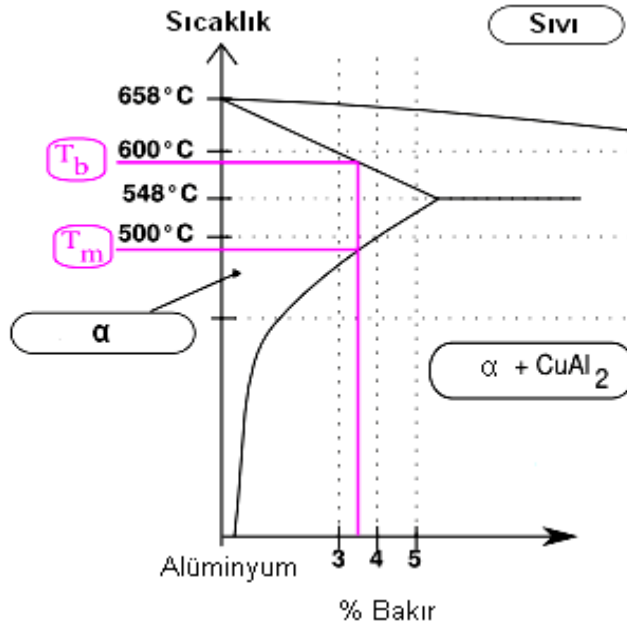
### **2.6.1. Yaşlandırma ısıl işlemi**

Plastik şekil değiştirmesine ihtiyaç duyulmaksızın ve üretimi sırasındaki istenen bir kademedeki malzemenin sertleştirilmesi, çökelme sertleşmesi yönteminin üstünlükleri olarak özetlenebilir. Çökelme sertleşmesi, ancak denge diyagramlarında solvüs eğrisi bulunan alaşımlarda oluşur. Sadece solvüs eğrisinin sınırladığı katı çözeltili bileşimlerinde meydana gelebildiğini Şekil 2.3’de açıkça gösterilmiştir. Yani alaşım elementinin çözünme miktarı sıcaklıkla artmalıdır. Çökelme sertleşmesinin aşamalarından birincisi öncelikle çözeltili alma işlemi, ikincisi su verme (soğutma), üçüncü olarak yaşlandırma işlemi olarak bilinmektedir (Sun 1998).

#### **Çözeltili alma işlemi**

Çökelme sertleşmesi ile malzemenin dayanımının artırılmasında ilk aşama çözeltili alma işlemidir. Çözeltili almada amaç mukavemet artırıcı alaşım elementlerinden maksimum miktarını katı çözeltili içine almaktır. Bu nedenle alaşım, artan alaşım elementi miktarıyla yükselen tek fazlı bölgeye girme sıcaklığına ulaşıldığına emin olunan sıcaklığın yani solvüs sıcaklığının birkaç derece üzerine kadar ısıtılmalıdır. Bu aşamada alaşımın ötektik ergime sıcaklığından daha düşük sıcaklığa kadar ısıtılmalıdır (Aydın 2002).

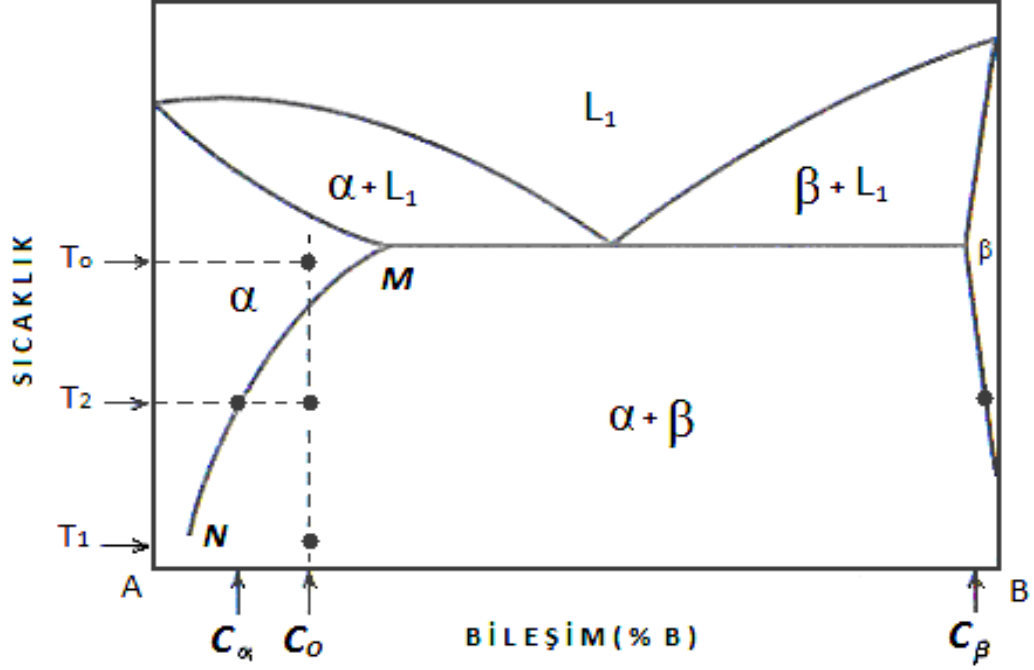
Isıl işlem uygulanabilen alaşımlarda Şekil 2.2’de görüldüğü gibi solvüs sıcaklığı artan alaşım elementi miktarıyla birlikte daha yukarı sıcaklıklara yükselmektedir. Bundan dolayı ısıl işlem uygulanacak malzemenin kimyasal bileşimini tespit ederek çözeltili ısıl işlem sıcaklığının belirlenmesi büyük faydalar sağlamaktadır.



**Şekil 2.2.** Al- Cu faz diyagramı (Internet 2011).

Çözeltiye (solüsyona) alma işleminde diğer önemli nokta ise solüsyonda bekleme süresidir. Bu süre, malzeme yapısında çözünmemiş faz bırakmayacak ve homojen bir yapı verecek şekilde ayarlanmalıdır. Solüsyona alma süresi, ince kesitli malzemelerde düşük olup artan kesit miktarıyla birlikte artmaktadır (Aydın 2002).

Ötektik başlangıç sıcaklığının aşılmasına dikkat edilmelidir. Şekil 2.3'deki faz diyagramına göre  $T_0$  sıcaklığından daha fazla bir sıcaklık üzerine yani ötektik ergime sıcaklığı üzerine çıkılmamalıdır. Alt sıcaklık değeri ise, katı çözeltiye alma işlemlerinin tamamlandığı sıcaklıktan biraz yüksek olmalıdır. Yani  $T_0$  sıcaklığından daha az bir sıcaklık seçilir (Meyveci 2007).



**Şekil 2.3.** Yaşlandırma ısıl işleminde faz diyagramına göre işlem sıcaklıklarının gösterilmesi (Callister 2002).

Eğer alaşımın ötektik ergime sıcaklığı aşırsa, tane sınırlarında ergime oluşur ve malzeme kırılabilir olur. Eriyebilen elemanların alüminyum içinde katı çözeltili halinde kalması için işlem sıcaklığı dikkatli seçilmelidir. Meyveci (2007) tarafından bildirildiğine göre, çözünebilen alaşımların difüzyonunu engellemek ve tane büyümesine fırsat vermemek için ısıtma hızı yeterli dereceye kadar yüksek olmalıdır (Doğan 1989).

### Su verme aşaması

Yaşlanma ısıl işleminin en önemli aşaması su verme işlemi olarak düşünülebilir. Meyveci (2007) tarafından bildirildiğine göre, su vermede amaç solüsyona alma işlemiyle oluşturulan aşırı doymuş katı eriyiğin hızlı soğuma ile toparlanmasına fırsat vermeden oda sıcaklığına soğutulmuş olarak korunmasıdır (Aydın 2002). Su verilmezse katı çözeltiler tane sınırlarında ve kayma düzlemlerinde çökerek şekil değiştirme kabiliyetini azaltır, taneler arası korozyon mukavemeti düşer (Karakışlak 1980; Doğan 1989). Bu



şekilde Şekil 2.3'deki faz diyagramına göre  $T_1$  sıcaklığında ani olarak su verme işlemi yapılır.

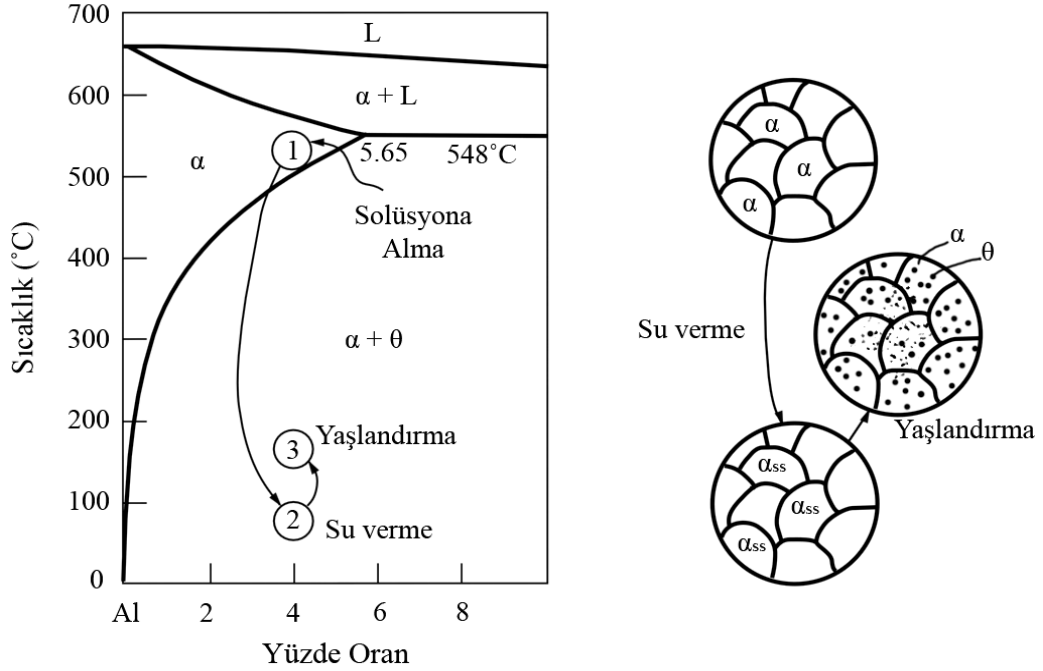
Meyveci (2007) tarafından bildirildiğine göre, çözeltiye alınan alaşımın su verilmesiyle oluşan aşırı boşluk konsantrasyonu beklenen denge difüzyonundan daha hızlı difüzyon oluşması ile çözünen atomlar toparlanarak GP (Guiner-Preston) bölgelerinin oluşmasına neden olurlar (Aydın 2002). Su verme esnasında çökeltme olması için fırın ile su ortamı sırasındaki zaman az olmalı ve su verme ortamının ısı absorbe etme katsayısı çok düşük olmalıdır. Pratikte su verme işlemi normal olarak azami su verme gecikmesi ve azami su sıcaklığı ile kontrol edilir. (Karakışlak 1980; Doğan 1989).

Genel kural olarak en iyi maksimum dayanım ve tokluk hızlı soğuma ile elde edilir. Daha hızlı su verme, çözündürme işleminin kalıcılığını daha fazla arttıracak, bu da daha sonra çökeltme sertleşmesinin daha etkin olarak yapılmasını sağlayacaktır. Meyveci (2007) tarafından bildirildiğine göre, ulaşılabilecek en yüksek dayanıma en hızlı su verme hızıyla erişilebilir (Doğan 1989; Aydın 2002).

### **Yaşlandırma aşaması**

Aşırı doymuş katı eriyiğin çözeltiye alınması ve su vermeden sonra oda sıcaklığında (doğal yaşlanma) veya denge solvüs eğrisinin altında (suni yaşlanma) bir sıcaklıkta çökelmeye alınması olayı yaşlandırma veya çökelti ısıl işlemi olarak bilinir. Bir diğer ifadeyle aşırı doymuş bir katı fazdan zaman ve sıcaklık etkisiyle yeni bir fazın oluşmasına çökeltme sertleşmesi (yaşlanma) adı verilir. Şekil 2.4'de görüldüğü gibi solüsyona alma işleminden sonra su verme işlemi sonucunda yaşlandırma yapılmaktadır. Yaşlandırma işleminin yapılabilmesi için alaşımın hangi sıcaklıklarda yaşlandırılması gerektiği bilinmelidir. Meyveci (2007) tarafından bildirildiğine göre, katı çözeltiye alma ısıl işleminden sonra uygulanan su verme sonucu alüminyum alaşımları, tam olarak uygun bir sertlik ve mukavemete ulaşamazlar. Bu alaşımlarda

maksimum sertlik ve mukavemeti elde etmek için alaşım yaşlandırılır (Doğan 1989; Aydın 2002).



**Şekil 2.4.** Al-Cu faz diyagramı ve Al %4 Cu alaşımının çözeltiye alma işlemi ve mikro yapı değişimleri (Erdoğan 1996).

Meyveci (2007) tarafından bildirildiğine göre, çökelti sertleşmesinin ana mekanizması çözünen atomların uyumlu bir topluluk oluşturmasını sağlamaktır. Bu oluşum ile bir araya toplanan çözünen atomlar bir taraftan matris kristal yapısına uyum gösterirken atom boyutları arasındaki farktan dolayı büyük miktarda gerilme meydana gelir. Bu nedenle çökeltinin gerilme alanının varlığı malzemede dislokasyon hareketine engel olduğundan malzemeye daha fazla mukavemet veya gerilme kazandırır. Malzeme mukavemetinin artmasında önemli bir etki ise çökelti veya çözünen atom gruplarının uyumlu veya uyumsuz olmasına bağlıdır. Çökeltinin ilk safhalarında ikinci faz tamamen oluşmakta, fakat ikinci fazınine benzer bir kristal yapısı katı çözeltilde sıkı temas halinde büyümektedir. İki yapı arasındaki atom dizilişi uygun ise katı çözeltilde distorsiyona uğramaktadır. Bu küçük boyutlu çökelti parçacıkları ilk olarak 1938'de Guinler-Preston tarafından x ışınları ile bulunmuştur. Bundan dolayı bu ön kademe

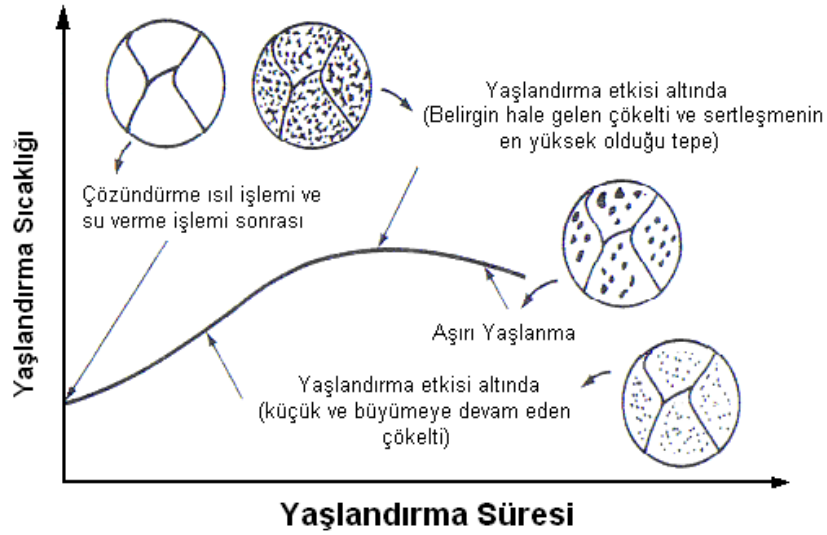
çökeltilerine literatürde GP zonları denir (Doğan 1989). Guiner-Preston (GP) bölgesi olarak bilinen çözünen atomların çökeltileri kristal ve mikro yapıda değişiklik nedeniyle malzeme özelliklerinde önemli derece de etkili olurlar. GP bölgesinin boyutu, şekli ve dağılımı; alaşımın kimyasal bileşimi, uygulanmış olan mekanik ve ısı işleme bağlıdır. GP bölgeleri X ışınları ile tanımlanabilirken bazı durumlarda elektron mikroskoplarıyla ile görülebilir. Çözen ve çözünen atom boyutlarının birbirine yakın olduğu durumlarda GP bölgeleri küresel şekildedir (Al-Ag ve Al-Zn). Ancak atom boyutları arasındaki fark büyükse (Al-Cu sistemi) GP bölgesi disk şeklinde olur. GP bölgeleri boyut itibarıyla yaklaşık  $100 \text{ \AA}$  çapında  $10-15 \text{ \AA}$  yüksekliğinde olup açıkça yeni bir faz veya yeni bir kristal yapı oluşturmaktan ziyade matris kafesinde distorsiyona uğramış bir bölge oluştururlar. Bu tür oluşum tamamen dengeli bir yapı oluşturduğundan mikro yapıda önemli bir değişim olmadan ürettikleri geniş bir deformasyon ve dislokasyon hareketlerini kısıtlayan gerilme alanlarının oluşturmalarından dolayı malzemenin mekanik özelliklerini artırır (Doğan 1989; Aydın 2002).

Alüminyum alaşımlarına uygulanan yaşlandırma ısı işleme esnasında çeşitli bölgeler oluşmaktadır. Bu bölgeler; GP-1, GP-2,  $\theta^{11}$  ve  $\theta^1$  bölgeleri olarak sıralanmaktadır. Alüminyum-bakır (Al-Cu) içeren alaşımların çoğunda GP-1 bölgeleri (100) düzlemleri boyunca alüminyum matris kafes yapısıyla uyumlu zengin bakır içeren yaklaşık  $100 \text{ \AA}$  uzunluğunda ve birkaç atom kalınlığında bakır atomları kümeleri şeklindedir. Bakır atomunun atomik yarıçapı ( $r$ ) alüminyumun atomik yarıçapından küçük olması nedeniyle ( $r_{Al}=0,143 \text{ nm}$ ,  $r_{Cu}=0,128 \text{ nm}$ ) GP bölgesinin çevresindeki matris düzlemi bakır katmanına doğru yaslanır (Aydın 2002).

GP-2 bölgeleri GP-1 bölgelerinden daha kalın (yaklaşık olarak  $150 \text{ \AA}$ ) ve daha geniş (yaklaşık olarak  $1500 \text{ \AA}$ ) çapta tetragonal kristal yapılu disk şeklinde çökelen parçacıklardan oluşur. GP-2 bölgeleri Al ve Cu atomları  $\text{Cu}_2\text{Al}_5$  bileşiği kapsayan bir yapı meydana getirirler (Aydın 2002).

Gerilme yaşlandırması, uyumlu çökelti mesafelerinin düzenlenmesini kontrol etmede en önemli yöntemlerden biridir. Çökeltilerin anizotropik dağılımı yaşlandırma esnasında gerilim uygulayarak belirlenebilir. Bu anizotropik dağılım iki fazlı malzemenin anizotropik davranış göstermesini sağlar (Aydın 2002).

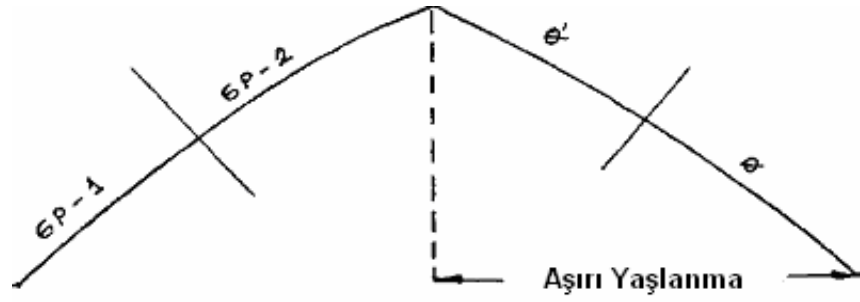
Meyveci (2007) tarafından bildirildiğine göre, yaşlandırma ısı işlemi sayesinde elde edilen maksimum özellikler  $\theta'$  bölgesinde elde edilir. Isıl işleme devam edildiğinde çökeltilerin boyutları ve dağılımı ideal olmaktan çıkarak komşu çökeltelerde birleşip aşırı derecede büyürler (Şekil 2.4). Bu durumda oluşan bölgeler  $\theta$  bölgeleri olarak bilinmektedir. Çökeltilerin aşırı derecede büyümesinden, çökelti arası mesafe de artmaktadır. Bu durumda oluşan çökelti arası mesafe dislokasyon hareketlerini önleyemeyecek durumdadır. Böylece alaşım  $\theta'$  bölgesinde kazanmış olduğu üstün özellikleri  $\theta$  bölgesinde kaybeder (Aluminium 1967; Aydın 2002).



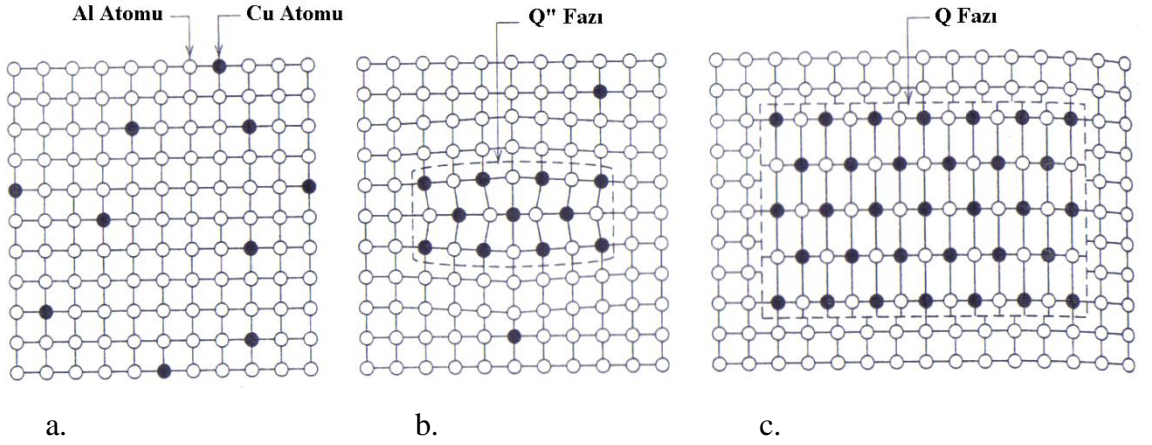
**Şekil 2.5.** Yaşlandırma ısı işlemi aşamaları ve mikro yapıları (Askeland 1994).

Çökeltinin başlangıcında çökelti boyutları çok küçük olduğundan dislokasyon hareketine engel teşkil etmezler ve bu sebeple malzemenin sertliğinde önemli bir değişiklik olmaz. Fakat çökeltinin boyutları arttıkça; çökelti dislokasyon hareketi için engel teşkil ederler ve malzemenin mukavemeti artar (Doğan 1989).

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi GP-1 ve GP-2 bölgelerinin oluşmasıyla malzemenin sertliğinde artış meydana gelir. Fakat yaşlanma süresi uzadıkça sertlik değerinde bir düşme meydana gelir. Bu durumda çökeltinin yapısı  $\theta'$  veya  $\theta$  dır. Yaşlanma süresinin artması ile sertlik veya mukavemette meydana gelen yaşlanmaya "aşırı yaşlanma" denir (Doğan 1989). Şekil 2.7.'de ise yaşlandırma ısıl işleminin nasıl olduğu görülmektedir.



**Şekil 2.6.** Yaşlanma süresine bağlı olarak malzemenin sertlik veya mukavemetindeki değişimi (Doğan 1989).



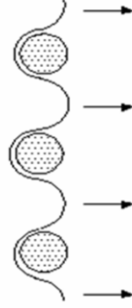
**Şekil 2.7.** Yaşlandırma sırasındaki çeşitli ara durumların gösterimi a. Çözünen atomun çözen atom içerisindeki dağılımı, b. Kendisini çevreleyen matris ile uyumlu çökelti, c. Kendisini çevreleyen matris ile uyumsuz çökelti (Askeland 1994).

### Çökeltme Sertleşmesi İle Mukavemet Artışı

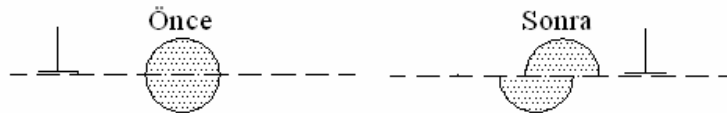
Çökelen partiküller dislokasyon hareketine engel oldukları zaman malzemenin sertliği artar. Çökelti partikülleri genellikle matristen daha serttir ve deformasyon esnasında dislokasyon hareketini engeller. Bu durumda çökelti arasında kalan dislokasyon parçası çökelti partiküllerini aşmak için uygulanan gerilime bağlı olarak hareket eder ve partiküllerin çevresini sarar. Dislokasyonlar her yönde hareket ettiği için çökelti etrafındaki halka sayısı artar ve malzemede dislokasyon yoğunluğunun artışına sebep olur. Şekil 2.8 ve 2.9’da açıkça dislokasyon hareketleri gösterilmiştir (Meyveci 2007).

İnce çökelti fazı içeren malzemede dayanım veya sertliğin artmasının başlıca sebepleri;

- Dislokasyon yoğunluğunun artması.
- Dislokasyon hareketlerinin zor olması.



**Şekil 2.8.** Çökelti arasında oluşan yarım halka şeklindeki dislokasyonlar (Öz 2007).



**Şekil 2.9.** Aşırı büyük çökeltilerin dislokasyonlar tarafından kesilmesi (Öz 2007).

Dislokasyon hareketi için gerilim miktarı teorik olarak 2.1'de verilen eşitlik yardımıyla hesaplanır.

$$\tau.a = \frac{2.G.b}{L} \dots\dots\dots(2.1)$$

Burada;

$a$  : Kayma modülü

$b$  : Burgers vektörü

$L$  : Çökelti arası mesafe

Meyveci (2007) tarafından bildirildiğine göre, bu bağıntıya göre çökelti arası mesafe azaldıkça dislokasyon hareketini engelleyici etkileri artmakta ve buna bağlı olarak da malzemenin mukavemetinde artış olmaktadır (Doğan 1989).

## 2.7. Fretting (Aşınmalı yorulma)'in Tanımı

Fretting, içerisinde triboloji, temas mekanizmaları ve malzeme bilimi gibi birçok farklı unsuru barındıran, birbirine temas halinde iki elemanın çevrimsel eksenel yüklemeye altında küçük genlikli salınımlı hareketi ile ortaya çıkan ve bu sebeple de tasarımlarda yıkıcı etkiye sahip hasar oluşturan, bir yorulma türüdür. Bu süreç, aşınma sonucu oluşan partiküllerin sürtünen yüzeyler arasında artarak çoğalmasından dolayı, malzemede hasar oluşumunun hızlanmasıyla sonuçlanır (Hamdy and Waterhouse 1982; Waterhouse 1992). Fretting olayı, malzemenin hasar görmesiyle sonuçlanan üç temel mekanizma ile tanımlanabilir (Fenner 1958).

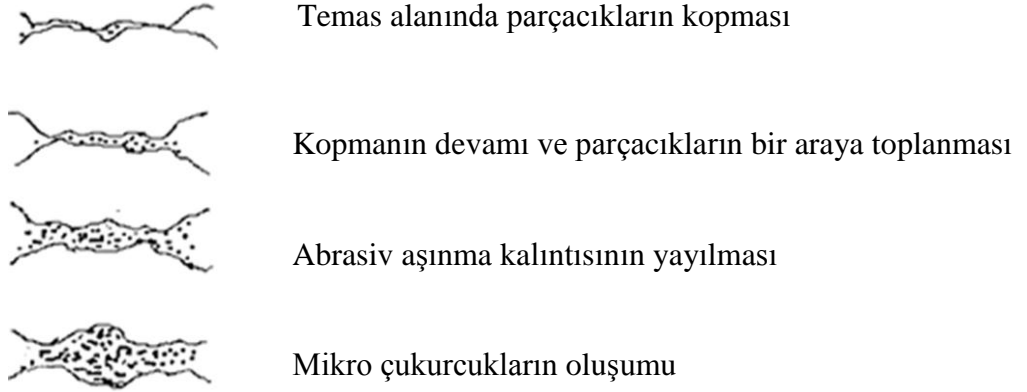
1. Fretting Aşınması; yüzey hasarına neden olan bir mekanizmadır ve fretting olayının dinamik yapısı buna sebep olur. Aşınma abrasif özelliktedir.
2. Fretting Yorulması; Fretting'den dolayı bir elemanın yorulma ömründeki azalma olarak tanımlanır.
3. Fretting korozyonu; hem fretting aşınması hem de fretting yorulmasının sebep olduğu hasarları hızlandıran oksidasyon gibi kimyasal reaksiyonlar ile ilgilenir.

### 2.7.1. Fretting aşınması

Yorulma makinesinin numuneyi tutan çenelerinde kahverengi oksit kalıntıları tespit eden Eden *et al.* 1911'de ilk kez fretting aşınmasından bahsetmiştir. Daha sonra 1927'de Tomlinson fretting ile ilgili ilk çalışmayı yaptı. Kullandığı çelik numuneler üzerinde oluşan debris, kahverengi demir oksit (Demir ile havanın kimyasal reaksiyonu sonucunda) olduğu için "Fretting Korozyonu" deyimini kullanmıştır. Yüzey molekülleri arasındaki kohezif kuvvet kopmaya neden olur. Daha sonra kopan partiküllerin oksitlenmesi meydana gelmektedir (Iyer and Mail 2001). Söz konusu dönemde aşınma ve korozyon oldukça iyi anlaşıldığı için, çalışmaların çoğunluğu fretting aşınması ve fretting korozyonu üzerinde odaklanmıştır.



Fretting aşınması, fretting yorulmasından farklı olarak düşük yüklerde yüzeylerin daha büyük genlikli (20–75 mikron) sürtünmesi sonucunda oluşur (Koenen *et al.* 1996). Fretting aşınması yüzeye fretting yorulmasından daha fazla zarar verme eğilimindedir. Fretting aşınmasının ilk safhasında kontak yüzeyinde aşınma debrisleri (döküntü) oluşur. Meydana gelen bu çapaklar oksitlenerek, orijinal yüzeyden daha sert olan oksitli yüzeyin oluşumunu başlatır. Bu oksitli parçacıklar yüzeyde çizik ve çukurcuklar oluşturarak, malzemede oluşan hasarı hızlandırır (Antoniou and Radtke 1997). Burada normal aşınmadan abrazyon aşınmasına geçiş olur. Daha sonraki safhada ise sürtünme sonucu izler oluşur ve malzeme transferi gerçekleşir. Buna ilaveten, yüzeyde oluşan bu hasarlar mikro çatlakların oluşumuna öncülük edebilir. Ancak yüzeye uygulanan gerilmenin düşük olması durumunda fretting aşınmasından dolayı yüzeyde oluşan mikro çatlaklar malzemenin tamamen kırılmasıyla sonuçlanacak ana çatlağın oluşmasına sebep olmayabilir (Iyer and Mail 2001). Brady (1990)'e göre kontak halindeki yüzeyler aslında çok az bir alanla birbirine temas ederler. Ancak kontak yüzeyine basınç uygulandığında yüzeydeki pürüzlerin tepe noktaları yerel olarak akma gerilmesini geçer. Dolayısıyla temas yüzeyi artar. Yüzeyler arasındaki relatif kayma hareketi neticesinde yüzeydeki oksit tabakası kırılır, metal metale sürtünerek aşınmaya neden olur. Aşınan parçacıkların araya girmesi abrazyon aşınmasına, eğer hareket salınımlı ise fretting aşınmasına sebep olur (Chakravarty 1995). Relatif hareket yüzeydeki oksit filminin kırılmasına sebep olur. Yüzeylerin pürüz tepe noktaları birbirine kaynak olur. Relatif hareket neticesinde kopan bu kaynaklı parçacıklar deformasyon setleşmesine uğrar ve hızla oksitlenerek yüzeyden kopmuş olan oksit tabakasıyla birleşir. Daha sonra bu kalıntılar bir yerde toplanırlar. Yorulma çevrimi boyunca sürekli artarak geniş bölgeleri kaplarlar ve abrasiv aşınmaya neden olurlar. Aşınma bölgeleri birleşerek mikro çukurcuklar oluşturur (Şekil 2.10). Bu mikro çukurcuklarda birleşerek daha derin çukurlar oluştururlar (Chakravarty 1995). Fretting aşınması: çevrim sayısı, normal yük, frekans, kayma genliği, yüzey sertliği, çevre şartları ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerden az ya da çok etkilenmektedir.



**Şekil 2.10.** Fretting aşınma evreleri (Brady 1990)

### 2.7.2. Fretting yorulması

Yorulmalı aşınma ilk kez 1911 yılında Eden, Rose ve Cunningham tarafından tespit edilmiştir. Bu araştırma, bugün artık çok iyi bilinen ve pratikte yaygın bir durum olan fretting ve yorulmanın birleşik etkisinin, çukurcuklar (pits) oluşturarak yorulma dayanımı üzerinde çok ciddi azalmalara neden olduğunu gösterdi. Yorulma dayanımındaki söz konusu bu azalmanın (SRF), 2 ile 5 kat arasında olduğu yine aynı çalışmada gösterildi. SRF, frettingsiz (düz) yorulma dayanımının, fretting'li yorulma dayanımına oranı olarak tanımlanabilir. Yorulma dayanımı ise, genellikle  $10^7$  çevrim sayısındaki değişken gerilmenin değeri olarak tanımlanır (Waterhouse 1992).

1958 yılında Fenner ve Field tarafından yapılan bir çalışmada, fretting'in çatlak başlangıç sürecini büyük ölçüde hızlandığını gösterdiler. Düz yorulmada çatlak başlangıcı toplam yorulma ömrünün %90'ını teşkil ederken, fretting yorulmasında ise çatlak başlangıcı toplam yorulma ömrünün yaklaşık %5'ini teşkil edebilmektedir (Fenner and Field 1958). Bu sonuç, gaz türbini, motor elemanları gibi yüksek çevrimli yorulma etkisine maruz makine elemanlarının fretting yorulmasından önemli ölçüde etkilendiğini gösterir (Fenner and Field 1958; Hamdy and Waterhouse 1982; Ruiz 1984; Waterhouse 1992).

Fretting yorulmasında, numune ile pabuç arasındaki relatif hareket, fretting aşınmasında ki relatif harekete göre daha küçüktür. Bu genellikle 30  $\mu\text{m}$ 'dan daha az olur (Koenen *et al.* 1996). Fretting yorulmasıyla fretting aşınmasının yüzeyde oluşturduğu hasar benzer görünmesine rağmen, fretting aşınması yüzeye daha fazla zarar vermektedir (Privett and Fujishiro 1994; Koenen *et al.* 1996).

## 2.8. Fretting Yorulma Kuramları

Fretting'in aşınma etkisiyle yorulma ömrünün azalmasını açıklayan teoriler geliştirilmiştir. Ancak buradaki zorluklardan biri fretting hasarının oldukça çeşitli etkilere sahip olmasıdır. Fretting önemli miktarda yüzey hasarına sebep olmasına rağmen yorulma çatlakları başlatmayabilir. Buna karşın uzun bir yorulma ömründe fretting çok az yüzey hasarı oluşturmakla beraber çok sayıda yorulma çatlaklarının başlamasına sebep olabilir. Sonuç olarak fretting yorulmasını yorumlayan teoriler, uç durumlar ile az etkili olabilecek durumlar arasında yeterince esnek olmalıdır.

Genel kabul gören fretting yorulma teorilerinden biri, temas halindeki yüzeyler arasında mikro seviyede küçük pürüzlerin tepe noktaları arasındaki temas yüzeyi küçük olduğundan gerilmenin, akma gerilmesini geçerek pürüz tepe noktalarının mikro mertebede birbirine kaynamasıdır (Chakravarty 1995). Temas yüzeyinde her çevrimde oluşan izafi hareket ile bu mikro kaynaklar koparak yeniden kaynak olmaktadır. Bu da yüzeyde hasara sebep olmaktadır. Daha pürüzlü ya da daha az parlatılmış yüzey uygulamalarında oluşan yorulma çizgileri daha derin ve kaba olur. Kontak halindeki yüzeyler arasında oluşan yorulma çizgileri, birbirini çeviren iki dişli çarkın dişleri gibi karşılıklı birbirinin simetriği şeklinde olur. Her bir yüklemde bir adet yorulma çizgisi oluşur. Fretting yorulmasında, temas yüzeyleri arasındaki izafi hareket malzemenin yüzeyindeki oksit tabakasını kaldırır. Korumasız kalan malzeme oksitlenecek ve süreç bu şekilde tekrarlanacaktır. Bu süreçten bazen fretting oksidasyonu olarak bahsedilir (Waterhouse 1992). Sonuç olarak dinamik gerilme, plastik deformasyona sebep olacak ve yüzeydeki yorulma çizgilerinde ayrılmalar başlayacaktır (Waterhouse 1992). Eğer çiziklerde ayrılmalar başlamazsa, temastaki

iki malzeme arasında malzeme transferi olacaktır. Yer değiştirmeler küçük olduğundan, sürtünme yüzeyinde aşınma parçacıkları kalacak ve bu parçacıklar bir araya gelecektir (Waterhouse 1989). Daha sonra oksitlenerek ana malzemeden daha sert olan kalıntılar haline gelecektir. Bu durum yerel olarak malzeme yüzeyinde kopmalar ve çukurcuk oluşumuyla çatlak oluşumunu hızlandıracaktır.

Fretting yorulmasını açıklayan çok sayıda teori olmasına rağmen fretting yorulmasının, yorulma ömründeki zararlı etkisini tam olarak tahmin eden bir eşitlik mevcut değildir. Bunun sebebi fretting yorulmasını etkileyen çok sayıda parametrenin olması ve bunların çoğunun bağımsız etkiye sahip olmasıdır (Privett and Fujishiro 1994; Koul *et al.* 1996).

Fretting yorulmasını etkileyen çeşitli parametrelerin bağımsız yapısı, ele alınan malzeme, çevre ya da yük şartları için, önleyici tedbir olarak deneysel metotları temel alır. Ruiz ve Chen'in çalışmaları, keskin makine parçaları ve disk bileşimlerinde muhtemel fretting yorulma çatlağı olasılığını ve yerinin tahmininde geliştirilen deneysel bağıntıya katkıda bulundu (Ruiz *et al.* 1984; Waterhouse 1992). Verilen bir noktada kayma genliği  $\delta$  ve  $\tau$  kesme gerilmesinin ve aynı bölgede verilen maksimum çekme gerilmesi  $\sigma$ 'nın ürettiği, fretting'e sebep olan mevcut enerjiyi dikkate alarak, sonuç kriterleri  $\sigma$ ,  $\tau$ ,  $\delta$  geliştirildi. Kontak yüzeyi boyunca çatlak başlangıcı için  $\sigma$ ,  $\tau$ ,  $\delta$  en yüksek değere ulaşır. Bununla birlikte  $\sigma$ ,  $\tau$ ,  $\delta$  pik değere ulaşınca kadar çatlak başlamayacaktır. (Ruiz *et al.* 1984; Ruiz and Chen 1986). Waterhouse bu kriterleri çelik çubuk ve düz levha için uyguladı ve  $\sigma$ ,  $\tau$ ,  $\delta$  vasıtasıyla çatlak yerini kesin olarak tahmin etti (Waterhouse 1992).

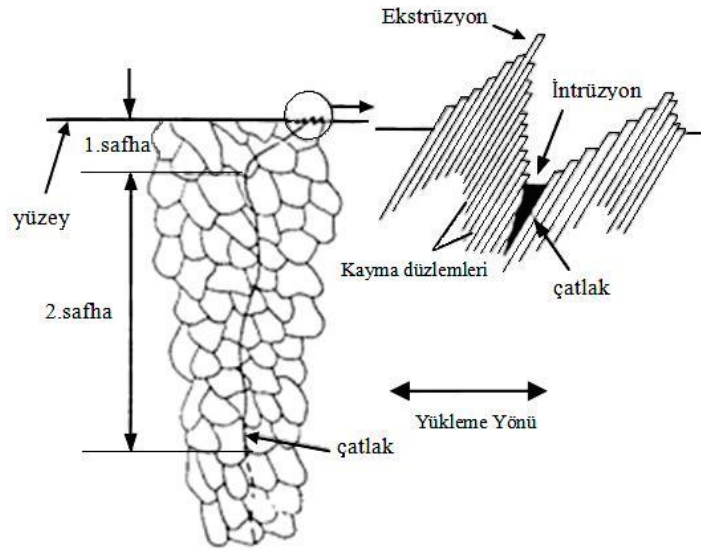
## 2.9. Temas (Kontak) Mekaniki

Temas mekaniği, fretting durumunda iken yüzeyler arasında mevcut temas şartlarının tanımlanmasıyla fretting'in oluşturulduğu hasarın gelişimini anlamada rol oynar. Temas mekaniğinin gelişiminde 1982'de Hertz'in geliştirdiği teori pek çok yerde

uygulanan temas problemlerinin çözümünde hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat teoride pek çok kabul bulunduğundan kullanımı sınırlıdır. Hertz tarafından yapılan kabuller aşağıdaki şekilde özetlenebilir. (1) yüzey süreklidir. (2) şekil değiştirmeler küçüktür. (3) malzemeler arasındaki yarı boşluk elastik davranır ve (4) yüzey sürtünmesizdir. Küçük şekil değiştirme kabulünü gerçekleştirmek için, yüklenmenin genellikle malzemenin elastik limitleri içerisinde kaldığı, lineer elastisite teorisini uygulanır. Temas halindeki malzemeler arası yarı boşluğun elastik olduğu kabulü ele alındığında, temas gerilme bölgesi malzeme sınırlarının yakınlığından ciddi bir şekilde etkilenmez. Yüzeyler arasında sürtünme olmadığı kabulü, sadece temas yüzeyleri arasında normal (dik) kuvvetlerin etkisi dikkate alındığında geçerlidir (Şengül 2006).

## 2.10. Çatlak Oluşumu ve Gelişme Süreci

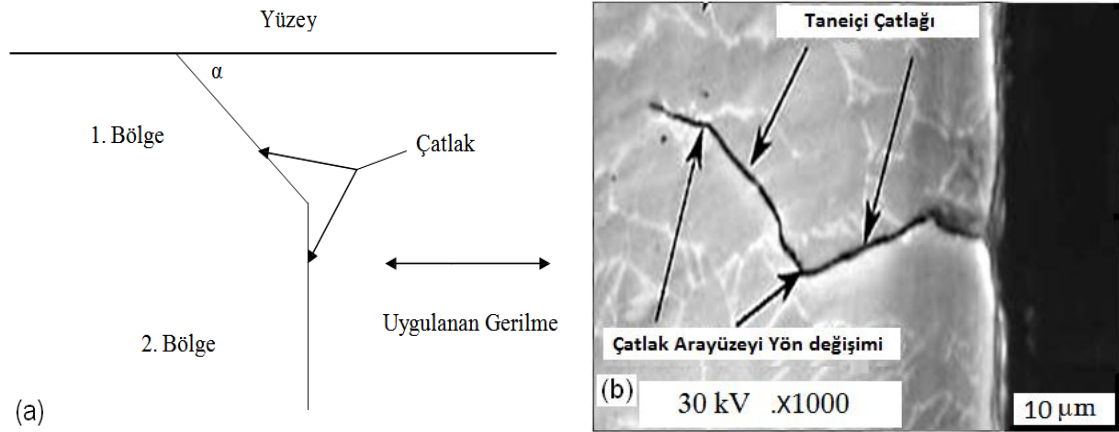
Yorulma çatlak oluşumu ve yayılımı Şekil 2.11.'de şematik olarak gösterilmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar fretting'in çatlak oluşumunu kuvvetli bir şekilde etkilediğini göstermiştir (Waterhouse 1981; 1992).



**Şekil 2.11.** Çatlak oluşumunun şematik gösterimi (Samuels 1993)

Sabit genlikli yük altında çatlak boyu ile çevrim sayısı arasında ilişki vardır. Numunenin yorulma ömrünün büyük bölümünde çatlak boyu kısadır. Gerilme değerinde  $\Delta\sigma$  kadar bir artış olduğunda çatlak yayılma oranında da artış olur (Bannantine 1990).

Çatlağa dik uygulanan yükün oluşturduğu ve çatlak ucunda meydana gelen çeki gerilmesi çatlak yayılmasına sebep olur (Şekil 2.12), (Waterhouse 1981).



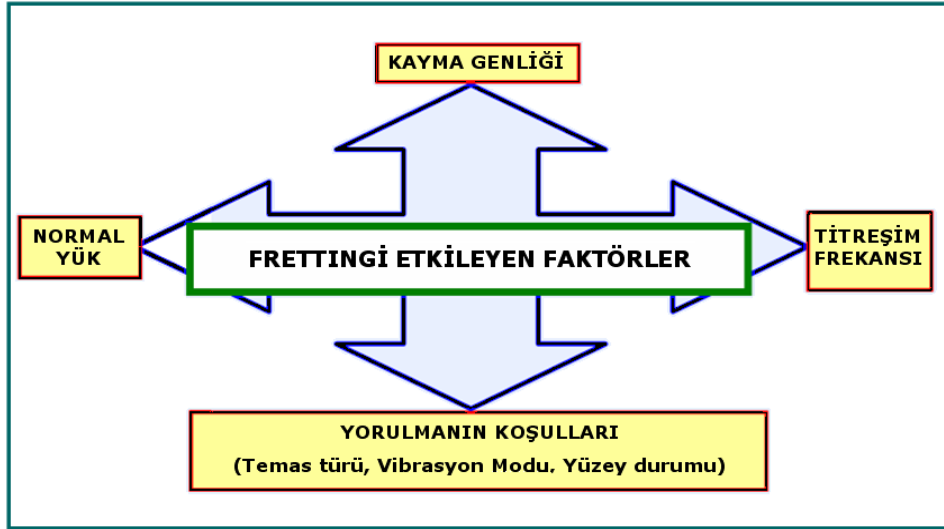
**Şekil 2.12.** (a) I. ve II. Bölgede çatlak yayılması (Waterhouse 1981) (b) Bu tip bir çatlağın SEM görüntüsü

Kırılmaya yakın periyotta çatlak yayılması hızlı ve dengesizdir. Bu evre, malzemenin toplam yorulma ömrünün küçük bir bölümünü oluşturur ve genellikle kırılmaya kadar ki çevrim sayısı  $N_f$ , tahmin edilemez (Sines and Waisman 1959; Bannantine 1990).

Fretting, çatlak başlangıcını ve yayılmasını ciddi şekilde etkiler. Çatlak başlangıcının hız kazanması, fretting'in sebep olduğu yüzey hasarı tarafından sağlanır. Fretting'in ilk devresinde oluşan aşınma birikintileri yüzeyde çukurcuklar ve karıncalanmaya sebep olur. Dolayısıyla bu durum yüzeyde gerilmenin yükselmesine neden olur (Chakravarty 1995). Fretting'in sebep olduğu yerel kesme gerilmesinin olduğu bölgede ki gerilme etkili bir şekilde yükselerek, bir çatlak başlatmak için yeterli enerji

seviyesine çıkabilir (Waterhouse 1981; 1992). Yorulma çatlak başlangıcı, maksimum kesme gerilmesinin yönlendirildiği yönde, yüzeye göre  $\alpha$  açısı ile ilerleme eğilimindedir (Waterhouse 1981). Şekil 2.11, Şekil 2.12.a'da şematik, b'de ise SEM görüntüsü olarak gösterilmiştir. Fretting'in sebep olduğu çatlak, çatlak yayılması esnasında, genellikle yüzey normaline göre açılı bir şekilde yönlenir. Bununla birlikte fretting yorulmasının başlattığı çatlakın uzunluğu, fretting'siz düz yorulmanın oluşturduğundan daha fazladır (Waterhouse 1992). İki yüzey arasında tam kayma oluşur, yerel sürtünme katsayısı sabit hale gelir ve fretting aşınması kırılma davranışından daha baskın hale gelir. Bu sürtünme hasarına, yüzey lekelerine ve yüzeyin tabaka tabaka ayrılmasına sebep olur (Waterhouse 1992).

### 2.11. Fretting Yorulmasına Etki Eden Faktörler



Şekil 2.13. Frettingi etkileyen faktörler

Fretting yorulmasının sebep olduğu yüzey hasarı, temas noktasındaki normal yük, kayma genliği ve titreşim frekansı gibi koşulların bir fonksiyonudur (Waterhouse 1992). Fretting yorulmasında çatlak oluşumunu etkileyen faktörler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

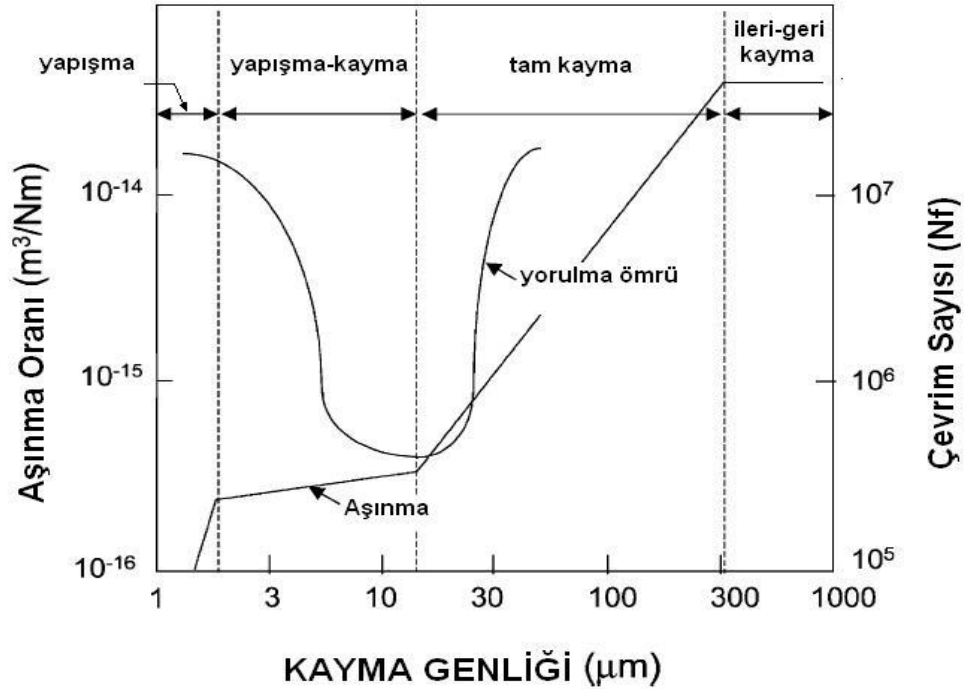
### 2.11.1. Relatif (bağıl) kaymanın etkisi

Fretting yorulma çatlak oluşumu malzeme türü, mekanik ve çevresel faktörlerden etkilenir. Karşılıklı olarak birbiriyle ilişkili olan bu faktörler, son derece karmaşık olan Fretting yorulmasını etkiler. Temas eden iki eleman arasındaki relatif kayma, tam kayma, kısmi kayma ve yapışma rejimleri arasında geçiş şeklinde seyreden kararsız bir durumdur. Diğer parametreler tarafından da etkilenir ve çatlak oluşumunda önemli etkiye sahiptir. Bir fretting temasında, relatif kaymanın üç bölgesi olabilir. Temas halindeki bileşenler arasında relatif bir kayma oluşmadığında, kontak yapışma rejimlidir ve yüzeyde çok az hasar meydana gelir. Diğer taraftan temas yüzeyinin her noktasında kayma meydana gelirse, tam bir kayma olayı oluşur ve yüzeyde kopmaların olduğu aşınmaya doğru bir geçiş gözlenir. Kayma ve yapışma bileşimi eşzamanlı olarak mevcut olduğunda kısmi kayma şartları oluşmuş olur. Zhou ve Vincent aynı deneyde bir süre kısmi kaymanın oluştuğu ve bir süre de tam kaymanın oluştuğu, sonra yine kısmi kaymanın oluştuğu birden fazla sayıda, kısmi kayma ile tam kayma arasında geçişin olduğu karışık bir Fretting rejimi tanımladılar. Bu geçişli rejimi çatlak oluşumu ve yorulma kırılması açısından malzemenin kırılmasıyla sonuçlanabilecek en tehlikeli fretting kayması rejimi olduğunu ifade ettiler.

Vingsbo and Söderberg (1988), fretting yorulma ömründe relatif kayma genliğinin etkisini incelediler. Literatürdeki mevcut verileri temel alarak, relatif kaymanın üç bölgesiyle, yorulma ömrü eğrisi arasındaki ilişkiyi relatif kayma genliğinin bir fonksiyonu olarak belirlediler. Şekil 2.14’da gösterildiği üzere Vingsbo ve Söderberg, yorulma ömrünün, relatif kayma genliğindeki artışla, başlangıçta düşerek bir minimum değere ulaştığını, sonra tekrar yükseldiğini ve nihayet sabit bir değere ulaştığını ifade ettiler. 10 ila 30  $\mu\text{m}$  arasındaki değerlerde relatif kayma genliğinin yorulma ömrünü minimuma indirdiğini gözlediler. Relatif kaymanın, kısmi kaymadan tam kaymaya geçiş değerine karşılık gelen bu değeri, Zhou ve Vincent’in karışık rejimin en fazla hasar oluşturduğu görüşünü destekler niteliktedir. Gaul and Duquette (1980) de relatif kayma genliğinin 20 ila 30  $\mu\text{m}$  arasında olduğu durumda, yorulma ömrünün



minimum olduğunu belirttiler. Spink, 3 ila 75  $\mu\text{m}$  arasındaki kayma genliğinde, fretting yorulmasından dolayı kırılmanın meydana geldiği ve yaklaşık 25  $\mu\text{m}$  kayma genliğinde yorulma ömrünün minimum bir değer aldığını buldu. Buciumeanu *et al.* (2008) yaptıkları çalışmada Ti6Al4V taban malzeme üzerinde 34CrNiMo6 çelik pabuçlar kullanarak relatif kayma değerinin fretting üzerine etkisini incelediler. Minimum fretting yorulma ömrüne karşılık gelen relatif kayma genliği değerini 40  $\mu\text{m}$  olarak tespit ettiler ve relatif kayma genliğinin fretting yorulma ömrü üzerine etkisinin kuvvetle malzemeye ve test koşullarına (normal yük, teğetsel yükleme, pabuç geometrisi) bağlı olduğunu rapor ettiler.



**Şekil 2.14.** Kayma genliğinin “Fretting Yorulma Ömrü” ve “Aşınma Oranı” üzerine etkisini gösterir grafik (Vingsbo and Soderberg 1988).

Sonuç olarak yapılan çalışmalardan da görüldüğü üzere relatif kaymanın fretting yorulma ömrü üzerine etkileri incelendiğinde temas halinde birbiri ile çalışan her malzeme için minimum fretting yorulma ömrü değerine karşılık gelen farklı relatif kayma değerleri ortaya çıkmaktadır. Yorulma safhasının bu minimum değerden önceki aşamasında kayma rejimlerinin de farklı olduğunu görmekteyiz. Minimum değerden

önceki aşamada, yani fretting yorulma ömrünün düşüş gösterdiği safhada “yapışık ve kısmi kayma rejimi” varken, minimumdan sonraki aşamada yani fretting yorulma ömrünün yükseliş gösterdiği safhada “tamamen kayma rejimi” nden söz edebiliriz. Bu da şu anlama gelir ki, “yapışık ve kısmi kayma rejimi”, “tamamen kayma rejimi” ne kıyasla hasar oranını fazlaca artıran bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır.

### **2.11.2. Normal yükün (kontak basıncının) etkisi**

Malzemelerin fretting yorulma dayanımını etkileyen diğer bir parametre de temas basıncıdır. Fretting yorulması oluşmadan önce minimum bir normal yüke gerek vardır (Waterhouse 1992). Bu minimum normal yükün altındaki temas basıncı değerinde, yüzeyde önemli hasara sebep olan fretting aşınması oluşumu ön plandadır. Fakat minimum bir değer altındaki kontak basıncında fretting, yüksek çevrimli yorulma ömrü üzerinde güçlü bir etkiye sahip değildir (Malkin 1972). Temas basıncı arttırıldığında malzemenin yorulma ömrü üzerinde fretting aşınmasının etkisi azalır fretting yorulması ön plana çıkmaya başlar. Ayrıca bir maksimum temas basıncı değeri vardır ki bu değer üstünde, yorulma ömründe daha fazla azalmaya sebep olmaz (Antoniou and Radtke 1995). Genel olarak pürüzlü yüzey tepe noktalarının küçük temas alanıyla birbirine bastırılması sonucu plastik deformasyonla yüzey hasarının oluştuğu kabul edilir (Waterhouse 1992). Normal yük  $\tau$  gerilmesini,  $\tau$  gerilmesi ise yüzeydeki plastik deformasyonu, aşınmayı ve çatlak başlangıcını etkiler (Waterhouse 1992). Ayrıca normal yük, fretting'in oluşturduğu hasarı etkileyen, iki yüzey arasındaki kayma miktarını etkiler (Koul *et al.* 1996).

Nishioka and Hirakawa (1972) kontak basıncının yükselmesiyle, yorulmada çatlak başlangıcını esas alan yorulma dayanımının düşüşü arasında doğrusal bir ilişki olduğunu buldular. Fakat kontak basıncındaki yükseliş ile kırılmayı temel alan Fretting yorulması dayanımındaki düşüş devam etti. Kontak basıncı daha da arttırılarak belli bir değere ulaşıttan sonra, yorulma dayanımı neredeyse sabit bir değerde kaldı. Bu durum, daha büyük kontak basınçlarında çatlak oluşumunun devam ettiğini, ancak yükün oluşturduğu bası gerilmesinin etkisiyle çatlak ilerlemesinin muhtemelen

durduğunu gösterir. Fernando *et al.* (1994), yorulma ömrünün, kontak basıncının artmasıyla başlangıçta düştüğünü ve bir minimum değere ulaştıktan sonra kontak basıncının yükselmeye devam etmesiyle artmaya başladığını söylemektedir. Çok yüksek kontak basınç değerlerinde yorulma ömründeki yükselişin sebebi olarak yüksek normal (kontak) bası gerilmelerinden dolayı çatlakta kapanma etkisi olduğu ve çatlak ilerleyişinin yavaşladığı sonucuna vardı. Nakazawa *et al.* (1992)'nin çalışmaları, kontak basıncının daha fazla artmasıyla yorulma ömründe ciddi bir değişimin olmadığını tespit etti. Kontak basıncının bu etkisini, orta gerilme genliği değerlerinde titanyum alaşımlarında ve yüksek dayanımlı çelikler içinde doğruladı. Titanyum alaşımı ve yüksek dayanımlı çeliklerde orta gerilme genliği değerinde, kontak basıncının artmasıyla yorulma ömründe başlangıçta oluşan düşüşü az bir artışın takip ettiği, daha sonra bir değişim olmadığını gözlemlədiler. Daha yüksek gerilme genliği değerlerinde, yorulma ömründe minimum bir değere ulaşıldıktan sonra kontak basıncındaki artışla herhangi bir değişiklik olmadığını gözlemlədiler. Düşük gerilme genliği değerinde alışılmışın dışında bir durumla karşılaştılar. Başlangıçta kontak basıncının artırılmasıyla yorulma ömründe bir düşüş, takiben sabit yorulma ömrü, daha sonra kontak basıncındaki yükselmenin devam etmesiyle, yorulma ömründeki keskin bir yükseliş olduğunu gözlemlədiler. Bu şartlar, kontak basınç değerinin küçük bir bölgesinde devam ettikten sonra yorulma ömrünün önceki minimum değerine düştüğünü gözlemlədiler. Kontak basıncında daha fazla artışa bağlı olarak ise, yorulma ömründe bir değişiklik olmadığı sonucuna vardılar.

Fernando *et al.* (1994) kontak basıncındaki artma ile kontak yüzeyinde meydana gelen sürtünme kuvvetini incelediler. Normal yükün artırılmasıyla, kayma gerilmesinin artış oranında bir düşüş ve sonunda normal yükün daha da artırılmasıyla sürtünme kuvvetinin sabit değerde kaldığını gözlemlədiler. Lee *et al.* (2000) 'da benzer sonuçlar elde etti. Switek (1985), temas eden yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetinin, fretting yorulma limitini etkileyen önemli faktörlerden biri olduğunu belirtti.

Naidu and Raman (2005) yaptıkları çalışmada AA6061 alaşımı malzemenin fretting yorulma ömrü üzerinde kontak basıncı etkisini araştırdılar. Bu çalışmada 50 MPa kontak basıncı değerinde geniş kayma genliği, 100 MPa kontak basıncı değerinde yapışma-kayma rejimi ve 200 MPa kontak basıncı altında ise ağırlıklı olarak yapışma rejimini gözlemladiler. Kontak basıncında ki artışa bağlı olarak Al-Mg-Si alaşımı AA6061 malzemenin fretting yorulma ömründe değişken davranışlar sergilediği görülmüştür. Kontak basıncı değeri artırıldıkça yorulma ömrü düşüş eğiliminde olmuştur. Bu değer 100 MPa kontak basıncında minimuma giderken sonra artış eğilimine girmiş ve 150 MPa kontak basıncında maksimum noktaya ulaşmış, daha sonra düşüş eğilimine girmiştir. Araştırmacılar, bu değişken davranışın, sürtünme gerilmesi, kritik relatif kayma genliği ve çatlak büyümesinin gecikmesi gibi faktörlere bağlı olabileceği sonucuna vardılar (Naidu and Raman 2005).

### **2.11.3. Frekansın etkisi**

Frekansın yorulma ömrünü etkilediği bilinmektedir (Waterhouse 1992). Hatta sabit gerilme değerinde yükün frekansı, kırılma devir sayısını etkilemektedir. Düşük frekanslarda, korozif ortamda yük uygulandığında, çevreye açık olan çatlak daha uzun süre çevre şartlarına maruz kalacağından yorulma ömrünü kısaltmaktadır (Bannantine *et al.* 1990). Bir başka deyişle çok küçük frekanslarda aşınmanın fazla olması oksidasyon ve metal-metal temasının fazla olması ile açıklanmıştır.

Diğer taraftan, yüksek frekansta malzemenin ısı dağıtma kabiliyetine bağlı olarak, malzemenin iç tabakalarında dinamik ısınma etkisi meydana gelebilir. Bu ısınma yüzeydeki koruyucu tabakayı alınlmışın dışında bozabilecek potansiyele sahiptir.

### **2.11.4. Yüzey durumunun (yüzey pürüzlülüğü) etkisi**

Yüzeyin iyi işlenerek pürüzlülüğün azaltılması, yorulma ömrü üzerinde etkisi olan, gerilme yoğunlaşmasını azaltır (Bannantine 1990; Waterhouse 1992). Bununla

birlikte fretting yorulması açısından pürüzlü yüzey, düzgün yüzeye göre daha fazla direnç gösterme eğilimindedir (Waterhouse 1992). Bunun sebebi yükün çok sayıda pürüzün üzerine dağılması olabilir. Bu dağılım daha önce bahsedilen Ruiz kriterlerindeki  $\delta$  ile birlikte düşünülmelidir. Buna rağmen yüzey pürüzlülüğünün artışıyla yorulma dayanımının pozitif artışının bir sınırı vardır. Yorulma açısından pürüzlülüğün getirdiği gerilme yoğunlaşmasından daha da önemli olan malzeme sertliğidir.

### **2.11.5. Çevrenin etkisi**

Fretting yorulmasının zararlı etkilerine karşı malzemeyi korumak için bir yüzey modifikasyonu seçilirken servis esnasındaki çevre etkileri de dikkate alınmalıdır. Çevre malzemelerin fretting yorulma ömründe, pozitif veya negatif rolü oynayabilir (Antoniou and Radtke 1995). Oksijenin bol olduğu ortam veya tuzlu su gibi çevre şartları, yüzeyde korozyona sebep olabilir. Bu da çatlak oluşumunu hızlandırarak, fretting yorulma dayanımını düşürür. Kötü çevre şartları fretting aşınması ve fretting yorulmasının etkilerini azaltan koruyucu kaplamanın bozulmasına neden olabilir. Bununla beraber oksijence zengin ortamda fretting yorulma direncinin arttığı malzemeler de vardır. Krom nikel paslanmaz çelik kararlı bir oksit tabakası oluşturma eğilimindedir ve bu oksit tabakası sürtünme ve aşınma oranını azaltır (Hamdy and Waterhouse 1982; Antoniou and Radtke 1995). Oksit tabakasının diğer bir özelliği kendini doğal olarak tamir edebilmesidir. Mevcut olan ilk koruyucu oksit tabakası, fretting'in etkisiyle kazınarak malzemenin yüzeyi ortaya çıkaracak olsa dahi malzemenin yapısından dolayı bu koruyucu oksit tabakası yeniden oluşabilir. Bu oksit, yüzeyler arasında sıcaklık gelişimindeki artış (Waterhouse and Iwabuchi 1985; Waterhouse 1989) ile metal metale temas miktarı ve sürtünme katsayısındaki azalma ile meydana gelir.

### **2.11.6. Sürtünme katsayısının etkisi**

Sürtünme katsayısı  $\mu_f$ , iki yüzey arasında hareket oluşturmak için gerekli olan kuvvetin büyüklüğü ile ilgilidir. Sürtünme katsayısı, iki yüzey arasındaki relatif hareketi sağlayan F kuvveti ile yüzeye uygulanan normal kuvvet N arasındaki oran olarak tanımlanabilir.

Genel olarak belirli bir zaman dilimindeki aşınma miktarı, sürtünme katsayısıyla ilgilidir. Bu yüzden pek çok fretting yorulma dayanımı arttırma düzeneği, yalnızca kontak halindeki iki yüzey arasındaki sürtünme katsayısını azaltmayı amaçlar. Yumuşak kaplamalarla karşılaştırıldığında, sert yüzey kaplamaları ile daha düşük sürtünme katsayıları elde edilir. Bununla birlikte pek çok sert yüzey kaplama işlemi fretting yorulma ömrü üzerinde zararlı etki oluşturabilir.

Sürtünme katsayısındaki azalma, aşınmadaki azalmaya yardımcı olurken, fretting aşınmasındaki azalma fretting yorulması üzerinde her zaman iyileşme olacağını garanti etmez. Ancak temasta olan iki yüzey arasında belli bir pürüzlülük değerinde ya da sürtünme katsayısı değerinde fretting yorulması üzerinde bir iyileşme görülebilir (Privett and Fujishiro 1994).

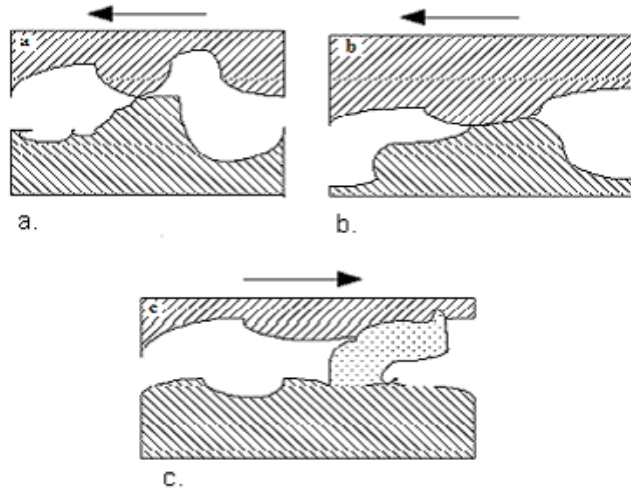
## **2.12. Aşınma Mekanizmaları**

### **2.12.1. Adhesiv aşınma**

Kayma sürtünmesi yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri arasında adhesiv çekim kuvveti söz konusudur. Bu kuvvetin oluşması moleküllerin yaklaştırılmasına bağlıdır. Temas halindeki yüzeyler pürüzlerle etkileştiklerinden, metal ağırlığı veya etkiyen bir kuvvet, temasla olan çok küçük pürüz tepelerine çok yüksek basınç olarak etkir. Bu basınç, yani bu noktadaki gerilme pürüzlerin akma sınırını aşınca plastik deformasyona, pürüzlerin birbirini

çizmesine, yarmasına ve sıvanıp kaynak olmasına neden olurlar. Ayrıca pürüzlerin deformasyonu ile oluşan mikro adhesiv temas yüzeyi boyunca yayılır. Çiftin karşılıklı hareket etmesi halinde de yüzeyde bulunan absorbe olmuş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaklaşmayı oluşturur. Kayma hareketi sırasında bu noktalar koparak yenme ve aşınmaya neden olurlar. Bu tip malzeme kaybı adhesiv aşınmayı oluşturur (Demiral vd 2006).

İki ayrı metal yüzeyi basınç altında Şekil 2.15’de görüldüğü gibi bir araya getirildiği zaman, iki ayrı yüzeyde bulunan karşılıklı çıkıntılar gerek sürtünme neticesinde oluşan ısı, gerekse de soğuk kaynaklaşma etkisi nedeniyle birbiriyle bağ yaparlar. Meydana gelen bu bağ, birleşen çıkıntıların diğer bölgelerindeki bağ yapısından daha kuvvetli olabilir. Yüzeylerin birbirine karşı olarak yaptığı hareketin devam etmesiyle birleşen iki çıkıntı, bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan kopacaktır. Bu kopma kaynak noktasında meydana gelmediği zaman, bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme transferi meydana gelir. Bu prosesin çalışma koşullarında birçok kere tekrarlanması ile adhesiv aşınma kendisini hissettirecek boyutlara ulaşır (Aytaç 2007).

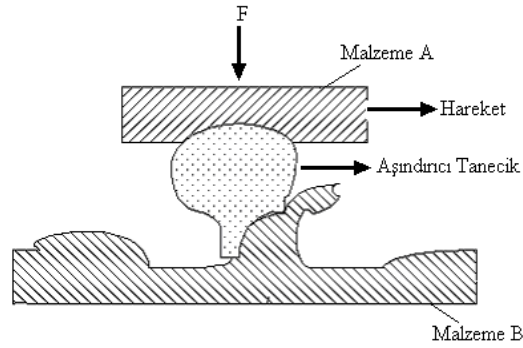


**Şekil 2.15.** Adhesiv aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi, a. iki çıkıntının bulaşması ve bağ oluşumu, b bağın koparak bir yüzden diğerine malzeme transferinin oluşumu c. uzamış olan çıkıntının diğer yüzeydeki çıkıntıyla etkileşimi sonucunda da yüzeyde kırıntı oluşumu (Aytaç 2007).

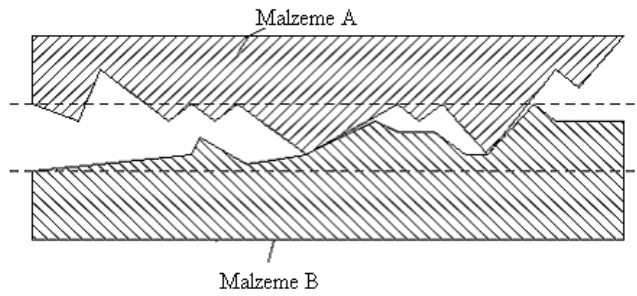
### 2.12.2. Abrasiv aşınma

Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da isimlendirilen abrasiv aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abrasiv aşınma en genel olarak, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan parçacıklarla basınç altında etkileşmesi ile sert parçacıkların malzeme yüzeylerinden parçalar koparması şeklinde tanımlanabilir. Bu mekanizmaya örnek olarak, sisteme dışarıdan giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma şekli verilebilir.

Bu tip aşınmada sert ve keskin parçacık, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma, iki elamanlı ve üç elamanlı olmak üzere ikiye ayrılır. (Şekil 2.16 ve Şekil 2.17).



**Şekil 2.16.** Üç elamanlı abrasiv aşınma (Aytaç 2007).



**Şekil 2.17.** İki elemanlı abrasiv aşınma (Aytaç 2007).



İki elemanlı abrasiv aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbiriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrasiv aşınmada ise, aşınan ve aşındıran malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir (Aytaç 2007).

Metal-metal sürtünmelerinde aşınma iki elemanlı abrasiv veya adhesiv olarak başlayıp, üç elemanlı abrasiv olarak devam eder. Bu durumda araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro taşlar ve parçalanmış oksit parçaları üçüncü elemanı (ara malzemeyi) oluşturabilir. Serbest hale geçen mikro talaş parçaları, genellikle ana malzemedan daha sert olduklarından dolayı aşınmayı hızlandırır (Aytaç 2007).

Abrasiv aşınmayı etkileyen iki temel faktör, aşındırıcı parçacık ile metal yüzeyi arasındaki sertlik farklılığı ve teması meydana getiren basıncın büyüklüğüdür. Abrasiv aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden normal yük azaltılarak düşürülebilir. Böylece parçacıkların yüzeye daha az batması ve çapak kaldırılması açısından daha az iz bırakması sağlanır (Aytaç 2007).

## **2.13. Aşınmanın Bağlı Olduğu Faktörler**

### **2.13.1. Malzemenin cinsi**

Deney malzemesi olarak seçilen malzemelerden, mekanik ve kimyasal özelliklerinin istenilen özellikleri sağlaması gerekmektedir. Bu sebepten dolayı çalışma şartları gerçeğe uygun bir şekilde belirlenmeli ve kullanılacak malzemenin türü (demir, çelik, alüminyum vs.) bu şartları karşılayabilecek şekilde seçimi yapılmalıdır (Aytaç 2007).

### **2.13.2. Malzemenin mikro yapısı**

Deney için kullanılacak olan malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerini belirleyen en önemli faktörden birisi mikro yapıdır. Mikro yapıda bulunan fazlar, tane boyutu, şekli, kristal kafes yapısı vb. birçok özelliğe bağlı olarak mekanik özellikler değişiklik göstermektedir. Malzemelerde değişiklik gösteren sertlik, akma mukavemeti, sürtünme katsayısı, kopma mukavemeti, elastikiyet modülü gibi birçok özellik mikro yapıyla değiştirilebilmektedir. Bu nedenle hangi metotla malzeme üretilirse üretilsin uygulanan işlem basamakları istenilen mikro yapıya göre şekillendirilmelidir (Aytaç 2007).

### **2.13.3. Malzeme şekli ve boyutları**

Malzemenin şekli ve boyutu gerçek temas alanını etkilediğinden dolayı aşınmayı da etkiler. Yapılan araştırmalarda, toprak işleme aletlerindeki kesici ağızların zamanla parabolik bir şekil aldığını ve parabolik şeklin aşınmaya karşı daha dirençli olduğu bulunmuştur. Ayrıca geometrik kesiti ideal daireye yakın olan numunelerin daha az aşındığını ve aşınma sonunda ideal daireye yaklaşma olduğu tespit edilmiştir (Mutlu 1996).

### **2.13.4. Ortamın etkisi**

Atmosfere açık ortamda çalışan sistemlerde çevre sıcaklığı, ortam basıncı ve ortamda bulunan nem, aşınma sistemini etkileyen en önemli faktörleri oluştururlar. Yüzeyler arasında sürtünme söz konusu olduğuna göre sürtünme kuvvetinin bir kısmı sistemde sıcaklık olarak ortaya çıkacaktır. Özellikle sistemde kuru bir sürtünme mevcut ise ortaya çıkan ısının boyutları oldukça yüksek olmakta, hatta bazı sistemlerde mikro yapı değişikliğine bile sebep olmaktadır (Yılmaz 1996).

Araştırmalarda, atmosfer basıncı ve sıcaklığın çeşitli çeliklerin aşınma direncine

etkileri incelenmiş ve 300 °C'ye kadar aşınma miktarının fazla etkilenmediği, 350 °C civarında ise farklı değerlerin çıktığı bulunmuştur. Bu sonuç düşük sıcaklıkta yüzey oksidasyonunun aşınmaya direnç teşkil edecek bir rol oynayabilmesi şeklinde açıklanmıştır. Aynı çalışmada argon gazı, yüksek basınç ve açık atmosfer kullanılmak suretiyle değişik basınç ve sıcaklıklarda çalışılmış ve ortamın etkisi incelenmiştir. Sonuçta sıcaklığın artışının aşınmayı belli bir sıcaklık değerine kadar etkilemediğini daha sonraki sıcaklıklarda etkisini hissettirdiğini göstermiştir (Yılmaz 1996).

### **2.13.5. İşletme koşulları**

Aşınma sistemi içerisinde aşınma yüzeyinin maruz kalacağı basıncın büyüklüğü, birim yüzeye uygulanan kuvvetin büyümesini sağlayacağından, aşınmanın artmasına da sebep olacaktır. Araştırmacıların birçoğu kritik bir yükleme miktarına kadar yükün artışı ile hacimsel aşınmanın orantılı bir değişim gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Kritik yükleme miktarı, aşınma yüzeyinin soğuk deformasyonla, sertliğin belli bir oranda değer olarak belirlenmiştir. Hacimsel aşınmanın yük ile doğrusal olarak arttığını, fakat yükün daha fazla artmasıyla birim yük başına düşen aşınma miktarının, belli bir kayma (aşınma) yolundan sonra dengeye geldiğini tespit etmiştir (Yılmaz 1996).

Bütün teorik uygulamalı çalışmalar, kayma yolu ile aşınma miktarının orantılı olduğunu belirtmektedir. 0-0,25 m/s aralığında kayma hızının artmasıyla hacimsel aşınmanın yavaş olarak arttığını belirlemişlerdir (Yılmaz 1996).

Düşük hızlarda ısınma söz konusu değilse aşınma miktarı sürtünme hızına bağlı değildir. Aşınma miktarı, abrasiv tanelerin büyümesiyle doğru orantılı olarak artma gösterir (Yılmaz 1996).

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme

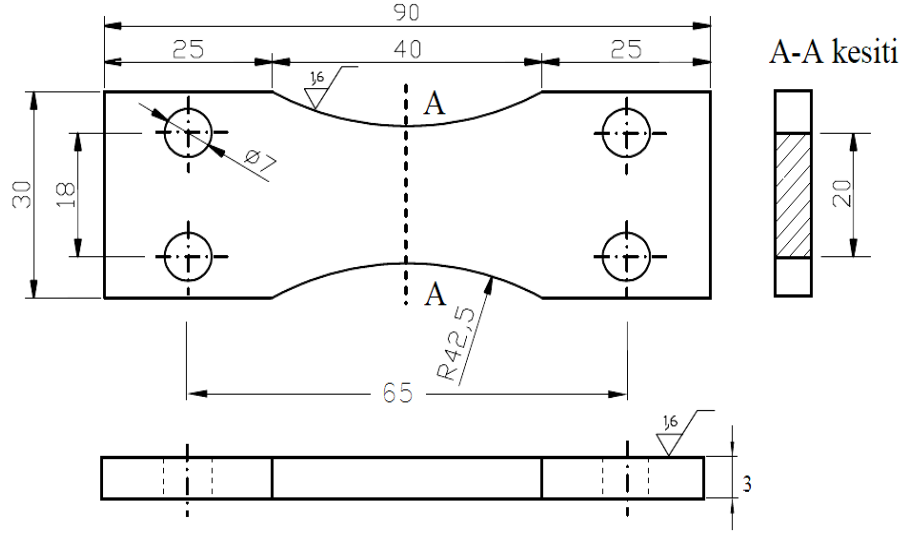
Bu çalışmada havacılık ve uzay sanayinde yaygın olarak kullanılan 2014 gurubu alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların tümü 20 °C ve %50 bağıl neme sahip atmosfere açık ortamda gerçekleştirildi. Yapılan spektrometre analiz raporuna bağlı olarak, malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.1.** 2014 Al alaşımı kimyasal bileşimi

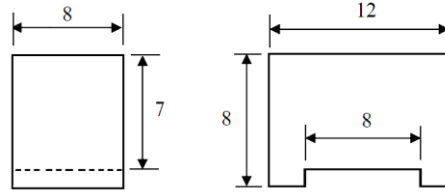
(% Ağırl.)	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Zn
	5,0	0,64	0,75	0,98	0,37	0,01	0,09

#### 3.2. Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan fretting yorulma numuneleri, Şekil 3.1’de verilmiş olan boyutlara talaşlı imalat yöntemleriyle, 2014 Al Alaşımı düzlemsel levhalardan kesilerek elde edilmiştir. Numune ve kontak pabucuna ait resimler Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmiştir.



**Şekil 3.1.** Fretting yorulma numunesi boyutları



**Şekil 3.2.** Kontak pabucu boyutları

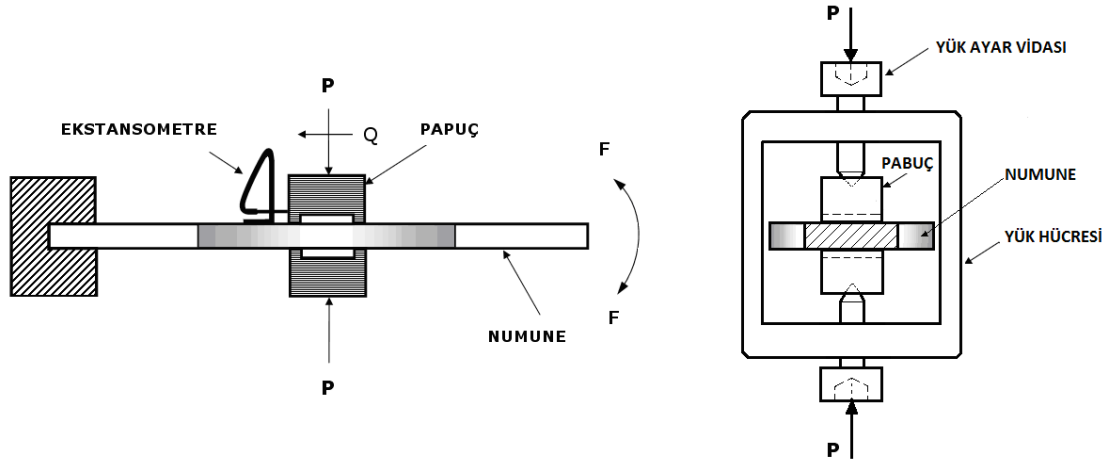
Fretting çalışmalarında tercih edilen en yaygın kontak türlerinden biri, düz yüzey üzerinde düz yüzey (*flat-on-flat*) temasıdır. Bu, numunenin paralel iki yüzeye sahip olması anlamına gelir. Bu çalışmada kullanılan fretting numuneleri, yukarıda ifade edilen özellikler göz önüne alınarak Şekil 3.1’de gösterilen ölçülerde hazırlanmıştır.

Fretting yorulma çalışmalarında farklı tipte kontak pabuçları (*contact pads*) kullanılır. Bu çalışmalarda en yaygın olarak kullanılanı, uygulamadaki kontak geometrilerini en iyi yansıtan köprü tipi (*bridge type*) kontak pabucudur. Bu çalışma için seçilen köprü tipi kontak pabucunun geometrik boyutları Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Pabuç malzemesi olarak AISI 1045 çeliği seçilmiştir.

Fretting yorulma davranışı üzerinde temas yüzeylerinin durumunun önemli bir etken olduğu bilinmektedir. Bu yüzden, fretting yorulma numuneleri ve köprü tipi kontak pabuçlarının temas yüzeyleri mekanik olarak parlatıldı. Bu işlem 800–1200 arasındaki kumlu su zımparası ile gerçekleştirildikten sonra, söz konusu yüzeyler alkol ile temizlendi.

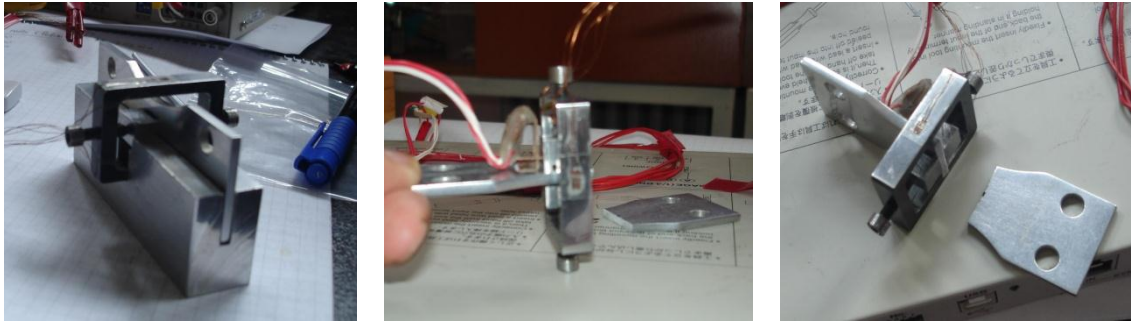
### 3.3. Fretting Test Sistemi

Uygulamadaki fretting şartlarını, laboratuvar ortamında oluşturmak için çeşitli metotlar kullanılır. Kullanılan en yaygın metotlardan biri, bir deney halkası (*proving ring*) kullanılarak numunenin köprü tipi fretting pabuçlarıyla sıkıştırılmasıdır. Daha sonra numuneye yorulma yükleri uygulanır. Köprü tipi kontak pabuç uygulamasında, her bir pabuç için iki kontak bölgesi oluşur. Yorulma yükleri numunede bası çeki olarak değişen bir şekil değiştirme oluşturur. Uygulanan yük sürtünme yoluyla pabuçlara nakledilir. Bu durum pabuçlarda da bası çeki olarak değişen bir şekil değiştirme oluşturur. Sonuç olarak, numune üzerindeki şekil değiştirmeler, kontak pabuçlarında oluşan şekil değiştirmelerden daha büyüktür. Bu yüzden oluşan şekil değiştirmeler ve kontak noktasındaki relatif kayma, numune ve pabuçlar arasında uyumsuz bir eşleşme oluşturur. Genellikle iki kontak yüzeyi arasındaki kaymanın düzgün bir şekilde dağıldığı varsayılır. Bu çalışmada kullanılan fretting test sistemindeki numune-pabuç-ekstansometre bağlantısı şematik olarak Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

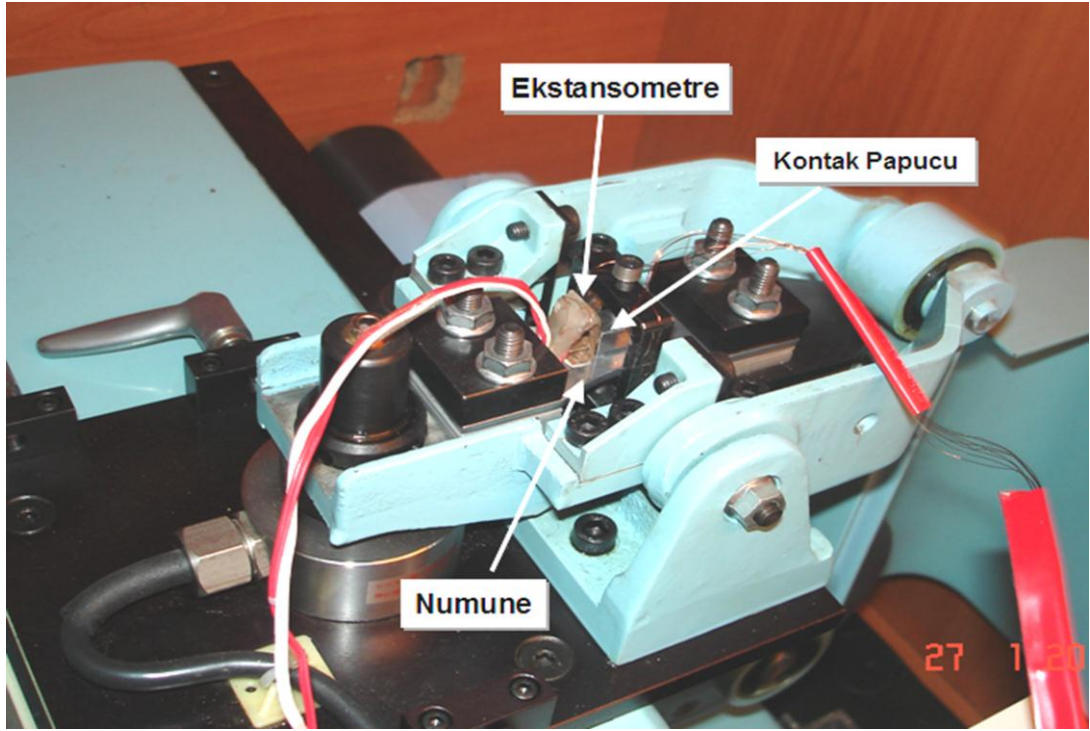


**Şekil 3.3.** Numune-pabuç-ekstansometre bağlantısı ve gerilme durumu şematik çizimi

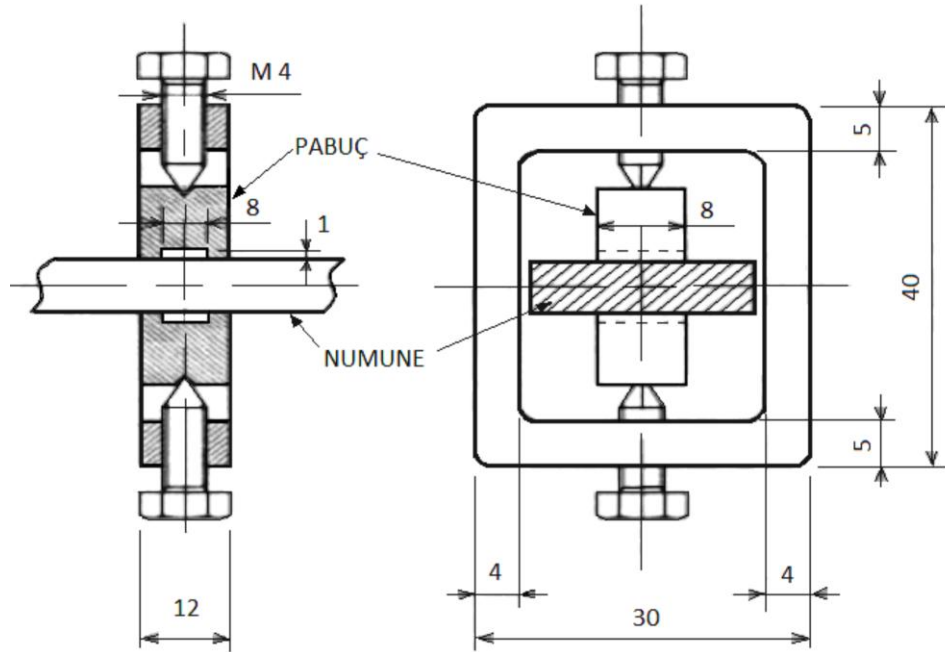
Şekil 3.4’de fotoğraf görüntüleri verilen yük halkası üzerindeki yük ayar vidaları anahtar ile sıkılarak, kontak pabucu ve numune arasındaki sabit ortalama kontak yükü 1920 N olarak ayarlandı. Kontak basıncı ayarlaması, yük hücresi üzerindeki strain-gauge’lerin tam köprü (*full bridge*) şeklinde bağlanarak data-logger cihazı üzerinden bilgisayara aktarılması suretiyle yapıldı.



**Şekil 3.4.** Yük hücresi-numune-pabuç-ekstansometre bağlantısı fotoğraf görüntüleri

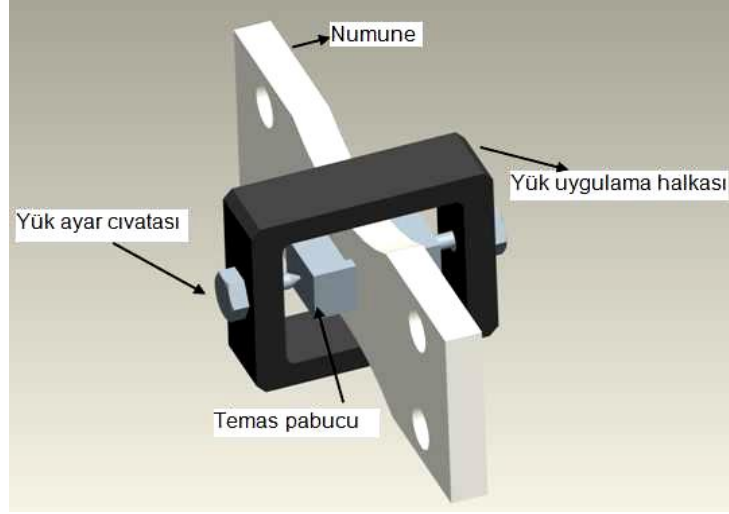


Şekil 3.5. Yorulma Cihazı üzerinde numune-pabuç-ekstansometre bağlantısı fotoğraf görüntüsü



Şekil 3.6. Düzlemsel Eğilmeli yorulma test cihazı için sürtünmeli temas test düzeneği ve teknik detayları (Atasoy 2009)





**Şekil 3.7.** Düzlemsel Eğilmeli yorulma test cihazı için sürtülmeli temas test düzeneğinin üç boyutlu gösterimi (Atasoy 2009)

Numune ve temas pabuçları arasındaki normal temas yükü, “sürtülmeli temas yük hücresi” üzerindeki yük ayar civatası ile sağlanmaktadır. Ortalama temas basıncı, temas pabucunun her bir ayağı için normal temas yükünün, temas alanına bölünmesi ile belirlenmiştir.

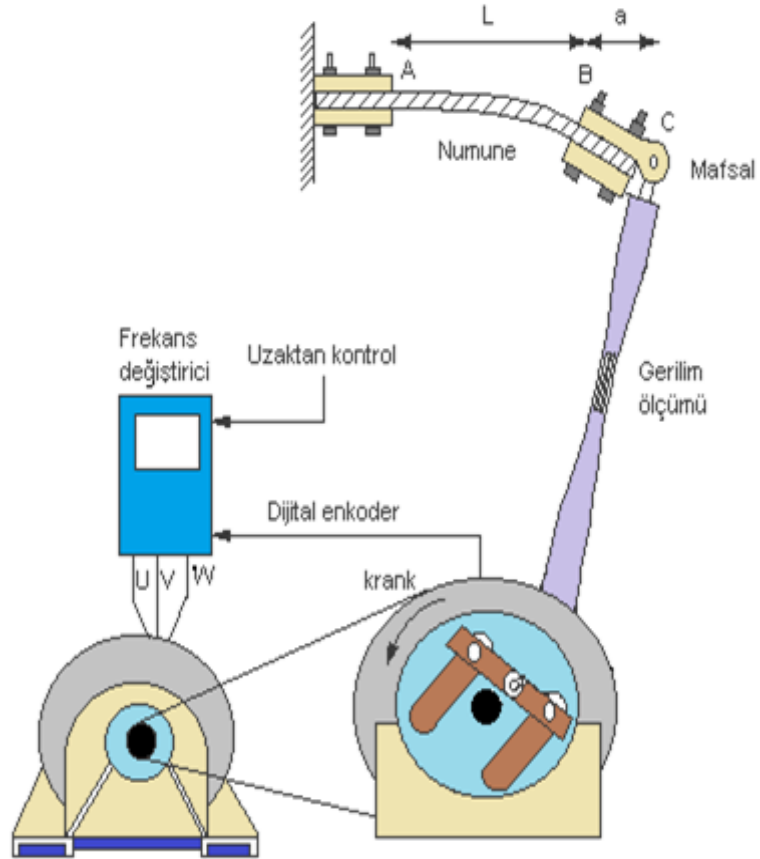
Normal temas yükü, yük ayar civataları ile sağlandı ve bir Wheatstone devresi kullanılarak ölçüldü. Dört adet strain-gauge (uzama ölçer) yük hücresi üzerindeki dört yüzeye, uygulanan normal temas yüküne paralel olarak yapıştırıldı ve yük ayar vidası ile yük uygulama halkası üzerinde oluşturulan elastik şekil değiştirmeleri ölçmek için Wheatstone devresi meydana getirecek bağlantılar oluşturuldu. Şekil değiştirmeye göre yük kalibrasyon eğrisi, yük halkasına standart ağırlıklar uygulanarak elde edildi.

### 3.4. Yorulma Test Cihazı

Bu çalışmadaki fretting yorulma deneyleri, Şekil 3.8’de şematik ve Şekil 3.9’da fotoğraf görüntüsü verilen TOKYO KOKI marka PBF-30 C model tekrarlanan eğilme yorulma test cihazı üzerinden gerçekleştirildi.

### 3.4.1. Tekrarlanan eğilme deney düzeneği

Eğilme yorulma deneyleri daha karmaşık ve bu yüzden daha gerçeğe uygun durumlarda sınırlı elemanı test etmeye izin verdiği için tercih edilir. Makineye sabit olarak bağlanan numunenin bir ucuna krank veya eksantriğe bağlı bir kol yardımıyla değişken yükleme yapılır. 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 (frettingsiz yorulma için) numunelerin servis sırasında kullanılan doğal halleriyle denenmesi mümkündür. Eksantrik mile bağlı kolun uzunluğunun ayarlanmasıyla sabit ve alternatif yüklerin çeşitli kombinasyonları uygulanabilir.



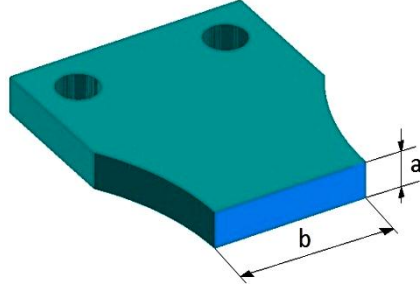
Şekil 3.8. Tekrarlanan eğilme test sisteminin şematik çizimi

Krank yarım devir döndüğünde tarafsız eksenin üzerindeki liflerdeki gerilmeler, basıdan eşit yoğunlukta çekiye çevrilir. Çevrim tamamlandığında gerilmeler tekrarlanır. Böylece bir tam çevrim süresince, test numunesi tam bir dalgalı gerilme çevriminden geçmiş olur.



**Şekil 3.9.** Fretting test sistemli düz eğilmeli yorulma test ünitesinin fotoğraf görüntüsü.

Fretting yorulma testleri 1920 N sabit ortalama temas yükü ile gerçekleştirildi. Test numuneleri yorulma cihazına bağlandıktan sonra farklı eğme momentleri altında teste tabi tutuldular. Yorulma cihazının krankı üzerinden eksantriklik manuel olarak ayarlanarak eğme momenti değeri ayarlandı. Numune üzerinde uygulanmak istenen gerilme değerini ayarlamak için aşağıdaki 4.1 bağıntısı kullanıldı.



**Şekil 3.10.** Gerilmeye maruz kalan numune kesiti alanı

$$S = \sigma_e = \frac{M_e}{W_e} \quad W_e = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_e = \sigma_e \cdot W_e \dots \dots \dots (4.1)$$

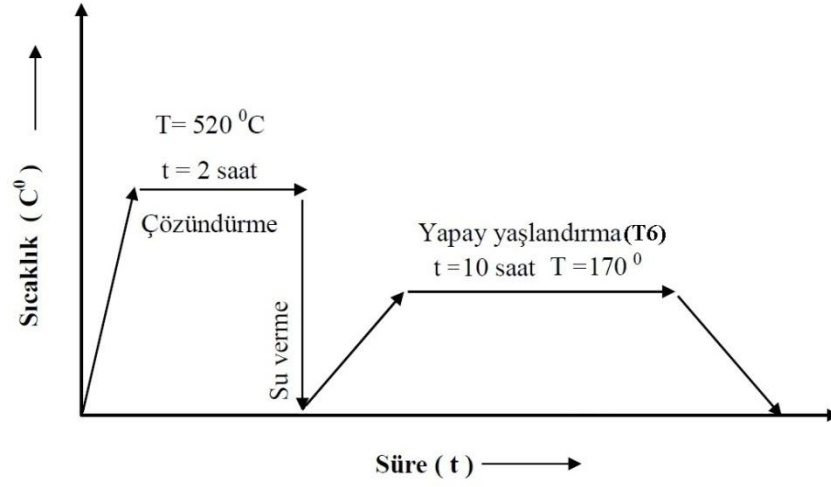
$M_e$  : Eğilme momenti (N.m)

$\sigma_e$  : Eğilme gerilmesi (MPa)

$W_e$  : Direnç momenti (mm<sup>3</sup>)

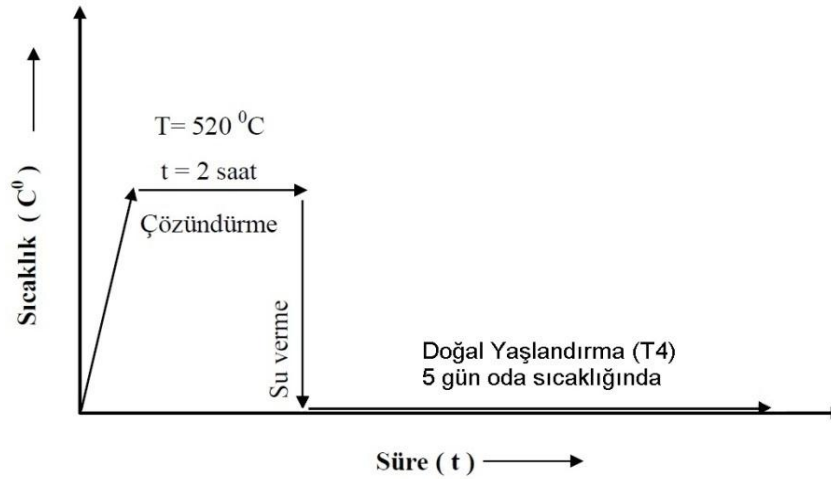
### 3.5. Deneysel İşlemler

Deneysel işlemlerde işlemsiz, T6 suni yaşlandırılmış ve T4 doğal yaşlandırılmış toplam üç grup numune kullanıldı. Bu araştırmada bakırca zengin 2014 alüminyum alaşımı kullanıldı. Alaşımın kimyasal kompozisyonu (ağırlık yüzdesi olarak) 5,0 Cu, 0,64 Mg, 0,75 Mn, 0,98 Si, 0,37 Fe, 0,01 Cr, 0,09 Zn ve Alüminyum'dan oluşmaktadır. Şekil 4.12, uygulanan T6 ısıl işlemin işlem koşullarını şematik olarak göstermektedir. Burada numuneler 520°C'de 2 saat süreyle çözeltiliye alındıktan sonra, suda hızla soğutuldu (fırından alınan numunelerin su ile teması için geçen süre maksimum 10 sn). Daha sonra 170 °C'deki fırında 10 saat bekletilerek suni (yapay) olarak yaşlandırıldı (T6 şartına bağlı kalarak).



**Şekil 3.11.** Suni yaşlandırma prosesi (T6) nin şematik diyagramı.

T4 doğal yaşlandırmada ise yine bir kısım numune alınarak 520°C'de 2 saat süreyle çözeltilmeye alındı. Daha sonra bu sıcaklıkta ki numuneler fırından alındıktan hemen sonra su verme yolu ile ani olarak soğutuldu ve minimum 5 gün süre ile doğal olarak normal şartlar altında yaşlandırıldı.



**Şekil 3.12.** Doğal yaşlandırma prosesi (T4) nin şematik diyagramı.

Numunelerin tüm yüzeyleri 800–1200'lük SiC zımpara kâğıtları ile parlatılarak pürüz ve çentiklerden iyici arındırıldı. Daha sonra, aseton kullanılarak ultrasonik temizleme

cihazında temizlendi. Köprü tipi düz temas yüzeyine sahip pabuçlar, AISI 1045 çelik malzemedен üretilmiştir. Pabuçların temas yüzeyleri, 800–1200'lük SiC zımpara kâğıtları ve ardından alümina ile parlatıldıktan sonra asetonla temizlendiler.

Kırılma yüzeylerini ve fretting izlerini (*scar*) görüntülemek için Şekil 3.13'de görülen Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), ve ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) parametresini belirlemek için yüzey pürüzlülük test cihazı (profilometre) kullanıldı. Sertliklerin ölçümünde Şekil 3.14'deki PC kontrollü Beuhler-Omnimet Vickers sertlik cihazı kullanıldı. Vickers sertlikleri, her bir numune üzerinden 8 farklı noktadan alınan değerlerin ortalaması ile hesaplandı.



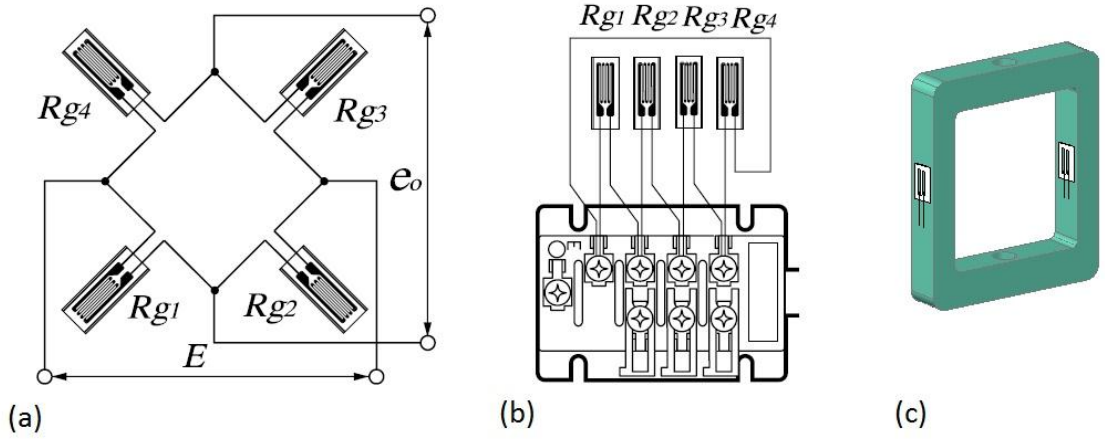
**Şekil 3.13.** Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)



**Şekil 3.14.** PC kontrollü Beuhler-Omnimet Vickers sertlik ölçme cihazı

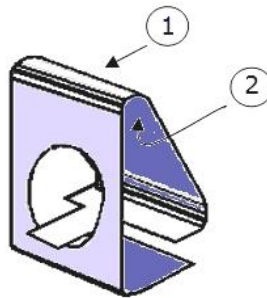
Fretting yorulma testleri atmosfere açık ortamda, Schenk tipi test cihazı (Kapasite=  $\pm 30$  Nm) ile gerilme oranı  $R = -1$  (tam değişken yükleme) için yapıldı. Fretting yorulma test sistemi, Şekil 3.3'de gösterildiği gibi dikdörtgen tipi yükleme hücresi ve köprü tipi temas pabuçları kullanılarak düzlem-üstü-düzlem (*flat-on-flat*) teması esasına göre tasarlanıp üretildi.

Yorulma numunesi, fretting test cihazına bağlandıktan sonra düzlemsel eğilmeli yorulma test makinesinde dinamik olarak yüklendi. Normal (kontak) yükü bir yük ayar vidası ile ayarlanarak, değeri Şekil 3.15.(a)'da görüldüğü gibi oluşturulan bir Wheatstone köprüsü vasıtasıyla tespit edildi. Şekil 3.15.(c)'de görülen dikdörtgen şeklindeki yükleme hücresi üzerine 4 adet strain-gage bağlanarak, bir Wheatstone köprüsü oluşturuldu. Böylece yük ayar vidası üzerinde, yükleme hücresine oluşturulan elastik şekil değiştirme değerleri okunarak yük-gerilme kalibrasyon eğrisi elde edildi.



**Şekil 3.15.** Wheatstone köprüsü kurulumu (a) Wheatstone şeması (b) data-logger cihazı üzerinde bağlantı şeması (c) Yük hücresi üzerinde strain-gage'lerin durumu (4 adet)

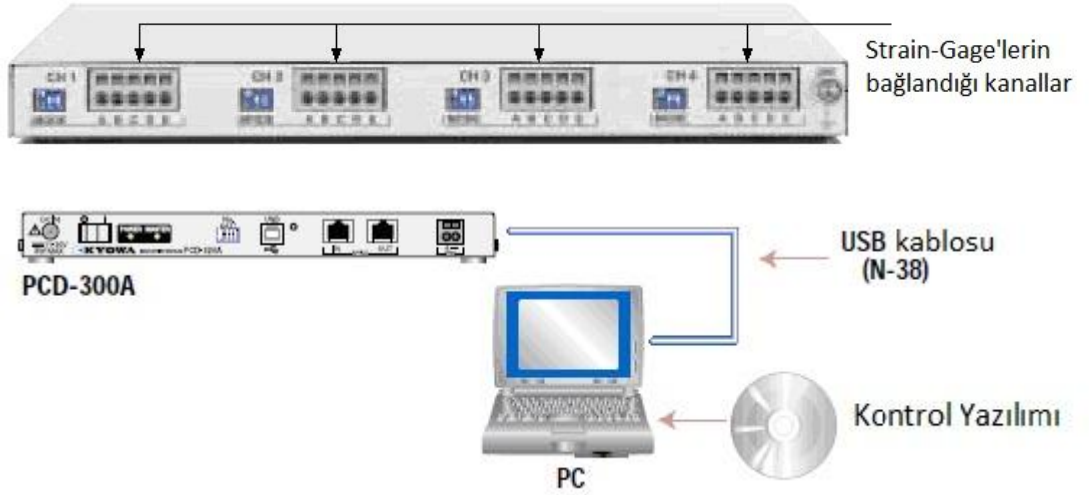
Relatif kayma ise, Şekil 3.3'de kurulumu şematik olarak gösterilen ekstansometre yardımıyla ölçüldü. Şekil 3.16'de gösterilen ekstansometre, yükleme hücresinde olduğu gibi üzerine 4 adet strain-gage'in bir Wheatstone köprüsü oluşturacak şekilde bağlanması ile hazır hale getirildi. Numune üzerindeki pabuca temas halinde çalışacak olan bu eleman üzerindeki strain-gageler vasıtasıyla titreşim esnasında meydana gelen çeki-bası gerilmelerine bağlı meydana gelen veriler data-logger cihazı üzerinden bilgisayara aktarıldı. Relatif kayma genlikleri, test süresince sürekli olarak bir PC tarafından kaydedildi ve sonra elde edilen veriler analiz edildi.



**Şekil 3.16.** Relatif kaymayı ölçen cihaz (Ekstansometre) 1 numaralı yüzeyde iki adet ve 2 numaralı iç yüzeyde iki adet olmak üzere toplam 4 adet strain-gage bağlı.



Ekstansometre ve yük hücresi bağlantıları Şekil 3.17’de kurulum şeması gösterilen Data-logger cihazı üzerindeki uygun kanallara Şekil 3.15.(b)’de ki gibi tam köprü (*full-bridge*) oluşturacak şekilde bağlandı. Cihaz yine Şekil 3.17’de gösterildiği gibi bilgisayara bir USB kablosu üzerinden bağlanarak aktif hale getirildi.



**Şekil 3.17.** Data-logger cihazı kurulum şeması.

Bir yorulma numunesi, ne zaman ki bir dinamik gerilme yüklemesine maruz kalsa, kontak pabuçları ile yorulma numunesi arasında fretting olayı gerçekleşir. Bu çalışmadaki tüm testlerde, aynı özellik ve boyutta fretting pabuçları kullanıldı. Fretting yorulma testi süresince, numune ve pabuçlar arasındaki relatif kayma değerleri yukarıdaki veri okuma sistemi (*data-logger*) aracılığıyla bilgisayara kaydedildi.

### 3.5.1. Ekstansometre kalibrasyon işlemi

Şekil 3.16’de gösterildiği üzere Ekstansometre üzerine dört adet strain-gage yapıştırılarak bir Wheatstone köprüsü oluşturuldu. Bu devre, veri okuyucu cihazımız PCD-300 data-logger üzerine tam köprü şeklinde bağlandı. Data-logger ile bilgisayar bağlantısı oluşturuldu. Kontrol yazılımı çalıştırıldı. Ekstansometre dilinin mikrometre yardımıyla belirli miktarlarda ötelenerek bilgisayar ekranındaki grafik üzerinden okunan

birim Şekil değiştirmeler kaydedildi ve kalibrasyon iÇin yŐk- Şekil değiştirme eğrisi elde edildi. Fretting yorulma deneyleri sŐuresince ekstansometre'nin bilgisayara aktardığı yer değiştirme değerleri, "yŐk-yer değiştirme kalibrasyon eğrisi" yardımıyla dŐnŐŐtŐrŐlerek relatif kayma değerleri belirlendi.

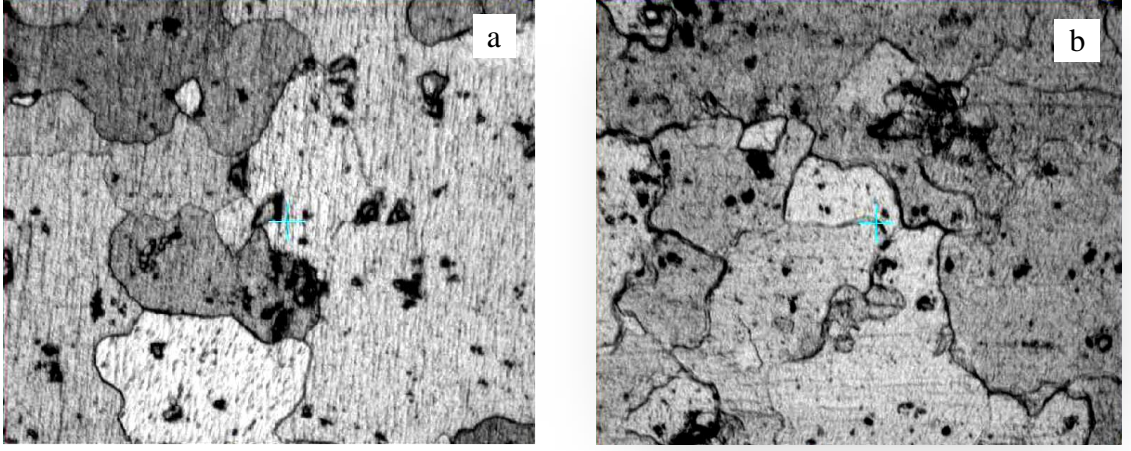
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere, bakırın alüminyum içerisinde çözünmesi sebebi ile sertlik değeri artmıştır. Bu çalışmada kullanılan 2014 Alüminyum alaşımında bakır, çökelmeye sebep olan elementtir. Su verme sırasında bakır çözelti içinde hapsolür. Böylece, alüminyumun zengin fazı ( $\alpha$ ) oda sıcaklığında içerisinde bakır barındıran aşırı doymuş bir katı çözelti haline dönüşür. Yaşlandırma esnasında  $\text{CuAl}_2$  partikülleri çözelti içerisinde çökeltirler. Böylece, alaşımın sertlik değerleri yaşlandırma şartlarına bağlı olarak artar.

**Çizelge 4.1.** Yaşlandırılmış numunelerin ölçülen sertlik değerleri

<u>Koşul</u>	<u>Sertlik ( HV )</u>
İşlemsiz 2014 Al Alaşımı (F)	110
T4 Isıl İşlem Koşulu	130
T6 Isıl İşlem Koşulu	180

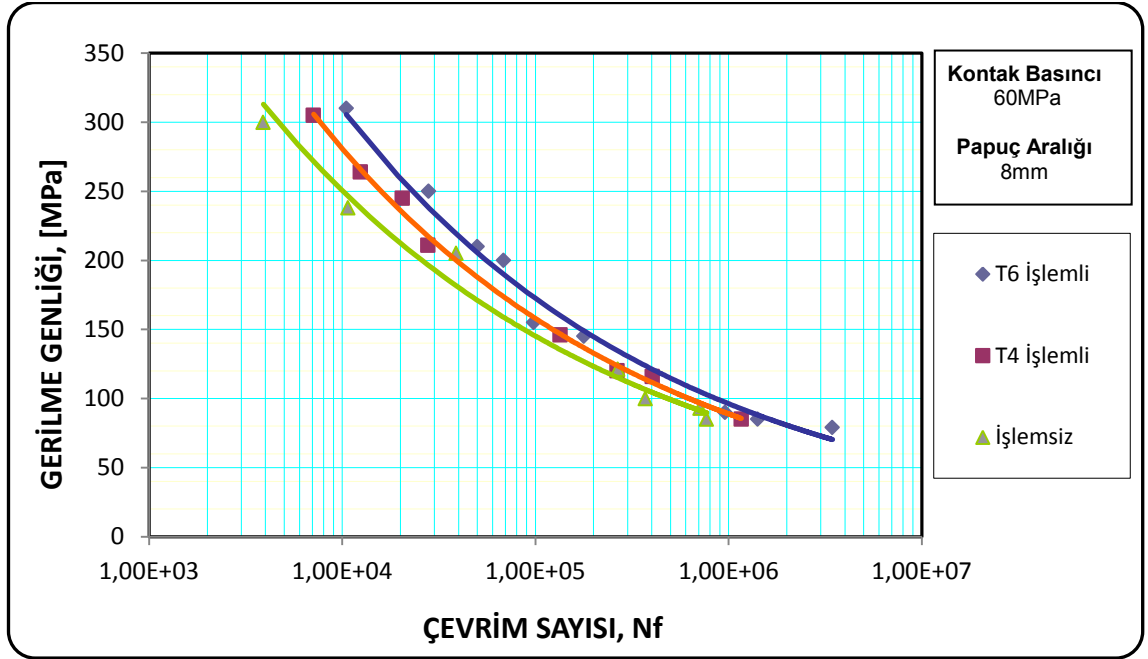
Metalografik muayene için, numune yüzeyleri SiC zımpara kâğıtları ile 1200 gride kadar zımparalandıktan sonra, son parlatma işlemi olarak alümina uygulanarak yüzey işlemi tamamlandı. Ultrasonik yöntemle temizlendikten sonra numuneler Keller reaktifi (2 ml HF+3 ml HCl+ 5 ml  $\text{HNO}_3$ +190 ml saf su) ile 10 sn. süre ile dağlandı. Bu işlemlerden sonra, farklı yaşlandırma işlemleri uygulanmış numunelerin mikro yapıları optik mikroskop altında incelendi. Şekil 4.1’de yaşlandırılmış numunelere ait mikro yapı görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 4.1.** Numunelerin mikro yapıları: (a) Doğal yaşlandırılmış numune (T4), (b) Suni yaşlandırılmış numune (T6)

Metalografik incelemede, yapı içerisine dağılmış  $\text{CuAl}_2$  fazı farklı kontrastta görülmektedir. Yapı, katı çözeltili matrisi içinde ağırlıklı olarak koyu renkte, çözünmeyen partiküllerden oluşan Fe, Mn, Si, Al karışımından ve az miktarda  $\text{CuAl}_2$  (beyaz renkte) faz partiküllerinden oluşmaktadır. Yaşlandırma işleminde, katı çözeltili içinde  $\text{CuAl}_2$  partiküllerinin oluştuğu ve çöktükleri görülmüştür.

Farklı yaşlandırma şartları ile elde edilen 2014-T4 ve 2014-T6 alüminyum alaşımı ve işlemsiz F-2014 Alüminyum alaşımı numuneler için elde edilen fretting yorulma test sonuçları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Grafikteki eğriler, her gerilme genlik değerinde tek bir test yapılarak elde edilmiştir.

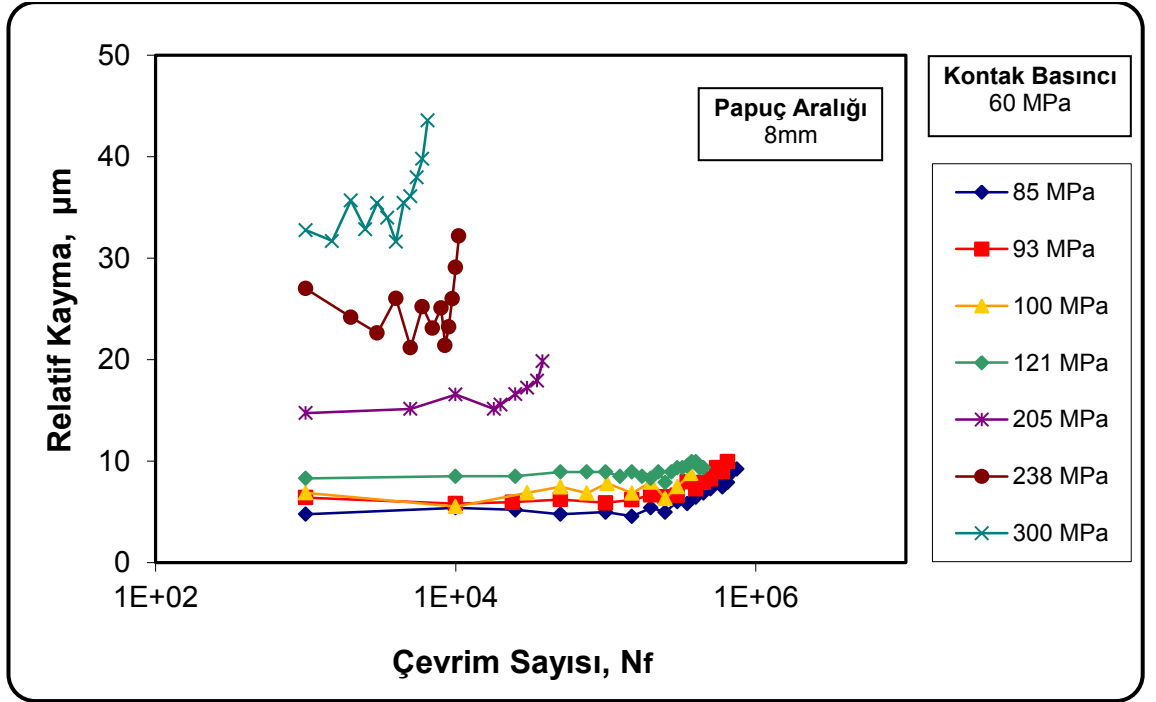


**Şekil 4.2.** Yaşlandırılmış (T4 ve T6) ve işlemsiz 2014 Al alaşımı numunelerin fretting yorulma testlerinin karşılaştırması.

Eğriler karşılaştırıldığında, T6 ısı işlem şartının özellikle yüksek gerilme genliklerinde, fretting yorulma hasarına karşı iyi bir direnç gösterdiği söylenebilir. Örneğin, 300 MPa gerilme genliğinde işlemsiz numunelerle karşılaştırıldığında, fretting yorulma ömrü üzerinde T6 ve T4 ısı işlemlerinin olumlu etkisi olduğu çok açıktır. Diğer taraftan, T6 ısı işlem koşulunun T4 ısı işlem koşuluna göre, fretting yorulma ömrü üzerinde daha olumlu etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. T6 ısı işlemi koşulunun fretting yorulma ömrü üzerindeki söz konusu bu olumlu etkisi, özellikle yüksek gerilme genliklerine çıktıkça daha da netleşmektedir. Düşük gerilme genliklerinde ise, her üç durum için elde edilen fretting yorulma ömürleri arasındaki farkın giderek azaldığı ve birbirlerine yaklaştığı görülmüştür.

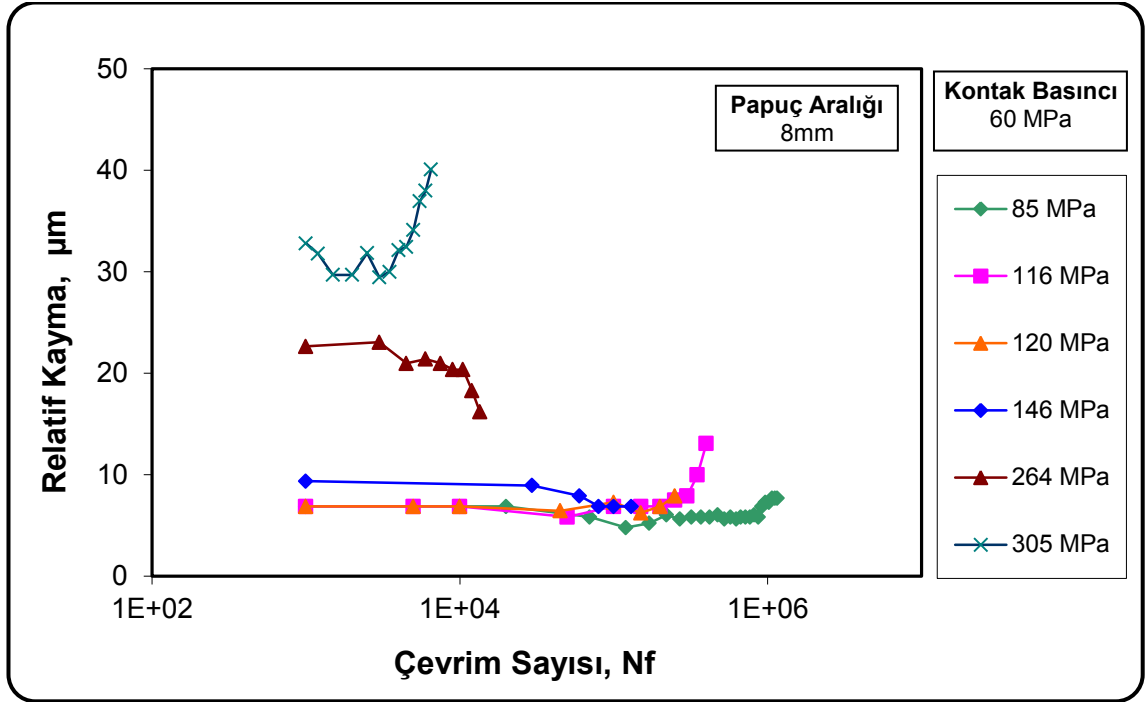
Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 çeşitli gerilme genliği değerlerinde elde edilen çevrim sayıları ile relatif kayma genliklerindeki değişimi göstermektedir. Test süresince relatif kayma genliklerinin sabit olmadığı tespit edilmiştir. Düşük gerilme genliklerinde relatif kaymaların daha küçük iniş-çıkışlarla test sürecini tamamladığı görülürken yüksek

gerilme genliklerinde bu iniş-çıkışların daha belirgin olduğu görülmektedir. Testlerin tamamı tam kırılma elde edilene dek devam ettirildi. “Relatif Kayma-Çevrim Sayısı” grafiklerine bakıldığında fretting çevrim sayılarının sonlarına doğru eğrilerin genellikle yukarı yönlendiği görülmektedir. Bu durum, yorulma ömrünü tamamlamak üzere olan numunelerde çatlakların giderek büyümesi ve yapıya hakim olması, dolayısıyla malzemenin aşırı derecede zayıflaması şeklinde açıklanabilir. Yüksek gerilme genliklerinde kuvvet kolundan dolayı sehimin fazla oluşu, düşük gerilme genliklerinde ise az oluşu bu yükselmeler arasındaki farklılığı açıklamaktadır.



**Şekil 4.3.** İşlemsiz 2014 Al alaşımı (F)’de relatif kayma genliğinin fretting çevrim sayısı ile değişimi

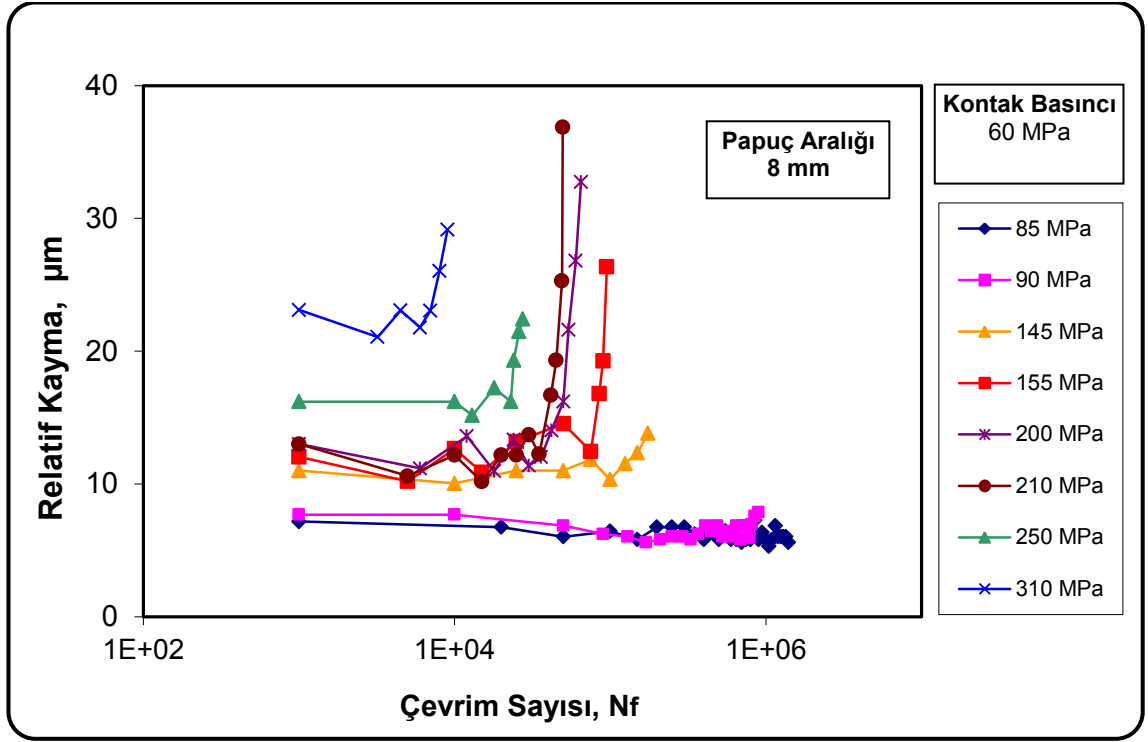
İşlemsiz numunelerle yürütülen testler sonucu elde edilen relatif kayma değerleri Ek 1 Çizelge 1’de verilmektedir.



**Şekil 4.4.** Doğal yaşlandırılmış 2014 Al alaşımı (T4)'de relatif kayma genliğinin fretting çevrim sayısı ile değişimi.

Doğal Yaşlandırılmış numunelerle yürütülen testler sonucu elde edilen relatif kayma değerleri Ek 1 Çizelge 3'de verilmektedir.

Şekil 4.4 incelendiğinde düşük gerilme genliklerinde relatif kayma değerleri 5-10µm seviyelerinde seyrederken çevrimin sonlarına doğru kırılma noktasına erişinceye dek yükselerek 10-15µm seviyelerine ulaşmaktadır. Aslında bu olay tüm test süresince genel olarak bütün numunelerde gözlemlendi. Çok nadir de olsa bazı numunelerde, Şekil 4.4'de 264 MPa gerilme genliğinde olduğu gibi anlam veremediğimiz bir şekilde aşağı yönde olmuştur. Daha önce de değindiğimiz gibi relatif kaymanın bu yükselişi, aslında çevrimin sonlarına doğru zayıflayan numunenin temas bölgesinde fazlaca esnemesi sonucu meydana gelmektedir.

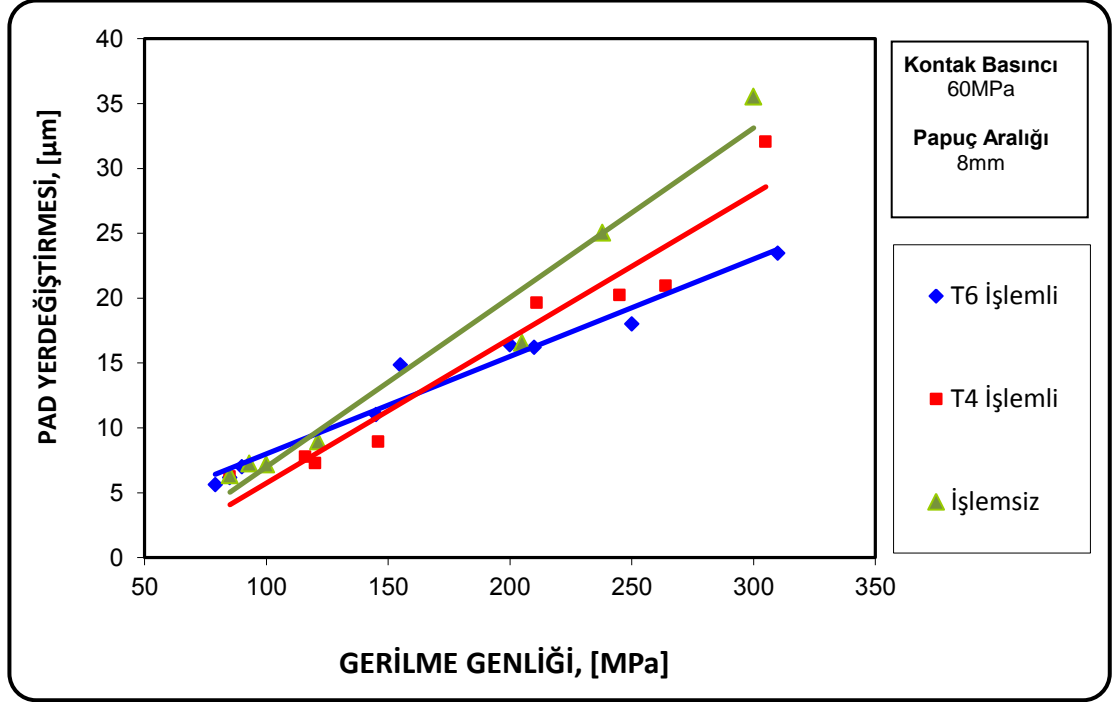


**Şekil 4.5.** Suni yaşlandırılmış 2014 Al alaşımı (T6)'de bağıl (relatif) kayma genliğinin fretting çevrim sayısı ile değişimi.

Suni yaşlandırılmış numunelerle yürütülen testler sonucu elde edilen relatif kayma değerleri Ek 1 Çizelge 4'de verilmektedir.

Relatif kayma genliği üzerinde çeşitli ısıl işlem koşullarının etkisi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, çalışılan tüm şartlar (F-T4-T6) için uygulanan gerilme genliği değerlerinde relatif kayma değerlerinin arttığı görülmektedir. Düşük gerilme genliğinde, her üç şart için relatif kayma değerleri arasında önemli bir farkın olmadığı açıktır.

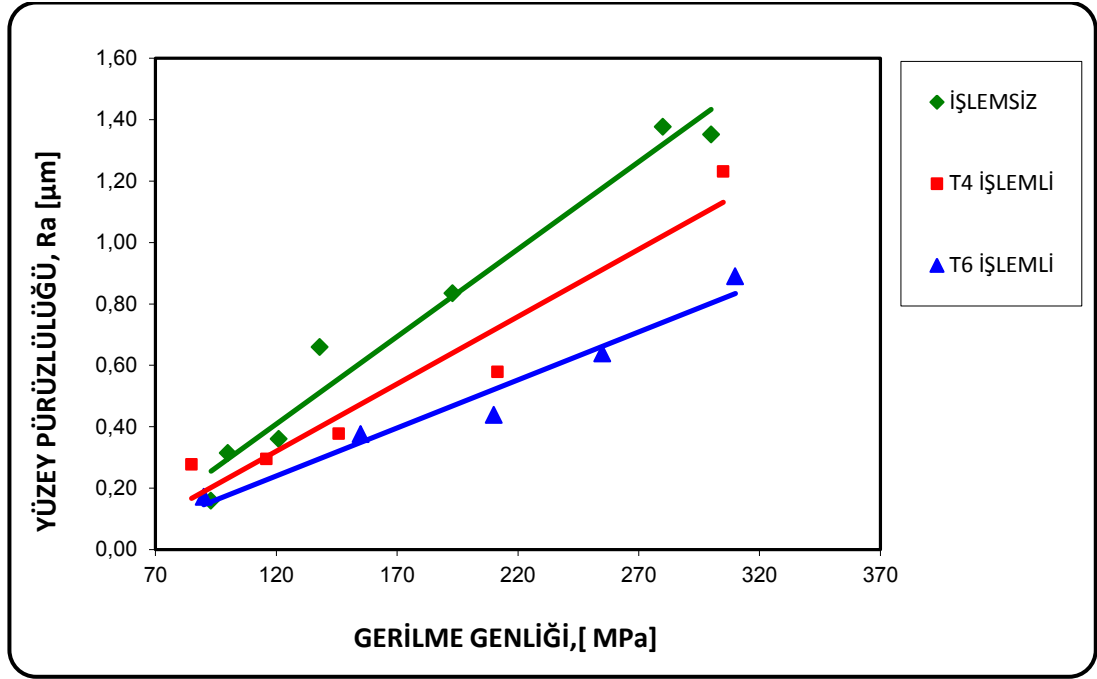




Şekil 4.6. Gerilme genliği-Relatif kayma genliği değişimi.

Şekil 4.6 incelendiğinde uygulanan gerilme genlikleri artırıldığı zaman, T6 ısıl işlem koşulu için daha düşük relatif kayma genlik değerleri elde edildiği görülmektedir. T4 ve T6 ısıl işlem görmüş numunelerle karşılaştırıldığında, işlemsiz 2014 Alüminyum alaşımı numuneler için daha büyük relatif kayma genlik değerleri belirlenmiştir.

İşlemsiz numunelerde relatif kayma değerlerinin yüksek oluşu aşınma kalıntılarının bu numuneler için fazla olduğunu gösterir. Dolayısıyla yüzeyden fazlaca ayrılan malzeme nedeniyle işlemsiz numunelerle yapılan test süresince temas basınçlarının test tamamlanana dek düşüş gösterdiği söylenebilir. T6 numunelere bakıldığında aşınma debriserinin daha az oluştuğu gözlenmiştir. Bunun sebebi ise relatif kayma genliği değerlerinin bu grup numunelerde düşük seyretmesindedir. Aşınmaların hacim artışı göz önüne alındığında bunun fretting yorulma ömrü üzerine etkisi olumsuz olacaktır (Endo and Marui 2002). Bu etken de yorulma ömürlerindeki farkın bir faktörü olarak değerlendirilebilir.



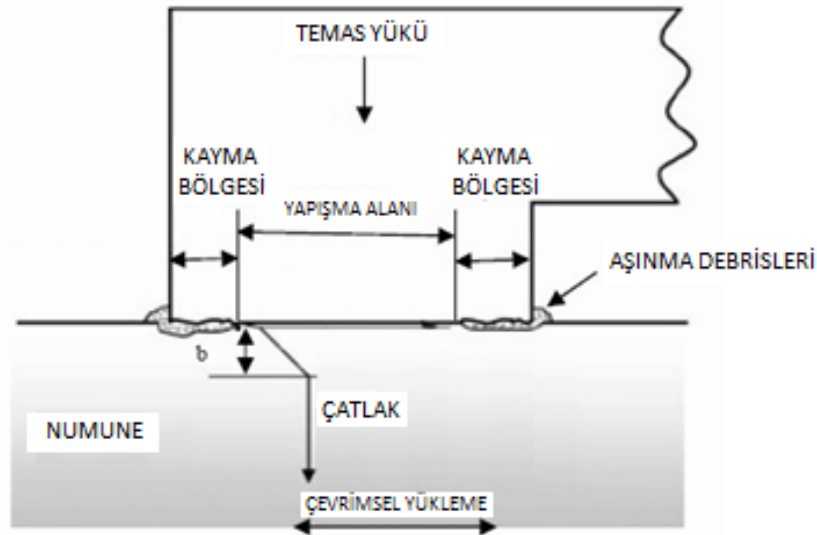
**Şekil 4.7.** Uygulanan gerilme genliği seviyeleri ile fretting izi (scar) üzerinden ölçülmüş olan ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) ilişkisi.

Şekil 4.7, ortalama yüzey pürüzlülüğü parametresi ( $R_a$ ) ile gerilme genliği arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Gerilme genliği arttıkça,  $R_a$  değerinin arttığı görülmektedir.  $R_a$  değerinin artışı fretting hasarı üzerinde negatif bir etkiye sebep olabilir. Bu çalışmada kullanılan tüm şartlar için fretting yorulma deformasyonundan önce, yüzey pürüzlülük değerleri aynı kalmıştır. Ancak deformasyondan dolayı, yüzey pürüzlülük değerleri işlemsiz ve T4 numunelerde T6'ya göre daha fazla olmuştur.

Literatürde (Li *et al.* 2000), yüzey pürüzlülüğünün fretting yorulma ömrü üzerinde faydalı etkisinin olduğu belirtilmiştir. Şekil 4.2.'te görüldüğü üzere, bu olumlu etki bu çalışmada tespit edilememiştir. Fretting yorulma ömrünü geliştirmede, mikro yapı veya diğer faktörler, belki yüzey pürüzlülüğünden daha fazla etkin olmuş olabilirler.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.6 beraber değerlendirildiğinde, relatif kayma genliği ile fretting yorulma ömrü arasında dikkate değer bir ilişkinin olduğu söylenebilir. Diğer taraftan, fretting yorulma hasarı kontak basıncı ve kontak pabucu ile yorulma numunesi

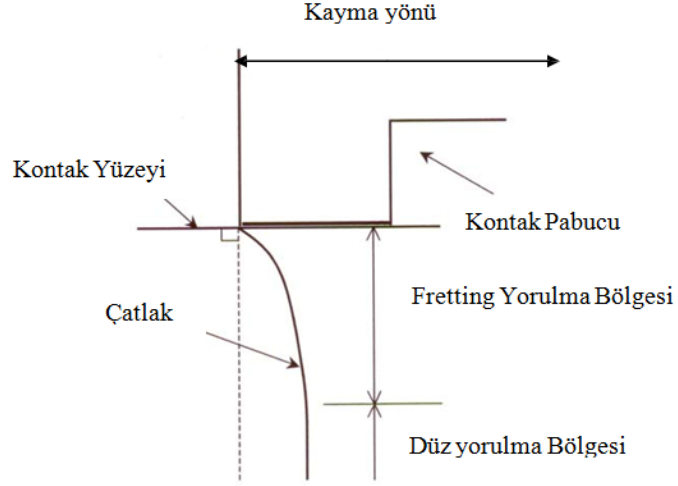
arasındaki relatif kayma genliğine bağlı olduğu, numuneye uygulanan gerilme genliğine direkt olarak bağlı olmadığı bilinmektedir (Nakazawa *et al.* 1994). Relatif kayma genliği değerinin azalmasının fretting yorulma ömrünün iyileştirilmesinde etkili olduğu açıktır. Bu yüzden, T6 ısıl işlemde özellikle yüksek gerilme genliklerinde daha büyük yorulma ömürleri elde edildi. T6 numunelerde gözlenen düşük relatif kayma genliği değerleri, T6 numunelerin T4 ve işlemsiz numunelerden daha kararlı bir mikro yapıya ve daha yüksek yüzey sertliğine sahip olmasının bir sonucu olabilir. T4 ve işlemsiz koşullarla mukayese edildiğinde, fretting yorulma çatlaklarının çekirdeklenmesi ve oluşumuna karşı T6 ısıl işlem koşulunun daha yüksek bir dirence sahip olduğu söylenebilir.



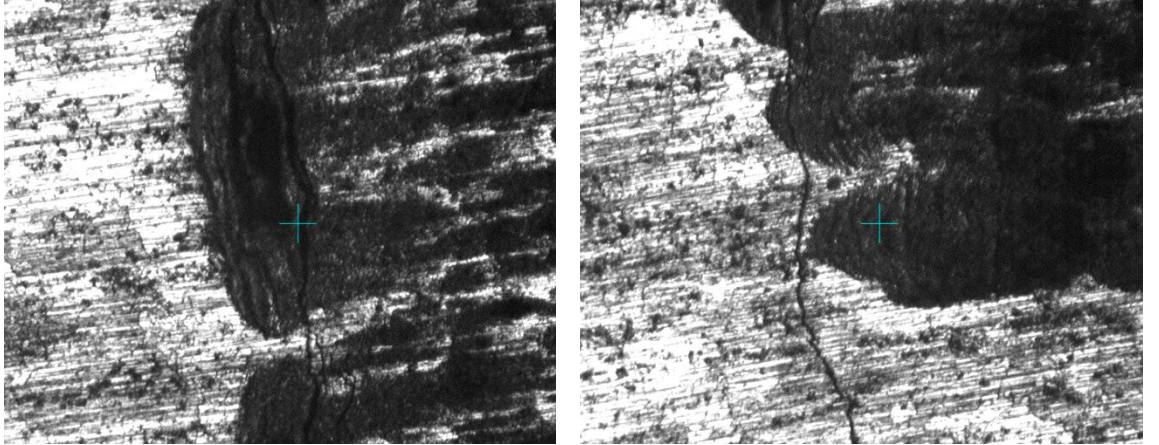
**Şekil.4.8.** Fretting hasarının oluşumunu gösteren modelin şematik çizimi. b: çatlak başlangıç bölgesinin derinliği

Deneysel çalışmalarda yürüttüğümüz tüm çevrimler tam kırılma ile sonuçlandırıldı. Bütün numuneler Şekil 4.9'da görüldüğü gibi temas alanının dış kenar kısmının tam altından kırıldı. Kontak yüzeyinde sürtünme kayma gerilmesinin lokal olarak yoğunlaştığı bölgede, fretting yorulma çatlaklarının oluştuğu ifade edilmektedir. Bu yüzden, fretting hasarının sebep olduğu yorulma ömründeki azalma, fretting'in sebep olduğu lokal gerilme konsantrasyonunun meydana getirdiği çatlak başlama ömründeki azalmanın sonucudur diye kabul edilir (Sumita *et al.* 1993). Fretting ile oluşan ilk

çatlağı hızlandıran temel mekanizmalardan biri de, aşınma debris'lerinin küçük fretting çatlaklarının arasına sıkışmasının sonucu olan kenar etkisidir (Antoniou and Radtke 1997). Tüm test şartlarında aşınmanın etkisi ile bu kenar etkisi gözlemlenmiştir.



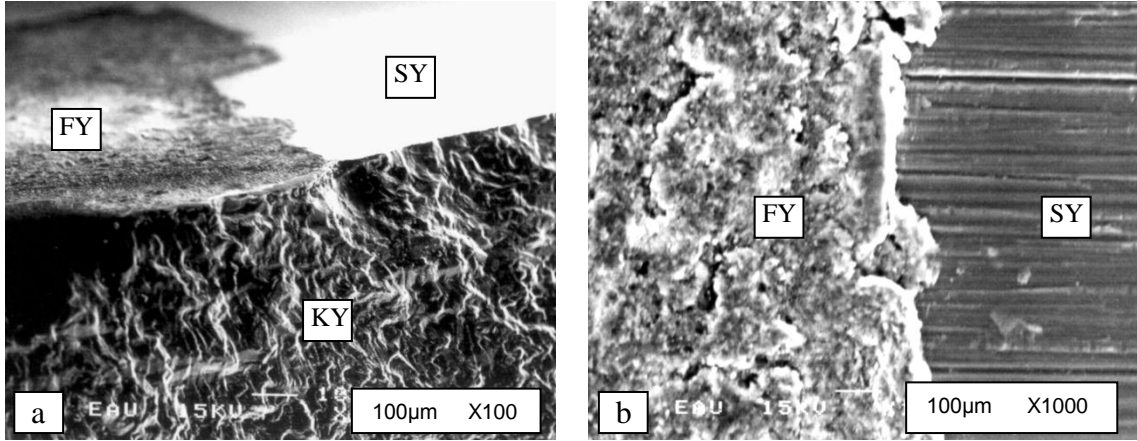
**Şekil 4.9.** Fretting yorulmasında çatlağın yayılma safhalarının şematik gösterimi (Şengül 2006)



**Şekil.4.10.** Fretting alanında temas alanının dış kenarında meydana gelen çatlak görüntüsü

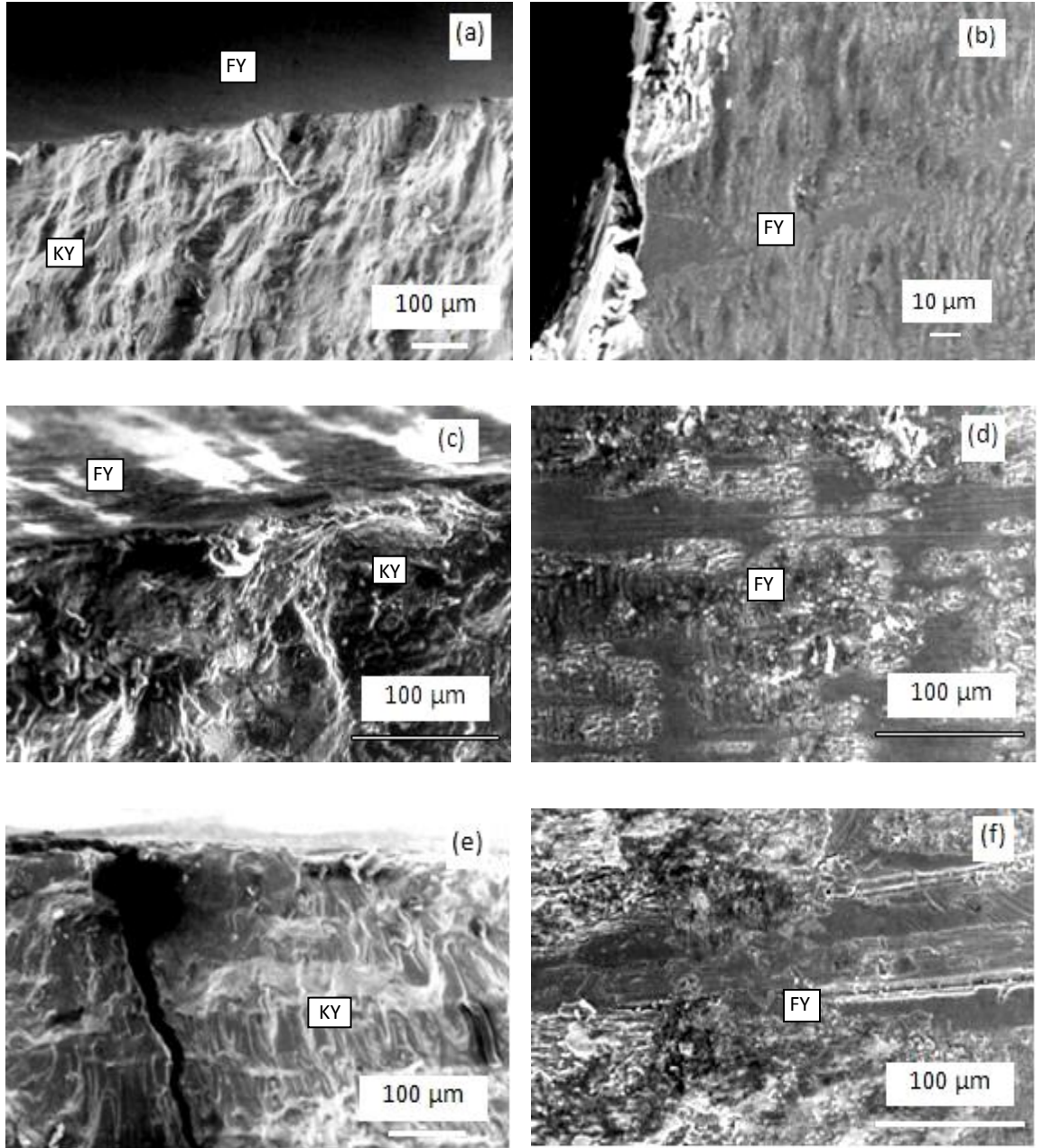
Şekil 4.10, 210 MPa gerilme genliğinde çevrimi tamamlayan T6 numuneye ait optik görüntüdür. Çatlak, Şekil 4.9'daki şematik gösterime uygun şekilde tam temas alanı dış kenarında pabuç ayağının altında oluşmuştur.

Şekil 4.11 incelendiğinde mikro çatlakların pabuç temas kenarının hemen altında olduğu görülmektedir. Temas basıncı 60 MPa gibi düşük bir seviyede olduğundan fretting izlerinde Şekil 4.8'in aksine ağırlıklı olarak kayma bandının geniş olduğu gözlemlendi. İşlemsiz numunelerin fretting yüzeylerinde görülen aşınmanın T4 ve T6 numunelere göre daha fazla olduğu Şekil 4.10.a'da net olarak görülmektedir. Bu aşınmaların içbükey kavis oluşturacak şekilde bir yapı sergiledikleri de görüldü. Aşınmaların işlemsiz numunelerde fazla oluşu meydana gelen kalıntıların fretting yüzeyinde oluşan mikro çatlaklara girerek hasarı hızlandırdığı tespit edildi. Bu kalıntıların yüzeyden uzaklaşması kontak basıncını düşürürken yorulma ömründe iyileşmeye sebep olmaktadır. Fakat işlemsiz numunelerdeki bu avantaja rağmen fretting ömründe T4 ve T6 numunelerden daha iyi olamamaktadır. Bunda diğer faktörlerin rol oynadığı açıktır (relatif kayma genliğinin yüksek oluşu, mikro yapı vb.)



**Şekil.4.11.** 300 MPa Gerilme genliğinde İşlemsiz 2014 Alüminyum alaşımı numuneye ait a). kırılma ve b).fretting izlerinin SEM görüntüleri. [FY: Fretting yüzeyi, KY:Kırılma Yüzeyi, SY: Serbest Yüzey]

Diğer taraftan, düşük gerilme genliklerinde relatif kayma genliği değerleri birbirine yaklaştığı için, fretting yorulma ömürleri hemen hemen aynı kalmaktadır. Relatif kayma değerleri arasındaki küçük fark, değişik yüzey sertlik değerlerine sahip olmalarının bir sonucu olabilir. Şekil 4.12, farklı ısıl işlem koşulları için düzlemsel eğme yorulması altında test edilen numunelere ait kırılma ve fretting izlerinin (*scar*) SEM görüntülerini göstermektedir.



**Şekil 4.12.** (a-b) 150 MPa gerilme genliği altında, işlemsiz 2014 Al alaşımı numuneye ait kırılma ve fretting izlerinin SEM görüntüleri; (c-d) 150 MPa gerilme genliği altında T4 ısıtma işlemine tabii numunelerin, kırılma ve fretting izlerinin SEM görüntüleri; (e-f) 210 MPa gerilme genliği altında T6 ısıtma işlemine tabii numunelerin, kırılma ve fretting izlerinin SEM görüntüleri. (KY: Kırık Yüzeyi, FY: Fretting yüzeyi)

Yorulma çatlakları, fretting kaynaklı gerilim yoğunluğuna bağlı olarak numunelerin temas bölgelerinde başlamaktadır. Çoklu çatlak başlangıçları temas bölgelerinde tespit edildi (Şekil 4.11. a,c,e). T6 numunelerde temas bölgelerinde çok az katmanlaşma vardı. Diğer taraftan, birbiri ile kontak halinde olan farklı malzemelerin temas bölgelerinde korozyonu artıran potansiyel elektrik oluşumu söz konusudur. Ancak bu çalışmada, temas bölgelerinde hiçbir korozyon çukuruna (pit) rastlanmadı.

## 5. SONUÇLAR

Çeşitli ısıtıl işlem şartlarında 2014 Al alaşımı numuneler fretting yorulma testlerine tabii tutuldu. Mevcut çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edildi:

- 1- Gerilme genliği arttıkça relatif kayma değerleri artmaktadır.
- 2- Özellikle yüksek gerilme genliklerinde, fretting yorulma ömrü üzerinde relatif kayma genliğinin etkisi önemli ölçüde 2014 Alüminyum alaşımının mikro yapısına bağlıdır.
- 3- İşlemsiz 2014 Alüminyum alaşımı özellikle büyük relatif kayma genliği değerlerinde, T4 ve T6 işlem görmüş 2014 Alüminyum alaşımına nazaran fretting yorulma hasarına karşı daha hassastır.
- 4- Düşük relatif kayma genliği değerlerine sahip olmasından dolayı T6 ısıtıl işlem görmüş numunelerin fretting yorulma hasarına karşı direnci, yorulma çatlağının oluşumunu engelleyen daha kararlı mikro yapıya ve yüksek yüzey sertliğine sahip olmasının sonucu olabilir.



**KAYNAKLAR**

- Akay, S.K., Yazıcı M., Bayram A. and Avınç A., 2009. Fatigue Life Behaviour of the Dual-Phase Low Carbon Steel Sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 3358-3365.
- Ali, M., 2005. *Int. J. Fatigue*, 27, 33.
- Altenpohl, D. G., (1998). *Aluminium: Technology, Applications, and Environment*. The Aluminium Association and The Minerals, Metals Materials, Washington.
- Antoniou, R.A., Radtke, T.C., 1995. Fretting-Fatigue of Titanium Based Aircraft Turbine Materials, *Defence Science and Technology Organisation*, 296 - 307.
- Askeland, (1994) *The Science and Engineering of Materials*. 3rd. edn., Wadsworth Publishing Company, 812 s.
- Antoniou, R.A., Radtke, T.C., 1995. Fretting-Fatigue of Titanium Based Aircraft Turbine Materials, *Defence Science and Technology Organisation*, 296 - 307.
- Atasoy, S., 2009. Sert Eloksal Ve Akımsız Nikel Kaplanmış Alüminyum Alaşımının Sürtünmeli Temas (Fretting) Yorulma Karakterizasyonu. (Yüksek Lisans Tezi), Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon ve Makine İmalatı Anabilim Dalı, Erzurum.
- Aydın, B., 2002. AA2014 Alaşımında Yaşlandırma Isıl İşleminin İşlenebilirlik Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi ), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara.
- Aytaç, A., 2007. A356 Alüminyum Alaşımının Yarı Katı İşleme Üretimi Ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. (Lisans Tezi), Z.K.Ü Metal Eğitimi Bölümü Döküm Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük.
- Bannantine, J.A., Comer, J.J. and Handrock, J.L., 1990. *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*. Prentice-Hall, New Jersey, USA, 190.
- Brady, H.E., 1990. Fretting Wear, SAE. *Technical Paper Series*. Aerospace Technology Conference and Exposition Long Beach, California 1 – 4.
- Reimann, W. H. and Brisbane A. W., 1973. *Eng. Fracture Mechanics*. 5, 67.
- Broek, D. and Bowles C. O., 1971. *J. Inst. Metals*. 99, 255.
- Brooks, C. R., 1982. *Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys*. ASM International The Materials Information Society, Ohio, USA, 95–114
- Buciumeanu, M., Miranda A.S. and Silva F.S., 2008. Effect Of Relative Displacement And Normal Contact Load On Fretting Fatigue Behaviour Of Ti6al4v Alloy, *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, 20, 92-98.
- C.X.Li, Y.Sun. *Bell*, 2000. *Mater. Sci. Technol.* 16, 1067.
- Chawla, N., Andres C., Jones J. W. and Allison J. E., 1998. *Met.Trans.* A29, 2843
- Çimenoğlu H. ve Kayalı E. S., 1989. *Malzemelerin mekanik özellikleri*, İ.T.Ü. Kimya Metalurji Fak.
- Daşcılar, B., 2006. Farklı Ekstrüzyon Hızlarında Ekstrüze Edilmiş AA6063 Alüminyum Alaşımının Yüzey ve Kozrozyon Özelliklerinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Demiral M., Yaşar M., 2006 95200-95300 Cu-Al-Fe Alaşımının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. *Z.K.Ü. Teknoloji Dergisi*, 9(1):17-26.
- Di Russo, E., Conserva M., Gatto F. and Maricus F., 1973. *Met. Trans.* A4, 1133.

- Dobromirski, J.M., 1992. Standardization of fretting Fatigue Test Methods and Equipment. Eds, Helmi Attia, M., 1978. Waterhouse, R.B., ASTM STP 1159, American Society for Testing and Materials, 60.
- Doğan M., 1989. Alüminyumların Isıl İşlemi. (Yüksek Lisans Tezi), İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Eden, E.M., Rose, W.N., Cunningham, F.L., 1911. "The Endurance of Metals Process Institute for Mechanical Engineering", Vol. 4, sayfa 839-974.
- Eker, A. K., 2008 Alüminyum ve Alaşımları ders notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, [http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Aluminyum ve Aluminyum\\_Alasimlari.pdf](http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Aluminyum_ve_Aluminyum_Alasimlari.pdf) (15.01.2011).
- Endo H., Marui E., 2002. Studies on Fretting Wear: Influence of Rubbing Surface Materials and some Consideration, *Wear*, 253, 795-802.
- Erdoğan, M., 1996 Al-Li-Cu-Mg Alaşımlarında Yaşlandırma Mekanizması ve Isıl İşlemi. (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Erdoğan, M., 2001. Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Nobel Yayın Dağıtım, Cilt II, 378 s., Ankara,
- Fenner, A.J., Field, J.E., 1958. La Fatigue Dans Les Conditions de Frottement. *Revue de Metallurgie*, Paris, France, 55, 475-485.
- Fernando, U.S.-Farrahi, G.H.-Brown, W., 1994. In: Fretting fatigue. ESIS 18. Eds: Waterhouse, R.B., Lindley, T.C., Mechanical Engineering Publications, 183.
- Fouvry S., Duo P. and Perruchaut P., 2004. A Quantitative Approach of Ti-6Al-4V Fretting Damage: Friction Wear and Crack Nucleation. *Wear*, 257, 916-929.
- Gao, Gu ve Zhou, 1991
- Gaul, D.J. and Duquette D.J., 1980. The Effect of Fretting and Environment On Fatigue Crack Initiation and Early Propagation in a Quenched and Tempered 4130 Steel. *Metallurgical Trans.* 11A, 1555-1561.
- Hamdy, M.M., Waterhouse, R.B., 1982. "The Fretting Fatigue Behaviour of the Titanium Alloy IMI 829 at Temperatures up to 600 °C". *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, 5 (4), 267-274.
- Harendranath, C. S. and Mallik A. K., 1982. *Trans. IIM.* 35, 415.
- Hoeppner, D.W., 2006. Fretting Fatigue Case Studies of Engineering Components. *Tribology Technology*, 39, 1271-1276.
- Internet, (2011) [http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Diag\\_phase\\_AlCu.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Diag_phase_AlCu.svg), 05 Nisan 2011.
- Iyer, K., Mail, S., 2001. Analyses of Contact Pressure and Stress Amplitude Effects on Fretting Fatigue Life, *Journal of Engineering Materials and Technology*, ASME. 123, 85-93.
- Jin, O. and Mall S., 2004. Effects of Slip on Fretting Behavior: Experiments and Analyses. *Wear*, 256, 671-684.
- Karakışlak, M., 1978. Alüminyum Alaşımları ve Isıl İşlemi. (Yüksek Lisans Tezi), İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Koenen, A. Vermoux, Ph. and Gras, R., 1996. "A machine for fretting fatigue and fretting wear testing in cryotechnical and normal environment," *Wear*, 197, 192-196.
- Koul, A.K., Xue, L. and Wallace, W., 1996. An Investigation on Surface Treatments

for improving the Fretting Fatigue Resistance of Titanium Alloys, 82nd Meeting of the AGARD SMP.

- Lee, S., Nakazawa K., Sumita M. and Maruyama N., 2000. In: Fretting Fatigue: Current Technology and Practices, ASTM STP 1367, Eds: Hoepfner, D. W., Chandrasekaran, V., Elliott III CB., American Society for Testing and Materials, sayfa 199.
- Lyst, J. O., 1968. *J. Mater.* 3, 996
- Madge, J. J., Leen S. B., McColl I.R. and Shipway P.H., 2006. Contact-evolution Based Prediction of Fretting Fatigue Life: Effect of Slip Amplitude. *Wear*, 262, 1159-1170.
- Malakondaiah, G. and Rama Rao P., 1977. Proc. 4th Int. conf on fracture, Waterloo (Canada) (New York: Pergamon) 2B p. 741
- Malkin, S., Majors, D.P., Courtney, H., 1972. "Surface Effects during Fretting Fatigue of T 6Al-4V". *Wear*, 22, 235 - 244.
- Meyveci, A., 2007 "Yaşlandırılmış 2xxx Ve 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", (Bilim Uzm.Tezi), Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi ABD., Karabük.
- Mutlu, H., 1996. Al-SiC Kompozitlerin Termomekaniksel İşlem Sonrası Aşınma Davranışlarının İncelenmesi.(Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Mutoh, Y., Nishida T., Sakamoto I., 1988. Effect of Relative Slip Amplitude and Contact Pressure, *J. Soc.Mater. Sci.Japan* 37, 649-655.
- Naidu, N.K., Raman S., 2005. Effect of Shot Blasting on Plain Fatigue and Fretting Fatigue Behaviour of Al-Mg-Si Alloy AA 6061, *International Journal of Fatigue*, 27, 323-331.
- Nakazawa, K., Sumita M., Maruyama N., 1992. Effect of contact pressure on Fretting fatigue of High Strength Steel And Titanium Alloy. In: Helmi Attia M., Waterhouse RB., editors. Standardization of fretting fatigue test equipment. ASTM STP 1159, Philadelphia, 115-25.
- Nakazawa, K., Sumita M., Maruyama N., 1994 Effect of Relative Slip Amplitude on Fretting Fatigue of High Strength Steel. *Fatigue Fract.Engng. Mater. Struct.* 17, 751-759.
- Nishida T., Kondoh K., Xu J. and Mutoh Y., 2003. Observations and Analysis of Relative Slip in Fretting Fatigue, *Fretting Fatigue: Advances of Basic Understanding and Applications*, ASTM STP 1425, Y.Mutoh, S.E. Kinyon and D.W. Hoepfner, Eds., American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA.
- Nishioka, K. and Hirakawa, K., 1972. Fundamental Investigations of Fretting Fatigue (Part 6. Effects of contact pressure and hardness of materials). *Bull. Jpn. Soc. Mech. Engr.*, 15, 135-44.
- Nishioka, K. and Hirakawa K., 1969. Fundamental Investigations of Fretting Fatigue (Part 2. Fretting fatigue testing machine and some test results). *Bull. Japan Soc. Mech. Engrs.* 12, 180-187.
- Ohmae, N., and Tsukizoe, T., 1974, The effect of slip amplitude on fretting. *Wear*, 27(3), 281-294.
- Ostermann, P., 1971. *Met. Trans.* 2, 2897.

- Öz, Ö., 2007. Yaşlandırma Isıl İşleminin AA 7075 Malzemeli Dikdörtgen Plağın Burkulma Yüğü Üzerine Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi), Z.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği A.B.D., Zonguldak.
- Privett, III, H.M. and Fujishiro, S., 1994. "Coating Studies for Prevention of Fretting Fatigue in Jet Engine Titanium Compressor Blade Dovetails," Minerals, Metals & Materials Society, sayfa 401-410.
- Reimann, W. H. and Brisbane A. W., 1973. Eng. Fracture Mechanics 5, 67.
- Ruiz, C., Boddington, P.H.B., Chen, K.C., 1984. "An Investigation of Fatigue and Fretting in a Dovetail Joint", Experimental Mechanics, sayfa 208 – 217.
- Ruiz, C. and Chen K.C., 1986. Fatigue of Engineering Materials and Structures. Institution of Mechanical Engineers, United Kingdom, 187-194.
- Sadeler, R., 2006. Influence of contact pressure on fretting fatigue behaviour of AA 2014 alloy with dissimilar mating material. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 29, 1039–1044.
- Sadeler, R., Totik Y., Gavgali M. and Kaymaz I., 2004. Improvements of fatigue behaviour in 2014 Al alloy by solution heat treating and age-hardening. Materials and Design, 25, 439-445
- Samuels, L.E., 1993. Metals Engineering, a Technical Guide. ASM International. Metals Park. 3. Ohio.
- Sarıtaş S., 1995. "Engineering Metallurgy and Materials". Gazi Üniversitesi, 510 s.
- Sato K. and Fujii H., 1984. Fretting-fatigue Strength and Fracture Morphology of Carbon Steel S45C. J. Japan Soc. Strength Fract. Mater., 18, 98-113.
- Sines, G. and Waisman, J.L., 1959. "Metal Fatigue," McGraw-Hill company. 71.
- Sumita, H.-Nakazawa, K.-Hamano, R.-Maruyama, N., 1993. Report of the National Research Institute for Metals, 14, sayfa 207.
- Sun, Y., 1998. Yaşlanabilir Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları, (Yüksek Lisans Tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Switek, W., 1985. Fretting Fatigue Strength of Mechanical Joints. Theor. Appl. Fract. Mech., 4, 59-63.
- Şengül, A.B., 2006. İki Farklı Kontak Basıncı Altında AISI 1045 Çeliğinin Fretting Yorulması Üzerinde İndüksiyonla Sertleştirilmenin Etkisi, (Yüksek Lisans Tezi), Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon ve Makine İmalatı Anabilim Dalı, Erzurum.
- Uygur, İ., Külekci M.K., 2002 "Low Fatigue Properties of 2124/SiCp Al-Alloy Composites", Turkish Journal of Engineering & Environmental Science, 26(3), 265-274.
- Vingsbo, O., Soderberg S., 1988. "On Fretting Maps," Wear, Vol. 126, pp. 131-147.
- Waterhouse, R.B. and Bethune B., 1968. "Electrochemical studies of fretting corrosion". Wear, 12, 27.
- Waterhouse, R.B., 1981. "Fretting Fatigue". Applied Science Publishers Ltd, 221-240.
- Waterhouse, R.B., Iwabuchi, A., 1985. "The Composition and Properties of Surface Films Formed During the High Temperature Fretting of Titanium Alloys," Proceedings of the JSLE international Tribology Conference, Tokyo, Japan,

sayfa 53 – 58.

- Waterhouse, R.B., 1989. "Fretting Wear and Fretting Fatigue at Temperatures up to 600°C," AGARD, High Temperature Surface interactions.
- Waterhouse, R.B., 1992. "Fretting Fatigue", International Materials Review, 37 (2), 77-97.
- Waterhouse, R.B. and Trowsdale, A.J., 1992. "Residual Stress and Surface Roughness in Fretting Fatigue," Journal of Physics D: Applied Physics, 25 (1A), 236-239.
- Yılmaz, M., 1996. Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları, (Yüksek Lisans Tezi), Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yüksel, E. E., 1991. 7075 Alüminyum Alaşımlarında Basamaklı Yaşlandırma Özellikleri Kontrol İmkanları. (Yüksek Lisans Tezi), İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zhou, Z.R., Fayeulle S. and Vincent L., 1992. Cracking Behaviour of Various Aluminium Alloys During Fretting Wear. Wear, 155, 317-330.
- Zhou, Z.R., Sauger E. and Vincent L., 1997. Nucleation and Early Growth of Tribologically Transformed Structure Induced by Fretting. Wear, 212, 50-67.

## ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Öcal 1974 yılında Iğdır'da doğdu. İlk, orta ve Lise eğitimini Kars Anadolu Lisesi'nde tamamladı. Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 1999 yılında mezun oldu. 2000 yılında Kafkas Üniversitesi'nde Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. Şu an Iğdır Üniversitesi Iğdır Meslek Yüksekokulu'nda Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. 2009 yılında Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Evli ve iki çocuk babasıdır.