

**AISI 1045 ÇELİĞİNİN FRETİNG
YORULMASINA VE KOROZYON
DAVRANIŞINA
FOSFAT KAPLAMANIN ETKİSİ**

Ahmet ÇAĞLAR OĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Doç. Dr. Yaşar TOTİK

2006

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**AISI 1045 ÇELİĞİNİN FRETİNG YORULMASINA VE
KOROZYON DAVRANIŞINA FOSFAT KAPLAMANIN ETKİSİ**

Ahmet ÇAĞLAROĞLU

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2006**

Her hakkı saklıdır

Doç. Dr. Yaşar TOTİK'in danışmanlığında, **Ahmet ÇAĞLAROĞLU** tarafından hazırlanan bu çalışma 08/09/2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan	: Doç. Dr. Mehmet GAVGALI	<i>İmza</i> :
Üye	: Doç. Dr. Yaşar TOTİK	<i>İmza</i> :
Üye	: Yrd. Doç. Dr. İbrahim TÜRKMEN	<i>İmza</i> :

Yukarıdaki sonucu onaylarım

(imza)

Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Enstitü Müdürü

ÖZET

Y.Lisans Tezi

AISI 1045 ÇELİĞİNİN FRETİNG YORULMASINA VE KOROZYON DAVRANIŞINA FOSFAT KAPLAMANIN ETKİSİ

Ahmet ÇAĞLAROĞLU

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yaşar TOTİK

Bu çalışmada 12 mm çapında soğuk çekilmiş ve silindirik AISI 1045 (C45) çeliğinden hazırlanmış numunelere yapılan mangan fosfat kaplama işleminin düz (frettingsiz) yorulma, fretting yorulma dayanımları ve korozyon davranışları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Hazırlanan yorulma numunelerine dönel eğilmeli yorulma cihazında düz (frettingsiz) ve fretting yorulma deneyleri uygulanmıştır. Numunelerin korozyon deneyleri ise %3,5 NaCl çözeltisinde ve 1 N H₂SO₄ ortamında potansiyostat test cihazında gerçekleştirilmiştir.

Yapılan fretting yorulma deneylerinde fretting olayının, malzemelerin yorulma dayanımı üzerinde önemli derecede düşüşe neden olduğu gözlenmiştir. Mangan fosfat kaplama işleminin, AISI 1045 çeliğinin fretting yorulma davranışı üzerinde etkili olduğu ve fretting yorulma limitini önemli miktarda artırdığı tespit edilmiştir. Ancak mangan fosfat kaplama işleminin AISI 1045 çeliğinin düz (frettingsiz) yorulma dayanımı üzerinde fazla bir artışa sebep olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca mangan fosfat kaplama işleminin AISI 1045 çeliğinin korozyona karşı direncini de artırdığı tespit edilmiştir.

2006, sayfa 83

Anahtar Kelimeler: AISI 1045 çelik, fretting yorulma , fosfat kaplama, korozyon

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECT OF PHOSPHATE COATING ON CORROSION AND FRETTING FATIGUE OF AISI 1045 STEEL

Ahmet ÇAĞLARÖĞLU

Atatürk University
Institute of Applied Science
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Yaşar TOTİK

In this study, the effect of manganese phosphate coating process on the plane fatigue, fretting fatigue strength and corrosion behaviours for the diameter of 12 mm of cold-drawn cylindrical AISI 1045 (C45) steel samples was investigated. The plane and fretting fatigue tests were applied to the prepared fatigue samples on a rotating bending fatigue test system. The corrosion tests of the samples were also performed in 3,5%NaCl solution and 1N H₂SO₄ environment by a potansiyostat.

It was observed that the fretting phenomena in the result of tests caused to significantly a decrease in terms of fatigue strength. It was also determined that the manganese phosphate coating process is effective on the fretting fatigue behaviour of AISI 1045 steel and increased mostly fretting fatigue limit. However, it was found that this process was not bring about a great raise on the plane fatigue strength of AISI 1045 steel. Besides, manganese phosphate coating process increased the corrosion resistance of the steel.

2006, 83 pages

Keywords : AISI 1045 steel, fretting fatigue, phosphate coating, corrosion

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma boyunca her türlü yardım ve desteği ile beni gayretlendiren, bilgi ve deneyimiyle bana yol gösteren, hocam Sayın Doç. Dr. Yaşar TOTİK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Recep SADELER'e, korozyon deneylerinin yapılmasında desteklerini gördüğüm Sayın Arş.Gör.Burak DİKİCİ'ye ve SEM incelemelerinde yardımlarını ve desteğini bizden esirgemeyen Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Sayın Yrd. Doç. Dr. Gençğa PÜRÇEK'e ve bölümümüzün değerli hocalarına ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmam boyunca gösterdikleri anlayış ve sabır için eşime ve çocuklarıma teşekkür ederim.

Ahmet ÇAĞLAROĞLU

Ağustos 2006

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1.GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	11
2.1. Yorulma olayının tanımı	11
2.2. Fretting olayının tanımı.....	13
2.2.1. Fretting aşınması.....	15
2.2.2. Fretting yorulması.....	17
2.2.3. Fretting korozyonu.....	19
2.3. Fretting yorulma teorileri.....	19
2.4. Temas mekaniği.....	21
2.5. Fretting yorulması esnasında çatlak oluşumu ve gelişimi.....	22
2.6. Fretting yorulmasına etki eden faktörler.....	27
2.6.1. Bağlı kaymanın etkisi.....	27
2.6.2. Temas basıncının etkisi.....	28
2.6.3. Sürtünme katsayısının etkisi.....	29
2.6.4. Kayma genliğinin etkisi.....	30
2.6.5. Frekansın etkisi.....	31
2.6.6. Ortamın etkisi.....	32
2.6.7. Yüzey özelliklerinin etkisi.....	32

2.7. Malzemelerin fretting yorulma özelliklerini iyileştirme yöntemleri..	33
2.7.1. Uygun tasarım.....	34
2.7.2. Yorulmaya dayanıklı malzeme seçimi.....	34
2.7.3. Yağlayıcılar.....	34
2.7.4. Yüzey işlemleri.....	35
2.8. Fosfat kaplamalar	37
2.8.1. Genel bilgiler.....	37
2.8.2. Fosfat kaplama türleri ve uygulama alanları.....	41
2.8.2.a) Çinko fosfat kaplama.....	41
2.8.2.b) Demir fosfat kaplama.....	43
2.8.2.c) Mangan fosfat kaplama.....	43
2.9. Korozyon.....	45
2.9.1. Korozyonun genel tanımı ve önemi.....	45
2.9.2. Korozyon reaksiyonları.....	47
2.9.3. Korozyon hücresi akımı.....	49
2.9.4. Korozyona etki eden parametreler.....	49
2.9.5 Korozyondan korunma yöntemleri.....	50
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	52
3.1. Deneylerde kullanılan malzemenin seçimi ve numunelerin hazırlanması.....	52
3.2. Numunelerin kaplanması.....	54
3.3. Sertlik ölçümleri.....	54
3.4. Yorulma deneyleri.....	55
3.5. Korozyon deneyleri.....	58
3.6. SEM ve yüzey pürüzlülüğü incelemeleri	59
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	60

4.1. Sertlik ve yüzey pürüzlülüğü bulguları.....	60
4.2. Korozyon deneyi bulguları.....	61
4.3. Yorulma deneyi bulguları.....	64
4.4. SEM incelemeleri.....	69
5. SONUÇ	78
KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	84

SİMGELER DİZİNİ

$^{\circ}\text{C}$	Celcius sıcaklık derecesi
μm	Uzunluk birimi, mikro metre
Ra	Yüzey pürüzlülüğü, mikro metre
N	Zaman, saniye
σ	Normal gerilme, Mpa
τ	Kesme gerilmesi, Mpa
δ	Kayma gerilmesi, Mpa
a	Çatlak boyu
N_f	Devir sayısı
K	Gerilme yoğunluğu
P	Normal yük, Mpa
F	Kesme yükü, Mpa
M	Serbest haldeki metal kütlesi, gr
A	Metalin atomik kütlesi
I	Akım şiddeti, amper
n	Değerlik sayısı
F	Faraday sabiti, 96500 coulomb/eşdeğer gr
d	Diyagonal uzunluklarının ortalaması, mm

Kısaltmalar

Al	Alüminyum
Cr	Krom
Cu	Bakır
E_{kor}	Korozyon potansiyeli (E_{corr})
Fe	Demir
H_2SO_4	Sülfürik asit
H_3PO_4	Fosforik asit
HV	Vickers sertlik değeri
JSME	Yorulma testi Japon Standardı (Standard method of statistical fatigue testing)
I_{kor}	Korozyon akım yoğunluğu (mA/cm^2) (I_{corr})
In	İndiyum
K_{max}	Maksimum gerilme yoğunluğu
K_{min}	Minimum gerilme yoğunluğu
NaCl	Sodyum Klorür
Ni	Nikel
PVD	Fiziksel buhar kaplama tekniği (physical vapour technical)
SEM	Taramalı elektron mikroskop (scanning electron microscope)
Ti	Titanyum
V	Vanadyum
X-Ray	X ışını kırınım ölçer
Zn	Çinko

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Küçük gerilme altında dönen bir milin, yorulma kırılmasına uğraması halinde, kırılma yüzeyinin görünümü.....	12
Şekil 2.2. Temel fretting modelleri.....	15
Şekil 2.3. Fretting aşınmasının şematik gösterimi.....	15
Şekil 2.4. Fretting aşınma süreci	17
Şekil 2.5. AISI 4130 çeliğinin fretting'siz ve fretting'li yorulma ömürlerinin karşılaştırılması.....	18
Şekil 2.6. Kırılma tipleri.....	22
Şekil 2.7. Çatlak oluşumunun şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.8. Çatlak gelişimi sırasında oluşan bölgeler	24
Şekil 2.9. I. ve II. Bölgede çatlak ilerleyişinin gelişimi.....	25
Şekil 2.10. II. Bölgede çatlak gelişimi.....	26
Şekil 2.11. Mindlin diyagramı.....	30
Şekil 2.12. SEM ile çekilmiş ağır mangan fosfat kaplamanın görünümü	44
Şekil 2.13. Farklı iki metalin oluşturduğu pil mekanizması.....	47
Şekil 3.1. Yorulma deney numunesi.....	53
Şekil 3.2. Fretting yorulma numunesi ve kontak pabucunun (Pad) şematik gösterimi.....	55
Şekil 3.3. Vickers sertlik ölçme yönteminin şematik gösterimi.....	53
Şekil 3.4. R.R. Moore dönel eğilmeli yorulma cihazının şematik gösterimi.....	56
Şekil 3.5. Dönel eğilmeli yorulma testleri için şematik test düzeneği.....	57
Şekil 3.6. Dönel eğilmeli fretting yorulma testleri için şematik fretting test düzeneği.....	57
Şekil 3.7. Korozyon deney düzeneğinin şematik resmi.....	59
Şekil 4.1. Kaplamadan önce ve kaplamadan sonra sertlik değerlerindeki değişimler.....	60
Şekil 4.2. Yüzey pürüzlülük değerleri a) kaplanmamış, b) kaplanmış.....	60
Şekil 4.3. %3,5 wt NaCl çözeltisinde yapılan potansiyo dinamik polarizasyon eğrileri.....	61
Şekil 4.4. %1N H ₂ SO ₄ ortamında yapılan potansiyo dinamik polarizasyon eğrileri.....	62
Şekil 4.5. %1N H ₂ SO ₄ ve %3,5 wt NaCl ortamında yapılan potansiyo dinamik polarizasyon eğrileri.....	63
Şekil 4.6. Kaplanmamış ve fretting'siz numunelerin S-N diyagramı.....	64
Şekil 4.7. Mangan fosfat kaplanmış ve fretting'siz numunelerin S-N diyagramı...	64
Şekil 4.8. Kaplanmamış ve fretting'li numunelerin S-N diyagramı.....	65
Şekil 4.9. Mangan fosfat kaplanmış ve fretting'li numunelerin S-N diyagramı.....	65
Şekil 4.10. Mangan fosfat kaplanmış ve kaplanmamış düz (fretting'siz) numunelerin S-N diyagramı.....	66
Şekil 4.11. Mangan fosfat kaplanmamış düz (fretting'siz) ve fretting'li numunelerin S-N diyagramı.....	67
Şekil 4.12. Mangan fosfat kaplanmış ve kaplanmamış fretting'li numunelerin S-N diyagramı.....	68
Şekil 4.13. Fretting yorulmasında hasar oluşum safhalarının şematik gösterimi...	68

Şekil 4.14. AISI 1045 çeliği üzerine kaplanan mangan fosfat kaplamanın yüzey SEM mikrografları.....	70
Şekil 4.15. Kaplama işleminden sonra yüzeyin topografik görüntüsü.....	72
Şekil 4.16. Düz (fretting'siz) dönel eğilmeli yorulma deneyleri sonunda elde edilen numunelerin kırılma yüzeyleri.....	73
Şekil 4.17. Fretting yorulma numunelerinde kırılmadan önce köprü tipi pabuçların (pad) numune yüzeyinde oluşturdukları izler.....	74
Şekil 4.18 Mangan fosfat kaplanmamış fretting'li numunelerin yorulma deneyleri sonunda elde edilen kırılma yüzeyleri.....	75
Şekil 4.19. Fretting yorulma deneylerinde kullanılan pabuçların aşınma yüzeyleri	76
Şekil 4.20. Mangan fosfat kaplanmış fretting'li numunelerin yorulma deneyleri sonunda elde edilen kırılma yüzeyleri.....	

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. AISI 1045 çeliğini kimyasal bileşimi.....	52
Çizelge 3.2. Mangan fosfat kaplama işleminin parametreleri	54
Çizelge 4.1. %1N H ₂ SO ₄ ve %3,5 NaCl ortamında yapılan malzemelerin E _{kor} ve I _{kor} değerleri	63

1. GİRİŞ

Günümüzde metalleri ve metal alaşımlarını yeterli miktarlarda üretme çabasında karşılaşılan güçlükler giderek artmaktadır. Özellikle enerji ve hammadde yetersizliği bu güçlüklerin başında gelmektedir. Bu nedenle metal ve alaşımlardan imal edilen yapı elemanlarının kullanım ömürlerinin artırılması giderek önem kazanmaktadır. Bilgi ve teknoloji yanında endüstri tesislerinin önemli bir bölümünü yurtdışından getirme zorunluluğu ile karşı karşıya bulunan ülkemiz için bu durum daha fazla önem arz etmektedir. Yapılan araştırmalara ve istatistiklere göre makina elemanlarının büyük bir bölümünün işe yaramaz hale gelmesine aşınma, yorulma ve korozyon gibi olayların neden olduğu ileri sürülmüştür.

İmalatta yüzey mühendisliği teknikleri kullanılarak; korozyon, aşınma ve yorulmanın negatif etkileri önemli derecede azaltılmıştır. Korozyon, aşınma ve yorulmanın olumsuz etkileri, malzeme seçiminde ve ürün tasarımında mutlaka dikkate alınmalıdır. Metal ve alaşımların yüzeyini korozyona, aşınmaya ve yorulmaya dayanıklı hale getirmenin en iyi yollarından birisi yüzeyin kaplanmasıdır. Yüzey kaplamalarının kullanımı, korozyon direncini artırmak, mekanik ve elektrik özellikleri geliştirmek ve dekoratif amaçlar için günümüzde endüstriyel alanda yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Elektro tutum bakımından metal kaplamalarını soy kaplamalar ve aktif kaplamalar olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Kaplanacak metale göre soy ve aktif kaplamaların seçiminde galvanik çizgiden yararlanılır. Korozyonun elektro kimyasal oluşum düzeni her iki kaplama türünün hangi koşullarda koruyucu olduğunu kesinlikle belirler. Buna göre soy kaplamaların koruma yeteneği metal ile saldırgan ortam arasında etkin bir engel oluşturmasına bağlıdır. Organik ve fosfat kaplamalarda son yıllarda yüzey modifikasyonu için kullanılan tekniklerdendir. Bu yöntemler ile son derece yüksek korozyon direnci sağlanır ve birbiri üzerinde izafi hareket eden yüzeylerde kaydırıcı bir tabaka oluşturularak aşınma, önemli derecede azaltılabilir. Bu kaplamaların maliyetinin hem diğer kaplamalara göre daha düşük olması hem de korozyonun ilerleme hızının son derece düşük olması fosfat kaplamaların yaygın bir şekilde kullanım alanı bulmasına neden olmuştur.

Korozyon, aşınma ve yorulma; endüstride kullanılan bütün cihaz ve malzemelerin işletme ömürlerinin azalmasına ve üretim veriminin düşmesine neden olduğu için korozyonun bu olumsuz etkisi bu kaplamalar yapılarak azaltılmaya çalışılmıştır.

Temasta olan ve birbirine göre izafi harekette bulunan iki elemanın temas yüzeyleri arasında sürtünme ve buna bağlı olarak aşınma meydana gelir. Özel bir aşınma prosesi olan fretting olayı, temas halinde ve belirli yük altında iki yüzeyde düşük genlikli titreşim nedeniyle oluşan bağıl kayma (10^{-6} cm) hareketi sonucu meydana gelir. Bu tip temas, genellikle makina titreşimlerinin birbirlerine sabit olarak tespit edilen elemanlar arasında çok küçük hareketlere neden olması neticesinde meydana gelmekte ve aşınma, korozyon ve yorulma çatlak başlaması ile hasara neden olmaktadır. Fretting aşınması ile yüzeyden kaldırılan malzeme, yerel aşınma (büyük genliğe sahip aşınma) gibi genellikle ciddi bir probleme sebep olabilecek düzeyde olmamaktadır. Ancak mühendislik açısından daha önemlisi, yorulma çatlak gelişiminin mümkün olduğu bir ortamda fretting'in meydana gelerek makina elemanlarında yorulma olayını başlatması ve yorulma ömrünü önemli derecede azaltmasıdır. Bu olay fretting yorulması olarak bilinmektedir.

Fretting hasarı, yüzeylerde bölgesel adhezyonu ile başlar ve adhezyon sonucu oluşan partiküllerin yüzeyden uzaklaştırılması veya kopması ile devam eder. Fretting mekanizmasının oluşumuna neden olan düşük genlikli bağıl kayma hareketi, tekrarlı bir yükleme ile birleşirse meydana gelen olaya fretting yorulması adı verilir. Fretting olayı altında bulunan makina elemanlarının yorulma dayanımlarında ve kullanım sürelerinde önemli derecede azalma gözlenir (Waterhouse 1981; Bryggman *et al.* 1986; Zhang *et al.* 1989; Szolwinski *et al.* 1996). Yapısal elemanların kullanım sürelerini önemli oranda düşüren fretting yorulma hasarı helikopterler, sabit kanatlı uçaklar, trenler, gemiler, otomotiv, kamyon, otobüs, tekerlek-aks bağlantıları, dişliler, şaftlar, mafsallar, perçinli ve civatalı bağlantılar, metal halatlar, demiryolu rayları, tarım makinaları, motorlar, yapım ekipmanları, ortopedik implantlar, ve roket motorlarındaki parçalarda sıkça rastlanmaktadır (Hoepfner *et al.* 1992).

Fosfat kaplamalar, endüstriyel uygulamalarda yukarıda bahsedildiği sebeplerden dolayı yaygın olarak kullanılan tekniklerden biridir. Fosfat kaplamaların uygulandığı çeliklerin korozyon davranışı üzerine çok sayıda çalışma olmasına rağmen, yorulma (fretting'siz) ve fretting yorulması ile ilgili olarak yapılmış çalışmaya henüz rastlanılmamıştır. Bu çalışma kapsamında dikkate alınan ve günümüze kadar yapılan çalışmaların kısa bir özeti aşağıda sunulmuştur.

Brad (2000), ferrous ve nonferrous metallerin yüzeyine çinko, magnezyum, demir fosfat kristalleri kaplayarak organik kaplama işlemi gerçekleştirmiştir. Bu kaplamaların korozyon deneyleri sonunda korozyon dirençlerinin özellikle ferrous metallerde arttığını gözlemiştir.

Flis *et al.* (2001), X10Cr18Ni9Ti paslanmaz çeliğini, fosfat kaplamadan önce 600⁰C de 9 saat nitrüledikten sonra çinko ve magnezyum/demir banyosunda fosfatlama işlemi gerçekleştirmişler ve fosfat kaplamanın derinlik profil analizi Discharge Optik Emisyon Spectrometre (GDOES) yapmışlardır. Kaplanmış ve kaplanmamış paslanmaz çeliklerin anodik davranışı 0,1MNa₂SO₄ çözeltisinde polarizasyon eğrileri ve polarizasyon direncini ölçerek, nitrülenmiş çeliklerin krom pasivasyonu ile korozyon direncinin önemli ölçüde geliştiğini tespit etmişlerdir.

Guenbour *et al.* (1999), çeliklerin üzerini çinko fosfat kaplayarak korozyon direnci üzerine pigment konsantrasyonunun etkisini ve korozyon ürünlerinin karakterizasyonunu TEM ve X-Ray ile araştırmışlar ve kaplanmış çeliklerin korozyon davranışı üzerinde pigment konsantrasyonunun etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Söderlund and Ljunggren (1998), yüzey pürüzlülüğü Ra= 1,72 µm olan düşük karbonlu çelik ve Ra= 0,12 µm AISI 316 ostenitik paslanmaz çelik üzerine değişik kaplamalar yaparak, bu kaplamaların yapısal analizlerini SEM, Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy ve optik mikroskopta gerçekleştirmişlerdir. Yapılan potansiyodinamik

ölçümleri sonunda kaplama uygulanan çeliklerde son derece yüksek korozyon direnci elde etmişlerdir.

Creus *et al.* (1999), AISI 4135 çelik üzerine çinko fosfattan oluşan kaplamalar yaparak kaplamaların morfolojisini X-Ray ve SEM’de secondary ve backscattering elektronlar ile araştırmışlardır. Elektrokimyasal deneyleri ise EGG 273 A potansiyostat ile üçlü elektrot tekniği kullanarak gerçekleştirmişler, kaplanmış çeliklerde gözenekliliğin korozyon direncini önemli ölçüde azalttığını ve bununla galvanik etki yaptığını tespit etmişlerdir.

Rossi *et al.* (2003) orta karbonlu çeliklerin tribolojik davranışlarını geliştirmek ve korozyon davranışını iyileştirmek için endüstriyel kaplamalardan fosfat kaplama yöntemini uygulamışlardır. Aşınma, sürtünme ve korozyon deneyleri sonunda çeliklerin tribolojik ve korozyon özelliklerinin, çelikler üzerinde bir bariyer görevi gören kaplama sayesinde son derece arttığını gözlemlemişlerdir.

AISI 1045 çeliğini çinko fosfat kaplayan Liu *et al.* (2002), yüzeyin yağlama ve aşınma davranışını incelemişlerdir. Kaplamaların faz ve kimyasal bileşimlerini X-ray diffractometre ve Auger Elektron Spectroscopy ile sürtünme ve aşınma özelliklerini ise Ball-on disc test cihazında yapmışlardır. Kaplama yapılmış çeliklerin sürtünme katsayılarının, kaplama yapılmamışlara göre çok düşük ve aşınma direncinin daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Zhou *et al.* (2006), malzemeleri korozyona ve aşınmaya karşı korumanın en ucuz yollarından biri olan fosfat kaplamaları orta karbonlu çelikler üzerinde uygulayarak bu özelliklerin elde edildiği en uygun kaplama kalınlığının elde edilmesi için araştırma yapmışlardır. Kaplamaların yapısal karakterizasyonu X-ray diffractometre ve SEM ile karakterize edilerek elde edilen optimum kaplama parametreleriyle bu özelliklerin son derece iyileştiğini gözlemişlerdir.

Çeliklerin soğuk olarak dövülmesi sırasında karşılaşılan sürtünme davranışlarını ve aşınmayı azaltmak için Dubar *et al.* (1998), yeni bir fosfat kaplama yöntemi geliştirmişler ve bu yeni kaplama yönteminin standart fosfat kaplamalara göre daha iyi tribolojik performans sergilediğini ileri sürmüşlerdir. Yine benzer olarak Caminaga *et al.* (2006), çeliklerin soğuk ekstrüzyonu sırasında meydana gelen takım aşınmasını ve ekstrüzyon kuvvetini azaltmak için alternatif bir kaplama yöntemi geliştirmişlerdir. Burada ekstrüze edilecek çelik üzerine MoS₂ ve fosfat birlikte kaplanarak ekstrüzyon yükünün ve aşınmanın önemli derecede azaldığını, ayrıca takımın korozyon özelliklerini iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Fretting ile ilgili yapılan literatür özetleri ise aşağıda kısaca ifade edilmiştir. Fretting konusu üzerinde ilk çalışmayı Tomlinson gerçekleştirmiştir ve “fretting korozyon” deyimini ilk olarak ortaya atmıştır. Çok küçük genliğe (10⁻⁶ cm) sahip fretting hareketinin hasara neden olduğu ve söz konusu hasar oluşumunda “kayma” olarak adlandırılan bağıl hareketin çok önemli olduğunu tespit etmiştir (Tomlinson 1927). Ortam ile oluşan aşınma partikülleri ve temas eden yüzeylerin kimyasal olarak etkileşmesi bu sürece eklendiğinde malzemede fretting korozyonu meydana gelmektedir.

Fretting hasarının malzemelerin yorulma dayanımı üzerindeki etkisi, ilk olarak Warlow Davies tarafından incelenmiş ve endüstride yaygın olarak karşılaşılan fretting ve yorulmanın birleşik etkisinin, yorulma dayanımını çok ciddi bir şekilde azalttığını belirlemiştir (Davies 1941).

Fretting; yüzeyler arasındaki temas ve bağıl hareket, frekans, normal yük, süre, sıcaklık, atmosfer, nem, yüzey pürüzlülüğü, yağlayıcılar, sertlik ve sürtünme katsayısı gibi birçok faktöre bağlıdır. Daha öncede Waterhouse tarafından ifade edildiği gibi, fretting olayında farklı aşınma süreçleri aynı anda meydana gelmekte ve bu faktörler fretting şartlarını değiştirmektedir (Waterhouse 1981).

Tomlinson'dan bugüne kadar, fretting yorulmasının anlaşılması için yoğun araştırma yapılmış ve fretting konusunun anlaşılmasına yönelik çok ciddi gelişmeler elde edilmiştir (Tomlinson 1927). Fretting konusunda bu gelişmeler elde edilse de, fretting hasarına neden olan mekanizmalar tam olarak anlaşılamamıştır. Bu görüş, günümüzde endüstride meydana gelen ciddi hasarlar ve kazalar ile desteklenmektedir.

Hurricks (1973), fretting aşınma mekanizmasını incelemiş ve fretting aşınmasının üç bölüme ayrılabilirliğini ifade etmiştir. Bunlar başlangıç aşaması, oksit oluşumu ve sürekli durumdur. Aşınma hasarına neden olan adhezyon ve metal transferi ilk aşamada meydana gelmektedir. İkinci aşamada yüzey oksitlenir ve bu oksit tabakası metalik teması azaltır. Son aşamada ise fretting olayının gerçekleştiğini ileri sürmüştür.

Waterhouse ve Taylor (1974), fretting etkisi altında olan yüzeylerde adhezyon ölçümleri ve SEM ile yaptıkları araştırmalarda, makroskopik seviyedeki adhezyonun fretting'in ilk safhalarında meydana geldiğini, fretting yüzeyleri arasındaki adhezyonun, malzemelerin yüzey ve mekanik özelliklerine bağlı olduğunu ve yüzeylerden malzemenin kaldırılmasının kırılma mekaniği açısından aşınma ile ilgili olduğunu tespit etmişlerdir.

Brady (1990), temas halinde bulunan iki yüzeyin, pürüz uçlarından temas ettiğini, yüzeye dik yönde bir yük uygulandığında ise deformasyon ile temas yüzeylerinin arttığını ve yüzeylerin birbirine daha da yaklaştığını belirlemiştir. Pürüzlerin birbiri üzerinde kayması sırasında yüzeyde meydana gelen oksit tabakasının kırılmasına neden olduğunu ve metal metale temasın sağlandığını ve kayma hareketinin salınım şeklinde olduğu zaman fretting aşınmasına yol açtığını ifade etmiştir.

Fretting yorulma olayında çatlaklar, yorulmanın çok erken safhalarında başlamakta ve çatlakların ilerlemesi fretting hasarı ile hızlanmaktadır. Fretting nedeniyle yorulma dayanımı belirgin bir şekilde azalmaktadır. Endo ve Goto (1976), yorulma çatlaklarının yorulma ömrünün hemen hemen %4 safhalarında meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Normal yorulma olayında toplam ömrün %90'ı yorulma çatlaklarının başlaması için

harcanırken, fretting olayının bulunması durumunda yaklaşık %4'e düştüğünü gözlemlemişlerdir.

Sato *et al.* (1981), 2 ½ %NiCrMoV çeliği üzerinde yapmış oldukları fretting yorulma deneylerinde, çatlakların yüzey aşınma hasarının en az olduğu numunelerde de var olduğunu tespit etmişler ve fretting yorulmanın temas alanındaki değişen teğetsel gerilme ile kontrol edilebildiğini ifade etmişlerdir.

Sato *et al.*(1986), 304 L ve AA 2024-T3 işlemi görmüş alüminyum alaşımı üzerinde yaptıkları diğer bir çalışmada ise fretting yorulmada çatlak ilerlemesini iki aşamaya ayırmış, ilk aşamada ilerlemenin çok yüksek olduğunu, azalan fretting etkisi ve çatlak kapanması nedeniyle çatlak ilerleme hızının tedrici olarak azaldığını tespit etmişlerdir.

Temasta olan malzemelerin kimyasal bileşimlerinin aynı veya farklı olmasının fretting yorulması üzerinde bir etkiye sahip olup olmadığı Hutson *et al.* (2006) tarafından araştırılmıştır. Bu amaçla Ti-6Al-4V numuneler üzerine farklı kimyasal bileşime, farklı geometriye sahip pabuçlar (padlar) ve farklı kuvvetler uygulayarak fretting yorulma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda; uygulanan kuvvetin, pabuçların kimyasal bileşiminin ve uygulanan kuvvetin fretting yorulma davranışı üzerinde etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca numune ve pabuçlar arasındaki malzeme transferinin malzemelerin özelliklerine bağlı olduğunu ve malzeme transferinin yumuşak malzemeden sert malzemeye doğru meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

Fretting yorulmasının, normal kuvvet etkisi altında temas bölgesinde meydana gelen düşük genlikli kayma hareketinin sebep olduğu bir adhesive aşınma olayı olduğu bilinmektedir. Bu olayın görüldüğü yerlerden biriside kalça implantları ve kemik tabakalarının temas yüzeyleridir. Vadiraj and Kamaraj (2006), biyomedikal titanyum alaşımlarına uygulanan PVD, TiN kaplamalar ve Plazma nitrürleme ile sürtünmenin

minimize edildiğini ve malzemede meydana gelen fretting hasarının etkili olarak geciktiğini tespit etmişlerdir.

Jin *et al.* (2006), Ti-6Al-4V taban malzemesi üzerine yapılan Cu-Al kaplamaların fretting yorulma özelliklerini araştırmışlar, fretting yorulma deneylerini sabit bir kontak basıncında ve farklı gerilme genliklerinde yaparak temas bölgesinin yüzey profillerini incelemişlerdir. Düşük gerilme genliklerinde fretting yorulma çevrimlerinin artmasıyla yavaş bir aşınma gözlemişler ve kaplamaların çok büyük çevrimlere kadar yüzeyden ayrılmadığını tespit etmişlerdir. Ancak yüksek gerilme genliklerinde ise kaplamaların ara yüzeyden ayrıldıklarını ve fretting yorulma özelliklerinin kaplanmış numunelerde çok daha iyi olduğunu ortaya koymuşlardır.

Lee *et al.* (2006), shot-peened edilmiş Ti-6Al-4V numunelerin yorulma davranışını servo hidrolik yorulma test makinası kullanarak deniz suyu ortamında araştırmışlardır. Çalışma sonunda shot-peened edilen numunelerin fretting yorulma ömürlerinin, shot peened edilmemiş numunelere göre daha fazla olduğunu ve deniz suyu ortamında yapılan deneylerde fretting yorulma ömrünün azaldığını tespit etmişlerdir.

Caron *et al.* (2006), fretting olayının sebep olduğu hasarları azaltmak için Ti-6Al-4V numunelere PVD ile gümüş, bakır-nikel, TiN, plazma nitrüleme ile TiN, Ti₂N, gibi sert ve yumuşak kaplamalar yaparak, sert ve yumuşak kaplamaların kriyojenik ortamda fretting yorulma davranışını araştırmışlardır. Fretting olayına maruz kalan yumuşak PVD kaplamaların kriyojenik ortamda fretting yorulma dayanımlarının kaplanmamış numunelere göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. PVD ile yapılan TiN ve Plasma nitrür ile yapılan sert kaplamalarında fretting davranışı üzerinde etkili olduklarını belirlemişlerdir. Ancak bu sert kaplamaların 10⁶ çevrime kadar fretting davranışı üzerinde daha faydalı olduğunu belirlemişlerdir.

Kubota *et al.* (2006), 304 paslanmaz çelikten yapılan numunelere hidrojen gazı ortamında fretting yorulma deneylerini uygulamışlardır. Hidrojen gazı ortamında

yapılan deneylerde fretting yorulma mukavemetinin, havada yapılan deneylere göre azaldığını tespit etmişlerdir. Bu azalmanın sebebini, teğetsel kuvvetin ortama bağlı olmasına ve hidrojen ortamında teğetsel kuvvetin artmasına bağlamışlardır.

Rajasekaran *et al.* (2006), Al–Mg–Si alaşımı (AA 6063) numunelerin üzerine Cu–Ni–In tozlarını patlamalı sprey tekniği ile farklı kalınlıklarda kaplayarak numunelerin düzlem yorulma ve fretting yorulma şartlarını araştırmışlardır. Farklı kalınlıklarda yapılan bu kaplamaların, bası artık gerilmelerinin artmasına paralel olarak hem düzlem yorulma hem de fretting yorulma dayanımlarında, kaplanmamış numunelere göre bir artış gösterdiğini belirtmişlerdir.

Martinez *et al.*(2005), shot-peened edilen Ti-6Al-4V de meydana gelen artık gerilme üzerinde fretting yorulmasının etkisini araştırmak için shot-peened edilmiş numunelerdeki artık gerilmeleri X-ray difraktometre ile ölçmüşlerdir. Fretting yorulma hasarından önce bası artık gerilmelerin numunede uniform olarak dağılmasına rağmen, fretting yorulmasına uğrayan numunelerde fretting hasarının olduğu bölgelerde bası artık gerilmelerinin gevşediğini ve fretting hasarının olduğu yerlerde anizotropik kalıntı gerilme dağılımının olduğunu belirlemişlerdir. Fretting yorulma deneylerinden fretting yorulma çevrim sayısının yükselmesi ile artık gerilmelerin arttığını tespit etmişlerdir.

Kontak basıncın fretting yorulma üzerinde etkisini araştırmak için Ramakrishna and Raman (2005), AA 6061 alüminyum alaşımına farklı kontak basınçları ve sürtünme şartları uygulamışlardır. Kontak basıncındaki artışa paralel olarak AA 6061 alaşımının fretting yorulma özelliğinin farklı davranmasına neden olduğunu ve kontak basıncının artmasıyla fretting yorulma ömrünün azaldığını tespit etmişlerdir.

Allen *et al.* (2003), çift fazlı çelik olarak bilinen 3CR12 ve AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerine plazma nitrürleme işlemi uygulayarak yorulma davranışı üzerinde fretting'in etkisini araştırmışlardır. Plazma nitrürleme işlemini çeliklere 400-520⁰C arasında uygulayarak yaptıkları yorulma deneylerinin sonunda; düzlem yorulma

dayanımının plazma nitrürleme işlemi ile yaklaşık %10-25 arasında bir artışa sebep olmasına rağmen, fretting yorulma deney şartlarında fretting yorulma dayanımını yaklaşık olarak %50 oranında artırdığını ve plazma nitrürleme işleminin fretting yorulma dayanımı üzerinde daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Günlük hayatta fretting olayını ve fretting yorulmasına sebep olan iki yüzey arasındaki düşük genlikli bağıl hareketi ortadan kaldırmak mümkün değildir. Ancak Fretting hasarına sebep olan etkenler iyi tespit edilirse, bu olayı azaltacak önlemler de alınabilir. Daha önceden de belirtildiği gibi fretting hasarının önlenmesi için uygulanan yöntemlerden biriside yüzey kaplama işlemidir. Öte yandan metal ve alaşımların yüzeyini korozyona ve oksitlenmeye karşı dirençli hale getirmenin de en iyi yollarından birisi yine yüzeyin kaplanmasıdır. Bu amaçla bu çalışmada yüzeyler arasında meydana gelecek fretting hasarının azaltılması, ayrıca fretting olayı sırasında meydana gelen aşınma sonucunda ortaya çıkan parçacıkların oksitlenerek abresive etkisini azaltmak ve numunelerin korozyon davranışlarını artırmak için numunelere mangan fosfat kaplama işlemi yapılmıştır. Bunun için kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin fretting'siz ve fretting yorulma dayanım ve ömründeki değişimleri dönel eğilmeli yorulma test cihazında, korozyon davranışları ise NaCl ve H₂SO₄ ortamlarında potansiyostat da araştırılacaktır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Yorulma olayının tanımı

Metal yorulması, makinalarda, taşıtlarda ya da yapılardaki metal parçaların tekrarlanan gerilmelerin veya yüklerin altında giderek dayanımını yitirmesi ve aslında dayanabileceğinden çok daha zayıf son bir gerilimin etkisiyle çatlayabilecek ya da kırılacak duruma gelmesidir.

Çalışma şartlarında ilk yorulma sonucu kırılmaların bir kaçı arabaların akslarında meydana gelmiştir. 19.Yüzyılın ortalarında demiryolu sistemlerinin hızla gelişmeye başlamasıyla, demir yolu akslarında yorulma sonucu oluşan kırılmalar, tekrarlı yük etkilerinin ne kadar önemli olduğunu ve ciddi bir şekilde incelenmesi gerektiğini gösteren yaygın bir problem olarak ortaya çıkmıştır. Akma noktasının altında çalışan makina parçalarının çoğu, nedeni bilinmeyen sebeplerden dolayı kırılmışlardır.

Açıklanamayan çalışma bozuklukları sık sık olurken, denemeler laboratuarda akma noktasının altında kırılma şartları yeniden meydana getirilerek tekrarlanmıştır. 1852 ve 1870 yılları arasında Alman demiryolu mühendisi August Wöhler ilk olarak sistematik yorulma araştırmasını yapmış ve geliştirmiştir. Bir kaç farklı malzeme için deneyleri, büyük ölçüde demiryolu aksları üzerinde ve küçük miktarlarda eğilme, burulma ve radyal olarak tekrarlanan yüklerle geliştirmiştir. Wöhler temel verileri S-N diyagramı diye bilinen grafiklerde yorumlamıştır (Collins 1981).

Daha sonra bu konuyla ilgili ciddi araştırmalar 20. yüzyılın ortalarına doğru ve özellikle 1954'te jet bir yolcu uçağının basınç kabinlerinin yarılması üzerine İngiliz Comet tarafından yapılmıştır. 1970'lerde, olayın nasıl geliştiği henüz tam olarak anlaşılamamışsa da, deneysel yollarla yorulmanın üstesinden gelecek teknikler geliştirilmiştir. Yorulmaya dayanıklı metaller bulunmuş ve çeşitli yeni yüzey

işlemleriyle bunların dayanımı daha da artırılmıştır. Bu arada uçak vb taşıtlarda yorulmaya yol açan gerilimleri en aza indirgeyecek yeni tasarımlara geçilmiştir.

Metallerde yorulmanın ortaya çıkması için bazı şartların sağlanmış olması gerekir. Bu şartlar, metal malzemeden yapılmış bir makina elemanına tesir eden kuvvetlerin şiddet veya uygulama şeklinin zamanla değişmesi veya makina elemanının dış yüzeyinde çekme gerilmesinin bulunması olabilir. Dış sathı düzgün olmayan ve ani kesit değişikliği ihtiva eden makina elemanlarında yorulma ömrü daha kısadır. Makina elemanının üretiminden ileri gelen veya kullanma sırasında ortaya çıkan bir kılcal çatlağın, enine kesit boyunca ilerlemesinden dolayı üzerine gelen kuvveti veya diğer dış tesirleri taşıyan kesit alanının küçülmesi sonucu malzeme dış tesirleri taşıyamayarak ani olarak kırılır. Başlangıçta, üzerine tesir eden dış kuvvetlere karşı koyabilen makina elemanında belli bir süre sonra hiç beklenmedik bir tarzda, bir hasarın ortaya çıkması yorulma olarak adlandırılmıştır. Nasıl kalp krizi ve kanser gibi hastalıklar yüksek oranda insan ölümlerinin sebepleri, iseler, benzer şekilde, endüstrideki hasarların yaklaşık %80-90'ına da metallerin yorulması sebep olmaktadır. Çünkü yorulma yükleri, ileri-geri kuvvet uygulamalarına ya da açık-kapalı basınç tiplerine benzer dinamik yüklerdir.



Şekil 2.1. Küçük gerilme altında dönen bir milin, yorulma kırılmasına uğraması halinde, kırılma yüzeyinin görünümü

Metallurjistler malzeme davranışlarını belirleyerek, akla uygun teoriler geliştirmelerine rağmen, yorulmayla oluşan kırılmalara sebep olan nedenleri tam olarak açıklayamamışlardır. Kırılma yüzleri makroskobik ölçüde genellikle çekme gerilmesinin

doğrultusuna diktir. Bir yorulma deformasyonu, kesit yükü taşıyabilecek kadar büyük olmadığı zaman, parçaların sünek bir davranışla kırıldığı yerde oluşur.

Yorulma olayına, parçaya sadece dışardan uygulanan mekanik kuvvetler değil, ısıl genleşmeler ve büzölmelerden doğan ısıl gerilmelerde neden olmaktadır. Yorulma olayında çatlak genellikle yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar. Yorulma bozulmasının oluşması için üç temel faktör gerekir:

- 1-Yeteri derecede yüksek maksimum çekme gerilmesi,
- 2-Uygulanan gerilmenin oldukça geniş bir değerde değişimi ve dalgalanması,
- 3-Uygulanan gerilmenin yeteri kadar büyük tekrar sayısında etkimesi.

Bunlara ek olarak, yorulma için şartları değiştirme eğiliminde olan gerilme konsantrasyonu, korozyon, sıcaklık, aşırı yükleme metalurjik yapılar, kalıntı gerilmeler ve bileşik gerilmeler gibi faktörler de sayılabilir.

2.2. Fretting olayının tanımı

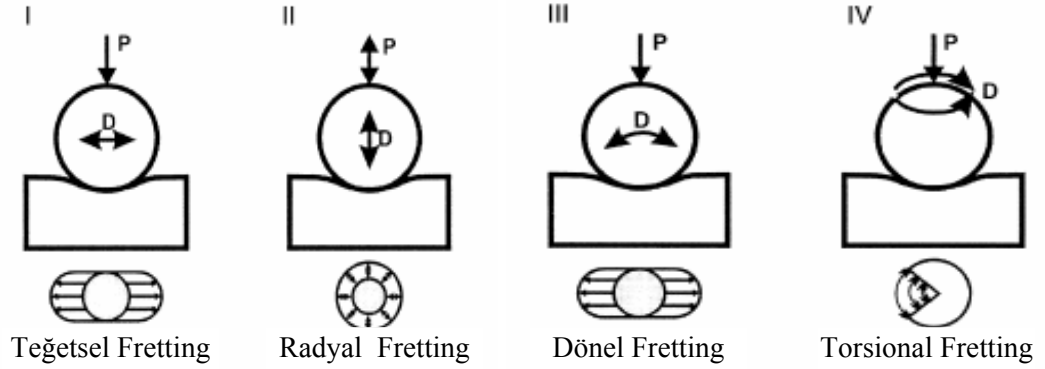
Temasta olan ve birbirine göre izafi harekette bulunan iki elemanın temas yüzeyleri arasında sürtünme ve buna bağlı olarak aşınma meydana gelir. Özel bir aşınma prosesi olan fretting olayı, temas halinde ve belirli yük altında iki yüzeyde düşük genlikli titreşim nedeniyle oluşan bağıl kayma (10^{-6} cm) hareketi sonucu meydana gelir. Bu tip temas, genellikle makina titreşimlerinin birbirlerine sabit olarak tespit edilen elemanlar arasında çok küçük hareketlere neden olması neticesinde meydana gelmekte ve aşınma, korozyon ve yorulma çatlak başlaması ile hasara neden olmaktadır. Fretting aşınması ile yüzeyden kaldırılan malzeme, yerel aşınma (büyük genliğe sahip aşınma) gibi genellikle ciddi bir probleme sebep olabilecek düzeyde olmamaktadır. Ancak mühendislik açısından daha önemlisi, yorulma çatlak gelişiminin mümkün olduğu bir ortamda fretting'in meydana gelerek makina elemanlarında yorulma olayını başlatması ve

yorulma ömrünü önemli derecede azaltmasıdır. Bu olay fretting yorulması olarak bilinmektedir.

Fretting hasarı, yüzeylerde bölgesel adhezyon ile başlar ve adhezyon sonucu oluşan partiküllerin yüzeyden uzaklaştırılması veya kopması ile devam eder. Fretting mekanizmasının oluşumuna neden olan düşük genlikli bağıl kayma hareketi, tekrarlı bir yükleme ile birleşirse meydana gelen olaya fretting yorulması adı verilir. Fretting olayı altında bulunan makina elemanlarının yorulma dayanımlarında ve kullanım sürelerinde önemli derecede azalma gözlenir (Waterhouse 1981; Bryggman *et al.* 1986; Zhang *et al.* 1989; Szolwinski *et al.* 1996). Yapısal elemanların kullanım sürelerini önemli oranda düşüren fretting yorulma hasarına; helikopterler, sabit kanatlı uçaklar, trenler, gemiler, otomotiv, kamyon, otobüs, tekerlek-aks bağlantıları, dişliler, şaftlar, mafsallar, perçinli ve civatalı bağlantılar, metal halatlar, demiryolu rayları, tarım makinaları, motorlar, yapım ekipmanları, ortopedik implantlar ve roket motorlarındaki parçalarda sıkça rastlanmaktadır (Hoepfner *et al.* 1992).

Waterhouse (1984), Broszeit *et al.* (1985), temas eden iki yüzey arasında oluşan küçük genlikli (yaklaşık 10^{-6} cm) titreşimli rölatif hareket neticesi sürtünmeden dolayı oluşan, aşınma ve yorulmayı fretting olayı olarak ifade etmişlerdir. Hamdy and Waterhouse (1982)'a göre, aşınma neticesinde oluşan kalıntıların sürtünen yüzeyler arasında kalması malzemede oluşacak hasar oluşumunun hızlanmasına yol açar. Fretting'in diğer bir tanımında ise, küçük genlikli salınımlı izafi harekete sahip iki yüzey arasında oluşan bir aşınma süreci olduğu ifade edilmiştir.

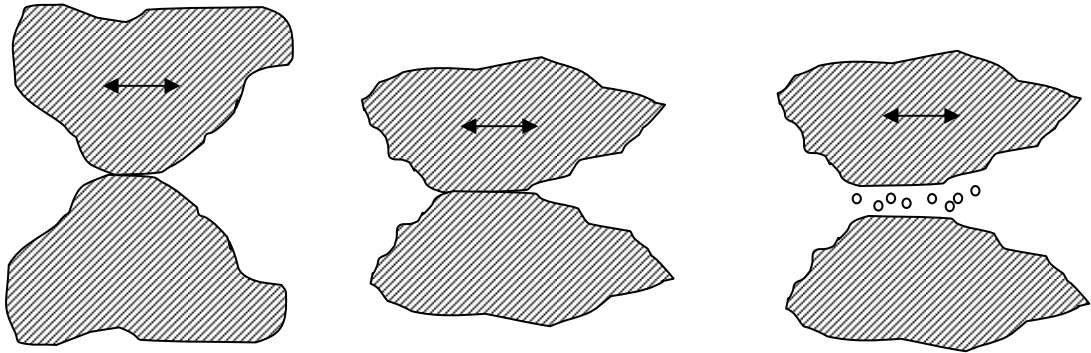
Fretting olayı, malzemenin hasar görmesine neden olan üç temel mekanizma ile tanımlanabilir (Fenner 1958). Bunlar fretting aşınması, fretting yorulması ve fretting korozyonudur. Şekil 2.2'de temel fretting modelleri gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Temel fretting modelleri

2.2.1. Fretting aşınması

Fretting aşınması; dönel fretting neticesinde meydana gelen ve yüzeyin hasar görmesiyle sonuçlanan bir mekanizmadır. Aşınma Şekil 2.3'te gösterildiği gibi abrasiv özelliktedir.



Şekil 2.3. Fretting aşınmasının şematik gösterimi

İlk olarak Eden *et al.* (1911), yorulma makinalarının numuneyi tutan çenelerinde oksit kalıntıları tespit ederek fretting aşınmasından söz etmişlerdir. Daha sonra Tomlinson (1927), fretting oluşumunu hızlandıracak bir düzenek oluşturarak demir ile havanın

kimyasal reaksiyonu sonucunda demir oksit oluşumunu “Fretting Corrosion” olarak tanımlamıştır. Iyer and Mail (2001) yaptıkları çalışmada yüzey molekülleri arasındaki kohezif kuvvet neticesinde kopma ve akabinde oksitlenme meydana geldiğini açıklamışlardır.

Fretting aşınması, fretting yorulmasından farklı olarak yüzeylerin fretting yorulmasına göre daha büyük genlikli (20–75 μm) sürtünmesi sonucunda ve normal yükten daha düşük yüklerde oluşur (Koenen *et al.* 1996). Fretting aşınması yüzeye fretting yorulmasından daha fazla hasar verme eğilimindedir. Fretting aşınmasının ilk evresinde temas yüzeyinde aşınma kalıntıları oluşur. Meydana gelen bu aşınma kalıntıları oksitlenirler ve orijinal yüzeyden daha sert olabilirler. Bu oksitlenmiş parçacıklar yüzeyde çizik ve çukurcuklar oluşturarak malzemede oluşan hasarı hızlandırırlar (Antoniou and Radtke 1997). Daha sonraki dönemde sürtünme sonucu izler ve materyal transferi meydana gelebilir. Yüzeyde meydana gelen bu hasarlar mikro çatlakların oluşumuna öncülük edebilir. Ancak yüzeye uygulanan yük veya gerilmenin düşük olması durumunda fretting aşınmasından dolayı yüzeyde oluşan mikro çatlakların, malzemenin tamamen kırılmasına neden olan ana çatlağın oluşmasına sebep olmayabileceğini belirtilmiştir (Iyer and Mail 2000).

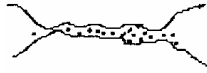
Temasta bulunan yüzeylerde sadece pürüzlerin uçları birbirleriyle temas halindedir. Ancak temas yüzeyine basınç uygulandığında yüzeydeki pürüzlerin uçları lokal olarak akma mukavemetini aşar ve bunun neticesinde temas alanı artar. Temasta bulunan yüzeyler arasında bağıl kayma hareketi neticesinde yüzeydeki oksit tabakası kırılır, metal metale sürtünerek aşınmaya yol açar (Brady 1990). Aşınan partiküllerin araya girmesi sonucu abrazyon aşınması, hareket salınımlı ise fretting aşınması meydana gelir (Chakravarty *et al.* 1995). Bağıl hareket yüzeydeki oksit filminin kırılmasına sebep olur ve yüzeylerin pürüz uç noktaları birbirine kaynak olur. Bağıl hareket neticesinde kaynak olan noktalar koparak deformasyon setleşmesine uğrar ve hızla oksitlenerek yüzeyden kopmuş olan oksit tabakasıyla birleşir. Daha sonra bu kalıntılar bir yerde toplanırlar. Sürekli büyüyerek geniş bölgeleri kaplar ve abrasif aşınma oluştururlar. Aşınma

bölgeleri birleşerek mikro çukurcuklar oluşturur. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi bu mikro çukurcuklar birleşerek daha derin çukurlar oluştururlar.

Fretting aşınması; çevrim sayısı, normal yük, frekans, kayma genliği, yüzey sertliği, çevre şartları ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerden etkilenmektedir.



a) Temas alanında parçacıkların kopması



b) Kopmanın devamı ve parçacıkların bir araya toplanması



c) Abrasiv aşınma kalıntısı yayılması



d) Mikro çukurcukların oluşumu

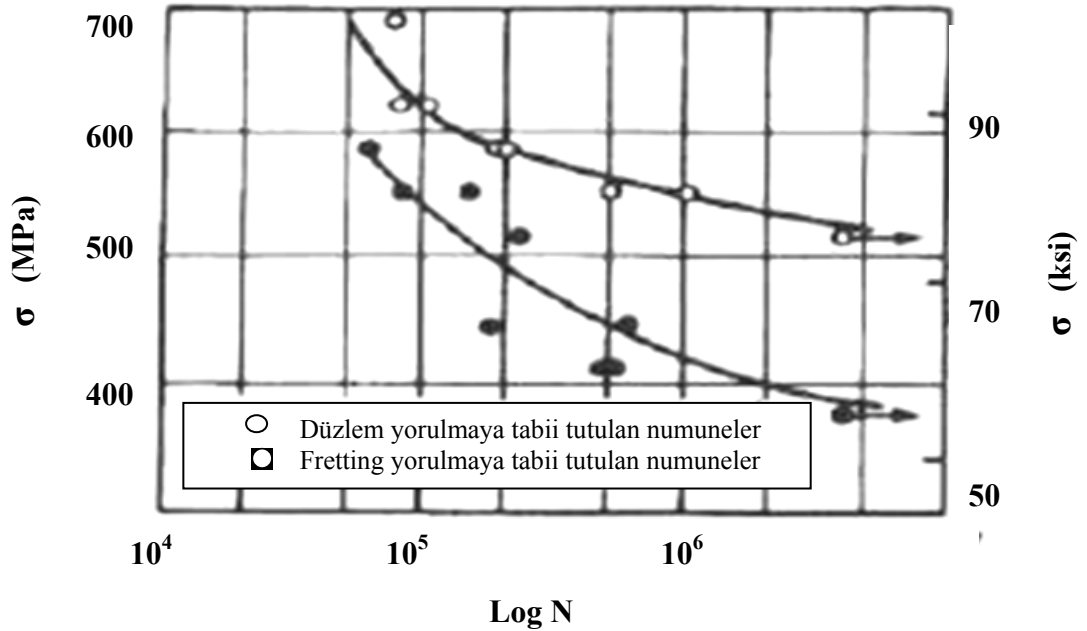
Şekil 2.4. Fretting aşınma süreci (Brady 1990)

2.2.2. Fretting yorulması

Fretting mekanizmasının oluşumuna neden olan titreşim hareketi, tekrarlı bir yükleme ile elde edilirse proses fretting yorulması olarak adlandırılır. Fretting yorulması; fretting nedeniyle bir elemanın yorulma ömründeki azalma olarak tanımlanabilir. Fretting şartları altında yorulma mukavemeti ciddi bir şekilde düşer. Düzlem yorulma durumu ile karşılaştırıldığında Şekil 2.5'de gösterildiği gibi yorulma mukavemeti tahmini olarak %40-60 oranında düşer.

Yorulma 1941'e kadar geçen sürede, fretting ile beraber araştırılmamıştır. Yapılan bazı çalışmalarda fretting nedeniyle yüzeyde oluşan çizik ve çukurcukların yorulma

dayanımında yaklaşık olarak %13–17 azalmaya sebep olabileceği Warlow Davies (1941) tarafından ileri sürülmüştür.



Şekil 2.5. AISI 4130 çeliğinin fretting'siz ve fretting'li yorulma ömürlerinin karşılaştırılması

Daha sonra yapılan araştırmalar, fretting ve yorulmanın birlikte meydana gelmesi halinde malzemenin mukavemet azaltma faktöründe, 2 ile 5 kat arasında bir azalmaya sebep olabileceğini göstermiştir. Bu faktör fretting'siz yorulma dayanımının, fretting'li yorulma dayanımına oranı olarak tanımlanır ve yorulma dayanımını, genellikle 10^7 çevrim sayısındaki değişken gerilme olarak tanımlamıştır (Waterhouse 1992).

Fretting, yorulmada çatlak başlangıç sürecini önemli ölçüde hızlandırır. Gerçekte çatlak başlangıcı toplam yorulma ömrünün %90'ını teşkil ederken, fretting yorulmasında ise çatlak başlangıcı yorulma ömrünün sadece %5'ini teşkil edebilmektedir (Fenner and Field 1958). Özellikle gaz türbini, motor elemanları gibi yüksek çevrimli yorulma etkisine maruz kalan parçaların fretting yorulmasından önemli ölçüde etkilenir (Hamdy and Waterhouse 1982; Ruiz *et al.* 1984).

Fretting yorulması, fretting aşınmasına göre daha küçük yer değiştirmeler oluşturma eğilimindedir. Bu tipik olarak 20 µm den daha azdır. Fretting yorulmasıyla fretting aşınmasının yüzeyde oluşturduğu hasar arasında bir fark olmamasına rağmen fretting aşınmasının yüzeye daha fazla zarar verdiği gözlenmiştir (Privett and Fujishiro 1994; Koenen *et al.* 1996).

2.2.3. Fretting korozyonu

Yine yük altında ve temas halinde bulunan yüzeylerin bağıl hareketi neticesinde meydana gelen korozyon ürününün abrasive etkisi ve korozyonun bileşimi ile meydana gelen bir olaydır. Çalışma sırasında titreşen ve küçük salınım yapan makina elemanlarında sıkça görülür. Fretting aşınmasının ve korozyonun birleşik etkisiyle ortaya çıkar ve temas halinde buluna makina parçalarında fretting korozyonu sayısız hasarlara neden olur. Malzemelerin yüzeylerinin kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan oksidasyon fretting aşınmasının ve fretting yorulmasının sebep olduğu hasarı hızlandırır. Fretting korozyonunun oluşumu, çok çeşitli sebeplerden kaynaklansa da fretting aşınması ve fretting yorulmasından bağımsız düşünülmemelidir.

2.3. Fretting yorulma teorileri

Fretting'in aşındırma etkisini ve bunun yorulma ömrünü azalttığını açıklayan çok sayıda teori geliştirilmiştir. Fretting yorulmasının ellinin üzerinde etkisinin olduğu Dobromirski (1992) tarafından rapor edilmiştir. Bu etkilerden bazıları önemli sonuçlar doğurabileceği gibi bazıları dikkate alınacak sonuçlara yol açmaz. Örneğin, fretting yorulması, yorulma ömrü açısından çok da önemli olmayan, çatlakla sonuçlanmayan ancak ciddi yüzey aşınmalarına sebep olabilir. Bu nedenle fretting yorulmasını açıklayan teoriler, uç durumlar ile az etkili olabilecek durumlar arasında yeterince esnek olarak ortaya atılmıştır.

Genel kabul gören fretting yorulma teorilerinden biri, küçük debrislerin oluşturduğu mikro kaynaktır ve Chakravarty *et al.* (1995) tarafından açıklanmıştır. Mikro seviyedeki yorulma çizgileri veya düzensiz yüzey görüntüleri ile tanımlanabilir. Daha pürüzlü ya da daha az parlatılmış yüzey uygulamalarında oluşan yorulma çizgileri daha derin ve kaba olur. Temas eden yüzeyler arasında oluşan yorulma çizgileri birbirini çeviren iki dişli çarkın dişilileri gibi karşılıklı birbirinin simetriği şeklinde olacaktır. Her bir tur yüklemde bir adet yorulma çizgisi oluşacaktır. Fretting yorulmasında temas yüzeyinin tekrarlanan soyulmaya zorlanmasıyla korumasız kalan materyal yorulmaya maruz kalacak, oksitlenecek ve süreç bu şekilde tekrarlanacaktır. Waterhouse (1992), bu süreçten fretting oksidasyonu olarak bahsetmiştir. Waterhouse (1992)'a göre, malzeme korumasız kaldığında, direk metalden metale temas artışı oluşacak ve pürüzlerin birbirine sürtünmesiyle açığa çıkan ısı malzemenin sıcaklığını artıracaktır. Sonuç olarak hareketli gerilme plastik deformasyona sebep olacak ve yüzeydeki yorulma çizgilerinde ayrılmalar başlayacaktır. Eğer çiziklerde ayrılmalar başlamazsa temastaki iki materyal arasında materyal transferi olacak, yer değiştirmeler küçük olduğundan, sürtünme yüzeyinde aşınma parçacıkları kalacak ve bu parçacıklar bir araya gelecektir. Toplanan bu parçacıklar daha sonra oksitlenerek ana malzemeden daha sert olan kalıntılar haline gelerek 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. Privett and Fujishiro (1994) ile Koul *et al.* (1996) bunun sebebinin, fretting yorulmasını etkileyen çok sayıda etkenin olmasından ve bunların çoğunun birbirinden bağımsız olarak gelişmesinden kaynaklandığını belirtirler. Bunlardan bazıları yüzeye dik olarak uygulanan normal yükleme, yüzey işlemi ve çevre şartlarıdır.

Fretting yorulmasını etkileyen çeşitli etmenlerin bağımsız doğası, ele alınan malzeme, çevre ya da yük şartları için, önleyici tedbir olarak ampirik metotları temel alır. Ruiz and Chen (1986)'in çalışmaları, keskin makina parçaları ve disk bileşimlerinde muhtemel fretting yorulma çatlakları ve lokasyon tahminleri için ampirik kriterlerin

geliştirilmesine öncülük etmiştir. Mevcut enerjiyi dikkate alarak fretting'e sebep olan ve aynı noktada verilen; τ kesme gerilmesi, δ kayma gerilmesi, σ maksimum çekme gerilmesiyle ilgili olarak σ , τ , δ sonuç kıstasları geliştirilmiştir. Temas yüzeyi boyunca çatlak başlangıcı için σ , τ ve δ en yüksek değere ulaşır. Ruiz *et al.* (1984 ve 1986)'a göre ayrıca σ , τ ve δ pik değere ulaşınca kadar çatlak başlamayacaktır. Waterhouse (1992), bu kıstasları çelik çubuk ve düz levha için uygulamış ve σ , τ , δ vasıtasıyla çatlak yerini kesin olarak tahmin edebilmiştir.

2.4. Temas mekaniği

Temas mekaniği fretting şartlarının sağlandığı durumda yüzeyler arasında mevcut temas şartlarının tanımlanmasıyla fretting'in oluşturduğu hasarın gelişimini anlamada önemli bir rol oynar. 1982'de Hertz'in geliştirdiği teori pek çok yerde uygulanan temas problemlerinin çözümünde hala çok sık olarak kullanılmaktadır. Fakat teoride pek çok kabul bulunduğundan kullanımı sınırlandırılabilir. Hertz tarafından yapılan kabuller aşağıda özetlenmiştir:

- (1) Yüzey süreklidir,
- (2) Strainler küçüktür,
- (3) Malzemeler arasındaki yarı boşluk elastik davranır,
- (4) Yüzey sürtünmesizdir.

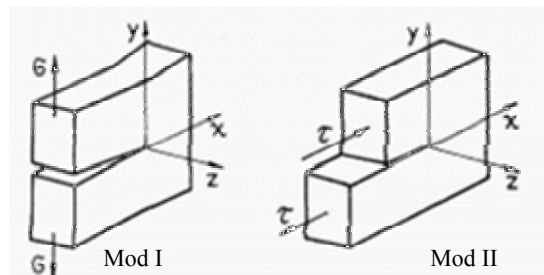
Küçük şekil değiştirmelerin kabulünü yerine getirmek için malzemenin elastik sınırları içerisinde kalacak şekilde lineer elastisite teorisi uygulanır. Temas halindeki malzemeler arası yarı boşluğun elastik olduğu kabulü ele alındığında temas gerilme bölgesi malzeme sınırlarının yakınlığından ciddi bir şekilde etkilenmez. Yüzeyler arasında sürtünme olmadığı kabulü yalnızca temas yüzeyleri arasında normal (dik) kuvvetlerin geçişi sırasında geçerlidir. 20. yüzyılın ikinci yarısında temas mekanizmasıyla ilgili çalışmalar, bu sınırlamalarla yüz yüze oldu.

Fretting sırasında meydana gelen temas durumlarını şu şekilde sıralayabiliriz. a) Tam Kayma Durumu (Full Slip); temas kenarlarında gerilme konsantrasyonlarının bulunmaması durumudur. b)Yapışma (kaymama) durumu (no-slip); $\tau < \mu\sigma$ şartı sağlandığı sürece bu durum geçerlidir. Bu kısımda parçaların birbirine yapışması (adhezyonu) söz konusudur. c) Kısmi kayma durumu (Partial Slip): her iki durumu da içine alan kayma durumudur.

2.5. Fretting yorulması esnasında çatlak oluşumu ve gelişimi

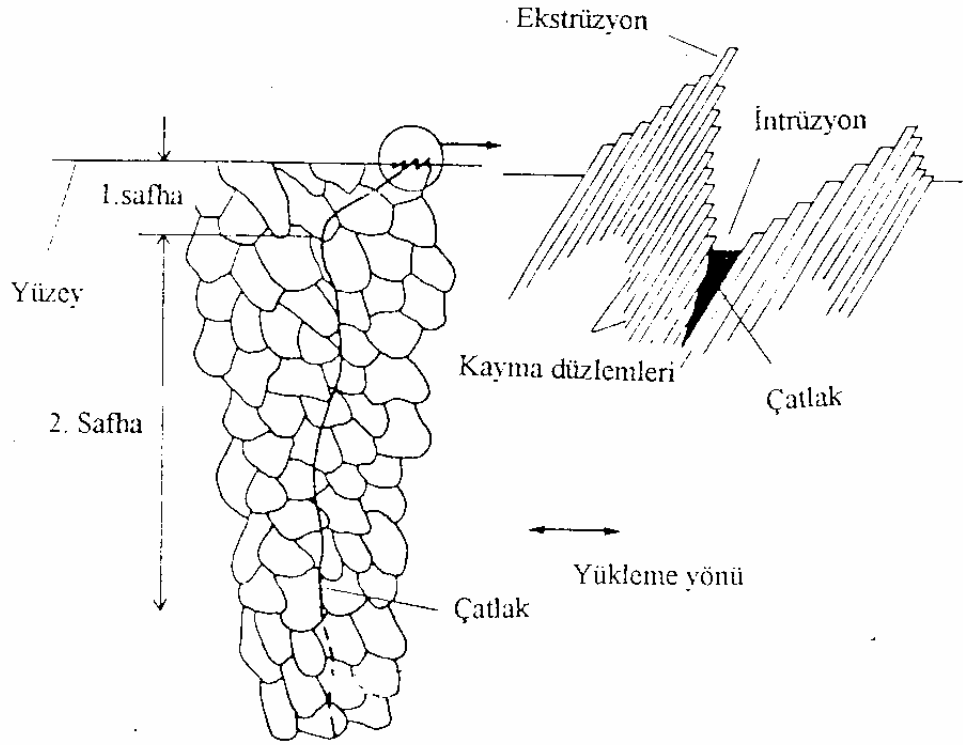
Fretting yorulması esnasında, çatlaklar çok düşük gerilmelerde başlayabilir ve bu değerler, düzlem yorulma uygulanmış numunelerin yorulma limitinin oldukça altındadır. Düzlem yorulmada küçük çatlakların başlangıcı, toplam ömrün %90'ını temsil ederken fretting yorulması birkaç bin çevrim içinde mikro çatlakların oluşmasına neden olabilir. Bu şekilde yorulma ömrünün önemli bir şekilde azaldığı bilinmektedir. Fretting nedeniyle oluşan çatlaklar, genellikle kolay bir şekilde saptanamazlar.

Fretting bölgesinde yorulma çatlak başlangıcı temel olarak yüzeydeki gerilme durumuna bağlıdır. Bu gerilmelerin oluşumuna ise yüksek sürtünme neden olur. Yorulma çatlağının başlama yeri, temas durumuna bağlıdır. Tam Kaymada aşınma bölgesinin herhangi bir yerinde başlar. Kısmi kaymada ise Kayma-yapışma sınır bölgesinde başlar. Çatlak ilerlemesi Şekil 2.6'da görüldüğü gibi başlangıçta kayma Mod II şartları altında meydana gelir ve daha sonra Mod I şartları daha baskın hale gelir.



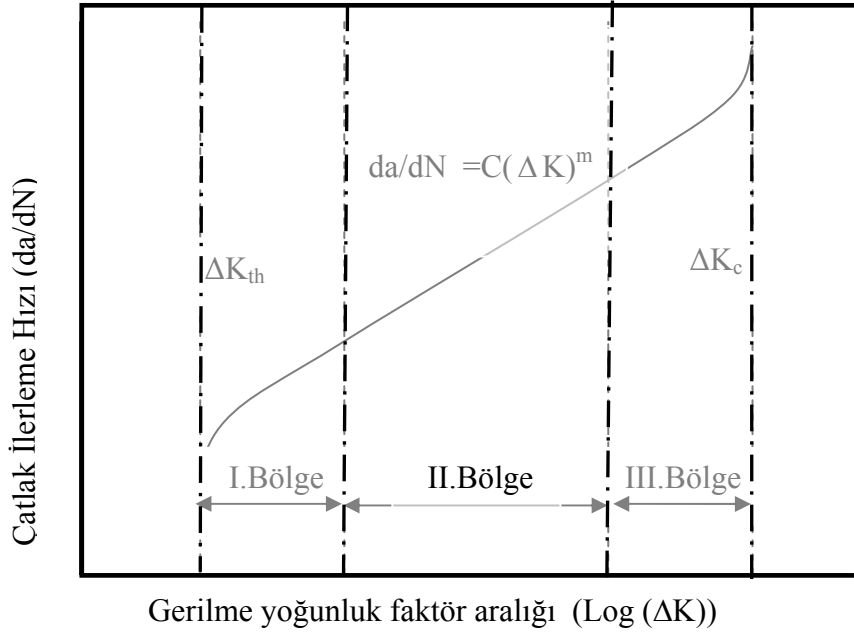
Şekil 2.6. Kırılma tipleri

Yorulma çatlak gelişimi Şekil 2.7 ve 2.8’de gösterildiği gibi temsil edilebilir. Waterhouse (1981 ve 1992)’un yaptığı çalışmalar fretting’in çatlak oluşumunda oldukça etkili olduğunu (I. Bölge) göstermiştir. Burada çatlak gelişimi kısaca izah edilmiştir.



Şekil 2.7. Çatlak oluşumunun şematik gösterimi

Çatlak ilerlenmesi malzemede kritik bir gerilme yoğunluğuna ulaşıldığında başlar. Sabit genlikli yük altında çatlak boyu (a) ve devir sayısı (N_f) arasında ilişki vardır. Bannantine *et al.* (1990)’e göre numunenin yorulma ömrünün büyük bölümünde çatlak boyu kısa, gerilme değerinde $\Delta\sigma$ kadar düşme olduğu ve çatlak büyümesinde düşüş olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2.8. Çatlak gelişimi sırasında oluşan bölgeler

Tipik olarak çatlak gelişiminin logaritmik oranı, da/dN , Şekil 2.8’de gösterilen, ΔK , gerilme yoğunluk faktörünün logaritmik oranına karşı ele alınmıştır ve ΔK aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} - \sigma_{\min} \sqrt{\pi a} = f_{(g)} \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (1)$$

Burada;

$K_{\max}$ ve $K_{\min}$: maksimum ve minimum gerilme yoğunluğu,

$f_{(g)}$: çatlağın boyu ve geometrisine göre ele alınan bir doğrulma faktörü,

$\Delta \sigma$: $\sigma_{\max}$ ve $\sigma_{\min}$ arasındaki gerilme aralığı,

a : çatlak boyudur

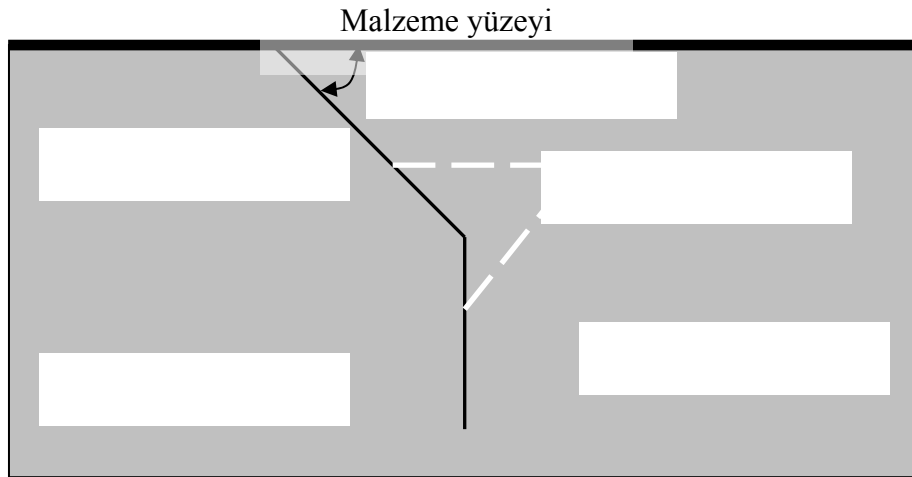
Şekil 2.8’deki ΔK_{th} çatlak ilerlemesinin oluşmayacağı eşik gerilme yoğunluğu değeridir ve buraya kadar çatlak ilerlemez. K_c ise malzemenin kırılma tokluğudur ve çatlak bu değere ulaştığı zaman hızla ilerler.

Çatlak gelişimi $\log (da/dN)$ ile $\log \Delta K$ arasında (II bölgede) baskın bir şekilde lineer olarak gerçekleşir. Bu bölgeyi modelleyen çok sayıda eşitlik vardır ki referans (Bannantine *et al.* 1990) da gösterildiği üzere Paris tarafından aşağıdaki bağlantı verilmiştir ve Paris eşitliği diye bilinir.

$$\frac{da}{dN} = C.(\Delta K)^m \dots\dots\dots (2)$$

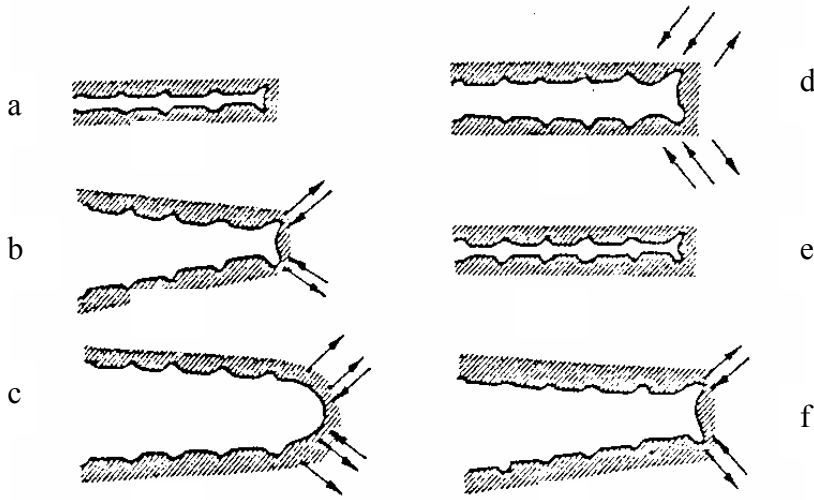
Burada C ve m materyal sabitleridir ve m da/dN - ΔK eğrisinin eğimidir.

Waterhouse (1981) çalışmalarında, çatlak ucuna uygulanan kuvvetli çekme gerilmesinin II. Bölgede çatlakla dik uygulanan yük ile çatlak gelişimini artıracakını belirtmiştir ve bu durum Şekil 2.9'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9. I. ve II. Bölgede çatlak ilerleyişinin gelişimi (Waterhouse 1981)

III. bölgede çatlak gelişimi hızlıdır ve dengesizdir. Sines and Waisman (1959) ile Bannantine *et al* (1990)'ın ifade ettikleri gibi bu bölge malzemenin toplam yorulma ömrünün küçük bir bölümünü oluşturur ve genellikle kırılmaya kadar ki çevrim sayısı ' N_f ' tahmin edilemez.



Şekil 2.10. II. Bölgede çatlak gelişimi

Şekil 2.10'da yorulma şartlarında plastik kütleşmeyle meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 2.10 a)'da çatlak tipi yük çevriminin başlangıcında keskindir. Çekme gerilmesi çatlak düzlemine 45^0 'lık bir düzlem boyunca kayma yoğunlaşır (Şekil 2.10 b). Çatlak plastik kayma gerilmesi etkisiyle daha da ilerler ve çatlak tipinde bir kütleşme meydana gelir (Şekil 2.10 c). Uygulanan yük kayma doğrultusunda basmaya dönüştüğünden en son bölge değişir (Şekil 2.10 d). Yorulma çatlak, bu düzlem boyunca ilerleyerek malzemede kırılma meydana gelinceye olay devam eder (Alsaran 1997).

Fretting olayı, çatlakın daha erken başlamasını sağlar ve özellikle I. Bölgedeki çatlak gelişimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Çatlakın erken başlaması fretting'in sebep olduğu yüzey hasarı tarafından tetiklenir. Fretting'in ilk evresinde metal çifti arasında oluşan çapaklar yüzeyde çukurcuklar ve karıncalanmaya sebep olur. Chakravarty *et al.* (1995)'e göre bu durum yüzey gerilmesinin yükselmesine sebep olur. Waterhouse (1981 ve 1992), durumla ilgili olarak aşağıdaki açıklamalarda bulunmuştur. Fretting tarafından üretilen yerel kesme gerilmesinin olduğu bölgedeki gerilme etkili bir şekilde artarak bir çatlak başlatmak için yeterli enerji seviyesine yükselebilir. Yorulma çatlak başlangıcı, maksimum kesme gerilmesinin yönlendirildiği yönde, yüzeye göre yaklaşık 45^0 açı ile ilerleme eğilimindedir ve bu durum şematik olarak Şekil 2.9'da

verilmiştir. Fretting'in neden olduğu çatlak, I. Bölgenin gelişimi esnasında genellikle yüzeyin normaline $35^0 - 50^0$ açı ile oluşmaya meyyleder. Bununla birlikte fretting yorulmasının sebep olduğu çatlağın I.Bölgedeki uzunluğu, fretting'siz standart normal yorulma şartlarında oluşan çatlağa göre daha fazladır. İki yüzey arasında bir kayma oluşur, yerel sürtünme katsayısı sabit hale gelir ve fretting aşınması kırılma karakteristiğinde baskın hale gelir. Bu sürtünme hasarına ve yüzey lekelerine sebep olur.

2.6. Fretting yorulmasına etki eden faktörler

Fretting yorulma çatlağı; malzemelerin mekanik özelliklerinden ve çevresel faktörlerden oldukça etkilenir. Karşılıklı olarak birbiriyle ilişkili olan bu faktörler son derece karmaşık olan fretting yorulması olayını etkiler. Bu faktörleri,

a) Bağıl kayma , b) temas yükü (basıncı), c) frekans, d) kayma genliği, d) artık gerilmeler, e) yüzey özellikleri, f) ortam, g) sürtünme katsayısı, h) sıcaklık, ı) çevrim sayısı, k) bağıl nem olarak sıralayabiliriz.

2.6.1. Bağıl kaymanın etkisi

Birbirleriyle temas halindeki iki bileşen arasındaki bağıl kayma, diğer parametreler tarafından da etkilenen ve çatlak oluşumunda önemli etkiye sahip olan kararsız bir durumdur.

Bağıl kayma temasta bulunan yüzeyler arasında üç farklı şekilde meydana gelebilir. Temas yüzeyleri arasında herhangi bir kayma hareketi meydana gelmediğinde, temas durumu yapışma şeklindedir ve yüzeyde fazla hasar meydana gelmez. Kayma ve yapışma bileşimi aynı anda mevcut olduğunda kısmi kayma şartları meydana gelir. Öte

yandan temas yüzeyinin her noktasında bir kayma hareketi meydana gelirse, tam bir kayma durumu oluşur ve yüzeyde kopmaların olduğu aşınmaya doğru bir geçiş görülür.

Fretting yorulma ömrü, izafi kayma genliğindeki bir yükselmeyle, başlangıçta düşerek bir minimum değere ulaşmakta, sonra tekrar yükselmekte ve nihayet sabit bir değere ulaşmaktadır. Ayrıca İzafi kayma genliğinin 10- 30 μm arasındaki değerlerinde yorulma ömrü minimum değerini almaktadır.

2.6.2. Temas basıncının etkisi

Materyallerin fretting yorulma dayanımını etkileyen en önemli faktörlerden birisi temas basıncıdır ve fretting aşınması artan temas yükü ile beraber lineer bir şekilde artacaktır.

Waterhouse (1992), iki yüzey arasındaki sürtünme katsayısıyla orantılı normal yükün, yüzey pürüzlülüğünün ve her bir yüzeyde oluşan plastik deformasyonun, τ gerilmesi üzerinde etkili olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca Koul *et al.* (1996)'da fretting'in oluşturduğu hasara etki eden normal yükün, iki yüzey arasındaki kayma miktarını etkilediğini ifade etmiştir.

Waterhouse (1992)'a göre fretting yorulması oluşmadan önce bir minimum normal yüke gerek vardır. Bu minimum yükün altındaki yük değerinde fretting aşınması baskın durumdadır ve yüzeyde önemli hasara sebep olmaz. Antoniou and Radtke (1995)' ye göre yükün bir de maksimum noktası vardır ki yükün bu değer üstünde olması yorulma ömründe daha fazla azalmaya sebep olmaz.

Temas basıncının yükselmesiyle, yorulmada çatlak başlangıcına bağlı olan yorulma dayanımı düşer. Fakat fretting yorulmasındaki bu düşüş belli bir temas basıncı değerine ulaştıktan sonra, neredeyse sabit bir değerde kalır. Bu durum, daha yüksek temas basınçlarında çatlağın hala oluştuğunu fakat muhtemelen yükün oluşturduğu bası gerilmesinden dolayı çatlak ilerlemesinin durduğunu gösterir. Yorulma ömrü, temas

basıncının artmasıyla başlangıçta düşer ancak minimum bir değere ulaştıktan sonra temas basıncının yükselmeye devam etmesi halinde tekrar artmaya başlar. Öte yandan çok yüksek temas basıncı değerlerinde yorulma ömründeki bu yükselişin sebebinin, yüksek bası normal gerilmelerinden dolayı çatlakta kapanma etkisinin oluşmasından kaynaklandığı söylenebilir ve bu nedenle çatlak ilerlemesi yavaşlamaktadır.

2.6.3. Sürtünme katsayısının etkisi

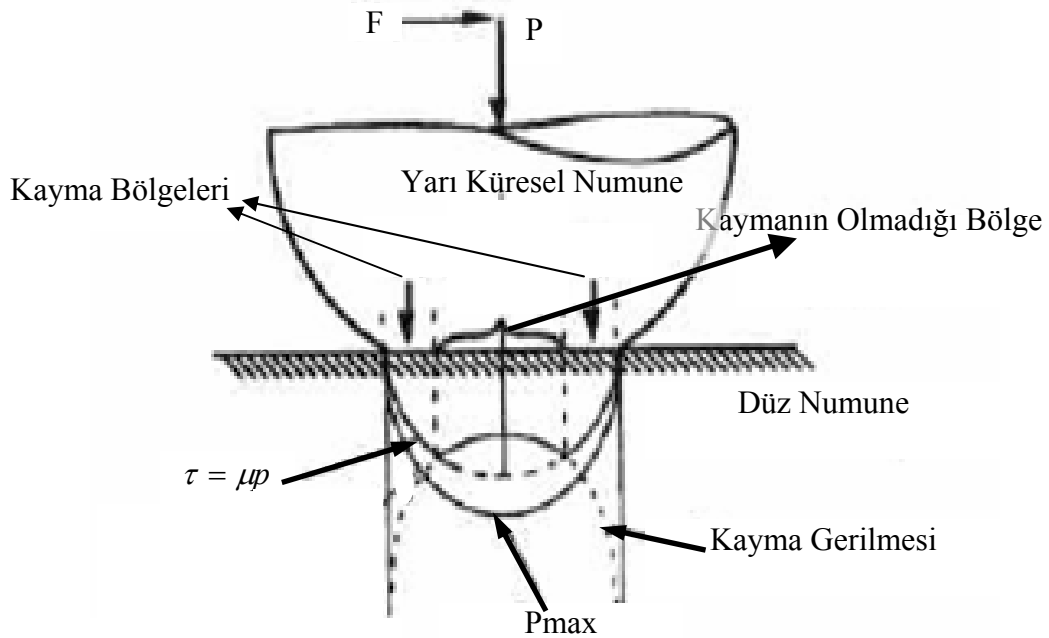
Fretting yorulmasına etki eden en önemli faktörlerden birisidir. Farklı malzeme kombinasyonlarının fretting yorulma ömrüne etkisi, sürtünme katsayısının bir sonucu olarak incelenmiştir.

Teorik olarak sürtünme katsayısının değeri sıfır ile sonsuz arasında olabilir. Hareketsiz iki yüzey arasında hesaplanan sürtünme katsayısına; statik sürtünme katsayısı, hareketli yüzeyler arasında kinetik sürtünme katsayısına ise kinetik sürtünme katsayısı denir. Genel olarak, belirli bir zaman dilimindeki aşınma miktarı, sürtünme katsayısıyla ilgilidir. Birbiriyle temas halinde bulunan malzemeler arasındaki sürtünme katsayısını azaltmak fretting yorulma dayanımını artırır. Sert yüzey kaplamaları, yumuşak kaplamalara göre daha düşük sürtünme katsayısı oluşturma eğilimindedir. Bununla birlikte bazı sert yüzey kaplama işlemleri yorulma ömrü üzerinde zararlı etki de oluşturabilir. Öte yandan bazı yumuşak kaplamalar da yüzeylerde yağlayıcı görevi görerek daha düşük bir sürtünme katsayısı sağlayabilirler.

Sürtünme katsayısındaki azalma aşınmayı da azaltır. Ancak fretting aşınmasındaki azalma her zaman fretting yorulma ömrünün de artacağı anlamına gelmez. Ancak temas halinde olan iki yüzey arasındaki daha yüksek sürtünme katsayısı ya da yüzey pürüzlülüğü fretting yorulmasını artırır (Privett and Fujishiro 1994).

2.6.4 Kayma genliğinin etkisi

Fretting'in görölmediği ölçülebilir bir genlik değeri yoktur. Fretting aşınma kaybı genlikle artar. Genliğin etkisi lineer olabilir veya belirli bir eşik değeri genliğin üzerinde aşınma hızlı bir artış gösterebilir. Genel olarak yüzeyler arasında; kısmi kayma ve toplam kayma olmak üzere iki farklı tipte kaymadan söz edilebilir. Malkin *et al.* (1972) ve Ruiz *et al.* (1984), dönel (tekrarlanan) kaymanın büyük oranda fretting'in oluşturduğu hasarın miktarını ve tipini etkilediğini ifade etmişlerdir. Mindlin (1949) ise Şekil 2.11'de gösterildiği gibi iki farklı kayma tipini analiz etmiştir. Mindlin düz bir malzemenin üzerine yarı küresel bir numune ile bir P normal yükü ile bir de F kesme yükü uygulamıştır. Dairesel temas yüzeyindeki basınç dağılım bölgesi yarım küreyle temsil edilmiştir. Merkezde $P = \text{maksimum}$, çevrede ise $P = \text{sıfır}$ değerini almaktadır. Eğer sürtünme katsayısı sıfır değil ise, " τ " ile temsil edilen kesme gerilmesi, merkezde minimum iken kenar çizgisinde maksimumdur.



Şekil 2.11. Mindlin diyagramı (Waterhouse 1992)

Sürtünme katsayısı μ , sabit kabul edilmiştir ve 1 den küçüktür. Eğer normale göre açılı olarak bir F kuvveti uygulandığında harekete karşı, μp , sürtünme kuvveti direnç gösterir. Temas yüzeyine uygulanan kuvvet, sürtünme direncinden daha büyüktür. Öte yandan merkeze doğru sürtünme kuvveti, uygulanan kuvveti geçtiğinden kayma olmayacaktır. Kayma olayının oluşma sınırı, çatlak başlangıcının en çok görüldüğü bölgedir (Waterhouse 1989). Bununla birlikte eğer fretting yorulmasına bağlı hasar oluşumu devam ederse, sürtünme katsayısının değişmesinden dolayı kayma sınırı da değişir.

2.6.5. Frekansın etkisi

Frekansın normal yorulma deney sonuçlarına etkisi tam olarak saptanamamıştır. Deney cihazlarının çoğunda uygulanan 200-10000 çevrim/dakika'lık frekansın deney sonuçlarını pek etkilemediği kabul edilmektedir. Ancak bazı malzemelerde çok yüksek deney hızlarında yorulma dayanımı sınırının da yükseldiği görülmüştür. Çok düşük deney hızlarında da yorulma dayanımını sınırının azaldığı kabul edilmektedir. Diğer yandan çok yüksek frekanslarda oluşan ısıların kısa zamanda yayınamaması, yorulma sonuçlarını olumsuz yönde etkilemektedir.

Ancak Waterhouse (1992), uygulanan yükün frekansının malzemenin veya test numunesinin yorulma ömrünü etkilediğini açıklamıştır. Sabit bir gerilme değerinde uygulanan yükün frekansı, kırılma devir sayısını etkilemektedir.

Malzemeye düşük frekanslarda ve korozyif bir ortamda yük uygulandığında, çevre şartlarından etkilenen malzemenin yorulma ömrü azalacaktır (Bannantine *et al* 1990). Yüksek frekansta ise malzemenin ısı dağıtma kabiliyetine bağlı olarak malzemenin iç tabakalarında dinamik ısınma etkisi oluşabilir. Bu ısınma yüzeydeki koruyucu tabakanın tipik olarak görülmeyecek şekilde tahrip olmasını tetikleyebilecek potansiyele sahiptir.

2.6.6. Ortamın etkisi

Normal koşullarda yorulma olaylarında çatlak oluşumu yüzeyde başlar. Bu yüzeyin temas ettiği ortam, malzemenin yorulma özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle fretting yorulmasının zararlı etkilerine karşı malzemeyi korumak için bir yüzey modifikasyonu seçilirken çevre etkileri de dikkate alınmalıdır. Çevresel etkiler fretting yorulma ömründe pozitif veya negatif rol oynayabilir (Antoniou and Radtke 1995). Oksijenin bol olduğu ortamlar 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 sebebiyet verebilir. Bununla beraber oksijence zengin ortamda fretting yorulma direncinin daha iyileştiği görülen bazı malzemeler de vardır. Krom nikel paslanmaz çelikleri yüzeylerinde kararlı 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 de kendini doğal olarak tamir edebilmesidir. Malzemenin yapısından dolayı bakir malzemenin ilk koruyucu oksit tabakası fretting'in etkisiyle kazınarak bakir materyal yüzeyi ortaya çıkacaktır. Bu oksit tabakasının kazınması yüzeyler arasında sıcaklık yükselişindeki düşüş ile gözlenebilir (Waterhouse and Iwabuchi 1985; Waterhouse 1989). Ayrıca metalden metale sürtünme katsayısı azalır (Waterhouse 1989).

2.6.7. Yüzey özelliklerinin etkisi

Yorulmada özellikle eğme ve burma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda en yüksek gerilmeler yüzeyde olduğu için, yorulma olayı sırasında çatlak genellikle yüzeyde başlar. Yüzeyde başlayan yorulma çatlağının kendisi daha sonra çentik etkisi göstereceğinden gerilme konsantrasyonuna ve dolayısıyla çatlağın hızla ilerlemesine neden olur. Bu nedenle malzemelerin yorulma dayanımlarını arttırmak büyük ölçüde yüzey çatlaklarının oluşumunu engellemekle olur. Çatlağa engel olma yüzey özelliklerinin artırılması ile olur.

Malzemelerin yüzeylerine uygulanan işlemlerdeki gelişmeler ile yüzey gerilme yoğunluğunun azaldığı ve malzemenin yorulma ömründe bir iyileşme sağladığı bilinmektedir (Bannantine 1990; Waterhouse 1992).

Genel düşüncenin aksine, pürüzlü yüzey durumu fretting yorulma hasarını minimize etmek için uygun olabilir. Yani fretting yorulması açısından pürüzlü yüzey, düzgün yüzeye göre daha fazla direnç gösterme eğilimindedir (Waterhouse 1992). Bunun sebebi uygulanan yükün çok sayıda pürüzün üzerine dağılması olabilir. Buna rağmen yüzey pürüzlülüğünden dolayı dayanımın yükselişinin bir limiti vardır.

2.7. Malzemelerin fretting yorulma özelliklerini iyileştirme yöntemleri

Makina elemanlarında meydana gelecek hasarların teknik ve ekonomik açıdan en düşük düzeye indirgenmesi veya zorunlu hallerde tamamen önlenmesi için başvurulabilecek birçok önlem vardır. Uygun tasarım, ortamın özelliklerinin değiştirilmesi, yüzey işlemleri, gibi işlemleri bu önlemler arasında sayabiliriz. Buna paralel olarak hasarların veya bozunmaların etkisini asgariye indirmek ve yorulma ömrünü artırmak için çeşitli prosesler uygulanır. Örneğin yüzey sertliğini arttırmak ve yüzey pürüzlülüğünü azaltıp yüzeyi parlatmak, yüzeye kaplama işlemi uygulamak yorulma ve fretting yorulmasının etkisini hafifletmede kullanılan proseslerden bazılarıdır. Ancak yüksek sıcaklıkta yapılan bazı ısıl işlemler bası artık gerilmelerinde düşüşlere ya da çeki gerilmelerinde artışa sebep olabilir buda malzemelerin yorulma ömründe azalmaya yol açar (Koul *et al* 1996). Malzemelere uygulanan her bir işlem farklı üstünlüklere sahip olduğundan, etkisini en üst düzeye çıkarabilmek için birkaç proses birlikte de kullanılabilir. Seçilen proseslerin her biri tek başına yorulma ömrünü uzatabilir ya da aşınmayı azaltabilir. Ancak diğer süreçlerle beraber kullanıldıklarında farklı etki oluşturarak sonunda zararlı etkilere de sebep olabilirler.

Makina elamanlarına uygulanan yüzey modifikasyonlarının uygun olarak seçilmesi, potansiyel hasar görme mekanizmaları ve çalışma esnasındaki çevre şartları fretting

ömrünü etkileyen en önemli hususlardır (Koul *et al* 1996). Bir çalışma ortamında, fretting yorulmasında veya fretting aşınmasında azalmaya sebep olan bir çözüm, diğer bir çalışma ortamında aynı etkiyi oluşturmazabilir.

2.7.1. Uygun tasarım

Yorulmayı önleme yöntemlerinin en ucuzu olan uygun tasarım ile yorulmaya yol açan koşulların azaltılması veya tamamen giderilmesi mümkündür. Fretting hasarının minimuma indirilmesi tasarım aşamasında göz önüne alınarak yapılmalıdır. Bunu sağlamak için birbirleriyle temas eden yüzeylerden mümkün olduğunca kaçınılmalı, makina parçalarını tek parça olarak tasarlanmalı ya da kaynaklı bağlantılar gibi yöntemler düşünülmelidir. Ancak imalat süreci ile çalışma sırasında yapılacak bakım ve onarımların kolay ve uygulanabilirliği açısından bu imalat yöntemleri her zaman mümkün olmayabilir.

2.7.2. Yorulmaya dayanıklı malzeme seçimi

Çalışma şartlarına uygun malzeme seçimi fretting'in meydana getirdiği hasarın azaltılmasında çok önemli bir husustur. Temas halinde bulunan malzemeler sürtünmeleri sonucunda aşınım oluşturabilirler. Böyle bir durumda metallere biri diğeri içinde çözünerek katı eriyik oluşturabilir ki bu durum istenmeyen bir durumdur. Eğer sürtünme açısından birbirine uygun olan malzemeler tercih edilirse metaller birbirleri içerisinde aşınım oluşturmazlar. Şayet uygun malzeme kullanma imkanı yoksa makina parçalarına uygun yüzey işlemleri uygulanabilir.

2.7.3. Yağlayıcılar

Daha önceden de belirtildiği gibi temas halinde bulunan malzemeler arasında sürtünme meydana gelir. Bu sürtünme çok fazla iş absorbe eder ve bu iş kayma yüzeylerinde

kırılmaya veya ergimeye sebep olan ısınmaya neden olur. Sürtünmeyi azaltmak için birbiri üzerinde hareket eden yüzeyler arasındaki kayma, mümkün olan en kolay hale getirilmelidir. Yağlayıcılar metal metale sürtünmeyi ve oksitlenmeyi önlemek için sanayide yoğun olarak kullanılırlar ve fretting ile temasta olan malzemeler arasında katı bir sınır gibi işlev gösterirler (Chakravarty *et al* 1995). Yüzeyler arasındaki kalıntıları uzaklaştırmalarına rağmen yüzeyleri tam olarak birbirinden ayıramazlar. Katı yağlayıcı olarak (MoS_2) molibden di sülfat ve molibden di sülfatin, grafit kullanılabilir, (Waterhouse 1981). Yağlamanın avantajları şu şekilde sıralanabilir.

- 1) Materyale iyi yapışma,
- 2) Belirli sıcaklıklar arasında etkili koruma,
- 3) Düşük sürtünme katsayısı,
- 4) Kimyasallara ve korozyona karşı direnç,
- 5) Kendini yenileyen doğası.

2.7.4. Yüzey işlemleri

Yüzey işlemlerinin amacı; malzeme yüzeyinin sertliğini, aşınma direncini, sürtünme davranışını artırmak ve ortam ile etkileşimini azaltmaktır. Metal ve alaşımların yorulma dayanımını artırmanın en önemli yollarından biriside malzemenin yüzeyine uygulanan yüzey işlemleridir. Bu amaçla malzemelere uygulanabilecek yüzey işlemlerini kısaca aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

Mekanik sertleştirme

Malzemelerin aşınma ve yorulma ömrünü uzatmak için başvuru en etkili metotlarından biri mekanik sertleştirmedir. Bu işlemler yüzeyin sertliğini artırarak ve yüzeyde bası artık gerilmeleri oluşturarak yorulma çatlak başlangıcını oldukça geciktirir (U.S Patent 1963; Waterhouse and Sunders 1979). Bu işlemler sonucunda malzemelerin plastik deformasyon direnci artırılarak yorulma çatlak başlangıcı geciktirilir

(Chakravarty *et al* 1995). Birtakım işlem parametreleriyle ayarlama yapılarak bası artık gerilmeleri ve yüzey parlaklığı kontrol edilebilir. Yüzeydeki oksit tabakası uzaklaştırılarak parlak ve sert yüzey elde edilebilir (Koul *et al* 1996). Ancak bu işlemler sonunda malzemelerin yüzey pürüzlülüğü, diğer metotlara göre daha çok artar.

Yüzeylerin kaplanması

Metal ve alaşımların yorulma ve diğer özelliklerini iyileştirmek için başvurulan yöntemlerden biriside yüzeylerin kaplanmasıdır. Kaplamaları kısaca aşağıdaki gibi özetleyebiliriz.

Yumuşak kaplamalar

Yumuşak kaplamalar, bakır-nikel-indiyum (Cu-Ni-In), alüminyum, bronz (Al-Cu-Zn) ve saf bakır (Cu) ihtiva eden, fretting yorulmasından korumak için yaygın olarak kullanılan kaplamalardır. Plazma yoluyla spreyci şeklinde püskürtülerek yapılan 15 µm dan daha kalın bakır kaplama fretting yorulma ömründe önemli ilerleme sağlar (Broszeit *et al* 1985). Bu süreç, ne yazık ki iki yüzey arasına ince materyal yerleştirmek kadar ucuz değildir. Genellikle iki yüzey arasında koruyucu kalkan gibi çalışan bu metot etkili bir yöntemdir. Normal yük kaplamanın yüzeye tamamen yayılmasını önler ve materyalin korumasız kalmasına sebep olur (Broszeit *et al* 1985). Tam bir yumuşak kaplamada, krom ya da nikel kısmen uygulanabilir. Bunlar koruyucu oksit tabakasına yardım eder (Waterhouse 1989).

AISI 1045 çeliğini çinko fosfat kaplayan Liu *et al.* (2002), kaplama yapılmış çeliklerin sürtünme katsayılarının kaplama yapılmamışlara göre çok düşük ve aşınma direncinin daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Malzemeleri korozyona ve aşınmaya karşı korumanın en ucuz yollarından biri olan fosfat kaplamalar, çelikler üzerinde uygulandığında bu özelliklerin son derece iyileştiği gözlenmiştir (Zhou *et al.* 2006). Fosfat kaplama ile ilgili detaylı bilgiler ilerleyen bölümler de verilecektir.

Sert kaplamalar

Sert kaplama ile ana materyalin üzerine koruyucu yüzeyin sertliğinin arttırılmış olduğu bir tabaka oluşturulur. Sert kaplamada fretting aşınmasında baskın olan sürtünme katsayısı düşüktür (Privett and Fujishiro 1994; Shen *et al.* 1995). Bundan başka aşınmaya, korozyona, ısıya direnç oluşturmak ve dekoratif amaçlarla bu kaplamalar yapılabilir. Wc-Co, Al_2O_3 - TiO_2 ve Cr_2O_3 gibi malzemeler plazma-püskürtme yöntemiyle bu amaç için kullanılan bazı materyallerdir.

Sert kaplamanın avantajlarından biri bası artık gerilmesi üretmesidir. Yüzeyde oluşan bu gerilmeler materyalin yorulma ömrünü artırır. Ancak sert kaplama yapısından dolayı daha yumuşak olan ana materyal ile direk uyuşmama eğilimindedir.

2.8. Fosfat kaplamalar

2.8.1. Genel bilgiler

Metaller, havanın ve suyun oksijeniyle oksitlenirler. Bakır ve alüminyum gibi bazı metallerin yüzeyinde oluşan oksit tabakası metalin içine kadar nüfuz edemez. Ancak koruyucu özelliği olmayan demir ve çeliğin yüzeyinde oluşan oksit tabakası, derinlemesine nüfuz ederek bu malzemelerin çürümesine neden olur. Bunu engellemek için koruyucu yağlar, boya sistemleri, organik ve plastik kaplamalar ile vakslar kullanılabilir. Metal yüzeylerini aşınma ve korozyondan korumak ve sonradan boya aplikasyonlarında uygun zemin oluşturmak için sanayide yoğun olarak kullanılan metotlardan biriside fosfat kaplamadır.

Fosfat, fosforik asitten (H_3PO_4) türeyen tuz ya da ester yapısındaki kimyasal bileşiklerin ortak adıdır. Atom numarası 15, atom ağırlığı 30.9738, erime noktası $44,1^0C$, kaynama noktası 280^0C olan fosfor periyodik tablonun 5. grubunda bulunmaktadır. Ametaller

sınıfından kimyasal bir element olan fosfor, P Sembolü ile gösterilir. Sanayide fosfor üretiminin en önemli kaynağı fosforittir.

Fosfat kaplama genel olarak kaplanacak malzemelerin fosforik asit ve ana metal fosfatların seyreltik çözeltisinde, fosforik asitle girdikleri reaksiyon sonucunda oluşan çözünmez sekonder ve tersiyer fosfat kristalleri ile kaplanma işlemidir. Bu kaplama metale sıkıca bağlanmış bir yüzey yaratarak daha çok yüzey alanı oluşturur ve yüzeyi korur. İyi bir temel kaplama oluşturduğu için kullanılan parçaların daha uzun ömürlü olmasını sağlar. Demir fosfat, çinko fosfat ve mangan fosfat olarak üç şekilde uygulanabilir. Genel olarak boya altı uygulandığı gibi koruyucu yağlar öncesinde de kullanılabilir. Demir, çelik ve bazı durumlarda da alüminyum ve çinko yüzeyleri kaplamak içinde kullanılabilir. Daldırma ve sprej kullanımı yaygındır. Sıcaklık, konsantrasyon, zaman, pH ve toplam-serbest asit dikkat edilmesi gereken noktalardır. Fosfatlama işlemi 35-98°C sıcaklıkta 5-10 dakika ve %3-20 konsantrasyonlarda yapılabilir. Bu parametreler fosfatın türüne ve proses şekline bağlı olarak belirlenir. Fosfat kaplama reaksiyonu metal yüzeyin fosforik asit ile eritilmesi sonucu, asit-baz reaksiyonu olarak kabul edilir. Bu erime gerçekleşirken pH artışı gözlenir. Metalik fosfat metal üzerinde çözünmez bir hal alır ve metalik renkli bir form oluşturur. Yüzeyin sertliğini, görünüşünü ve metalin elektriksel özelliklerini etkileyen fosfat kaplamanın kullanım amaçları genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir (Yılmaz 2003).

1. Boya için zemin hazırlamak,
2. Korozyona karşı korumak,
3. Yağ ve diğer pas önleyici malzemeye zemin hazırlamak,
4. Malzemelerin plastik şekillendirilmesine yardımcı olmak,
5. Yağlı ve yağsız, temas halindeki parçaların sürtünmeye karşı dayanıklılığını ve kayganlığını sağlamak,
6. Temas halinde bulunan malzemelerin aşınmaya karşı direncini artırmak,

7. Plastik-metal kaplamalarda, yapıştırıcılar için zemin hazırlamak,
8. Soğuk şekillendirmeyi kolaylaştırıcı yüzey sağlamak.

Fosfatlama demir çelik yüzeylerin korunmasında olduğu kadar alüminyum, çinko, magnezyum ve kadmiyum metallerinin korunmasında da uygulanabilir. Fosfat kaplamanın kalınlığı 2,5 µm ile 50µm arasında değişir. Biriken kaplamanın miktarı kaplama kalınlığından çok kaplama ağırlığı (mg/m^2) ile ifade edilir.

Fosfat kaplanacak metaller kaplamadan önce yağ alma prosesine tabi tutulmalıdır. Metal üzerinde hava ile reaksiyonu kesmesi için kullanılan mineral yağlar bulunur. Bu yağların görevi havadaki oksijenle teması kesip metalin paslanmasını engellemektir. Aynı yağlar, fosfatlama ve kromatlama işleminin yapılmasını imkansız hale getirir. Bu yüzden malzeme yağ, kir ve pastan arındırılmış bir hale getirilmelidir. Yağ alma işlemi 50-90°C sıcaklıkta, 5-10 dakikalık sürede uygulanabilir. Kullanılacak malzemeler alkali, asidik veya nötr olabilir. Uygulanacak sistem, metalin ve işletmenin şartlarına göre değişiklik gösterir. Sıcaklık, zaman, konsantrasyon ve sistem, yağ alma işleminde dikkat edilmesi gereken parametrelerdir. Sıcaklık temizleme kalitesini logaritmik olarak etkilediği için konsantrasyonla beraber en önemli parametredir. Sıcaklık veya konsantrasyon düşükse işlem süresi uzatılarak telafi edilebilir. Suyun sertliği de yağ alma işlemini olumsuz yönde etkiler. Genelde yumuşak sular tercih edilmelidir. Banyonun ömrü giren yağ miktarı ve kirlilikle doğru orantılıdır. Ne kadar yağlı parça girse banyo ömrü o kadar kısa olacaktır. Banyo kuruluş miktarının yarısı kadar ekleme yapıldıktan sonra ekleme yapmak ekonomik olmayıp döküp yeniden kurmak daha anlamlıdır. Bir parçanın üzerinde yağ kalıp kalmadığı en kolay durulama banyosunda anlaşılır. Durulanmış parçanın üzerinde su kalıyorsa yağı tam olarak alınmamış demektir.

Fosfat kaplamanın uygulama yöntemi ise genellikle malzemenin büyüklüğüne ve şekline bağlıdır. Günümüzde uygulanan fosfat kaplama yöntemleri;

- 1- Elle Silme,
- 2- Daldırma,
- 3- Püskürtme, şeklinde sınıflandırılabilir.

Elle Silme yöntemi; bildiğimiz bulaşık yıkama mantığıyla çalışır. Hazırlanan fosfat çözeltisi sünger veya fırçayla kaplanacak yüzeyin üzerine uygulanır. Aynı anda hem yağı alıp hem de fosfat yapılmış olur. Sıcaklığın etkisi pozitif olacaktır. İşlem yapıldıktan sonra hava veya bezle kurutmak gerekir. En ekonomik ve basit yöntemdir. Su tutabilecek veya çok büyük parçalar için uygundur.

Daldırma Yöntemi; Sıcaklık, konsantrasyon ve sürenin etkili olduğu klasik bir yöntemdir. İlk aşama yağ alma banyosudur. Yağı alınmış olan malzeme ikinci aşamada durulamaya girer. Çift durulama taşınım olmaması açısından daha uygundur. Üçüncü aşamada malzeme hazırlanan fosfat çözeltisinin içine daldırılır. Parçalar fosfat banyosunda uygun sıcaklıkta, 5-20 dakika kalır ve fosfatlanmış olur. Ardından pasivasyon banyosunda 30-45 saniye kaldıktan sonra maksimum 130°C kurutmadan sonra hazır hale gelir.

Pasivasyon fosfat banyolarının son aşamasında uygulanır. Kromlu veya kromsuz olarak iki çeşittir. %0,1-0,3 arasındaki konsantrasyonlarda oda sıcaklığında kullanılır. Fosfatlama banyosundan çıkan fosfat filmi yüzeyde homojen bir yapıda değildir. Pasivasyon fosfatı homojen bir hale getirir. Fosfat altındaki tabakaya ulaşan kromik asit ekstra bir korozyon direnci sağlar. Pasivasyon sudan gelen anyon ve katyonları temizleyerek bu oluşumu engeller. Fosfatlanmış metaller pasivasyon banyosunda fazla beklerse zarar görebilir. Sebebi kromik asidin fosfat kristallerini aşındırmasıdır.

Püskürtme yöntemi; Sıcaklık, konsantrasyon, basınç ve sürenin etkili olduğu en yeni seçenektir. İlk yatırım maliyeti yüksek olmasına rağmen kalite ve daha az kimyasal tüketimi ile maliyetini kısa sürede karşılayabilir. Alkali yağ alma banyosu sonrası kullanılabildiği gibi içerisine nötr yağ almalar girilerek de uygulanabilir. Sıcaklığın 45-

55°C, basıncın 1,5-1,8 bar ve sürenin minimum 1,5 dakika olduğu bir ortamda kaliteli bir fosfat tabakası oluşturmak mümkündür. Alkali temizleme yöntemi kullanılmayacaksa fosfat banyosunun içerisine yağ alma efekti olan kimyasallar girilerek ikisi bir arada kullanılabilir. Banyo seçenekleri ve temizleme yöntemleri işletme şartlarına göre değişim gösterir. Fosfatlanan parçalar pasivasyon ve maksimum 130°C kurutmadan sonra boyanacak hale gelir.

2.8.2. Fosfat kaplama türleri ve uygulama alanları

Genel kullanımda üç çeşittir:

- 1- Çinko Fosfat Kaplamalar
- 2- Demir Fosfat Kaplamalar
- 3- Mangan Fosfat Kaplamalar

2.8.2.a) Çinko fosfat kaplama

Genellikle uzun süreli korozyon direnci gerektiren koşullarda kullanılır. Otomotiv ve yan sanayilerinin hemen hemen tamamının kullandığı kaplama türüdür. Dış ortam ve tuzlu hava koşulları içinde uygundur. Kaplama kalitesi demir fosfatla kıyaslandığında daha yüksektir. Bu kaplamalar yağ ve boya için zemin, soğuk şekillendirmeye yardımcı, pasa karşı koruyucu olarak ve sürtünme dayanıklılığını arttırmak amacıyla sprey ve daldırma yöntemiyle uygulanır. Boya altı olarak kullanıldığında kaplanacak metal üzerinde 2-5 gr/m²'lik bir kaplama oluşturur.

Nikel, mangan ve organik bileşik gibi eklentiler kaplama formunu hızlandırmak, kristal şekillerini geliştirmek ve performanslarını artırmak için fosfat banyolarına eklenir. Fosfat kristallerini küçültmek için çinko fosfat banyosu öncesi aktivasyon da

kullanılabilir. Çinko fosfat amorf yapıda çökme sonucu oluşan bir reaksiyondur. Gri-siyah renklerde oluşur. Kaplanan çelikteki karbon yüzdesi arttıkça kaplama koyulaşır.

Kaplama kalınlığı 7-15 gr/m² olan çinko fosfatlar soğuk şekillendirmede, yağlama için taşıyıcı tabaka olarak kullanılır. Boru çekme, tel çekme ve soğuk presle şekil vermede kullanılır. Fosfatlanan metal koruyucu yağ ve sabunlarla sonraki işleme hazır hale getirilir. Kalın çinko fosfatta kaplama kalınlığı 10-40 gr/m²'dir. Çinko fosfat banyoları genelde çamur üreten banyolardır. Belli aralıklarda banyonun altında biriken çamur temizlenmeli ve tekrardan kurulmalı veya dekantasyon sistemiyle desteklenmelidir. Banyo zemini konik olursa çamur birikmesi giren malzemeyi çok etkilemeyecektir.

Çinko fosfat reaksiyonu:



Çinko fosfat kaplamanın en basit hali çinko üzerine uygulanmasıdır. Çünkü kaplamalar büyük oranda hopeit, $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ içerir. Çinko fosfatın, çelik üzerine kaplanması daha karmaşıktır. Çinko tersiyer fosfatının spreyle püskürtüldüğü hızlandırılmış çinko fosfat banyolarından elde edilen kaplamalarda, az miktarda demir fosfat, demirin ferro sekonder ve tersiyer fosfat bulunur (Demirözü 2000). Sonraki aşamada ise, metal-çözelti ara yüzeyinde sekonder fosfat ile ferro demir arasında reaksiyon oluştuğu ileri sürülür.

Çinko fosfat kaplamanın bileşimini etkileyen başlıca faktörler aşağıda belirtilmiştir (Freeman 1986).

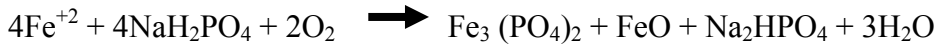
1. Uygulama Tipi: Sprey veya Daldırma
2. Karıştırma Derecesi
3. Banyonun Kimyasal Özellikleri: Başta $\text{Zn}:\text{PO}_4$ oranı, hızlandırıcıların cinsi ve derecesi, diğer metal iyonların varlığı

Tüm bu anlatılanların yanında; kaplamanın performansını etkileyecek, kaplamanın bileşimi ve yapısı hakkında oldukça fazla sayıda detayın incelenmesi ve çözülmesi gerekmektedir.

2.8.2.b) Demir fosfat kaplama

En eski fosfatlama metodudur. Uygulaması, kurulumu ve kontrolleri en kolay olan fosfat kaplama türüdür. Korozyon direnci diğer fosfat türlerine göre daha düşük fakat daha ekonomiktir. Metal üzerinde ağırlıklı mavi olmak üzere sarıdan kıızıla kadar renkler oluşabilir. Yaklaşık olarak metal yüzeye 0,2-1,0 gr/m² kaplama yapar. Toplam asit, pH, sıcaklık ve süre kontrol edilmesi gereken parametrelerdir. Demir fosfat üç şekilde, elle silme, daldırma ve püskürtme yöntemleriyle uygulanabilir. Daldırma yöntemi daha pratik olmasına rağmen sprej yöntemi daha çok tercih edilir. Sprej ve daldırma metodu için belirlenen sıcaklık aralığı 25⁰C- 65⁰C'dir.

Demir fosfat reaksiyonu:



2.8.2.c) Mangan fosfat kaplama

Mangan fosfat metal yüzeyinde bir tabaka görevi yapar. Yağ emme ve bu yağ uzun süre bünyelerinde tutma özelliklerinden dolayı dişli, piston ve silah sanayinde kullanımı yaygındır. Yağlı ortamlarda çalışan, hareketli makina parçalarının kaymalarını kolaylaştırır. Metaller arasındaki sürtünmeyi azaltır. Çinko fosfata göre daha fazla basınca ve sıcaklığa dayanıklı bir yapısı vardır.

Diğer proseslerde olduğu gibi ancak yağ alınmış parçalar üzerine uygulanabilir. aktivasyon banyosu gerekir. Sıcaklık, süre, konsantrasyon, serbest ve toplam asit dikkat

edilmesi gereken parametrelerdir. 70-98°C sıcaklık, %15-20 konsantrasyon ve 5-20 dakikalık daldırma süresi uygulama için gereken aralıklardır. Gri-siyah renkte ve 4-40 gr/m² kaplama kalınlığı oluşur. Boya altı olarak kullanılmaz.

Mangan fosfat kaplamalar genellikle demire uygulanır. Yöntem olarak ise sadece daldırma yöntemi kullanılır. Tercih edilen mangan fosfatlaması ince ve sıkı kristal yapısına sahiptir. Çinko fosfat kristallerine oranla daha yumuşaktır ve bu nedenle daha kolay bozulur (Yılmaz 2003).

Mangan fosfat reaksiyonu:



Taze hazırlanmış, mangan fosfat kaplama elde edilen banyolar sekonder ve tersiyer fosfat içerirler. Banyo çözeltisi eskiyince ve zamanla ferro demir oluşur, ferro demir miktarı arttıkça (Mn , Fe)₅H₂(PO₄)₄. 4H₂O şeklinde kaplama bünyesine dahil olur. Çok yüksek miktarda demir bulunursa, kaplama saf demir hurealit Fe₅H₂(PO₄). 4H₂O da içerebilir. Mangan fosfat kaplamanın taramalı elektron mikroskopuyla çekilmiş kristal fotoğrafı Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12. SEM ile çekilmiş ağır mangan fosfat kaplamanın görünümü (Freeman 1986)

2.9. Korozyon

2.9.1. Korozyonun genel tanımı ve önemi

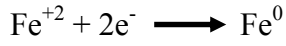
Korozyon, metallerin ve alaşımların içinde bulunduğu ortam ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyona girerek metalik özelliklerini kaybetmesidir. Son yıllarda yapılan araştırmalar metal olmayan malzemelerinde korozyona uğradığını göstermektedir. Bu nedenle korozyon, yapı malzemesi özelliğindeki bütün malzemelerin içinde bulundukları ortamın etkisiyle bozunmasını kapsamaktadır (Doruk 1982). Korozyonun en fazla görüldüğü malzeme türü ise elektro kimyasal reaksiyonlara eğilimlerinin yüksek olmasından dolayı metallerdir.

Metallerin büyük bir kısmı su ve atmosfer etkisine dayanıklı olmayıp, normal şartlar altında bile korozyona uğrayabilir. Bütün metaller doğada mineral olarak bulundukları hale dönüşmek eğilimindedir. Doğada mineraller, söz konusu metalin en düşük enerji taşıyan bileşiği yani en kararlı halinde bulunurlar. Bu mineraller özel metalurjik yöntemlerle ve enerji harcanarak metal haline getirilir. Ancak metallerin çoğu, element

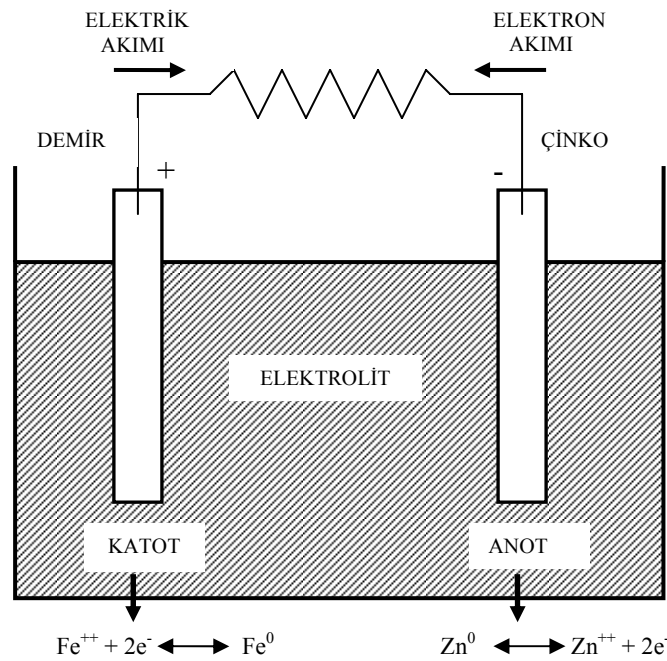
halinde, termodinamik olarak kararlı değildir. Uygun bir ortamın bulunması halinde üzerinde taşımış oldukları kimyasal enerjiyi geri vererek yeniden minimum enerji taşıyan kararlı bileşikler haline dönüşmek isterler. Bu sebeple korozyon olayı enerji açığına çıkararak kendiliğinden yürür. Bazı soy metaller hariç teknolojik öneme sahip bütün metal ve alaşımlar korozyona uğrayabilir.

Bir çok metalin korozyon hızı, pasifleşme sebebiyle, pratikte önemsenemeyecek kadar küçüktür. Buna karşılık endüstrinin temel yapı malzemesi olan demir ve çelik, sulu ortamda ve atmosferde korozyona dayanıksız bir metaldir. Bu sebeple korozif ortamlar söz konusu olduğunda, çoğu zaman demir yerine korozyona daha dayanıklı fakat daha pahalı başka metal veya alaşımların kullanılması yoluna gidilir. Bu sebeple, malzeme seçiminde korozyonun yanı sıra ekonomik faktörler de göz önüne alınır. Mühendislik açısından bakıldığında, korozyonla mücadelenin temeli ekonomiye dayanır. Korozyondan dolayı uğranan ekonomik kayıp gelişmiş ülkelerde GSMH'nin %1'i iken az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde bu oran %5'lere ulaşmaktadır. Bu nedenle korozyon ile yapılacak mücadelenin, korozyon maliyetini azaltmasının yanı sıra ulusal ekonomi üzerinde de etkisi vardır (Yalçın ve Koç 1998). Metal seçiminde korozyon hızları ile kullanılabilirlik dereceleri birlikte değerlendirilir. Ucuz metaller korozyon hızları yüksek olsa bile bazı ortamlarda korozyona daha dayanıklı metallere tercih edilebilir.

Korozyon olayı, elektrik enerjisi üretiminde kullanılan pil modeli ile açıklanabilir. İyonlaşma eğilimi farklı olan iki metal (mesela çinko ve demir), iyonların hareketine izin veren bir elektrolite daldırılırsa pil mekanizması oluşur. Çinko elektrotta elektron yoğunluğu demir elektrottan fazladır. Her iki elektrot iletken bir telle birleştirildiğinde çinkodan demire doğru elektron akımı gerçekleşir. Oluşan bu elektron akımı kimyasal dengeyi bozar. Dengede bulunan bir sisteme dışarıdan bir etki yapıldığı zaman, sistem bunu azaltacak yönde tepki verir. Elektron yoğunluğunun bozunmasına karşın çinko elektrotta elektron yoğunluğunu artıracak yönde reaksiyon ilerler. Demir elektrotta ise reaksiyon elektron yoğunluğunu azaltacak yönde ilerler. Bu durumu aşağıdaki kimyasal denklemlerle ifade edebiliriz.



Sonuç olarak çinko elektrot korozyona uğrar demir elektrot ise korunur. İki farklı metalin oluşturduğu pil mekanizması Şekil 2.13’de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Farklı iki metalin oluşturduğu pil mekanizması

Bu mekanizmada yüzeyinde kimyasal indirgenmenin olduğu elektrot (demir) “katot” ve kimyasal oksitlenme yolu ile çözünen elektrot (çinko) ise “anot” diye adlandırılır.

2.9.2. Korozyon reaksiyonları

Korozyon sırasında anodik (elektron veren, yükseltgenme) reaksiyonlar ile katodik (elektron alan, indirgenme) reaksiyonları birlikte oluşur. Demir metalinin bulunduğu ortamdaki anodik ve katodik reaksiyonlar şunlardır.

Anodik Reaksiyon	Fe^0	$\longrightarrow$	$\text{Fe}^{+2} + 2\text{e}^-$ (İyonlaşma)
Katodik Reaksiyon	$1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\longrightarrow$	$2(\text{OH})^-$
	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\longrightarrow$	H_2 (Asitli Ortamda)
Toplam Reaksiyon	$\text{Fe}^0 + 1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$\longrightarrow$	$\text{Fe}(\text{OH})_2$ (Pas)

Korozyon reaksiyonunun yürütücü kuvveti, reaksiyon sırasında açığa çıkan enerji yani serbest entalpi azalışıdır. Termodinamik olarak bir reaksiyonun kendiliğinden yürümesi için, reaksiyonun serbest entalpi değişiminin mutlaka negatif olması gerekir. Buna göre herhangi bir metalin belli bir ortamda korozyona uğrayıp uğramayacağı, serbest entalpi değişiminin işaretine bakılarak kolayca anlaşılabilir. Eğer serbest entalpi değişiminin işareti pozitif ise, metalin söz konusu ortamda korozyona uğramayacağı kesin olarak söylenebilir. Bunun tersi, yani serbest entalpi değişiminin negatif olması, korozyon olayının olabileceğini gösterir. Ancak bazı hallerde metalin termodinamik açıdan korozyona uğraması beklendiği halde, pratikte reaksiyonun yürümediği veya önemsiz derecede yavaş yürümekte olduğu görülür. Bu durum kabuk oluşumu ve pasifleşme gibi sebeplerle reaksiyon hızının azalmasından kaynaklanır (Erden ve Değertekin 2004).

Metallerin oksitlenme eğilimini Nerst Skalası yardımıyla öğrenebiliriz. Bu skala, 1 atmosferde ve 25°C'de 1 mol / lt iyon sulu çözeltisi hidrojen gazı ile temastaki platin elektrodu standart referans elektrot kabul edilerek, her bir metalin 25°C'deki çözeltisinde metal ile çözelti arasında ölçülen potansiyel değerlerinin sırasıdır. Nerst skalasında hidrojene göre daha negatif olan metaller daha aktif, yani iyonlaşma eğilimi daha fazla olan metali; hidrojene göre daha pozitif olan metaller ise daha soy, yani iyonlaşma eğilimi daha az olan metali karakterize etmektedir. Bir metalin aktifliği, elektronunu verme eğilimi, diğer bir ifade ile reaksiyona girme eğilimidir. Metaller aktifleştikçe daha kolay korozyona maruz kalır.

2.9.3. Korozyon hücresi akımı

Metal herhangi bir elektrolit ortamda ortama elektron vererek korozyona uğrar. Ortama yayılan pozitif yüklü demir iyonları bir korozyon akımı meydana getirir. Faraday elektroliz kanunu korozyondan dolayı ortama yayılan metal miktarlarını hesaplamakta kullanılır. Bu kanun aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir.

$$M = A \times I \times N/n \times F \dots\dots\dots (3)$$

M = Serbest haldeki metal kütlesi (gr)

A = Metalin atomik kütlesi

I = Akım şiddeti (Amper)

N = Zaman (sn)

n = Değerlik sayısı

F = Faraday sabiti (96500 Coulumb / eşdeğer gr)

2.9.4. Korozyona etki eden parametreler

Ortamın etkisi: Metallerin korozyona uğrama hızı büyük ölçüde bulunduğu ortamla alakalıdır. Ortamdaki nem miktarı, asitlik – baziklik durumu, havanın oksijenin veya suyun ortam tarafından geçirilebilme yeteneği, kaçak akımlar ve çeşitli bakteriler korozyonu başlatıcı ve hızlandırıcı etken olarak karşımıza çıkar.

Sıcaklığın etkisi: Ortam sıcaklığının artması iyon hareketini arttırarak korozyon hızını arttırır. Sıcaklığın artmasının oksijen konsantrasyonunu düşürücü ve dolayısıyla korozyon hızını düşürücü etkisi de vardır. Ancak bu etki iyon hareketinin artmasından dolayı olan reaksiyonların yanında oldukça zayıf kalmaktadır.

Malzeme seçiminin etkisi: Korozyona sebep olan etkenlerden biri de birbiriyle potansiyel farkı bulunan metallerin bir arada kullanılmasıdır. Bu durum korozyonu başlatıcı ve hızlandırıcı bir etkindir. Mesela çok düşülen bir hata olarak çelik sacdan yapılan panoların üzerine konulan paslanmaz çelik civata ve contalar bulundukları bölgede galvanik korozyona sebep olmaktadır. Bu tip durumlarda ana yüzeye civatalar ile contalar, plastik civatalar ile izole edilmelidir.

Taneler arası özellik farkları: Metallerin tane boyutları arasındaki farklar ve iki tanedeki farklı konsantrasyonlar neticesinde iki tanenin sınırı korozyon başlangıcı için uygun bir ortam oluşturur. Çok düşülen bir hata olarak paslanmaz çelik malzemeden imal edilen tanklar ve benzeri yapılardaki kaynak bölgeleri üretici tarafından hiç beklemediği halde korozyona uğramaktadır. Bu korozyonun önüne geçmenin yolu ya elektrotlu kaynak kullanmamak ya da önleyici olarak galvanik anotlu katodik koruma sistemi uygulamaktır.

Sistem dizaynı: Korozi malzemelerin depolandığı sistemlerde korozi ortamın (su vb) birikmesini engellemeye yönelik tasarımlar uygulanmalıdır. Ayrıca arasında sıvı birikintisine sebep olabilecek çok ince aralıklardan kaçınılmalıdır.

Sistemin bulunduğu ortamın oksijen konsantrasyonu: Aynı tip toprak içerisinde çözünmüş hava konsantrasyonu her yerde aynı olmayabilir. Farklı havalandırma koşullarındaki sistemlerde yan yana duran sistem bir bölgede anot iken hemen yanındaki bölgede katot görevi görerek elektro kimyasal korozyona sebep olabilir.

Zemin elektriksel özgül direncinin etkisi: Düşük elektriksel özgül dirençli bölgelerde iletkenliğin yüksek olması iyonik ortamın daha aktif olmasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı korozyon mekanizması daha hızlı gelişir.

2.9.5. Korozyondan korunma yöntemleri

Çok sayıda korozyon çeşidi endüstrinin her dalında kendini gösterir. Atmosfer şartlarına açık bulunan tanklar, depolar, direkler, korkuluklar, taşıt araçları, yeraltı boru hatları, betonarme demirleri, iskele ayakları, gemiler, fabrikalarda kimyasal madde doldurulan kaplar, borular, depolar ve bir çok makina parçası korozyon olayı ile karşı karşıyadır. Bütün bu yapılar korozyon sebebiyle beklenenden daha kısa sürede işletme dışı kalmakta ve büyük ekonomik kayıplar meydana gelmektedir.

Korozyon kayıplarının maliyetinin hesabı çok zordur. Bu zorluk korozyon sebebiyle meydana gelen malzeme ve işçilik kaybı yanında, gözle görülmeyen bazı ikincil kayıpların belirlenmesinden kaynaklanır. Korozyonun doğrudan sebep olduğu malzeme ve işçilik kaybına, korozyon sebebiyle ortaya çıkan diğer kayıpların da dahil edilmesi gerekir. Örneğin bir doğal gaz borusunun veya ana su borusunun korozyon sebebiyle bir kaç gün devre dışı kalması ile meydana gelen kayıplar hesap edilemeyecek kadar büyüktür. Ayrıca metalleri korozyondan korumak üzere kullanılan boyalar, kalay ve çinko ile yapılan kaplamalar da korozyon kaybı olarak kabul edilmelidir. Korozyon kayıplarını mümkün olduğunca azaltmak amacıyla aşağıda verilen çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- a) Uygun malzeme seçimi,
- b) Malzemeyi uygun bir kaplamayla korumak,
- c) Doğru tasarım,
- d) Katodik koruma,
- e) Anodik koruma,
- f) Ortamın saldırganlığının azaltılması,
- g) Korozyona dayanıklı malzeme seçimi.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneylerde kullanılan malzemenin seçimi ve numunelerin hazırlanması

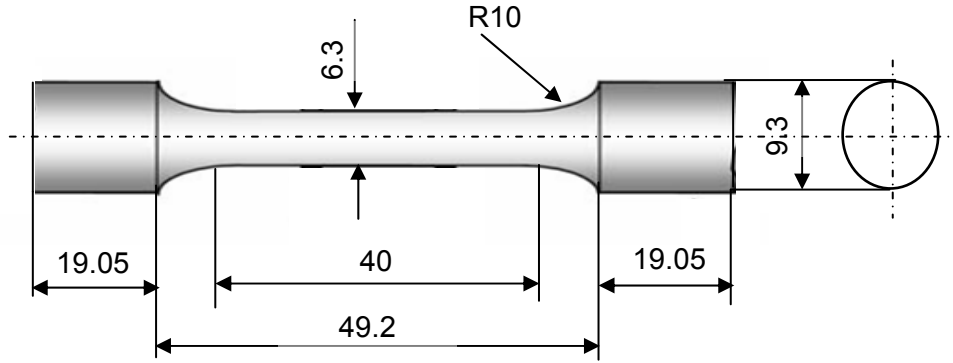
Bu çalışmada deney malzemesi olarak AISI 1045 (C45) çeliği kullanılmıştır. Yapılan spektrometre analiz raporuna bağlı olarak, malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. AISI 1045 çeliğini kimyasal bileşimi

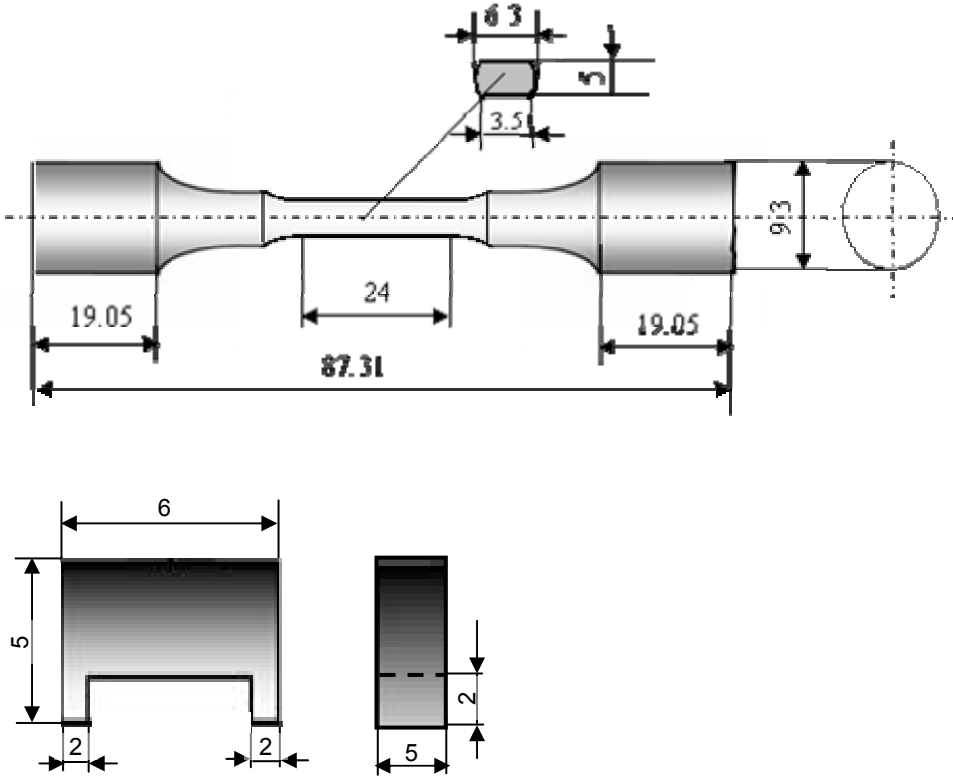
Kimyasal kompozisyon (% W)								
AISI 1045	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	0,4220	0,2440	0,6070	0,0190	0,0330	0,1970	0,0332	0,1220

Bu çalışmada kullanılan düz ve fretting yorulma numuneleri, 12 mm çapta, soğuk çekilmiş ve silindirik olarak AISI 1045 çelik malzemeden elde edilmiştir. Normal yorulma ve fretting yorulma dayanımını belirlemek için iki tür numune kullanılmıştır. Normal yorulma dayanımını belirlemek için Şekil 3.1’de boyutları verilen Satec firması tarafından önerilen standartlara uygun numuneler kullanılmıştır. Fretting yorulma dayanımını belirlemek için Şekil 3.2’de gösterilen numuneler ve pabuçlar kullanılmıştır. Yorulma deneylerinde kullanılan numuneler CNC tezgahında işlenmiş ve yüzeylerine polisaj yapılmıştır.

Pabuç malzemesi olarak, düz ve fretting numunelerinde olduğu gibi AISI 1045 çeliğinden yapılmış köprü tipi pabuçlar kullanılmıştır. Bu kontak pabuçlarının temas yüzeyleri mekanik olarak parlatılmıştır.



Şekil 3.1. Yorulma deney numunesi



Şekil 3.2. Fretting yorulma numunesi ve kontak pabucunun (Pad) şematik gösterimi

3.2 Numunelerin kaplanması

Malzemenin çalışma ortamına bağlı olarak, korozyon davranışı, çevre sıcaklığı, aşınması ve yorulması o malzemenin ömrünü ve verimini önemli derecede etkiler. Bu nedenle malzemelerin kullanma karakteristiklerini geliştirmek için değişik yüzey işlemleri ve yüzey kaplama prosesleri ile malzemelere uygun işlemler uygulanmaktadır. Kaplamalar ve yüzey işlemleri, tribolojik bileşenlerin servis sürelerini ve verimini artırmak için kullanılmaktadır.

Fosfat kaplama genellikle uygun bileşimde hazırlanan kaplama banyoları içine daldırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Kullanılan alaşımın tipine ve yüzey şartlarına bağlı olarak fosfat kaplamaların ağırlıkları $0,2-30 \text{ g/m}^2$ arasında değişir (Weng *et al.* 1997, Totik 2006). Kaplama parametreleri malzemelerin türüne, mikro yapısına ve yüzey şartlarına bağlı olarak belirlenir. Bu amaca uygun olarak numuneler kaplanmadan önce, yüzeylerinde bulunan yağ, kir ve oksitlerden temizlenmesi için %12 NaOH çözeltisi içinde temizlenmiştir. Temizlenme işlemi tamamlanmış numuneler, 90°C sıcaklıkta Çizelge 3.2’de verilen kaplama parametreleri dikkate alınarak mangan fosfat kaplama ile kaplanmıştır.

Çizelge 3.2. Mangan fosfat kaplama işleminin parametreleri

Serbest Asit Noktası	Toplam Asit Noktası	Demir Miktarı (mg/Lt)	Sıcaklık ($^\circ\text{C}$)	Zaman (dk)	Kaplama Ağırlığı mg/dm^2
10,8	114,6	0,3	90	15	170

3.3 Sertlik ölçümleri

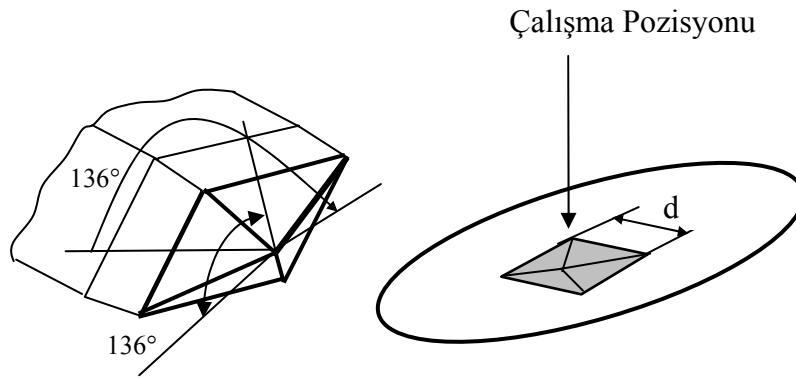
Numunelerin sertlik ölçümü için şematik resmi Şekil 3.3’de gösterilen Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Sertlik ölçümlerinde Buehler-Omnimet mikrosertlik test cihazı kullanılmıştır. Ölçüm işlemine başlamadan önce kaplanmamış numuneler 1200’lük zımpara ve 1 mikronluk alümine tozu ile parlatıldıktan sonra sertlik ölçümleri,

100 gf'lık bir yükün 10 sn süreyle numune üzerine uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında elde edilen diyagonal uzunluklar yardımıyla sertlik aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$HV = \frac{1,8544.F}{d^2} \dots\dots\dots(4)$$

F= Numuneye uygulanan yük (kgf),

d= Diyagonal uzunluklarının ortalaması (mm)



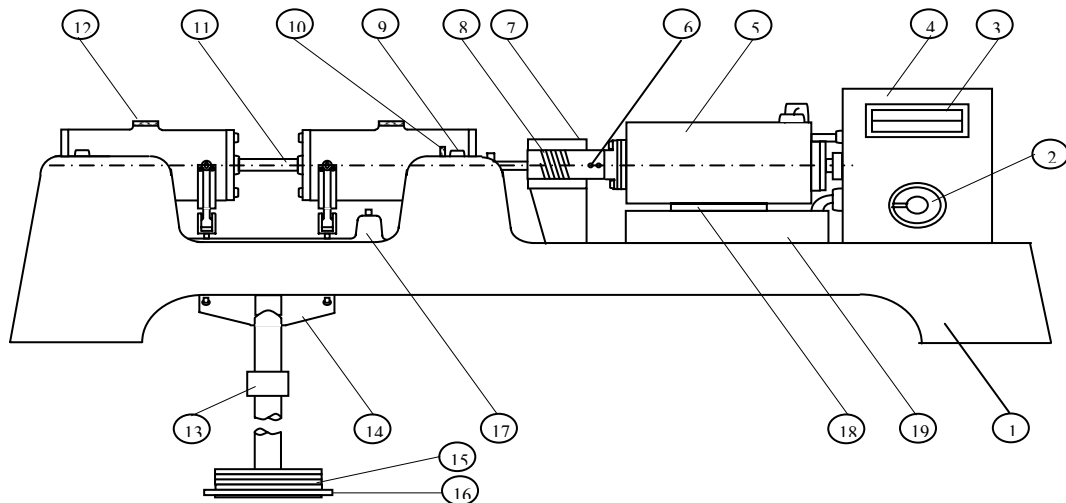
Şekil 3.3. Vickers sertlik ölçme yönteminin şematik gösterimi

3.4. Yorulma deneyleri

Numunelerin fretting ve normal yorulma dayanımlarını belirlemek için Şekil 3.4'de şematik olarak gösterilen ve R=-1 olan R.R. Moore döner eğilmeli yorulma cihazı kullanılmıştır. Cihaz 12000 d/d'lık dönme hızına ulaşabilen bir motora sahiptir. Deney sırasında numune yüzeyinin her bir noktasına sırası ile çeki ve bası gerilmeleri etkimektedir ve numuneler cihaza yerleştirilerek verilen yükte kırılma meydana gelinceye kadar devam ettirilmiştir. Kırılma çevrim sayısı yorulma makinası tarafından dijital olarak sayılmakta ve kırılma anında sistem otomatik olarak kapanmaktadır. Yorulma sınırı 3.10^6 çevrim olarak kabul edilmiş ve bu değere ulaşıldığı zaman cihaz

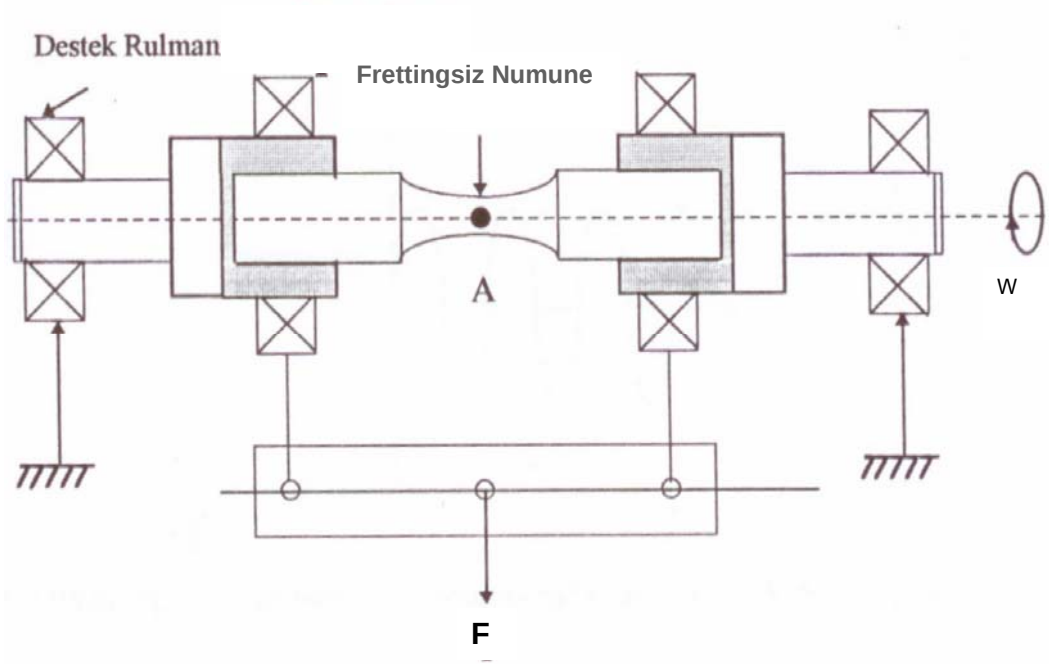
kapatılmıştır. Tüm deneyler laboratuvar ortamında oda sıcaklığında 5000-5500 d/d'da yapılmıştır.

Kaplanmış ve kaplanmamış AISI 1045 çeliğinden hazırlanan numunelerin yorulma deneyleri iki grup halinde gerçekleştirilmiştir. Birinci grupta mangan fosfat kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin, Şekil 3.5’de şematik resmi verilen düzeneğe normal yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Diğer grupta ise yine mangan fosfat kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin şekil 3.6’da şematik olarak gösterilen düzeneğe fretting yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Fretting yorulma deneylerinde kontak basıncı $F=100$ MPa olarak alınmıştır.

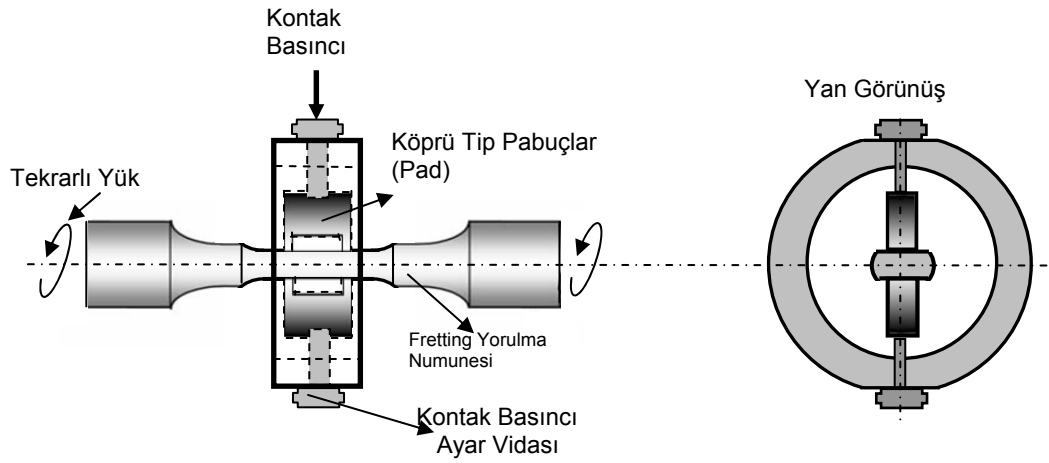


- | | |
|--|---------------------------------|
| 1. Taşıma gövdesi | 10. Mesnet |
| 2. Potansiyometre | 11. Numune |
| 3. Motor dönme hızı ve toplam
çevrim sayısı | 12. Yağlama cıvatası |
| 4. Kumanda panosu | 13. Ağırlık kancası |
| 5. Motor | 14. Zincir-kanca bağlantısı |
| 6. Sinyal verme pimi | 15. Ağırlıklar |
| 7. Kaplin koruyucu | 16. Ağırlık taşıyıcı tablası |
| 8. Kaplin | 17. Otomatik durdurma tertibatı |
| 9. Mesnet tekeri | 18. Tespit cıvatası |
| | 19. Motor tespit plakası |

Şekil 3.4. R.R. Moore dönel eğilmeli yorulma cihazının şematik gösterimi (Yetim 2004)



Şekil 3.5. Dönel eğilmeli yorulma testleri için şematik test düzeneği



Şekil 3.6. Dönel eğilmeli fretting yorulma testleri için şematik fretting test düzeneği

Deney sırasında numuneye önceden hesaplanmış bir yük uygulayarak, numuneyi gerilmeye maruz bırakmaktır. Deneylerin yapıldığı test cihazında numunedeki gerilme (5) denklemi ile hesaplanabilir.

$$\sigma_g = \frac{16FL}{\pi d^3} \dots\dots\dots(5)$$

Bu denklemde;

σ_g =genlik gerilmesini, F=numunedeki toplam yükü, L=moment kolunu, d=numune çapını göstermektedir. Arzu edilen σ_g değerini elde etmek için gerekli olan F değeri, herhangi bir numune çapı için kolaylıkla tespit edilebilir. S – N eğrisinin çizimi JSME S 002-1981 standardı kullanılarak hesaplanmıştır.

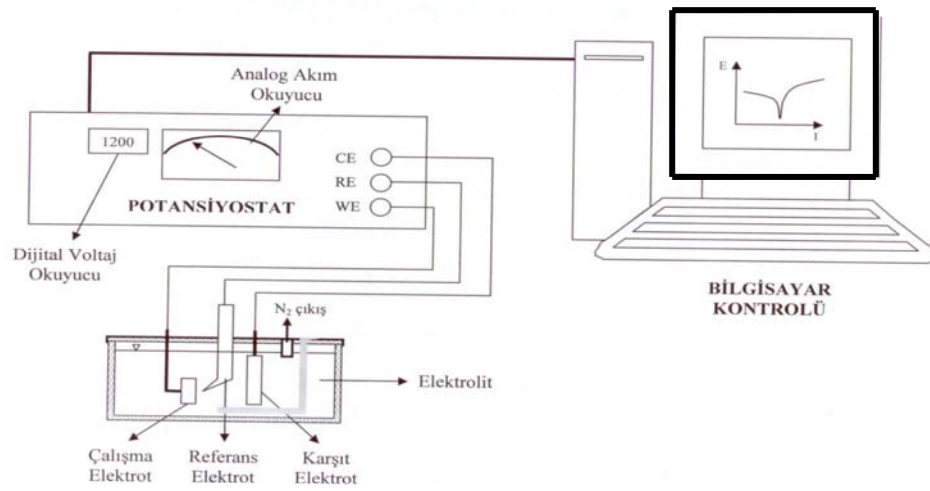
Wöhler diyagramları, σ_{ort} ortalama gerilmenin sıfır olduğu yüklemelerde, numune kırılıncaya kadar, değişik gerilme genliklerinde elde edilen yorulma ömürlerindeki değişimlerin istatistiksel yöntemler kullanılarak, gerilme genliği-yorulma ömrü grafiğinde verilmesidir. Fretting yorulma dayanımı ve fretting yorulma ömründeki değişim, normal ve fretting yorulma deneylerinden elde edilen S-N (Wöhler) diyagramları sayesinde belirlenir.. S-N eğrisi lineer ve yatay olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Lineer kısım S-N diyagramının da yatay kısmı kırılmanın oluşmadığı en yüksek gerilme değerine kadar uzanan kısımdır. Yatay kısım için ise Staircase metodu kullanılmıştır (Collins 1993).

3.5 Korozyon deneyleri

Korozyon deneylerinde kullanılan numuneler 10 mm çapında ve 10 mm yüksekliğinde olacak şekilde hazırlanmıştır. Numuneler, üst yüzeylerine elektron geçişini sağlayacak, iletkenlik katsayısı yüksek bakır teller monte edildikten sonra uygun kalıplar içinde bakalite alınmışlardır.

Korozyon testleri AISI 1045 çeliğinin kaplamadan önce ve kaplama yapıldıktan sonraki korozyon davranışlarının nasıl değiştiğini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Korozyon deneyleri %3,5 NaCl çözeltisinde ve 1 N H₂SO₄ ortamında normal atmosfer şartlarında

ve şematik olarak şekil 3.7’de gösterilen Bank elektronik firmasının Wenking-PGS95 polarizasyon test cihazında gerçekleştirilmiştir. Polarizasyon ölçümleri Ag/AgCl referans elektrot (RE) ve karşıt elektrot olarak (CE) bir platin tel kullanılarak üç elektrot tekniğine göre bir cam hücre içerisinde yapılmıştır. Numuneler açık devre potansiyeline (OCP) kadar yaklaşık 40 dakika bekletilmiştir. Daha sonra numuneler -1000/ 750 mV potansiyel aralığı içinde 1 mV/sn lik tarama hızlarında potansiyodinamik olarak polarize edilmiştir. Çözeltilerin pH değerleri pH metre ile ölçülmüştür.



Şekil 3.7. Korozyon deney düzeneğinin şematik resmi

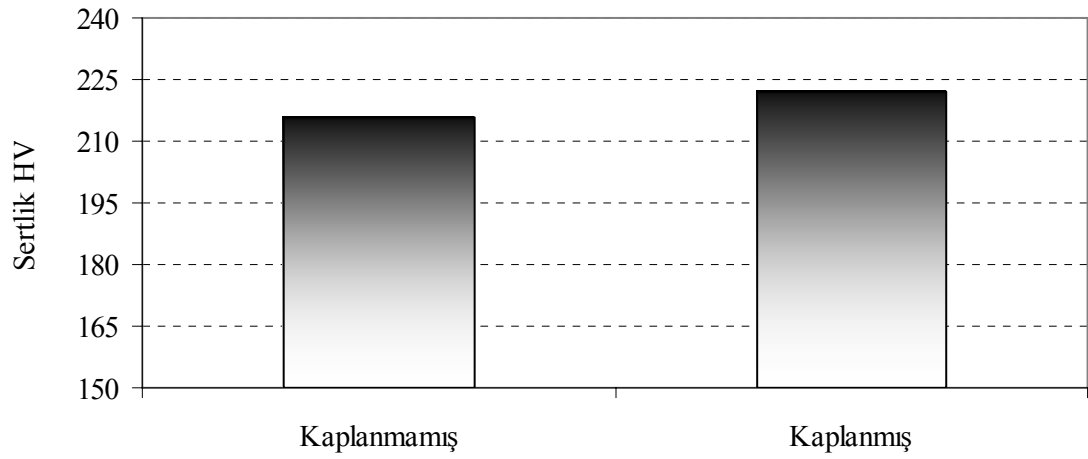
3.6. SEM ve yüzey pürüzlülüğü incelemeleri

Numunelerin SEM incelemeleri, Jeol 6400 marka elektron mikroskopta gerçekleştirilmiştir. Normal yorulma ve fretting’li yorulma numunelerinde çatlak başlangıcı, kırılma şekilleri, kaplamanın kesiti ve fretting’li numuneler üzerinde oluşan pabuçların aşınma izleri SEM vasıtasıyla incelenmiştir. Ayrıca kaplanmış numuneler üzerine mangan fosfat kaplamaların yüzey topografyası da yine SEM de incelenmiştir. Numunelerin kaplamadan önce sonra yüzey pürüzlülükleri Mitutuyo profilometre ile gerçekleştirilmiştir.

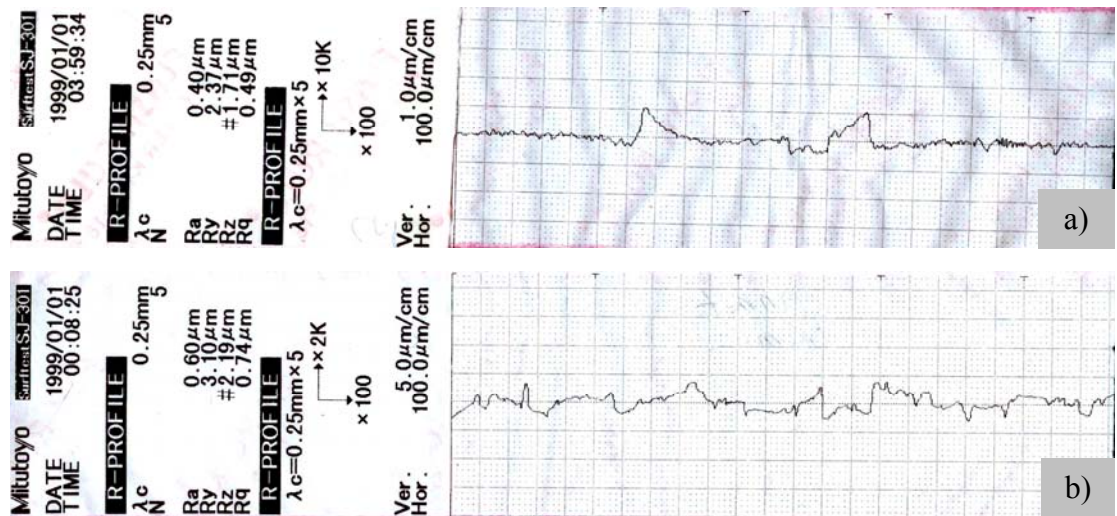
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Sertlik ve yüzey pürüzlülüğü bulguları

AISI 1045 çeliğinin kaplamadan önce ve mangan fosfat kaplama işleminden sonra ölçülen sertlik değerleri Şekil 4.1’de verilen grafik üzerinde gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi sertlik değerlerinde belirgin bir artış gözlenmemiştir. Yapılan kaplama işlemi ile sertlik değerinde çok küçük bir değişim meydana geldiği gözlenmiştir.



Şekil 4.1. Kaplamadan önce ve kaplamadan sonra sertlik değerlerindeki değişimler

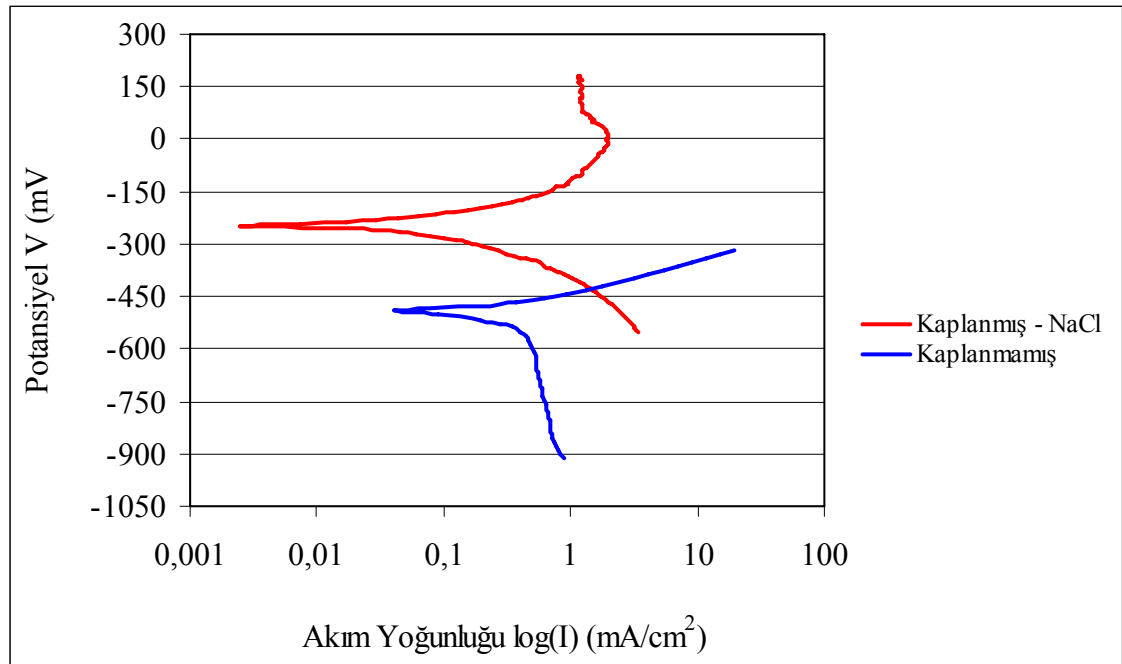


Şekil 4.2. Yüzey pürüzlülük değerleri a) Kaplanmamış, b) Kaplanmış

Kaplama işlemiyle numunelerin yüzey pürüzlülüğünde herhangi bir değişimin olup olmadığı bu bölümde araştırılmıştır. Numunelerin kaplamadan önce ve kaplamadan sonra yapılan yüzey pürüzlülüğü sonuçları şekil 4.2’de gösterilmiştir. Mangan fosfat kaplama işleminden önce AISI 1045 çelik numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri yaklaşık olarak $R_a=0,40$ iken, mangan fosfat kaplama işleminden sonra bu değer $R_a=0,60$ değerine yükselmiştir. Bu sonuç; mangan fosfat kaplama işleminin yüzey pürüzlülüğü değerlerinde azda olsa bir artışa neden olduğunu göstermektedir.

4.2. Korozyon deneyi bulguları

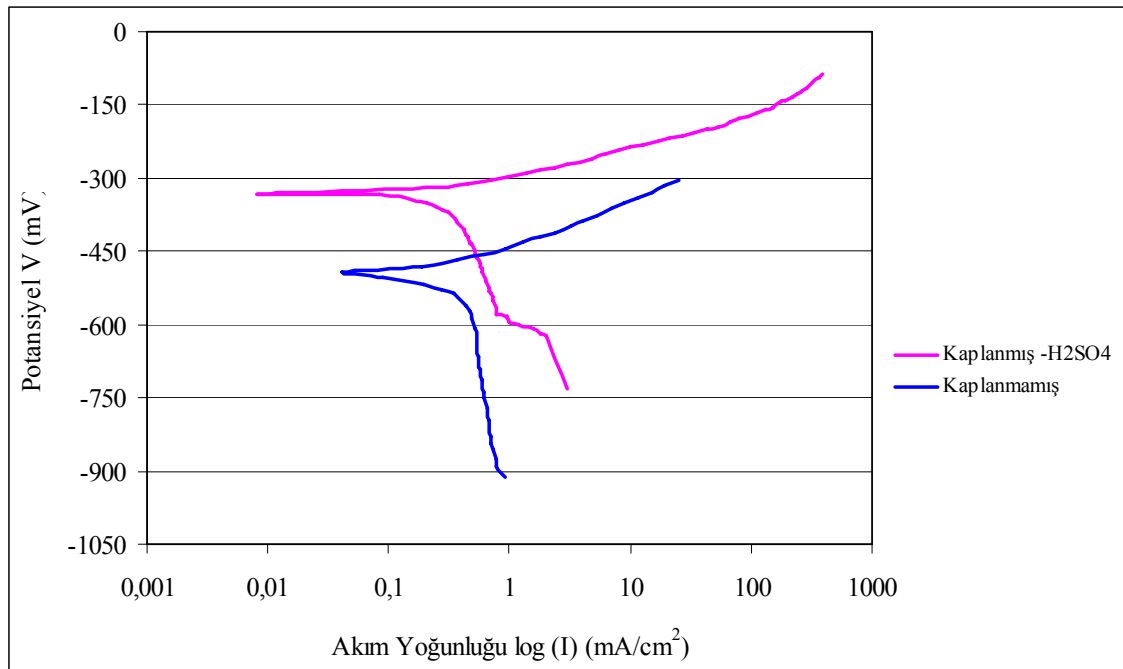
Mangan fosfat kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin korozyon deneyleri %3,5 wt NaCl çözeltisi ve 1N H_2SO_4 ortamında normal atmosfer şartlarında gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar polarizasyon eğrilerinde gösterilmiştir. Şekil 4.3’de NaCl çözeltisinde kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin polarizasyon eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere AISI 1045 çeliği üzerine yapılan mangan fosfat



Şekil 4.3. %3,5 wt NaCl çözeltisinde yapılan potansiyol dinamik polarizasyon eğrileri

kaplama işlemi, kaplamasız numunelere göre korozyon potansiyellerinde bir artışa sebep olmuştur. Öte yandan NaCl ortamında yapılan korozyon deneylerinde polarizasyon eğrilerinde de görüldüğü üzere pasif bir davranış sergilemiştir.

Şekil 4.4’de ise 1N H₂SO₄ ortamında fosfat kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin polarizasyon eğrileri görülmektedir. Burada da NaCl çözeltisinde olduğu gibi kaplama işlemi ile malzemelerin korozyon potansiyellerinde pozitif yönde artış sağlanmış ve kaplamadan önce -491 mV olan korozyon potansiyelinin yaklaşık olarak -332 mV’a kadar yükseldiği gözlenmiştir. H₂SO₄ ortamında yapılan korozyon deneylerinde pasif bir tutum gözlenmemiştir.



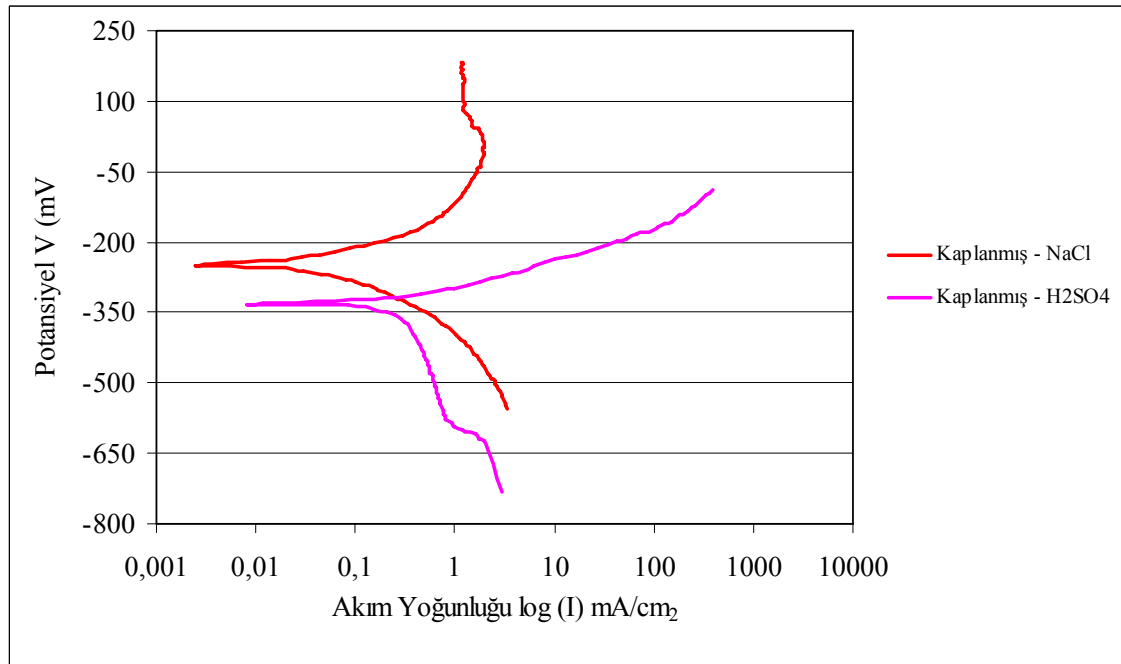
Şekil 4.4. %1N H₂SO₄ ortamında yapılan potansiyel dinamik polarizasyon eğrileri

Çizelge 4.1’de ise tüm korozyon deneylerinden elde edilen E_{kor} ve I_{kor} değerleri verilmiştir. Kaplamasız durumda yaklaşık olarak -491 mV olan korozyon potansiyeli, mangan fosfat kaplama işlemi ile yaklaşık olarak -249 mV’a kadar yükselmiştir.

Çizelge 4.1. %1N H₂SO₄ ve %3,5 wt NaCl ortamında yapılan malzemelerin E_{kor} ve I_{kor} değerleri

Malzeme	E _{kor} (mV)	I _{kor} (mA/cm ²)
Kaplanmamış AISI 1045	-491	0,040
Kaplanmış- AISI 1045 (%1 N H ₂ SO ₄)	-332	0,0081
Kaplanmış- AISI 1045 (%3,5 NaCl ortamı)	-249	0,0024

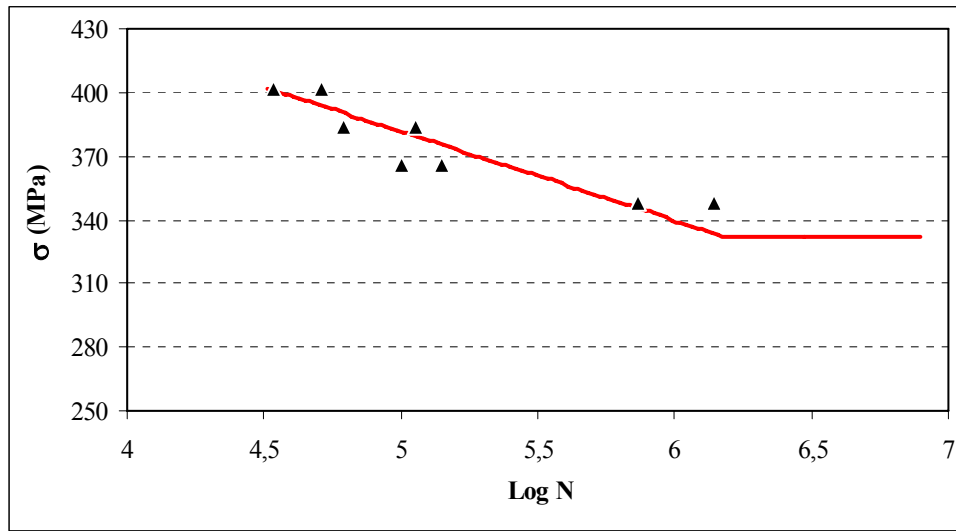
Korozyon ortamının malzemenin korozyon potansiyeli üzerinde etkili olduğu Şekil 4.5’de görülmektedir. Burada yapılan mangan fosfat kaplamanın korozyon direncinin NaCl ortamında H₂SO₄ ortamına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. NaCl ortamında kaplanmamış numuneye göre korozyon potansiyelinde 242 mV’luk bir artış sağlanmasına rağmen, H₂SO₄ ortamında ise bu artış 159 mV’tur. Yine kaplama işlemi sayesinde korozyon akımlarının kaplanmamış numunelere göre azaldığı tespit edilmiştir. En düşük korozyon akımı ise NaCl ortamında yapılan numunelerde elde edilmiştir. NaCl ortamında numunelerde pasif bir tutum gözlenmiştir.



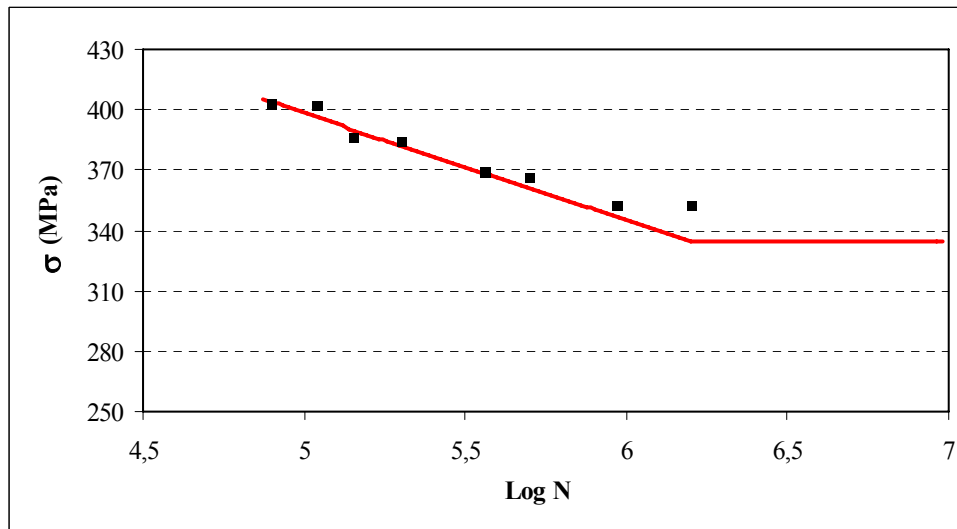
Şekil 4.5. %1N H₂SO₄ ve %3,5 wt NaCl ortamında yapılan potansiyel dinamik polarizasyon eğrileri

4.3. Yorulma deneyi bulguları

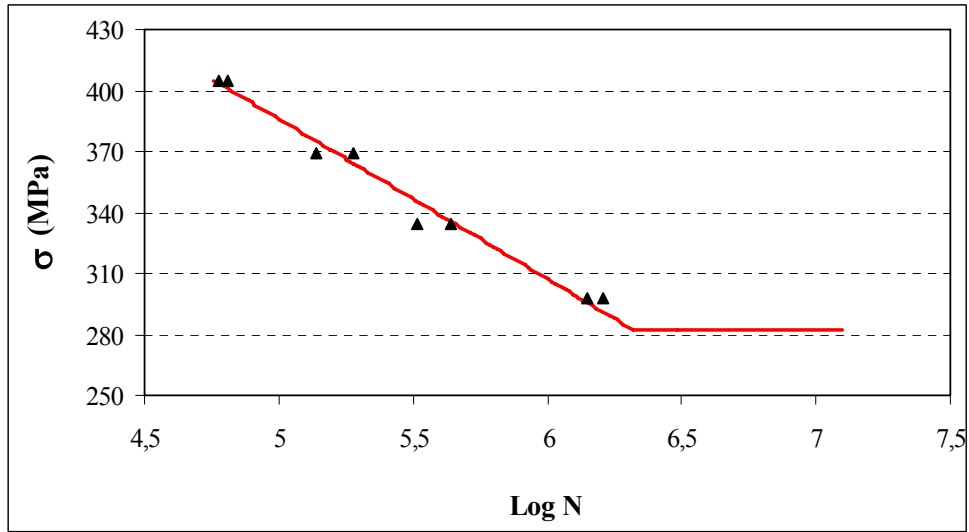
Bu bölümde AISI 1045 çeliğinin düz ve fretting yorulma davranışları üzerinde mangan fosfat kaplamanın etkisi araştırılmıştır. $F=100$ MPa kontak basıncı altında, aynı malzemelerin teması durumunda fretting deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada fretting yorulma limiti ve ömründeki değişimin belirlenmesi, düz ve fretting



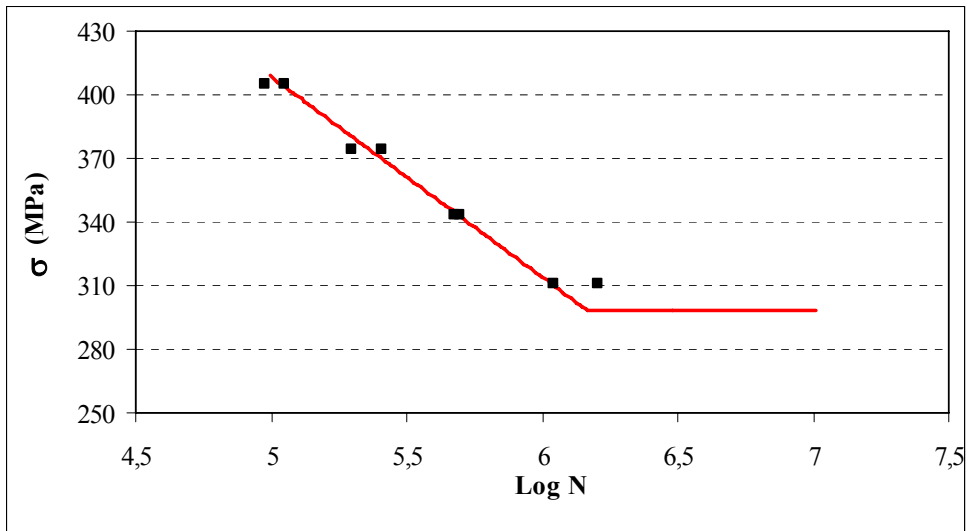
Şekil 4.6. Kaplanmamış ve fretting'siz numunelerin S-N diyagramı
Yorulma Limiti = 332 Mpa



Şekil 4.7. Mangan fosfat kaplanmış ve fretting'siz numunelerin S-N diyagramı
Yorulma Limiti = 334 Mpa



Şekil 4.8. Kaplanmamış ve fretting'li numunelerin S-N diyagramı
Yorulma Limiti = 282 Mpa

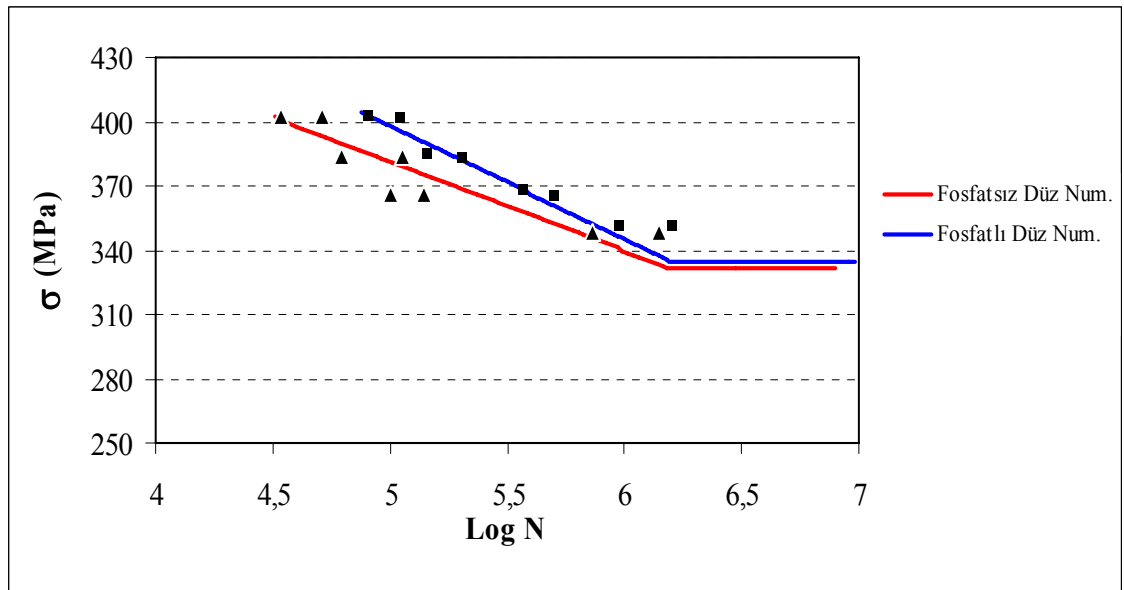


Şekil 4.9. Mangan fosfat kaplanmış ve fretting'li numunelerin S-N diyagramı
Yorulma Limiti = 298 Mpa

numunelerinden elde edilen S-N (Wöhler) diyagramlarının elde edilmesi ile mümkündür. Bu çalışmada sonsuz yorulma ömür sınırı olarak 3×10^6 devir alınmıştır. JSME 002-1981 (Standard method of statistical fatigue testing) standart istatistiksel

yorulma metodu kullanılarak S-N eğrileri tespit edilmiştir. Göz önüne alınan durumlar için elde edilen S-N eğrileri Şekil 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9’da verilmiştir.

Mangan fosfat kaplanmamış ve fretting’siz numunelerin yorulma limiti 332 MPa olarak bulunmasına rağmen (Şekil 4.6), bu sonuç kaplama işlemi uygulanmış fretting’siz numunelerin S-N eğrisi ile karşılaştırıldığında, mangan fosfat kaplama işleminin yorulma limitinde yok denecek kadar az bir artışa sebep olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.7). Bu durum, düz (fretting’siz) yorulma hasar mekanizmalarının oluşumunda (yorulma çatlak başlangıcı ve yayılmasında) mangan fosfat kaplama işleminin yorulma hasar önleyici hiçbir etkisinin olmadığını göstermektedir.

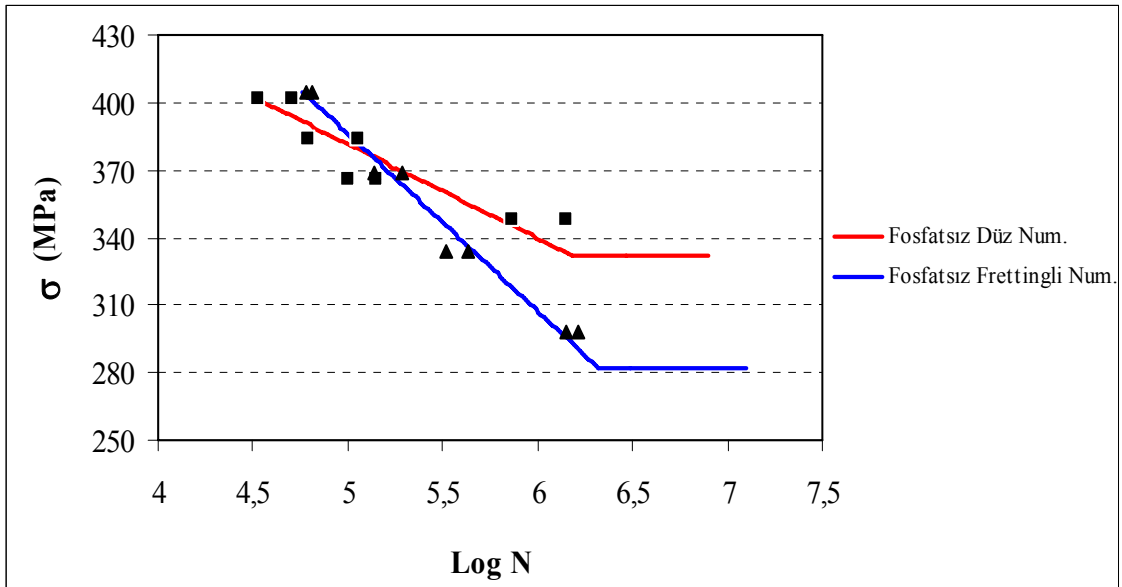


Şekil 4.10. Mangan fosfat kaplanmış ve kaplanmamış düz (fretting’siz) numunelerin S-N diyagramı

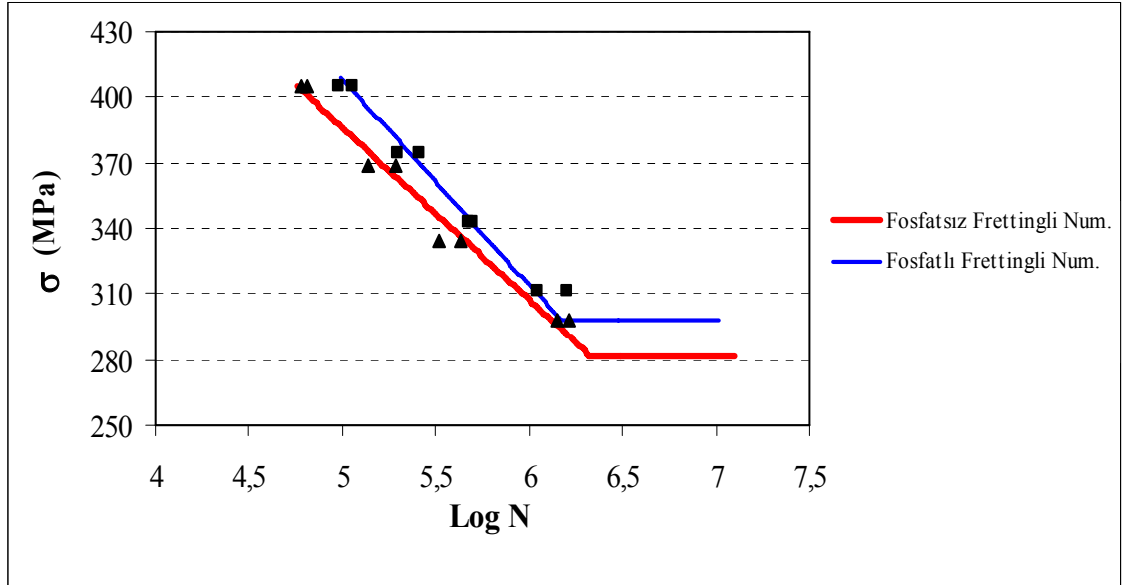
Yine şekil 4.10’da da mangan fosfat kaplama işleminin düz (fretting’siz) numunelerin yorulma limitleri üzerinde fazla bir etkiye sahip olmadıkları daha açık bir şekilde gözlenmektedir. Şekil. 4.11’de ise mangan fosfat kaplama işlemi uygulanmamış düz (fretting’siz) ve fretting’li numunelerin S-N eğrileri birlikte gösterilmiştir. Buradan fretting’li numunelerin malzemenin yorulma dayanımını önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. S-N eğrileri incelendiğinde fretting’in yorulma ömründe olumsuz bir

etkiye sahip olduğu görülmektedir. Yorulma limiti değeri fretting'in etkisiyle 332 MPa'dan 282 MPa'a düşmektedir. Bu ise mikro kayma hareketi neticesinde, temas yüzeyine yakın yerlerde çatlakların oluşumuna bağlı olarak gelişen fretting yorulma hasar mekanizmalarının (yorulma çatlak başlangıcı ve yayılması) oluşumundan ileri gelmektedir. Bu yüzden, fretting hasarının sebep olduğu yorulma limitindeki azalma, fretting'in sebep olduğu bölgesel gerilme konsantrasyonunun meydana getirdiği çatlak başlama ömründeki azalmanın sonucudur diye kabul edilir (Sumita *et al.* 1993).

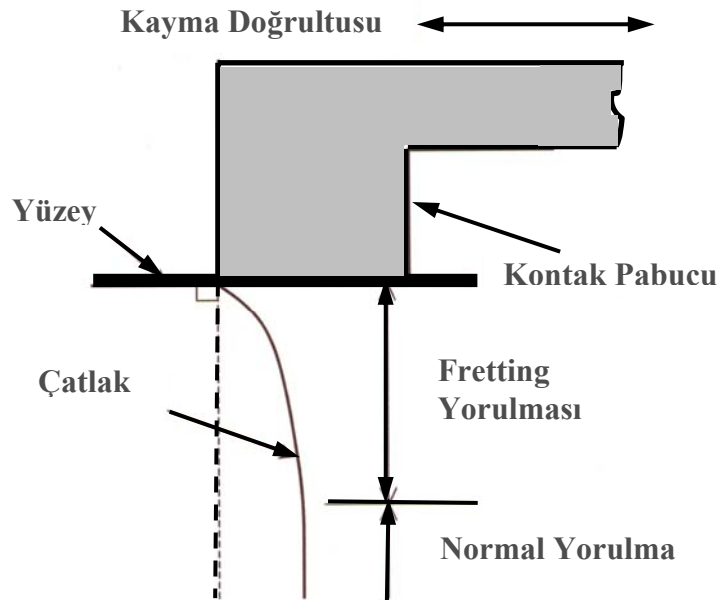
Şekil 4.12'de ise mangan fosfat kaplanmamış ve mangan fosfat kaplanmış fretting'li numunelerin S-N eğrileri birlikte gösterilmiştir. Burada düz (fretting'siz) numunelerin aksine kaplama işleminin numunelerin fretting davranışı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu ve mangan fosfat kaplanmış numunelerin yorulma limitinin kaplanmamış numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu artışın nedeni, mangan fosfat kaplama işlemiyle yüzeyde oluşan fosfat kristallerinin temas yerlerinde bağıl hareket sonucu meydana gelen kayma ve teğetsel sürtünme kuvvetini azaltarak çatlakların oluşumunu ve büyümesini yavaşlatmasından ileri gelmektedir. Fretting yorulmasından kaynaklanan temas bölgesinin morfolojisi şekil 4.13'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Mangan fosfat kaplanmamış düz (fretting'siz) ve fretting'li numunelerin S-N diyagramı



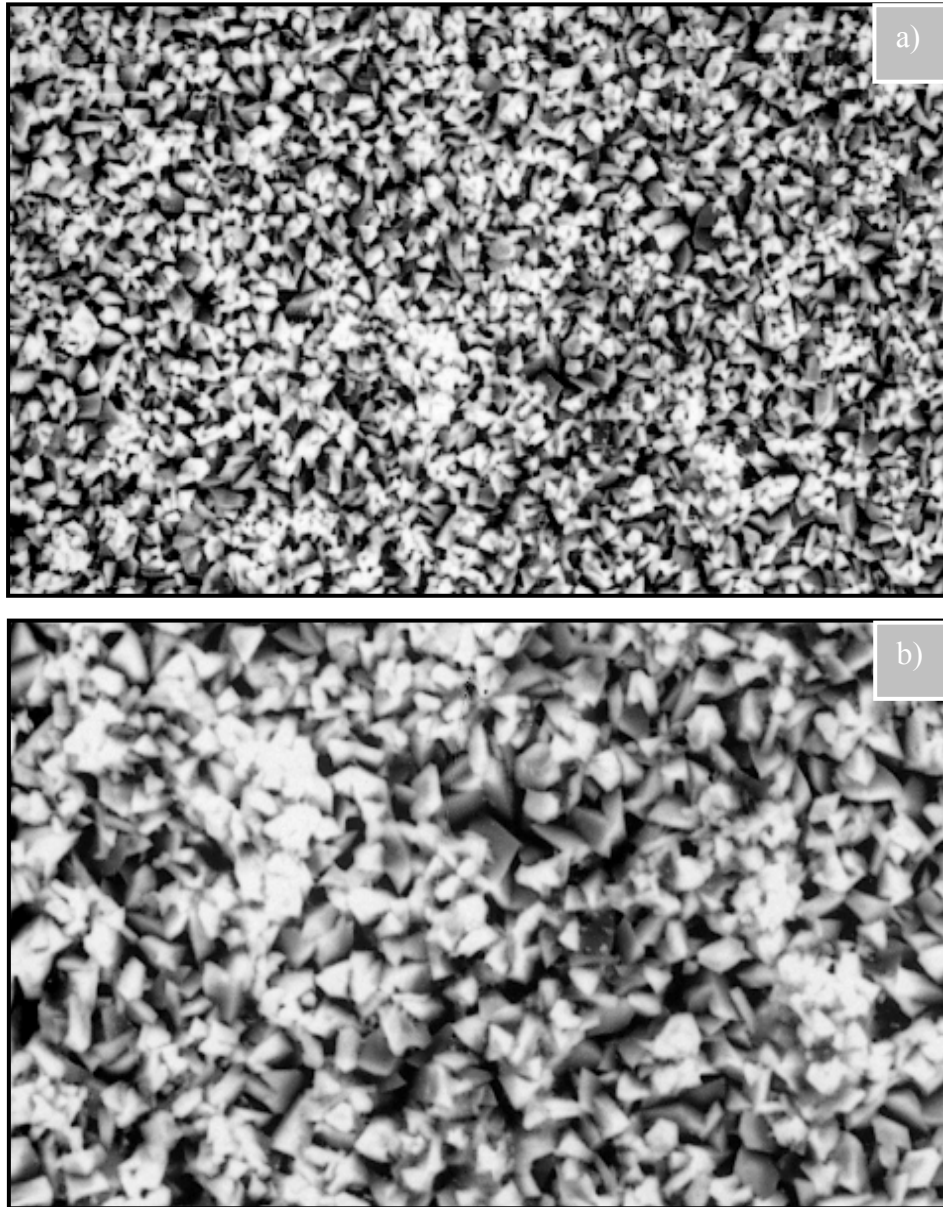
Şekil 4.12. Mangan fosfat kaplanmış ve kaplanmamış fretting’li numunelerin S-N diyagramı



Şekil 4.13. Fretting yorulmasında hasar oluşum safhalarının şematik gösterimi

4.4. SEM incelemeleri

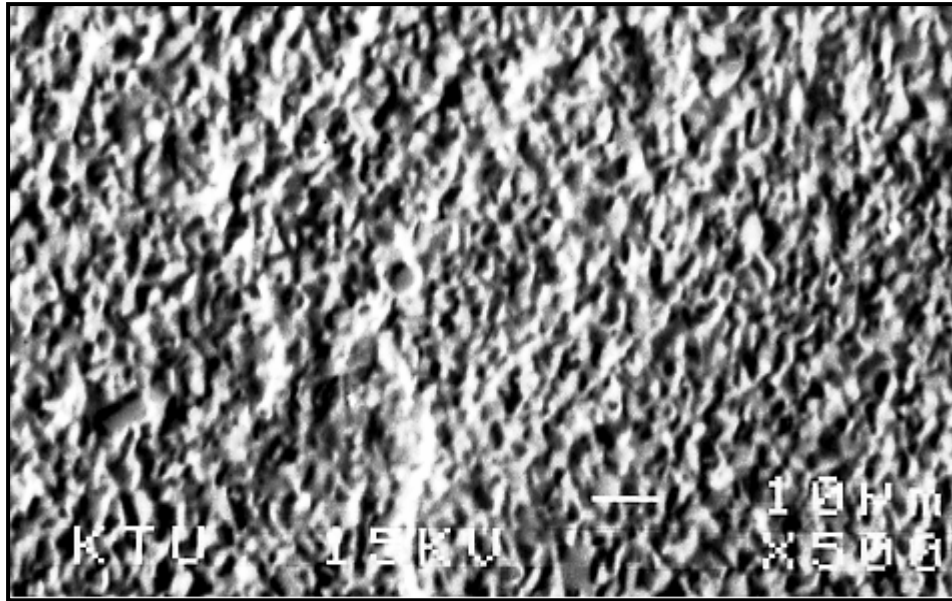
Mangan fosfat kaplama işlemi uygulanmış numunelerinin kaplama yapıldıktan sonra yüzey topografyası, mangan fosfat kaplanmamış ve kaplanmış yorulma numunelerin kırılma yüzeyleri SEM de incelenmiş ve elde edilen görüntüler aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.14. AISI 1045 çeliği üzerine kaplanan mangan fosfat kaplamanın yüzey SEM mikrografları a) X500 b) 1000

Şekil 4.14.a ve b’de AISI 1045 çeliği üzerine yapılan mangan fosfat kaplamanın yüzey SEM mikrograf yapıları gösterilmiştir. Şekilde, mangan fosfat kaplama işlemiyle çeliğin yüzeyinde oldukça yoğun ve ince taneli kristalize olmuş fosfat kristalleri görülmektedir. Kaplamanın yapısının çok ince taneli olmasının sebebi çelik yüzeyinde kristallerin çekirdeklenmesine sebep olacak çok sayıda pürüzlerin ve kaplama banyosunda bulunan organik bileşiklerin bulunması ve ayrıca kaplama banyosunun homojen yapıda olmasıdır. Bu yoğun ve ince kristalli yapı yağlayıcı ve korozyona karşı malzemenin yüzeyini koruyucu tabaka olarak katkı sağlar. Kaplama işlemi ile yüzeyde meydana getirilen bu tabaka sayesinde, numunelerin kayma özelliği iyileştirmekte ve kaplama aşınmayı azaltmaktadır

Mangan fosfat metal yüzeyinde bir tabaka görevi yaparak hareketli makina parçalarının kaymalarını kolaylaştırır ve metaller arasındaki sürtünmeyi azaltır. Mangan fosfat, çinko fosfata göre daha fazla basınca ve sıcaklığa dayanıklı bir yapıya sahiptir. Fretting yorulmada düşük genlikli kayma hareketi mevcut olduğu için birbirine mekanik olarak bağlanan iki malzemenin çok küçük salınımlarla hareket etmesi sonucu meydana gelen aşınmayı ve birlikte oluşan korozyonu yüzeyde oluşana fosfat kristalleri azaltır.



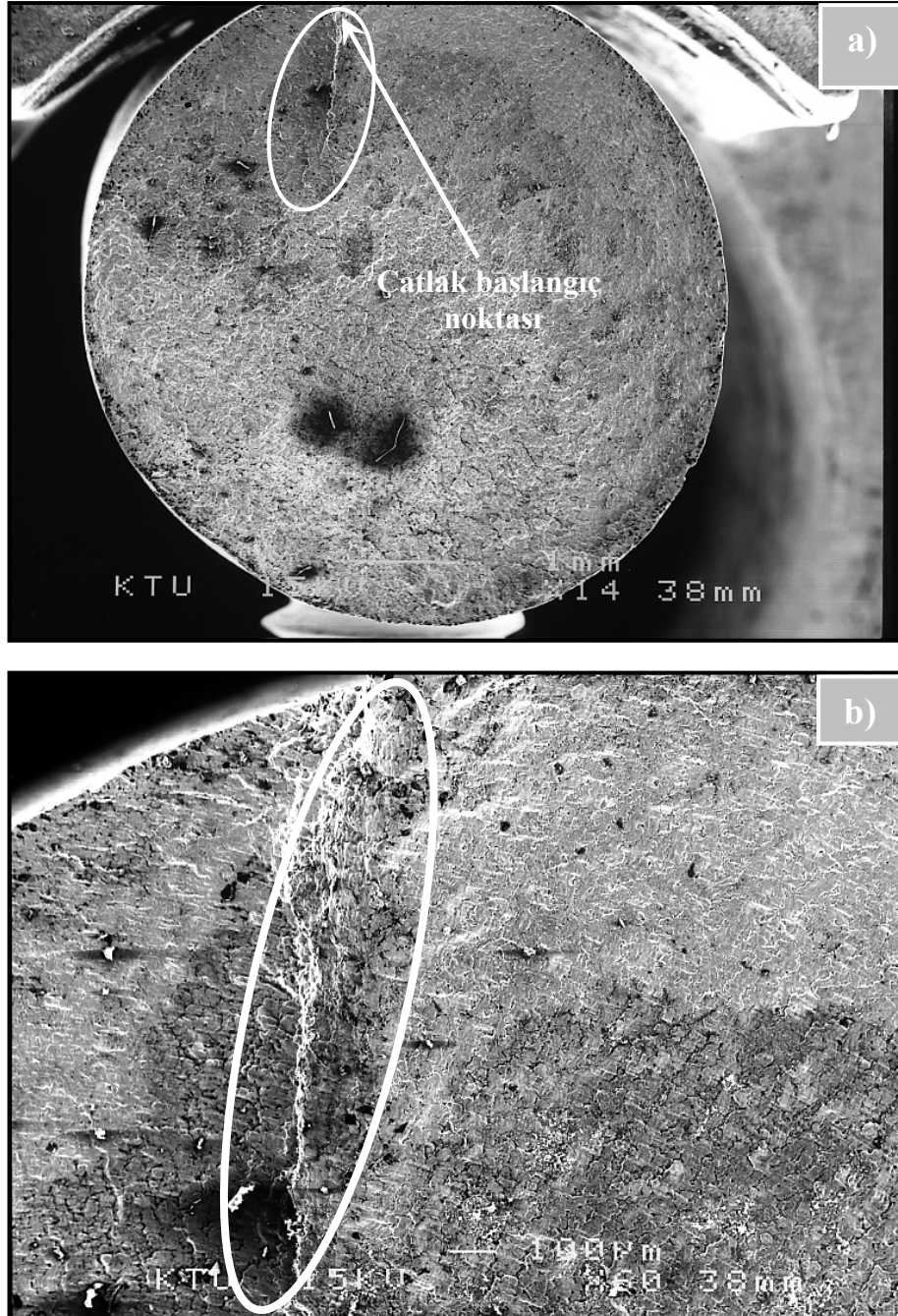
Şekil 4.15. Kaplama işleminden sonra yüzeyin topografik görüntüsü

Şekil 4.15’de ise kaplama işleminden sonra yüzeyin topografik görüntüsü görülmektedir. Yapılan mangan fosfat kaplama işlemi ile yüzey pürüzlülüğünde profilometre ile alınan ölçümlerden görüldüğü üzere bir artış gözlenmiştir.

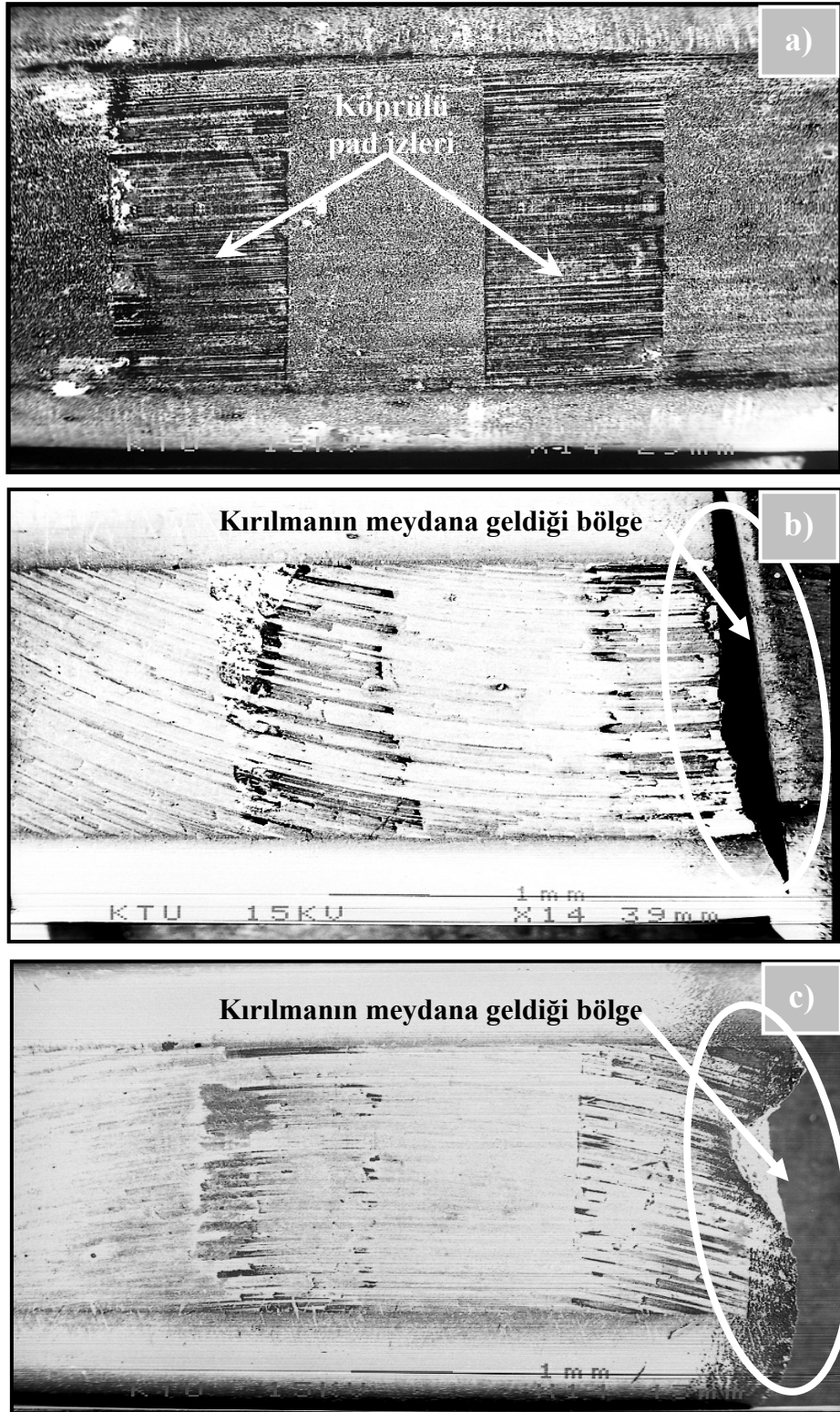
Şekil 4.16’da normal dönel eğilmeli yorulma deneyleri sonunda elde edilen numunelerin kırılma yüzeylerinin değişik büyötmeye sahip görüntüleri verilmiştir. Bilindiğı gibi yorulma kırılması başlıca üç aşamadan meydana gelmektedir. Bunlar sırasıyla, çatlak oluşumu, çatlağın kritik boyaya ilerlemesi ve kırılma. Gerek çatlağın oluşumu ve gerekse ilerleme kademelerinde plastik deformasyonun rolü vardır. Yorulma esnasında yer alan başlıca deformasyon mekanizmaları, kayma, çapraz kayma ve ikizlenmedir. Şekil 4.16’dan da görüldüğü üzere yorulma kırılmasına neden olan çatlak yüzeyde başlamıştır. Uygulanan yük akma mukavemetinin altında olmasına rağmen yükün tekrarlı olması yüklemelerin kümülatif etkisi nedeniyle malzemede plastik deformasyon yer alır. Şekil 4.16.b’de görüldüğü gibi kayma neticesinde numunenin yüzeyinde meydana gelen pürüzler çentik etkisi yaparak çatlak oluşumuna neden olmuştur. Yorulma kırılmasına maruz kalan numunenin kırılma yüzeyi incelendiğinde (şekil 4.13.a) iki yüzey görülmektedir. Bunlar parlak ve taneli bölgedir. Parlak bölge çatlağın başlayıp yavaşça ilerlediğı bölgedir. Diğer bölge ise çatlağın kritik boyaya ulaşarak yükü taşıyamaz hale gelip koptuğı bölgedir ve taneli bir görünüme sahiptir.

Şekil 4.17.a’da fretting yorulma deneyleri sırasında, deney başladıktan belirli bir süre sonra deney durdurularak görüntölenen, fretting yorulma numunesi üzerinde oluşan pabuç izleri görülmektedir. Şekil 4.17.b’de kaplama yapılmamış fretting numunesi üzerinde oluşan iz ve kırılmanın meydana geldiğı bölge gösterilmektedir. Şekil 4.17.c’de de mangan fosfat kaplanmış fretting yorulma numunesi üzerinde kırılmanın meydana geldiğı bölge görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere; pabuçların yorulma numunesi üzerinde yapmış olduğı düşük genlikli hareket nedeniyle numune yüzeylerinde pabuç izleri oluşmakta ve bu oluşan izler fretting hasarı nedeniyle çatlağın başlaması üzerinde etkili olmaktadır. Kırılmanın; hem kaplanmamış (şekil 4.17.b) hem de mangan fosfat kaplanmış (şekil 4.17.c) fretting yorulma numunelerinin

yüzeyinde temas bölgelerinde oluşan izlerin dibinden başladığı görülmektedir. Bu izler numune üzerinde çentik etkisi oluşturarak çatlak başlangıcını hızlandırmaktadır.

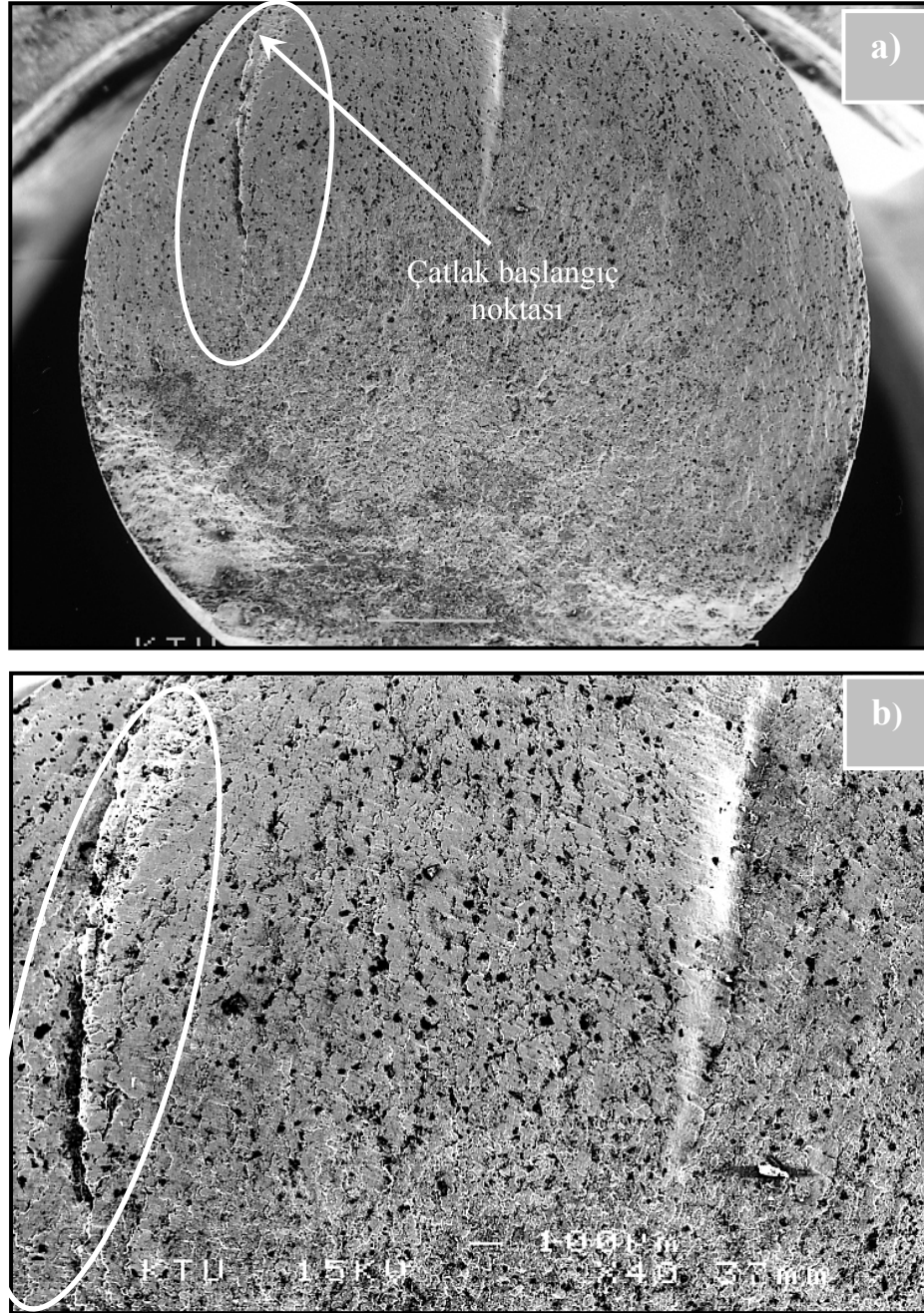


Şekil 4.16. Düz (Fretting'siz) dönel eğilmeli yorulma deneyleri sonunda elde edilen numunelerin kırılma yüzeyleri a) X14, b) X60



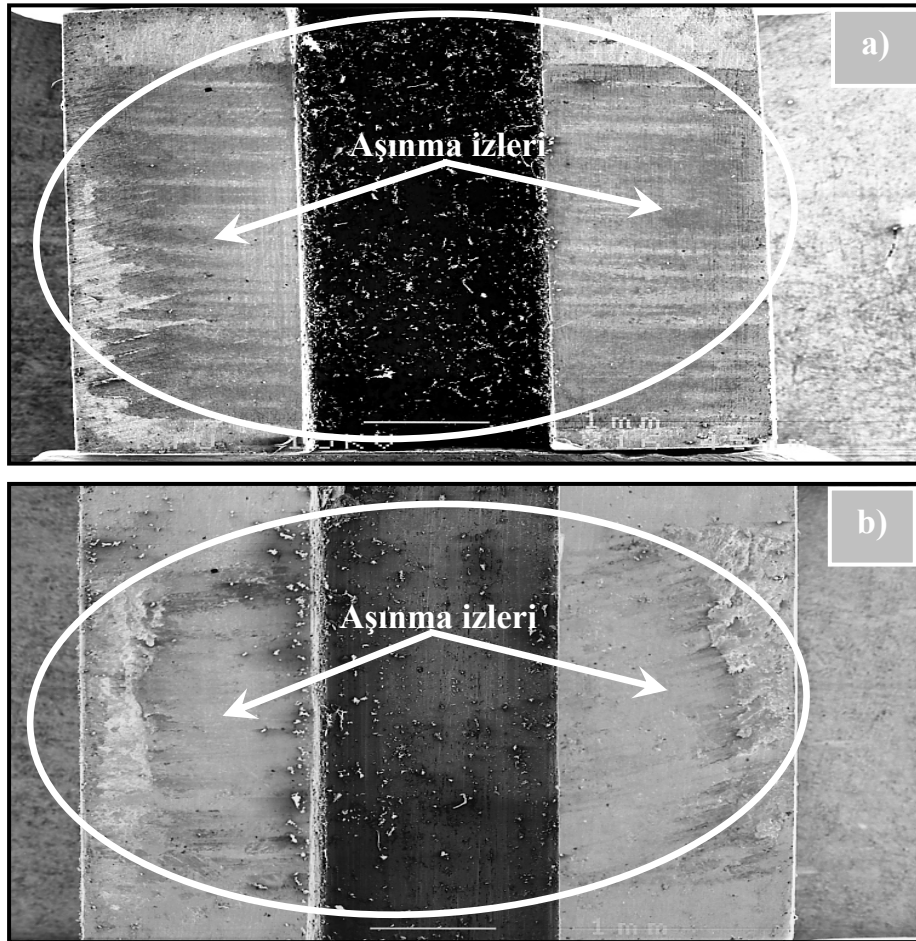
Şekil 4.17. a) Fretting yorulma numunelerinde kırılmadan önce köprü tipi pabuçların (pad) numune yüzeyinde oluşturdukları izler b) kaplanmamış, c) kaplanmış

Şekil 4.18.a ve b’den de görüldüğü gibi kaplama işlemi yapılmamış fretting yorulma numunelerinde de çatlak yüzeyde başlayıp, yavaşça ilerlemektedir. Burada da fretting’siz yorulma numunelerinde olduğu gibi parlak ve taneli bölgenin olduğu ve çatlağın kritik boyaya ulaştığı zaman aniden taneli bölgeden kırıldığı görülmektedir.

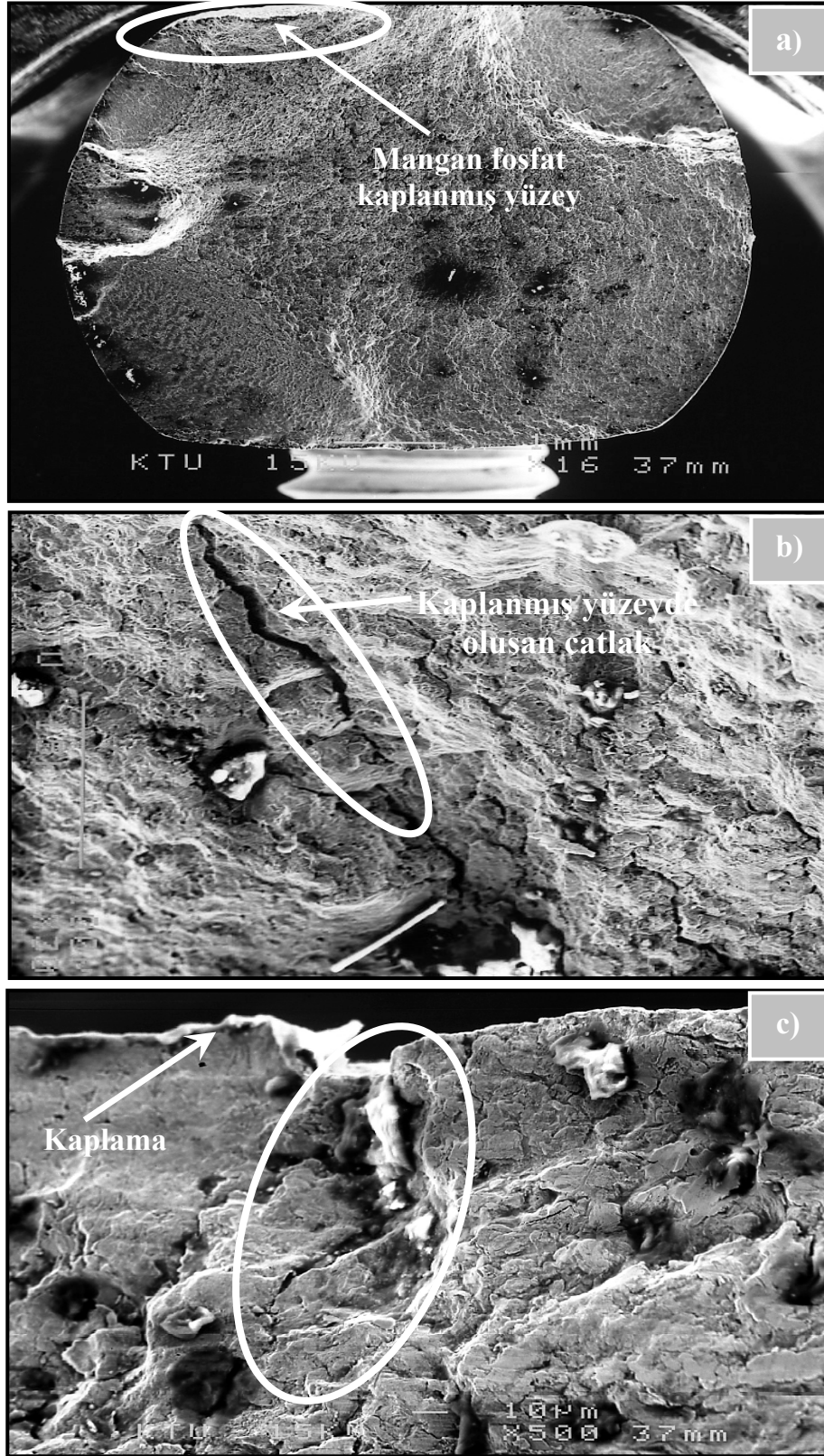


Şekil 4.18 Manganez fosfat kaplanmamış fretting’li numunelerin yorulma deneyleri sonunda elde edilen kırılma yüzeyleri a) X20, b) X40

Şekil 4.19’da fretting deneylerinde karşı eleman olarak kullanılan köprü tipi pabuçların aşınma yüzeyleri görülmektedir. Şekil 4.19.a kaplama yapılmamış numunelerle temas halinde olan pabuçların aşınma yüzeyini göstermektedir. Şekil 4.19.b ise kaplama yapılmış numunelerle temas halinde olan pabuçların aşınma yüzeylerini göstermektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi her iki pabuçta da aşınma meydana gelmektedir. Ancak aşınma miktarlarının kaplanmamış numunelerle temas halinde olan pabuçlarda daha şiddetli olarak gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Buradan kaplanmış numunelerde, pabuç ve fretting’li yorulma numune arasındaki mangan fosfat tabakasının aşınmayı azalttığı söylenebilir.



Şekil 4.19. Fretting yorulma deneylerinde kullanılan pabuçların aşınma yüzeyleri
a) kaplamasız numunelerde kullanılan pabuç, b) kaplanmış numunelerde kullanılan pabuç (pad)



Şekil 4.20. Mangan fosfat kaplanmış fretting’li numunelerin yorulma deneyleri sonunda elde edilen kırılma yüzeyleri a) X16, b) X300, c) X500

Şekil 4.20.a, b ve c’de mangan fosfat kaplanmış fretting deney numunelerinin kırılma yüzeyleri görülmektedir. Buradan da görüldüğü gibi kırılma yüzeyleri diğer numunelere benzemektedir. Çatlağın kaplamada başlayıp ilerlediği değişik büyütmelerde çekilen SEM görüntülerinden görülmektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada $F= 100$ MPa kontak basıncında AISI 1045 çeliğinin fretting yorulma davranışı ve ayrıca korozyon davranışı üzerinde mangan fosfat kaplamanın etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Yapılan fretting yorulma deneylerinde fretting olayının, malzemelerin yorulma dayanımı üzerinde önemli derecede azalmalara neden olduğu gözlenmiştir. Fretting'siz durumda yorulma dayanımı 332 MPa iken bu değer fretting yorulma deneyi sonunda 282 MPa'a düştüğü tespit edilmiştir. Fretting hasarının sebep olduğu yorulma limitindeki bu azalma, fretting'in sebep olduğu bölgesel gerilme konsantrasyonunun meydana getirdiği çatlak başlama ömründeki azalmanın sonucu olarak ifade edilebilir.
- Mangan fosfat kaplama işleminin AISI 1045 çeliğinin düz (fretting'siz) yorulma dayanımı üzerinde fazla bir artışa sebep olmadığı gözlenmiştir. Bunun sebebinin mangan fosfat kaplama işleminin malzemelerin sertliğinde fazla bir değişime sebep olmadığı ve yüzeyde bir bası artık gerilmesi meydana getirmemesinden kaynaklandığı söylenebilir. Öte yandan düz (fretting'siz) yorulma esnasında yorulma çatlak başlangıcı ve ilerlemesinde mangan fosfat kaplama işleminin yorulma hasar önleyici hiçbir etkisinin olmadığını göstermektedir.
- Mangan fosfat kaplama işleminin, AISI 1045 çeliğinin fretting yorulma davranışı üzerinde etkili olduğu ve fretting yorulma limitini önemli miktarda artırdığı tespit edilmiştir. Fretting yorulma limiti kaplanmamış durumda 282 MPa iken kaplama işlemi sonunda bu değer 298 MPa'a yükselmiştir. Bu artışın nedeni, mangan fosfat kaplama işlemiyle yüzeyde oluşan yoğun fosfat kristallerinin, temas yerlerinde bağlı hareket sonucu meydana gelen kaymayı ve teğetsel sürtünme kuvvetini azaltmasından kaynaklanmaktadır.

- Mangan fosfat kaplama işlemi sonunda numunelerin yüzey pürüzlüğünde bir miktar artış gözlenmiştir. Fretting yorulma deneyi sırasındaki aşınma neticesinde yüzeyler arasında oluşan parçacıkların bu pürüzler arasına girerek aşınmayı azalttığı bunda mangan fosfat kaplanmış numunelerin fretting yorulma dayanımı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olacağı söylenebilir.
- Mangan fosfat kaplama işleminin AISI 1045 çeliğinin korozyona karşı direncini artırdığı tespit edilmiştir. Kaplamadan önce -491 mV olan korozyon potansiyeli, kaplama işleminden sonra -249 mV değerine yükselmiştir.
- Polarizasyon eğrilerinden açıkça görüldüğü üzere mangan fosfat tabakasının H_2SO_4 asit ortamından kolayca etkilendiği ve fosfat kaplanmış numunelerin asit ortamında korozyon ömürlerinin daha kısa olduğu tespit edilmiştir. Polarizasyon eğrilerinden görüldüğü üzere NaCl ortamında kalan numunelerde pasif tutum gözlenmiş ve ayrıca NaCl ortamındaki numunelerin korozyon potansiyelinin, H_2SO_4 ortamına göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Mangan fosfat kaplama neticesinde yüzeyde oluşan kaplama tabakasının, yüzeyin oksitlenmeye karşı direncini artırarak, fretting olayı sonunda temas bölgelerinden ayrılan partiküllerin kısa sürede oksitlenmesini önleyerek fretting yorulma direncini artırabileceği söylenebilir.
- SEM incelemeleri sonucunda mangan fosfat kaplama işlemiyle çeliğin yüzeyinde oldukça yoğun ve ince taneli kristalize olmuş fosfat kristalleri elde edilmiştir. Mangan fosfat kaplama işlemi ile yüzeyde meydana getirilen bu tabakanın numunelerin kayma özelliğini iyileştirdiği ve aşınmayı azalttığı ve bunun sonucunda da kaplanmış numunelerde temas noktalarında oluşan pabuç izlerinin kaplanmamış numunelere göre daha az olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Allen, C., Li, C.X., Bell, T., Sun, Y., 2003, "The effect of fretting on the fatigue behaviour of plasma nitrided stainless steels", *Wear* 254, 1106–1112.
- Alsaran, A., 1997, "Kaynaklı parçaların yorulması", Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 35-36.
- Antoniou, R.A., Radtke, T.C., 1995, "Fretting-Fatigue of Titanium Based Aircraft Turbine Materials," Defence Science and Technology Organisation, 296-307.
- Antoniou, R.A., Radtke, T.C., 1997, "Mechanisms offretting-fatigue of titanium alloys", *Materials Science and Engineering*, A237, 229-240.
- Bannantine, J.A., Comer, J.J., Handrock, J.L., 1990, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Brady, B. G., 1990, Fretting Wear, SAE, Technical Paper Series, Aeroscope Technology Conference and Exposition Long Beach, December 1-4, California.
- Broszeit, E., Kloos, K.H., Schweighofer, B., 1985, "The Fretting Fatigue Behaviour of the Titanium Alloy TÝ-6Al-4V," *Proceedings of the Fifth international Conference on Titanium*, Munich, West Germany, Vol. 4, pp 2171-2178.
- Bryggman, U., and Sodeberg, S., 1986, "Contact Condition in Fretting", *Wear*, 107, 245.
- Caminaga, C., Issii, R.L.S., Button, S.T, 2006, "Alternative lubrication and lubricants for the cold extrusion of steel parts", *Journal of Materials Processing Technology*, in press.
- Caron, I., Gras, R., Ganne, T., De Monicault, J.M., 2006, "Coatings on Ti6Al4V as palliatives for fretting fatigue in cryogenic environment", *Tribology International*, in press.
- Chakravarty, S., Andrews, R.G., Patnaik, P.C., Koul, A.K., Nisan 1995, "The Effect of Surface Modification on Fretting Fatigue in Ti Alloy Turbine Components," *JOM*, sayfa 31-35.
- Collins, J.A., 1981, *Failure of Materials in Mechanical Design*. A Wiley-Interscience Publication, United States of America.
- Creus, J., Idrissi, H., Mazille, H., Sanchette, F. and Jacquot, P., 1 June 1999, "Corrosion behaviour of Al/Ti coating elaborated by cathodic arc PVD process onto mild steel substrate", *Thin Solid Films*, Volume 346, Issues 1-2, 150-154.
- Demirözü, T., 2000, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Dobromirski, J.M., 1992, In: *Standardization of fretting Fatigue Test Methods and Equipment*, Eds.: Helmi Attia, M., Waterhouse, R.B., ASTM STP 1159, American Society for Testing and Materials, 60.
- Doruk, M., Korozyon ve Önlenmesi, ODTU, 248, Ankara.
- Dubar, L., Bricout, J.P., Wierre, C., Meignan, P., 1998, "New surface processes for cold forging of steels", *Surface and Coatings Technology*, 102, 159–167.
- Eden, E.M., Rose, W.N., Cunningham, F.L., 1911, "The Endurance of Metalsi Process institute tor Mechanical Engineering, Vol. 4, pp 839-974.
- Endo, K., and Goto, H., 1976, "Initation and Propagation of fretting Fatigue Cracks", *Wear*, 38, 311.

- Erden, S., Değertekin M. C., 2004, Korozyon ve Katodik Koruma, Kocaeli EMO Şubesi, İzmit.
- Fenner, A.J., Field, J.E., 1958, "Revue de Metallurgie," Vol. 55, pp 475-485, Paris, France.
- Flis J.; Mankowski J.; Zakroczymski T.; Bell T., September 2001, "The formation of phosphate coatings on nitrided stainless steel", Volume 43, Number 9, pp. 1711-1725.
- Freeman, D. B., 1986, Phosphating and Metal Pre-Treatment, Woodhead-Faulkner Ltd., London.
- Guenbour, A., Benbachir, A., Kacemi, A., 1999, "Evaluation of the corrosion performance of zinc-phosphate-painted carbon steel", Surface Coatings Technology, 113, 36-43.
- Hamdy, M.M., Waterhouse, R.B., 1982, "The Fretting Fatigue Behaviour of the Titanium Alloy Ti-6Al-4V at Temperatures up to 600 °C," Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol 5., No. 4, pp 267-274.
- Hoeppner, D., 1992, "Mechanisms of fretting fatigue and their impact on test methods development", ASTM STP 1159, M.H. Attia and R.B. Waterhouse, Eds, ASTM, Philadelphia, pp. 23-32.
- Hurricks, P., 2001, "The mechanism of Fretting, Wear, 25, 1973, 111.) (Hascalık, A., Savaş, V., "Bir Fretting Yorulma Cihazının Tasarımı ve İmalatı", Politeknik Dergisi, 87-93.
- Hutson, A., Lee, H., Mall, S., 2006, "Effect of dissimilar metals on fretting fatigue behavior of Ti-6Al-4V", Tribology International, in press.
- Iyer, K., Mail, S., 2001, "Analyses of Contact Pressure and Stress Amplitude Effects on Fretting Fatigue Life," Journal of Engineering Materials and Technology, ASME, Vol. 123, 85-93.
- Jin, O., Mall, S., Sanders, J.H., Sharma, S.K., 2006, "Durability of Cu-Al coating on Ti-6Al-4V substrate under fretting fatigue", Surface & Coatings Technology, in press.
- Koenen, A., Vermoux, Ph., Gras, R., et al., 1996, "A machine for fretting fatigue and fretting wear testing in cryotechnical and normal environment," Wear, No. 197, 192-196.
- Koul, A.K., Xue, L., Wallace, W., Et Al., May 1996, "An Investigation on Surface Treatments for improving the Fretting Fatigue Resistance of Titanium Alloys," 82nd Meeting of the AGARD SMP.
- Kubota, M., Noyama, N., Sakae, C., Kondo, Y., 2006, "Fretting fatigue in hydrogen gas", Tribology International, in press.
- Lee, H., Mall, S., Allen, W.Y., 2006, "Fretting fatigue behavior of shot-peened Ti-6Al-4V under seawater enviro", Materials Science and Engineering A 420, 72-78.
- Liu, W.M., Xia, Y.Q., Han, N., Xue, Q.J., 2002, "A comparative study of the friction and wear behavior of untreated mild steel and its boron-permeated counterpart under lubrication of liquid paraffin containing zinc dialkylthio-phosphate", Tribology International 35, 497-502.
- Malkin, S., Majors, D.P., Courtney, H., 1972, "Surface Effects during Fretting Fatigue of Ti-6Al-4V," WEAR Magazine, No. 22, pp 235 - 244.

- Martinez, S.A., Sathish, S., Blodgett, M.P., Mall, S., Namjoshi, S., 2005, "Effects of fretting fatigue on the residual stress of shot peened Ti-6Al-4V samples", *Materials Science and Engineering A* 399, 58–63.
- Mindlin, R.D., 1949, "Compliance of Elastic Bodies in Contact," *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 16, pp 259-268.
- Privett III, H.M., Fujishiro, S., 1994, "Coating Studies for Prevention of Fretting Fatigue in Jet Engine Titanium Compressor Blade Dovetails," *Minerals, Metals & Materials Society*, pp 401-410.
- Rajasekaran, B., Raman, S.G.S, Joshi, S.V., Sundararajan, G., 2006, "Effect of detonation gun sprayed Cu-Ni-In coating on plain fatigue and fretting fatigue behaviour of Al-Mg-Si alloy", *Surface & Coatings Technology*, in press.
- Ramakrishna, N.K., Naidu, Raman, S.G.S, 2005, "Effect of contact pressure on fretting fatigue behaviour of Al-Mg-Si alloy AA6061", *International Journal of Fatigue* 27, 283–291.
- Rossi, S., Chini, F., Straffelini, G., Bonora, P.L., Moschini, R., Stampali, A., 2003, "Corrosion protection properties of electroless Nickel/PTFE, Phosphate/MoS₂ and Bronze/PTFE coatings applied to improve the wear resistance of carbon steel", *Surface and Coatings Technology* 173, 235–242.
- Ruiz, C., Boddington, P.H.B., Chen, K.C., September 1984, "An Investigation of Fatigue and Fretting in a Dovetail Joint," *Experimental Mechanics*, pp 208–217.
- Ruiz, C., Chen, K.C., 1986, "Fatigue of Engineering materials and structures", *Institution of Mechanical Engineers, United Kingdom*, 187-194.
- Sato, J., Shima, M., Igarashi, J., Tanak, M., and Waterhouse, R.B., 1981, *Studies on Fretting*, I. Section, *JSLE*, 26, 207.
- Sato, K., Fuji, H., Kodama, S., 1986, "Crack Propagation Behaviour in Fretting Fatigue", *Wear*, 107, 245.
- Shen, G., Luo, J., Wang, S., Liang, Y., 1995, "The Surface Preventing Methods for Fretting Fatigue on TC11 Titanium Alloy," *Titanium: Science and Technology*, pp 2046-2052.
- Sines, G., Waisman, J.L., et al, 1959, "Metal Fatigue," McGraw-Hill company, 71.
- Söderlund, E., Ljunggren, P., 1998, "Formability and corrosion properties of metal/ceramic multilayer coated strip steels", *Surface Coatings Technology*, 110, 94-104.
- Szolwinski, M. P., Farris, T. N., 1996, "Mechanics of Fretting Fatigue Crack Formation", *Wear*, vol. 198, pp. 93-107.
- Tomlinson, G. A., 1927, "The Rusting of Steel Surfaces in Strength," *Proc. R. Soc. London*, A115, p. 472.
- Totik, Y., Jan 24 2006, "The Corrosion Behaviour of Manganese Phosphate Coatings Applied to AISI 4140 Steel Subjected to Different Heat Treatments", *Surface and Coatings Technology*, 200 (8): 2711-2717.
- Vadiraj, A., and Kamaraj, M., 2006, "Effect of surface treatments on fretting fatigue damage of biomedical titanium alloys", *Tribology International*, in press.
- Vadiraj, A., and Kamaraj, M., 2006, "Characterization of fretting fatigue damage of PVD TiN coated biomedical titanium alloys", *Surface & Coatings Technology* 200, 4538 – 4542.

- Warlow Davies, 1941, "fretting corrosion and fatigue strength : Brief results of Preliminary Experiments, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol.146, 32-38.
- Waterhouse, R.B., and Taylor, D.E, 1974, " Fretting Debris and the Delamination Theory of Wear", Wear, 25, 337.
- Waterhouse, R.B. and Sunders, D.A., 1979, "The Effect of Shot Peening on the Fretting Fatigue Behaviour o f an Austenitic Stainless Steel and a Mild Steel," WEAR Magazine, No. 53, pp. 381-386.
- Waterhouse, R.B., 1981, "Fretting Fatigue," Applied Science Publishers Ltd, London, 221-240.
- Waterhouse, R.B., Iwabuchi, A., July 1985, "The Composition and Properties of Surface Films Formed During the High Temperature Fretting of Titanium Alloys," Proceedings of the JSLE intemational Tribology Conference, Tokyo, Japan, pp 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^ intemational Materials Review, Vol. 37, No.2, 77-97.
- Yalçın, H. Ve Koç, T., Mühendisler için Korozyon, Kimya Mühendisleri Odası, 316, Ankara.
- Yetim, F., 2004, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Yılmaz, P., 2003, Fosfatlama, Gemsan A. Ş. Teknik Bülteni, 40:5-6, İstanbul.
- Zhang, X., Zhang, C., and Zhu, C., 1989, "slip amplitude effects and microstructural charceteristics of surface layers in fretting wear of carbon steel", Wear, 134, 297.
- Zhou, M., Yang, Q., Troczynski, T., 2006, "Effect of substrate surface modification on alumina composite sol-gel coatings", Surface & Coatings Technology, 200, 2800 – 2804.

ÖZGEÇMİŞ

1972 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 1987 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği bölümünde yüksek öğrenimine başladı. Bu bölümden 1991 yılında mezun oldu ve DSİ Genel Müdürlüğü’nde Makina Mühendisi olarak çalışma hayatına başladı. 1993 yılında Erzurum DSİ VIII. Bölge Müdürlüğü’ne tayin oldu. 1995-1996 yılları arasında 245. dönem yedek subay olarak vatani görevini yaptı. 2002 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

Halen Erzurum DSİ VIII. Bölge Müdürlüğü’nde İkmal Başmühendisi olarak görev yapmakta olup, evli ve iki çocuk babasıdır.