

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Y. LİSANS TEZİ

SERT ELOKSAL VE AKIMSIZ NİKEL KAPLANMIŞ ALÜMİNYUM
ALAŞIMININ SÜRTÜNMELİ TEMAS (FRETTING) YORULMA
KAREKTERİZASYONU

Selçuk ATASOY

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZURUM

2009

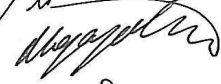
Her hakkı saklıdır

Doç. Dr. Recep SADELER' in danışmanlığında, Selçuk ATASOY tarafından hazırlanan bu çalışma 19.08.2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Doç. Dr. Recep SADELER

İmza : 

Üye : Doç. Dr. Mehmet GAVGALI

İmza : 

Üye : Doç. Dr. Ramazan DEMİRBOĞA

İmza : 

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ömer AKBULUT

Enstitü Müdürü

ÖZET

Y. Lisans Tezi

SERT ELOKSAL VE AKIMSIZ NİKEL KAPLANMIŞ ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SÜRTÜNMELİ TEMAS (FRETTING) YORULMA KAREKTERİZASYONU

Selçuk ATASOY

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Recep SADELER

Birçok makine parçası ve yapı elemanı, kullanılma esnasında tekrarlanan yükler ve titreşimler altında çalışmaktadır. Mühendislik Malzemelerinde, dinamik yükleme şartları altında meydana gelen hasara yorulma adı verilir. Sürtünmeli temas yorulması, yorulma hasarının alt başlığı altında incelenmektedir.

Temas eden iki elemandan biri dinamik yükleme veya titreşime maruz kaldığında meydana gelen sürtünmeli temas yorulması, malzemelerin yorulma dayanımını ciddi şekilde azaltarak ve sonuçta da beklenmeyen kazalara neden olan önemli mühendislik problemlerindendir. Birçok endüstri uygulamasında yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımları mühendislik ve yapısal uygulamalarda, sürtünmeli temas yorulması hasarına maruz kalabilirler. Bu yüzden bu tezde, T6 ısıtma işlemi görmüş 2014 grubu alüminyum alaşımına uygulanan Sert Eloksal ve Akımsız Nikel kaplamalarının sürtünmeli temas yorulma davranışı üzerindeki etkisi, iki farklı yorulma yükleme türü için incelenmiştir. Ayrıca aşınma testleri de yapılarak aşınma ile sürtünmeli temas yorulma davranışı arasında doğrudan bir etkileşimin olup olmadığı araştırılmıştır.

2009, 116 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yorulma, Sürtünmeli temas yorulması, Yüzey işlemi

ABSTRACT

MS Thesis

FRETTING FATIGUE CHARACTERISATION OF ALUMINIUM ALLOY COATED WITH AN HARD ANODIZING AND ELECTROLESS NICKEL

Selçuk ATASOY

Ataturk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Recep SADELER

Many mechanic and structure components are to work under repeated loading and vibration in usage.. Failures occurring under conditions of dynamic loading in Engineering materials are called fatigue. Fretting fatigue is analysed as a subhead of fatigue failure.

Fretting fatigue, which occurs if one of two contacting surfaces is subjected to vibration or cyclic loading, is one of the most important engineering problem by inducing a serious reduction of fatigue strength of materials and consequently, of unexpected failure accidents.

Aluminium alloy, which is widely used in various industry arms, at engineering and structural applications may be subjected to Fretting fatigue failures. Thus, in this thesis, effect of hard anodizing and electro less, which were applied to 2014 Aluminium alloy with T6 heat treatment, on fretting fatigue was searched for two different fatigue loadings. Besides, it was investigated by performing wear tests whether there is a directly interaction between wear and fretting fatigue or not.

2009, 116 pages

Keywords: Fatigue, Fretting Fatigue, Surface Treatments

TEŞEKKÜRLER

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma boyunca her türlü yardım ve desteği ile beni sürekli gayretlendiren, bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, danışmanım Sayın Doç. Dr. Recep SADELER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmaya maddi destek veren TÜBİTAK' a teşekkürlerimi sunarım.

Selçuk ATASOY

Ağustos 2009

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİN.....	v
1.GİRİŞ.....	1
2.KURAMSAL TEMELLER.....	19
2.1. Sürtünmeli Temas Olayı.....	19
2.1.1. Sürtünmeli temas aşınması.....	20
2.1.2. Sürtünmeli temas yorulması.....	21
2.1.3. Sürtünmeli temas yorulma teorileri.....	22
2.1.4. Sürtünmeli temas yorulmasının sebep olduğu çatlak oluşumu.....	25
2.1.5. Sürtünmeli temas yorulmasında çatlak oluşumunu etkileyen faktörler.	29
2.1.6. Sürtünmeli temas yorulmasının zararlı etkilerine karşı direnç arttırma metotları.....	36
2.2. Yüzeyler arasında temas.....	39
2.2.1. Sürtünme.....	40
2.2.2. Aşınma.....	42
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	45
3.1. Sürtünmesiz ve Sürtünmeli Temas Yorulma Deneyleri.....	45
3.1.1. Döner eğilmeli sürtünmesiz ve sürtünmeli temas yorulma deneyleri	45
3.1.1.a. Malzeme özellikleri.....	45
3.1.1.b. Döner eğilmeli test numune boyutları.....	47
3.1.1.c. Döner eğilmeli test numunelerine uygulanan ısıtma işlemi.....	48
3.1.1.d. Döner eğilmeli test numunelerine uygulanan kaplamalar.....	51
3.1.1.e. Döner eğilmeli sürtünmeli temas yorulması deney düzeneği.....	53
3.1.1.f. Döner eğilmeli yorulma test cihazı.....	55
3.1.1.g. Döner eğilmeli sürtünmeli temas yorulma deneyleri için	

temas basıncı.....	57
3.1.2. Düzlemsel eğilmeli sürtünmesiz ve sürtünmeli temas yorulma deneyi...	58
3.1.2.a. Malzeme özellikleri (düz numune).....	58
3.1.2.b. Düzlemsel eğilmeli test numune boyutları.....	59
3.1.2.c. Düzlemsel eğilmeli test numunelerine uygulanan ısı işlem.....	60
3.1.2.d. Düzlemsel eğilmeli test numunelerine uygulanan kaplamalar.....	62
3.1.2.e. Düzlemsel eğilmeli sürtünmeli temas yorulma deneyi.....	64
3.1.2.f. Düzlemsel eğilmeli yorulma test cihazı.....	70
3.2. Aşınma Deneyi.....	75
3.2.1. Malzeme özellikleri.....	75
3.2.2. Aşınma deneyi malzemelerine uygulanan kaplamalar.....	76
3.2.3. Aşınma deney düzeneği.....	78
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	80
4.1. Düz (Sürtünmesiz Temas) ve Sürtünmeli Temas Yorulma Deneyi.....	80
4.1.1. Döner eğilmeli yorulma.....	80
4.1.1.a. Döner eğilmeli düz (sürtünmesiz temas) yorulma deneyi.....	80
4.1.1.b. Sürtünmeli temas yorulma deneyi.....	82
4.1.1.c. Döner eğilmeli sürtünmeli temas yorulma numunelerinin SEM görüntüleri.....	86
4.1.2. Düzlemsel eğilmeli yorulma.....	90
4.1.2.a. Düzlemsel eğilmeli sürtünmesiz temas yorulma deneyi.....	90
4.1.2.b. Düzlemsel eğilmeli sürtünmeli temas yorulma deneyi.....	91
4.1.2.c. Düzlemsel eğilmeli sürtünmeli temas yorulma numunelerinin SEM görüntüleri.....	98
4.2. Aşınma Deneyi Bulguları.....	103
5. SONUÇLAR.....	106
KAYNAKLAR.....	112
ÖZGEÇMİŞ.....	116

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

μm	Mikrometre
MPa	Mega Paskal
$^{\circ}\text{K}$	Kelvin
IBED	İyon demeti yöntemi
Ra	Yüzey Pürüzlülük Değeri (μm)
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat
AA	Alüminyum alaşım
SEY	Sonlu elemanlar yöntemi
HV	Vickers sertlik değeri
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
σ	Sigma
α	Alfa
F	Kuvvet
δ	Delta
K_c	Kırılma tokluk değeri
ΔK_{th}	Eşik gerilme şiddet aralığı değeri
$f_{(g)}$	Doğrulama Faktörü
P	Normal yük
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
N_f	Hasar çevrim sayısı
S-N	Gerilme-Çevrim Sayısı
XRD	X ışını Kırınım Ölçer
μ_f	Sürtünme katsayısı
Cu	Bakır
DCL	Elmas benzeri karbon

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Şaft ve gerilme azaltma yivlerinde sürtünmeli temas yorulması.....	3
Şekil 1.2. Türbin kırılmaçıkuyruklarında sürtünmeli temas yorulması.....	3
Şekil 1.3. Yataklarda ve perçin bağlantılarında sürtünmeli temas yorulması.....	4
Şekil 1.4. Civatalı flanşda sürtünmeli temas yorulması.....	4
Şekil 2.1. Sürtünmeli temas aşınma mekanizması.....	21
Şekil 2.2. Çatlak oluşumunun şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.3. Çatlak yayılmasının şematik gösterimi.....	26
Şekil 2.4. I. Ve II. Bölgede çatlak yayılması.....	27
Şekil 2.5. II. Bölgede çatlak yayılması.....	28
Şekil 2.6. Mindlin diyagramı.....	34
Şekil 3.1. Mitutoyo SJ. 400 tipi yüzey profilometre cihazı.....	46
Şekil 3.2. Köprü tipi temas pabucu ölçü ve boyutları.....	47
Şekil 3.3. Döner eğilmeli Düz (sürtünmesiz temas) yorulma numunesi ölçü ve boyutları.....	48
Şekil 3.4. Döner eğilmeli sürtünmeli temas yorulma numunesi ölçü ve boyutları	48
Şekil 3.5. T6 ısıtma işlem koşulları.....	49
Şekil 3.6. Al-Cu ikili faz diyagramı.....	50
Şekil 3.7. Döner eğilmeli yorulma test cihazı için sürtünmeli temas test düzeneği şematik gösterimi.....	53
Şekil 3.8. Döner eğilmeli test cihazı için sürtünmeli temas test düzeneği üzerine temas pabuçları yerleştirme aparatı fotoğraf görüntüsü.....	54
Şekil 3.9. Döner eğilmeli yorulma test ünitesinin genel görünümünün şematik resmi.....	55
Şekil 3.10. Döner eğilmeli yorulma test ünitesinin fotoğraf görüntüsü.....	56
Şekil 3.11. Temas basıncına göre sürtünmeli temas yorulma dayanımındaki değişim.....	57
Şekil 3.12. Düzlemsel eğilmeli sürtünmeli ve sürtünmesiz temas yorulma numunesi şekil ve boyutları.....	59

Şekil 3.13. Köprü tipi temas pabucu ölçü ve boyutları.....	60
Şekil 3.14. T6 ısıtma işlem koşulları.....	61
Şekil 3.15. Düzlemsel eğilmeli yorulma test cihazı için sürtünmeli temas test düzeneği.....	65
Şekil 3.16. Düzlemsel Eğilmeli yorulma test cihazı için sürtünmeli temas test düzeneği üç boyutlu gösterim.....	65
Şekil 3.17. Yerleştirme aparatının üç boyutlu gösterimi.....	66
Şekil 3.18. Yük uygulama halkası için kalibrasyon eğrisinin elde edilmesini gösteren fotoğraf görüntüsü.....	67
Şekil 3.19. Yük uygulama halkası için kalibrasyon eğrisinin elde edilmesini gösteren şematik görüntüsü.....	67
Şekil 3.20. Yük uygulama halkası için kalibrasyon eğrisi.....	68
Şekil 3.21. Temas Pabuçları için kalibrasyon eğrisinin elde edilmesini gösteren fotoğraf.....	69
Şekil 3.22. Temas pabucu için kalibrasyon eğrisi.....	69
Şekil 3.23. R-1 için sinüzoidal eğri grafiği.....	71
Şekil 3.24. Sürtünmeli temas test düzeneğine sahip düzlemsel eğilmeli yorulma deney düzeneği.....	71
Şekil 3.25. Düzlemsel eğilmeli yorulma test cihazının fotoğraf görüntüsü.....	72
Şekil 3.26. Düzlemsel eğilmeli yorulma test cihazının şematik görüntüsü.....	72
Şekil 3.27. T6 (Çözeltiye alma ve yapay yaşlandırma) ısıtma işlem koşulları.....	75
Şekil 3.28. Ağırlık ölçümlerinin yapıldığı hassas terazi.....	78
Şekil 3.29. Aşınma deney cihazı.....	78
Şekil 3.30. Blok on disk aşınma deney düzeneği.....	79
Şekil 4.1. Döner eğilmeli yorulma yüklemesi altında, T6 Isıtma işlemi görmüş kaplamasız numuneler için elde edilen S-N (Wöhler) diyagramı.....	80
Şekil 4.2. T6 ısıtma işlemi görmüş taban malzeme, T6+Akımsız Nikel ve T6+ Sert Eloksal kaplanmış numuneler için sürtünmesiz ve sürtünmeli temas yorulma S-N (Wöhler) eğrileri.....	83
Şekil 4.3. T6 ısıtma işlemi görmüş numunelerde, gerilme genliğine bağlı olarak	

sürtünmeli temas yorulma ömründeki azalma yüzdesi.....	83
Şekil 4.4. T6+Akımsız Nikel numuneler için, gerilme genliğine bağlı olarak sürtünmeli temas yorulma ömründeki artış yüzdesi.....	84
Şekil 4.5. (T6+HA) numuneler için, gerilme genliğine bağlı olarak sürtünmeli temas yorulma ömründeki artış yüzdesi.....	85
Şekil 4.6. T6 ısıtılmalı düz yorulma numunesinin, 255 MPa gerilme ve 330.103 çevrim sayısından sonra kırılmış yüzeyinin SEM görüntüsü..	86
Şekil 4.7. 100 MPa temas basıncı ve 204 MPa gerilme seviyesinde test edilmiş T6 ısıtılmalı taban malzemesinin sürtünmeli temas izlerinin (scar) görünümü.....	87
Şekil 4.8. a) T6+Akımsız Nikel b) T6+Sert Eloksal kaplamaların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	88
Şekil 4.9. a) T6+Akımsız Nikel, b) T6+Sert Eloksal kaplamaları için çatlak başlangıç ve çatlak yayılma doğrultuları.....	88
Şekil 4.10. a) T6+EN, b) T6+HA kaplamaları için 100 MPa temas basıncı için elde edilen sürtünmeli temas yorulma izleri.....	89
Şekil 4.11. Sürtünmeli temas yorulma hasarının şematik gösterimi; b: çatlak başlangıç bölgesi derinliği.....	89
Şekil 4.12. Düzlemsel eğilmeli yorulma yüklemesi altında, T6 ısıtılmalı görmüş levha numuneler için, (frettingsiz) S-N (Wöhler) diyagramı	91
Şekil 4.13. T6 ısıtılmalı görmüş kaplamasız, sert eloksal ve akımsız nikel kaplanmış numuneler için sürtünmesiz ve sürtünmeli temas (fretting) yorulma S-N (Wöhler) eğrileri.....	93
Şekil 4.14. T6 ısıtılmalı görmüş kaplamasız numunelerde, gerilme genliğine bağlı olarak sürtünmeli temas yorulma ömründeki azalma yüzdesi...	94
Şekil 4.15. Akımsız nikel kaplanmış numunelerde, gerilme genliğine bağlı olarak sürtünmeli temas yorulma ömründeki azalma yüzdesi.....	95
Şekil 4.16. Sert eloksal kaplanmış numunelerde, gerilme genliğine bağlı olarak sürtünmeli temas yorulma ömründeki azalma yüzdesi.....	96
Şekil 4.17. Uygulanan gerilme genliği ile yanal kuvvet arasındaki değişim.....	96
Şekil 4.18. Akımsız nikel kaplanmış numunede 76,3 MPa gerilme genliği için,	

çevrim sayısı ile yanal kuvvet arasındaki değişim.....	97
Şekil 4.19. Gerilme genliği ile sürtünmeli temas izleri boyunca ölçülen yüzey pürüzlülükleri arasındaki değişim.....	98
Şekil 4.20. Sert eloksal kaplanmış numunelerde kırılma kesit yüzeyinin SEM görüntüsü.....	99
Şekil 4.21. Akımsız nikel kaplanmış numunelerde kırılma kesit alanının SEM görüntüsü.....	99
Şekil 4.22. Kaplanmış numunelerin yüzey durumlarının SEM görüntüsü.....	100
Şekil 4.23. Kaplamasız numune için sürtünmeli temas yüzeyi SEM görüntüsü..	100
Şekil 4.24. Sert Eloksal kaplanmış numune için sürtünmeli temas yüzeyi SEM görüntüsü.....	101
Şekil 4.25. Akımsız nikel kaplanmış numune için sürtünmeli temas yüzeyi SEM görüntüsü.....	101
Şekil 4.26. Kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri (Akımsız nikel kaplama).....	102
Şekil 4.27. Kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri (Sert Eloksal Kaplama).....	102
Şekil 4.28. Aşınma sonrası ağırlık kayıp grafiği.....	103
Şekil 4.29. Aşınma izlerinin SEM görüntüleri.....	103

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. 2014 Alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu.....	45
Çizelge 3.2. Dairesel kesitli Silindirik Numunelerin Yüzey Pürüzlülük değerleri.....	46
Çizelge 3.3. 2014 Al alaşımının silindirik numunelerde farklı uygulama durumları için sertlik değerleri.....	51
Çizelge 3.4. Sert eloksal kaplama parametreleri.....	52
Çizelge 3.5. Akımsız nikel kaplama parametreleri.....	53
Çizelge 3.6. 2014 Alüminyum alaşımının kimyasal bileşeni.....	58
Çizelge 3.7. Dikdörtgen kesitli Levha Numunelerin Yüzey Pürüzlülük değerleri.....	59
Çizelge 3.8. 2014 Al alaşımının farklı işlem şartları için elde edilen sertlik değerleri.....	62
Çizelge 3.9. Sert Elokmal Kaplama Parametreleri.....	63
Çizelge 3.10. Akımsız Nikel Kaplama Parametreleri.....	64
Çizelge 3.11. PBF-30C düzlemsel eğilmeli yorulma test makinesinin teknik özellikleri.....	74
Çizelge 3.12. Aşınma deney numuneleri kimyasal bileşimi.....	75
Çizelge 3.13. Aşınma testleri için, Sert Elokmal Kaplama Parametreleri.....	76
Çizelge 3.14. Akımsız nikel kaplama parametreleri.....	77
Çizelge 3.15. İşlem durumu ve işlem durumuna göre verilmiş numune kodları...	77
Çizelge 4.1. 10^7 kırılma çevrimindeki yorulma dayanım değerleri.....	86

1. GİRİŞ

Birçok makine parçası ve yapı elemanı, kullanıma esnasında tekrarlanan gerilmeler (yükler) ve titreşimler altında çalışmaktadır. Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, mevcut gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen, belirli bir tekrarlama sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takip eden kırılma olayı gözlemlenir. Malzemelerin tekrarlanan gerilmeler altında belirli bir süre sonunda kırılmasına yorulma adı verilir (Hirata *et al.* 1996). Metallerde yorulma hadisesi buharlı makine ve çok sayıda hareketli parçadan oluşan makinelerin icadı ve geniş bir alanda kullanılmaya başlanması ile ortaya çıkmıştır. Wöhler tarafından ilk olarak 1850'li yıllarda kapsamlı olarak incelenen yorulma konusu, 19. yüzyılın sonlarına doğru tasarım kriterlerine dahil edilmiş ve günümüzde pek çok mühendislik uygulamaları için tasarım şartnamelerinin bir parçası haline gelmiştir.

Yorulma kırılması gevrek kırılma tipinde olduğundan, nerede ve ne zaman olacağını önceden kestirmek zordur (Onaran 1999). Geçmişte birçok kazaya neden olduğundan yorulma olayı üzerine yoğun çalışmalar yapılmış ve halen de yapılmaya devam edilmektedir. Bununla beraber çok değişik etkenlerin rol oynadığı bu karışık yorulma olayını yakından tanımlamakla yorulma kırılmalarını önlemek mümkündür.

Makinelerdeki hasarların yaklaşık %80'inden sorumlu olduğu düşünülen yorulma olayı (Kayalı vd 1978), daha detaylı olarak ısı yorulma, kısa ömürlü yorulma, korozyonlu yorulma ve sürtünmeli temas yorulması alt başlıkları altında incelenmektedir.

Isıl yorulma; sıcaklık değişimleri sırasında parçanın boyut değiştirmesinin engellendiği durumlarda parçada meydana gelecek iç gerilmelerin etkisi ile oluşan yorulma biçimidir ve daha çok, yüksek sıcaklığa maruz makine parçalarında görülmektedir.

Kısa ömürlü yorulma; hasar çevrim sayısı 10^4 'den daha düşük olan yorulma hasarlarına verilen genel isimdir.

Korozyonlu Yorulma; çevrimsel gerilmenin kimyasal olarak saldırgan bir ortamda etkimesi sonucu meydana gelir.

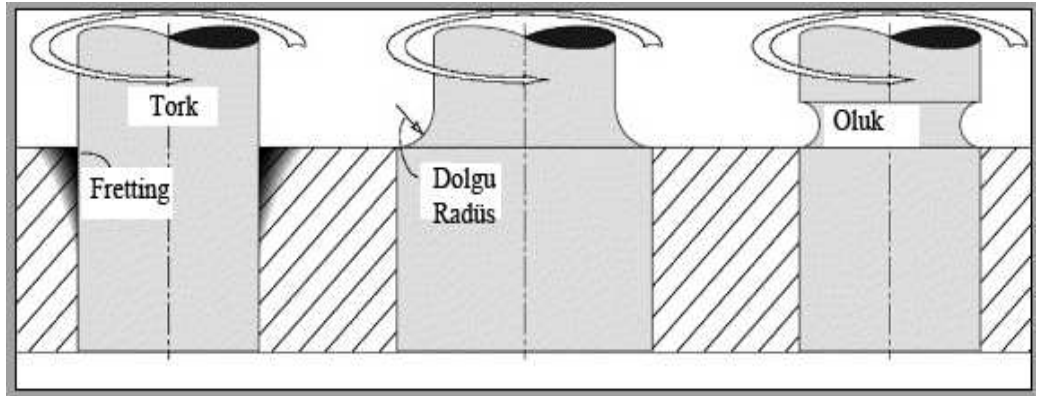
Sürtünmeli temas yorulması (Fretting Fatigue), özellikle otomotiv, hava taşıtları ve güç santrallerinde kullanılan yapısal elemanlarda meydana gelen ciddi hasar problemlerinin en önemli nedenlerinden birisidir. Temas eden iki elemandan biri dinamik yükleme veya titreşime maruz kaldığında meydana gelen önemli bir mühendislik problemidir. Temas eden iki cisim arasındaki küçük genlikli bağıl hareketin sonucu olan sürtünmeli temas, dinamik bir yüklemenin varlığında yorulma çatlaklarının oluşup yayıldığı yüzey veya yüzey altı hasarına neden olur (Cree *et al.* 1995).

Sürtünmeli temas yorulması, malzemelerin yorulma dayanımını ciddi şekilde azaltarak beklenmeyen kazalara neden olan önemli mühendislik problemlerindendir. Modern endüstrinin vebası olarak göz önüne alınan sürtünmeli temas yorulmasına, titreşim ve yorulma yüklemesine maruz bütün uygulamalarda rastlanılabildiğinden, pek çok endüstri kolunu etkiler (Waterhouse 1981). Özellikle, sürtünmeli temas yorulma hasarına; helikopterler, sabit kanatlı uçaklar, trenler, gemiler, otomotiv, kamyon, otobüs, tarım makineleri, motorlar, yapım ekipmanları, ortopedik implantlar, yapay kalp ve roket motorlarında bulunan parçalarda sık olarak rastlanmaktadır (Hoeppner 1992).

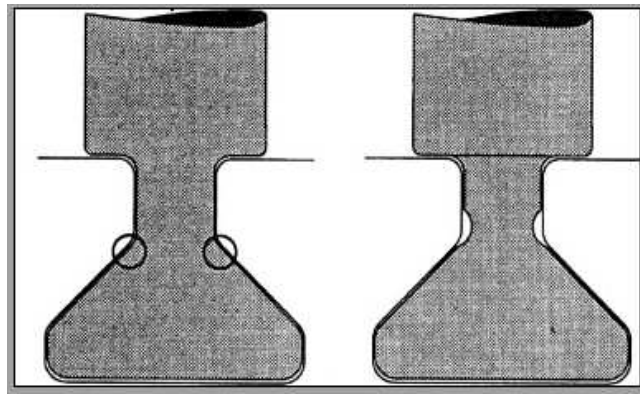
Thomlinson (1927) bu konuda ilk araştırmayı yaparak, “fretting korozyon” deyimini ortaya attı. $30\ \mu\text{m}$ 'den daha küçük genliğe sahip sürtünmeli temas hareketinin hasara neden olduğu ve söz konusu hasar oluşumunda “kayma” olarak adlandırılan bağıl hareketin çok önemli olduğunu tespit etti.

Sürtünmeli temasın yorulma üzerindeki etkisi, ilk olarak Warlow Davies (1941) tarafından araştırıldı. Bu araştırma, pratikte yaygın bir durum olan “sürtünmeli temas” ve yorulmanın birleşik etkisinin, yorulma dayanımı üzerinde çok ciddi azalmalara neden olduğunu gösterdi.

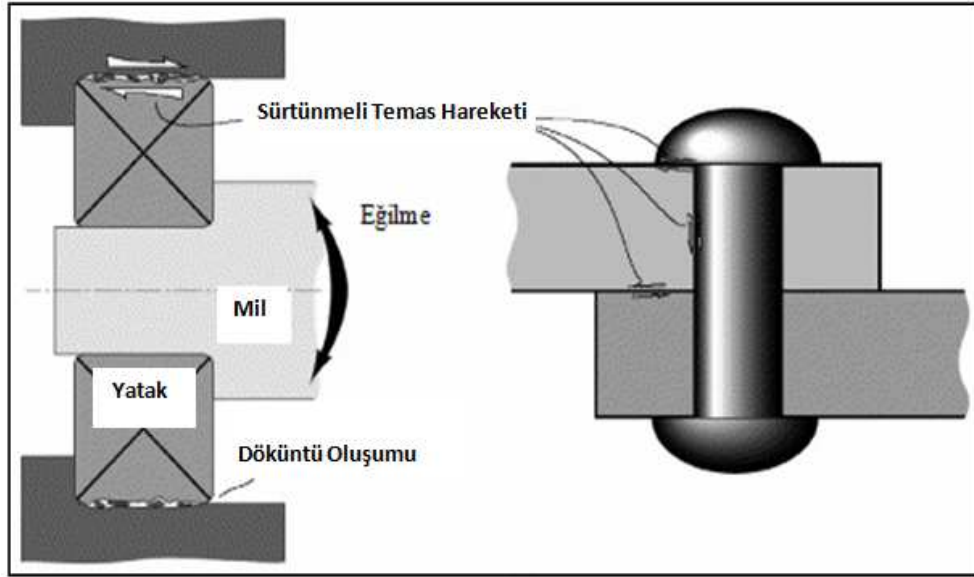
Şekil 1.1 1.2 1.3 ve 1.4’de sürtünmeli temas yorulmasının endüstriyel uygulamalarda oluşturduğu hasarlar için bazı örnekler verilmiştir.



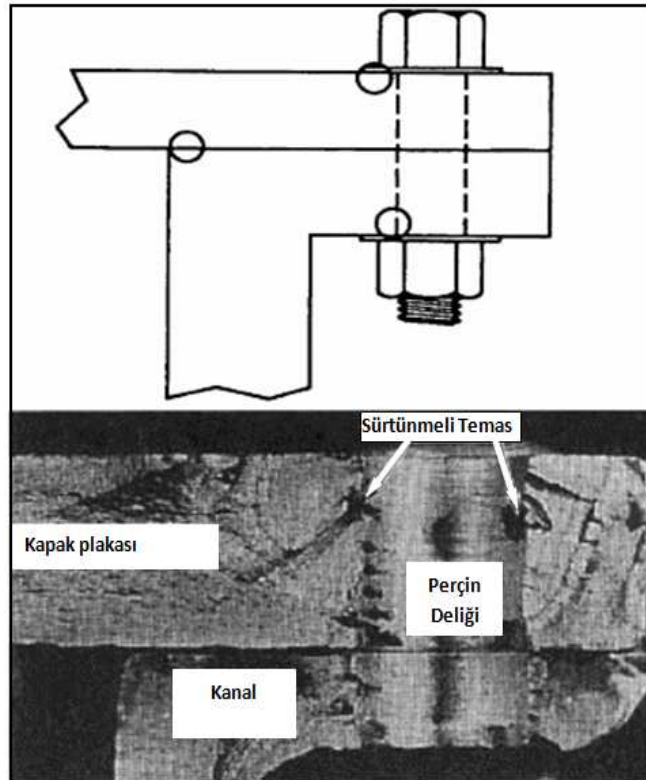
Şekil 1.1. Şaft ve gerilme azaltma yivlerinde sürtünmeli temas yorulması



Şekil 1.2. Türbin kırbağıkuyruklarında sürtünmeli temas yorulması



Şekil 1.3. Yataklarda ve perçin bağlantılarında sürtünmeli temas yorulması



Şekil 1.4. Civatalı flanşda sürtünmeli temas yorulması

Küçük genlikli salınımlı bağıl harekete sahip iki yüzey arasında oluşan sürtünmeli temas yorulma olayı, malzemenin hasar görmesiyle sonuçlanan üç temel mekanizma ile tanımlanabilir: Sürtünmeli temas aşınması, sürtünmeli temas yorulması ve sürtünmeli temas korozyonlu yorulması (Fenner 1958).

Sürtünmeli temas yorulma hasarını azaltmak için değişik metotlar kullanılmaktadır. Uygulanan metotlar özel servis şartlarına bağlı olarak kullanılır. Genellikle, önleyici tedbir seçiminde üç temel yöntem mevcuttur;

Dizaynda değişiklik: Dizayn optimizasyonu ile sürtünmeli temas yorulma hasarının önlenmesi, temas eden elemanların geometri ve malzemelerinin değiştirilmesini kapsar (Gordelier *et al.* 1984). Bununla birlikte, yeniden tasarım zaman ve para gerektirdiği için her zaman mümkün değildir. Ayrıca, bu önlemler aşırı yükleme veya sürtünmeli temas yorulma dayanımında problemlere sebep olabilir.

Yağlayıcı kullanma: Sürtünmeli temas yorulmasını azaltmanın diğer muhtemel yollarından biride uygun yağlayıcı (sıvı veya katı) kullanmaktır (Sato *et al.* 1988). Buna rağmen, sürtünmeli temas yorulmasının oluşturduğu çok düşük kayma hızı ve yüksek basınç, sürtünmeli temas yorulma şartları için çok etkili değildir (Qiu and Roylancei 1992).

Yüzey mühendislik uygulamaları: Sürtünmeli temas durumu, aşınma, korozyon ve yorulma ile ilgili olduğu için, yüzey işlemleri veya kaplamalarının sürtünmeli temas yorulma hasarını azaltmada ideal çözüm olduğu ifade edilmektedir (Haris *et al.* 1985). Bazı kaplamaların, sürtünmeli temas yorulması neticesinde meydana gelen aşınma hacmini ciddi oranda azalttığı veya sürtünmeli temas yorulma ömrünü artırdığı rapor edilmiştir (Bill 1978).

Sürtünmeli temas yorulmasının hasarını hafifletmek için kullanılan pek çok yüzey modifikasyon metodu vardır (Li *et al.* 2000). Yüzey durumu ve şartları, sürtünmeli

temas yorulma hasar hassasiyetini etkileyen önemli faktörlerdir (Waterhouse 1992). Thomlinson'dan günümüze, uygulama ve laboratuvar değerlendirme programlarında, sürtünmeli temas yorulmasının anlaşılması için yoğun araştırma yapıldı. Sürtünmeli temas ile doğrudan veya dolaylı olarak ilgili olan çalışmalar incelenerek bunlardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

Buhar türbinlerinde yaygın olarak kullanılan 12Cr-Mo-W-V malzemesinin yüksek sıcaklıklardaki sürtünmeli temas yorulma davranışını geliştirmek için, bilye püskürtülmüş (shot peening) numuneler üzerinde yüksek sıcaklıklarda sürtünmeli temas testleri gerçekleştirildi. Oda sıcaklığına ilaveten, yüksek sıcaklıklarda da (773 ⁰K), bilye püskürtme işleminin sürtünmeli temas yorulma dayanımını ciddi bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir. Bilye püskürtme işlemi sonucu oluşan bası artık gerilmelerinin yüksek sıcaklıklarda önemli oranda azaldıktan sonra 200 MPa'lık bir değerde sabit kaldığı belirlenmiştir. Bu yüzden, bilye püskürtme işleminin 773⁰K'de uzun periyotlarda etkili olabildiği gösterilmiştir (Mutoh *et al.* 1992).

Temas basıncındaki artış ile temas yüzeyinde meydana gelen sürtünme kuvveti arasındaki ilişkinin araştırıldığı çalışmada, normal yükün artmasına bağlı olarak, kayma kuvvetindeki artışının azaldığı ve sonunda normal yükün daha fazla artırılmasına rağmen sürtünme kuvvetinin sabit değerde kaldığı belirlenmiştir (Fernando *et al.* 1994).

Titanyum alaşımlarının sürtünmeli temas yorulma dirençlerinin ve yorulma dayanımlarının geliştirilmesi amacıyla, püskürtme ile sertleştirme, geliştirilmiş iyon demeti CrN tabakası filmi oluşturma ve her iki yöntemin birlikte kullanıldığı yüzey işlemleri kullanılmıştır. Püskürtmeli sertleştirme ile birlikte geliştirilmiş iyon demeti CrN uygulanmasının sürtünmeli temas yorulma aşınma direncinde en etkili metot olmasına rağmen, tek başına uygulanan iyon demeti (IBED) yöntemi sürtünmeli temas yorulma performansında en etkili sonucu verdiği belirlenmiştir. Bası artık gerilmelerinin varlığı, artan sürtünme katsayısı, artan sertlik ve yüzey pürüzlülüğü, farklı yorulma etkilerini açıklamak için etkili mekanizmalar olarak belirtilmiştir (Fu *et al.* 1998).

Sürtünmeli temas yorulma davranışı üzerinde seramik kaplamaların etkisini tespit için PVD metodu ile (TiN) kaplanmış karbon çeliğinin sürtünmeli temas yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. TiN kaplamanın malzemenin sürtünmeli temas yorulma davranışını önemli ölçüde artırdığı belirlendi. Bu artışın sebebi olarak, temas yüzeyinde TiN kaplamanın sürtünmeli temas yorulma çatlak oluşumunu sert TiN filminin varlığından dolayı geciktirmesi ile izah edilmiştir (Okane *et al.* 2000).

(Switek 2000), temas yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvvetini incelemiş, sürtünme kuvvetinin sürtünmeli temas yorulma limitini etkileyen önemli parametrelerden olduğunu belirtmiştir.

Normal statik bir kuvvet uygulandığı zaman, yüzeyler arasında tekrarlı olarak küçük teğetsel bağıl yer değiştirmeler olduğu zaman, sürtünmeli temas yorulma veya aşınması meydana gelir. Sürtünmeli temas yorulmasını etkileyen birçok faktör vardır. Yapılan çalışmada deneysel olarak farklı yüzey malzemesi kombinasyonlarında, sürtünmeli temas aşınması gözlenmiş ve sürtünmeli aşınma hacmi yeni bir metod ile tespit edilmiştir. Yüzey malzemelerinin sürtünmeli temas yorulma aşınması üzerine etkisi, farklı sürtünmeli aşınma boyutu, sürtünmeli aşınma hacmi ve aşınma izlerinin şekli tahmin edilerek belirlenmiştir (Endo and Marui 2002).

Ostenitik paslanmaz çeliğin sürtünmeli temas yorulma davranışı üzerine temas basıncının etkisinin incelendiği çalışmada; düşük temas basınçlarında sürtünmeli temas yorulma ömrünün hemen hemen değişmediği sadece yüksek temas basınçlarında artış gösterdiği tespit edilmiştir (Nakazawa *et al.* 2003).

Ti-6Al-4V, Inconel 718 ve 2024 alüminyum alaşımı gibi üç farklı malzemeden imal edilmiş pabuç malzemesi ile temas ettirilen (Ti-6Al-4V) titanyum alaşımının sürtünmeli temas yorulma davranışının incelenmiştir. Benzer temas basınçları altında farklı pabuç malzemeleri ile sürtünmeli aşındırma yapıldığında, (Ti-6Al-4V) titanyum alaşımı numunelerin sürtünmeli temas yorulma ömürlerinde önemli bir fark tespit edilmemiştir.

Farklı pabuç malzemeleri ile yapılan sürtünmeli temas deneylerinin sonucunda, kullanılan numunelerde küçük mikroskobik aşınma davranışı gözlemlenmiş ancak bu farkların sürtünmeli temas yorulma ömrünü etkileyecek kadar önemli olmadığı anlaşılmıştır (Lee *et al.* 2004).

Sürtünmeli temas yorulması sırasında, sürtünme kuvvetinin davranışı ve onun diğer sürtünmeli temas yorulmasını etkileyen faktörlerle ilişkisinin araştırılmıştır. Temas bölgesinde sıcaklığın değiştiği ve normal sürtünme kuvvetinin artan çevrim sayılarında sürtünmeli temas yorulması sırasında artık gerilim ile benzer bir ortalamaya sahip olduğu görülmüştür. Hem statik sürtünme katsayısı hem de dinamik sürtünme katsayısı, sürtünmeli temas yorulma testinin ilk çevrimlerinde arttığı ve daha sonra kararlı bir değere ulaştığı belirlenmiştir. Çevrim sayısı arttıkça sürtünme katsayılarına benzer olarak, normal sürtünme kuvvetinin de arttığı daha sonra ise kararlı bir değere ulaştığı görülmüştür. Sürtünme kuvvetinin temas geometrisinden, yüzey işlemlerinden ve artık gerilmeden etkilenmediği ancak uygulanan yüke göre değişiklik gösterdiği kaydedilmiştir (Lee and Mall 2004).

Normal yükleme, sürtünme katsayısı, artık gerilme gibi sürtünmeli temas yorulma davranışına etki eden faktörlerden teğetsel kuvvetin rolünün incelendiği çalışmada, iki temas geometrisi kullanılmış. Silindir üzerine düzlem, düzlem üzerine düzlem normal yükleme ve artık gerilimin oluşturulduğu koşullarda teğetsel kuvveti ve düzlem kayma arasında basit bir ilişkinin olduğu iddia edilmiştir. Bu testlerde teğetsel kuvvetin büyüklüğünün uygulanan gerilme ve normal yüklemenin genliğine bağlı olduğu görülmüştür. Teğetsel kuvvet ve sürtünmeli temas yorulması arasındaki ilişkinin, temas geometrisinden bağımsız olduğu kaydedilmiştir (Jin and Mall 2004).

Al-Mg-Si Alaşımı AA6061'in sürtünmeli temas yorulma davranışı üzerine, temas basıncının etkisinin incelenmiştir. Oluşan farklı sürtünme kuvvetleri ve sürtünme katsayıları temas basıncına göre incelenmiştir. Sürtünmeli temas yorulma ömrünün temas basıncı arttıkça değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Bu davranışın sürtünme gerilimi, çatlak büyüme gecikmesi ve gerilme yığılması ile ilişkili olduğu iddia

edilmiştir. Temas basıncı arttıkça yorulma ömrünün düştüğü, yaklaşık 100 MPa değerinde minimum değere indiği, ortalama 150 MPa basınçta da maksimum değerine ulaştığı görülmüştür (Naidu and Raman 2005).

Tekrarlı püskürtme (peening) işleminin sürtünmeli temas yorulma ömrü ve dayanımı üzerine etkisi oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda Ti-6Al-4V için incelendiği çalışmada; Püskürtme işlemi ile oluşan bası gerilmelerindeki azalma oranının, uygulanan gerilme genliğindeki artışa ve test sıcaklığına bağlı olduğu iddia edilmiştir. 370°C sıcaklıkta ve yorulma ömrünün %40'ına ulaşıldığında, artık gerilmelerin %20–50 aralığında azaldığı kaydedilmiştir. Artık gerilmelerdeki bu azalmanın sürtünmeli temas ömrü ve dayanımını azalttığı tespit edilmiştir (Lee *et al.* 2005).

2014 Al alaşımının yorulma davranışı, çeşitli termomekanik yaşlandırma koşulları için incelenmiştir. Gerilme yığılmalarını azaltan termomekanik işlemlerle, yorulma özelliklerinin geliştirilmesinin mümkün olduğu gözlemlenmiştir. Gerilme yığılmasının azaltılması ile nispeten daha üniform bir deformasyon yapısı elde edilerek, alaşımın yorulma özellikleri artırılmıştır (Singh and Goel 2005).

420°C de yapılmış olan plazma nitrürlemenin AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin yorulma ve sürtünmeli temas yorulma davranışları üzerindeki etkisi incelenmiş, plazma nitrürlenmiş AISI 304 paslanmaz çeliğinin bu işlemin uygulanmadığı duruma göre yüksek yüzey sertliği, bası artık gerilmeleri ve düşük yüzey pürüzlülüğü gösterdiği tespit edilmiştir. Plazma nitrürlenmiş AISI 304 paslanmaz çeliğin sürtünmeli temas yorulma özellikleri daha kötü olarak belirlenmiş, bunun sebebi olarak plazma nitrürleme işleminin sonucunda tane sınırlarında krom segregasyonunun sebep olduğu zayıf bölgelerin çatlak oluşumunu kolaylaştırdığı iddia edilmiştir (Raman 2006).

AA 6063 alaşımının sürtünmeli temas yorulma davranışı üzerine Cu-Ni-In kaplama kalınlığının etkisi incelenmiş, 40 µm kalınlıktaki kaplamada yüzey artık gerilmelerinin bası, kaplama kalınlığı 100 µm'ye çıkarıldığında ise yüzeyde çeki artık gerilmelerinin

oluştugu tespit edilmiştir. Sürtünmeli temas yorulması, yorulma ömrünü hem kaplamalı hem de kaplamasız numunelerde azaltmakta ve 40 μm kalınlıktaki kaplamada, maksimum sürtünmeli temas yorulma dayanımı sağlandığı kaydedilmiştir (Rajasekaran *et al.* 2006).

Ebara ve Fujimura (2006), cıvatarla sabitlenmiş levha numune üzerinde sürtünmeli temas yorulma testleri yapmışlardır. Tekrarlanan eğme gerilmelerinde temas alanı büyüdükçe sürtünmeli temas yorulma hata başlangıcının doğrusal olarak geciktiği görülmüştür. Sürtünmeli temas yorulma çatlağı gerilme yığılmalarının olduğu yerde oluşmuştur. Bu çatlak oluşum tipi taneler arasındır ve çatlak yayılması ise yivli durumdadır.

Değişik yüzey tekniklerinin (nitürleme ve titanyum kaplama dahil vakum katot boşalması (HCD) magnetron saçma tekniği) malzemenin sürtünmeli temas yorulma direncine etkisi araştırılmıştır. HCD tekniği ve titanyum kaplama kullanılarak yorulma ömründe, düşük çalışma yüklemelerinde %85'e kadar artış sağlandığı ancak yüksek gerilmelerde artışın kayda değer olmadığı tespit edilmiştir. HCD tekniği ve titanyum kaplama kullanılarak yorulma ömrü düşük çalışma yüklerinde %77'ye kadar artış sağlanmış ancak yüksek gerilmelerde bunun tam tersi etki yapmıştır. Nitürleme ve titanyum kaplama uygulanmış ve üstüne magnetron saçma tekniği kullanılmış numunede yorulma ömrü, düşük yüklemelerde %185, büyük yüklemelerde ise %60'a varan artışlar sağlandığı belirlenmiştir (Majzoobi and Jaleh 2006).

Biyomedikal implantların sürtünmeli temas yorulma hasarları, ortopedik implant cerrahisinde en önemli kaygılardan biri olduğu bilindiğinden, 2 μm PVD TiN kaplanmış Ti alaşımlarının sürtünmeli temas yorulma davranışı incelenmiştir. PVD TiN kaplanmış Ti alaşımları, kaplanmamışlara göre sürtünmeli temas yorulma ömründe ciddi bir ömür artışına neden olduğu ve kaplanmamışlara göre PVD TiN kaplanmış Ti alaşımlarının sürtünme katsayılarının daha küçük olduğu belirtilmiştir (Vadiraj *et al.* 2006).

Majzoobi (2006) yaptığı çalışmada; Nitrürleme, titanyum kaplama ve dubleks yüzey işlemlerinin sürtünmeli temas üzerindeki etkisini incelemiştir. Kaplamasız şartlarda, sürtünmeli temas yorulmasının, yorulma ömrünü, yüksek çevrim bölgesinde %60, düşük çevrim bölgesinde %30 civarında azalttığı belirlenmiştir. Yüzey nitrürleme işleminin malzemenin sürtünmeli temas yorulma dayanımını azalttığı kaydedilmiştir. Titanyum kaplama, düşük çalışma gerilmelerinde yorulma ömrünü %85'e kadar artırırken, yüksek çalışma gerilmelerinde kayda değer bir artışa sebep olmadığı gözlemlenmiştir. Dubleks yüzey işlemi sürtünmeli temas yorulma ömründe azalmaya neden olduğu ve kaplanmış numunelerde sürtünme katsayısının, kaplanmamışlara göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Lokal veya homojen şekil değiştirme oluşturan dört farklı mikro yapının (Alaşımın Saflığı, Tane Yapısı, Akma Mukavemeti ve Kayma Özellikleri) sürtünmeli temas yorulması üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada, sürtünmeli temas gerilmelerinin etkisi altında çatlak oluşumu ve yayılması üzerinde mikro yapı özelliklerinin önemli bir etkisinin olmadığı ancak sürtünmeli temas yorulmasının çatlak oluşum ömrünü önemli derecede azalttığı ve sürtünmeli temas gerilmelerinin etkisi altında, toplam ömrün önemli bir kısmının yorulma çatlak yayılması için harcadığı kaydedilmiştir (Giummarra *et al.* 2006).

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

Ti-6Al-4V için sürtünmeli temas yorulma testleri farklı temas gerilmeleri için yapılarak, sürtünmeli temas yorulma çatlağını başlatan temas alanı üzerindeki gerilmelerin 128 MPa'nın üzerinde olduğu ve sürtünmeli temas yorulma çatlaklarının gerilme yığılmalarının olduğu çukurlarda başladığı tespit edilmiş. Bunun yanı sıra, sürtünmeli temas yorulma çatlaklarının başlama modu yapıya bağlı olarak tane içi (transgranuler)

ve sürtünmeli temas yorulma çatlağının yayılma modunun ise yorulma striasyonları ile olduğu ifade edilmiştir (Ebara 2006).

Wc-Co kaplanmış malzemelerin aşınma ve sürtünmeli temas yorulma davranışlarının incelendiği çalışmada, Wc-Co kaplaması sürtünme katsayısını azalttığı ve söz konusu kaplamanın gross kayma şartları altında aşınma özelliklerini ve sürtünmeli temas yorulma ömrünü önemli ölçüde artırdığı görülmüştür (Kubiak *et al.* 2006).

Sprey kaplama uygulanmış numuneler üzerinde, yorulma ve sürtünmeli temas yorulma testleri oda sıcaklığında yürütülmüştür. Sprey kaplama düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüksek adezyon kuvveti sayesinde iyi sonuç vermiştir. Düzlem yorulması yüklemesi altında yorulma ömrünün önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. 120MPa gerilme seviyesinde kaplanmış numuneler, kaplanmamış olanlara göre çok daha uzun ömürlüdür. Kaplanmış numunelerde kalıntı gerilmeler bası gerilmesi şeklindedir (Rajasekaran *et al.* 2006).

2XXX grubu Al alaşımı üzerinde, mikro yapının sürtünmeli temas yorulması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Mikro yapının, sürtünmeli temas yorulma yüklemesi etkisi altında çatlak oluşum ve büyümesi üzerinde belli bir etkisinin olmadığı görülmüştür (Giummarra *et al.* 2006).

Hidrojen gaz ortamında sürtünmeli temas yorulmasının incelendiği çalışmada, sürtünmeli temas yorulmasının, tasarımda hesaba katılmasının gerekli olduğu, zira yorulma hatasından kaynaklanan birçok kazanın mafsallık yerlerinde veya temas eden parçaların temas bölgelerinde meydana geldiği iddia edilmiştir. Bu çalışmada ostenitik paslanmaz çelik kullanılmış ve malzeme olarak SUS304 seçilmiştir. Havaya oranla hidrojen gazı ortamında sürtünmeli temas yorulma dayanımı daha düşük çıkmıştır. Çevre şartlarına göre değişen teğetsel kuvvetin farklı olmasının bunun sebeplerinden biri olabileceği düşünülmüştür. Sürtünmeli temas yorulma dayanımındaki düşmenin

diğer bir nedeni de, çatlak oluşumunun hızlanmasında hidrojen emilmesinin çok etkili olduğu iddia edilmiştir (Kubota *et al.* 2006).

Dünya çapındaki çevresel kaygılar dolayısıyla otomotiv endüstrileri, mümkün olduğu kadar yüksek dayanımlı çelik saçlar kullanarak sağlamlıktan ödün vermeden araçların ağırlığında azaltma yoluna gitmektedirler. TRIP çelikleri yapısal uygulamada nispeten daha yeni olup, bu alanda önemli bir rol oynamaktadır. Yapılan çalışmada TRIP590 ve TRIP780 düşük alaşımlı çeliklerin özellikleri incelenmiştir. Metalografik analizde, çeliğin mikro yapısının ferrit, beynit, östenit fazlarından oluştuğu görülmüştür. Her iki çelikte de normal yüklemde gevrek yapı, yorulma yüklemesinde sünek yapı oluştuğu gözlemlenmiştir. Her iki çelik için, yüksek gerilme seviyelerinde daha yüksek yorulma ömürleri elde edilmiştir (Islam *et al.* 2007).

Mühendislik malzemelerinde, sürtünmeli temas yorulma hasarına yol açan faktörlerin önceden tahmin edilerek tasarım ve kullanımda uygulanabilirliği araştırılmıştır. En büyük zorluklardan biri olarak bütün dünyadaki mühendislik öğrencilerinin bu faktörler ve parametreler hakkında yeterli bilgiye sahip olmamaları gösterilmiş ve sürtünmeli temas yorulma hatalarının mühendislik tasarım ve uygulamalarında nerdeyse bir salgın halinde olduğu belirtilmiştir. Şirketlerin ya da hükümetlerin ürünler için bir entegrasyon kılavuzunu, edinilen tecrübeler sonucunda yürürlüğe sokmasının gerekliliğine işaret edilmiştir. Birçok akademisyenin hala kırılma ve çatlak büyüme problemlerini tam olarak tanımlayamamakta olduklarının altı çizilerek, sürtünmeli temas yorulması gibi negatif etkileri ortadan kaldırmaya yönelik çalışmalara fon ayrılması gerekliliği önemle vurgulanmıştır (Hoeppner 2006).

Yüzey işlemleri görmüş ve görmemiş Ti-6Al-4V malzemesinin, Ringer solüsyonu olarak bilinen fizyolojik bir ortamda sürtünmeli temas yorulma hasarı incelenmiş ve yüzey tabakalarının medikal ortamlar için kullanılan Titanyum alaşımlarının tribolojik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği anlaşılmıştır. PVD TiN kaplaması ve plazma nitrürleme uygulamalarının, biyomedikal alaşımlar için sürtünmeli temas yorulma

hasarını önlemede kullanılabilecek etkili yüzey kaplama metotları olduğu belirlenmiştir (Vadiraj *et al.* 2007).

7075-T6Al alaşımında çatlak dağılımı hakkında bir görüş elde edebilmek amacıyla yapılan çalışmada, sürtünmeli temas yorulma derecesini tanımlanarak sürtünmeli temas yorulma mekanizması anlaşılmasına çalışılmıştır. Numunelerin %60'ında tespit edilen baskın çatlak, kırılma yüzeyinden maksimum derinliktedir. Bu tanımlama, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) sonuçları dikkate alınarak uygulanmıştır. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde çoklu hata bölgelerinin sürtünmeli temas yorulması sonucu olduğu görülmüştür (Shinde *et al.* 2007).

Kaplamasız malzemelerde mikro yapıdaki büyük boyutlu süreksizliklerin (mikro boşluk, inklüzyon vs.) ve yüzey tokluğunun yorulma çatlağı oluşmasında önemli rolü olduğu bilinmektedir. Uzay ve havacılıkta kullanılan 7000 grubu Al alaşımına farklı kaplamalar uygulandıktan (cladding and anodizing) sonra, mikro yapıdaki düzensizliklerin çatlak oluşumundaki etkisinin anlaşılması araştırılmıştır. Bu şartlar için, daha düşük yorulma ömürleri elde edilmiştir. Daha düşük yükleme şartlarında bile çatlak oluşumu ve çoklu çatlak oluşum bölgelerinin kaplanmış malzemede yorulma sırasında yoğun olarak meydana gelmesi, yorulma ömründeki azalmanın muhtemel sebepleri olarak gösterilmiştir (Merati and Eastaugh 2007).

Golden ve arkadaşları (2007), farklı kaplama ve yüzey işleminin (DLC ve LSP) Ti-6Al-4V'un sürtünmeli temas yorulma özelliklerine etkisini araştırmışlardır. DLC kaplamanın laboratuvar numunelerinde sürtünmeli temas yorulma ömrünü belirgin şekilde arttırdığı belirlenmiştir. DLC kaplama yorulma özelliklerinde hiçbir düşüş göstermemekle birlikte sürtünmeli temas yorulma performansını artırıcı özellik göstermiştir. DLC ve LSP uygulanmış numunelerde, sürtünmeli temas özelliklerinin arttığı saptanmıştır.

Plastik otomotiv parçaları için üretilen kalıplarda genellikle önceden sertleştirilmiş çelik malzemesi kullanılır. Boyutları göz önüne alındığında, uygulanan ısıtma işlemleri sonucunda karmaşık mikro yapılar elde edilir. Kalıbın yüksek sıcaklığa olan tepkisi dökülen eriyik plastiğin düzgün yataklanmaması yüzünden mikro çatlaklara yol açar ve kırılma tokluğu azalır. Mikro yapılardaki çatlaklar daha alt derinliklerde gözlemlenmiş olup, düşük soğutma hızlarında bu derinliğin arttığı gözlemlenmiştir. Tekrar ısıtma işlemi görmüş numunelerde mikro yapı temperlenmiş martenzit olarak gözlemlendiği kaydedilmiştir (Firrao *et al.* 2007).

Korozyon direnci, eloksal tabakanın kalite ve kalınlığına bağlı olduğu için, 15, 5 ve 1 μm kalınlığındaki üç farklı eloksal tabaka kullanılarak, AM60 magnezyum alaşımının yorulma davranışı üzerine eloksal kaplama kalınlığının etkisi incelenmiştir. Eloksal kaplama kalınlığının artması ile yorulma dayanımının azaldığı belirlenmiş, 5 ile 1 μm kalınlığındaki eloksal kaplama ile taban malzeme arasında düzenli bir yapı gözlenirken, 15 μm kalınlığındaki eloksal kaplama ile taban malzeme arasında düzensiz ara yüzey ve bozukluklar tespit edilmiştir. 15 μm kalınlıktaki eloksal kaplanmış numunelerin çatlak çekirdeklenme ömrü, 5 ile 1 μm kalınlıktaki eloksal kaplanmış numunelerin çatlak çekirdeklenme ömründen daha kısa olduğu görülmüştür (Khan *et al.* 2008)

Sürtünmeli temas yorulma yükleme şartlarında ve 0,1 gerilme oranında tek eksenli bir gerilme halinde mikro ark oksidasyonu ve sert eloksal kaplanmış Al-Mg-Si alaşımında (AA6063), kaplamaların karakterizasyonu, artık gerilme, yüzey pürüzlülüğü ve kaplamanın dış görünüşü arasındaki ilişki incelenmiştir. Mikro ark oksidasyonu ile kaplanmış numuneler sert eloksal ile kaplanmış numunelere göre daha pürüzlü yüzeylere sahip olduğu belirlenmiştir. Mikro ark oksidasyon kaplamanın malzeme yüzeyi nispeten daha az gözenekli yapıya sahip iken, sert eloksal kaplamada gözeneklerin çatlak boyunca devam ettiği tespit edilmiştir. Her iki şekilde kaplanmış numune kaplanmamış numuneye göre çok daha fazla sürtünme kuvveti göstermiştir. Kaplanmış numunelerin her iki çeşidinde düz yorulma ömrünün kaplanmamışlara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Rajasekaran 2008).

AISI 316 L östenitik paslanmaz çelikte, düşük sıcaklıkta yapılan karbürlemenin (LTC), mikro yapı ve yorulma davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Termokimyasal işlemin malzeme sertliğini 1150 HV'e kadar önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Karbürize edilmiş malzemenin yorulma dayanımının kaplamasız malzeme ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde (%40) iyileştiği tespit edilmiştir. LTC uygulanmış numunelerde yorulma çatlaklarının taban malzeme ile sertleştirilmiş tabaka arasında oluştuğu görülmüştür (Ceschini and Minak 2008).

Sohar ve arkadaşları (2008), AISI D2 tipi soğuk takım çeliğinin yüksek çevrimlerde ($N_{max}=10^{10}$), tam değişken gerilme yüklemesinde ($R=-1$) ve maksimum 20 kHz'deki yorulma davranışı incelemiştir. Bu çalışmada, numuneler kendi eksenlerine dik yönde döndürüldüğünde belirgin bir yorulma dayanımı düşüşü görülmüş, çatlakların karbid parçacıklarının yakınında oluştuğu görülmüştür. Çatlak yoğunlaşması bu bölgede olduğu için, çatlak ilerlemesinin eksenine dik yönde döndürülen numunede daha hızlı olduğu tespit edilmiştir.

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

Temas yüzeyinde kanal oluşturup, gerilme yığılmasını azaltarak sürtünmeli temas yorulma dayanımının artırılması için testler yapılmıştır. Sürtünmeli temas yorulma testleri, birkaç tür kanalın oluşturulduğu numuneler kullanılarak yürütülmüştür. Kanalın yapısı, çap ve teğetsel açıya bağlı olarak sistematik olarak değiştirilmiştir. Gerilme azalmasına bağlı olarak, yorulma limitinin geliştirilmesi hem çap hem de açıya doğru

orantıyla bağılıdır. Temas yüzeyindeki gerilme durumunu analiz etmek Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) yapılmıştır. Bu analizde, temas köşesinin ideal şekilde olduğu varsayılarak, yüksek bir bası gerilmesinde gerilme yığılması temas köşesinde meydana gelmekte ve küçük çatlaklar asla büyümemektedir. Teğetsel açı ve derinliğin artmasıyla sürtünmeli temas yorulma limiti artmıştır. Gerilme azalmasının rolü gerilme yığılmasındaki azalmadır. Çap değişkeni gerilme azalmasıyla doğrudan alakalıdır. Bu da sürtünmeli temas yorulma test verilerinin sadece bu değişkenle ifade edilebileceğinin bir göstergesidir (Kubota *et al.* 2006).

Taşıt tekerleklerinin flanşa bağlı yüzeylerinde temasa bağlı olarak sürtünmeli temas yorulması meydana gelebilir. Ounpanich ve arkadaşları (2009), teker imalatı için kullanılan plastik şekillendirme yöntemlerinin (soğuk eğme ve bükme, parlatma) yorulma ve sürtünmeli temas yorulması üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Soğuk eğme ve bükme işlemlerinin sonucunda, yorulma dayanımını artıran düşük seviyelerde bası artık gerilmelerinin oluştuğu ve sertliğin arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte yorulma dayanımını azaltan yüzey pürüzlülüğü gibi yüzey kusurları da arttı. Sürtünmeli temas yorulmasında, sürtünmeli temas yüzey kenarında oluşan gerilme konsantrasyonu sürtünmeli temas yorulma özelliklerini etkilemede yüzey kusurlarından daha etkili bir faktördür. Bu yüzden, sürtünmeli temas dayanımının yüzey şartları ne olursa olsun hemen hemen uygulanan bütün plastik şekillendirme yöntemleri için uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Majzoobi ve arkadaşları (2009), Al 7075-T6 alaşımının sürtünmeli temas yorulma ömrü üzerinde, bilye püskürtme(shot peening) ve IBED tekniği ile oluşturulan titanyum yüzey kaplamanın etkisini araştırdılar. Bilye püskürtme işlemi, sürtünmeli temas yorulma ömrünü çok önemli oranda artırırken, Ti kaplamalar sadece düşük gerilme genliklerinde daha düşük oranlarda bir artışa neden olduğu belirlendi. Ti+Bilye püskürmenin birlikte yapıldığı duble kaplamanın, Ti kaplamalara benzer olarak sadece düşük gerilme genliklerinde ancak ömür artışına neden olduğu tespit edilmiştir.

Daha öncede belirtildiği gibi, uçak motorlarının dönen elemanlarından suni kalplere kadar çok geniş bir alanda gözlenen sürtünmeli temas yorulması, süresinden önce elemanların kusuruna yol açarak beklenmedik hasarlara neden olmasından dolayı endüstriyel uygulamalarda her zaman önemli bir yere sahip olmuştur. Mikro kayma şartını oluşturan değişik temas parametrelerinin etkileşimli şartları altında yapılan literatür çalışmalarında; değişik malzemelerin ve onlara uygulanan değişik yüzey işlemi ve kaplamaların sürtünmeli temas yorulmasına karşı gösterdikleri farklı davranışların tanımlanması, genellikle eksenel (axial) yükleme tipleri için yapılmıştır.

Diğer taraftan, üstün mekanik özellikleri, düşük maliyet, hafif ağırlık ve güvenilirliğinden dolayı alüminyum alaşımları değişik parça ve elemanların imalatı için birçok endüstri kolunda yaygın olarak kullanılır. Bununla birlikte, yumuşak alaşım ve düşük aşınma dayanımlarından dolayı, alüminyum alaşımlarında yüzeylerin hasar görmesi daha kolaydır. Alüminyum alaşımları mühendislik ve yapısal uygulamalarda sürtünmeli temas yorulması hasarına maruz kalabilirler. Sürtünmeli temas, yüzey hasarına neden olduğuna göre değişik yüzey teknikleri uygulanarak sürtünmeli temas yorulma hasarı azaltılabilir. Sert eloksal ve akımsız nikel kaplamalar, endüstriyel uygulamalarda alüminyum alaşımlarına uygulanabilen iki farklı ticari kaplama teknikleridir. Söz konusu kaplamaların uygulandığı Alüminyum alaşımlarının düz yorulma (sürtünmeli temas yorulma şartları mevcut değil) davranışı üzerinde literatürde yeterli miktarda çalışma bulunmasına rağmen, Döner eğilmeli ve Düzlemsel eğilmeli yorulma yükleme tiplerinin uygulandığı sürtünmeli temas yorulması ile ilgili olarak yapılmış çalışma sayısı neredeyse yok denecek kadar azdır.

Bu yüzden bu çalışmada, T6 ısıt işlemleri görmüş 2014 grubu alüminyum alaşımına uygulanan Sert Elokso ve Akımsız Nikel kaplamalarının sürtünmeli temas yorulma davranışı üzerindeki etkisi, iki farklı yorulma yükleme türü için incelenmiştir. Ayrıca aşınma testleri de yapılarak aşınma ile sürtünmeli temas yorulma davranışı arasında doğrudan bir etkileşimin olup olmadığı araştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Sürtünmeli Temas Olayı

Sürtünmeli temas yorulması, temas eden iki yüzey arasında oluşan küçük genlikli (yaklaşık 3–75 mikron) titreşimli bağıl hareket sonucu oluşan aşınma ve yorulma olayıdır (Waterhouse 1984; Broszeit *et al.* 1985; Koul *et al.* 1996). Aşınma sonucu oluşan kalıntıların, sürtünen yüzeyler arasında kalmasından dolayı malzemede hasar oluşumunun hızlanmasıyla sonuçlanır (Hamdy and Waterhouse 1982; Waterhouse 1992). OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) sürtünmeli temas yorulmasını, ”Küçük genlikli salınımlı bağıl harekete sahip iki yüzey arasında oluşan bir aşınma olayı” olarak tarif etmiştir.

Sürtünmeli temas yorulması, malzemenin hasar görmesiyle sonuçlanan üç temel mekanizma ile tanımlanabilir (Fenner 1958):

Sürtünmeli temas aşınması; Yüzey hasarına neden olan bir mekanizmadır ve sürtünmeli temas yorulmasının dinamik yapısı buna sebep olur. Aşınma abrasif özelliktedir.

Sürtünmeli temas yorulması; Sürtünmeli temastan dolayı bir elemanın yorulma ömründeki azalma olarak tanımlanır.

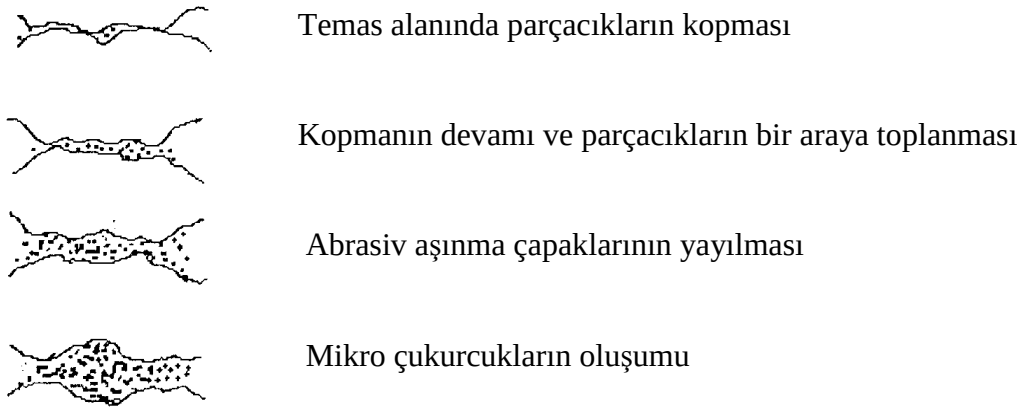
Sürtünmeli temas korozyonu; hem sürtünmeli temas aşınması hem de sürtünmeli temas yorulmasının sebep olduğu hasarları hızlandıran oksidasyon gibi kimyasal reaksiyonlar ile ilgilenir.

2.1.1. Sürtünmeli temas aşınması

İlk kez Eden ve arkadaşları 1911’de sürtünmeli temas aşınmasından söz etmiştir. Yorulma makinesinin numuneyi tutan çenelerinde kahverengi oksit kalıntıları tespit etmiştir (Eden *et al.* 1911). Daha sonra 1927’de Tomlinson sürtünmeli temas aşınmasının daha iyi tanımlanmasını sağlayan bir tasarım oluşturmuştur. Demir ile havanın kimyasal reaksiyonu sonucunda kahverengi demir oksit oluşumunu “sürtünmeli temas korozyonu“ (Fretting Corrosion) olarak tanımlamıştır. Yüzey molekülleri arasındaki kohezif kuvvet, önce kopma, sonra ise oksitlenme meydana getirmektedir (Iyer and Mail 2001). O dönem aşınma ve korozyon oldukça iyi anlaşıldığı için çalışmaların çoğunluğu sürtünmeli temas aşınması ve korozyonu üzerinde odaklanmıştır.

Sürtünmeli temas aşınması, sürtünmeli temas yorulmasından farklı olarak yüzeylerin daha büyük genlikle (20–75 mikron) sürtünmesi (Koenen *et al.* 1996) ve normal yükten daha düşük yüklerde yüklenmesi ile oluşur. Yüzeye sürtünmeli temas yorulmasından daha fazla zarar verme eğilimindedir. Sürtünmeli temas aşınmasının ilk evresinde temas yüzeyinde aşınma debrisleri (çapak) oluşur. Meydana gelen bu çapaklar oksitlenerek, oksitli yüzeyin ilk kısmını oluşturur ki bu orijinal yüzeyden daha sert olabilir. Bu oksitli parçacıklar yüzeyde çizik ve çukurcuklar oluşturarak malzemede oluşan hasarı hızlandırır (Antoniou and Radtke 1997). Burada normal aşınmadan abrazyon aşınmasına geçiş olur. Daha sonraki evrede sürtünme sonucu izler ve malzeme transferi meydana gelebilir. Buna ilaveten yüzeyde oluşan bu hasarlar mikro çatlakların oluşumuna öncülük edebilir. Ancak yüzeye uygulanan gerilmenin düşük olması durumunda sürtünmeli temas aşınmasından dolayı yüzeyde oluşan mikro çatlaklar malzemenin tamamen kırılmasıyla sonuçlanacak ana çatlağın oluşmasına sebep olmayabilir (Iyer and Mail 2001). Brady (1990)’e göre temas halindeki yüzeyler aslında çok az bir alanla birine temas ederler. Ancak temas yüzeyine basınç uygulandığında yüzeydeki pürüzlerin tepe noktalarındaki gerilmeler yerel olarak akma gerilmesini geçer. Dolayısıyla temas yüzeyi artar. Yüzeyler arasındaki bağıl kayma hareketi

neticesinde yüzeydeki oksit tabakası kırılır metal metale sürtünerek aşınmaya, aşınan parçacıkların araya girmesi sonucu abrazyon aşınması, hareket salınımlı ise sürtünmeli temas aşınmasına sebep olur (Chakravarty 1995). Bağlı hareket yüzeydeki oksit filminin kırılmasına sebep olur. Yüzeylerin pürüz tepe noktaları birbirine kaynak olur. Bağlı hareket neticesinde kopan bu kaynaklı çapaklar deformasyon setleşmesine uğrar ve hızla oksitlenerek yüzeyden kopmuş olan oksit tabakasıyla birleşir. Daha sonra bu kalıntı çapaklar bir yerde toplanır. Sürekli hacim kazanır geniş bölgeleri kaplayarak abrasif aşınma oluşturur. Aşınma bölgeleri birleşerek mikro çukurcuklar oluşturur (Şekil 2.1.). Bu mikro çukurcuklarda birleşerek daha derin ana çukurlar oluştururlar (Chakravarty 1995). Sürtünmeli temas aşınması: çevrim sayısı, normal yük, frekans, kayma genliği, yüzey sertliği, çevre şartları ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerden etkilenmektedir.



Şekil 2.1. Sürtünmeli temas aşınma mekanizması (Brady 1990)

2.1.2. Sürtünmeli temas yorulması

1941'e kadar yorulma, sürtünmeli temas durumu ile birlikte göz önüne alınmadı. Sürtünmeli temasın yorulma üzerindeki etkisi, ilk olarak 1941'de Warlow Davies tarafından araştırıldı. Bu araştırma, pratikte yaygın bir durum olan sürtünmeli temas ve

yorulmanın birleşik etkisinin, çukurcuklar oluşturarak yorulma dayanımı üzerinde çok ciddi azalmalara neden olduğunu gösterdi. Yorulma dayanımındaki söz konusu bu azalmanın, 2 ile 5 kat arasında olduğu aynı çalışmada gösterildi. Yorulma dayanım azalması, düz (sürtünmeli temasız) yorulma dayanımının, sürtünmeli temas yorulma dayanımına oranı olarak tanımlanabilir.

Demir dışı malzemeler için, yorulma dayanımı genellikle 10^7 çevrim sayısındaki değişken gerilmenin değeri olarak tanımlanır (Waterhouse 1992).

Fenner ve Field (1958), yorulmada sürtünmeli temasın çatlak başlangıç süresini büyük ölçüde hızlandırdığını gösterdiler. Düz yorulmada çatlak başlangıcı toplam yorulma ömrünün yaklaşık %90'ını teşkil ederken, sürtünmeli temas yorulmasında ise çatlak başlangıcı toplam yorulma ömrünün yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır. Bu sonuç, gaz türbini, motor elemanları gibi yüksek çevrimli yorulma etkisine maruz makine elemanlarının sürtünmeli temas yorulmasından önemli ölçüde etkilendiğini gösterir (Fenner and Field 1958; Hamdy and Waterhouse 1982; Ruiz 1984; Waterhouse 1992).

Sürtünmeli temas yorulmasında, numune ile temas pabucu (contact pad) arasındaki bağıl hareketin genliği, sürtünmeli temas aşınmasındakine göre daha küçüktür. Bu genellikle $30\ \mu\text{m}$ 'den daha az olur (Koenen *et al.* 1996). Sürtünmeli temas yorulmasıyla sürtünmeli temas aşınmasının yüzeyde oluşturduğu hasar benzer görünmesine rağmen, sürtünmeli temas aşınması yüzeye daha fazla zarar vermektedir (Privett and Fujishiro 1994; Koenen *et al.* 1996).

2.1.3.Sürtünmeli temas yorulma teorileri

Sürtünmeli temasının aşınma etkisiyle yorulma ömrünün azalmasını açıklayan teoriler geliştirilmiştir. Ancak buradaki zorluklardan biri sürtünmeli temas yorulma hasarının oldukça çeşitli etkilere sahip olmasıdır. Sürtünmeli temas aşınması önemli miktarda yüzey hasarına sebep olmasına rağmen, yorulma çatlakları başlatmayabilir. Buna karşın

uzun bir yorulma ömründe sürtünmeli temas, çok az yüzey hasarı oluşturmakla beraber çok sayıda yorulma çatlağının başlamasına sebep olabilir.

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

Yer değiştirmeler küçük olduğundan, sürtünme yüzeyinde aşınma parçacıkları kalacak ve bu parçacıklar bir araya gelecektir (Waterhouse 1989).

Daha sonra oksitlenerek ana malzemedan daha sert olan kalıntılar haline gelecektir. Bu durum yerel olarak malzeme yüzeyinde kopmalar ve çukurcuk oluşumuyla çatlak oluşumunu hızlandıracaktır.

Sürtünmeli temas yorulmasını açıklayan çok sayıda teori olmasına rağmen sürtünmeli temas yorulmasının, yorulma ömründeki zararlı etkisini tam olarak tahmin eden bir eşitlik mevcut değildir. Bunun sebebi sürtünmeli temas yorulmasını etkileyen çok

sayıda parametrenin olması ve bunların çoğunun bağımsız etkiye sahip olmasıdır (Privett and Fujishiro 1994; Koul *et al.* 1996).

Sürtünmeli temas yorulmasını etkileyen çeşitli parametrelerin bağımsız yapısı, ele alınan malzeme, çevre ya da yük şartları için, önleyici tedbir olarak deneysel metotları temel alır. Ruiz ve Chen'in çalışmaları, makine parçaları ve disk bileşimlerinde muhtemel sürtünmeli temas yorulma çatlağı olasılığını ve yerinin tahmininde geliştirilen ampirik bağıntıya katkıda bulundu (Ruiz *et al.* 1984; Waterhouse 1992). Verilen bir noktada kayma genliği δ , kayma gerilmesi τ ve aynı bölgede verilen maksimum çekme gerilmesi σ 'ise, sürtünmeli temas'a sebep olan enerjiyi dikkate alarak, sonuç kriterleri σ , τ , δ 'e bağlı olarak verildi. Temas yüzeyi boyunca çatlak başlangıcı için σ , τ , δ en yüksek değere ulaşır. Bununla birlikte σ , τ , δ pik değere ulaşıncaya kadar çatlak başlamayacaktır (Ruiz *et al.* 1984; Ruiz and Chen 1986). Waterhouse bu kriterleri çelik çubuk ve düz levha için uyguladı ve σ , τ , δ vasıtasıyla çatlak yerini tahmin etti (Waterhouse 1992).

Temas mekaniği

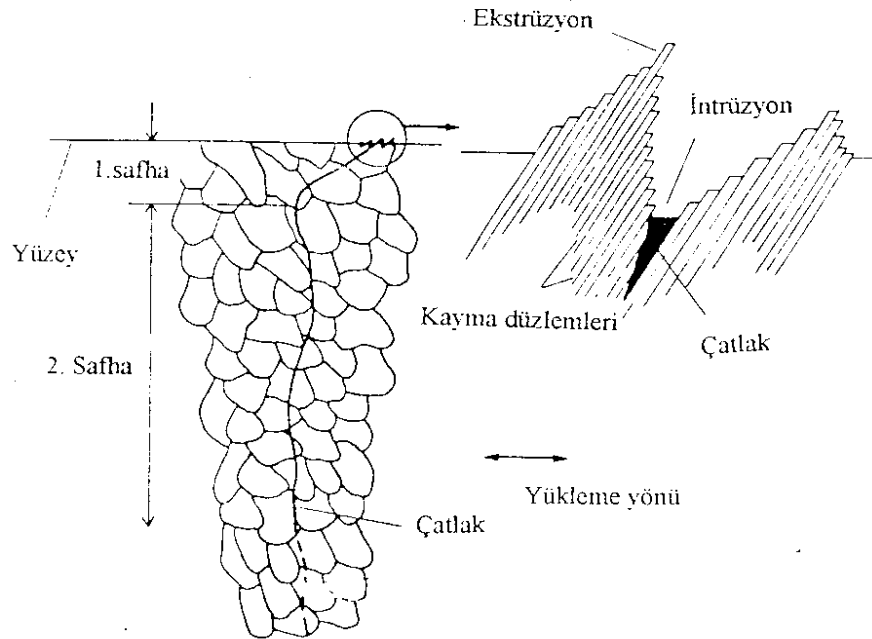
Temas mekaniği, sürtünmeli temas durumunda yüzeyler arasında mevcut temas şartlarının tanımlanmasıyla sürtünmeli temasın oluşturduğu hasarın gelişimini anlamada rol oynar. Temas mekaniğinin gelişiminde 1982'de Hertz'in geliştirdiği teori pek çok yerde uygulanan temas problemlerinin çözümünde hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat teoride pek çok kabul bulunduğundan kullanımı sınırlıdır. Hertz tarafından yapılan kabuller aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

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

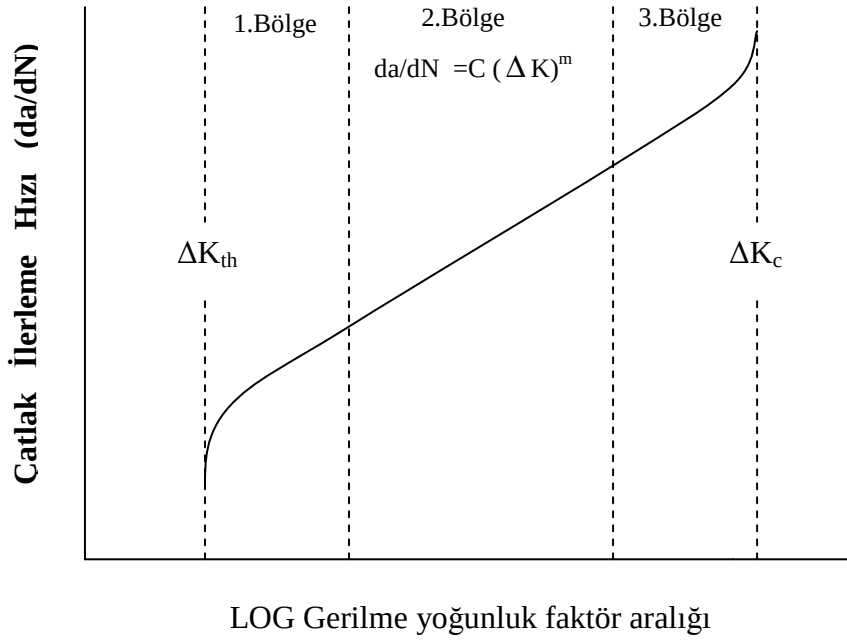
Küçük şekil değiştirme kabulünü gerçekleştirmek için, yüklemenin genellikle malzemenin elastik limitleri içerisinde kaldığı, lineer elastisite teorisi uygulanır. Temas halindeki malzemeler arası yarı boşluğun elastik olduğu kabulü göz önüne alındığında, temas gerilme bölgesi malzeme sınırlarının yakınlığından ciddi bir şekilde etkilenmez. Yüzeyler arasında sürtünme olmadığı kabulü, sadece temas yüzeyleri arasında normal (dik) kuvvetlerin etkisi dikkate alındığında geçerlidir.

2.1.4. Sürtünmeli temas yorulmasının sebep olduğu çatlak oluşumu ve gelişimi

Yorulma çatlak oluşumu ve yayılması Şekil 2.2. ve 2.3.'de gösterilmiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, sürtünmeli temas yorulmasının çatlak oluşumunu hızlandığını (1.Bölge) göstermiştir (Waterhouse 1981, 1992) . Burada 2. ve 3. bölgedeki çatlak oluşumu kısaca anlatılmıştır (Sines and Waisman 1959; Bannantine 1990).



Şekil 2.2. Çatlak oluşumunun şematik gösterimi (Samuels 1993)



Şekil 2.3. Çatlak yayılmasının şematik gösterimi

Sabit genlikli yük altında, çatlak boyu (a) ve hasar çevrim sayısı (N_f) arasında ilişki vardır. Çatlak yayılma hızının (da/dN), gerilme şiddet aralığı ile logaritmik skaladaki değişimi şematik olarak Şekil 7’de gösterilmiştir. Gerilme şiddet aralığı ΔK aşağıdaki şekilde elde edilebilir (Bannantine 1990).

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = f_{(g)} \Delta \sigma (\pi a)^{1/2}$$

Burada;

$K_{\max}$ ve $K_{\min}$ maksimum ve minimum gerilme şiddet faktörüdür.

$f_{(g)}$ çatlağın boyu ve geometrisine göre ele alınan bir doğrulma faktörüdür.

$\Delta \sigma$ $\sigma_{\max}$ ve $\sigma_{\min}$ arasındaki gerilme aralığıdır.

a çatlak boyudur

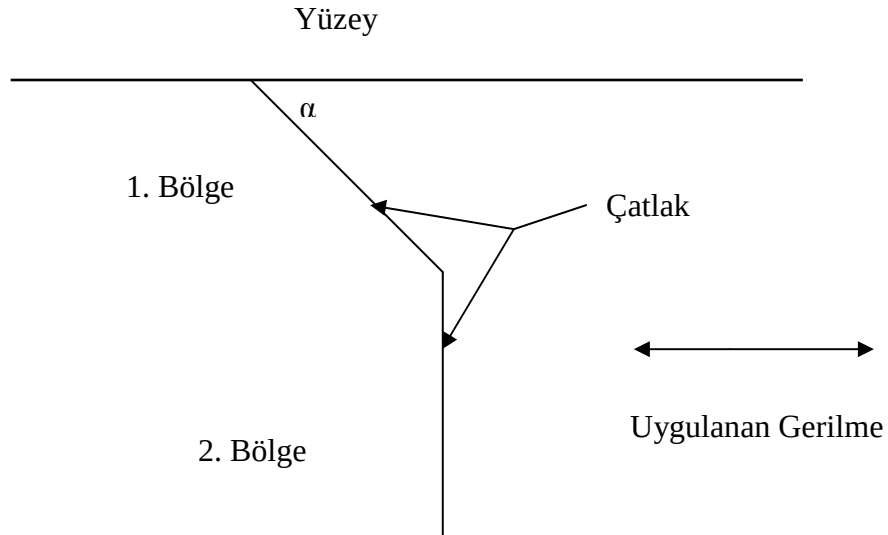
Küçük ΔK değerlerinde çatlak ilerlemesi gerçekleşmemekte, ilerlemenin oluşmasını sağlayan en küçük gerilme şiddeti aralığına da Eşik gerilme şiddet Aralığı değeri (ΔK_{th}) adı verilmektedir. K_c ise malzemenin kırılma tokluğunu göstermektedir.

2. bölge çatlakın kararlı bir şekilde ilerlediği bölgedir ve en önemli kısmı oluşturmaktadır. Bu bölgedeki çatlak ilerlemesi davranışı Paris-Erdoğan bağıntısı adı verilen bir ifade (Bannantine 1990) ile

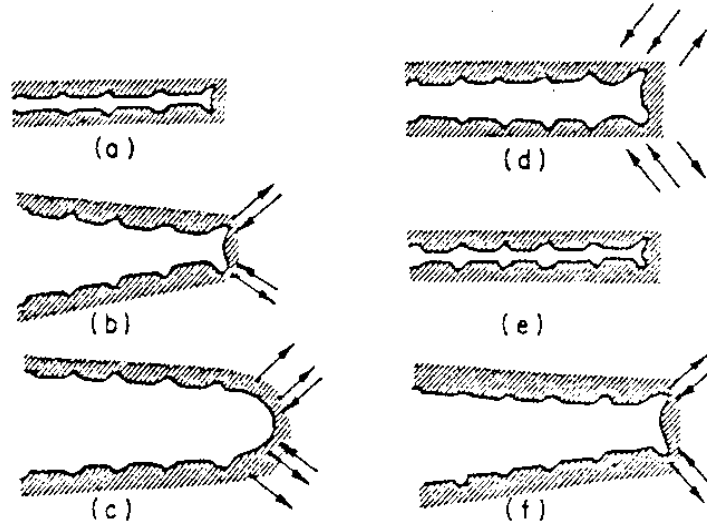
$$da/dN = C (\Delta K)^m$$

şeklinde açıklanmaktadır. Burada C ve m malzeme sabitleridir.

Şekil 8’de görüldüğü üzere, çatlak ucuna uygulanan çeki gerilmesi ile 2. bölgede çatlak dik yönde uygulanan yük, çatlakın yayılmasına neden olurlar (Waterhouse 1981).



Şekil 2.4. I. ve II. Bölgede çatlak yayılması (Waterhouse 1981)



Şekil 2.5. II. Bölgede çatlak yayılması (Laird 1979)

3. bölge ise çatlak kararsız bir şekilde hızla ilerleyerek kırılmaya neden olduğu bölgedir. Bu bölge malzemenin toplam yorulma ömrünün küçük bir bölümünü oluşturur ve genellikle kırılmaya kadar ki çevrim sayısı, N_f , tahmin edilemez (Sines and Waisman 1959; Bannantine 1990).

Sürtünmeli temas, çatlak başlangıç zamanını ve 1. bölgedeki çatlak ilerlemesini etkiler. Çatlak başlangıcı, sürtünmeli temas'ın sebep olduğu yüzey hasarı tarafından tetiklenir. Sürtünmeli temas yorulmasının ilk devresinde oluşan çapakçıklar yüzeyde çukurcuklar ve karıncalanmaya sebep olur. Dolayısıyla bu durum yüzeyde gerilmenin yükselmesine neden olur (Chakravarty 1995). Sürtünmeli temasın oluşturduğu lokal kesme gerilmesinin oluşturduğu bölgedeki gerilme, etkili bir şekilde yükselerek bir çatlak başlatmak için yeterli enerji seviyesine ulaşabilir (Waterhouse 1981, 1992). Yorulma çatlak başlangıcı, maksimum kesme gerilmesinin etkili olduğu yönde, yüzeye göre yaklaşık α^0 açı ile ilerleme eğilimindedir. Şekil 8'de görüldüğü üzere, sürtünmeli temasın oluşturduğu çatlak I. bölgenin gelişimi esnasında, genellikle yüzey normaline $\alpha=35-50^0$ açı ile yayılır. Bununla birlikte sürtünmeli temas yorulmasının başlattığı çatlakın I. bölgedeki uzunluğu, sürtünmesiz düz yorulmanın oluşturduğundan daha fazladır. İki yüzey arasında tam bir kayma oluşur, lokal sürtünme katsayısı sabit hale

gelir ve sürtünmeli temas aşınması kırılma hasarında etkili hale gelir. Bu sürtünme hasarına, yüzey lekeleri ve yüzey bozulmaları sebep olur (Waterhouse 1992).

2.1.5. Sürtünmeli temas yorulmasında çatlak oluşumunu etkileyen faktörler

Sürtünmeli temas yorulmasının sebep olduğu yüzey hasarı, temas noktasındaki normal yük, kayma genliği ve frekans gibi faktörlerin fonksiyonudur (Waterhouse 1992). Sürtünmeli temas yorulmasında çatlak oluşumunu etkileyen faktörler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Bağıl kayma

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

Vingsbo ve Soderberg, sürtünmeli temas yorulma ömründe bağıl kayma genliğinin etkisini incelediler. Literatürdeki mevcut verileri temel alarak, bağıl kaymanın üç bölgesiyle, yorulma ömrü eğrisi arasındaki ilişkiyi bağıl kayma genliğinin bir fonksiyonu olarak belirlediler. Vingsbo ve Söderberg, yorulma ömrünün, bağıl kayma genliğindeki artışla, başlangıçta düşerek bir minimum değere ulaştığını, sonra tekrar yükseldiğini ve nihayet sabit bir değere ulaştığını ifade ettiler. Bağıl kayma genliğinin 10–30 μm arasındaki değerinde, yorulma ömrünün minimum değer aldığını belirlediler. Bağıl kaymanın, kısmi kaymadan tam kaymaya geçiş değerine karşılık gelen bu değeri, Zhou ve Vincent'in karışık rejimin en fazla hasar oluşturduğu görüşünü destekler niteliktedir. Gaul ve Duquette'de (1980) bağıl kayma genliğinin 20 ila 30 μm arasında olduğu durumda, yorulma direncinin minimum değer aldığını belirttiler. Spink 3 ila 75 μm arasındaki kayma genliğinde, sürtünmeli temas yorulmasından dolayı kırılmanın meydana geldiği ve yaklaşık 25 μm kayma genliğinde yorulma ömrünün minimum bir değer aldığını tespit ettiler.

Temas basıncı

Malzemelerin sürtünmeli temas yorulma dayanımını etkileyen diğer bir parametre de temas basıncıdır. Sürtünmeli temas yorulması oluşmadan önce minimum bir normal yüke gerek vardır (Waterhouse 1992). Bu minimum normal yükün altındaki temas basıncı değerinde, yüzeyde önemli hasara sebep olan sürtünmeli temas aşınması oluşumu ön plandadır. Fakat minimum bir değer altındaki temas basıncında sürtünmeli temas, yüksek çevrimli yorulma ömrü üzerinde güçlü bir etkiye sahip değildir (Malkin 1972). Temas basıncı arttırıldığında malzemenin yorulma ömrü üzerinde sürtünmeli temas aşınmasının etkisi azalır sürtünmeli temas yorulması ön plana çıkmaya başlar. Ayrıca bir maksimum temas basıncı değeri vardır ki bu değer üstünde, yorulma ömründe daha fazla azalmaya sebep olmaz (Antoniou and Radtke 1995). Genel olarak pürüzlü yüzey tepe noktalarının küçük temas alanıyla birbirine bastırılması sonucu plastik deformasyonla yüzey hasarının oluştuğu kabul edilir (Waterhouse 1992). Normal yük, τ gerilmesini, τ gerilmesi ise yüzeyde plastik deformasyon ve aşınma oluşturarak çatlak başlangıcını etkiler. Ayrıca normal yük,

sürtünmeli temas yorulmasının oluşturduğu hasarı etkileyen, iki yüzey arasındaki kayma miktarını etkiler (Koul *et al.* 1996).

Nishioka ve Hirakawa (1972) temas basıncının yükselmesiyle, yorulmada çatlak başlangıcını esas alan yorulma dayanımının düşüşü arasında doğrusal bir ilişki olduğunu buldular. Fakat temas basıncındaki yükseliş ile kırılmayı temel alan sürtünmeli temas yorulması dayanımındaki düşüş devam etti. Temas basıncı daha da artırılarak belli bir değere ulaştıktan sonra, yorulma dayanımı neredeyse sabit bir değerde kaldı. Bu durum, daha büyük temas basınçlarında çatlak oluşumunun devam ettiği, fakat muhtemelen yükün oluşturduğu bası gerilmesinin etkisiyle çatlak ilerlemesinin durduğunu gösterir. Fernando ve arkadaşları (1994), yorulma ömrünün, temas basıncının artmasıyla başlangıçta düştüğünü bir minimum değere ulaştıktan sonra temas basıncının yükselmeye devam etmesiyle, artmaya başladığını söyledi. Çok yüksek temas basınç değerlerinde, yorulma ömründeki yükselişin sebebi olarak, yüksek bası normal gerilmelerinden dolayı çatlakta kapanma etkisi olduğu ve çatlak ilerleyişinin yavaşladığı sonucuna vardılar.

Nakazawa ve arkadaşlarının çalışmaları, temas basıncının daha fazla artmasıyla yorulma ömründe ciddi bir değişimin olmadığını tespit etti. Temas basıncının bu etkisi, orta gerilme genliği değerlerinde titanyum alaşımlarında ve yüksek dayanımlı çelikler içinde doğrulandı. Titanyum alaşımı ve yüksek dayanımlı çeliklerde orta gerilme genliği değerinde, temas basıncının artmasıyla yorulma ömründe başlangıçta oluşan düşüşü az bir artışın takip ettiği, daha sonra bir değişim olmadığını gözlemlediler. Daha yüksek gerilme genliği değerlerinde, yorulma ömründe minimum bir değere ulaşıldıktan sonra temas basıncındaki artışla herhangi bir değişiklik olmadığını belirlediler. Düşük gerilme genliği değerinde alışılmışın dışında bir durum gözlemlediler. Başlangıçta temas basıncının artırılmasıyla yorulma ömründe bir düşüş, takiben sabit yorulma ömrü, daha sonra temas basıncındaki yükselmenin devam etmesiyle, yorulma ömründeki keskin bir yükseliş olduğunu gözlemlediler. Bu şartlar temas basınç değerinin küçük bir bölgesinde devam ettikten sonra, yorulma ömrü önceki minimum değerine düştü. Temas basıncında daha fazla artışa bağlı olarak, yorulma ömründe bir değişiklik olmadı.

Temas basıncının etkisi, temas basınç dağılımı dikkate alınarak da araştırıldı. Satoh, düz yüzey ile düz yüzey ve silindir ile düz yüzey temaslarını inceledi. Farklı temas basınç dağılımı şartlarında elde ettiği S-N eğrisinde bütün sonuçlar birbirine yakın çıktı. Pape ve Neu, temas basınç dağılımının yorulma ömrü üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını deneysel olarak buldular. Düz yüzey ile düz yüzey ve silindir ile düz yüzey temaslarını aynı normal yük şartları altında test ettiler. Maksimum değerde temas basıncı uygulayarak, silindir temasında düz temasa göre daha yüksek basınç uygulamalarına rağmen, yorulma ömründe fazlaca bir değişiklik olmadığını, basınç dağılımının önemli bir rol oynamadığını gördüler.

Fernando ve arkadaşları, temas basıncındaki artma ile temas yüzeyinde meydana gelen sürtünme kuvvetini incelediler. Normal yükün artması ile kayma gerilmesinin artışı azaldı ve sonunda normal yük daha fazla artırılmasına rağmen sürtünme kuvveti sabit değerde kaldı. Lee ve arkadaşları da benzer sonuçlar elde etti. Switek temas eden yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetinin, sürtünmeli temas yorulma limitini etkileyen önemli faktörlerden biri olduğunu belirtti.

Frekans

Frekansın yorulma ömrünü etkilediği bilinmektedir Waterhouse (1992). Hatta sabit gerilme değerinde yükün frekansı, kırılma devir sayısını etkilemektedir. Düşük frekanslarda, korozyif ortamda yük uygulandığında, çevreye açık olan çatlak daha uzun süre çevre şartlarına maruz kalacaktır. Korozyon, yorulma ömrünü kısaltmaktadır (Bannantine *et al.* 1990).

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

Kayma genliği

Daha önce normal yükün büyüklüğünün kayma genliğini etkilediği ifade edilmişti. Çevrimli (tekrarlanan) kaymanın varlığı ve tipi, büyük oranda sürtünmeli temas yorulmasının oluşturduğu hasarın miktarını ve tipini etkiler (Malkin *et al.* 1972; Ruiz *et al.* 1984). Genel olarak temas eden yüzeyler arasında iki tür kaymadan söz edilebilir; kısmi ve toplam kayma. Mindlin'in analizinde, Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi bu iki kayma arasındaki fark gösterilmiştir (Mindlin 1949; Waterhouse 1992). Mindlin, düz bir malzemenin üzerine bir 'P' normal yükü ile bir kesme yükü uygulamıştır. Bu modelde ki, dairesel temas yüzeyindeki basınç dağılım bölgesi yarım küreyle temsil edilir. Merkezde P değerı maksimum, çevrede ise sıfır değerini alır. Kesme gerilmesi q ile gösterildiğinde, eğer sürtünme katsayısı sıfır değeril ise, q değerı merkezde minimum olurken, kenar çizgisinde maksimum değerini alır. Sürtünme katsayısı μ , sabit kabul edilir ve değerı birden küçüktür. Bir F kuvveti normale göre açılı olarak uygulandığında, harekete karşı μ_p sürtünme kuvveti direnç gösterir. Temas yüzeyinde uygulanan kuvvet sürtünme direncinden daha büyüktür. Bunlarla birlikte, merkeze doğru sürtünme kuvveti uygulanan kuvveti aştığından kayma olmayacaktır. Kayma genliği daha önceki bölümde Ruiz kriterleriyle tanımlanmıştır. Kayma bölgesi ile yapışma bölgesi sınırı, çatlak başlangıcının en çok görüldüğu bölgedir (Waterhouse 1989).

Bununla birlikte, sürtünmeli temas yorulması hasar oluşumu devam ederse, sürtünme katsayısı değiştiği için bu kayma sınırı değerir. Sürtünme katsayısı değerikliğine, çatlaklardan dolayı yüzey gerilmesinde meydana gelen rahatlama ve oluşan çukurcukların biçimlenmesi sebep olmaktadır (Waterhouse 1992). Gaul ve Duquette (1980), 20–30 mikronluk kayma genliği değerlerinde yorulma ömrünün minimum değere ulaştığını tespit etmişlerdir.

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

Sürtünme katsayısı

Sürtünme katsayısı μ_f , iki yüzey arasında hareket oluşturmak için gerekli olan kuvvetin büyüklüğü ile ilgilidir.

Sürtünme katsayısı, iki yüzey arasındaki bağıl hareketi sağlayan F kuvveti ile yüzeye uygulanan normal kuvvet N arasındaki oran olarak tanımlanabilir.

$$\mu_f = F / N \quad \text{veya} \quad F = \mu_f N$$

Sürtünme katsayısının değeri sıfır ile sonsuz arasında olabilir ve formülasyon hem statik, hem kinetik sürtünme katsayıları için yazılabilir. Statik sürtünme katsayısı cisim hareketsiz iken, kinetik sürtünme katsayısı ise cisim bağlı hareket yaparken hesaplanır. Genel olarak belirli bir zaman dilimindeki aşınma miktarı, sürtünme katsayısıyla ilgilidir. Bu yüzden pek çok sürtünmeli temas yorulma dayanımı arttırma düzeneği, yalnızca temas halindeki iki yüzey arasındaki sürtünme katsayısını azaltmayı amaçlar. Yumuşak kaplamalarla karşılaştırıldığında, sert yüzey kaplamaları ile daha düşük sürtünme katsayıları elde edilir. Bununla birlikte pek çok sert yüzey kaplama işlemi sürtünmeli temas yorulma ömrü üzerinde zararlı etki oluşturabilir.

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

2.1.6. Sürtünmeli temas yorulmasının zararlı etkisine karşı direnç arttırma metotları

Aşınmanın etkisini azaltıp, yorulma ömrünü arttıran çeşitli metotlar mevcuttur. Yüzey sertliğini arttırmak ve yüzeyi işlemi uygulamak sürtünmeli temas yorulmasını etkiler. Yorulma direncini arttırma metotlarının bazıları yüksek sıcaklıklarda uygulanır. Ancak yüksek sıcaklıklarda uygulanan bazı ısıtma işlemleri, bası artışı gerilmelerinde düşüşe ya da çeki artışı gerilmelerinde artışa sebep olabilir. Dolayısıyla malzemenin yorulma ömründe azalmaya sebep olabilir (Koul *et al.* 1996). Her bir uygulamanın farklı avantajları olduğu için, etkiyi daha fazla arttırmak için bazen bu yöntemler birleşik bir şekilde kullanılır. Seçilen yöntemler yüzey işlemi ya da ısıtma işlemi bileşimi, her biri tek başına yorulma ömrünü uzatabilir ya da aşınmayı azaltabilir. Ancak birleşik

kullanıldığında farklı etki oluşturarak sonunda zararlı etkiye sebep olma ihtimali göz önünde tutulmalıdır.

Doğru yüzey işlemlerinin seçilebilmesi için malzemenin potansiyel hasar görme mekanizmaları ve çalışma esnasındaki çevre şartlarını anlama en önemli husustur (Koul *et al.* 1996).

Bir servis şartında sürtünmeli temas yorulmasında ya da sürtünmeli temas aşınmasında azalmaya sebep olan bir çözüm, diğer bir servis şartında aynı etkiyi oluşturmayabilir.

Dizayn

Sürtünmeli temas yorulma hasarı ilk önce dizayn aşamasında düşünülmelidir. Bunu sağlamak için temas eden yüzeylerden mümkün olduğunca kaçınmalı, tek parça veya kaynaklı konstrüksiyonlar düşünülmelidir. Ancak bu uygulamada, imalat ve bakım onarım açısından ekonomik olmayabilir.

Malzeme seçimi

Malzeme seçimi sürtünmeli temas yorulma hasarını azaltmada en önemli konulardan biridir. Sürtünmeli temas yorulma dayanımı direk malzeme ile ilgilidir. Ayrıca sürtünme açısından birbirine uygun olan malzemeler kullanılmalıdır. Şayet uygun malzeme kullanılamıyorsa sert ya da yumuşak kaplama yapma yoluna gidilebilir.

Yağlayıcılar

Sürtünme ve oksitlenmeyi önlemek için kullanılır. Sürtünmeli temas halinde olan malzemeler arasında katı bir sınır gibi işlev görür (Chakravarty *et al.* 1995), ancak

yüzeyleri tam olarak birbirinden ayırmaz. Yüzeyler arasındaki kalıntıları uzaklaştırır. Katı yağlayıcı olarak molibden di sülfat (MoS_2) ve grafit kullanılabilir (Waterhouse 1981).

Yağlamanın etkileri şu şekilde sıralanabilir.

- Malzemeye iyi yapışma
- Belirli sıcaklıklar arasında etkili koruma
- Düşük sürtünme katsayısı
- Kimyasallara ve korozyona karşı direnç
- Kendini yenileme özelliği

Mekanik sertleştirme

Mekanik sertleştirme yorulma kırılması mekanizmasında ömrü uzatmada çok etkilidir. Yüzeyin sertliğini arttırarak ve yüzeyde bası artık gerilmeleri oluşturarak yorulma çatlağı başlamasını oldukça geciktirir (U.S Patent 1963; Waterhouse and Sunders 1979). Shot penning (bilye püskürtme), dual shot penning (çift bilye püskürtme) ve laser shot penning bunlar arasında sayılabilir. Yorulma çatlak oluşumunu geciktiren plastik deformasyon direncini yükseltir (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).

Yumuşak kaplamalar

Yumuşak kaplamalar, bakır-nikel-indiyum (Cu,Ni,In), alüminyum, bronz (Al-CuZn) ve saf bakır (Cu) ihtiva eden, sürtünmeli temas yorulmasından korumak için yaygın olarak kullanılan kaplamalardır. Plazma yoluyla sprey şeklinde püskürtülerek yapılan 15 μm .dan daha kalın bakır kaplama sürtünmeli temas yorulma ömründe önemli ilerleme

sağlar (Broszeit *et al.* 1985). Bu süreç, ne yazık ki iki yüzey arasında ince malzeme 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 malzemenin korumasız kalmasına sebep olur (Broszeit *et al.* 1985). Yumuşak kaplamada, krom ya da nikel kısmen uygulanabilir. Bunlar koruyucu oksit tabakasına yardım eder (Waterhouse 1989).

Yumuşak kaplama daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğundan bulaşma eğilimindedir. Dolayısıyla kaplama giderek azalır (Privett and Fujishiro 1994). Buna ilaveten bu tarz malzemeler daha düşük sıcaklıklar da oksitlenme eğilimindedirler. Bu yüzden yaklaşık 500⁰C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bozulur etkisiz hale gelirler (Broszeit *et al.* 1985).

Sert kaplamalar

Ana malzemenin yüzey sertliğinin artırılmasına ilaveten, sürtünme katsayısını azaltmak için yüksek sertlikli bu kaplamalar genellikle parlatılır. Sert kaplamada sürtünmeli temas aşınmasında etkin olan sürtünme katsayısı düşüktür (Privett and Fujishiro 1994; Shen *et al.* 1995). Plazma spreysi ile uygulanan Wc-Co, Al₂O₃-TiO₂ ve Cr₂O₃ gibi sert kaplamalar genellikle bu amaç için kullanılır.

Sert kaplamanın avantajlarından biri bası artık gerilmesi üretmesidir (Pantleon *et al.* 1999). Sert kaplama yapısından dolayı daha yumuşak olan ana malzeme ile direk uyuşmama eğilimindedir.

2.2. Yüzeyler Arasında Temas

Birbirine paralel iki yüzey yavaş bir şekilde birbirine temas ettirilirse, ilk olarak birkaç noktadan temas sağlanmış olacaktır. Temas eden yüzeylere uygulanan yükün artırılması

ile temas eden noktaların artması ve buna paralel olarak temas yüzey alanının artması söz konusu olacaktır. Bağlı harekette, sürtünme ve aşınmayı anlamak için temasta ortaya çıkan mekanizmayı anlamak gerekmektedir. Katı kütlelerde, uygulanan yüklerle birlikte elastik olarak meydana gelen deformasyon, yapıdaki gerilme değerinin akma gerilmesini aşması halinde plastik deformasyon meydana gelecektir. Birçok temas şekillerinde bazı pürüzlülükler elastik olarak deforme olurken, temas eden pürüzlülüklerin en uç noktasında plastik deformasyon meydana gelmektedir.

2.2.1. Sürtünme

Belirli bir yük altında temas eden iki katı yüzeyin kayma, yuvarlanma vb. bağlı hareketinin sonucu olarak ortaya çıkan direnç, sürtünme olarak tanımlanır. Temas anında ilk hareketin kaymanın ortaya çıkışına sebep olan güç, statik sürtünme kuvveti olarak tanımlanır. Kinetik sürtünme kuvveti genellikle statik sürtünme kuvvetinden küçüktür.

Sürtünme kuvvetinin büyüklüğü, sürtünme katsayısının da büyük olmasını doğrudan etkilemektedir. Sürtünme katsayısı; 0.001 den başlayan ve 1'e kadar uzanan geniş bir aralıkta, kullanılan malzeme çifti, çevre şartları, uygulanan yükleme gibi birçok parametreye bağlı olarak değişim göstermektedir. Geleneksel olarak, kaymalı temas durumlarında sürtünme mekanizması, yüzey pürüzlülükleri arasındaki adesiv etki ile açıklanmaktadır. Bu kavram Bowden ve Tabor (1950) tarafından ifade edildi. Yapılan açıklamada, bir yük altında temas halinde, iki yüzey pürüzlülüğü adezyon'un etkisi ile kaynaklı bir birleşmeye gidecektir.

Sürtünme teorileri

Sürtünmenin sebeplerine bakıldığı zaman, sürtünmenin kohezyon ve adezyon kuvvetlerinden doğduğu bilinir. Kohezyon; bir maddeyi teşkil eden parçacıkları bir arada tutan kuvvettir. Bu kuvvet katı cisimlerde, sıvılardan daha fazladır. Diğer taraftan

adezyon; bir maddenin bir maddeyi çekme kuvvetidir. Bu kuvvet sıvı cisimlerde katı cisimlere oranla daha fazladır. Kohezyon ve adezyon kuvvetleri birbirine zıt yönlüdür.

Basit adezyon teorisi; bu teori daha önce ifade edildiği üzere, Bowden ve Tabor (1950) tarafından ilk defa modern bir anlayışla açıklanmıştır. İlgili teori aşağıda verilmektedir.

- 1- Temas halindeki yüzeylere birlikte yük uygulandığı zaman, ilk temas gerçekte yüzey pürüzlülüklerinin tepe-uç noktasında meydana gelecektir.
- 2- Düşük yükleme durumunda, gerçek temas ile oluşan basınç yüksektir. Böylece yumuşak olan tepelikler plastik deformasyona uğrarlar.
- 3- Oluşan plastik akış temas alanının büyümesine sebep olacaktır.
- 4- Bu şartlar altında, ideal elastik-plastik malzeme için, $W = A \cdot p_0$. Burada W; normal yük, A; gerçek temas alanı ve p_0 ; iki malzemedeki yumuşak olanının akma basıncı. Bu akma basıncı yaklaşık olarak sertlik değerine eşit kabul edilir ve sertlik testi ile ölçülen, H ile gösterilen değerdir. Buradan; $W = A \cdot H$ yazılabilir.
- 5- Kuvvetli plastik deformasyon ile pürüzlülüklerin temasından soğuk kaynak olarak tanımlanan kuvvetli adesiv bir bağ oluşur.
- 6- Spesifik sürtünme kuvveti s , basit olarak pürüzlülük teması ile oluşan bağın koparılması (kesilmesi) için gerekli güç olarak tanımlanırsa; $F/W = \mu = s/H$ olur.

Sürtünmenin ölçülmesi

Sürtünme, hareket halinde olan veya hareket ettirilmek istenen bir cismin hareket yönünün aksi yönünde ortaya çıkan, karşı direnç olarak tarif edilir. Bir hareket ancak bu karşı direnç kuvvetinin yenilmesi ile mümkün olabilir. Sürtünmenin veya sürtünme katsayısının ölçülmesinde kullanılacak aparatlarda, tanımlı bir yük altında birbirine temas eden ve biri diğerine göre bağıl harekette olan (kayma ve/veya dönme), kaymaya teğetsel (uygulanan yüke dik ve ters yönde) veya eksenel yönde ortaya çıkan direncin sürtünme kuvveti olarak ölçülmesi ile tanımlanmaktadır.

2.2.2. Aşınma

Aşınma, birbirleri ile temasta olan katı yüzeylerden malzeme kaybı olarak tanımlanır. Hareket halindeki iki yüzey arasındaki tribolojik temasta eş zamanlı olarak sürtünme aşınma olayları meydana gelmektedir. Henüz sürtünme aşınma ilişkisi tamamen anlaşılmış değildir. Genel olarak, düşük sürtünme katsayısı ile düşük aşınma arasındaki doğrusal ilişki, benzer şekilde yüksek sürtünme ile yüksek aşınma arasında da gözlenmektedir. Sürtünme mekanizmasının gerçekleşmesi durumunda, yüzeyden kütle kaybının ortaya çıktığı ve aşınma diye tanımlanacak olan farklı türde “Aşınma Mekanizmaları” ortaya çıkmıştır. Bunlar; Adesiv, abraziv, yüzey yorulması ve koroziv aşınma diye genel bir gruplandırma yapılmaktadır.

Adesiv aşınma

Adesiv aşınma bazen kayma aşınması olarakta tanımlanmaktadır. Adesiv aşınmanın teorisi adezyon aşınması ile aynı temele oturmaktadır. Teorinin altında açıklanan temel mekanizmada, temas anındaki yüzeydeki iki tepelik (pürüzlülük) arasında meydana gelen soğuk kaynak benzeri adesiv bağın kayma sürecinde koparılmasına çalışılır. Aşınma miktarı, adesiv bağların koparılması ile meydana gelen taneciklerin miktarına bağlıdır. Kopan tanecikler bir yüzeyden diğerine transfer olmaya başlar. Bu taneciklerin transferi normalde, yumuşak malzemeden sert malzemeye doğru olmasına rağmen bazen, sert malzemeden yumuşak malzemeye doğru da olmaktadır. Adesiv aşınmada, malzeme yüzey özellikleri, koruyucu kaplama filimlerin önemli rol oynamaktadırlar.

Abrasiv aşınma

İki yüzey arasındaki tanenin kendisinden daha yumuşak yüzeyden kütle kaybına sebep olması da sert olan yüzey tepeliklerinden birisinin yine diğer yumuşak yüzeyden kütleyi kazıyarak, çizerek uzaklaştırması ile ortaya çıkmaktadır. Abrasiv aşınma iki türde ortaya

çıkılmaktadır. Bunlar ;”iki cisimli abrasiv aşınma” ve “ üç cisimli abrasiv aşınma” dır. Her bir durumda da yumuşak olan yüzey, sert tanecik ve/veya uç tarafından kazınır.

Koroziv (kimyasal) aşınma

Koroziv aşınma, temas eden yüzeyler arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu meydana gelmektedir. Temas eden yüzeylerde taşınan gaz veya sıvı gibi maddeden kaynaklanan bir koroziv aşınma değil ise, çevrenin etkisi olarak meydana geliyor demektir. Oksidasyon ve aşınma oranı arasındaki ilişki, oksidasyon oranına bağlı olmazsınız, taban malzeme ve oksit filminin mekanik özelliklerine ve oksit tabakasının taban malzemeye adezyonuna da bağlıdır. Oksit film içinde gerilmeler, filmin kalınlaşması ile artmaktadır. Eğer film içindeki gerilme, film-taban malzeme arasındaki adezyon bağından güçlü olursa film kırılacaktır. Filmin kararlılığı, taban malzemenin sertliğine bağlıdır. Sert taban malzemesi ince film için destek olurken, taban malzeme yumuşak olursa plastik deformasyon meydana gelir.

Kaplanmış yüzeylerde tribolojik mekanizmalar

Günümüz mühendislik sistemlerinde, yüzey mühendisliğinin uygulama alanlarından kaplama filmler, her tür temastaki yüzeylerin sürtünme ve aşınmalarının kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok endüstriyel kayma mekanizmalarında, sürtünme katsayısı, teflon, WS_2 , MoS_2 , DCL (elmas benzeri karbon) gibi katı yağlayıcıların kullanılması ile önemli derecede düşürülmektedir. Sürtünme katsayısındaki önemli küçük değerlere ulaşma, taban malzeme ve film seçimi ile elde edilen kaplamanın kalınlığı, sertliği, yüzey pürüzlülüğü gibi parametreler önemli rol oynamaktadır. Relativ hareketteki yüzeylerin tribolojik temasını iyi analiz edebilmek için, giriş ve çıkış parametrelerini çok iyi anlamak gerekmektedir.

Kaplama sertliği

İnce film temaslarında, tribolojik özellikleri etkileyen en önemli faktörlerden birisi de kaplanmış yüzeyin sertliği ve bu sertlik ile taban malzeme sertliği arasındaki ilişkidir. Mekanik ve tribolojik uygulamalara göre, kaplama filmleri sert ve yumuşak kaplamalar olarak ikiye ayırıp, ayrı ayrı incelemek doğru olacaktır. Yumuşak kaplamalar, sürtünme katsayısını düşürmek için kullanılır.

Kaplama kalınlığı

Kaplama kalınlığının artması ile sürtünme katsayısındaki düşüş, yüzeyin yük taşıma kapasitesindeki düşüşü ile açıklanabilir. Finkin teorik olarak yaptığı çalışmada, sürtünme katsayısının film kalınlığının karekökü ile doğru orantılı, normal yükün karekökü ile de ters orantılı bir ilişkiye sahip olduğunu göstermiştir. Fakat sürtünme kanunlarından bilinen o ki, sürtünme katsayısını etkileyen iç ve dış parametrelerin etkinlik derecesini gerçek anlamda tespit etmek mümkün olamamaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, T6 ısıtıl işlemi görmüş 2014 grubu alüminyum alaşımına uygulanan Sert Elokso ve Akımsız Nikel kaplamalarının sürtünmeli temas yorulma davranışı üzerindeki etkisi, iki farklı yorulma yükleme türü için incelenmiştir. Ayrıca aşınma testleri de yapılarak aşınma ile sürtünmeli temas yorulma davranışı arasında doğrudan bir etkileşimin olup olmadığı araştırılmıştır.

3.1. Sürtünmesiz ve Sürtünmeli Temas (Fretting) Yorulma Deneyleri

3.1.1. Döner eğilmeli sürtünmesiz ve sürtünmeli temas yorulma deneyleri (silindirik numuneler)

3.1.1.a. Malzeme özellikleri (silindirik numuneler)

Bu projede, sürtünmesiz temas ve sürtünmeli temas yorulma deneylerinde taban malzemesi olarak; T6 (çözündürme, daha sonrada yapay yaşlandırma) ısıtıl işlemi görmüş, üstün mekanik özellikleri, düşük maliyet, hafif ağırlık ve güvenilirliğinden dolayı otomobil, uçak parçaları, hava ve yağ kompresörleri gibi yorulmaya maruz parçalarda yaygın biçimde kullanılan 2014 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Satın alınan 2014 alüminyum alaşımının spektrometre analizi ile belirlenen kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. 2014 Alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu (% ağırlık)

	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Zn	Al
(% Ağırlık)	4,51	0,39	0,60	0,68	0,33	0,05	0,090	Dengeli

Silindirik numuneler 12 mm çaplı bar numunelerden işlenerek imal edilmiştir. Kullanılacak olan bütün numunelerin yüzeylerine, çevresel çentik ve çizikleri azaltmak için, düzlemsel yüzey taşlama ve parlatma (polisaj) işlemi birlikte uygulanmış ve parlatma işlemi uygulanan numuneler daha sonra aseton ile temizlenmiştir. Son durumda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 3.1’de gösterilen profilometre ile ölçülmüştür.



Şekil 3.1. Mitutoyo SJ. 400 tipi yüzey profilometre cihazı

Göz önüne alınan malzeme durumları için yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Dairesel kesitli Silindirik Numunelerin Yüzey Pürüzlülük Değerleri, (R_a)

Malzeme Durumu	Yüzey Pürüzlülük değeri (R_a) μm
T6 Isıl işlemi uygulanmış	0.42
T6 + Sert Eloksal Kaplama	1.80
T6 + Akımsız Nikel	0.80

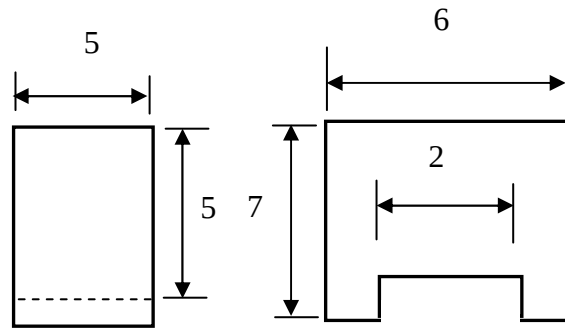
Çizelge değerleri incelendiğinde, referans durum olarak göz önüne alınan T6 ısıtıl işlemi görmüş (kaplama yapılmamış) malzeme durumu ile karşılaştırıldığında, sert eloksal

kaplama amorf poroz bir yapıya sahip olmasından dolayı yüzey pürüzlülüğünün arttığı, bunun aksine akımsız nikel kaplanmış numunelerde yüzey pürüzlülüğünün azaldığı gözükmetedir.

3.1.1.b. Döner eğilmeli test numune boyutları (silindirik numuneler)

Çalışmada kullanılan numunelerin şekil ve boyutları, öncelikle sürtünmeli temas türünün belirlenmesinden sonra tasarlanmıştır. Literatürde, çok yaygın olarak kullanılan temas türü, düz üzeri düz (flat-on-flat) şeklidir. Yani numuneler paralel düz ölçü yüzeylerine sahip olmak zorundadır. Başka bir deyişle, numunenin kendisi levhadan işlenmelidir veya numune dairesel kesite sahipse, düz paralel yüzeyler ölçü uzunluğu boyunca işlenmelidir. Diğer taraftan, temas basıncı, bir çift köprü tipi pabuçla (pad) sağlanmıştır.

Bu araştırmada, temas pabucu (pad) malzemesi olarak AISI 4140 çeliği seçilmiştir. Söz konusu malzemenin sertliği 339 HV olarak ölçülmüştür. Yorulma numunelerine benzer şekilde temas pabuçlarının ölçü uzunlukları da sırasıyla düzlemsel taşlama ve daha sonra polisaj işlemine tabi tutulmuş ve son olarak aseton ile temizlenmiştir.

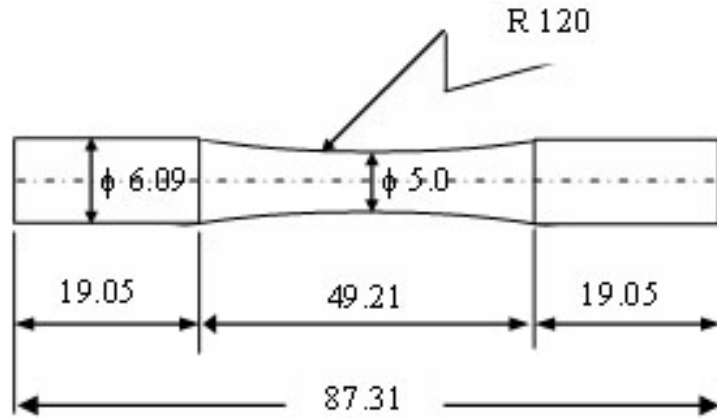


Şekil 3.2. Köprü tipi temas pabucu ölçü ve boyutları (ölçüler mm'dir).

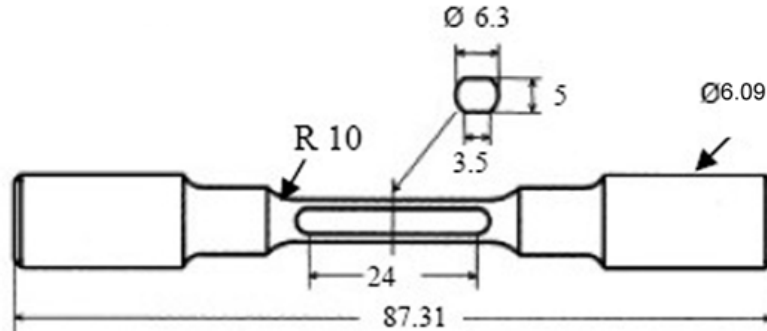
Pabuçların geometrik boyutları, kayma genliğindeki değişim aralığına ilaveten, yorulma cihazlarına yerleştirilecek olan sürtünmeli temas test düzeneğinin boyutları da göz önüne alınarak tasarlanıp imal ettirilmiştir.

Her bir temas pabucunun iki temas yüzeyi mevcut olup, bu yüzeyler yardımıyla yük büyük numune üzerine iletilir. Pabuç ayaklarının merkezleri arasındaki mesafe olarak tanımlanan pabuç mesafesi, 2 mm olarak seçilmiştir.

Kullanılan silindirik numunelerin boyutları Şekil 3.3. ve Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Döner eğilmeli Düz (sürtünmesiz temas) yorulma numunesi ölçü ve boyutları (ölçüler mm’dir).

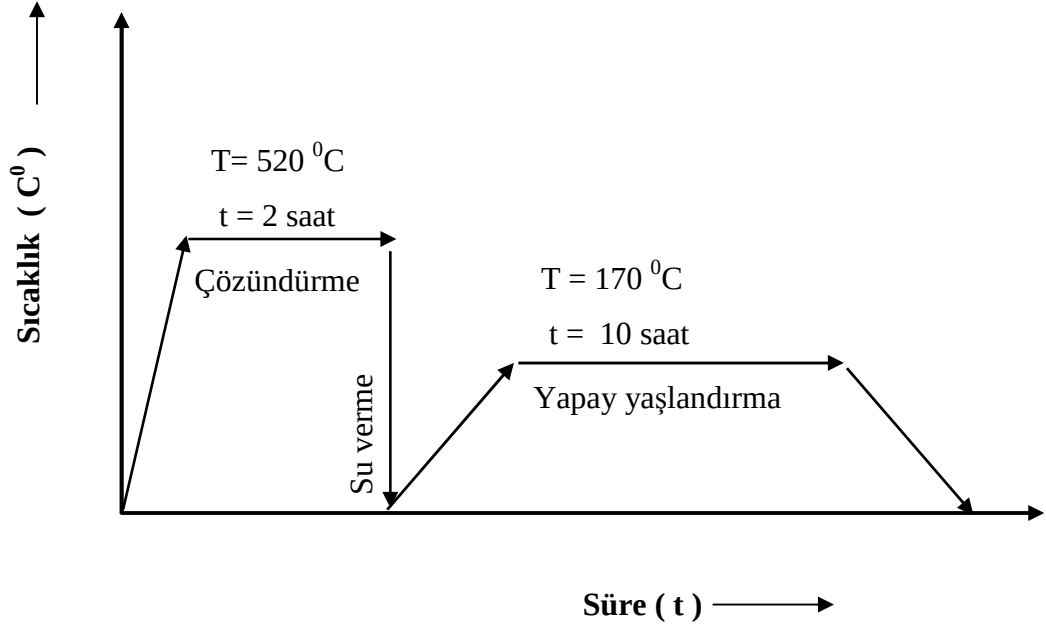


Şekil 3.4. Döner eğilmeli sürtünmeli temas yorulma numunesi ölçü ve boyutları (ölçüler mm’dir).

3.1.1.c. Döner eğilmeli test numunelerine uygulanan ısıtma işlemi (T6) şartları

Taban malzemelerine uygulanan T6 ısıtma işlemindeki, ısıtma işlem şartları Şekil 3.5’de şematik olarak gösterilmektedir.

T6 ısıt işlemi olarak adlandırılan bu işlemde, aşırı doymuş katı bir fazdan, zaman ve sıcaklığın etkisiyle ikinci bir katı fazın çökertilerek malzemenin sertliği ve mekanik özelliklerinin artırılması sağlanır.

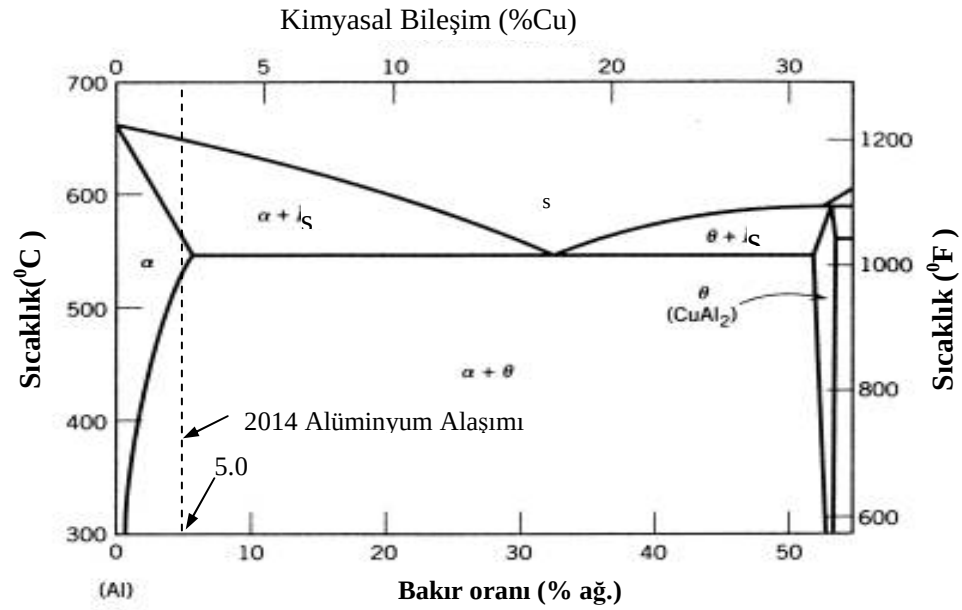


Şekil 3.5. T6 ısıt işlem koşulları

Üç kademede yapılan bu işlemde, ilk olarak malzeme, 520°C de 2 saat tutularak çözeltiye alınmış ve bu şekilde alüminyum içerisindeki bakır çözünürlüğü artırılmıştır. İkinci kademede malzeme hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Böylece oda sıcaklığında, aşırı doymuş bir katı eriyik içerisinde bakır ihtiva eden alüminyumca zengin bir faz elde edilmiştir. Son kademede ise, malzemeye 170°C de 10 saat süreyle doğal yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Böylece yapıda küçük partiküller halinde CuAl_2 çökelmiş ve bu çökelti taban malzemesinin sertliğinin artmasına neden olmuştur.

Sertlikteki bu artış klasik dislokasyon teorisinde yaygın kabul gören Orowan mekanizmasıyla açıklanmaktadır. Yani malzeme dayanımındaki bu artış, işlem sonucu

dislokasyon yoğunluğunun artışı ve birincil fazın (CuAl_2), mobil dislokasyonların hareketini engellemesi ile açıklanmaktadır.



Şekil 3.6. Al-Cu ikili faz diyagramı (Alüminyumca zengin)

Taban malzemesinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için uygulanan T6 ısıtılma işleminde, işlem parametrelerinin (sıcaklık ve süre) seçiminde Şekil 3.6.'da gösterilen alüminyumca zengin ikili Alüminyum-Bakır faz diyagramından faydalanılmıştır. Alüminyumda maksimum bakır çözünürlüğü ötektik sıcaklık olan 548°C 'de %5,65 olup, çözünürlük 300°C 'de azalarak %0,45 olur. Bu yüzden %2,5 ile %5 arasında bakır ihtiva eden alaşımlar yaşlandırma işlemine tabi tutulabilir. Oda sıcaklığındaki içyapı (α) katı çözeltisi ile birlikte bir miktar ötektikte içerir. Bu nedenle denge diyagramına göre, ötektik çizgisini kesmeyen alaşımlarında ısıtılma işlemleri, her zaman ötektik sıcaklığının altında yapılmalıdır. Aksi takdirde olası dengesiz yapıdaki ötektiğin erimesi giderilemeyerek malzeme ayrımına neden olabilir.

Bütün numuneler için sertlik ölçümleri bilgisayar kontrollü Buehler – Omnimet Vickers test cihazıyla yapılmıştır. Vickers sertlik ölçümleri, T6 ısıtılma işlemi uygulanmış

numunelere 200 gr, sert eloksal ve akımsız nikel kaplanmış numunelere de 2 kg yükler uygulanarak, ortalama sekiz ölçüm alınarak yapılmıştır. Elde edilen sertlik değerleri Çizelge 3.3' de verilmiştir.

Çizelge 3.3. 2014 Al alaşımının silindirik numunelerde farklı uygulama durumları için sertlik değerleri

Malzeme Durumu	İşlem aşamaları	Ortalama sertlik Değerleri (HV)
T6 Isıl işlemi	(çözeltiye alma, su verme, yaşlandırma)	170
Sert Eloksal kaplama	T6 ısıtıl işlemi+ Sert eloksal kaplama	380
Akımsız Nikel kaplama	T6 ısıtıl işlemi+ Akımsız nikel kaplama	220

3.1.1.d. Döner eğilmeli test numunelerine uygulanan kaplamalar

Sert eloksal kaplama

Sert eloksal, alüminyum için çok özel bir yüzey kaplamasıdır ve elektrokimyasal bir işlem ile yapılır. Kullanılan elektrolit, genelde asidik bir çözeltidir. Kaplanacak alüminyum elektroliz işleminin "anot"udur. Belirli ve kontrol edilen bir akım (genellikle doğru akım, DA) yoğunluğu, kaplanacak alüminyum (iş parçası) ile uygun bir katot arasında, yine belirli bir süre için geçirilir. Bu süre, oluşacak eloksal tabakasının özellik ve kalınlığına göre belirlenir. Eloksal tabakasının alüminyuma tutunması, alüminyum ile bütünleşerek oluşmasından dolayı mükemmel sonuç verir. Eloksal tabakası çok sert ve böylece aşınmaya karşı çok dayanıklı olduğundan, alüminyuma üstün özellikler kazandırır.

Bu çalışmada, dairesel kesitli silindirik yorulma ve sürtünmeli temas yorulma numunelerine uygulanan Sert Eloksal kaplama için, kaplama parametreleri Çizelge 3.4’de verilmektedir.

Çizelge 3.4. Sert eloksallı kaplama parametreleri

Banyo Bileşimi	: 200 ml / lt Sülfürik asit + 1 g / lt Oksalik asit
Banyo Sıcaklığı	: 0 – 5 °C
Akım Yoğunluğu	: 2 A / dm ²
Yaklaşık Kaplama Kalınlığı	: 30 µm
Kaplama Süresi	: 1 saat

Akımsız nikel kaplama

Katalitik metal ya da katalize edilmiş metal olmayan alt (baz) malzeme üzerine kimyasal reaksiyon yöntemi ile fosfor içeren nikel kaplamayı tanımlar. Akımlı nikelden farklı olarak elektrik akımı uygulanmaz. Bu nedenle kaplanacak alt malzemenin bütün yüzeylerinde düzenli, homojen aynı kalınlıkta, sert ve yağlanma özelliği daha yüksek nikel kaplanır. Aşınma, sürtünme ve korozyona karşı dirençli, sert, manyetik olmayan karakterde nikel tabakası elde edilir.

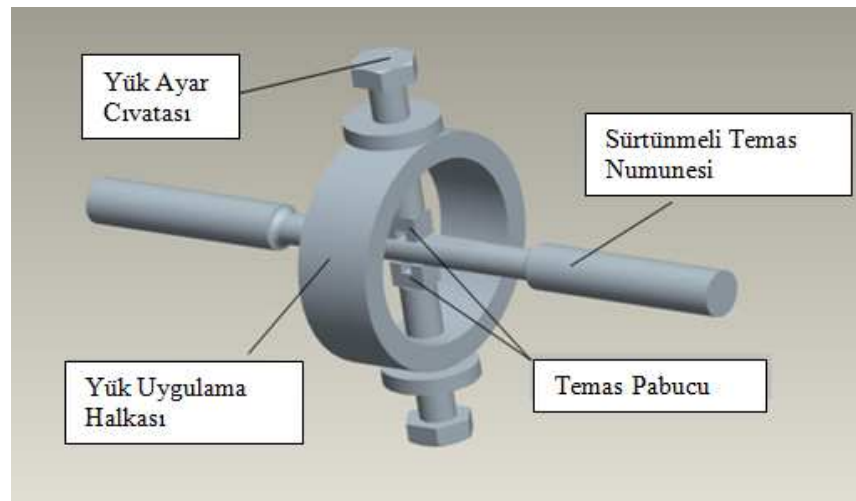
Elektrik akımı bütün metal yüzeylere eşit verilmeyeceğinden düzenli, homojen ve aynı kalınlıkta kaplama yapmak mümkün değildir. Akımsız nikel kaplama bu problemi ortadan kaldırır. Çok şekilli ve geometrisinde detaylar bulunan parçalarda ölçü toleranslarının korunması ve bütün yüzeylerde eşit kalınlıkta homojen kaplama kalınlığının istenmesi durumunda akımsız nikel kaplama tercih edilir. Bu projede, dairesel kesitli silindirik yorulma ve sürtünmeli temas yorulma numunelerine uygulanan Akımsız Nikel kaplama için, kaplama parametreleri Çizelge 3.5’de verilmektedir.

Çizelge 3.5. Akımsız nikel kaplama parametreleri

Banyo Bileşimi	: 7.5 lt Saf su + 6.5 lt 301-121, A + 15 lt 301 – 122, B eklenip karıştırıldıktan sonra, saf su ile banyo 100 lt'ye tamamlanıp, banyo süzüldü.
Banyo Sıcaklığı	: Banyo sıcaklığı 80 – 90 °C
P _H	: 5-6
Yaklaşık Kaplama Kalınlığı	: 6-8 µm
Kaplama Süresi	: 30 dakika

3.1.1.e. Döner eğilmeli sürtünmeli temas (fretting) yorulması deney düzeneği

Sürtünmeli temas, köprü tipi temas pabuçlarıyla sağlanmıştır. Temas pabuçları numune üzerine basıncın ayarlanmasına müsaade eden ve şekil değiştirme kabiliyetine sahip olan bir sürtünmeli temas düzeneğiyle sıkıştırılmıştır. Numune ve temas pabuçları arasındaki normal temas yükü, tork anahtarı kullanılarak yük uygulama halkası üzerindeki yük ayar cıvatası ile sağlanmıştır. Sürtünmeli temas yorulma testleri, literatürde genellikle 20–120 MPa arasındaki temas basınç değerleri için gerçekleştirilir.

**Şekil 3.7.** Döner eğilmeli yorulma test cihazı için sürtünmeli temas test düzeneği şematik gösterimi

Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 a.b. döner eğilmeli yorulma cihazında sürtünmeli temas yorulma deneylerinin yapıldığı sürtünmeli temas test düzeneği ve sürtünmeli temas test düzeneği üzerine temas pabuçlarını yerleştirmek için kullanılan yerleştirme aparatını göstermektedir.



Şekil 3.8.a.b. Döner eğilmeli test cihazı için, sürtünmeli temas test düzeneği üzerine temas pabuçlarını yerleştirme aparatı fotoğraf görüntüsü

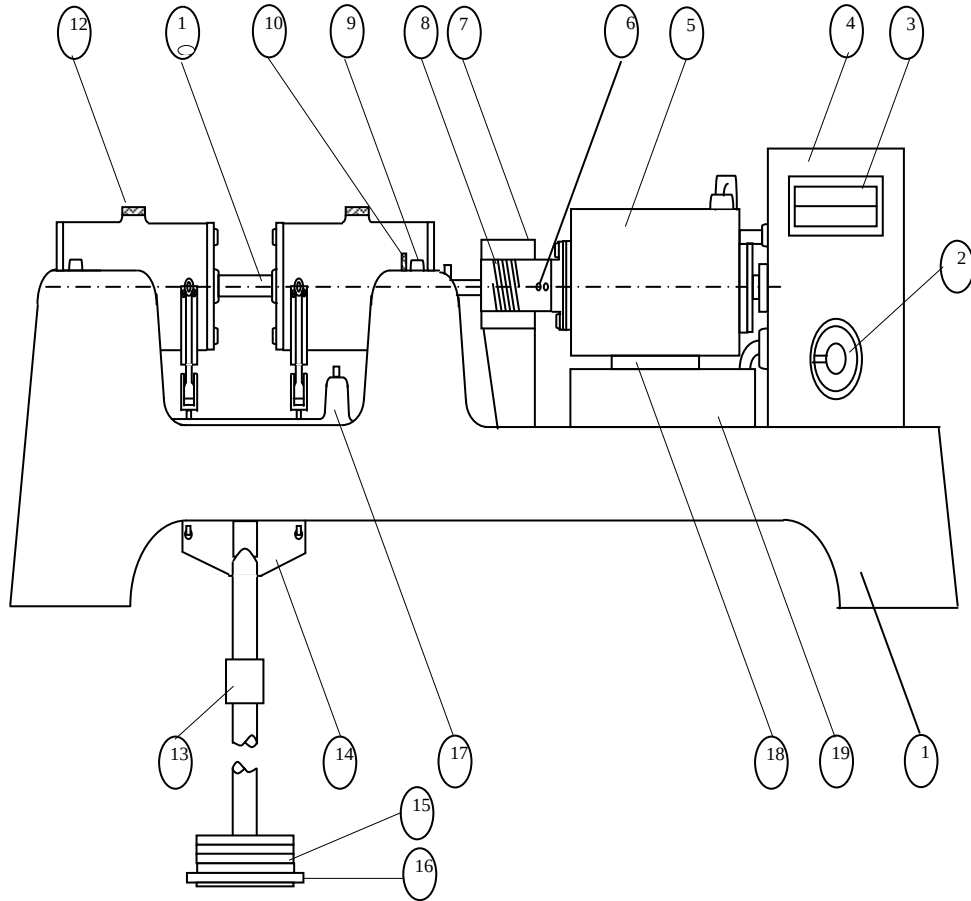
Bu araştırmada, dairesel kesitli silindirik numuneler için temas basıncı, 100 MPa alınarak sürtünmeli temas yorulma deneyleri yapılmıştır. Ortalama temas basıncı, temas pabucunun her bir ayağı için normal temas yükünün, temas alanına bölünmesiyle belirlenmiştir.

Yorulma numunesi tekrarlı yüklemeye maruz kaldığında temas pabucu ve numune arasında sürtünmeli temas yorulması meydana gelir. Düz ve sürtünmeli temas yorulma deneyleri oda sıcaklığında, 5000 dev/dak çevrimsel hızda ve $R=-1$ için dört noktadan yüklemeli döner eğilmeli (R.R.Moore) yorulma test makinesinde yapılmıştır.

3.1.1.f. Döner eğilmeli yorulma test cihazı

Bu çalışmada, silindirik numunelerde sürtünmesiz ve sürtünmeli temas döner eğilmeli yorulma deneyleri, Şekil 3.9'da şematik, Şekil 3.10'da fotoğraf görüntüleri verilen R.R.Moore yorulma test makinesinde ($R=-1$) gerçekleştirilmiştir.

Yataklar, yük uygulandığında düşey düzlemde çökmelerini sağlayacak muylular üzerinde tutulur. Her bir yatağın zıt kenarlarına bağlanmış olan bağlantı ayağına, yük ağırlıklarının konulduğu boyunduruk askısı asılır. Yük ağırlık askısı, üzerinde yığılmış halde bulunan ve tam olarak ayarlanabilen ağırlıklardan ibarettir.



Şekil 3.9. Döner eğilmeli yorulma test ünitesinin genel görünümünün şematik resmi

1.Taşıma gövdesi 2.Potansiyometre 3.Motor dönme hızı 4.Kumanda panosu 5.Motor 6.Sinyal Verme pimi 7.Kaplin koruyucu 8.Kaplin 9.Mesnet tekeri 10.Mesnet 11.Numune 12.Yağlama Civatası 13 Ağırlık kancası 14. Zincir-kanca bağlantısı 15.Ağırlıklar 16.Ağırlık taşıyıcı tablası 17.Durdurma tertibatı 18.Tespit civatası 19.Motor tespit plakası

Gerilme çevrim sayısı, motorun arka kısmına bağlanmış dijital bir sayaçta gösterilir. Bu sayaç, numunenin her bin devrinde bir kayıt yapar. Bu yüzden gerilmenin çevrim sayısını elde etmek için sayaçtan okunan değer bin ile çarpılır. Makineye, numune kırıldığı zaman motoru hemen durduracak anahtar monte edilmiştir.

Numune uzunluğu boyunca üniform bir eğilme momentine maruz kalır. Standart yorulma test makinelerinde bu eğilme momenti, en küçük 2,4525 N.m (25 kg.cm)'den en büyük 22.563 N.m (230 kg.cm)'ye 0,02492 N.m (0.254 kg.cm)'lik artışlar ile değiştirilebilir.

Standart makine 120 voltluk AA veya DA güç kaynağından beslenen üniversal bir motor tarafından çalıştırılır. Normal hız 10.000 dev/dak olmasına rağmen hız 1000 ile 12000 dev/dak arasında istenilen bir devire, bir kumanda düğmesi yardımıyla ayarlanabilir. Bu çalışmada, deneyler 4000- 5000 dev/dak'da yapılmıştır.



Şekil 3.10. Döner eğilmeli yorulma test ünitesinin fotoğraf görüntüsü

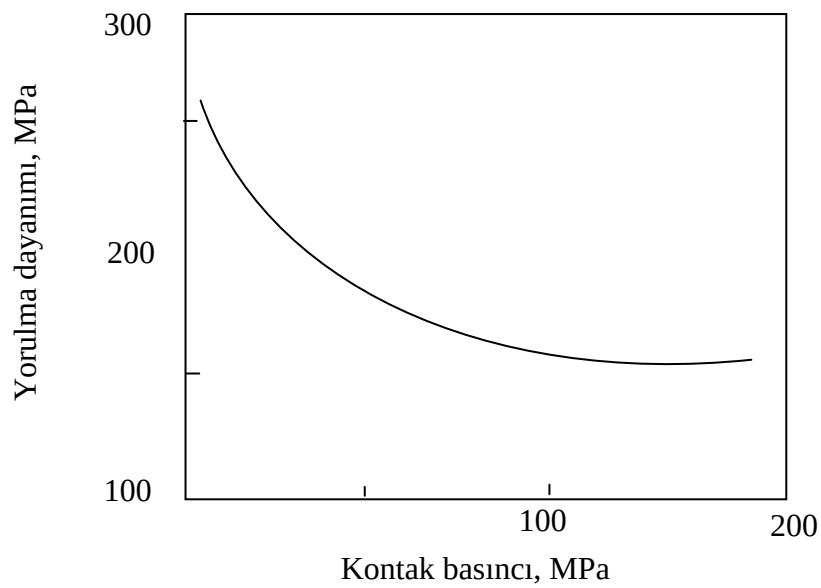
Bir testi yapmanın genel yolu, hesaplanmış bir yük uygulayarak, numuneyi önceden tespit edilmiş bir gerilmeye maruz bırakmaktır. Bu makinede, numunedeki gerilme aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilir.

$$S = \frac{16PL}{\pi d^3} \quad (1)$$

Bu denklemde, S gerilme genliğini, P numunedeki toplam yükü, L moment kolunu, d ise minimum numune çapını göstermektedir. Arzu edilen gerilme (σ_g) değerini elde etmek için gerekli olan P değeri, herhangi bir numune çapı için kolaylıkla tespit edilebilir.

3.1.1.g. Döner eğilmeli sürtünmeli temas yorulma deneyleri için temas basıncı

Sürtünmeli temas yorulma dayanımı üzerinde temas yükünün etkisi Şekil 3.11’de verilmektedir.



Şekil 3.11. Temas basıncına göre sürtünmeli temas yorulma dayanımındaki değişim

Yukarıdaki şekilde eğrinin yatay asimptot gösterdiği yük değeri, literatürde genellikle temas basıncı olarak seçildiği için, bu çalışmada da temas basıncı 100 MPa olarak alınmıştır. Debris etkisinden dolayı oluşan küçük sapmalar göz önüne alınmayıp, ihmal edilmiştir.

3.1.2. Düzlemsel eğilmeli sürtünmesiz ve sürtülmeli temas yorulma deneyi (düz numuneler)

3.1.2.a. Malzeme özellikleri (düz numuneler)

Taban malzemesi olarak kullanılan dikdörtgen kesitli AA 2014 Alüminyum alaşımı yassı numuneler 6 mm kalınlıkta levhadan işlenerek imal edildiler. Kullanılacak olan bütün numunelerin yüzeylerinde çevresel çentik ve çizikleri azaltmak için düzlemsel yüzey taşlama ve polisaj işlemi birlikte uygulandı. Polisaj işlemi uygulanan numuneler daha sonra aseton ile temizlendi. 2014 Alüminyum alaşımı taban malzemesinin kimyasal bileşimi, Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. 2014 Alüminyum alaşımının kimyasal bileşeni (% ağırlık)

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

Son durumda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 3.1’de gösterilen profilometre ile ölçülmüştür. Göz önüne alınan malzeme durumları için yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7’deki değerler incelendiğinde, referans durum olarak göz önüne alınan T6 ısıl işlemi görmüş (kaplama yapılmamış) malzeme durumu ile karşılaştırıldığında, sert

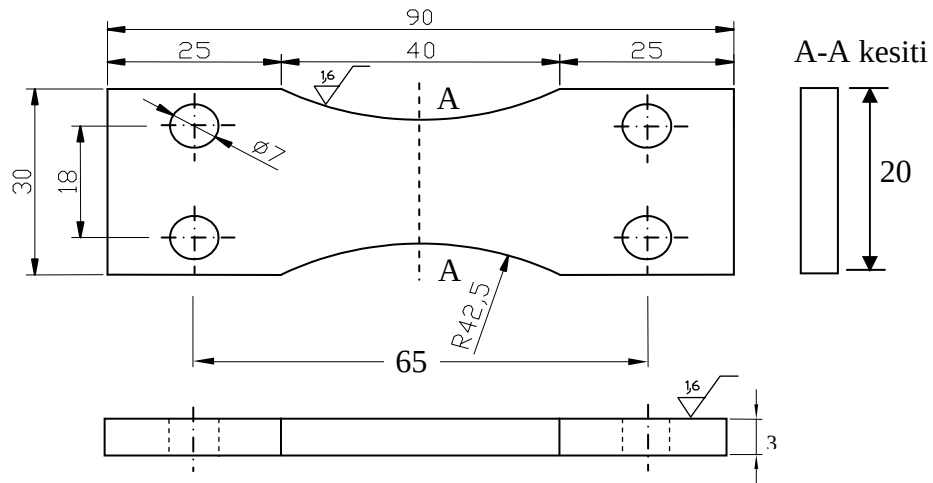
eloksall kaplama amorf poroz bir yapıya sahip olmasından dolayı yüzey pürüzlülüğünün arttığı, gözükmemektedir.

Çizelge 3.7. Dikdörtgen kesitli Levha Numunelerin Yüzey Pürüzlülük Değerleri, (R_a)

Malzeme Durumu	Yüzey Pürüzlülük değeri (R_a) μm
T6 Isıl işlemleri uygulanmış	0.30
T6 + Sert Eloksal Kaplama (Hard anodizing coating)	1.20
T6+Akımsız Nikel Kaplama(Electroless Nickel coating)	0.50

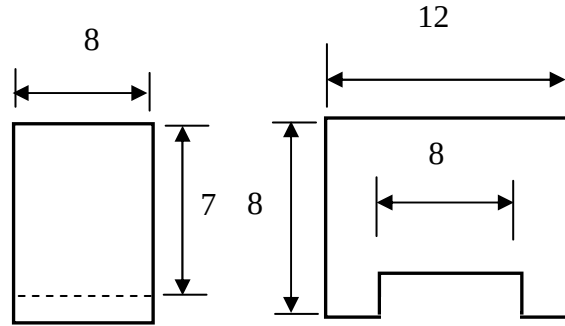
3.1.2.b. Düzlemsel eğilmeli test numune boyutları (düz numuneler)

Sürtünmesiz ve sürtünmeli temas yorulma deneylerinde kullanılan yorulma numuneleri ile temas pabuçlarının şekil ve boyutları sırasıyla, Şekil 3.12’de şematik olarak gösterilmiştir. Literatürde çok yaygın uygulandığı için bu araştırmada da temas türü olarak, düz üzeri düz (flat-on-flat) temas şekli seçilmiştir. Farklı tür malzemeler arasındaki temas basıncı, bir çift köprü tipi pabucun, numunelerin düz paralel yüzeylerine temas ettirilmesi ile sağlanmıştır.



Şekil 3.12. Düzlemsel eğilmeli sürtünmeli ve sürtünmesiz temas yorulma numunesi şekil ve boyutları

Bu araştırmada, temas pabuçları AISI 4140 çeliğinden imal edilmiştir. Köprü tipi temas pabuçlarının her iki ayağındaki temas bölgeleri ve yanal kuvvetin (sürtünme kuvvetinin) belirlenmesinde kullanılan uzama ölçerlerin (strain gage) yapıştırılacağı ayaklar arasındaki bölge düzlemsel taşlama sonrası polisaj işlemine tabi tutulmuş ve son olarak aseton ile temizlenmiştir.



Şekil 3.13. Köprü tipi temas pabucu ölçü ve boyutları

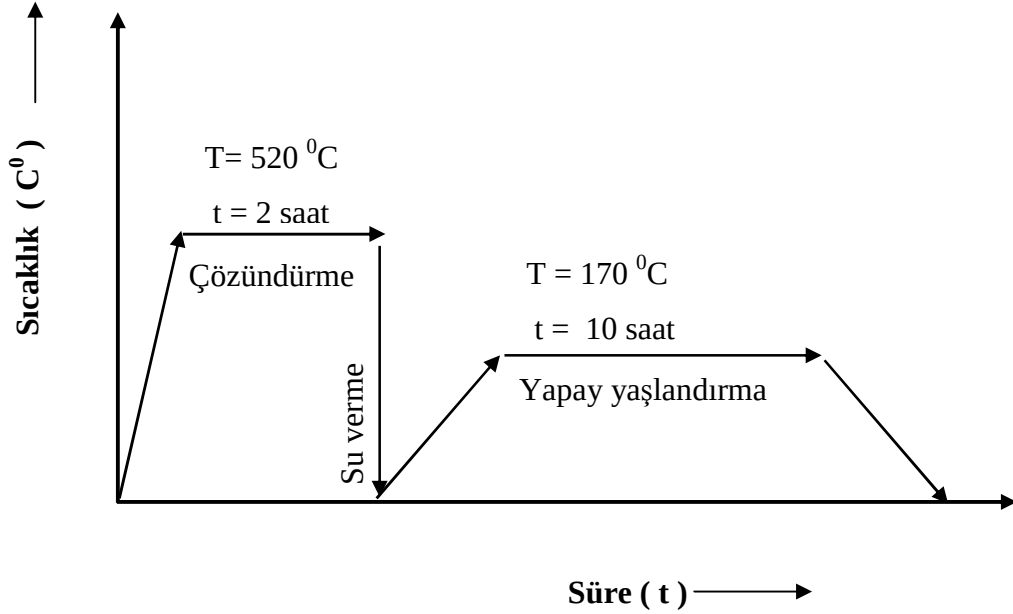
Pabuçların geometrik boyutları, kayma genliğindeki değişim aralığına ilaveten yorulma cihazlarına yerleştirilecek olan sürtünmeli temas (fretting) test düzeneğinin boyutları da göz önüne alınarak tasarlanıp imal ettirilmiştir.

3.1.2.c. Düzlemsel eğilmeli test numunelerine uygulanan ısıt işlem (T6) şartları

Taban malzemelerine uygulanan T6 ısıt işlemindeki, ısıt işlem şartları Şekil 3.14’de gösterilmektedir. T6 ısıt işlemi olarak adlandırılan bu işlemde, aşırı doymuş katı bir fazdan, zaman ve sıcaklığın etkisiyle ikinci bir katı fazın çökertilerek malzemenin sertliği ve mekanik özelliklerinin artırılması sağlanır.

Üç kademedeki yapılan bu işlemde, AA 2014 alüminyum malzeme 520⁰C sıcaklıkta 2 saat tutularak çözeltiye alındı. Yani, alüminyum içerisindeki bakır çözünürlüğü artırıldı. İkinci kademedeki malzeme 520⁰C sıcaklıktan hızlı bir şekilde soğutuldu. Böylece oda sıcaklığında, aşırı doymuş bir katı çözelti içerisinde bakır ihtiva eden alüminyumca

zengin bir faz elde edildi. Son kademedeki malzemeye 170°C sıcaklıkta 10 saat süreyle yapay yaşlandırma işlemi uygulandı.



Şekil 3.14. T6 ısıtım işlem koşulları

Yaşlandırma işlemi sırasında sertlik ve mukavemette meydana gelen artışın ana nedeni, bağdaşık (koherent) CuAl_2 çökeltilerinin oluşmasıdır. Çökelen CuAl_2 çökeltilerinin kafes parametresi, matrisin kafes parametresinden daha farklıdır. Bu fazın kafes yapısının matrisin kafes yapısı ile bağdaşık ve uyumlu olması nedeniyle matrisin kafes yapısında çarpılma meydana gelir. Matrisin kafes yapısında meydana gelen çarpılmanın dislokasyon hareketini zorlaştırması veya engellemesi nedeniyle alaşımın sertlik ve mukavemeti artar. T6 ısıtım işleminden sonra dikdörtgen kesitli (yassı) yorulma numunelerine, yüzeylerindeki çevresel çentik ve çizikleri azaltmak için kumlama işlemi uygulandı. Daha sonrada numune yüzeyleri aseton ile temizlendi.

Bütün numuneler için sertlik ölçümleri, PC kontrollü Buehler–Omnimet Vickers test cihazı ile yapılmıştır. Vickers sertlik ölçümleri, daha net iz görüntüleri sağladığı için

200 gr yük uygulanarak ortalama sekiz ölçüm alınarak yapılmıştır. Elde edilen sertlik değerleri Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. 2014 Al alaşımının farklı işlem şartları için elde edilen sertlik değerleri

Malzeme Durumu	İşlem aşamaları	Ortalama sertlik Değerleri (HV)
T6 Isıl İşlemi	(çözeltiye alma, su verme, yaşlandırma)	158
Sert Eloksal Kaplama Tabakası	T6 ısıt işlemleri+ Sert eloksall kaplama	430
Akımsız Nikel Kaplama Tabakası	T6 ısıt işlemleri+ Akımsız nikel kaplama	360
Temas Pabucu (AISI 4140)	İşlemsiz	250

3.1.2.d. Düzlemsel eğilmeli test numunelerine uygulanan kaplamalar

Sert eloksall kaplama

Sert eloksall, alüminyum için çok özel bir yüzey kaplamasıdır; elektrokimyasal bir işlem ile yapılır. Kullanılan elektrolit, genelde asidik bir çözeltidir. Kaplanacak alüminyum elektroliz işleminin "anot"udur. Belirli ve kontrol edilen bir akım (genellikle doğru akım DA) yoğunluğu, kaplanacak alüminyum (iş parçası) ile uygun bir katot arasında, yine belirli bir süre için geçirilir. Bu süre, oluşacak eloksall tabakasının özellik ve kalınlığına göre belirlenir. Sert eloksall tabakanın alüminyuma tutunması, alüminyum ile bütünleşerek oluşmasından dolayı mükemmel sonuç verir. Eloksall tabakası çok sert ve böylece aşınmaya karşı çok dayanıklı olduğundan, alüminyuma üstün özellikler kazandırır. Bu projede kullanılan Sert Eloksall kaplama için, kaplama parametreleri Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Sert Eloksal Kaplama Parametreleri

Banyo Bileşimi	: 250 ml / lt Sülfürik asit + 1 g / lt Oksalik asit
Banyo Sıcaklığı	: 0 – 5 °C
Akım Yoğunluğu	: 2 -2.5 A / dm ²
Yaklaşık Kaplama Kalınlığı	: 50-60 µm
Kaplama Süresi	: 75 dakika

Akımsız nikel kaplama

Katalitik metal ya da katalize edilmiş metal olmayan alt (baz) malzeme üzerine kimyasal reaksiyon yöntemi ile fosfor içeren nikel kaplamayı tanımlar. Akımlı nikelden farklı olarak elektrik akımı uygulanmaz. Bu nedenle kaplanacak alt malzemenin bütün yüzeylerinde düzenli, homojen aynı kalınlıkta, sert ve yağlanma özelliği daha yüksek nikel kaplanır. Aşınma, sürtünme ve korozyona karşı dirençli sert, manyetik olmayan karakterde nikel tabakası elde edilir. Akımsız nikel kaplama işlemi, nikel ve alaşımlarının daldırma yöntemi ile elektrik akımı kullanmadan metal yüzeylere kimyasal kaplanmasıdır. Akımlı kaplamalarda ise metal yüzeylere dışarıdan (Redresörden) elektrik akımı verilir.

Elektirik akımı bütün metal yüzeylere eşit verilmeyeceğinden düzenli, homojen ve aynı kalınlıkta kaplama yapmak mümkün değildir. Akımsız nikel kaplama bu problemi ortadan kaldırır.

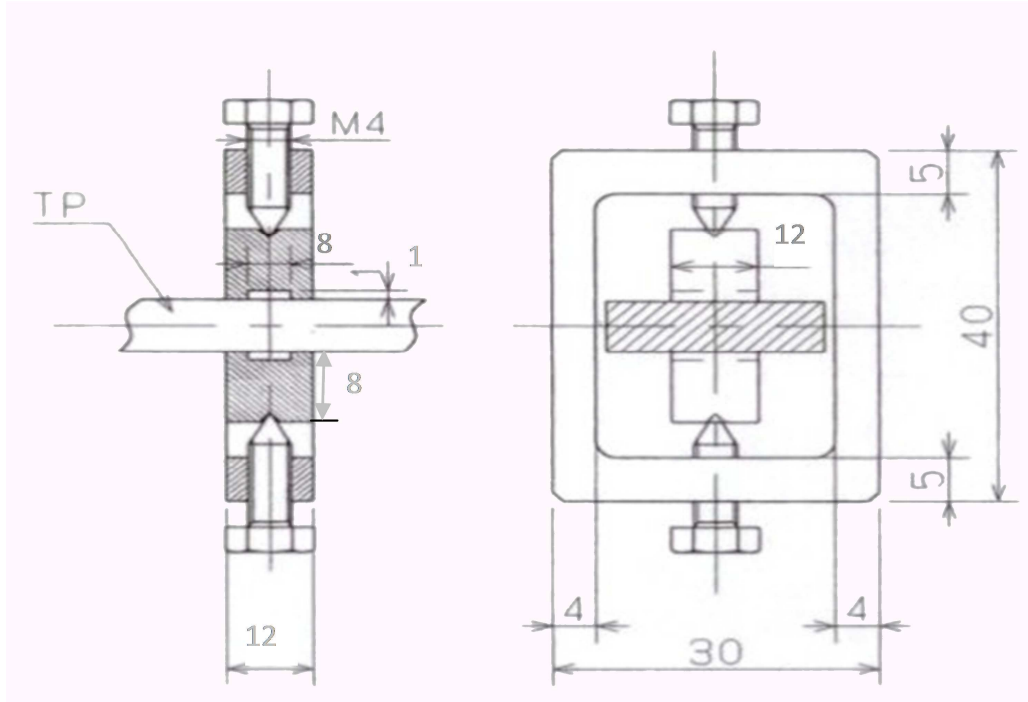
Çizelge 3.10. Akımsız Nikel Kaplama Parametreleri

Banyo Bileşimi	: 7.5 lt Saf su + 6.5 lt 301-121, A + 15 lt 301 – 122, B eklenip karıştırıldıktan sonra, saf su ile banyo 100 lt’ye tamamlanıp, banyo süzüldü.
Banyo Sıcaklığı	: Banyo sıcaklığı 80 – 90 °C
P _H	: 5-6
Yaklaşık Kaplama Kalınlığı	: 12-15 µm
Kaplama Süresi	: 45 dakika

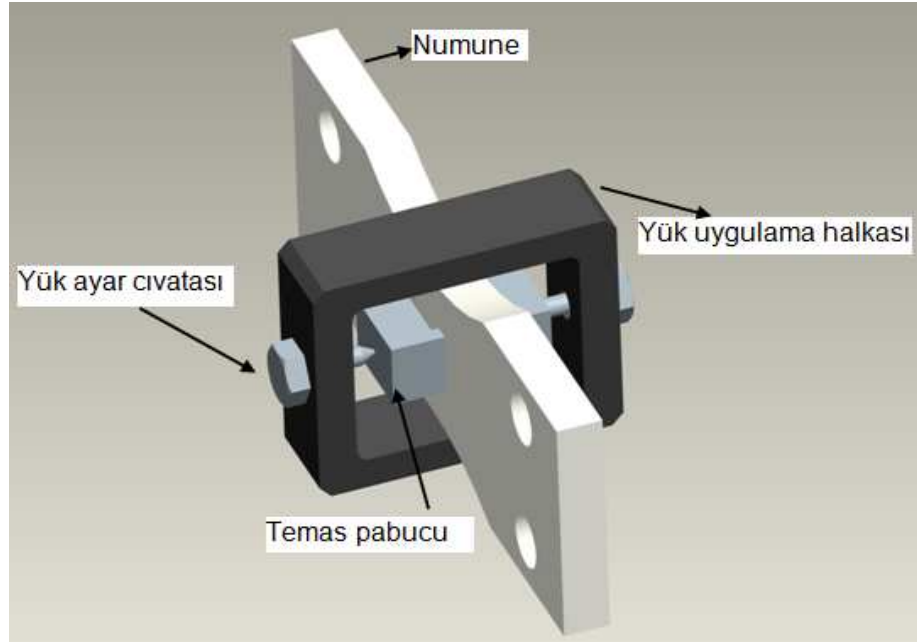
Çok şekilli ve geometrisinde detaylar bulunan parçalarda ölçü toleranslarının korunması ve bütün yüzeylerde eşit kalınlıkta homojen kaplama kalınlığının istenmesi durumunda akımsız nikel kaplama tercih edilir. Bu projede kullanılan Akımsız Nikel kaplama için, kaplama parametreleri ve uygulama şartları Çizelge 3.10’da verilmiştir.

3.1.2.e. Düzlemsel eğilmeli sürtünmeli temas yorulma deney düzeneği

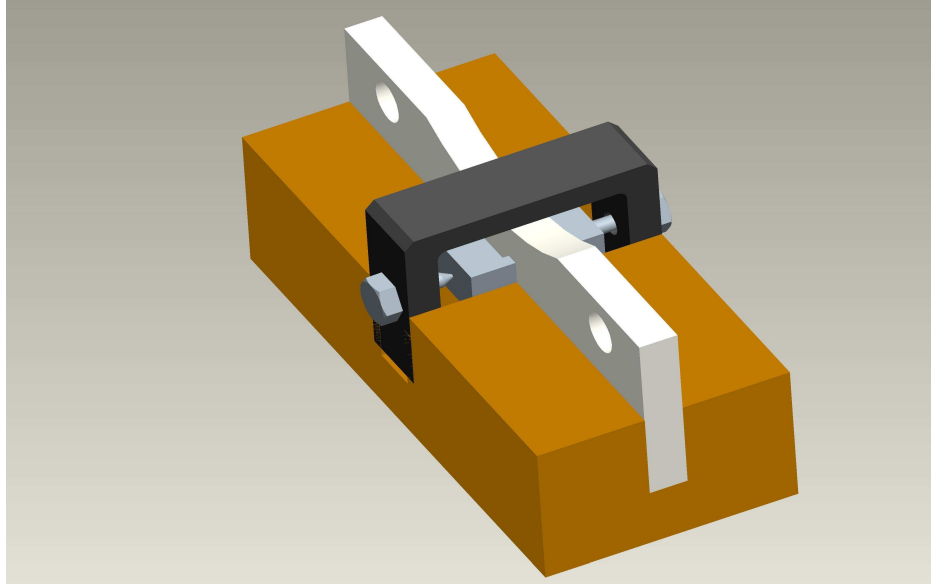
Temas sürtünmesi (Fretting), köprü tipi temas pabuçları ile sağlanmaktadır. Temas pabuçları, numune üzerine basıncın ayarlanmasına müsaade eden ve şekil değiştirme kabiliyetine sahip olan bir “sürtünmeli temas yük halkası” ile sıkıştırılmaktadır. Sürtünmeli teması (Fretting) oluşturmak için gerekli olan basınç, temas alanına “yük uygulama halkası” üzerinden yükleme pabuçları yardımıyla iletilir (Şekil 3.13). Temas pabuçlarının kullanılan bütün numunelerde aynı temas bölgesine gelecek şekilde yerleştirilmesi oldukça önemlidir. Bunu sağlamak için, bu çalışma kapsamında imal edilen bir “yerleştirme aparatı” kullanılmaktadır. Bu yerleştirme aparatının üç boyutlu gösterimi Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.15. Düzlemsel Eğilmeli yorulma test cihazı için sürtünmeli temas test düzeneği şematik gösterimi



Şekil 3.16. Düzlemsel Eğilmeli yorulma test cihazı için sürtünmeli temas test düzeneği üç boyutlu gösterimi



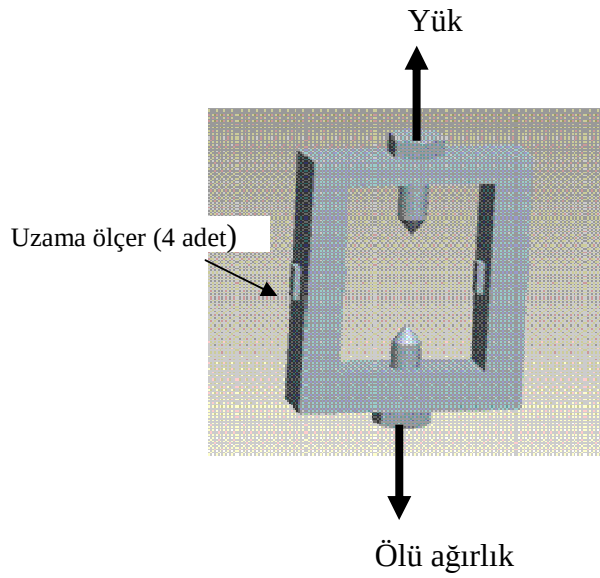
Şekil 3.17. Yerleştirme aparatının üç boyutlu gösterimi

Numune ve temas pabuçları arasındaki normal temas yükü, “sürtünmeli temas yük halkası” üzerindeki yük ayar cıvatası ile sağlanmaktadır. Fretting yorulma testleri, literatürde genellikle 20–120 MPa arasındaki kontak basınç değerleri için gerçekleştirilmektedir. Bu araştırmada temas basıncı 50 MPa olarak seçilmiştir. Ortalama temas basıncı, temas pabucunun her bir ayağı için normal temas yükünün, temas alanına bölünmesi ile belirlenmiştir.

Normal temas yükü, yük ayar cıvataları ile sağlanır ve bir Wheatstone devresi kullanılarak ölçülür. Dört adet uzama ölçer (strain gauge) yük uygulama halkasına yapıştırılır ve yük ayar vidası ile yük uygulama halkası üzerinde oluşturulan elastik şekil değiştirmeleri ölçmek için Wheatstone devresi meydana getirecek bağlantılar oluşturulur. Şekil değiştirmeye göre yük kalibrasyon eğrisi, yük halkasına standart ağırlıklar uygulanarak elde edilir. Şekil 3.18 ve 3.19 yük uygulama halkası için kalibrasyon eğrisinin elde edilmesini veren fotoğraf ve şematik görüntüleri içermektedir.

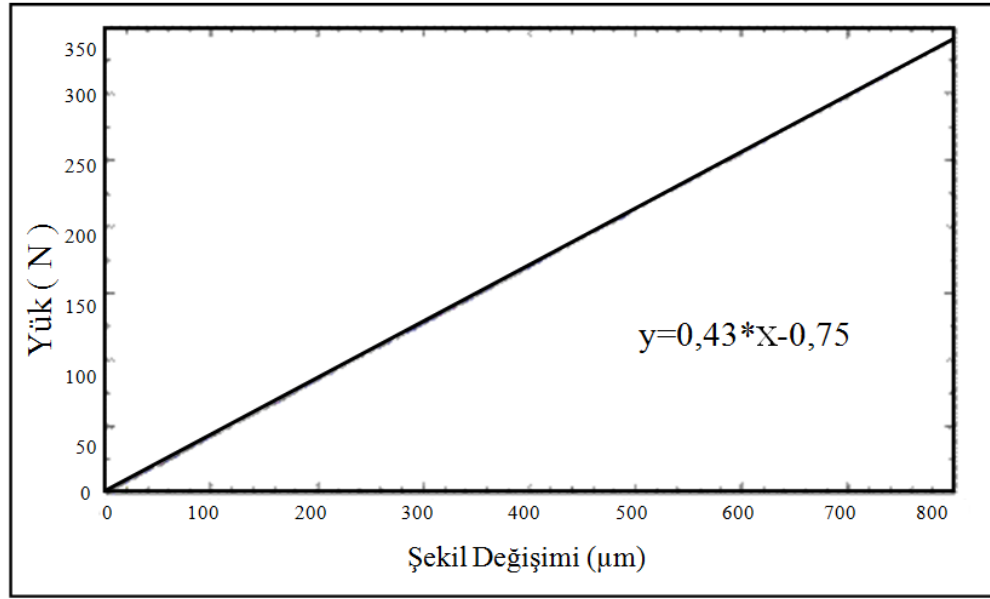


Şekil 3.18. Yük uygulama halkası için kalibrasyon eğrisinin elde edilmesini gösteren fotoğraf görüntüsü



Şekil 3.19. Yük uygulama halkası için kalibrasyon eğrisinin elde edilmesini gösteren şematik görüntüsü

Yük uygulama halkası imal edilip, 4 adet uzama ölçer (strain gauge) özel bir teknikle, yük uygulama halkasının her bir yüzeyine yapıştırılmıştır. Wheatstone köprüsü için kablo bağlantıları oluşturulduktan sonra yük uygulama halkasının kalibrasyonu için, yük uygulama halkası bir askıya asıldıktan sonra halkanın diğer ucuna farklı ölü ağırlıklar asılmıştır. Şekil değiştirmeler PC uyumlu, PCD-300 Model dinamik bir veri okuyucu kullanılarak okunmuş, daha sonra, yük ve şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi veren kalibrasyon eğrisi (Şekil 3.20) elde edilmiştir.



Şekil
kil
3.2
0.
Yük
k
uyg
ula
ma
hal
kas

1 için kalibrasyon eğrisi

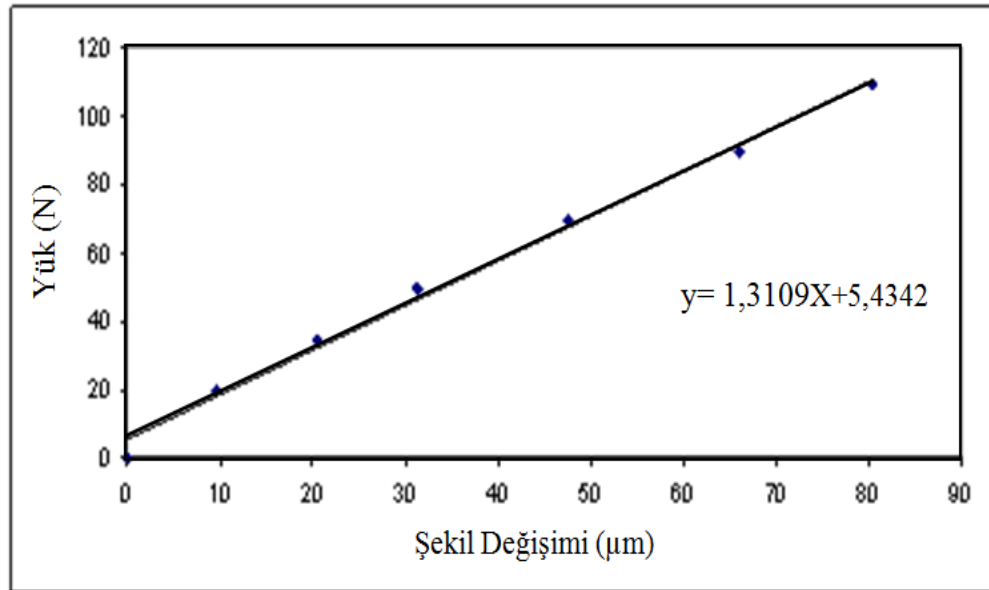
Diğer taraftan numune ve köprü tipi temas pabuçları arasında normal yük ve kayma hareketinin oluşturduğu sürtünme kuvveti (yanal kuvvet) testten önce kalibre edilmiştir. Sürtünme kuvvetinin oluşturduğu elastik şekil değiştirmeleri ölçmek için, her bir temas pabucunun daha önceden parlatma (polisaj) işlemine tabii tutulmuş olan kısımlarına birer tane uzama ölçer (strain gauge) yapıştırılmıştır.

Sürtünmeli temas pabuçlarının kalibrasyonu işlemi için, yorulma numunesi orta noktası belirlenerek iki parçaya ayrılmıştır. Öncelikli olarak 50 MPa'lık temas basıncı için gerekli olan yük hesaplanmış ve kalibrasyon eğrisi kullanılarak bu yüke karşılık gelen şekil değiştirme değeri belirlenmiştir.



Şekil 3.21. Temas Pabuçları için kalibrasyon eğrisinin elde edilmesini gösteren fotoğraf görüntüleri

Daha sonra, PCD-30 model dinamik veri okuyucu yardımıyla istenilen yükü verecek şekil değiştirme takip edilerek, yük ayar cıvatalarıyla temas pabuçları iki parçalı numune üzerine sıkıştırılmıştır. Son olarak, numunenin diğer ucuna farklı ölü ağırlıklar asılmış ve şekil değiştirmeler PC uyumlu, PCD-300 Model dinamik bir veri okuyucu kullanılarak okunmuştur. Yük-şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi veren kalibrasyon eğrisi Şekil 3.22’de verilmiştir.



Şekil 3.22. Temas pabucu için kalibrasyon eğrisi

Belirlenen kalibrasyon eğrileri sürtünmeli temas yorulma deneylerinde, sürtünmeli temas yorulma hasarını etkileyen en önemli parametrelerden olan sürtünme kuvveti ve temas basınçlarının belirlenmesinde kullanılmıştır.

3.1.2.f. Düzlemsel eğilmeli yorulma test cihazı

Bu çalışmada düz (sürtünmesiz temas) ve sürtünmeli temas yorulma deneyleri, PBF-30C model düzlemsel eğilmeli yorulma test makinesinde (plane bending fatigue machine), $R=-1$ yükleme durumu için gerçekleştirilmiştir.

R değeri gerilme oranı olup, $R=\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$ formülü ile hesaplanır. Yorulma yüklemesinde gerilmenin iki bileşenden oluştuğu göz önüne alınır. Bunlar ortalama gerilme ve değişken gerilme bileşenleridir. R 'nin -1 değerini alması, ortalama gerilmenin sıfır olduğu ve malzemede yorulma hasarına sadece değişken gerilmenin sebep olduğunu gösterir.

Ortalama gerilmenin sıfır olduğu değişken gerilme zorlaması için, yani $R=-1$ için yükleme durumu Şekil 3.23'de gösterilmiştir.

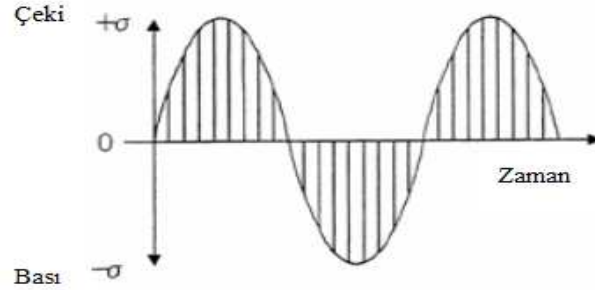
$$|\sigma_{\max}| = |\sigma_{\min}|, \quad \sigma_m = 0$$

Ortalama gerilme sıfır olduğu zaman, tam değişken gerilmeli yorulma deneyi yapılabilir.

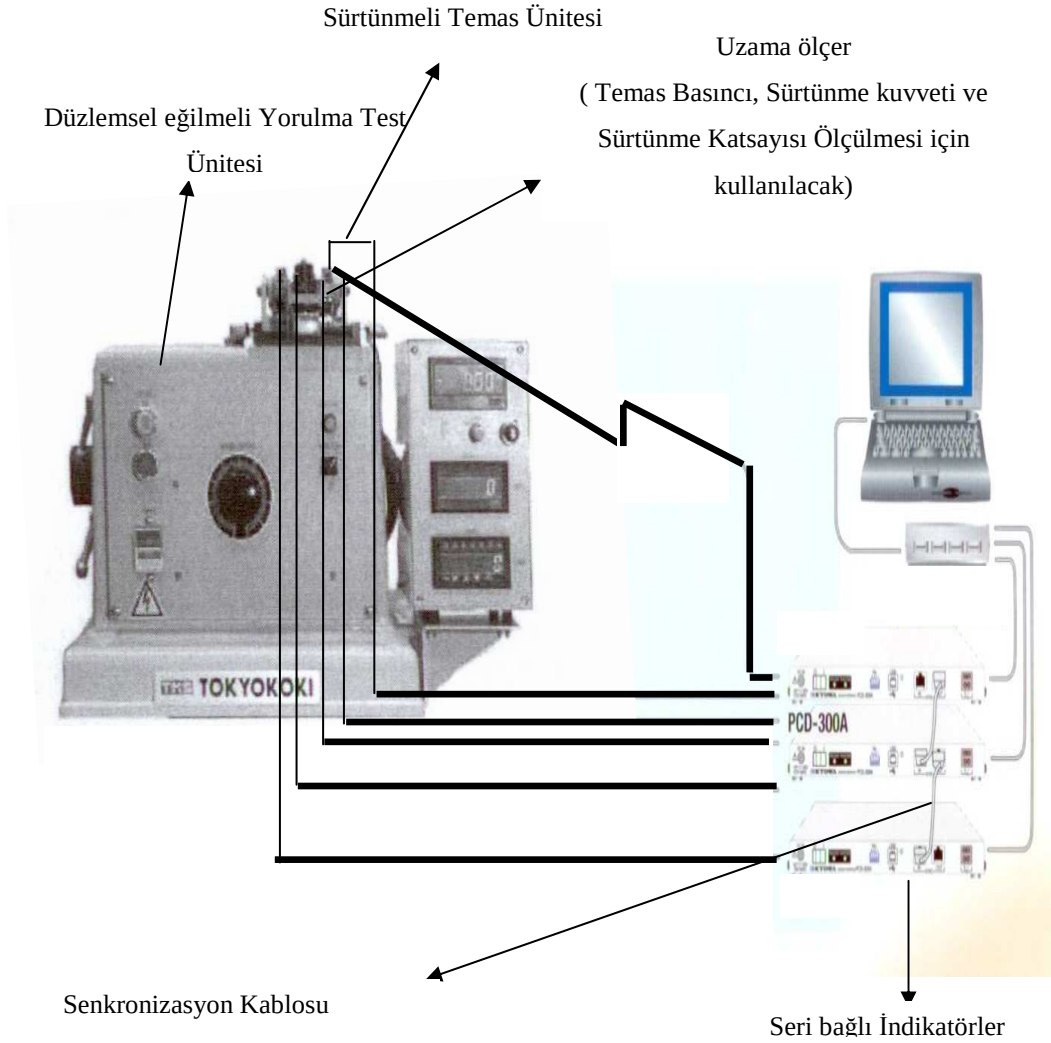
PBF-30C model için, bu yükleme tipindeki maksimum eğilme momenti ± 15 Nm dir.

Şekil 3.25 ve 3.26 PBF-30C model düzlemsel eğilmeli yorulma test makinesinin sırasıyla, fotoğraf ve şematik görüntüsünü vermektedir. Özellikle Şekil 3.25 sürtünmeli

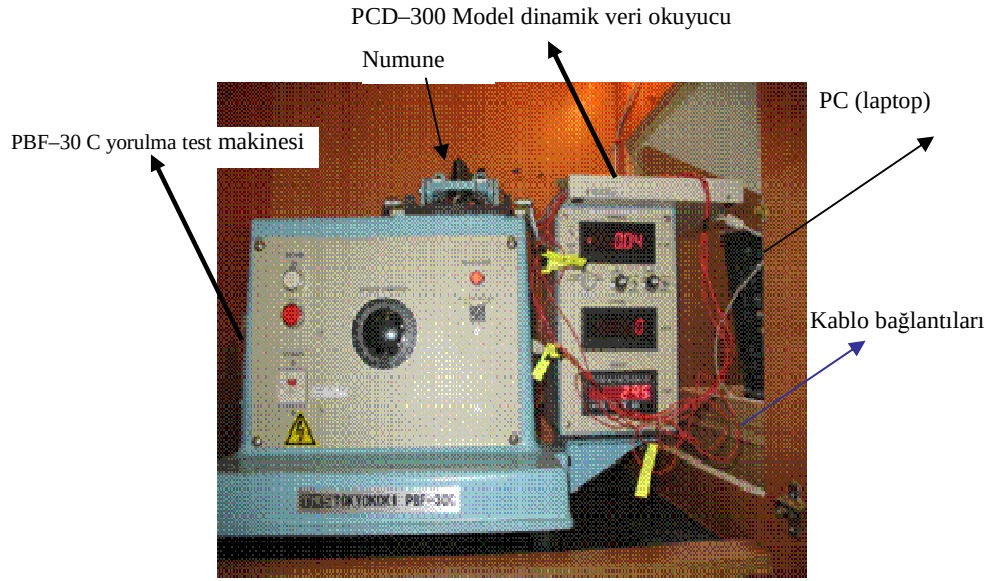
temas (fretting) yorulma deneylerinde kullanılacak dinamik veri okuyucu, PC ve dinamik veri okuyucunun PC bağlantı kablolarını göstermektedir.



Şekil 3.23. R-1 için sinüzoidal eğri grafiği

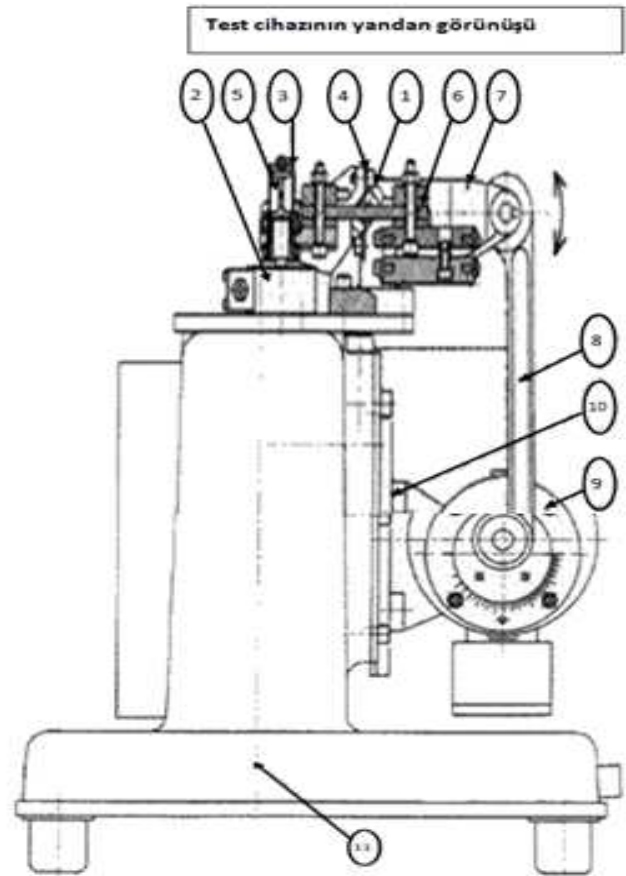


Şekil 3.24. Sürtünmeli temas test düzeneğine sahip düzlemsel eğilmeli yorulma deney düzeneği



Şekil 3.25. Düzlemsel eğilmeli yorulma test cihazının fotoğraf görüntüsü

- 1: Burulma
- 2: Yük hücresi
- 3: Ölçme salıncak kolu
- 4: Destek yaprak yayı
- 5: Döndürme eksen
- 6: Test numunesi
- 7: Salıncak manivela kolu
- 8: Bağlantı kolu
- 9: İkili eksantrik aleti
- 10: Ortalama gerilme ayar aleti
- 11: Şasi



Şekil 3.26. Düzlemsel eğilmeli yorulma test cihazının şematik görüntüsü

Yorulma cihazı için, eğilme momentinin hesaplanması, aşağıda bir örnek ile gösterilmektedir:

4 mm kalınlığı 20 mm genişliği olan dikdörtgen kesitli bir test numunesi, $\sigma=250 \text{ N/mm}^2$ tekrarlı eğilme gerilmesi altında test edilmek istendiğinde, gerekli olan eğilme momenti aşağıdaki formülle hesaplanır.

(σ) istenilen eğilme gerilmesi, (Z) test edilen parçanın kesit modülünü, eğilme momenti Mb, genişlik b, yükseklik h olmak üzere, gerekli eğilme momenti,

$$Z = bh^2 / 6 = 20 \times 4^2 / 6 = 53,3 \text{ mm}^3$$

Gerekli eğilme momenti Mb aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$Mb = Z \times \sigma = 53,3 \times 250 = 13325 \text{ Nmm} \quad (13.33 \text{ Nm}) \quad (4)$$

Hesaplanan eğilme momentinin alt ve üst limit değerleri ($R=-1$ için aynı) ve ilk eğilme momenti değeri bir buton yardımıyla cihazda ayarlanır. Ayrıca, alt ve üst moment değerleri için kırılma limit değerleri ayrı bir buton kullanılarak ayarlandıktan sonra, cihaz çalıştırılarak deney başlatılmış olur.

Çizelge 3.11. PBF-30C düzlemsel eğilmeli yorulma test makinesinin teknik özellikleri

Özellikler	
Model	PBF-300
Maksimum Eğilme Momenti Nm	-15 ~ +30
Maks. Değişken Eğilme Momenti Nm	0 ~ ±15
Maksimum Ortalama Eğilme Momenti Nm	0 ~ +15
Maksimum Eğilme Açısı	-12° ~ +24°
Maksimum Değişken Yükleme Hızı devir/dak	300 ~ 1500
Maksimum çevrim sayısı	999999x100 çevrim
Ağırlık	71 kg
Ortalama Miktar	6
Dışsal Çıkış Gücü(Anlık)	DC10V
Güç Kaynağı 220/200V 50/60Hz	Single-phase 0.2KVA

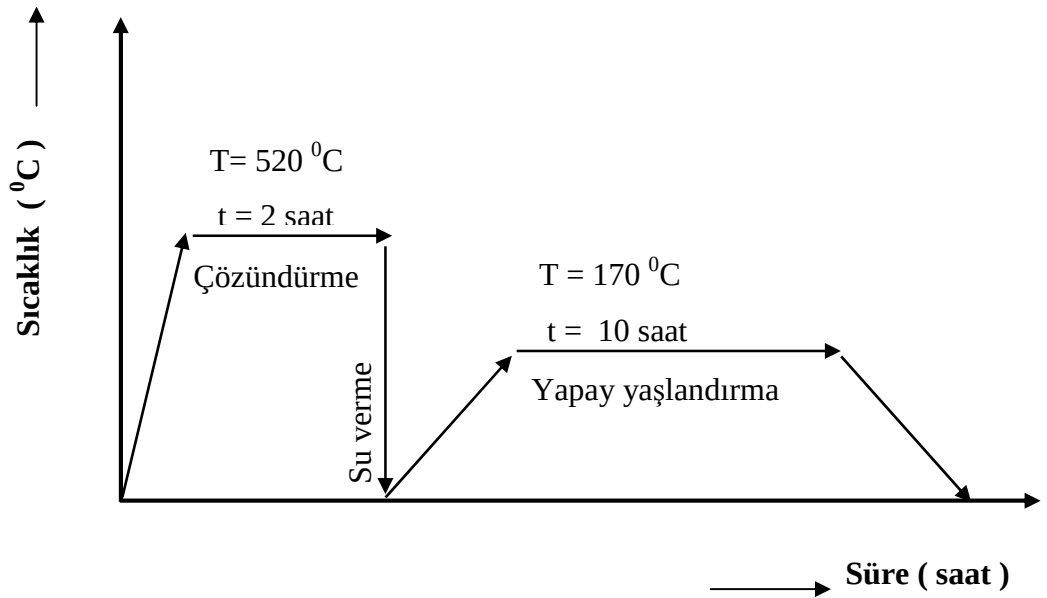
3.2. Aşınma Deneyi

3.2.1. Malzeme özellikleri

Blok-on-disk aşınma deney düzeneğinde deney numunesi olarak Dikdörtgen kesitli T6–2014 Alüminyum malzeme kullanılmıştır. Kullanılan AA 2014 Alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi, Çizelge 3.12’de verilmiştir. Taban malzemelerine uygulanan T6 ısıl işleminin şartları Şekil 3.27’de şematik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3.12. Aşınma deney numuneleri kimyasal bileşimi

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



Şekil 3.27. T6 (Çözeltiye alma ve yapay yaşlandırma) ısıl işlem koşulları.

10x10x10 mm ölçülerinde hazırlanan döküm deney numunelerine T6 ısıl işlemi uygulamanın dışında akımsız nikel ve sert eloksal kaplama işlemleri uygulanmıştır.

3.2.2. Aşınma deneyi malzemelerine uygulanan kaplamalar

Sert eloksal kaplama

Sert eloksal, alüminyum için çok özel bir yüzey kaplamasıdır ve elektrokimyasal bir proses ile yapılır. Kullanılan elektrolit, genelde asidik bir çözeltidir. Belirli ve kontrol edilen bir akım (genellikle doğru akım, DA) yoğunluğu, kaplanacak alüminyum (iş parçası) ile uygun bir katot arasında, yine belirli bir süre için geçirilir. Bu süre, oluşacak eloksal tabakasının özellik ve kalınlığına göre belirlenir. Elokسال tabakası çok sert ve aşınmaya karşı çok dayanıklı olduğundan, alüminyuma üstün özellikler kazandırır. Aşınma deneylerinde kullanılan Sert Elokسال kaplama için, kaplama parametreleri Çizelge 3.13’de verilmektedir.

Çizelge 3.13. Aşınma testleri için, Sert Elokسال Kaplama Parametreleri

Banyo Bileşimi	: 200 ml / lt Sülfürik asit + 1 g / lt Oksalik asit
Banyo Sıcaklığı	: 0 – 5 °C
Akım Yoğunluğu	: 2 A / dm ²
Yaklaşık Kaplama Kalınlığı	: 30 µm
Kaplama Süresi	: 1 saat

Akımsız nikel kaplama

Katalitik metal ya da katalize edilmiş metal olmayan alt (baz) malzeme üzerine kimyasal reaksiyon yöntemi ile fosfor içeren nikel kaplamayı tanımlar. Akımlı nikelden farklı olarak elektrik akımı uygulanmaz. Bu nedenle kaplanacak alt malzemenin bütün yüzeylerinde düzenli, homojen aynı kalınlıkta, sert ve yağlanma özelliği daha yüksek nikel kaplanır.

Çizelge 3.14. Akımsız nikel kaplama parametreleri

Banyo Bileşimi	: 7.5 lt Saf su + 6.5 lt 301-121, A + 15 lt 301 – 122, B eklenip karıştırıldıktan sonra, saf su ile banyo 100 lt'ye tamamlanıp, banyo süzüldü.
Banyo Sıcaklığı	: Banyo sıcaklığı 80 – 90 °C
P _H	: 5-6
Yaklaşık Kaplama Kalınlığı	: 6-8 µm
Kaplama Süresi	: 30 dakika

Aşınma, sürtünme ve korozyona karşı dirençli, sert, manyetik olmayan karakterde nikel tabakası elde edilir. Aşınma deneylerinde kullanılan Akımsız Nikel kaplama için, kaplama parametreleri ve uygulaması Çizelge 3.14’de verilmektedir.

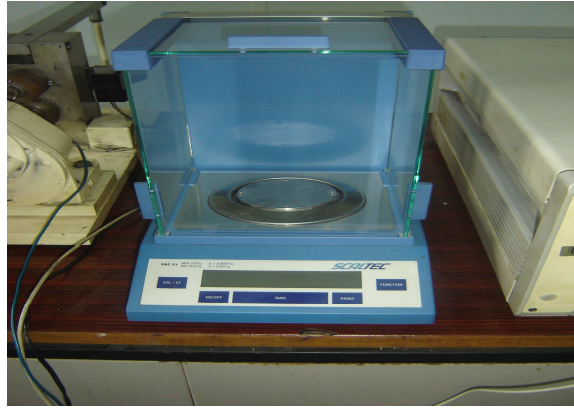
Blok-on-disk aşınma deney düzeneğinde kullanılan disk takım çeliğinden tornalanarak hazırlanmış ve daha sonra sertleştirme işlemine tabii tutulmuştur. Disklerin sertleştirme sonrası ölçülen sertlik değerleri 50–55 HRC olarak ölçülmüştür. Deneyde kullanılan numune kodları Çizelge 3.15’de verilmiştir.

Çizelge 3.15. İşlem durumu ve işlem durumuna göre verilmiş numune kodları

Numune Kodu	Kaplama Tozu
1	Isıl işlemsiz
2	T6 Isıl işlemli
3	T6 + Akımsız nikel kaplanmış (T6+EN)
4	T6 + Sert eloksallı kaplanmış (T6+HA)

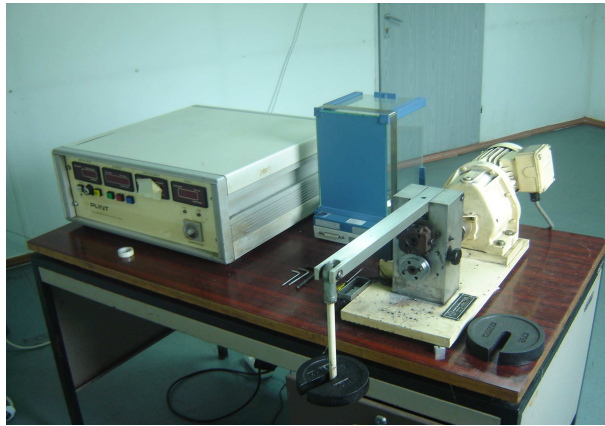
3.2.3. Aşınma deney düzeneği

Aşınma deneyleri öncesinde deney numuneleri, üzerlerinde bulunması olası toz, kir vs. gibi yabancı maddelerden temizlenmesi amacı ile önce su içerisinde daha sonra alkol banyosunda yıkanıp kurutulmuş ve Şekil 3.28’de gösterilen 0,1 mg hassasiyetli elektronik terazide tartılmıştır.



Şekil 3.28. Ağırlık ölçümlerinin yapıldığı hassas terazi

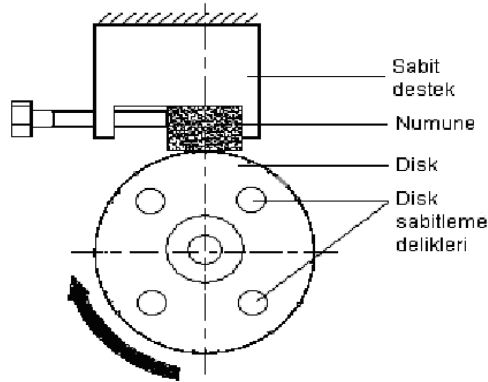
Bu çalışmada kullanılan aşınma deney cihazı Şekil 3.29’da gösterilmiştir. Kullanılan deney tesisatı blok-on-disk deney düzeneği olup deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 3.30’da verilmiştir.



Şekil 3.29. Aşınma deney cihazı

Aşınma deneylerinde, her bir numune grubuna ait deney numunesi en az 3 adet olup her bir numune 1500 m aşınma mesafesine tabii tutulmuştur. Aşınma ölçümleri, ağırlık kaybı esasına göre aşınma deneyleri sonunda deney numunelerinin hassas terazide tartılmasıyla belirlenmiştir.

Her aşınma deneyi sonunda numunelerin ağırlık kaybını belirlemeden önce numuneler yine önce su içerisinde daha sonra alkol banyosunda yıkanıp kurutulmuştur. Aşınma deney düzeneğinde, deney numunesini aşındıran diskin kendisi de aşındığından periyodik olarak disk değiştirilmiştir.



Şekil 3.30. Blok on disk aşınma deney düzeneği

Aşınma deneylerinin tamamı 800 dev/dak devir sayısı ve 10, 20 ve 30 N'luk yük altında gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yükler, numune üzerine doğrudan etkili olmayıp manivela kuralına göre hesaplandığında 6,64 kat daha fazla olup sırasıyla 67, 135 ve 203 N olarak etki etmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

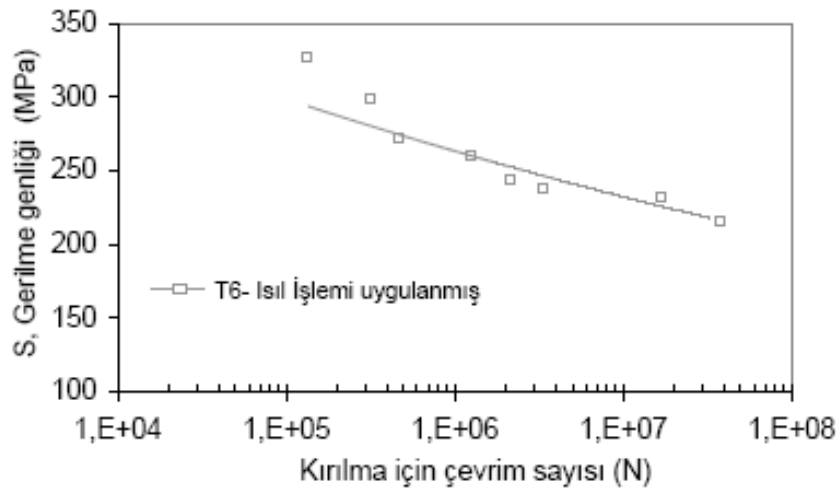
4.1. Düz (Sürtünmesiz Temas) ve Sürtünmeli Temas Yorulma Deneyleri

4.1.1. Döner eğilmeli yorulma

4.1.1.a. Döner eğilmeli düz (sürtünmesiz temas) yorulma deneyi

Daha önce belirtildiği gibi, bu çalışmada T6 ısıtıl işlemi uygulanmış 2014 alüminyum taban malzemesi üzerine iki farklı kaplamanın (Sert Elokso ve Akımsız Nikel kaplamalar) sürtünmeli temas yorulmasındaki etkileri araştırılmıştır. Yorulmada sürtünmeli temasın etkisi, sürtünmeli temas şartı için elde edilen S-N (Wöhler) eğrisinin, sürtünmesiz temas yorulması için elde edilen S-N eğrileri ile karşılaştırılması ile belirlenir.

Bu yüzden öncelikli olarak, döner eğilmeli yorulma test şartları altında bulunan, T6 ısıtıl işlemi uygulanmış numuneler için, düz yorulma S-N eğrisi elde edilmiştir. Söz konusu durum için S-N eğrisi Şekil 4.1’de verilmektedir.



Şekil 4.1. Döner eğilmeli yorulma yüklemesi altında, T6 Isıl işlemi görmüş kaplamasız numuneler için elde edilen S-N (Wöhler) diyagramı

Yorulma testleri, döner eğilmeli yükleme şartları altında ($R=-1$), Şekil 14’de şekil ve ölçü uzunlukları verilen numuneler ile 4000 dev/dak dönme hızlarında ve 22°C sıcaklık, %50–55 bağıl neme sahip bir ortamda yapılmıştır. Bu tip testlerde, yatakların dönmesine müsaade edilirken, numuneye ölü ağırlıklı bir yük uygulanır. Dairesel kesitli yüzeyin orta noktasında, numune, her bir dönme ile üstte çeki iken alt tarafta basıya değişen sinüzoidal bir gerilme genliğine maruz kalır. Numuneye uygulanan gerilme, (2) no’lu denklem ile hesaplanmıştır.

Bu tip testlerde, hasarın oluştuğu maksimum çevrim sayısı, verilmiş bir gerilme seviyesi için elde edilir. Gerilme genliği (S), sürekli olarak azalırken hasara sebep olan çevrim sayısı (N_f) artar.

Test edilen bütün numuneler için testler, tam kırılma ile bitirilmiştir. T6 ısıtıl işlemi uygulanmış silindirik düz (kaplamasız) numunelerin S-N eğrisi, sekiz farklı gerilme genlik değerinde yapılan deneylerden elde edilen hasar çevrim sayısına bağlı olarak çizilmiştir.

Gerilme genliği (S) ile kırılma için gerekli olan çevrim sayısı (N_f) arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile tanımlanmıştır;

$$S = A (N_f)^b \quad (2)$$

Bu denklemde S : Gerilme genliği; A : yorulma dayanım katsayısı; b : yorulma dayanım üsteli; N_f : Kırılma çevrim sayısını ifade etmektedir.

Demir dışı metalik malzemelerde, demir esaslı malzemelerde olduğu gibi S-N eğrisinde yatay bir asimptot değeri olmadığı için, demir dışı metalik malzemelerde yorulma dayanımları, belirli bir çevrim sayısına (genellikle 10^7 kırılma çevrimi için) gerekli olan gerilme genliği, yorulma dayanımı olarak alınır.

Bu durumda T6 ısıtıl işlemi uygulanmış silindirik 2014 Alüminyum alaşımı numunelerin, döner eğilmeli yorulma yüklemesi altındaki yorulma dayanımı yaklaşık olarak 232 MPa olarak elde edilmiştir.

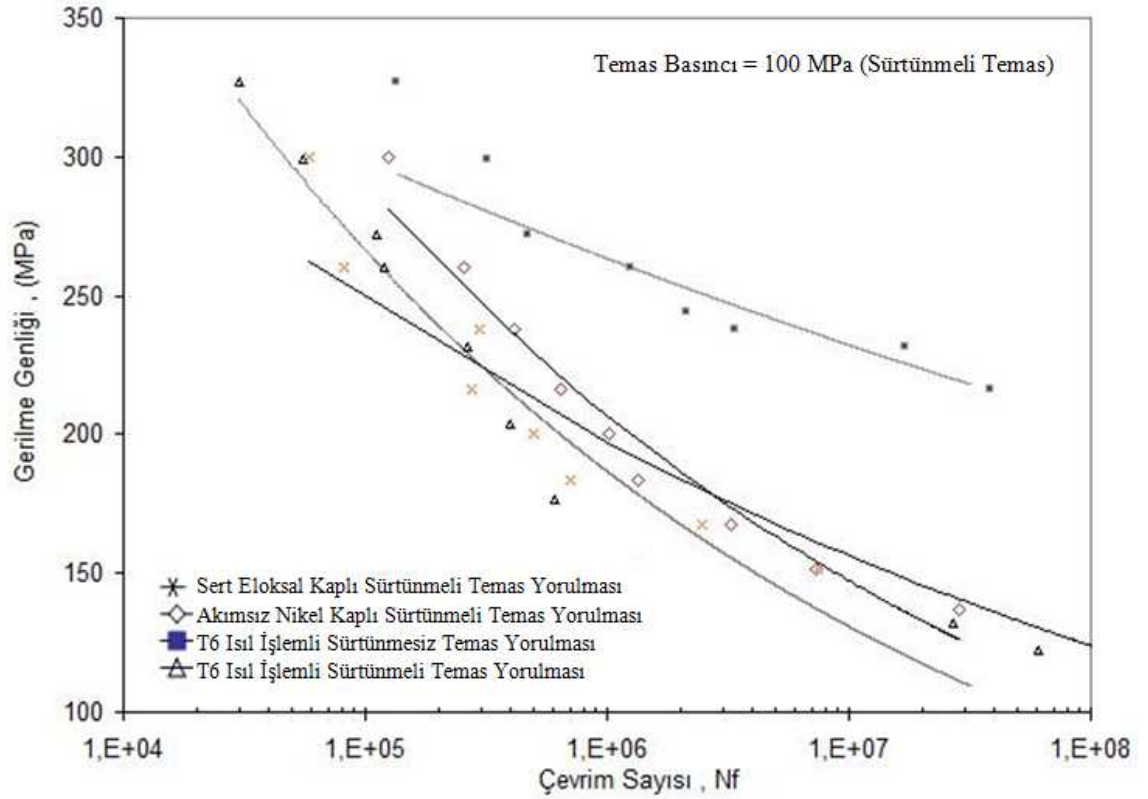
4.1.1.b. Sürtünmeli temas yorulma deneyi

Sürtünmeli temas yorulma çatlağı, sürtünme kayma gerilmelerinin lokal olarak yığıldığı temas bölgesinde meydana gelir. Sürtünmeli temasın zararlı etkisinden dolayı yorulma ömründe meydana gelen azalma, sürtünmeli temasın meydana getirdiği lokal gerilme yığılmalarının sebep olduğu, çatlak oluşum ömründeki azalmadan dolayı olduğu kabul edilmektedir. Farklı kaplamaların meydana getirdiği yorulma ömür artışlarını (3) no'lu basit bir denklem yardımıyla değerlendirmek mümkün olmaktadır.

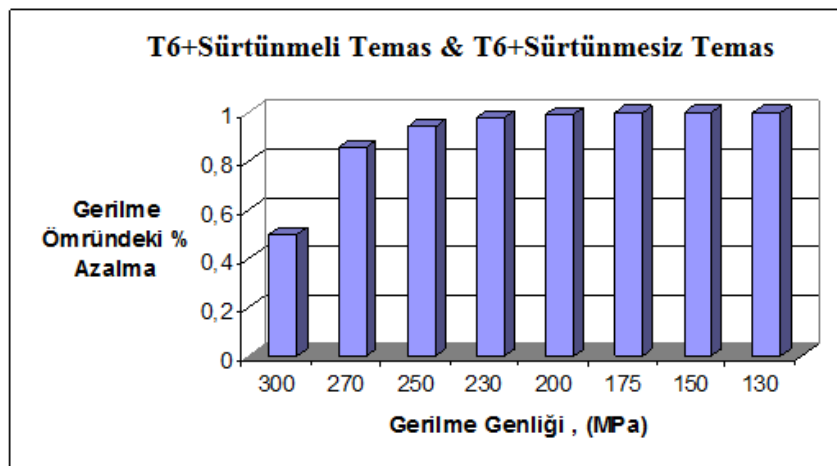
$$\% \text{ Yorulma ömür art.} = \frac{N_f^{Kaplama} - N_f^{Tab..Mal.}}{N_f^{Tab..Mal.}} \times 100 \quad (3)$$

Denklem (3)'deki hasar oluşumu için gerekli yorulma ömrü (N_f), (2) no'lu denklem yardımıyla belirlenmektedir.

Şekil 4.2. T6 ısıtıl işlemi görmüş taban malzeme ve T6+Akımsız Nikel ve T6+Sert Eloksal kaplamalar için sürtünmesiz ve sürtünmeli temas yorulma ömür (S-N) eğrilerini göstermektedir. Her üç durum için, düz (sürtünmesiz temas) yorulma ile karşılaştırıldığında, sürtünmeli temas etkisinden dolayı yorulma ömürlerinde önemli bir azalma olduğu gözlemlenmiştir.

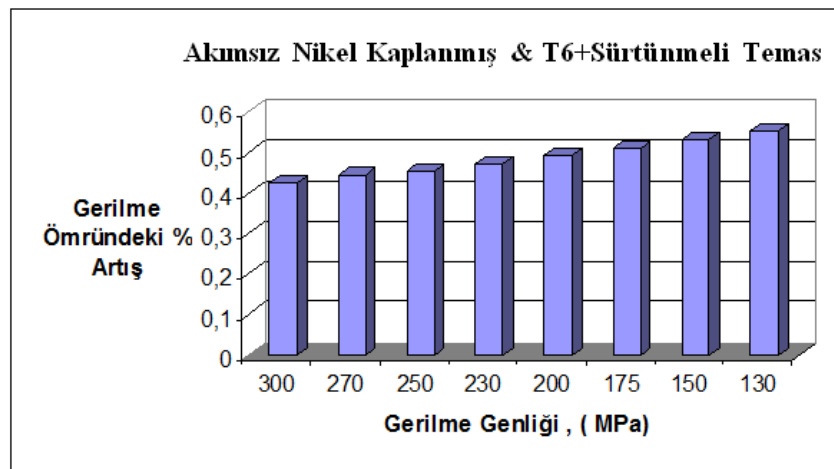


Şekil 4.2. T6 ısıt işlemleri görmüş taban malzeme, T6+Akımsız Nikel ve T6+ Sert Eloksal kaplanmış numuneler için sürtünmesiz ve sürtünmeli temas yorulma S-N (Wöhler) eğrileri.



Şekil 4.3. T6 ısıt işlemleri görmüş numunelerde, gerilme genliğine bağlı olarak sürtünmeli temas yorulma ömründeki azalma yüzdesi.

Gerilme genliğine bağılı olarak sürtünmeli temas yorulma ömründeki bu azalma yüzdesi, şekil 4.3’de yorulma ömründeki azalma-gerilme genliği grafiğinde ayrıca gösterilmiştir. 300 MPa gerilme genliği seviyesi göz önüne alındığında, sürtünmeli temas yorulma ömründeki azalma yaklaşık %50 iken, gerilme genliği daha düşük değerlere azaltıldığında, (örneğin 200 MPa gerilme seviyesinde) sürtünmeli temas yorulma ömründeki azalma %90 seviyesine çıkmaktadır.

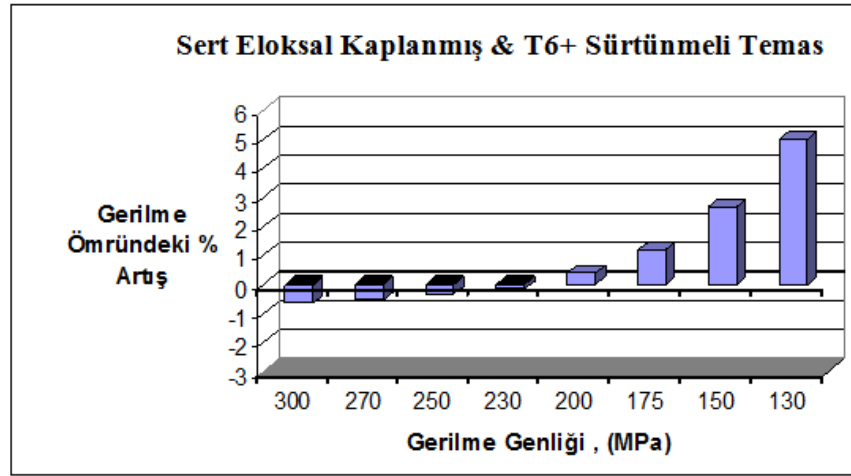


Şekil 4.4. T6+Akımsız Nikel numuneler için, gerilme genliğine bağılı olarak sürtünmeli temas yorulma ömründeki artış yüzdesi

Diğer taraftan, T6+Akımsız Nikel ve T6+Sert Eloksal kaplamaların sürtünmeli temas yorulma davranışları üzerinde farklı etkilere sahip olduğu anlaşılmaktadır. Göz önüne alınan bütün gerilme genliği seviyelerinde, T6+Akımsız Nikel kaplamanın sürtünmeli temas yorulma ömrü üzerinde önemli artışlara neden olduğu açıktır.

Bu artış Şekil 4.4’de verilen yorulma ömründeki azalma-gerilme genliği grafiğinde daha belirgin olarak gözlemlenmektedir. Sürtünmeli temas yorulma ömründeki bu artış, düşük gerilme genliklerinde daha belirgindir.

Sert eloksall kaplamanın, sürtünmeli temas yorulma davranışı üzerindeki etkisi biraz farklılık göstermektedir. Bu farklılık Şekil 4.2 ve Şekil 4.5’de açıkça gözükmemektedir. T6 işlemi uygulanmış taban malzemesi ile karşılaştırıldığında, 300 MPa’nın üzerinde gerilme genliği seviyelerinde Sert Eloksal kaplamanın zararlı bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Söz konusu bu gerilme genliği seviyesinin üzerinde, sürtünmeli temas yorulma ömrünü artırdığı ve bu artışın gerilme genliğinin azalmasıyla daha da belirginleştiği görülmektedir.



Şekil 4.5. (T6+HA) numuneler için, gerilme genliğine bağlı olarak sürtünmeli temas yorulma ömründeki artış yüzdesi

Benzer olarak, Sert Eloksal kaplamanın etkisi Akımsız Nikel ile karşılaştırıldığında, yaklaşık olarak 170 MPa gerilme seviyesinin altında Sert Eloksal kaplamanın zararlı bir etkiye sahip olduğu açıktır. Söz konusu bu gerilme seviyesinin üzerinde uygulanan gerilme genliklerinde, kaplamanın sürtünmeli temas yorulma ömrü üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu tespit edilmektedir.

Demir dışı metalik malzemelerde, demir esaslı malzemelerde olduğu gibi S-N eğrisinde yatay bir asimptot değeri olmadığı için, demir dışı metalik malzemelerde yorulma dayanımları, belirli bir çevrim sayısına (genellikle 10^6 veya 10^7 kırılma çevrimi için)

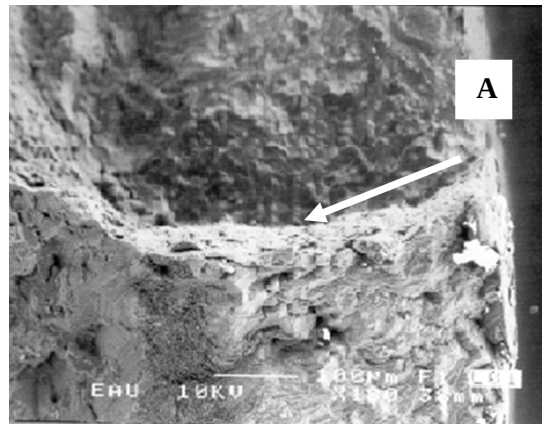
gerekli olan gerilme genliği, yorulma dayanımı olarak alınır. 10^7 kırılma çevrimindeki yorulma dayanımları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 10^7 kırılma çevrimindeki yorulma dayanım değerleri

<u>İşlem Durumu</u> <u>(MPa)</u>	<u>Yorulma dayanımı</u>
T6 Düz yorulma (Sürtünmesiz)	230
T6+ Sürtünmeli Temas Yorulması	130
(T6+EN) Akımsız Nikel Kaplanmış Numune	160
(T6+HA) Sert Eloksal Kaplanmış Numune	173

Çizelge 4.1 incelendiğinde, sürtünmeli temasın, yorulma dayanımını ciddi şekilde azalttığı açıktır. Diğer taraftan, ticari kaplama yöntemlerinin her ikisinin taban malzemenin yorulma dayanımını artırdığı, yüksek çevrim sayılarında (düşük gerilme genliklerinde), Sert Eloksal kaplamanın etkisinin Akımsız Nikel kaplamaya göre biraz daha fazla etkili olduğu tespit edilmiştir.

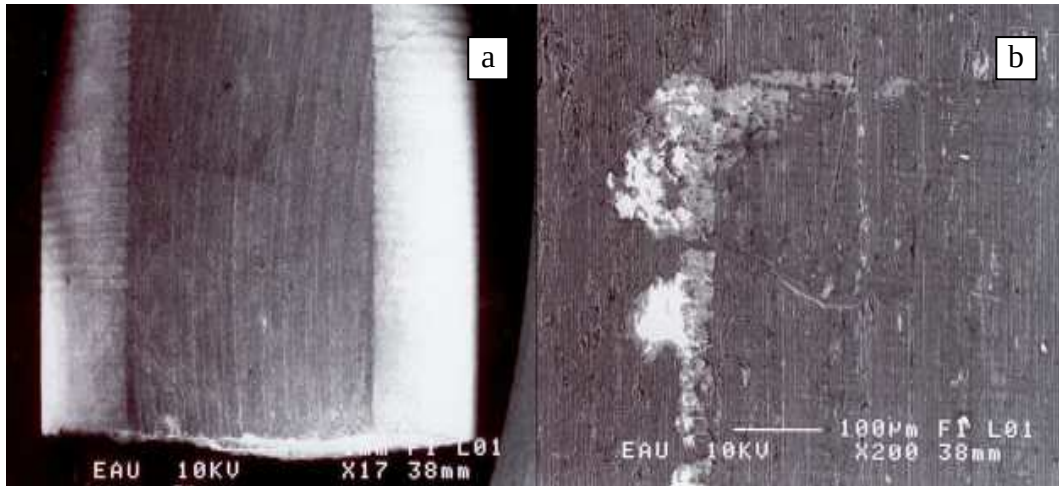
4.1.1.c. Döner eğilmeli sürtünmeli temas yorulma numunelerinin SEM görüntüleri



Şekil 4.6. T6 ısıtılmış düz yorulma numunesinin, 255 MPa gerilme ve 330.103 çevrim sayısından sonra kırılmış yüzeyinin SEM görüntüsü. A noktası çatlak başlangıç yerini, ok işareti ise çatlak yayılma doğrultusunu göstermektedir.

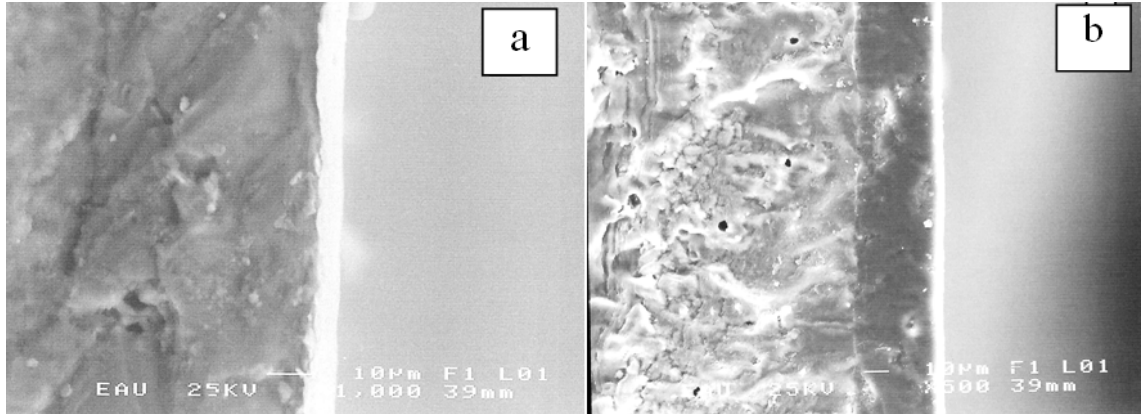
Şekil 4.6 T6 ısıt işlemleri görmüş sürtünmesiz (frettingsiz) yorulma numunesinin 255 MPa gerilme ve 330.103 çevrim sayısından sonra kırılmış yorulma numunesinin yüzeyinin SEM görüntüsünü göstermektedir.

Şekil 4.7 T6 ısıt işlemleri görmüş taban malzemesindeki sürtünmeli temas yorulma izlerinin SEM ile elde edilmiş görüntüsünü vermektedir. Söz konusu sürtünmeli temas yorulması izlerinin kaplama uygulanmış numunelerdeki izlerden daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, söz konusu izlerin göz önüne alınan bütün durumlar için gerilme genlik değerlerindeki artışı ile daha da belirginleştiği gözlenmiştir. Şekil 4.7’de aşınma izlerinin mevcudiyeti gözükmemektedir.



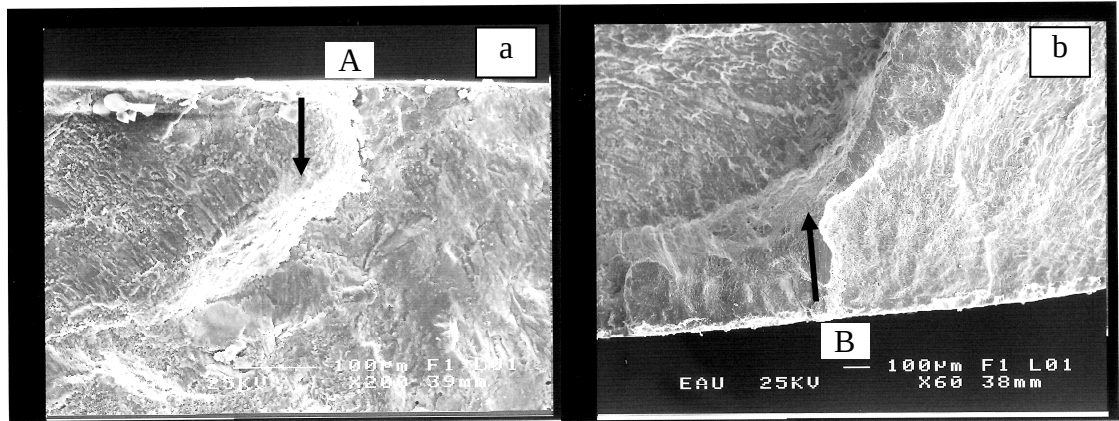
Şekil 4.7. 100 MPa temas basıncı ve 204 MPa gerilme seviyesinde test edilmiş T6 işlemleri taban malzemesinin sürtünmeli temas izlerinin (scar) görünümü

Şekil 4.8.a ve 4.8.b, T6+Akımsız Nikel ve T6+Sert Eloksal kaplamaların kırılma yüzeylerini sırasıyla göstermektedir. Bu görüntülerden kaplama kalınlıklarının, Akımsız Nikel için yaklaşık 6–8 μm ve Sert Eloksal için 20–25 μm olduğu tespit edilebilmektedir.



Şekil 4.8. a) T6+Akımsız Nikel b) T6+Sert Eloksal kaplamaların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri

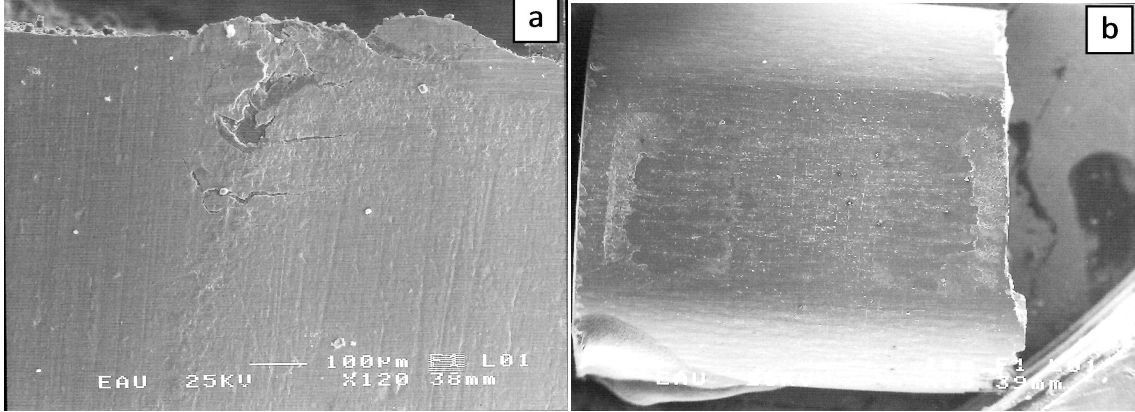
Şekil 4.9’da, sürtünmeli temas yorulma yüklemesi uygulanmış T6+Akımsız Nikel ve T6+Sert Eloksal kaplamalı numunelerde elde edilen çatlak başlangıç ve çatlak yayılma doğrultuları gösterilmektedir.



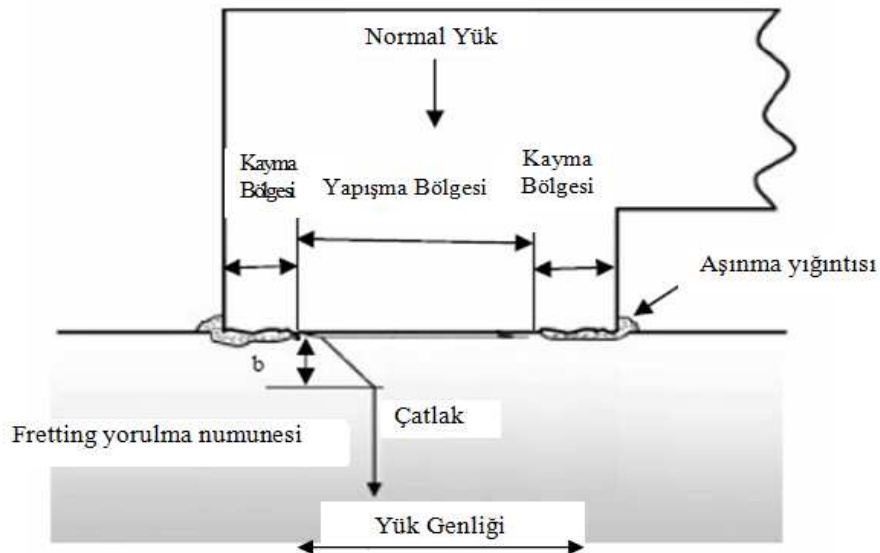
Şekil 4.9. a) T6+Akımsız Nikel, b) T6+Sert Eloksal kaplamaları için çatlak başlangıç ve çatlak yayılma doğrultuları. A, B: Çatlak başlangıçları, Oklar çatlak yayılma doğrultularını göstermektedir.

Her iki kaplamada da çatlak temas yüzeyinde (A ve B noktaları) başlayıp, tekil bir çatlak etkisinde taban malzemeye doğru bir yayılma (oklar ile gösterilmiş) davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 4.10 kaplamaların temas yüzeylerindeki sürtünmeli temas izlerini göstermektedir. SEM görüntülerinden sürtünmeli temasın bir yüzey hasarı olduğu, yüzeyde oluşan çatlak izlerinden anlaşılmaktadır. Bundan dolayı yorulma hasarı yüzeyde başlamaktadır. Yüzeydeki sürtünmeli temas hasar oluşumu, detaylı olarak Şekil 4.11’de verilen mekanizma ile açıklanmaktadır.



Şekil 4.10. a) T6+EN, b) T6+HA kaplamaları için 100 MPa temas basıncı için elde edilen sürtünmeli temas yorulma izleri



Şekil 4.11. Sürtünmeli temas yorulma hasarının şematik gösterimi; b: çatlak başlangıç bölgesi derinliği

4.1.2. Düzlemsel eğilmeli yorulma

4.1.2.a. Düzlemsel eğilmeli sürtünmesiz temas yorulma deneyi

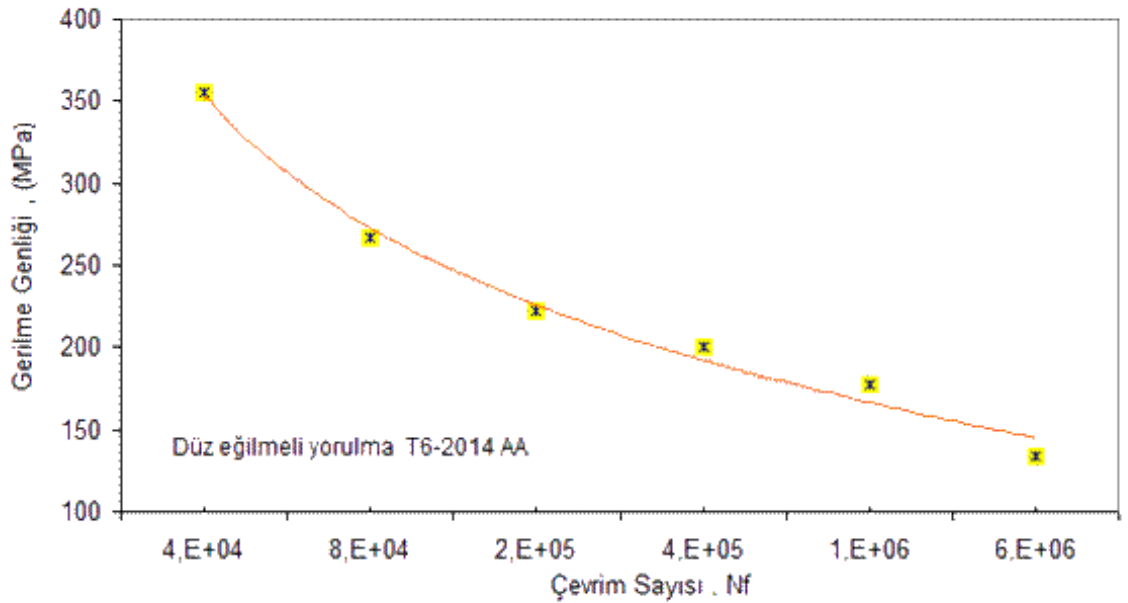
Araştırmanın bu bölümünde, Düzlemsel eğilmeli yorulma yüklemesi uygulanan, T6 ısıtıl işlemi uygulanmış dikdörtgen kesitli 2014 alüminyum numunelerin sürtünmeli temas yorulma davranışları üzerinde, iki farklı kaplamanın (Sert Eloksal ve Akımsız Nikel kaplamalar), etkileri araştırılmıştır

Yorulma yüklemelerinde sürtünmeli temas yorulmasının etkisi, sürtünmeli temas yorulma şartı için elde edilen S-N (Wöhler) eğrisinin, sürtünmesiz yorulma için elde edilen S-N eğrileri ile karşılaştırılması ile belirlenir. Öncelikli olarak düzlemsel eğilmeli yorulma şartları altında bulunan, T6 ısıtıl işlemi uygulanmış dikdörtgen kesitli numuneler için, sürtünmesiz yorulma S-N eğrisi elde edilmiştir. Söz konusu durum için S-N eğrisi Şekil 4.12’de verilmektedir.

Göz önüne alınan bütün şartlar için yorulma testleri, düzlemsel eğilmeli yükleme şartları altında ($R=-1$), Şekil 22’de şekil ve boyutları verilen numuneler ile 600-700 dev/dak dönme hızlarında gerçekleştirildi.

Bütün testler 22°C sıcaklık ve %50–55 bağıl neme sahip bir ortamda elde edildi. Numuneye uygulanan gerilme, 4 no’lu denklemler ile hesaplanmıştır. Yorulma hasarının olduğu maksimum çevrim sayısı, verilmiş bir gerilme seviyesi için elde edilmiştir. Gerilme genliğindeki (S) azalmaya bağlı olarak, hasara sebep olan çevrim sayısı (N_f) arttığı gözlemlenmiştir.

Test edilen bütün numuneler için, testler tam kırılma ile bitirilmiştir. T6 ısıtıl işlemi uygulanmış dikdörtgen kesitli düz numuneler için S-N eğrileri, altı farklı gerilme genlik değerinde yapılan deneylerden elde edilen hasar çevrim sayısına bağlı olarak çizilmiştir.



Şekil 4.12. Düzlemsel eğilmeli yorulma yüklemesi altında, T6 ısı işlemleri görmüş levha numuneleri için, (frettingsiz) S-N (Wöhler) diyagramı

Demir dışı metalik malzemelerde, demir esaslı malzemelerde olduğu gibi S-N eğrisinde yatay bir asimptot değeri olmadığı için, demir dışı metalik malzemelerde yorulma dayanımları, belirli bir çevrim sayısına (örneğin 5×10^6) gerekli olan gerilme genliği, yorulma dayanımı olarak alınır. Bu durumda T6 ısı işlemleri uygulanmış dikdörtgen kesitli 2014 Alüminyum alaşımı numunelerinin, düzlemsel eğilmeli yorulma yüklemesi altındaki yorulma dayanımı yaklaşık olarak 150 MPa olarak elde edilmiştir.

4.1.2.b. Düzlemsel eğilmeli sürtünmeli temas yorulma deneyi

Düzlemsel eğilmeli yorulma yüklemelerinde, sürtünmeli temasın etkisi, sürtünmeli temas (Fretting) şartı için elde edilen S-N (Wöhler) eğrisinin, düz yorulma (Frettingsiz) için elde edilen S-N eğrileri ile karşılaştırılması ile belirlenir.

Bütün deney koşulları için yorulma testleri, gerilme genliğinin sinüzoidal bir değişim gösterdiği düzlemsel eğilmeli yorulma şartları altında, $R=-1$ gerilme oranı için yapılmıştır. Şekil 3.3’de şekil ve boyutları verilen numuneler ile düz yorulma deneyleri,

700 dev/dak ve temas sürtünmesi (fretting) deneyleri için 500 dev/dak dönme hızlarında gerçekleştirildi. Bütün testler 22°C sıcaklık ve %50–55 bağıl neme sahip bir ortamda elde edildi.

Sürtünmeli temas yorulma deneyleri, literatürde çok kullanıldığı ve temas basıncını belirlemek için kullandığımız uzama ölçerlerin (strain gauge), ölçü sınırları içerisinde bir şekil değişimine neden olduğu için 50 MPa’lık sabit ortalama temas basıncında gerçekleştirildi. Ortalama temas basıncı, normal yükün, temas alanına (temas alanı=pabuç ayak boyutu x pabuç ayak genişliği=8x2=16mm²) bölünmesi ile hesaplanmıştır. Sürtünmeli temas yorulma testleri süresince, temas kuvveti ve yanal kuvvetler, iki ayrı PCD–300 model dinamik veri okuyucu ile takip edilmiştir.

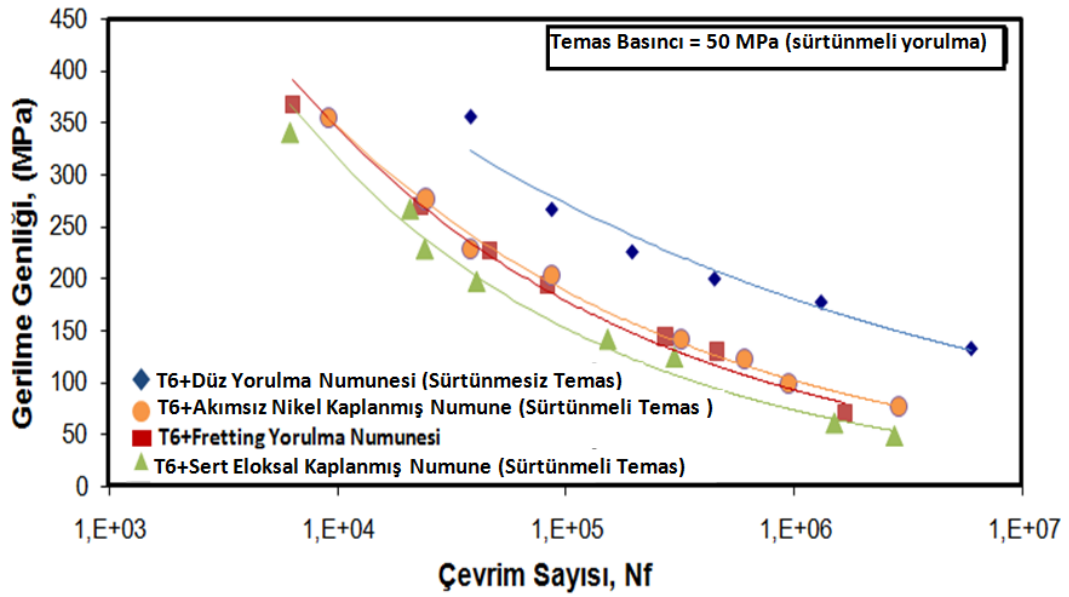
Hasarın oluştuğu maksimum çevrim sayısı, verilmiş bir gerilme seviyesi için elde edilmiştir. Gerilme genliğindeki (S) azalmaya bağlı olarak, hasara sebep olan çevrim sayısının (N_f) arttığı gözlemlenmiştir. Bütün numuneler için testler, tam kırılma ile bitirilmiş ve T6 ısıtıl işlemi uygulanmış numuneler ile sürtünmeli temas (fretting) yorulma testleri için S-N eğrileri, farklı gerilme genlik değerlerinde yapılan deneylerden elde edilen hasar çevrim sayısına bağlı olarak çizilmiştir (Şekil 4.12).

Gerilme genliği (σ) ile kırılma için gerekli olan çevrim sayısı (N_f) arasındaki ilişki;

$$S = AN_f^b \quad (5)$$

denklemleri ile verilir. Bu denklem, bu tip verileri tanımlamak için daha önceleri Basquin tarafından geliştirilen denklemin benzeridir. (S) gerilme genliğini, (A) yorulma dayanım katsayısını, (b) yorulma dayanım üstelini, (N_f) ise kırılma için gerekli çevrim sayısını ifade etmektedir.

Şekil 4.13 T6 ısıt işlemleri görmüş kaplamasız, sert eloksal ve akımsız nikel kaplamalar için düz ve fretting yorulma ömür (S-N) eğrilerini göstermektedir. Her üç durum için, düz yorulma ile karşılaştırıldığında, sürtünmeli temas etkisinden dolayı, yorulma ömürlerinde önemli azalmalar olduğu açıktır.

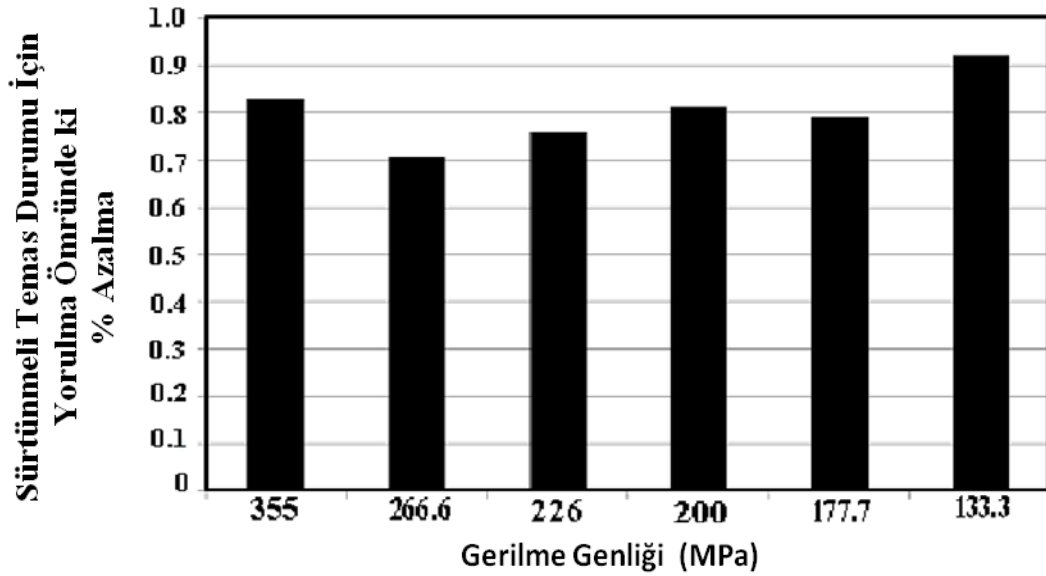


Şekil 4.13. T6 ısıt işlemleri görmüş kaplamasız, sert eloksal ve akımsız nikel kaplanmış numuneler için sürtünmesiz ve sürtünmeli temas (fretting) yorulma S-N (Wöhler) eğrileri.

Sürtünmeli temas yorulma çatlakları, sürtünme kayma gerilmelerinin lokal olarak yığıldığı temas bölgesinde meydana gelir. Sürtünmeli temas durumunun zararlı etkisinden dolayı yorulma ömründe meydana gelen azalma, sürtünmeli temas sonucu oluşan lokal gerilme yığılmalarının sebep olduğu çatlak oluşum ömründeki azalmadan kaynaklandığı kabul edilmektedir.

Gerilme genliğine bağlı olarak sürtünmeli temas yorulma ömründeki azalma yüzdesi, Şekil 4.14'de kaplamasız numuneler için yorulma ömründeki azalma-gerilme genliği grafiğinde ayrıca gösterilmektedir. Sürtünmeli temas ömründeki % azalma, düz yorulma

için elde edilen yorulma ömür değerleri kullanılarak (3) No'lu denklem yardımıyla elde edilmiştir.

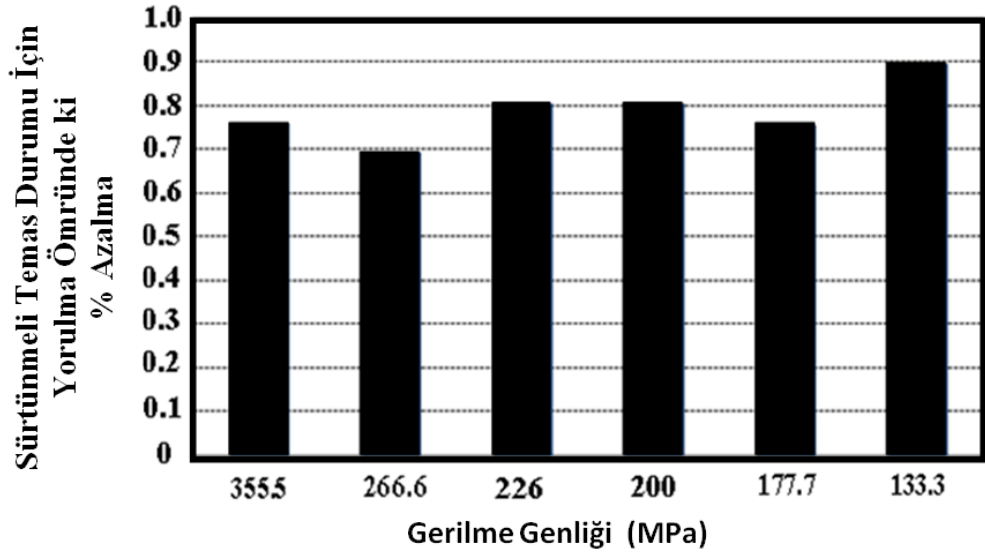


Şekil 4.14. T6 ısıt işlemleri görmüş kaplamasız numunelerde, gerilme genliğine bağlı olarak sürtünmeli temas yorulma ömründeki azalma yüzdesi.

266,6 MPa gerilme genliği seviyesi göz önüne alındığında, sürtünmeli temas yorulma ömründeki azalma yaklaşık %70 iken, gerilme genliği daha düşük değerlere azaltıldığında, örneğin 133,3 MPa gerilme seviyesinde sürtünmeli temas yorulma ömründe meydana gelen azalma %90 seviyesinin üzerine çıkmaktadır.

Diğer taraftan, sert eloksall ve akımsız nikel sürtünmeli temas (fretting) yorulma davranışları üzerinde farklı etkilere sahip olduğu anlaşılmaktadır. Göz önüne alınan bütün gerilme genliği seviyelerinde, akımsız nikel kaplamanın, kaplamasız ve sert eloksall kaplamalarla mukayese edildiğinde, sürtünmeli temas yorulma ömrü üzerinde gelişmeye neden olduğu açıktır. Bu artış Şekil 4.15’de verilen yorulma ömründeki

azalma-gerilme genliği grafiğinde daha belirgin olarak gözlenmektedir. Sürtünmeli temas yorulma ömründeki bu artış, düşük gerilme genliklerinde daha belirgindir.

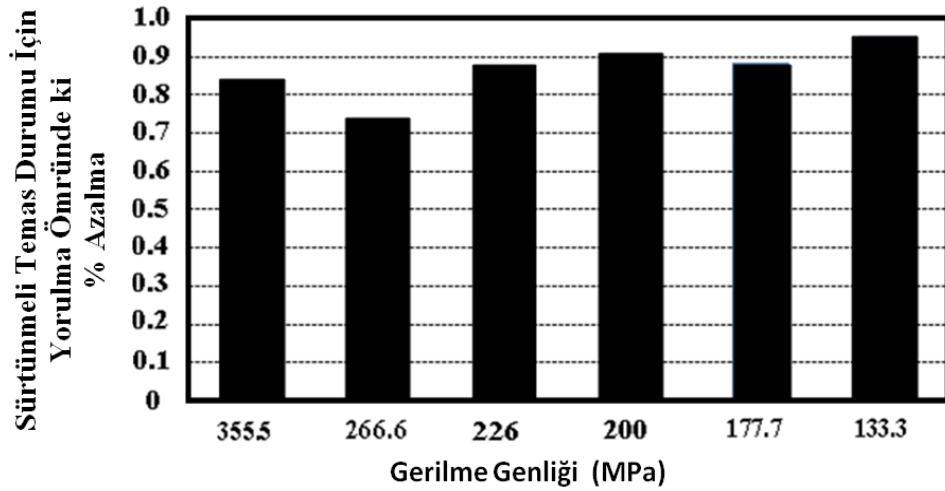


Şekil 4.15. Akımsız nikel kaplanmış numunelerde, gerilme genliğine bağlı olarak sürtünmeli temas yorulma ömründeki azalma yüzdesi.

Akımsız nikel kaplanmış numuneler için, 266,6 MPa gerilme genliği seviyesi göz önüne alındığında, sürtünmeli temas yorulma ömründeki azalma yaklaşık %70'in altında iken, gerilme genliği daha düşük değerlere azaltıldığında, örneğin 133,3 MPa gerilme seviyesinde sürtünmeli temas (fretting) yorulma ömründeki azalma %90 seviyesinin altına inmektedir. Sürtünmeli temas ömürlerindeki artış düşük gerilme seviyelerinde daha belirgin olmaktadır.

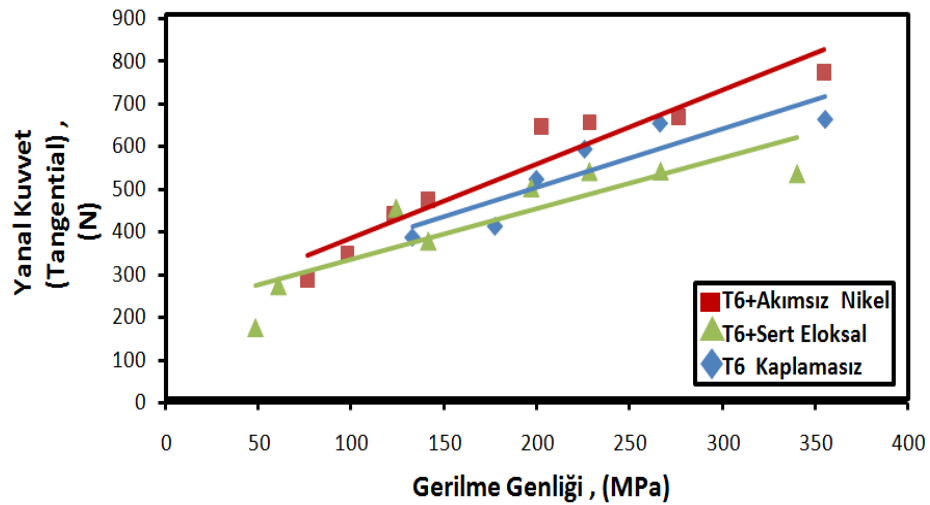
50–60 μm kalınlıktaki sert eloksal kaplanmış numuneler için, gerilme genliğine bağlı olarak sürtünmeli temas yorulma ömründeki azalma yüzdesi Şekil 4.16'da verilmektedir.

Sert eloksal kaplamaların, sürtünmeli temas yorulma ömrünü önemli ölçüde azalttığı Şekil 4.13 ve 4.16'dan görülmektedir.



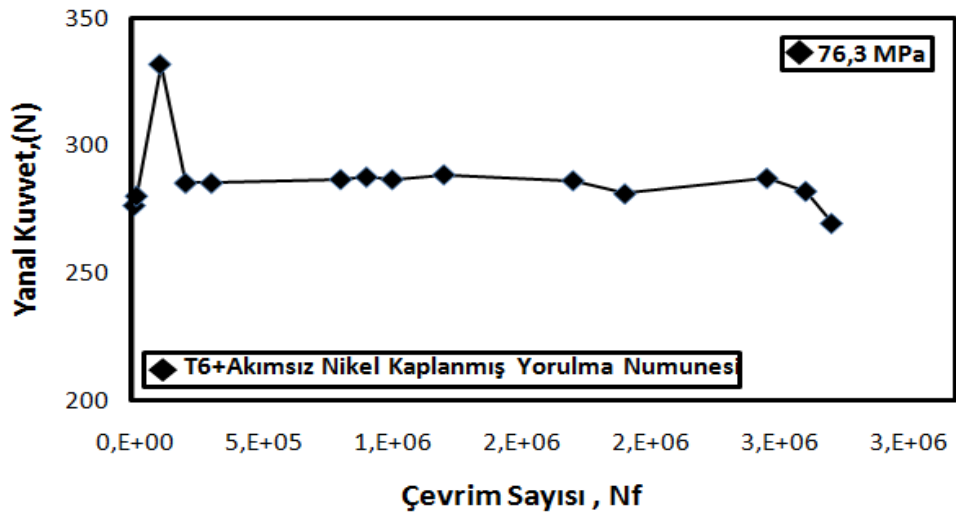
Şekil 4.16. Sert eloksal kaplanmış numunelerde, gerilme genliğine bağlı olarak sürtünmeli temas yorulma ömründeki azalma yüzdesi.

Şekil 4.17 uygulanan gerilme genliği ile yanal kuvvet arasındaki değişimi göstermektedir. Örnek olması açısından çevrim sayısına göre yanal kuvvet değerlerinin nasıl elde edildiği Şekil 4.17’de akımsız nikel kaplanmış numunede 76,3 MPa gerilme genliği için gösterilmektedir. Söz konusu gerilme genliğinde, farklı çevrimlerde elde edilen yanal kuvvetlerin ortalaması bulunarak, ortalama yanal kuvvet belirlenmiştir. Aynı işlem seçilen bütün gerilme genlik değerleri için tekrarlanarak Şekil 4.16’da verilen grafik elde edilmiştir. Bütün deney şartları için gerilme genliği arttıkça, yanal kuvvet değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.17. Uygulanan gerilme genliği ile yanal kuvvet arasındaki değişim.

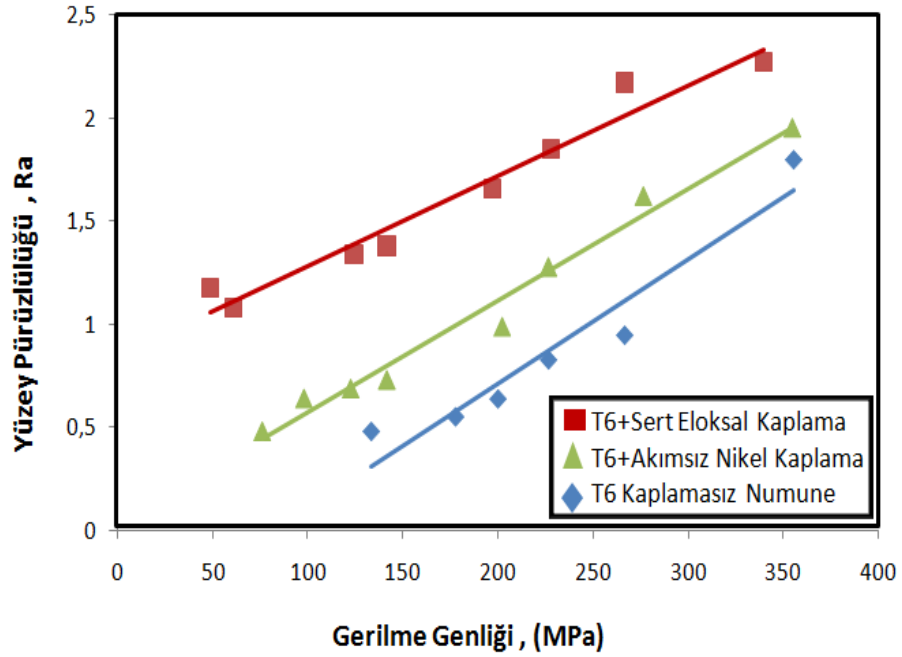
Şekil 4.17 incelendiğinde, kaplamasız taban malzeme ile mukayese edildiğinde, akımsız nikel kaplamalar için elde edilen yanal kuvvetlerin göz önüne alınan bütün gerilme genlikleri için daha yüksek olduğu gözükmemektedir. Genellikle kaplamasız durum ile mukayese edildiğinde, daha düşük yanal kuvvetler veren kaplama türleri, uygulama için seçilmiştir. Bu çalışmada seçilen akımsız nikel kaplama daha yüksek yanal kuvvetler göstermiştir.



Şekil 4.18. Akımsız nikel kaplanmış numunede 76,3 MPa gerilme genliği için, çevrim sayısı ile yanal kuvvet arasındaki değişim.

Şekil 4.18 incelendiğinde başlangıç çevrimlerinde yanal kuvvetin temas yüzey pürüzlülüğünden dolayı arttığı daha sonra sabit bir değere inerek devam ettiği, kırılmaya yakın çevrimlerde ise azaldığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, T6 ısıtma işlemi uygulanmış taban malzeme ile mukayese edildiğinde, sert eloksallı kaplamanın gerilme genliğinin bütün değerleri için daha yüksek yanal (tangential) kuvvetlere sahip olduğu ve akımsız nikel kaplamalarda ise tersinin geçerli olduğu tespit edilmiştir.

Göz önüne alınan bütün deney koşulları için, uygulanan gerilme genliği ile sürtünmeli temas izleri boyunca ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri arasındaki değişim Şekil 4.19'da gösterilmiştir.

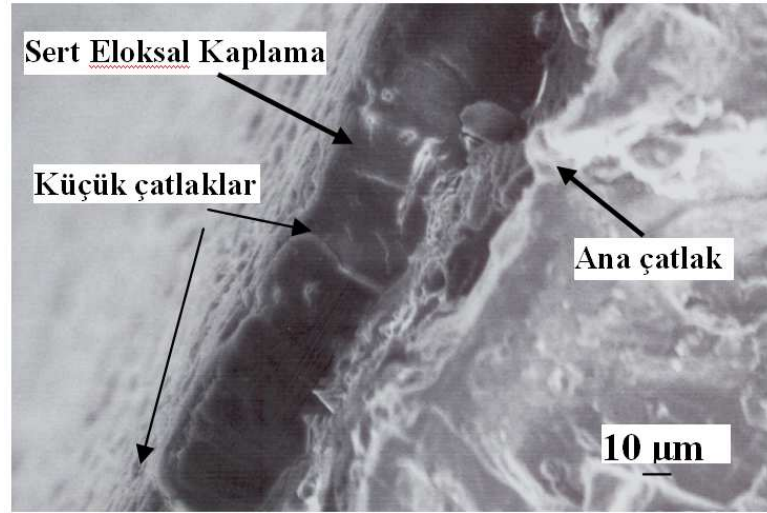


Şekil 4.19. Gerilme genliği ile sürtünmeli temas izleri boyunca ölçülen yüzey pürüzlülükleri arasındaki değişim

Bütün deney şartları için, gerilme genliğindeki artış ile yüzey pürüzlülükleri arttı. Sert eloksallı kaplamalarda temas yüzeyindeki pürüzlülük, çoklu çatlaklardan dolayı hem akımsız nikel hem de kaplamasız numunelerdeki değerlerden daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

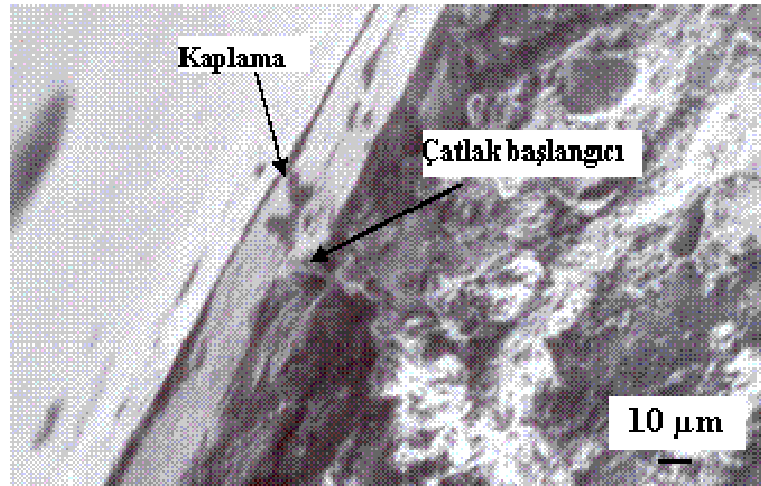
4.1.2.c. Düzlemsel eğilmeli sürtünmeli temas yorulma numunelerinin (SEM) görüntüleri

Sert eloksallı kaplamaların %20–40 arasında gözenek ihtiva ettiği bilinmektedir. Sert eloksallı kaplamalarda, kaplama kalınlığı boyunca oksit tabakasının yoğun küçük çatlaklar ihtiva ettiği, Şekil 4.20’de görülmektedir.

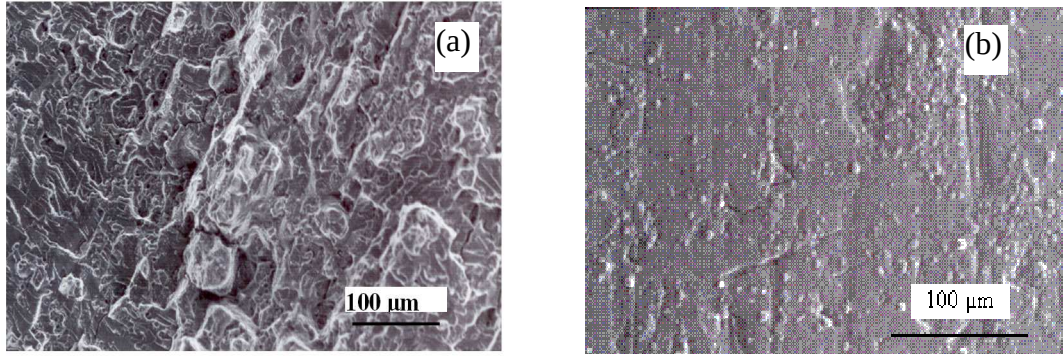


Şekil 4.20. Sert eloksal kaplanmış numunelerde kırılma kesit yüzeyinin SEM görüntüsü.

Akımsız nikel kaplamaların, alüminyum taban malzeme üzerine daha yoğun olarak büyüdüğü ve sert eloksal kaplama ile karşılaştırıldığında içerisinde küçük çatlaklar bulundurmadığı görülür (Şekil 4.21).



Şekil 4.21. Akımsız nikel kaplanmış numunelerde kırılma kesit alanının SEM görüntüsü.

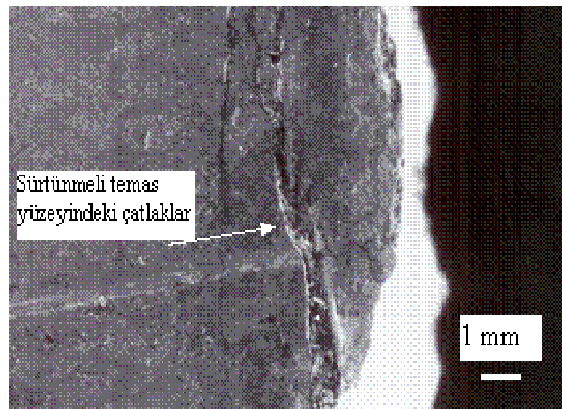


Şekil 4.22. Kaplanmış numunelerin yüzey durumlarının SEM görüntüsü: (a) Sert eloksallı kaplama; (b) Akımsız nikel kaplama.

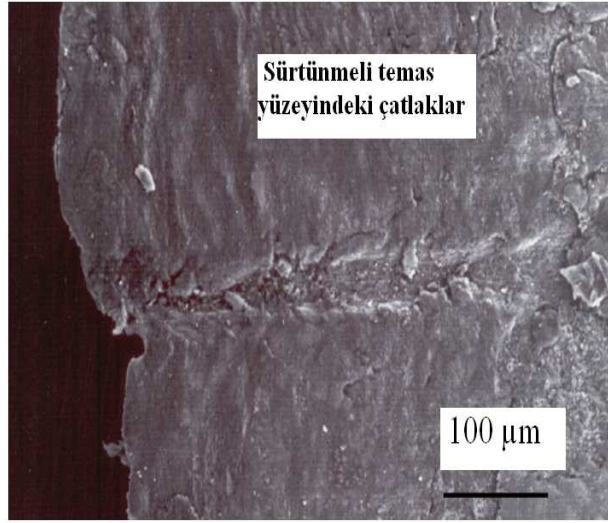
Kaplama yüzeylerinde yapılan gözlemler, akımsız nikel kaplanmış numunelerin daha düzgün olduğu, sert eloksallı kaplanmış yüzeylerde bağıl olarak çok sayıda çatlakların mevcut olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte mikro sertlik ölçümleri, her iki kaplamanın sertlik değerinin taban malzemeden oldukça yüksek olduğunu göstermiştir.

Şekil 4.23–24–25, sürtünmeli temas yüklemesi altında test edilmiş deney şartlarında (kaplamasız, sert eloksallı ve akımsız nikel kaplamaların) kırılma yüzeylerinin SEM görüntülerini vermektedir.

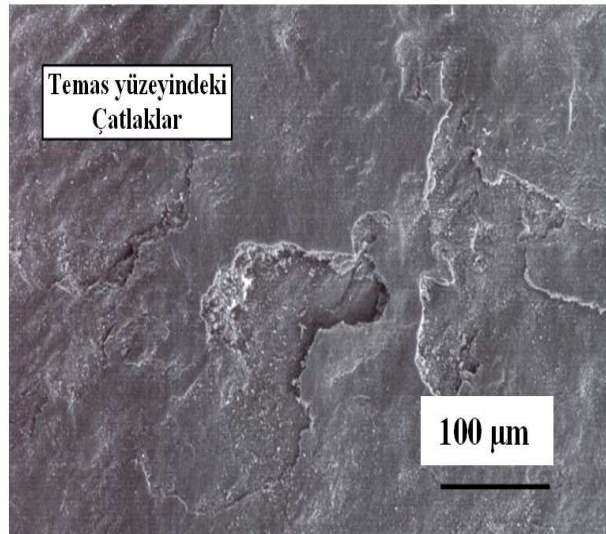
Yorulma çatlaklarının, sürtünmeli temasın sebep olduğu gerilme yığılma etkisinden dolayı numunelerin temas yüzeyinde oluştuğu anlaşılmaktadır. Ayrıca temas yüzeyinin sert eloksallı kaplamalarda daha pürüzlü olduğu gözükmemektedir.



Şekil 4.23. Kaplamasız numune için sürtünmeli temas yüzeyi SEM görüntüsü

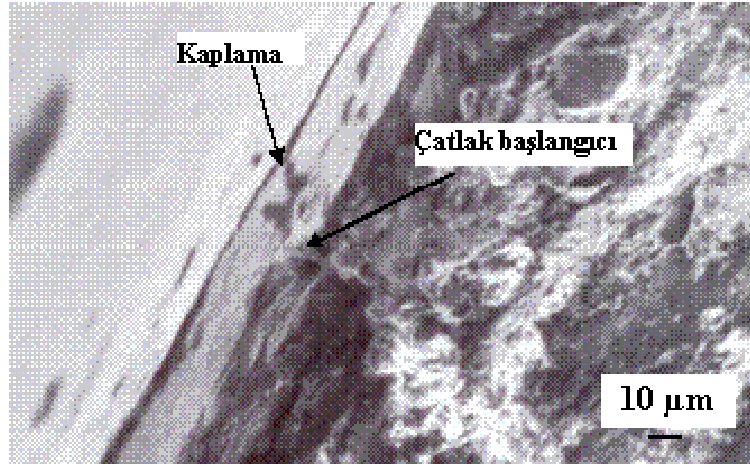


Şekil 4.24. Sert Eloksal kaplanmış numune için sürtünmeli temas yüzeyi SEM görüntüsü

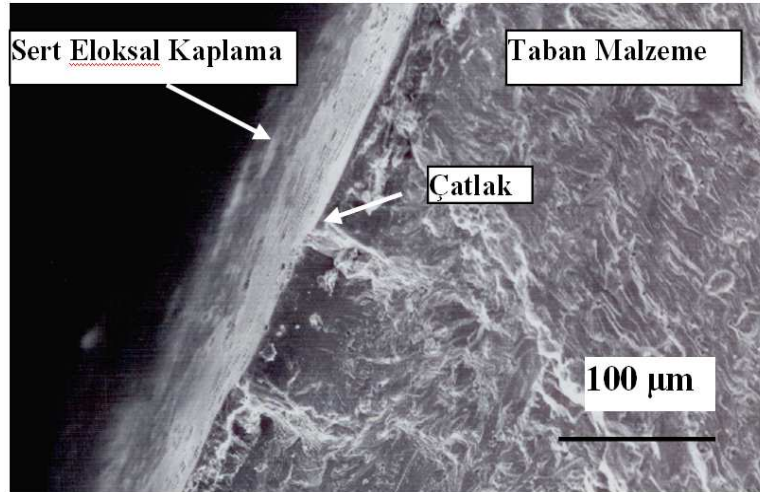


Şekil 4.25. Akımsız nikel kaplanmış numune için sürtünmeli temas yüzeyi SEM görüntüsü

Yorulma çatlaklarının, sürtünmeli temasın sebep olduğu gerilme yığılma etkisinden dolayı numunelerin temas yüzeyinde oluştuğu anlaşılmaktadır. Ayrıca temas yüzeyinin sert eloksal kaplamalarda daha pürüzlü olduğu gözükmemektedir.



Şekil 4.26. Kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri (Akımsız nikel kaplama)



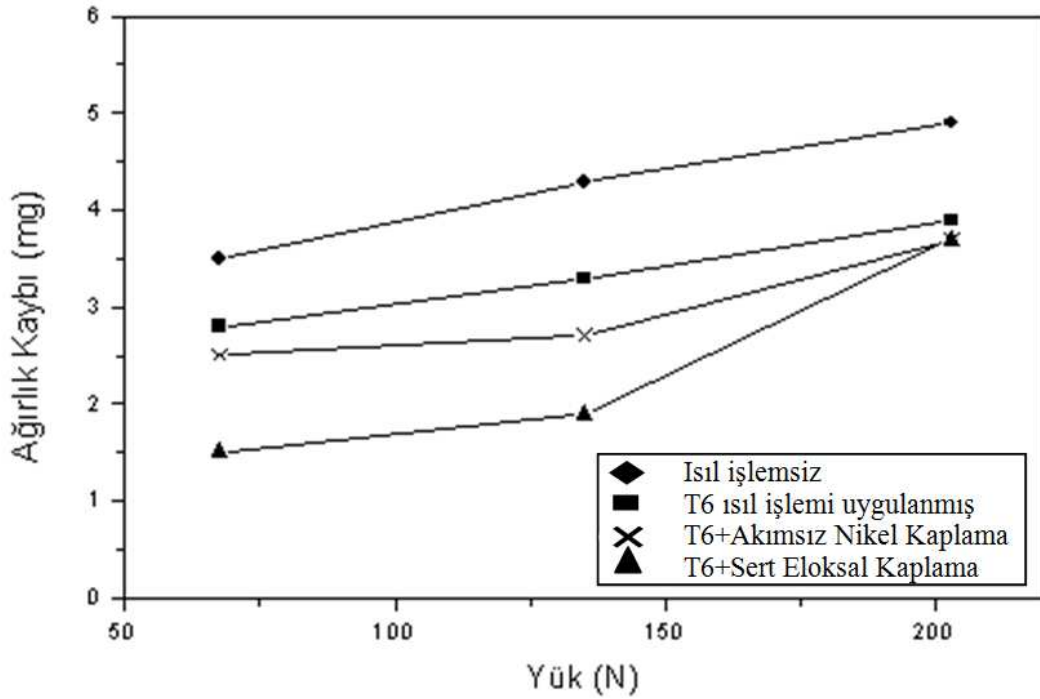
Şekil 4.27. Kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri (Sert Eloksal Kaplama)

Sürtünmeli temas yüklemesi altında test edilmiş sert eloksallı ve akımsız nikel kaplanmış numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 4.26 ve 4.27’de gösterilmiştir. Sert eloksallı kaplamaların kaplama kalınlığı boyunca çoklu çatlakla sahip olduğu (Şekil 4.20) ve taban malzeme ile güçlü bir adezyona sahip olduğu için (ince kaplama kalınlıklarında adezyon daha fazla), kaplama kalınlığı boyunca ilerleyen çatlaklar ara yüzeyden taban malzemeye kolaylıkla ilerlemektedir. Sert eloksallı kaplamaların sürtünmeli temas hasarını olumsuz yönde etkilemesi daha öncede açıklandığı gibi bundan dolayı olabilir. Bu gözlem literatür ile de uyumludur. Benzer şekilde akımsız

nikel kaplanmış numunelerde de çatlağın temas yüzeyinde oluştuğu ve kaplama tabakası boyunca ilerleyip ara yüzeyden taban malzemeye doğru yayıldığı anlaşılmaktadır (Şekil 4.26).

4.2. Aşınma Deneyi Bulguları

Aşınma deneyleri sonucunda, ağırlık kaybı miktarları Şekil 4.28’de görülmektedir.



Şekil 4.28. Aşınma sonrası ağırlık kaybı grafiği

Uygulanan yüke bağlı olarak, oluşan aşınma ağırlık kaybı eğrileri yukarıdaki Şekil 4.28’de gösterilmektedir. Tüm deney numuneleri için aşınma yükünün artışı ile ağırlık kaybının artış gösterdiği görülmüştür. Bu artışlar, kaplamaların yüzeyden sökülmesine bağlı olarak metal-metal temas yüzeyinin artması ile açıklanabilir. Numune gruplarının karşılaştırılmasından, döküm sonrası T6 ısıl işlemi uygulanmamış (as-cast) deney numunelerinin diğer numunelerden daha fazla aşındığı görülmüştür. Buna karşın, T6, işleminin ve Akımsız Nikel ve Sert Eloksal kaplamaların aşınma direncini iyileştirdiği,

yani her iki kaplama hali için de numunelerin daha az aşınma gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu kaplamalardan sert eloksal kaplanmış numunelerin diğerine göre daha az ağırlık kaybına uğradığı görülmüştür.

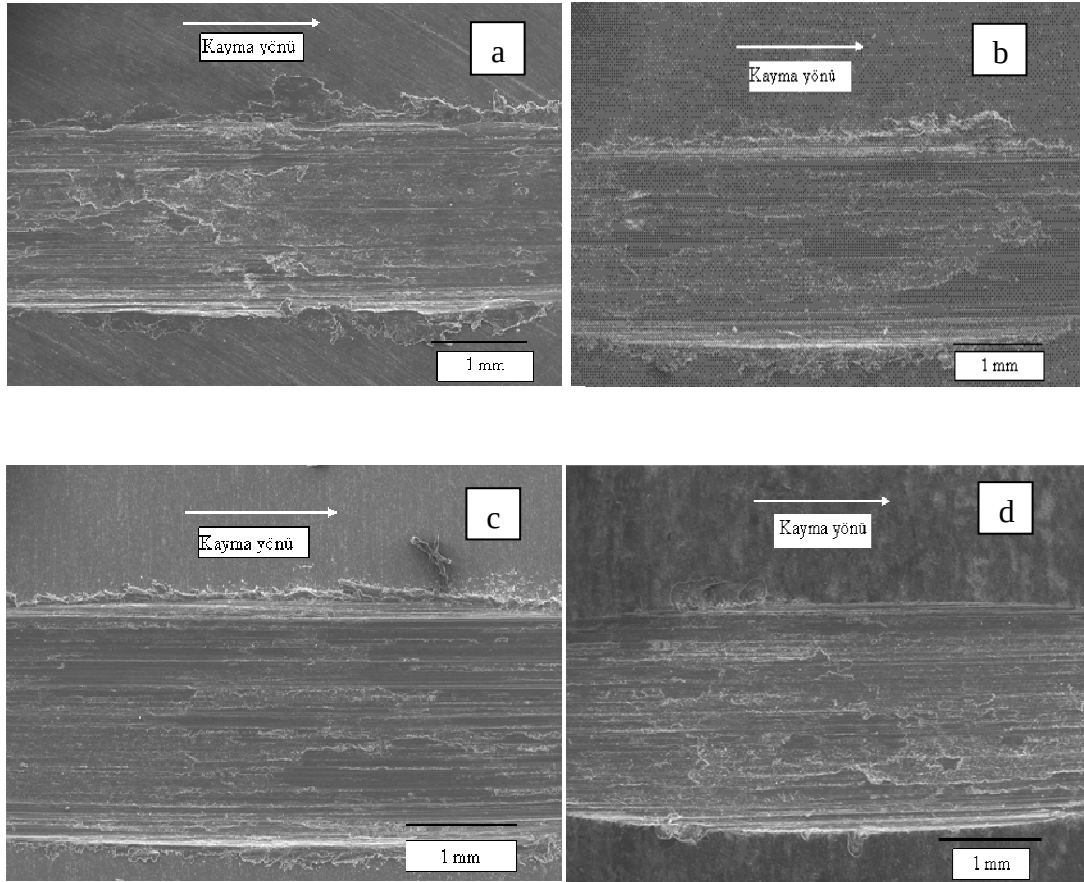
Ancak 203 N aşınma yükü için kaplamaların her ikisi için de aynı miktarda ağırlık kaybı elde edilmekle beraber T6 ısıtma işlemi uygulanmış malzeme için ortaya çıkan ağırlık kaybına yaklaşıma ortaya çıktığı belirlenmiştir. Akımsız nikel kaplanmış numuneler için Isıl işlemsiz (as-cast) ve T6 ısıtma işlemi uygulanmış 2014 Alüminyum numunelerine göre ağırlık kaybındaki maksimum azalmalar, en düşük aşınma yükünde sırasıyla %57 ve %46 olarak elde edilmiştir.

Sert eloksal kaplanmış numuneler için ısıtma işlemsiz ve T6 ısıtma işlemi uygulanmış numunelere göre ağırlık kaybındaki maksimum azalmalar ise, 135 N aşınma yükünde sırasıyla %37 ve %18 olarak elde edilmiştir.

Deney sonuçları göz önüne alındığında, uygulanan kaplamaların malzemelerin aşınma ve Sürtünmeli temas yorulma özelliklerini (özellikle düşük gerilme genlikleri için Sert eloksal kaplamalarda) önemli ölçüde geliştirdiği tespit edilmiştir.

Numunelerin aşınma yüzeyleri SEM ile incelendi. Bütün koşullar için aşınma yüzeylerin SEM görüntüleri aşağıdaki Şekil 4.29'de gösterilmiştir. Bu görüntüler çiziklerin (scratch), aşınma yüzeylerinin ana karakteristiğini oluşturduğunu göstermektedir.

Aşınma izleri (scarları) incelendiğinde, T6 ısıtma işlemsiz numunelerde aşınma izlerinin genişliğinin diğer koşullar ile mukayese edildiğinde oldukça fazla olduğu anlaşılmaktadır. T6 ısıtma işlemi sonucu aşınma özelliğinin iyileşmesi, ısıtma işlem sonucu oluşan sert ikincil faz partiküllerinin (Cu_2Al) etkisi ile meydana geldiği söylenebilir.



Şekil 4.29. Aşınma izlerinin SEM görüntüleri; (a) As-cast, (b) T6 ısıt işlemlili, (c) T6+Akımsız Nikel kaplanmış, (d) T6+Sert eloksal Kaplanmış

Diğer taraftan, Sert eloksal kaplanmış (Şekil 4.29d) numunelerde aşınma izlerinin daha dar olduğu tespit edilmiştir. Sert eloksal kaplamaların aşınma direncini artırması yüzey sertliğini artıran yoğun alüminyum oksit tabakasının varlığı ile açıklanabilir. Diğer taratan, akımsız nikel kaplamanın aşınma özelliklerinin geliştirmesi, yüzey sertliğinin artışı ve kaplamanın oluşturduğu bası artık gerilmelerinin varlığından kaynaklandığı söylenebilir.

5. SONUÇ

5.1. Sürtünmesiz ve Sürtünmeli Temas Yorulma Deneyi

5.1.1. Döner eğilmeli yorulma deneyleri

T6 ısıtıl işlemi görmüş taban malzeme, Akımsız Nikel ve Sert Eloksal kaplamalar için düz ve sürtünmeli temas yorulma ömür (S-N) eğrilerinde her üç durum için, düz yorulma değerleri ile karşılaştırıldığında, sürtünmeli temas etkisinden dolayı yorulma ömürlerinde önemli bir azalma olmaktadır. Sürtünmeli temas yorulma çatlakları, sürtünme kayma gerilmelerinin lokal olarak yığıldığı temas bölgesinde meydana gelir. Sürtünmeli temas yorulmasının zararlı etkisinden dolayı yorulma ömründe meydana gelen azalma sürtünmeli temasın sebep olduğu lokal gerilme yığılmalarının sebep olduğu çatlak oluşum ömründeki azalmadan dolayı oluştuğu kabul edilmektedir. Sürtünmeli temas yorulmasının çatlak oluşum periyodunda önemli bir rol oynadığı ve çatlak oluşumunun da toplam yorulma ömrünün önemli bir kısmını oluşturduğu göz önüne alınırsa, yorulma ömrü üzerinde sürtünmeli temas yorulmasının düşük gerilme genlikleri ve yüksek çevrim bölgesinde daha büyük bir etkiye sahip olduğu beklenebilir. Bu yüzden, yorulma ömründeki azalma düşük gerilme genliği seviyelerinde daha fazladır.

Akımsız Nikel kaplamanın sürtünmeli temas yorulma davranışı üzerindeki olumlu etkisi, kaplamanın yüksek dayanımı ve kaplama sırasında oluşan bası artık iç gerilmelerinin sonucu olabilir. Taban malzemeye karşılaştırıldığında, Akımsız Nikel kaplamanın yüksek dayanıma sahip olması, sürtünmeli temas yorulma davranışını olumlu etkilemesinde önemli faktörlerden biridir.

Yüzey sertliğindeki artış, adesiv ve abrasiv aşınmayı önleyecektir. Kaplamanın taban malzemeye oluşturduğu adesyona bağlı olarak, kaplama sürtünmeli temas yorulma davranışını olumlu yönde etkileyecektir. Diğer bir faktörde, Akımsız Nikel kaplama uygulaması sonucu meydana gelen bası artık gerilmelerinin yorulma

davranışı üzerinde olumlu etkiye sahip olmasındandır. (80–90⁰C) arasında seçilen işlem sıcaklığından oda sıcaklığına soğumada, kaplama ve taban malzemelerin termal genleşme katsayılarının farklılığından dolayı, akımsız nikel kaplama uygulama sırasında artık gerilmeler oluşur. Söz konusu bu gerilmelerin bası olduğu bilinmektedir. Bası artık gerilmeleri yüzeydeki sürtünmeli temas yorulma çatlaklarını kapatıp onların yayılmasını önlediği için sürtünmeli temas yorulma ömrü üzerinde olumlu etkiye sahiptirler.

Sert eloksal kaplamanın, sürtünmeli temas yorulma davranışı üzerindeki etkisi biraz farklılık göstermektedir. T6 işlemli uygulanmış taban malzemesi ile karşılaştırıldığında 300 MPa'ın üzerinde gerilme genliği seviyelerinde Sert Eloksal kaplamanın zararlı bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Söz konusu bu gerilme genliği seviyesinin üzerinde, sürtünmeli temas yorulma ömrünü artırdığı ve bu artışın gerilme genliğinin azalmasıyla daha da belirginleştiği görülmektedir. Düşük gerilme seviyelerinde elde edilen sürtünmeli temas yorulma ömür artışları, metal-metal temasını önleyen düşük sürtünme katsayısı ile açıklanabilir. Metal-metal temasının önlenmesi, taban malzemeyle karşılaştırıldığında Sert Eloksal kaplamanın, düşük gerilme yığılmalarının sonucu olarak, çatlak oluşumunu yavaşlatması bunun sonucu olarak da yüksek yorulma ömürlerinin elde edilmesine neden olmuş olabilir. Yüksek gerilme genliklerinde sert eloksal filmin kırıldığı ve çatlak başlangıcını oluşturarak yorulma hasarını hızlandırdığı düşünülmektedir.

Özellikle düşük gerilme genliklerinde ve ince film kalınlıklarında sert eloksal kaplama ve akımsız nikel kaplama uygulamalarının, T6 ısıtma işlemi görmüş alüminyum taban malzemesinin sürtünmeli temas yorulma davranışı üzerindeki faydalı etkileri, farklı etkiler ile yorulma çatlak oluşumunu geciktirmeleri ile ilişkili olabilir. Ayrıca, taban malzeme ile karşılaştırıldığında taban malzemedan daha yüksek mukavemete sahip olmaları (mikro sertlik ölçümleri arasındaki farklar) kaplama uygulanmış malzemelerin daha iyi sürtünmeli temas yorulma dayanımına sahip olmalarının muhtemel sebeplerinden biri olabilir. Özellikle akımsız nikel kaplamalar için, kaplama işlem sıcaklığından (yaklaşık 90⁰C) oda sıcaklığına soğutmada kaplama ve taban

malzemelerin termal genleşme katsayıları arasındaki farktan dolayı oluşan artık gerilmelerin diğer bir etken olduğu söylenebilir.

Aşınma kalıntılarının (debris) oluşumu ve bir bölgede yığılmasından dolayı, kayma bölgesindeki temas basıncı ortalama temas basıncından daha düşüktür. Diğer taraftan yapışma bölgesinde temas alanı küçüldüğünden temas basıncı ortalama temas basıncından daha yüksektir. Dolayısıyla yapışma bölgesi temas basıncı, kayma bölgesininkinden daha yüksektir. Bu yüzden kayma yapışma bölgesi sınırında gerilme yoğunlaşması oluşur ve kolayca çatlak başlayabilir.

5.1.2. Düzlemsel eğilmeli yorulma

Düzlemsel eğilmeli yükleme altında, sürtünmeli temas hasarına oldukça farklı mekanizmaların etki ettiği anlaşılmaktadır. Sürtünmeli temas hasarını etkileyen mekanizmalardan önemlileri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Bası artık gerilme oluşturma;
- Yanal (tangential) kuvvetleri azaltma;
- Sertliği artırma;
- Yüzey durumu, kaplama kalınlığı ve mekanik özellikleri

Herhangi bir yüzey işlemi ile yüzey tabakalarında bası artık gerilmelerinin oluşturulması sürtünmeli temas yorulma hasarını azaltacak belki de en önemli mekanizmalardan biridir. Bası artık gerilmeleri yüzeyde oluşan sürtünmeli temas çatlaklarını kapanmaya zorlayarak onların yayılmasını önler.

Buna ilave olarak bası artık gerilmeleri, başlangıç çatlak yayılma hızına etki eden sürtünmeli temasın (fretting) çeki gerilmelerini azaltır. Akımsız nikel kaplamalar için, kaplama işlem sıcaklığından (yaklaşık 90°C) oda sıcaklığına soğutmada kaplama ve

taban malzemelerin termal genleşme katsayıları arasındaki farktan dolayı bası artık gerilmeleri oluşmaktadır. Bu bası artık gerilmelerinin akımsız nikel kaplamaların sürtünmeli temas hasarını azaltmada önemli bir etken olduğu söylenebilir. Diğer taraftan çeki artık gerilmelerinin sürtünmeli teması olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Nishida ve arkadaşları farklı bir metot kullanarak AA 6063 alüminyum alaşım üzerine kaplanmış anodik oksit filminde çeki artık gerilmelerinin varlığını rapor etmiştir. Ayrıca, taban malzemeyle iyi bir adezyon kuvveti oluşturacak şekilde yüzey sertliğindeki artış sürtünmeli temas hasarını azaltabilir. Taban malzeme ile karşılaştırıldığında, her iki kaplamanın taban malzemedan daha yüksek mukavemete sahip olması (mikro sertlik ölçümleri arasındaki farklar) özellikle akımsız nikel uygulanmış numuneler için daha iyi sürtünmeli temas yorulma dayanımına sahip olmalarının muhtemel diğer sebeplerinden biri olabilir. Bununla birlikte, sert eloksallı kaplamanın (Şekil 59) oksit tabakaları pek çok küçük çatlak ihtiva ettiği için, bu çatlaklar taban malzemeye doğru büyüyerek hasarı hızlandırır. Bu durum, özellikle kalınlığı fazla olan sert eloksallı kaplamalarda daha az sürtünmeli temas (fretting) ömrünün elde edilmesinin diğer önemli sebeplerinden biri olarak açıklanabilir.

Yanal kuvvetlerin büyük değerleri, ara yüzeyde yorulma hasarını yoğunlaştırarak yüzey çatlaklarını oluşumunu hızlandıran büyük dinamik kayma gerilmelerinin oluşmasına neden olur. Bu yüzden genel bir kural olarak taban malzemeyle karşılaştırıldığında, yanal kuvvetleri azaltan yüzey işlemlerinin seçilmesi hedeflenir. Özellikle akımsız nikel kaplamalar için elde edilen yanal kuvvet değerlerinin taban malzemeye göre daha büyük oldukları anlaşılmıştır.

50–60 μm kalınlıklı sert eloksallı kaplamada, kaplama kalınlığının artması belki kaplamanın gevrekliğini artırıp tokluğunu azaltarak (mekanik özellikler), ayrıca kaplama yüzey alanında birim hacimdeki küçük çatlaklarının miktar ve boyutlarını artırarak, sürtünmeli temas yorulma hasarını daha derinleştirmiş olabilir. Diğer taraftan 12–15 μm kalınlıklı akımsız nikel kaplamalarda, kaplama kalınlığının artması kaplamanın taban malzemeye adezyonunu azaltmış olabilir.

Özet olarak 50–60 μm kalınlıklı sert eloksal kaplanmış numuneler taban malzemeye karşılaştırıldığında daha düşük yanal kuvvetler, daha sert ve daha pürüzlü bir yüzey ve yüksek çeki gerilmelerinin oluşmasını sağlamaktadır. Bunlarda ilk üçünün olumlu manada bir etkiye sahip olduğu umulmaktadır. Fakat kaplamanın doğasında var olan çatlaklar ve çeki artık gerilmelerinin, kaplamanın sürtünmeli temas hasarını olumsuz yönde etkilemesine neden olduğu düşünülmektedir.

Diğer taraftan, 12–15 μm kalınlıklı akımsız nikel kaplanmış numuneler taban malzemeye karşılaştırıldığında, daha sert bir yüzey, yüksek bası gerilmelerinin oluşması, daha yüksek yanal kuvvetler ve düzgün bir yüzey sağlamaktadır. Bu faktörlerden ilk ikisinin sürtünmeli temas yorulma hasarı üzerinde (özellikle bası artık gerilmelerinin) olumlu etkiye, diğer ikisinin ise ilk iki etkinin olumlu etkisini sınırladığı söylenebilir.

Fakat her iki kaplama türü için, her bir faktörün bağıl önemi ve sürtünmeli temas yorulma ömrü üzerindeki etkilerini tam olarak tanımlamanın şu an için mümkün olmadığı söylenebilir. Daha öncede belirtildiği gibi sürtünmeli temas yorulmasına etki eden 50'ye yakın parametre olduğu bilinmektedir. Bunların her birinin sürtünmeli temas üzerindeki etkisi, diğer etkenler ortadan kaldırılarak belirlenememiştir. Bu zorluk literatürde de ciddi bir problem olarak rapor edilmiştir. Bu mekanizmaların bağıl etkileri ve diğer etkilerle etkileşiminin oldukça karmaşık olduğu ve söz konusu kaplamaların çok dikkatli yapılacak optimizasyonu ile sürtünmeli temas hasarı üzerinde olumlu etkilerinin elde edilebileceği umulmaktadır.

5.2. Aşınma Deneyi

T6 ısıtıl işlemi uygulanmamış numuneler için elde edilen aşınma kaybı değerleri ile karşılaştırıldığında, T6 ısıtıl işlemi, Akımsız nikel ve sert eloksal kaplamaların alüminyum 2014 Alüminyum alaşımının aşınma direncini iyileştirdiği belirlenmiştir. T6 ısıtıl işleminin aşınma direncini artırması, sert ikinci faz partiküllerinin oluşmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Akımsız nikel kaplamanın sahip olduğu bası artık gerilmeleri aşınma direncinin artmasının temel sebebi olarak düşünölebilir. En iyi aşınma direncinin elde edildiği sert eloksal kaplamada, yüzeyde oluşturulan yoğun sert oksit filminin sahip olduğu yüksek aşınma direncinden kaynaklandığı açıktır.

Diğer taraftan, akımsız nikel kaplama sürtünmeli temas yorulması ve aşınma üzerinde iyileşme etkisini sahipken, sert eloksal kaplama malzemenin aşınma özelliğini iyileştirirken sürtünmeli temas özelliğini genelde azalttığı belirlenmiştir.

Bu sonuç, aşınma direnci yüksek olan yüzey işlemlerinin, her zaman sürtünmeli temas yorulması üzerinde iyileşme etkisine sahip olacağını garanti etmeyeceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Akay S.K., Yazıcı M., Bayram A., Avcı A., 2009. Fatigue Life Behaviour of the Dual-Phase Low Carbon Steel Sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 3358-3365.
- 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 oftitanium alloys, *Materials Science and Engineering A*, 237, 229-240.
- Bannantine, J.A., Comer, J.J., Handrock, J.L., 1990, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice-Hall, New Jersey, USA, 190.
- Brady, H.E., 1990. Fretting Wear, SAE. Teknical paper series, Aerospace Tecnology Conferance and Exposition Long Beach, California, 1 – 4.
- Broszeit, E., Kloos, K.H., Schweighofer, B., 1985. The Fretting Fatigue Behaviour of the Titanium Alloy TY-6Al-4V. *Proceedings of the Fifth international Conference on titanium Munich, Wesr Germany, Vol.4*, 2171-2178.
- Ceschini L., Minak G., 2008. Fatigue Behaviour of Low Temperature Carburised AISI 316L Austenitic Stainless Steel, *Surface and Coating Technology*, 202, 1778-1784.
- Chakravarty, S., Andrews, R.G., Patnaik, P.C., Koul, A.K., 1995. The Effect of Surface Modification on Fretting Fatigue in Ti Alloy Turbine Components, *JOM*, 31-35.
- Ebara R., Fujimura M., 2006. Fretting Fatigue Behaviour of Ti-6Al-4V Alloy Under Plane Bending Stress and Contact Stress, *Tribology International* , 39, 1184-1186.
- Eden, E.M., Rose, W.N., Cunningham, F.L., 1911. *The Endurance of Metals* Process institute for Mechanical Engineering, Vol. 4, 839-974.
- Endo H., Marui E., 2002. Studies on Fretting Wear: Influence of Rubbing Surface Materials and some Consideration, *Wear*, 253, 795-802.
- Fenner, A.J., Field, J.E., 1958. *Revue de Metallurgie*, Vol. 55, , Paris, France, 475-485.
- Fernando, U.S., Farrahi, G.H., Brown, W., 1994. In: *Fretting fatigue*. Eds: Waterhouse, R.B., Lindley, T.C., *Mechanical Engineering Publications*, 183-189,
- Firrao D., Matteis P., Scavino G., Ubertalli G., Ienco M.G., Pinasco M.R., Stagno E., Gerosa R., Rivolta B., Silvestri A., Silva G., Ghidini A., 2007. Relationships between tensile and Fracture Properties and fatigue properties of large plastic mould steel blocks, *Materials Science and Engineering A*, 468-470, 193-200.
- Fu Y., Batchelor W.A., Wang Y., Khor K.A., 1998. Fretting Wear Behaviors of Thermal Sprayed Hydroxyapatite (HA) Coating Under Unlubricated Conditions, *Wear*, 217, 132-139.
- Gaul, D.J. ve Duquette , D.J., 1980. The effect of fretting and environment on fatigue crack initiation and early propagation in a quenched and tempered 4130 steel. *Metallurgical Trans.* 11A, 1555.
- Gummarra C., Bray G.H., Duquette D.J., 2006. Fretting Fatigue in 2xxx Series Aerospace Aluminum Alloys, *Tribology International*, 39, 1206-1212.
- Gordelier S.C. and Chivers, T.C., 1984 *Wear*, 96, 153-161.

- Hamdy, M.M., Waterhouse, R.B., 1982. The Fretting Fatigue Behaviour of the Titanium Alloy YMY 829 at Temperatures up to 600 °C, *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol 5., No. 4, 267-274.
- Hirata M., Maejima M., Saruwatari K., Shigeno H., 1996. Rotational Bending Fatigue of Anodized Coating of Aluminum, *Aluminum Surface Technology*, Vol. 47-4, 1996, Pp: 376-377.
- Hoeppner D.W., 2006. Fretting Fatigue Case Studies of Engineering Components, *Tribology Technology*, 39, 1271-1276.
- Islam M.A., Chen S., Tomota Y., 2007. Tensile and Plane Bending Fatigue Properties of Two Trip Steel at Room Temperature in the Air-A Comparative Study, *ASM International*, 16, 248-253.
- Jin O., Mall S., 2004. Shear Force Effect on Fretting Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V, *Metalurgical and Materials Transactions*, 35A. 1, Academic Research Library, 131.
- Khan A.S., Miyashita Y., Mutoh Y., Koike T., 2008. Effect of Anodized Layer Thickness on Fatigue Behaviour of Magnesium Alloy, *Materials Science and Engineering A*, 474, 261-269.
- Koenen, A. Vermoux, Ph., Gras, R., 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., 1996. An Investigation on Surface Treatments for improving the Fretting Fatigue Resistance of Titanium Alloys, 82nd Meeting of the ASME, 1996.
- Kubiak K., Fouvry S., Marechal A.M., Vernet J.M., 2006. Behaviour of Shot Peening Combined With WC-Co HVOF Coating Under Complex Fretting Wear And Fretting Fatigue Loading Conditions, *Surface and Coatings Technology*, 201, 4323-4328
- Kubota M., Noyama N., Sakae C., Kondo Y., 2006. Fretting Fatigue in Hydrogen Gas, *Tribology International* 39, 1241-1247.
- Lee H., Jin O., Mall S., 2005. Fretting Fatigue Behaviour of Ti-6Al-4V with Dissimilar Mating Materials, 26, 393-402.
- Lee H., Mall S., Sathish S., 2005. Investigation Into Effects of Re-Shot-Peening on Fretting Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V, *Materials Science and Engineering A*, 390, 227- 232.
- Lee H., Mall S., 2004. Some Observations on Frictional Force During Fretting Fatigue, *Tribology Letters*, 17, 491-499.
- Li C.X., Sun Y., Bell T., 2000. Factors Influencing Fretting Fatigue Properties of Plasma Nitrided Low Alloy Steel, *Materials Science and Engineering A*, 292, 18-25.
- Majzoubi G.H., Jaleh M., 2006. Duplex Surface Treatments on AL7075-T6 Alloy Against Fretting Fatigue Behavior by Application of Titanium Coating Plus Nitriding, *Materials Science and Engineering*, 20, 1990-1998.
- Majzoubi, G.H., Nemati J., Rooz N., Farrahi G.H., 2009. Modification of fretting fatigue behaviour of AL7075-T6 alloy by the application of titanium coating using IBED technique and shot peening, *Tribology International*, 42, 121-129.
- Malkin, S., Majors, D.P., Courtney, H., 1972. Surface Effects during Fretting Fatigue of Ti 6Al-4V, *Wear Magazine* No. 22, 235 – 244.

- Merati A., Eastaugh G., 2007. Determination of Fatigue Related Discontinuity state of 7000 Series of Aerospace Aluminum Alloys, *Engineering Failure Analysis*, 14, 673-685.
- Mindlin, R.D., 1995. Compliance of Elastic Bodies in Contact, *ASME Journal of Modification on Fretting Fatigue in Ti Alloy Turbine Components*, JOM, 31-35.
- Mutoh Y., Satoh, T., Tsunoda E., 1992 Improving Fretting Strenght at Elevated Temperatures by Shot Peening in Steam Turbine Steel, *Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment*, ASTM STP 1159, 199-209.
- Naidu N.K., Raman S., 2005. Effect of Shot Blasting on Plain Fatigue and Fretting Fatigue Behaviour of Al-Mg-Si Alloy AA 6061, *International Journal of Fatigue*, 27, 323-331.
- Nakazava H., Kodama S., 1985. Statistical S – N Testing method with 14 specimens: JSME Standard method for determination of S – N curves.
- Nakazawa, K., Mayuroma, N.-Hanawa, T., 2003. Effect Of Contact Pressure on Fretting Fatigue of Austenitic Stainless Steel, *Tribology International*, 36, 79-85.
- Niinomi M., 2006. Fatigue Characteristics of Metallic Biomaterials, *International Journal of Fatigue*, 21, 384-385.
- Nishioka, K., Hirakawa, K., 1972. *Bull. Jpn. Soc. Mech. Engr*, 15, 135.
- Okane, M., Shiozawa., Ishikura T., 2000. Fretting Fatigue Behaviour of TiN-Coated Steel, *Fretting Fatigue: Current Technology and Practices*, ASTM STP 1367, 1234-1240.
- Ounpanich D., Mutoh Y., Yoshii K., 2009. Plain fatigue and fretting fatigue behaviour of hot-rolled steel sheet after cold spinning, *Materials Science and Engineering A*, 509, 14-22.
- Pantleon K., Kessler O., Hoffann F., Mayr P., 1999. Induction surface hardening of hard coated steels, *Surface and coatings Technology*, 495 – 501 120-121.
- Privett H.M., Fujishiro S., 1994. Coating Studiesfor Prevention of Fretting Fatigue in Jet Engine Titanium Compressor Biade Dovetails, *Minerals, Metals & Materials Society*, 401-410.
- Rajasekaran B., Ganesh Sundara Raman S., Joshi S.V., Sundurarajan G., 2006. Effect of Detonation Gun Sprayed Cu-Ni-In Coating on Plain Fatigue and Fretting Fatigue Behaviour of Al-Mg-Si Alloy, *Surface and Coatings Technology*, 201, 1548-1558.
- Rajasekaran B., Raman S., Krishna L., Joshi S.V., Sundurarajan G., 2008. Influence of Microac Oxidation and Hard Anodizing on Plain Fatigue and Fretting Fatigue Behaviour of Al-Mg-Si Alloy, *Surface and Coating Technology* , 202, 1462-1469.
- Raman S., Jayaprakash, M., 2006. Influence of plasma nitriding on plain Fatigue and fretting Fatigue behaviour of AISI 304 austenitic stainless steel, *Surface and Coatings Technology*, 202, 1748-1754.
- Ruiz, C., Boddington, P.H.B., Chen, K.C., 1984. An Investigation of Fatigue and Fretting in a Dovetail Joint, *Experimental Mechanics*, 208 – 217.
- Ruiz C., Chen K.C., 1986. Fatigue of Engineering materials and structures, *institution of Mechanical Engineers, United Kingdom*, sayfa 187-194.
- Samuels, L. E., 1993. *Metals Engineering, a Technical Guide*. ASM International. Metals Park. 3. Press Ohio.

- Shen G., Luo, J., Wang, S., Liang, Y., 1995. The Surface Preventing Methods for Fretting Fatigue on TC11 Titanium Alloy, *Titanium: Science and Technology*, 2046-2052.
- Shinde S.R., Elliot III C.B., Hoepfner D.W., 2007. Quantitative Analysis of Fretting Fatigue Degradation in 7075-T6 Aluminum Alloy, *Tribology International*, 40, 542-547.
- Singh S., Goel B.D., 2005. Influence of Thermomechanical aging on Fatigue Behaviour of 2014 Al-Alloy, *Bull. Mater. Sci.* Vol. 28, No. 2. Pp:91-96.
- Sines, G., Waisman, J.L., 1959. *Metal Fatigue*, McGraw-Hill company. 71.
- Sohar Ch.S., Betzwar-Kotas A., Gierl Ch., Weiss B., Danninger H., 2008. Anisotropy Effect on Gigacycle Fatigue Behaviour of High Cr Alloyed Cold Work Tool Steel, *Kovove Material*, 46, 197-207.
- Thomlinson G.A., 1927. The rusting of steel surfaces in contact, *Proceedings of the Royal.*
- Warlow F.J., 1941 Fretting Corrosion and Fatigue Strength, *Proceedings of the Institute on Mechanical Engineers*, 146, 32-34.
- Waterhouse, R.B., 1992. Fretting Fatigue international Materials Review, Vol. 37, No.2, 77-97.
- Waterhouse, R.B., 1981. Fretting Fatigue. Applied Science Publishers Ltd, .221- 240.
- Waterhouse, R.B., 1989. Fretting Wear and Fretting Fatigue at Temperatures up to 600°C, *AGARD, High Temperature Surface interactions*, 233-240.
- Waterhouse, R.B., Iwabuchi, A., 1985. The Composition and Properties of Surface, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 19, 2A, 134- 139.
- Waterhouse, R.B., Trowsdale, A.J., 1992. Residual Stress and Surface Roughness in Fretting Fatigue, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 25, 1A, 236- 239.
- Waterhouse, R.B., 1992. ASTM STP 1159, American Society for Testing and Materials, 60.
- Waterhouse, R.B., Bethune, B., 1968. Electrochemical studies of fretting corrosion *Wear*.12,27.
- Waterhouse, R.B., Sunders, D.A., 1979. The Effect of Shot Peening on the Fretting Fatigue Behaviour of an Austenitic Stainless Steel and a Mild Steel, *WEAR Magazine*, No. 53, 381-386.
- Vadiraj A., Kamaraj M., 2006. Characterization of Fretting Fatigue Damage of PVD TiN Coated Biomedical Titanium Alloys, *Surface and Coatings Technology* , 200, 4538-4542.
- Vadiraj A., Kamaraj M., 2007. Effect of Surface Treatments on Fretting Fatigue Damage of Biomedical Titanium Alloys, *Tribology International*, 40, 82-88.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Erzurum ilinde doğdu. İlkokulu İstanbul’da, Orta ve Lise Öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2002 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde üniversite öğrenim hayatına başladı ve 2006 yılında Makine Mühendisi unvanı ile mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.