

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPRAK YAY YAPIMINDA KULLANILAN 35 Cr 4 ÇELİĞİNİN FRETİNG
YORULMA DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

77662

Ahmet HASÇALIK

DOKTORA TEZİ

77662

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

1998
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPRAK YAY YAPIMINDA KULLANILAN 35 Cr 4 ÇELİĞİNİN FRETİNG
YORULMA DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI

Ahmet HASÇALIK

DOKTORA TEZİ

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu Tez/...../ 199... Tarihinde Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından Oybirliği /Oyçokluğu İle Başarılı / Başarısız Olarak Değerlendirilmiştir.

(İmza)

(İmza)

(İmza)

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Mustafa Aksoy

ÖZET**DOKTORA TEZİ****YAPRAK YAY YAPIMINDA KULLANILAN 35 Cr 4 ÇELİĞİNİN FRETİNG
YORULMA DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI****Ahmet HASÇALIK**

**Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalı
1998, Sayfa : 120**

Bu çalışmada, taşıtların askı donanımlarındaki yaprak yayların yapımında kullanılan 35 Cr 4 çeliğinin normal ve fretting yorulma davranışları üzerinde, belirlenen ısıt işlemlerin ve bilyalı dövme işleminin etkisi incelenmiş ve fretting şartları altında çatlak ilerleme hızları tesbit edilmiştir.

Çalışmanın birinci bölümünde genel kavramlar açıklanmıştır. İkinci bölümde fretting yorulmanın ilk safhasını teşkil eden fretting aşınma ve tesir eden faktörler incelenmiştir. Üçüncü bölümde fretting yorulma mekanizması ve tesir eden faktörler, dördüncü bölümde normal yorulma ve yorulmaya tesir eden temel faktörler incelenmiştir. Beşinci bölümde bilyalı dövme işlemi kısaca tanıtılmış ve bilyalı dövme işleminin yorulmaya tesiri incelenmiştir. Çalışmanın altıncı bölümü deney çalışmalarını, yedinci bölümü deney sonuçları ve tartışmayı, sekizinci bölümü ise, genel sonuç ve önerileri kapsamaktadır.

Yorulma deneyleri normal ve fretting yorulma olarak iki farklı şekilde yapılmış ve deneyler için düzlem eğmeli bir deney düzeneği kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, numunelere normalizasyon ısı işlemi ve yağda sertleştirme işleminden sonra 300, 400 ve 500 °C de temperleme işlemi uygulanmıştır. Normalleştirilmiş numunelere 0.20 ve 0,30 mm, 500 °C de temperlenmiş numunelere 0,13 mm dövme şiddetlerinde bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Ayrıca normalizasyon ısı işlemi uygulanan numunelerde 1 - 1,5 - 2 kg normal yük uygulanmak suretiyle, temas basıncının fretting yorulmaya tesiri incelenmiştir. Numunelerin diğer mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, çekme deneyi, çentik darbe deneyi, sertlik ölçümleri, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ve bilyalı dövülmüş numunelerde mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Yorulma numunelerinin mikroyapıları ve kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskopu ile incelenmiştir.

Fretting yorulma deneylerinde temperleme sıcaklığının, temas basıncının ve bilyalı dövme işlemlerinin yorulma çatlaklarının başlama ve ilerleme hızlarına etkisini incelemek amacıyla, belirli çevrim sayılarında çatlak boyu optik mikroskopla ölçülmüş ve çatlakların ilerleme hızları tesbit edilmiştir.

Normal ve fretting yorulma deneylerinde ısı işlem uygulanan numuneler içerisinde en yüksek yorulma dayanımı 300 °C de temperlenmiş numunelerde elde edilmiştir. Artan temperleme sıcaklığı ile yorulma dayanımı düşmektedir. En düşük yorulma dayanımı ise normalleştirilmiş numunelerde elde edilmiştir. Plastik deformasyona karşı malzemenin direncinin azalması yorulma dayanımının düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca, fretting yorulmada yüzey sertliğine bağlı olarak, yüzeyde meydana gelen aşınma yorulma dayanımı açısından etkili olmaktadır. Fretting yorulma deneylerinde normal yükün tesiri ile ilgili çalışmada, artan temas basıncıyla yorulma dayanımının düştüğü görülmektedir. Buna teğetsel gerilmedeki artışın neden olduğu sonucuna varılmıştır.

Bilyalı dövme işlemi, normal ve fretting yorulma dayanımlarını önemli ölçüde artırmaktadır. Her iki yorulma tipi için, en yüksek yorulma dayanımı normalleştirilmiş ve 0,30 mm dövme şiddetinde bilyalı dövme işlemi uygulanan numunelerde elde edilmiştir. 500 °C de temperlenmiş numunelerde dövme şiddetinin düşük olmasına bağlı olarak, yorulma dayanımı daha düşüktür ancak, yorulma dayanımındaki artış oranı daha

yüksek tesbit edilmiştir. Bilyalı dövme işlemi, yüzeyde ve yüzey altında belirli bir derinliğe kadar basma gerilmeli tabaka oluşturarak, yorulma dayanımını artırmaktadır.

Çatlak ilerleme hızlarının tesbit edilmesi ile ilgili deneylerde temas basıncının artışıyla beraber çatlakların başladığı çevrim sayısı azalmakta ve ilerleme hızı artmaktadır. Yüzeydeki aşınma şiddetine bağlı olarak çatlaklar erken başlamakta ve hızlı ilerlemektedir. Isıl işlem uygulanan numunelerde 300 °C de temperlenmiş numunelerin çatlak ilerleme hızı diğerlerine göre daha yavaştır. Temperleme sıcaklığı arttıkça çatlak ilerleme hızı artmaktadır. Frettingin ilk safhasında, numunelerin yüzey sertliği etkili olurken, daha sonra çatlak boyutları ilerleme hızında etkili olmaktadır. Deney şartlarında, bilyalı dövme işlemi çatlak ilerleme hızlarını hem başlama hem de ilerleme safhalarında yavaşlatmaktadır. Bilyalı dövme işlemi ile yüzey ve yüzey altında meydana gelen basma gerilmeli tabaka çatlakların ilerlemesini geciktirmektedir.

Normal ve fretting yorulma için, uygulanan ısıl işlemlerle, bilyalı dövme işlemi mukayese edildiğinde, bilyalı dövme işleminin yorulma dayanımı açısından daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Normalizasyon ısıl işlemi uygulanan numunelerde 0,30 mm dövme şiddeti uygulanması ile yorulma dayanımında , fretting yorulma için % 63, normal yorulma için % 62 oranında bir artış sağlanmıştır. 500 °C de temperlenen ve 0,13 mm dövme şiddeti uygulanan numunelerde ise, yorulma dayanımında elde edilen artış fretting yorulma için % 34, normal yorulma için % 41 olmuştur.

ANAHTAR KELİMELEER : Yorulma, fretting aşınması, fretting yorulma, triboloji, çatlak ilerleme mekanizması, bilyalı dövme, basma gerilmesi

ABSTRACT

PhD. THESIS

**THE INVESTIGATION OF FRETTING FATIGUE BEHAVIOUR OF 35 Cr 4
STEEL USED IN THE PRODUCTION OF LEAF SPRING**

Ahmet HASÇALIK

**University of Firat
Faculty of Technical Education
Department of Machine
1998, Page : 120**

In this study, the effects of heat treatment and shot peening on the fretting and plain fatigue behaviour of 35 Cr 4 steel used in the production of leaf springs in suspension systems of vehicles were investigated and the crack propagation rates were determined under the fretting conditions.

In the first chapter of the study, basic concepts were explained. In the second chapter, fretting wear which is the first stage of the fretting fatigue and its parameters were presented. In the third chapter the mechanism of the fretting fatigue and the factors, in the fourth chapter plain fatigue and the factors effecting were given. In the fifth chapter, shot peening was defined briefly and its effects on the fatigue behaviour were explained. In the sixth chapter of study, the experiments done and in the seventh chapter the results and discussions and in the final and eighth chapter the recommendations were given.

In the study, fatigue tests were done in two different modes; plain and fretting fatigues. Plane reversed bending experiments apparatus was used for the experiments. The specimens were normalized and tempered at 300, 400 and 500 °C after oil

quenched. Shot peening was applied to the normalized specimens at a peening intensity of 0,20 and 0,30 mm and to the tempered specimens at 500 °C at a peening intensity of 0,13 mm. In addition, the effects of the contact pressure on the fretting fatigue of the specimens normalized were investigated using normal loads of 1 – 1,5 – 2 kg. In order to determine the other mechanical properties of the specimens, tension, charpy tests were applied and hardness values, surface roughness and microhardness measurements for shot peened specimens were done. The microstructure and fractured surfaces were examined with SEM.

In order to determine the effects of tempering temperature, contact pressure and shot peening on crack initiation and propagation in fretting fatigue tests, the crack length were measured at certain cycles with optical microscope and the crack propagation rates were determined.

In plain and fretting fatigue tests, highest fatigue strength was obtain with the specimens tempered at 300 °C. With the increasing tempering temperature, fatigue strength decreased. The lowest fatigue strength were seen with the normalized specimens. The decrease in plastic deformation resistance causes the fatigue strength to fall. In addition, the wear occurred on the surfaces depending on the hardness effects the fatigue behaviour in fretting fatigue. Increasing contact pressure results in a decrease in fatigue strength. This is because of the increase in tangential stresses.

Shot peening considerably increases the fatigue strength. The highest fatigue strength for both fatigue modes, were obtained for the normalized and 0,30 mm shot peened specimens. In the specimens tempered at 500 °C, the fatigue strength was low depending on the low peening intensity but the increase rate in the fatigue strength was highest. Shot peening increases the fatigue strength by forming a layer under compression into a certain distance under the surface.

With the increase of the contact pressure, the cycle for the crack initiation decreases and the crack propagates more rapidly. Depending on the amount of the wear on the surface, cracks initiates earlier and propagates rapidly. In the heat treated specimens, the crack propagation rates were lower for the specimens tempered at 300 °C. With the increase of the tempering temperature, the crack propagation rates increases. In the first stage of the fretting, the surface hardness of the specimens are dominate while in the latter stages the crack lengths becomes important. In the

experiment conditions, shot peening lowers the crack propagation rates at both initial and latter stages. Compressed layer as a result of shot peening retards the crack propagation.

For plain and fretting fatigue, the comparison of shot peening with the heat treatment shows that shot peening is more effective in fatigue behaviour. With the normalized specimens, shot peening with an intensity of 0,30 mm increased the fretting fatigue life as 63 % and the plain fatigue life as 62 %. In the specimens tempered at 500 °C and shot peened with an intensity of 0,13 mm, the plain fatigue life and fretting fatigue life increased 34 % and 41% respectively.

KEY WORDS : Fatigue, fretting wear, fretting fatigue, tribology, crack growth mechanism, shot peening, compressive residual stresses.



TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yönlendirilmesi ve tamamlanmasında sağladığı her türlü katkıdan dolayı, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Bölüm Başkanı tez yöneticisi hocam, sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa Aksoy' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi laboratuvarında çalışma imkanı sağlayan ve çalışmalarda yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Nuri Orhan'a, deney düzeneğinin kurulmasında yardımcı olan Öğr. Gör. Vedat Savaş'a ve emeği geçenlere teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
Özet.....	I
Abstract.....	IV
Teşekkür.....	VII
İçindekiler.....	VIII
Semboller.....	XI
Şekiller.....	XIII
Tablolar.....	XVII
Resimler.....	XIX
1. GİRİŞ.....	1
2. FRETİNG AŞINMA.....	4
2.1. Fretting Aşınmaya Tesir Eden Faktörler.....	8
2.1.1. Çevrim sayısı.....	8
2.1.2. Normal yük.....	9
2.1.3. Frekans.....	10
2.1.4. Kayma genliği.....	10
2.1.5. Yüzey pürüzlülüğü.....	12
2.1.6. Sertlik.....	12
2.1.7. Çevre.....	12
3. FRETİNG YORULMA.....	16
3.1. Yorulma Çatlaklarının Başlaması.....	16
3.2. Yorulma Çatlaklarının İlerlemesi.....	18
3.3. Fretting Yorulmasına Tesir Eden Faktörler.....	20
3.3.1. Kayma genliği.....	20
3.3.2. Temas basıncı.....	20
3.3.3. Frekans.....	21
3.3.4. Malzeme bileşimi.....	21
3.3.5. Çevre.....	22
3.4. Fretting Yorulma Hasarlarının Belirlenmesi ve Örnekler.....	22
3.5. Fretting Hasarlarını Önleme Metotları.....	24

3.5.1. Dizayn.....	24
3.5.2. Malzeme seçimi.....	25
3.5.3. Kaplamalar.....	27
3.5.4. Yağlama.....	28
3.5.5. Soğuk yüzey işlemleri.....	29
4. NORMAL YORULMA.....	30
4.1. Gerilme Oranı.....	30
4.2. S-N Eğrileri.....	31
4.3. Kırılma Yüzeyi Karakteristikleri.....	32
4.4. Yorulma Mekanizması.....	33
4.5. Yorulmaya Tesir Eden Faktörler.....	37
4.5.1. Gerilme yoğunlaşması.....	37
4.5.2. Boyut.....	38
4.5.3. Yüzey etkileri.....	38
4.5.4. Sıcaklık.....	40
4.5.5. Frekans.....	40
4.5.6. Metalurjik faktörler.....	40
4.5.6.1. Tane boyutu.....	40
4.5.6.2. Alaşımlama.....	40
4.5.6.3. İkinci fazlar.....	41
4.5.6.4. Isıl işlemler.....	41
5. BİLYALI DÖVME.....	43
5.1. Dövme Şiddeti.....	45
5.2. Dövme Şiddetini Etkileyen Faktörler.....	46
5.3. Doyum Oranı.....	48
5.4. Bilyaların Tipi ve Kalitesi.....	49
5.5. Bilyalı Dövme Sistemleri.....	50
5.6. Bilyalı Dövme İşleminin Yorulmaya Etkisi.....	50
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	52
6.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme.....	52
6.2. Numunelerin Hazırlanması ve Deneylerin Yapılışı.....	52
6.2.1. Çekme deneylerinin yapılışı.....	56

6.2.2. Çentik darbe deneylerinin yapılışı.....	56
6.2.3. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri.....	57
6.2.4. Sertlik ölçümleri.....	57
6.2.5. Mikrosertlik ölçümleri.....	57
6.2.6. Metalografik incelemeler.....	57
6.2.7. Yorulma deneylerinin yapılışı.....	58
6.2.8. Fretting yorulma çatlaklarının ilerleme hızları deneylerinin yapılışı.....	62
7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	63
7.1. Çekme deneyi sonuçları.....	63
7.2. Çentik darbe deneyi sonuçları.....	65
7.3. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları.....	67
7.4. Sertlik ölçüm sonuçları.....	68
7.5. Mikrosertlik ölçüm sonuçları.....	70
7.6. Mikroyapı sonuçları.....	72
7.7. Yorulma deneyi sonuçları.....	75
7.7.1. Normal yorulma deney sonuçları.....	75
7.7.2. Fretting yorulma deney sonuçları.....	93
7.8. Fretting yorulma çatlaklarının ilerleme hızları deneylerinin sonuçları.....	109
8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	117
9. KAYNAKLAR.....	121

SEMBOLLER

W :	Ağırlık kaybı (mg)
L :	Yük (kg)
C :	Çevrim sayısı
f :	Frekans
I :	Kayma genliği (μm)
k_0, k_1, k_2 :	Sabitler
V :	Aşınma hacmi (mm^3)
Hv :	Vickers sertlik değeri
δ_2 :	Frettingsiz şartlar altında bir yorulma çatlaklarının başlaması için değişen eğme gerilmesi (kg/mm^2)
δ_1 :	Fretting şartlarında yorulma çatlaklarının başlaması için değişen eğme gerilmesi (kg/mm^2)
τ_2 :	Frettingsiz şartlarda bir yorulma çatlaklarının başlaması için değişen burulma gerilmesi (kg/mm^2)
τ_1 :	Fretting şartlarında bir yorulma çatlaklarının başlaması için değişen burulma gerilmesi (kg/mm^2)
σ_{fw1} :	Fretting şartlarında çatlakların başlaması için gerekli gerilme (kg/mm^2)
σ_{w1} :	Frettingsiz şartlarda çatlakların başlaması için gerekli gerilme (kg/mm^2)
μ :	Sürtünme katsayısı
p_0 :	Maksimum temas basıncı (kg/mm^2)
A :	Değişen gerilme genliğinin ortalama gerilmeye oranı
Sa :	Değişen gerilme (kg/mm^2)
Sm :	Ortalama gerilme (kg/mm^2)
R :	Gerilme oranı
$S_{\max}$:	Maksimum gerilme (kg/mm^2)
$S_{\min}$:	Minimum gerilme (kg/mm^2)
Sr :	Gerilme aralığı (kg/mm^2)
N :	Çevrim sayısı
PSB :	Devamlı kayma bantları

m, C : Malzemeye bağılı sabitler

ΔK : Gerilim şiddet aralığı

t : Zaman (dk)

L : Mesafe (mm)

E : Elastisite modülü

I : Atalet momenti (mm^4)

M : Eğme momenti (kg mm)

W : Mukavemet momenti (mm^3)

a : Çatlak boyu (μm)



ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Fretting aşınma sürecinin şematik görünüşü

Şekil 2.2. Havada ve deniz suyunda çevrim sayısı ve aşınma hacmi arasındaki ilişki

Şekil 2.3. Aşınma hacmi ve frekans arasındaki ilişki

Şekil 2.4. Yumuşak çelik için kayma genliği ve aşınma hızı ilişkisi

Şekil 2.5. Havada düzlem numunenin sertliği ve aşınma hacmi arasındaki ilişki

Şekil 2.6. 0,45 C çeliği ve paslanmaz çelik 304 için aşınma - sıcaklık ilişkisi

Şekil 3.1. SUS304 L çeliğinin fretting ve normal yorulma çatlaklarının ilerlemesi

Şekil 3.2. Metalurjik uygunluk grafiği

Şekil 3.3. Mo_2S kaplanmış çelik yüzeyler için çevrim sayısı ve sürtünme enerjisinin değişimi

Şekil 4.1. Çevrimli gerilme ile ilgili parametreler

Şekil 4.2. Orta mukavemetli çelikler için S – N eğrisi

Şekil 4.3. Çatlak oluşumunun şematik olarak gösterilmesi

Şekil 4.4. Çatlak gelişim safhalarının şematik gösterimi

Şekil 4.5. İkinci safhada çatlak gelişiminin şematik gösterimi

Şekil 4.6. Çeliklerin yorulma özelliklerinde yüzey şartlarının tesiri

Şekil 4.7. Rockwell sertliğinin bir fonksiyonu olarak alaşım çeliklerinin yorulma sınırı

Şekil 5.1. Bilyalı dövülmüş bir parçada oluşan artık gerilme profili

Şekil 5.2. Almen test şeritlerinin ölçüleri

Şekil 5.3. İki farklı sertliğe sahip çelik için dövme şiddeti ile basma gerilmeli tabaka derinliğinin değişimi

Şekil 5.4. Çeşitli bilya çapları için yay yüksekliğinde işlem zamanının tesiri

Şekil 5.5. İşlem zamanının doyum oranına etkisi

Şekil 5.6. Dövme süresi ile yay yüksekliği ilişkisinden doyum oranının tesbit edilmesi

Şekil 6.1. Deneysel çalışmaların akış diyagramı

Şekil 6.2. Çekme numunelerinin ölçüleri

Şekil 6.3. Çentik darbe deneyi numunelerinin ölçüleri

Şekil 6.4. Yorulma numunelerinin ölçüleri

Şekil 6.5. Deney düzeneğinin krokisi

Şekil 6.6. Gerilme kalibrasyon eğrisi

Şekil 7.1. Normalizasyon ısıt işlemleri uygulanmış numunelerin gerilme – uzama eğrisi

Şekil 7.2. 300 °C de temperlenmiş numunelerin gerilme – uzama eğrisi

Şekil 7.3. 400 °C de temperlenmiş numunelerin gerilme – uzama eğrisi

Şekil 7.4. 500 °C de temperlenmiş numunelerin gerilme – uzama eğrisi

Şekil 7.5. Çentik darbe deney sonuçlarının grafik olarak değerleri

Şekil 7.6. Temperleme sıcaklığına göre çekme mukavemeti ve tokluk değişimi

Şekil 7.7. Bilyalı dövme işleminin yüzey pürüzlülüğüne tesiri

Şekil 7.8. İşlemlere göre sertlik dağılımı

Şekil 7.9. Normalizasyon ve 0,20 mm dövme şiddetine sahip numunelerde enine kesit boyunca sertlik dağılımı

Şekil 7.10. Normalizasyon ve 0,30 mm dövme şiddetine sahip numunelerde enine kesit boyunca sertlik dağılımı

Şekil 7.11. 500 °C de temperlenmiş ve 0,13 mm dövme şiddetine sahip numunelerde enine kesit boyunca sertlik dağılımı

Şekil 7.12. Normalizasyon ısıt işlemleri uygulanan numunelerde S – N diyagramı

Şekil 7.13. 300 °C de temperlenmiş numunelerde normal yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.14. 400 °C de temperlenmiş numunelerde normal yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.15. 500 °C de temperlenmiş numunelerde normal yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.16. Farklı ısıt işlemleri uygulanan numunelerin S – N diyagramlarının toplu olarak gösterilmesi

Şekil 7.17. Yorulma dayanımı ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki

Şekil 7.18. Yorulma dayanımı ile sertlik arasındaki ilişki

Şekil 7.19. Yorulma dayanımının çentik darbe değerleri ile değişimi

Şekil 7.20. Normalleştirilmiş ve 0,20 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerde normal yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.21. Normalleştirilmiş ve 0,30 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerde normal yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.22. Normalleştirilmiş numunelerde bilyalı dövme işlemi ile yorulma dayanımının değişimi

Şekil 7.23. 500 °C de temperlenmiş ve 0,13 mm dövme şiddeti ile dövülen numunelerin S – N diyagramı

Şekil 7.24. 500 °C de temperlenmiş ve 500 °C temperleme sonrası bilyalı dövme işlemi

uygulanan numunelerin normal yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.25. İşlem şartlarına göre normal yorulma sınırının değişimi

Şekil 7.26. Normalizasyon ısı işlemi uygulanmış numunelerde fretting yorulma S – N diyagramı ($p = 1 \text{ kg}$)

Şekil 7.27. Normalizasyon ısı işlemi uygulanmış numunelerde fretting yorulma S – N diyagramı ($p = 1,5 \text{ kg}$)

Şekil 7.28. Normalizasyon ısı işlemi uygulanmış numunelerde fretting yorulma S – N diyagramı ($p = 2 \text{ kg}$)

Şekil 7.29. Normalizasyon ısı işlemi uygulanmış numunelerde normal ve fretting yorulma deneylerinin S – N diyagramı

Şekil 7.30. 300°C de temperlenmiş numunelerde fretting yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.31. 400°C de temperlenmiş numunelerde fretting yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.32. 500°C de temperlenmiş numunelerde fretting yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.33. Normalizasyon ve temperleme sıcaklığına göre S – N diyagramları

Şekil 7.34. Temperleme sıcaklığına göre normal ve fretting yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.35. Normalleştirilmiş ve $0,20 \text{ mm}$ dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerde fretting yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.36. Normalleştirilmiş ve $0,30 \text{ mm}$ dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerde fretting yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.37. Normalizasyon ve normalizasyon sonrası bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerde dövme şiddetine göre fretting yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.38. 500°C de temperlenmiş ve $0,13 \text{ mm}$ dövme şiddeti ile dövülen numunelerin fretting yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.39. 500°C temperleme ve 500°C temperleme sonrası bilyalı dövme işlemi uygulanan numunelerin fretting yorulma S – N diyagramı

Şekil 7.40. İşlem şartlarına göre fretting yorulma sınırının değişimi

Şekil 7.41. Normalleştirilmiş numunelerde baskı ağırlığına göre çatlak boyu ve çevrim sayısı arasındaki ilişki

Şekil 7.42. Normalleştirilmiş numunelerde baskı ağırlığına göre çatlak ilerleme hızları

Şekil 7.43. Temperleme sıcaklıklarına göre çatlak boyu ve çevrim sayısı arasındaki ilişki

Şekil 7.44. Temperleme sıcaklıklarına göre çatlak ilerleme hızları

Şekil 7.45. Normalleştirilmiş ve bilyalı dövülmüş numunelerde çatlak boyu ve çevrim sayısı arasındaki ilişki

Şekil 7.46. Normalleştirilmiş ve bilyalı dövülmüş numunelerde çatlak ilerleme hızları

Şekil 7.47. 500 °C de temperlenmiş ve temperleme sonrası bilyalı dövülmüş numunelerde çatlak boyu ve çevrim sayısı ilişkisi

Şekil 7.48. 500 °C de temperlenmiş ve temperleme sonrası bilyalı dövülmüş numunelerde çatlak ilerleme hızları



TABLÖLAR

- Tablo 6.1. Deneylerde kullanılan malzemenin kimyasal analizi
- Tablo 6.2. Bilyalı dövmeğe ait işlem şartları
- Tablo 7.1. Çekme deneyi sonuçları
- Tablo 7.2. Çentik darbe deneyi sonuçları
- Tablo 7.3. Yüzey pürüzlülük değeri
- Tablo 7.4. Sertlik ölçüm sonuçları
- Tablo 7.5. Bilyalı dövülen numunelerde enine kesit boyunca sertlik dağılımı
- Tablo 7.6. Normalizasyon ısı işlem uygulanmış numunelerde normal yorulma deney sonuçları
- Tablo 7.7. 300 °C de temperlenmiş numunelerde normal yorulma deney sonuçları
- Tablo 7.8. 400 °C de temperlenmiş numunelerde normal yorulma deney sonuçları
- Tablo 7.9. 500 °C de temperlenmiş numunelerde normal yorulma deney sonuçları
- Tablo 7.10. Normalleştirilmiş ve 0,20 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerin normal yorulma deney sonuçları
- Tablo 7.11. Normalleştirilmiş ve 0,30 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerin normal yorulma deney sonuçları
- Tablo 7.12. 500 °C de temperlenmiş ve 0,13 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerin normal yorulma deney sonuçları
- Tablo 7.13. Normalizasyon ısı işlem uygulanan numunelerde fretting yorulma deney sonuçları (p = 1 kg)
- Tablo 7.14. Normalizasyon ısı işlem uygulanan numunelerde fretting yorulma deney sonuçları (p = 1,5 kg)
- Tablo 7.15. Normalizasyon ısı işlem uygulanan numunelerde fretting yorulma deney sonuçları (p = 2 kg)
- Tablo 7.16. 300 °C de temperlenmiş numunelerde fretting yorulma deney sonuçları
- Tablo 7.17. 400 °C de temperlenmiş numunelerde fretting yorulma deney sonuçları
- Tablo 7.18. 500 °C de temperlenmiş numunelerde fretting yorulma deney sonuçları
- Tablo 7.19. Normalleştirilmiş ve 0,20 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerin fretting yorulma deney sonuçları
- Tablo 7.20. Normalleştirilmiş ve 0,30 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerin

fretting yorulma deney sonuçları

Tablo 7.21. 500 °C de temperlenmiş ve 0,13 mm dövme şiddeti ile dövülmüş
numunelerin fretting yorulma deney sonuçları



RESİMLER

- Resim 1. Deney düzeneğinin fotoğrafı
- Resim 2. Normalizasyon ısıt işleml uygulanan numunelerin mikroyapısı (SEM)
- Resim 3. 300 °C de temperlenmiş numunelerin mikroyapısı (SEM)
- Resim 4. 400 °C de temperlenmiş numunelerin mikroyapısı (SEM)
- Resim 5. 500 °C de temperlenmiş numunelerin mikroyapısı (SEM)
- Resim 6. 300 °C de temperlenmiş numunenin kırık yüzey fotoğrafı (SEM)
- Resim 7. 400 °C de temperlenmiş numunenin kırık yüzey fotoğrafı (SEM)
- Resim 8. 500 °C de temperlenmiş numunenin kırık yüzey fotoğrafı (SEM)
- Resim 9. Normalleştirilmiş numunenin kırık yüzey fotoğrafı (SEM)
- Resim 10. Normalleştirilmiş numunenin kırık yüzey fotoğrafı (SEM)
- Resim 11. Normalleştirilmiş ve 0,30 mm dövme şiddetinde dövülmüş numunenin kırık yüzey fotoğrafı (SEM)
- Resim 12. Normalleştirilmiş ve 0,30 mm dövme şiddetinde dövülmüş numunenin kırık yüzey fotoğrafı (SEM)

1. GİRİŞ

Tribolojide Fretting terimi, mekanik olarak temas halinde iki yüzeyin küçük genlikli salınımlı izafi harekete maruz kaldığı herhangi bir temas durumunu ifade etmek için kullanılmaktadır. Bu tip temas, genellikle makina titreşimlerinin birbirlerine göre sabit olarak tesbit edilen elemanlar arasında çok küçük hareketlere neden olması neticesinde meydana gelmekte ve aşınma, korozyon ve yorulma çatlak başlaması ile hasara neden olmaktadır (Zhang, 1989; Bryggman, 1985).

Bu tip yüzey hasarı ilk defa 1911 yılında Eden, Rose ve Cunningham tarafından yapılan yorulma deneylerinde gözlenmiştir. Ancak fretting hasarı üzerinde gerçek anlamda ilk araştırmalar Tomlison tarafından 1927 yılında yapılmış ve fretting korozyonu terimi de onun bir araştırma yazısında ilk defa ifade edilmiştir. Daha sonraları OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) tarafından fretting ve fretting korozyonu ifadelerinin tanımları aşağıdaki gibi yapılmıştır.

Fretting; küçük genlikli, salınımlı izafi harekete sahip iki yüzey arasında meydana gelen bir aşınma sürecidir.

Not: (1) Fretting korozyonu, genellikle yüzeyden malzeme kaldırılması ve daha sonra oksitlerin oluşumu ile karakterize olur. Bunlar abrasiv özelliktedir ve aşınmayı artırır.

(2) Fretting korozyonu abrasiv özellik taşımayan diğer kimyasal reaksiyon ürünlerini ihtiva edebilir (Takeuchi, 1990).

Temas halindeki iki yüzey salınımlı teğetsel kuvvetlere maruz kalması halinde, iki yüzey üzerinde mikro kayma bölgeleri gelişir. Bunun neticesi olarak iki önemli tesir ortaya çıkar. Birincisi fretting aşınma olarak bilinen bir süreçte yüzeylerin aşınması meydana gelebilir. Ancak, frettingle kaldırılan malzeme ve belirli bir yerle sınırlanmış aşınma ciddi bir probleme sebep olabilecek yeterlikte olmayabilir.

İkincisi ve mühendislik açısından daha önemlisi, yorulma çatlak gelişiminin mümkün olduğu bir ortamda frettingin meydana gelmesi halinde elemanların yorulma ömrü önemli ölçüde azalır. Bu ikinci tesir, fretting yorulma olarak bilinmektedir (Brady, 1990).

Birçok makine hasarlarının sebebi fretting yorulmadır. Fretting sürecinin meydana gelişinin gerekli temel bir şartı, temas eden yüzeylerin 1.10^{-6} - $2,5.10^{-1}$ mm kadar çevrimli izafi hareketidir. Ortam ile oluşan aşınma tanecikleri ve temas eden yüzeylerin kimyasal etkileşimi bu süreçlere eklendiğinde malzemelerin fretting korozyonu meydana gelir. Bu süreçlerin bileşimi, frettingin yokluğunda aynı karakteristiklerle mukayese edildiğinde malzemelerin yorulma sınırında 1,5 – 10 kat bir azalmaya yolaçar (Troshchenko, vd.,1989)

Fretting; yüzeyler arasında temas ve izafi hareket, frekans, normal yük, süre, sıcaklık, atmosfer, nem, yüzey pürüzlülüğü, yağlayıcılar, sertlik, sürtünme katsayısı gibi birçok faktöre bağlıdır. Waterhouse tarafından ifade edildiği gibi, frettingde farklı aşınma süreçleri aynı anda meydana gelmekte ve bu faktörlerin izafi tesirleri fretting şartlarını değiştirmektedir. Bu karmaşık durum, Waterhouse (1981) tarafından fretting yorulması ve frettinge dair araştırmaların yeterli olmaması için muhtemel bir sebep olarak ifade edilmiştir.

Konu ile ilgili olarak yapılan literatür araştırması neticesinde, fretting üzerinde günümüze kadar yapılan çalışmalar;

1. Fretting yorulma mekanizmasının araştırılması,
2. Fretting yorulmaya tesir eden faktörlerin araştırılması,
3. Fretting yorulmasına dirençli malzeme geliştirme veya malzemelerin fretting davranışlarının iyileştirilmesi, üzerine yoğunlaştığı tesbit edilmiştir.

Pratikte, fretting problemleri ile en çok karşılaşılan makine elemanlarından biri de yaprak yaylardır. Yapılan literatür araştırmasında yaprak yaylar üzerinde yeterli araştırmanın yapılmadığı görülmüştür. Bu durum dikkate alınarak, özellikle ağır taşıtların süspansiyon sisteminde kullanılan yaprak yayların fretting ve normal yorulma davranışları ve bu davranışların iyileştirilmesi için uygulanabilecek ısı işlemleri ile soğuk deformasyon yöntemlerinden biri olan bilyalı dövme işleminin etkisi incelenmiştir.

Süspansiyon sisteminin bir elemanı olan ve daha çok taşıtların arka askı donanımında kullanılan yaprak yaylar sayıları değişen birkaç plakadan meydana gelmişlerdir. Yay yaprakları bir merkez civatası tarafından birbirlerine bağlanırlar ve merkezden uçlara doğru kaymayı önleyici kelepçelerle yapraklar birbirlerine tutturulmuşlardır. Taşıt üzerinde yayın ortası "U" civatası ile arka aks muhafazasına,

uçları ise şasi çerçevesine hareket edebilecek özellikte olan bir yay küpesi ile bağlanmıştır. Yol engbelerinden dolayı çok yapraklı bir yay salınma geçerken hem eğilmeye hem de birbirleri üzerinde kaymaya çalışarak bu salınımları belirli ölçüde yok ederler. Titreşim yükündeki değişmeler, yaprak yayların elemanları arasındaki temas alanlarında genliği değişen kaymalara ve neticede fretting sürecinin meydana gelmesine neden olurlar.

Bu araştırmanın amacı; Yukarda belirtilen problemten hareketle, yaprak yay yapımında kullanılan 35 Cr 4 çeliğinin, fretting ve normal şartlar altında yorulma mukavemetini artırabilmek ve bu doğrultuda belirlenen ısıt işlemlerin ve bilyalı dövme işlemlerinin farklı düzeylerinin yorulma mukavemetine tesirlerini incelemektir.

Bu amaç doğrultusunda, yaprak yayların çalışma mekanizmasına benzer bir deney düzeneği geliştirilmiş ve yorulma deneyleri bu düzende yapılmıştır.



2. FRETTING AŞINMA

Fretting konusunda ilk sistematik çalışma 1927 yılında Tomlison tarafından yapılmış ve moleküler aşınma mekanizması öne sürülmüştür. Yüzey molekülleri arasındaki kohezif kuvvetler kopma ve daha sonra oksitlenme ile sonuçlanmaktadır (Hoepner, 1981). Daha sonraki yıllarda çeşitli araştırmacılar tarafından çalışmalar devam ettirilmiş ve çeşitli mekanizmalar öne sürülmüştür. Aşağıda bunlardan bazıları incelenmeye çalışılmıştır.

Feng ve Righmire (1956), fretting aşınma sürecini üç safhaya ayırmıştır.

1. Başlangıç safhası; Normal aşınma ve metal transferi ile aşınma taneciklerinin meydana gelmesi.

2. Geçiş safhası; Salınımlı hareket nedeni ile temas eden yüzeylerde meydana gelen oksit taneciklerin yığılması ile fretting aşınma mekanizmasının normal aşınmadan abrasyona değişmesi.

3. Sürekli durum safhası veya sürekli abrasiv aşınma; Bu mekanizmada fretting aşınmanın oksitlenmiş aşınma taneciklerinin abrasiv tesiri ile meydana geldiği ifade edilmektedir.

Uhlig, mekanik ve kimyasal faktörlerden ibaret olan fretting hasarının miktarı için nicel bir ifade ileri sürmüştür.

$$W = (k_0 L^{1/2} - k_1 L)c/f + k_2 I L c \quad (2.1)$$

W = Ağırlık kaybı

L = Yük

c = Çevrim sayısı

f = Frekans

I = Kayma genliği

k_0, k_1, k_2 = Sabitler.

Bu denklemle fretting ağırlık kaybının, frekansın hiperbolik bir fonksiyonu olduğu ifade edilmiştir (Hoepner, 1981).

Waterhause (1955), fretting mekanizmasının üç muhtemel süreç ile meydana geldiğini ileri sürmüştür.

1. Temas noktalarında kaynakların oluşumu ile veya mekanik taşlama ile yüzeyden ince tabakalar halinde metalin kaldırılması.

2. Abrasiv tanecikler oluşturmak üzere sonradan oksitlenen metal taneciklerin kaldırılması ve bunların abrasiv tesiri.

3. Metal yüzeyin oksidasyonu ve mekanik tesir ile oksit filmlerinin sürekli kaldırılması.

Oksitleyici olmayan ortamlarda veya metalik olmayan malzemelerde fretting esas olarak mekaniktir. Tek yönlü aşınmaya benzer ve birinci safha ile meydana gelir (Waterhouse, 1955)

Hurricks (1970), fretting aşınma mekanizmasını incelemiş ve fretting aşınma sürecinin üç safhaya ayrılabilirliğini ifade etmiştir. Bunlar başlangıç safhası, kalıntı oluşumu ve sürekli durumdur. Aşınma hasarına yolaçan adhezyon ve metal transferi birinci safhada meydana gelmektedir. İkinci safhada kalıntı oksitlenir ve oksit kalıntısının bir tabaka şeklinde oluşumu metalik teması azaltır. Üçüncü safha, fretting hasarının başlangıç safhası ile etkilenen bölgenin dağılması ile karakterize olur. Bu safhada önemli faktör abrasyon yerine yorulmadır.

Suh (1973), tarafından ortaya atılan "delaminasyon" teorisi kırılma mekaniği açısından aşınma ile ilgilidir ve fretting aşınmada kalıntının kaldırılmasını açıklamaktadır.

Waterhouse ve Taylor (1977), frettinge maruz kalan yüzeylerin adhezyon ölçümleri ve taramalı elektron mikroskopu ile yaptıkları incelemelerde, makroskopik adhezyonun ilk safhalarda meydana geldiğini, fretting yüzeyleri arasındaki adhezyonun, malzemelerin mekanik özelliklerine bağlı olduğunu ve yüzeylerden malzeme kaldırılmasının delaminasyon teorisine göre olduğunu tesbit etmişlerdir. Bu araştırmacılar bir başka çalışmada ise, aşınma tanelerinin kalınlığının $1\mu - 3\mu$ arasında değiştiğini ifade etmişlerdir (Waterhouse ve Taylor, 1974).

Sproles ve Duguet'te delaminasyon teorisinin malzeme kaldırma süreci için en uygun model olduğunu ifade etmişlerdir. Delaminasyon teorisi, dislokasyon teorisi, plastik deformasyon ve yüzeye yakın metallerin kırılmasına dayanmaktadır. Küçük çatlaklar sert taneciklerin etrafında matrisin plastik akması ile ve matris - tanecik arayüzey kohezyonun yenilmesi ile başlar. Aşınma tanecikleri bu çatlakların yüzeye paralel ilerlemesi ile meydana gelir (Sproles ve Duquette, 1978).

Stower ve Rabinowicz (1973), fretting aşınma katsayısının sürekli kayma aşınmasındakine benzer olmasından dolayı, fretting aşınmasının adhezif aşınma ile meydana gelen sürekli kayma aşınması ile aynı olduğu ifade etmişlerdir.

Yukarıda görüldüğü gibi, birbirine benzemekle beraber bir teori veya bir model ile fretting aşınma mekanizmasını açıklamak yeterli görünmemektedir. Waterhouse tarafından ifade edildiği gibi, fretting şartlarında farklı aşınma süreçleri aynı anda meydana gelmekte ve bu faktörlerin izafi tesirleri deney şartlarına göre değişmektedir (Takeuchi, 1990).

Yukarıda belirtilen teoriler doğrultusunda, fretting aşınma mekanizması Brady (1990) tarafından aşağıdaki gibi sonuç ifadesini bulmuştur. İki yüzey temas halinde iken, gerçekte çok az noktalarda temas sağlanır. Yüzeye normal bir yük uygulandığında deformasyon ile genişleyen ilk temas bölgeleri artar. Deformasyon önce elastiktir, ancak yerel olarak malzemenin akma mukavemeti aşıldığında plastik olur. Bu yüksek noktaların deformasyonu ile temas alanları büyürken yüzeyler birbirine daha da yaklaşır. böylece daha küçük tepelikler yükü taşımaya başlar. Bu pürüzlerin birbirleriyle etkileşimi aşınma sürecini de yönlendirir. Pürüzlerin birbiri üzerinde kayması yüzeylerdeki oksit filmlerini kırar ve metal metale temas meydana gelir. Daha sonra detaylı bir şekilde tartışılacağı üzere, bu durum adhezyona ve eğer kayma hareketi salınım şeklinde ise fretting aşınmasına yol açar.

Ayrıca pürüzlerin birbiri üzerinde kayması dislokasyona da sebep olabilir ve deformasyon devam ederken bu dislokasyonlar, delaminasyon olarak isimlendirilen bir süreç ile ana malzemeden ince tabakalar halinde malzeme kaldırılmasına müsaade ederek yığılabirler (Brady, 1990).

Fretting aşınma sürecini dört safhada incelemek uygundur.

- a. Oksit filmlerinin kırılması,
- b. Adhezyon, delaminasyon ve abrasyon,
- c. Abrasiv aşınma kalıntılarının yayılması,
- d. Mikro çukurların birleşmesi.

a. Oksit Filmlerinin Kırılması

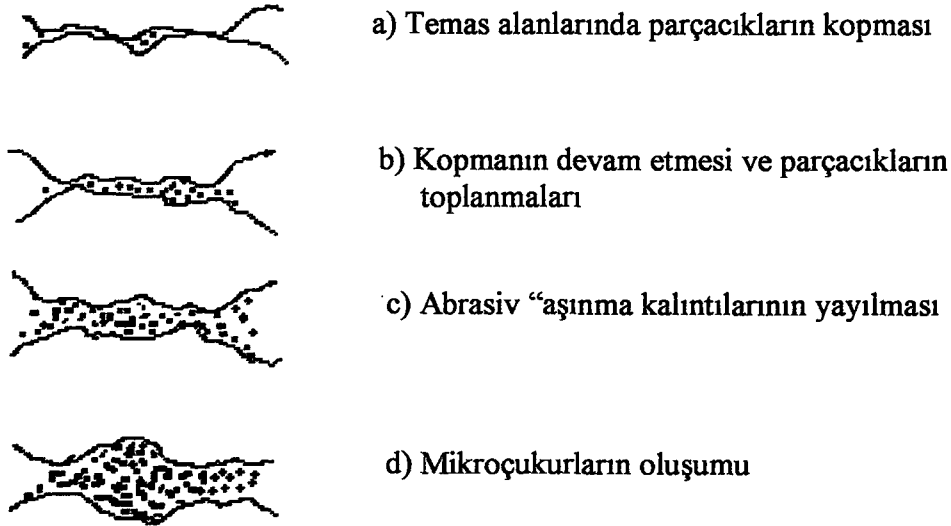
Mekanik hareket (kayma) temas eden yüzeylerde pürüzlerin oksit filmlerini kırmasına sebep olur. Bu oksitler bir abrasiv gibi davranabilmektedir. Fretting aşınma durumunda bu mekanik hareket, küçük genlikli bir titreşimdir.

b. Adhezyon, Delaminasyon ve Abrasyon

Fretting süresinde bir sonraki safha esnasında sadece oksit değil aynı zamanda metal de kaldırılmaktadır. Metalin kaldırılması iki veya muhtemelen üç mekanizma ile meydana gelmektedir. Temas eden yüzeylerde pürüzler bir oksit filminin yeniden oluşmasından önce karşılaştıkları takdirde, uygulanan normal kuvvet mikro düzeyde kaynağa (adhezyon) sebep olabilmektedir. Hareket devam ederken, bu kaynaklar daha sonra esas arayüzeyden diğer bir yüzeyde kırılırlar. Yüzeyden yüzeye malzeme transferi bu kaynaklı pürüzlerin bir yerel yorulma tesiri ile veya doğrudan kesme işlemi ile kırılıncaya kadar devam edebilir. Taneciklere dönüşen bu kaynaklı pürüzler deformasyon sertleşmesine maruz kalırlar ve neticede hızlı şekilde oksitlenen sert tanecikleri oluştururlar. Bu tanecikler frettingin birinci safhasında kaldırılmış olan ilk oksitlerle birleşirler. Daha sonra bu kalıntıların hepsi yüzey geometrisine bağlı olarak bir yerde birikirler. Böylece abrasiv unsurların sürekli artan hacmi büyüyerek metal kaldırılmasının ikinci safhasını meydana getirirler (Şekil 1 a).

Taramalı elektron mikroskopu ile yumuşak çelikler üzerinde yapılan hasar gözlemlerinde, yerel kaynakların erken safhalarda meydana geldiği ve yüzeyin belirgin ölçüde pürüzlenmesine sebep olduğu tesbit edilmiştir. Daha sonraki safhalarda ise, yüzey pürüzlülüğünde azalma meydana gelmekte ve neticede malzeme ince tabakalar şeklinde delaminasyon süreci ile yüzeyden koparılmaktadır. Bu safhada kalıntı ince oksit kaplı metal taneciklerden ibarettir (Waterhouse, 1981).

Aşınmada delaminasyon teorisine göre; iki yüzey arasında kayma meydana gelirken dislokasyonlar yüzeyden belirli bir mesafede yığılırlar. Zamanla bu durum boşlukların meydana gelmesine neden olur. Bu boşluklar birleşerek aşınma yüzeyine paralel bir çatlak meydana getirirler. Çatlak kritik bir uzunluğa ulaştığında yüzey ve çatlak arasındaki malzeme kırılır. Bu şekilde çok ince tabaka şeklinde tanecikler yüzeyden kaldırılır ve fretting süreciyle oluşan diğer kalıntılarla birleşir. Aşınma taneciklerinin başlangıç kalınlığı malzemeye bağlı olan serbest dislokasyon tabakasının kalınlığına bağlıdır. Bu değer 0,1 ve 20 μm arasında değişmektedir (Taylor and Waterhouse 1974). Delaminasyon ile meydana gelen kalıntı sadece mikro düzeyde kaynak ile meydana gelen kalıntı gibi, hızlı bir şekilde oksitlenebilir ve fretting kalıntılarının toplam hacmini artırır. Normal kuvvetlerin bileşimi kayma ve kalıntı temas halindeki metali aşındırır ve aşınma bölgesi yana doğru genişler (Şekil 1 b)



Şekil 2.1 Fretting aşınma sürecinin şematik görünüşü (Brady, 1990)

c. Abrasiv Aşınma Kalıntılarının Yayılması

Metallerin çoğunda, metal taneciklerinden oluşan oksitlenmiş kalıntılar, esas metalden hacim olarak daha çoktur. Kalıntıların bir kısmı komşu çukurlara dolabilir (Şekil 1 c).

d. Mikroçukurların Birleşmesi

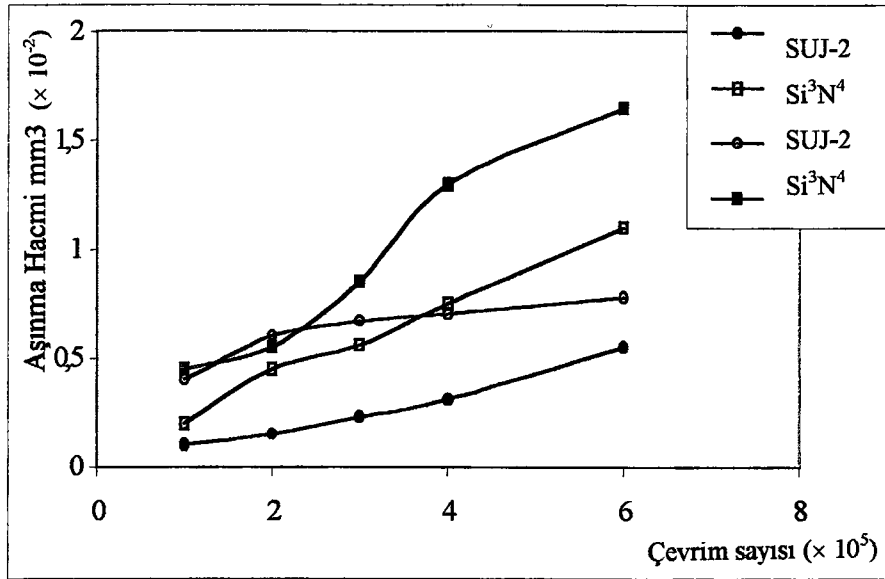
İki yüzey arasındaki temas, soğuk deformasyon sertleşmesi nedeniyle elastikdir ve maksimum gerilme merkezdedir. Bu yüzden fretting devam ederken (Şekil 1.d) de görüldüğü gibi eğimli hale gelir. Bu bir mikroçukurdur. Benzer mikroçukurlar uygun şekilde gelişirler ve salınım devam ederken bu mikroçukurlar daha büyük ve daha derin çukurlar oluşturmak üzere birleşirler (Brady, 1990).

2.1. Fretting Aşınmaya Tesir Eden Faktörler

2.1.1. Çevrim Sayısı

Çoğu araştırmalarda aşınma hacmi ve çevrim sayısı arasında doğrusal bir ilişki tesbit edilmiştir (Soderberg, ve vd.1986). Zhang, Zhang, ve Zhu(1986) tarafından elde edilen sonuçlara göre, başlangıçta yüksek bir aşınma hızı olmasına rağmen daha sonra aşınma hacmi çevrim sayısı ile doğrusal bir şekilde artmaktadır. Aşağıdaki şekilde de

Sato (1985) tarafından tesbit edilen çevrim sayısı ve aşınma hacmi arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 2.2. Havada ($\circ, \square$) ve suni deniz suyunda ($\bullet, \blacksquare$) çevrim sayısı ve aşınma hacmi arasındaki ilişki. (50 μ m genlik ve 19,6 N yük şartlarında), (Sato, 1985).

2.1.2. Normal Yük

Normal yükün etkisi konusunda literatürde üç farklı sonuç ifade edilmiştir. Birincisi; aşınma hacmi artan normal yük ile lineer veya parabolik olarak artmaktadır (Soda ve Aoki, 1959).

İkincisi, yüzey hasarında önemli bir değişme yoktur ve aşınma hacmi artan normal yük ile azalmaktadır (İto 1959).

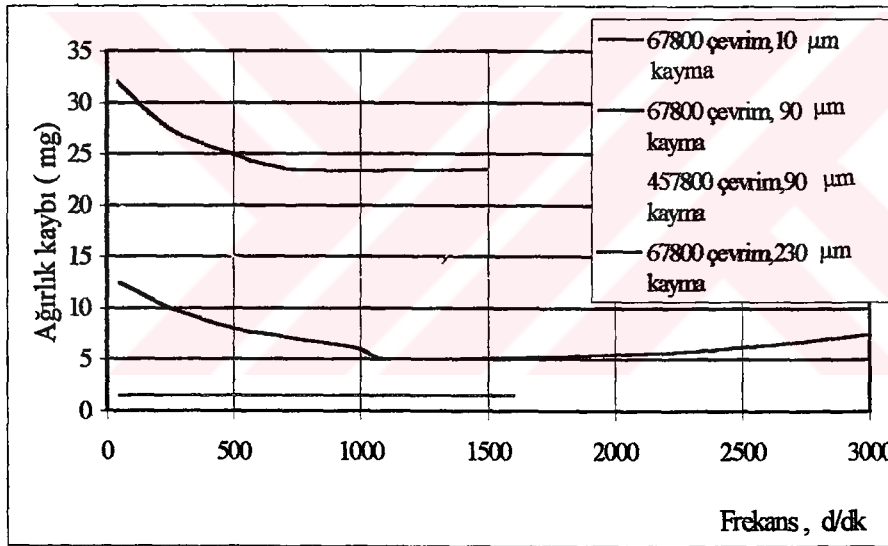
Üçüncüsü ise, deneysel olarak aşınma hacmi (V) ve normal yük (L) arasındaki ilişki Soda ve Aoki (1959) tarafından $V \propto L^{0.7}$ şeklinde tesbit edilmiştir.

Bazı deneysel aparatlarda, temas yükündeki azalma gerçek izafi kayma genliğini azaltmaktadır. Böyle durumlarda yükteki artma aşınma hacmini azaltmaktadır. İto (1959)' ya göre, büyük yük altındaki aşınma hacmindeki azalma, temas eden yüzeyler arasındaki gerçek kaymada meydana gelen azalmaya bağlıdır. Kayma genliği sabit tutulduğunda aşınma hacmi ve normal yük arasında hemen hemen orantılı bir ilişki olacaktır.

Zhang and Zhu(1989), karbon çeliği üzerinde yaptıkları çalışmada 300 μm 'luk bir kayma genliğinde belirli bir yük değerinden sonra aşınma hacminin, yük ile doğrusal olarak arttığını tesbit etmişlerdir.

2.1.3. Frekans

Genel olarak sabit bir kayma genliğinde frekans artarken aşınma hacmi azalmaktadır. Feng ve Uhlig (1954) fretting aşınmada frekansın etkisini havada ve azot ortamında incelemişler ve fretting aşınmanın zamana bağlı bir süreç olduğu sonucuna varmışlardır. Bununla beraber çok yüksek frekanslarda yüksek yüzey sıcaklığı ve yüksek şekil değiştirme hızı nedeniyle aşınma hacmi artmaktadır. (Sodeberg ve Bryggman 1986). Şekil (2.3.) de, çok düşük ve çok yüksek frekanslarda değişen kayma genliği ve çevrim sayıları için frekans hasar ilişkisi görülmektedir.

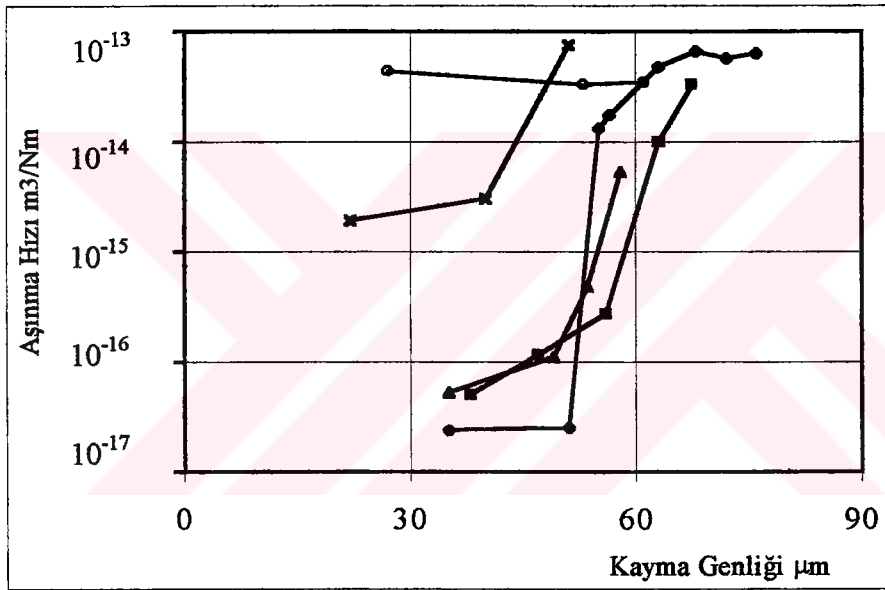


Şekil 2.3. Değişik kayma genliklerinde yumuşak bir çelikteki hasar üzerinde frekansın tesiri (Feng, 1954)

2.1.3. Kayma Genliği

Fretting hasarının görüldüğü başlangıç kayma genliğinin 0,5 μm mertebesinde olduğu tesbit edilmiştir. Üst sınır ile ilgili çeşitli görüşler olmasına rağmen mikro kaymanın meydana geldiği kesindir (Waterhouse, 1984)

Kayma genliği ile ilgili birçok araştırmada artan kayma genliği ile aşınma hacmi arasında doğrusal bir artış veya belirli bir kayma genliği üzerinde aşınma hacminde belirgin bir artış tesbit edilmiştir (Ohmae ve Isukizoe 1974; kayaba ve Iwabuchi 1979; Sato ve Shima 1981). Ohmae ve Isukizoe (1974) yumuşak bir çeliğin fretting aşınmasında kayma genliğinin etkisini araştırmışlar ve kritik genliği $70 \mu\text{m}$ olarak tesbit etmişlerdir. $70 \mu\text{m}$ 'dan daha az genliklerde oksitleyici aşınma meydana gelmiştir. $70 \mu\text{m}$ 'dan daha büyük genliklerde ise oksidasyon adhezyon ve abrasyon fretting aşınmaya sebep olmaktadır. Aşağıdaki şekil (2.4) de değişik araştırmacılar tarafından farklı deney şartlarında, yumuşak çelikler üzerinde yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar toplu halde gösterilmiştir (Warburton, 1988).



- ° ; (Lewis ve Didsbury), 8 kgf , 25 Hz , $5 \cdot 10^5$ çevrim
- x ; (Feng ve Uhlig), 453 kgf , 9 Hz , 67800 çevrim
- Δ ; (Ohmae ve Tsukizoe), 15 kgf , 10 Hz
- ◆ ; (Halliday ve Hirst), 19 kgf , 10^6 çevrim
- ; (Halliday), 19 kgf , 10^6 çevrim

Şekil 2.4. Yumuşak çelik için kayma genliği aşınma hızı ilişkisi (Warburton, 1988)

Kayaba ve Iwabuhı (1978), kritik genlik değerinin normal yük ve malzemeye bağlı olduğunu ifade etmiştir. Fretting hasarı meydana getirebilecek minimum genliğin tesbiti ile ilgili çalışmalarda da bu genliğin $10^{-3} \mu\text{m}$ mertebesinde olduğu tesbit

edilmiştir(Kennedy ve Peterson 1982; Kennedy ve Stalligs 1984). Waterhouse tarafından yapılan deneylerde bir bilyaya karşı bükülen düz bir levhanın fretting şartlarında hasarı meydana getiren minumum genlik 0,075 μm olarak belirlenmiştir (Waterhouse, 1984).

2.1. 5. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğünün tesiri konusunda kısmen görüş birliği vardır. Reed ve Batter (1960), pürüzlü bir yüzeyin daha düşük hasar meydana getirdiğini ifade etmişlerdir .Waterhouse (1972), bu durumu aşağıdaki şekilde açıklamıştır.

1). Daha pürüzlü yüzey daha yüksek plastizite indeksi demektir. Bu yüzden pürüzlü yüzey frettinge sebep olan teğetsel hareketi bir dereceye kadar absorbe eder.

2). Aşınma tanecikleri kolaylıkla temas eden yüzeylerden kaçabilirler.

2.1. 6. Sertlik

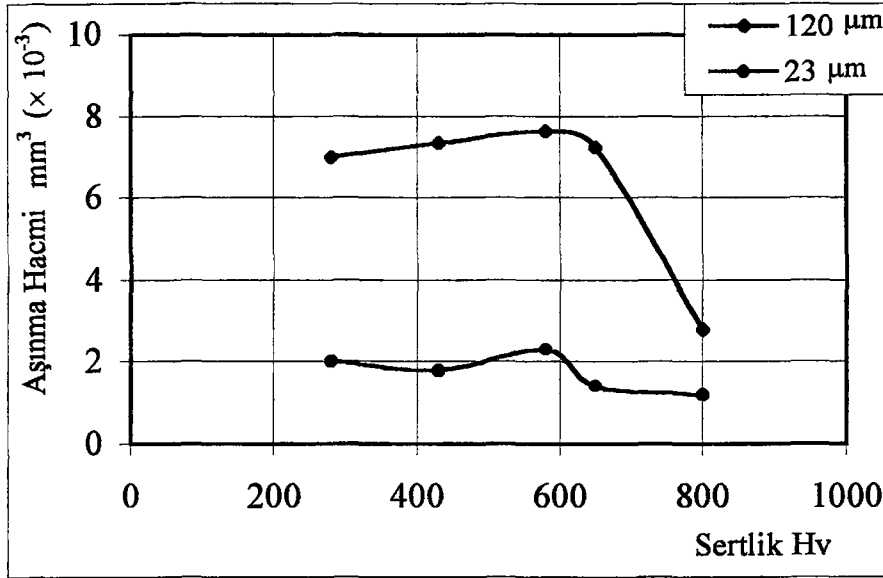
Sertlik fretting aşınmasını iki şekilde etkilemektedir. Birincisi yerel yüksek gerilme yorulması altında bir yüzeyin zayıflaması ile meydana gelen fretting aşınması durumunda, sert çelikte hasarın daha az olması beklenebilir. İkincisi, daha sert çeliğin iki yüzey arasında oksit kalıntılarının aşındırıcı etkilerine karşı daha yüksek mukavemete sahip olduğu söylenebilir (Waterhouse, 1972).

Kayaba ve Iwabuchi (1979) ise, sertliğin fretting aşınmasında küçük bir etkiye sahip olduğunu ve önemli faktörün iki yüzey arasında meydana gelen oksit kalıntılarının tesiri olduğunu ifade etmişlerdir.

Aşağıda Şekil (2.5.) de, Sato (1986) tarafından SUJ-2 malzemesi üzerinde yapılan bir çalışmada sertlikle aşınma hacmi arasındaki ilişki görülmektedir. Her iki genlikte de aşınma hacmi 568 Hv ye kadar hemen hemen sabit olmakta, daha sonra azalmaktadır.

2.1. 7. Çevre

Çevre unsurlarının fretting aşınmaya etkisi dört başlık altında kısaca incelenmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.5. Havada düzlem numunenin sertliği ve aşınma hacmi arasındaki ilişki (Sato, 1986)

a) Nem

Havadaki su buharı aşınmaya iki farklı şekilde tesir etmektedir. Nem koroziye aşınmaya neden olmakta ve artan nem oranı ile koroziye aşınma artmaktadır. Ayrıca artan nem yağlama tesiri göstererek mekanik aşınmayı etkileyebilmektedir (Bill, 1982). Bu iki zıt tesir aynı zamanda meydana geldiğinde aşınma hacmi belirli nem oranında maksimum bir değer göstermektedir.

Goto ve Ashida (1987), fretting şartları altında bir alüminyum alaşımındaki oksijen ve su buharının tesirini incelemişler ve makro kayma şartları altında kuru argon ve kuru havada aşınma hızlarının hemen hemen aynı olduğunu, nemli havadikine göre ise, oldukça düşük olduğunu tesbit etmişlerdir. Fretting aşınmada oksijenin etkisi fazla değildir, fakat su buharı alüminyum alaşımının fretting aşınmasını hızlandırmaktadır.

b) Sıcaklık

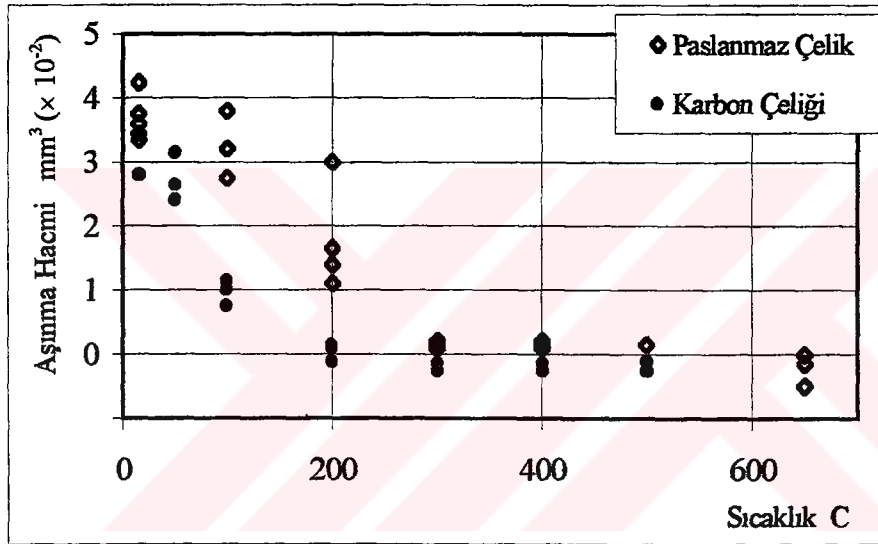
Bilindiği gibi sıcaklık hem korozyon hızını ve hem de malzemenin mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda oksit filmlerinin fretting süresini etkileyebildiği muhtemel iki durum vardır (Hamdy and. Waterhouse, 1981).

1. Fretting koruyucu oksit filmini keser, artan kimyasal tesiri destekler ve koroziye aşınmaya sebep olur.

2. Oksit filmleri katı yağlayıcı gibi davranarak sürtünme ve aşınmayı azaltabilir.

Yüksek sıcaklıklarda ve oksitleyici atmosferde çoğu zaman ikinci durumun meydana geldiği belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda aşınma ve sürtünmenin azalması genellikle glaze olarak isimlendirilen tribolojik olarak faydalı oksit filmlerinin oluşumundan kaynaklanmaktadır (Stott, Lin and Wood 1973). Bu glaze oksitleri 10 - 50 μm çapında kristalli oksit taneciklerinden ibarettir ve oluşabildiği yüksek sıcaklıklar deney şartlarına ve malzemeye göre değişmektedir (Millman and Sleightholme, 1985).

Şekil (2.6.) da, Waterhouse (1990) tarafından elde edilen, 0,45 C çeliği ve austenitik çelik 304 için fretting aşınma eğrileri görülmektedir. Yine burada da aşınma hacimlerdeki azalma glaze oksitlerinin oluşumuna bağlanmıştır.



Şekil 2.6. 0,45 C Çeliği ve paslanmaz çelik 304 için aşınma - sıcaklık ilişkisi (Waterhouse,1990).

c) sıvı yağlayıcılar

Yağlama şartları altında aşınma mekanizması sadece yağlayıcı ve katkılarının kimyasal ve fiziksel özellikleri ile değil, aynı zamanda izafi hareketlerin genliği, hızı yük ve temas şekli gibi mekanik şartlardan da etkilenmektedir. Sıvı yağlayıcılar fretting aşınma sürecini,

1. Oksijen geçişini sınırlayarak,
2. Kalıntıların süpürülerek dışarı atılmasını sağlayarak,
3. Sürtünmeyi değiştirerek,

Olumlu yönde etkileyebilmektedir (Waterhouse,1972).

d) Sulu Ortamlar

Sulu ortamlarda fretting aşınması ile ilgili olarak yapılan çalışmaların çoğu cerrahi aşılama ve denizcilikte kullanılan malzemeler üzerinde yapılmıştır. Bethune ve Waterhouse (1968) yaptıkları çalışmalarda, fretting şartları altında %1 NaCl çözeltisinde alüminyum alaşımı ve bakırda polarizasyon ölçümleri yapmışlar ve korozyon akımında büyük bir artış tesbit etmişlerdir. Bu durum oksit filmlerinin fretting ile sürekli kesilmesine bağlanmıştır.

Overs ve Waterhouse (1983), deniz suyunda kaynak yapılabilen yapı çeliklerinin fretting aşınmasının bir koroziv aşınma süreci olduğunu ve katodik koruma ile büyük oranda azaldığını tesbit etmişlerdir. Ayrıca, kalay yapımında kullanılan çeliklerde, deniz suyundaki aşınma hacmindeki artma elektrokimyasal tesirlerden kaynaklandığı ifade edilmiştir (Pearson and Waterhouse, 1984).

Syrett ve Wing (1978) bir fizyolojik tuz eriyiğinde, cerrahi aşılama malzemeleri ile fretting deneyleri yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre, frettingin korozyon hızını artırdığı ve Co - Cr - Mo alaşımının korozyona karşı, paslanmaz çeliğe nazaran daha dirençli olduğu tesbit edilmiştir.

3. FRETİNG YORULMA

Fretting yorulma çatlakları yorulma ömrünün çok erken safhalarında başlamakta ve çatlakların ilerlemesi fretting hasarı ile hızlanmaktadır. Bu, fretting nedeniyle yorulma mukavemetinin ve yorulma ömrünün belirgin bir şekilde azalması için temel sebeptir. Yorulma çatlaklarını belirlemek oldukça zordur. Bu özellikle numune yüzeylerinin şiddetli bir şekilde hasar gördüğü ve kayma hatları veya mikro çatlakların pek az gözlemlendiği fretting yorulmasında da geçerlidir. Buna rağmen görünebilir çatlakların çok erken başlaması fretting yorulmasının bir karakteristiğidir. Endo ve Goto küçük çatlakların yorulma ömrünün hemen hemen % 4 safhalarında meydana geldiğini tesbit etmişlerdir. Daha sonra çatlak büyümesi uygulanan gerilmenin küçük olmasından dolayı çok yavaştır (Endo and Goto, 1976).

Fretting yorulma mekanizmasını iki başlık altında incelemek mümkündür.

1. Çatlakların başlaması
2. Çatlakların ilerlemesi.

3.1. Yorulma Çatlaklarının Başlaması

Normal yorulmada toplam ömrün % 90'ı ilerleyen bir yorulma çatlaklarının başlaması için harcanırken, frettingin varlığında bu takriben % 4'e düşmektedir. Bir çatlak fretting ile başladıktan sonra ilk ilerleme hızı, değişen sürtünme kuvvetlerinin tesiri ile hızlanmaktadır. Çatlak belirli bir uzunluğa ulaştığında ise, ilerleme hızı normal yorulmadaki hıza dönüşmektedir (Waterhouse, 1989).

Fretting şartları altında yorulma çatlaklarının başlaması ile ilgili literatürde geçen mekanizmalar esas olarak ikiye ayrılabilir.

1. Fretting ile yerel yüzey yorulması (kovalevskii, 1981).
2. Fretting ile oluşan yüzey pürüzlülüğü nedeniyle yüksek gerilme yoğunlaşması (Gaul and Duguet, 1980) veya tekrarlı gerilmeler ve frettinginden dolayı sürtünme kuvveti ile meydana gelen temas gerilmelerinin bileşimi olan gerilme şartları (Nowell and O'connor 1987).

Birinci gruptaki mekanizma için, tipik bir model Goss ve Hoeppner (1971) tarafından ifade edilmiştir. Buna göre;

1. Normal bir yük uygulandığında yüzey pürüzleri birbirleriyle temas ederler ve daha sonra deforme olurlar,

2. Ayrıca bir yorulma yükü uygulandığında hasar ve kalıntı meydana gelir,

3. Yeterli bir çevrim sayısında sonra yorulma hasarına sebep olan çatlaklar, pürüzlerin aralarında başlarlar. Bu model bir yüzey yorulma mekanizmasıdır ve çevre bu süreçte küçük bir faktördür.

Spink (1990); 2 1/2 % Ni Cr MoV çeliğinde fretting yorulma deneyleri yapmış ve fretting yorulma çatlaklarının maximum fretting hasarına sahip alanlarla ilgili olmadığını fretting yorulma çatlaklarının yüzey aşınma hasarının en az olduğu numunelerde de bulunduğunu tesbit etmiş ve fretting yorulmanın, temas altındaki değişen teğetsel gerilme ile kontrol edilebildiğini ifade etmiştir.

Kovalevskıı (1981); Fretting yorulma ile kırılan yüzeylerin kırılma grafiği analizlerinden yararlanarak düşük çevrimli yorulma nedeniyle yerel yüzey tabakalarının harabiyeti ile oluşan gerilme yoğunlaşmasının yorulma mukavemetinin azalmasında temel faktör olduğunu tesbit etmiştir. Nishioka ve Hirakawa (1968) ve Endo ve Goto (1980) yorulma çatlaklarının başlama mekanizması için aşağıdaki sonuçları tesbit etmişlerdir.

1. Fretting ile oluşan çukurlar her zaman çatlak başlangıcının kaynağı değildir.

2. Fretting ve tekrarlı gerilme numuneye aynı zamanda uygulandığında yorulma ömrü büyük oranda azalmaktadır.

3. Fretting aşınma miktarı ile fretting yorulma mukavemeti arasında her zaman bir ilişki yoktur.

Sato, Shima ve Sugawara (1985), çelik bir bilyaya karşı frettinge maruz kalan cam levhada çatlakların başlamasını max. çekme gerilmesi nedeniyle meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

Endo ve Goto (1980), bir yorulma çatlağının teğetsel fretting gerilmesi ve tekrarlı gerilmenin bileşimi olan maksimum kesme gerilmesi ile başladığını varsayarak, aşağıdaki denklem (3.1 ve 3.2) de görüldüğü gibi bir yorulma çatlağının başlaması ile yorulma mukavemetinde bir azalma oranı tesbit etmişlerdir.

Eğme yorulması için ;

$$\delta_2 - \delta_1 / \delta_2 = 1 - 1 / (1 + (2q_0 / \delta_1)) \quad (3.1)$$

Burulma yorulması için ;

$$\tau_2 - \tau_1 / \tau_2 = 1 - 1 / (1 + (2q_0 / \tau_1)^2) \quad (3.2)$$

Burada;

δ_1 = Fretting şartları altında bir yorulma çatlaklarının başlaması için değişen eğme gerilmesi.

δ_2 = Frettingsiz şartlar altında bir yorulma çatlaklarının başlaması için değişen eğme gerilmesi.

q_0 = Temas eden yüzeylerde maksimum teğetsel gerilmedir.

Yukarıda ifade edildiği gibi, fretting yorulma çatlaklarının başlaması tekrarlı gerilme ve sürtünme kuvvetinden ibaret olan temas gerilmesi nedeniyle meydana geliyor ise, çatlakların maksimum temas gerilmesinin beklendiği yerlerde meydana geleceği varsayılabilir. Bu durum Waterhouse ve Taylor (1971) ve Alıc, Hawley ve Urey (1979) tarafından deneysel olarak desteklenmiştir. Yorulma çatlakları yüksek deformasyon ve / veya gerilmelerin bulunduğu kayma bölgeleri ile kaymanın olmadığı bölgeler arasındaki sınırda başlamaktadır.

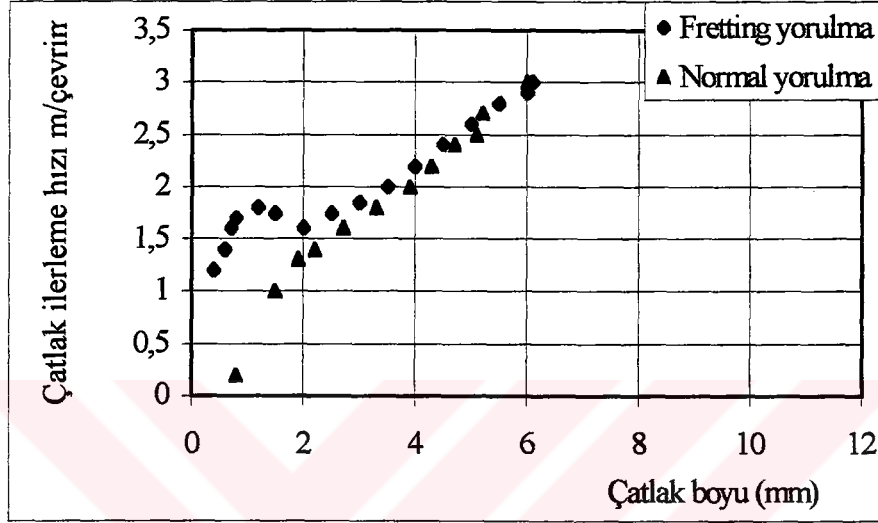
Bununla beraber son yıllarda yapılan düz ve fretting birleştirme analizlerinde aşınan bölgenin merkez kısmında da yorulma hasarının muhtemel olabileceği ifade edilmektedir. 1040 çeliğinin üzerinde yapılan deneyler ve yüzey hasar sürecinin incelenmesi bu ihtimali güçlendirmiştir (Dobromırski and Smith 1987).

3.2. Yorulma Çatlaklarının İlerlemesi

Endo, ve Goto (1976), elektrik direnç metodu ve taramalı elektron mikroskopu ile yorulma çatlaklarının derinliğini ölçmüşlerdir. Buna göre, çatlak ilerleme eğrisi yüksek başlangıç eğilimli düz bir çizgi ve daha sonra belirli bir büküm noktasından sonra daha düşük meyilli bir hat şeklindedir. Maksimum tekrarlı kesme gerilmesi (tekrarlı gerilme ve fretting nedeniyle teğetsel kuvvetin bileşimi) sadece çatlak başlangıcında değil, aynı zamanda belirli bir çatlak derinliğine kadar çatlak ilerlemesini hızlandırmakta ve daha sonra çatlak sadece tekrarlı gerilme ile ilerlemektedir. Fretting yorulma hasarı eşiği ile aynı zamanda meydana gelen büküm noktası, yorulma ömrünün takriben % 25'inde elde edilmektedir (Wharton,Taylor ve Waterhouse 1973 ; Hoepner ve Goss 1974).

Alic ve Hawley (1979) kırılma grafiği muayenelerinden, erken safhalarda fretting yorulma çatlaklarının ilerleme hızlarının, normal yorulmadakinden çok daha yüksek olduğunu tesbit etmişlerdir.

Sato, Fuji ve Kodama (1986) tarafından SUS304 L çeliği üzerinde yapılan bir çalışmada 80 MPa basınç ve $R = 0$ şartlarında elde edilen fretting ve normal yorulma çatlağının ilerlemesi Şekil (3.1) de görülmektedir.



Şekil 3.1. SUS304 L çeliğinin fretting ve normal yorulma çatlaklarının ilerlemesi (Sato ve vd., 1986)

Sato, Fuji ve Kodama (1986) tarafından paslanmaz çelik SUS-304'L ve A 2024 - T3 alüminyum alaşımı üzerinde yapılan çalışmalarda, fretting yorulmada çatlak ilerlemesi iki safhaya ayrılmış ve birinci safhada ilerlemenin çok yüksek olduğu, azalan fretting etkisi ve çatlak kapanması nedeniyle, çatlak ilerleme hızının tedrici olarak azaldığı tesbit edilmiştir. Normal yorulmada ise, çatlaklar çatlak boyu ile doğrusal bir artış göstermektedirler.

Sonuç olarak, araştırmaların çoğunda çatlak ilerlemesinin ilk safhalarda yüzeye eğik olduğu ve daha sonra yüzeye dik bir şekilde ilerlediği tesbit edilmiştir. İlk safhalardaki bu eğik çatlak, tekrarlı gerilme ve fretting tesirlerinin birleşmesi nedeniyle meydana gelmektedir. Çatlak belirli bir derinliğe ulaştıktan sonra frettingin tesiri (teğetsel gerilme) ihmal edilmektedir.

3.3. Fretting Yorulmasına Tesir Eden Faktörler

3.3.1. Kayma Genliği

Kayma genliğinin fretting yorulmasına etkisi ile ilgili olarak Field ve Waters (1967); nikel, krom - molibdenli bir çelik üzerinde çalışmışlar ve kaymanın en hasar verici aralığının 8 ile 14 μm arasında olduğunu tesbit etmişlerdir. Bununla beraber yorulma mukavemeti azalma faktörü (sıfır ortalama gerilmesinde aşınmamış bir numunenin yorulma mukavemeti ve aşınmış bir numunenin yorulma mukavemeti arasındaki oran) sadece kayma genliği ile değil, aynı zamanda ortalama gerilme ile de değişmektedir.

Diğer bir çalışma, Nishioka ve Hirakawa (1968) tarafından kayma genliği değiştirilebilen bir fretting yorulma makinasında yumuşak çelikler üzerinde yapılmıştır. Buna göre genlik artarken çatlakların başladığı gerilme azalmakta, 15 ile 20 μm arasındaki genliklerde minimum bir değer gösterdikten sonra artmaktadır. Daha büyük genliklerde çatlakları başlatan gerilmedeki artış, aşınma kalıntısının abrasiv tesiri ile meydana gelen yüksek aşınma hızı nedeniyle mikro çatlakların kaldırılmasına bağlanmıştır. Su verilmiş ve temperlenmiş 4130 çeliğinin kayma genliğinin incelenmesinde ise, 20 ile 30 μm 'luk izafi kayma genliklerin de yorulma direncinde minimum bir değer elde edilmiştir (Gaul and Duguet 1980).

3.3.2. Temas Basıncı

Daha önce ifade edildiği gibi temas basıncı fretting yorulma ömrünü büyük oranda etkilemektedir. Birçok araştırmada artan temas basıncı ile fretting yorulma mukavemetinin önemli ölçüde azaldığı ve belirli bir basıncın üzerinde sabit kaldığı ifade edilmiştir (Nishioka and Hirakawa 1970) Goss ve Hoeppner tarafından yapılan normal basıncın tesiri ile ilgili bir çalışmada alüminyum alaşımının normal yükteki değişmelere hassas olmadığı fakat titanyum alaşımının (normal yükteki değişmelere) çok hassas olduğu tesbit edilmiştir. Davranıştaki bu farklılık fretting sürecinde mikroskopik tokluk ve farklı yerel mikroyapıdan kaynaklandığı ifade edilmiştir (Goss and Hoeppner 1974). Bu çalışmada da izafi kayma genliği kontrol edilmemiştir. Bilindiği gibi, pratikte temas basıncı artarken kayma genliği azalmaktadır.

Nishioka ve Hirakawa (1972) temas basıncının ve malzeme sertliğinin etkisini araştırmışlar ve sertliğin fretting yorulmada küçük bir etkiye sahip olduğunu tesbit etmişlerdir.

3.3.3. Frekans

Endo, Goto ve Nakamura (1969), yumuşak bir çelik üzerinde burulmalı ve eğmeli fretting yorulma deneyleri yapmışlar ve fretting yorulmasının zamana bağlı bir süreç olduğunu ve düşük frekansın daha düşük yorulma mukavemetine neden olduğunu tesbit etmişlerdir. Yorulma mukavemetindeki azalmanın derecesi eğme yorulmasında burulmaya nazaran daha fazla olmaktadır.

3.3.4. Malzeme Bileşimi

Frettingin mekanik tesiri özellikle de temas eden yüzeyler arasındaki sürtünme kuvveti, fretting yorulma çatlaklarının başlamasını etkileyebilmektedir. Bu yüzden fretting yorulma hasarı malzemelerin bileşimi ile yakından ilgilidir. Horger (1953), aynı malzeme ile tesbit edilen bir çelik milin yorulma mukavemetinin, dökme demir ile tesbit edilen çelik milin yorulma mukavemetinden daha düşük olduğunu belirlemiştir. Lui, Curten ve Sinclair (1957), farklı malzemelerle birleşmiş titanyum alaşımları üzerinde yaptığı çalışmalarda iki yüzey arasındaki sertlikte olan farkın numunenin yorulma mukavemetinde önemli bir tesire sahip olduğunu tesbit etmişlerdir. Yorulma mukavemeti yastık malzemesinin sertliği arttıkça azalmaktadır. Waterhouse (1965) ise, yumuşak bir çeliğin fretting yorulma hasarında en az zararlı tesire sahip tesbit malzemelerinin, düşük sertliğe, yüksek termal iletkenliğe, dizilme hata enerjisi (stacking fault enerji) ve düşük bir rekristalizasyon sıcaklığına sahip olduğunu ifade etmiştir.

Nishida ve Mutoh (1993), toz metalurji ile üretilen yüksek hız çeliklerinde karbür büyüklüğünün yorulma özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Normal yorulma deneylerinde, büyük karbür tanelerine sahip numunelerin yorulma mukavemetinin, küçük taneciklere sahip numunelere nazaran daha düşük olduğunu ve ayrıca, artan karbür taneciği boyutu ile fretting yorulma mukavemetinin de azaldığını tesbit etmişlerdir. Bu sonuçlar, azalan karbür tanesi büyüklüğü ile malzemenin sürtünme katsayısının azalmasına bağlanmıştır.

Reeves ve Hoeppner (1978), 0,40 / 0,50 karbon çeliğinde fretting yorulma hasarlarını taramalı elektron mikroskopu ile incelemişler ve sert martenzit yüzeyin yumuşak ferrit / perlit yüzeylere nazaran daha az hasara maruz kaldığını tesbit etmişlerdir.

3.3.5. Çevre (Ortam)

Atmosferin tesirleri hakkında araştırmaların çoğu, oksitlenme ile ilgili olarak yapılmıştır. Reeves ve Hoeppner (1978), vakum ortamında ve havada elde edilen yorulma eğrilerinde farklılık olmasından dolayı fretting nedeniyle meydana gelen mekanik hasarın oksitlenme nedeniyle meydana gelen kimyasal hasardan daha etkili olduğunu tesbit etmişlerdir

Endo ve Goto'nun oksijen ve su buharının tesiri ile ilgili olarak yaptıkları çalışmada, su buharının karbon çeliğindeki tesirlerinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu buna karşın oksijenin fretting yorulma çatlaklarının başlaması ve ilerlemesinde olumsuz tesirlere sahip olduğu tesbit edilmiştir. Bununla beraber alüminyum alaşımında oksijenin çok küçük bir tesire sahip olmasına karşın su buharı fretting yorulma çatlaklarının başlamasını ve ilerlemesini hızlandırmıştır (Endo ve Goto 1978).

Sulu ortamlarda hem sulu ortamın korozi özelliği ve hem de frettingin olumsuz tesirleri yorulma mukavemetini büyük ölçüde etkilemektedir. Waterhouse ve Taylor (1970), % 1 NaCl çözeltisinde korozyona dirençli olmayan bir malzemenin (% 0,7 C çeliği) yorulma mukavemetinde korozyon ve frettingin nisbi etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre,

1. Fretting normal yorulmaya nazaran yorulma sınırını önemli ölçüde düşürmektedir.
2. Korozyon yorulması frettinge nazaran daha ciddi problemlere yol açmaktadır ve yorulma sınırı yoktur.

Ayrıca, Wharton ve Waterhouse (1980), Ti - 6Al - 4V ' un fretting yorulma deneylerinde, % 1 NaCl çözeltisi veya nemli ortamda oluşan korozyon ürünlerinin fretting yorulmaya karşı koruyucu olduğunu tesbit etmişlerdir.

3.4. Fretting Yorulma Hasarlarının Belirlenmesi ve Örnekler

Daha önce ifade edildiği gibi, fretting, temas halindeki pürüzlerin elastik bölgeyi aşması durumunda çok küçük genlikli izafi harekete maruz kalan iki yüzey arasında

meydana gelmektedir. Bu hareket genellikle arzu edilmez ancak çevrimli yük altında iki eleman arasındaki şekil değiştirme farklılıkları veya sistemdeki titreşimler bu hareketi meydana getirebilmektedirler. Hasarın olabilmesi için bazı temel şartların bulunması gerekir. Bunlar;

1. Ara yüzey hareketi için serbestlik,
2. Pürüz teması,
3. Bu noktalarda veya yakınlarında belirli derecede yüksek yorulma gerilmelerinin bulunmasıdır (Forsyth, 1981).

Metalik yüzeylerin karşılıklı sürtünmesi metal tahribatına bağlı olarak bir takım izler oluştururlar. Bu izler sürtünme yönünde uzayan çizgiler şeklinde karakteristik olarak kendini gösterirler.

Fretting hasarı sonucu yüzeyde meydana gelen kalıntıların şekli ve büyüklüğü hasarın genel bir karakteristiği olarak frettingin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu kalıntıların kimyasal yapısı ve fiziksel şekli çalışma ortamındaki şartlara göre, özellikle de nem ve oksijen yoğunluğuna göre değişmektedir. Normal atmosfer şartlarında çeliklerde kırmızımsı kahverengi renkte, alüminyum alaşımlarında ise siyah renkli kalıntılar oluşmaktadır (Takeuchi, 1990).

Karşılıklı hareket halinde bulunan yüzeylerde sertliğin değişmesi mümkündür. Genellikle yüzey sertliğinde görülecek artma oluşan oksit tabakasından kaynaklanmaktadır. Bunun yanı sıra rekristalizasyon veya aşırı yaşlanma sıcaklığının oluşması halinde yüzeylerde yumuşama görülebilmektedir. Tek yönlü veya karşılıklı kayma aşınmasından fretting aşınmayı ayıran en önemli özellik izafi hareketlerin çok küçük genlikli olmasıdır.

Pratikte fretting hasarlarına en çok karşılaşılan makina elemanlarını aşağıdaki şekilde özetlemek mümkündür (forsyth, 1981).

1. Tel halat veya kablolarda temas eden teller,
2. Çeşitli şekillerde yay rondelaları,
3. Yaprak yaylar ve helezon yaylar,
4. Kamalı ve pimli birleştirmeler,
5. Manşonlar, perçinli birleştirmeler,
6. Sıkı ve toleranslı geçmeler,
7. Protez cihazları vb.

3.5.Fretting Hasarını Önleme Metotları

Fretting hasarını önlemek için alınabilecek tedbirleri;

1. Dizayn,
2. Malzeme Seçimi,
3. Çeşitli kaplamalar,
4. Yağlama,
5. Yüzey soğuk işlemleri, şeklinde özetlemek mümkündür.

3.5.1. Dizayn

Frettinge neden olan mekanik faktörlerin yok edilmesi veya en aza indirilmesi öncelikle dizayn safhasında ele alınmalıdır. Bunun için mümkün olduğu kadar temas eden yüzeylerde kaçınmak gerekmektedir. Örnek olarak civatalı flanş bağlantıları yerine, tek bir makina elemanı kullanarak veya kaynaklı birleştirmelerin yapılması gibi. Bununla beraber tek ünite konstrüksiyonların gerek imalat esnasında, gerekse bakım ve tamir esnasında ekonomik olmaması veya konstrüksiyonun durumuna uygun olmaması gibi faktörler bu yöndeki tasarımları sınırlayabilmektedir.

Temas parametreleri ile ilgili olarak, Nishioka ve Hirakawa silindirik fretting yastıkları ile aşındırılan düz yorulma numunelerinde fretting yorulma çatlaklarının başlangıç safhası için bir denklem geliştirmişlerdir. Tamamen kayma durumunda yani, kayma genliği (S) değerinin çok büyük olması durumunda denklem aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\sigma_{fwl} = \sigma_{wl} - 2 \mu p_o \quad (3.3)$$

σ_{fwl} = Fretting yorulması çatlaklarının başlaması için gerekli gerilme.

σ_{wl} = Frettingsiz çatlak başlaması için gerekli değişen gerilme.

μ = Sürtünme katsayısı.

p_o = Max. temas basıncı.

Denklemden de görüldüğü gibi, fretting yorulma davranışındaki iyileşme,

1. Malzemenin yorulma mukavemetini artırarak,
2. İzafi kaymayı azaltarak,
3. Temas basıncını azaltarak,

3.a). p_0 basıncı azaltılarak,

3.b). Sürtünme katsayısı azaltılarak,

sağlanabilmektedir (Gordelier ve Chivers, 1979).

3.5.2. Malzeme Seçimi

Malzemelerin dikkatli seçimi de fretting aşınmayı azaltmada önemli bir unsurdur. Sert malzemeler fretting aşınmaya dirençli olmalarına rağmen, bu malzemelerin de şiddetli mukavemet kaybına uğradıkları tesbit edilmiştir.

iki metal arasında adhezyonun miktarı, metallerin karşılıklı eriyebilirliklerinin bir fonksiyonudur. Tuzun sadece suda kolaylıkla eriyebildiği gibi, belirli metal atomları diğer metallerin kristal yapılarında kolaylıkla eriyebilirler. Örnek olarak, nikel atomları bakır içerisinde tamamen eriyebilirler. Bunun yanısıra kurşun demir de tamamen erimez özelliktedir. Birbirleri içerisinde eriyebilen iki metal metalurjik bakımdan birbirlerine daha uygundur. Buna karşın, metalurjik olarak uygun olmayan malzemeler ise, sürtünme bakımından uygun malzemelerdir ve aşınmanın olduğu uygulamalarda kullanılmaları tercih edilmelidir. Robinowicz tarafından geliştirilen metalurjik uygunluk grafiği Şekil (3.2) de görülmektedir.

Şayet tasarım sınırlamaları sebebiyle metalurjik bakımdan uygun olan malzemelerin kullanılma mecburiyeti varsa, metalurjik açıdan uygun olmayan bir malzeme ile yüzeyin kaplanması yeterli bir çözümdür. Kadmiyum, kurşun, kalay ve gümüş genellikle fretting aşınmasına maruz kalan elemanların kaplanmasında kullanılmaktadır (Brady, 1990).

	W	Mo	Cr	Co	Ni	Fe	Nb	Pt	Zr	Ti	Cu	Au	Ag	Al	Zn	Mg	Cd	Sn	Pb	In
In				•	□	○		⊗	⊗	□	□	⊗	⊗	○	□	⊗	⊗	⊗	⊗	Δ
Pb	•	•	○	○	○	○	○	⊗	⊗	⊗	○	•	□	○	○	□	□	⊗	Δ	
Sn	□		○	□	□	•	□	⊗	□	⊗	□	⊗	⊗	•	□	•	⊗	Δ		
Cd			□	□	•	•		⊗	⊗	□	□	⊗	⊗	○	⊗	⊗	Δ			
Mg		□		□	•	•	○		⊗	•	⊗	⊗	⊗	⊗	□	Δ				
Zn		□	⊗	⊗	⊗	⊗	•	⊗	•	□	⊗	⊗	⊗	⊗	Δ					
Al	⊗	□	⊗	□	⊗	⊗	⊗	□	□	⊗	⊗	⊗	⊗	Δ						
Ag	○	•	○	○	○	○	•	⊗	□	⊗	□	⊗	Δ							
Au	⊗	□	⊗	□	⊗	⊗		⊗	⊗	□	⊗	Δ								
Cu	•	○	○	⊗	⊗	□	•	⊗	⊗	□	Δ									
Ti	⊗	⊗	⊗	□	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	Δ										
Zr	□	⊗	□	⊗	□	•	⊗	□	Δ											
Pt	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	Δ												
Nb	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	Δ													
Fe	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	Δ														
Ni	⊗	⊗	⊗	⊗	Δ															
Co	⊗	⊗	⊗	Δ																
Cr	⊗	⊗	Δ																	
Mo	⊗	Δ																		
W	Δ																			

- Uygun Değil
 • Kısmen Uygun Değil
 □ Kısmen Uygun
 ⊗ Uygun
 Δ Özdeş Metaller

Şekil 3.2. Metalurjik uygunluk grafiği (Brady, 1990).

3.5.3. Kaplamalar.

a) Metal Kaplamalar

Fretting hasarını azaltmak amacıyla kullanılan kaplamaları sert ve yumuşak malzemeler olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Sert kaplamalar gerçek temas noktalarını azaltmakta ve yüzeyler arasında kaynak olma gibi adhezif etkileri azaltmaktadır. Yumuşak metal kaplamalar ise, düşük kesme mukavemetleri dikkate alınarak kullanılmaktadır ve temas bölgesinden atılmaya eğilimlidirler. Ancak çok ince bir metal tabakaya ihtiyaç duyulduğundan bu durum kaplamaların fonksiyonlarından ciddi bir azalmaya sebep olmaz. Bu tür kaplamalarının kullanılma nedeni, arayüzey sürtünme kuvvetlerini azaltması ve daha düşük elastisite modülüne sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Chivers ve Gordelier,1984). Syers'e göre sert kaplamalar genellikle daha iyi neticeler vermektedir. Bununla beraber optimum şartların sağlanması için darbeli sertleştirme gerekli olmaktadır (Waterhouse, 1981).

b) Metalik Olmayan Kaplamalar

Metalik olmayan kaplamaların temel fonksiyonu metal yüzeyler arasında fretting sürecinin ilk safhalarında meydana gelen yerel kaynakların oluşmasını engelleyen bir yüzey sağlamaktır. Kaplama bir reaksiyon ürünü şeklinde, örnek olarak; çeliklerde fosfor kaplamalar veya alüminyum ve titanyum alaşımlarında anodik kaplamalar, ısıtma işlemi veya kimyasal tesir ile sonradan polimerleşen bir monomer formunda uygulanabilmektedir. Bazı durumlarda ince bir naylon tabaka ilavesi veya politetrafloretillen mekanik olarak yüzeyler arasında tesbit edilebilir veya yüzeylerin birine veya her ikisine bağlanabilir. Ayrıca bu kaplamaların birçoğu belirli miktarlarda gözenekler ihtiva ettiğinden, uygun bir yağlayıcı ile doyurulabilmektedir.

Polimer tip kaplamaların etkisi elastik modülüne bağlıdır. Şayet bu değer düşük ise yüzeyler arasındaki hareket, kaplamada absorbe edilmektedir.

c) Difüzyon Kaplamalar

Difüzyon işlemleri metal yüzeylerin kimyasal yapısını ve sertliğini değiştirebilmektedir. Çeliklerin karbürizasyon ve nitrürasyonu perlit içeriğinin

artmasına sebep olan demir karbür gibi metaller arası bileşiklerin yoğunluğunu artırarak sertliğin artmasına yol açarlar

Bu yöntemin yorulma ile ilgili bir özelliği de yüzeydeki basma gerilmelerini artırmasıdır. Kromlama, alüminyumlama gibi gaz difüzyon süreçleri yüzeyin kimyasal yapısını değiştirir ve çelik yüzeylerine uygulandığında korozyon ve oksidasyon davranışını etkiler. Çeliklerde boron, krom ve vanadyum difüzyon kaplamaları, özellikle 200 °C de temperleme ve soğutma işlemlerinden sonra fretting yorulma hasarını önemli ölçüde azaltmaktadır (Waterhouse, 1981).

c) İyon Kaplama ve İyon Aşılama

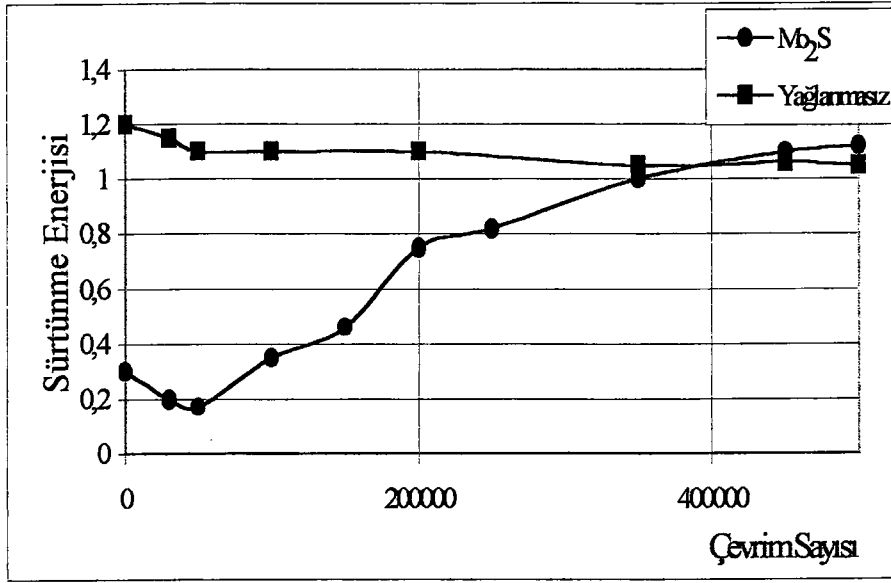
Yüzey işlemlerinin bu iki metodu son yıllarda uygulanmaya başlanmıştır. İyon kaplama işleminde gerilim nisbeten düşüktür ve iyonlar yüzeye nüfuz edecek kadar yeterli enerjiye sahip değildir, neticede yüzeyde kalırlar.

İyon aşılama yönteminde ise, iyonlar çok yüksek enerji ile hızlandırılarak 0,25 nm derinliğe kadar yüzeye nüfuz edebilmesi sağlanmaktadır. Yüzey aşılama iyonlarla kuvvetlenmekte ancak müstakil bir tabaka oluşmamaktadır. Sarıtaş ve Procter (1989), Ti – 6Al – 4V malzemesi üzerinde iyon aşılamanın fretting davranışı üzerindeki tesirini incelemişler ve bor ve azot aşılamanın aşınma direncini iyileştirmesine karşılık, yorulma özelliklerini zayıflatmadığını , ayrıca bor ve azot aşılamanın deniz suyunda fretting korozyona karşı direnci artırdığını tesbit etmişlerdir.

3.5.4. Yağlama

Metal yüzeylerin oksidasyonunu önlemek ve iki yüzey arasındaki sürtünmeyi azaltmak gibi özelliklerinden dolayı yağlama işlemi fretting hasarını önleyici bir tedbir olarak uygulanmaktadır.

Sıvı yağların yüzeyleri tam olarak ayırmadığı bilinmektedir. Ancak temas halindeki pürüzlerin sayısını azaltması ve sistemdeki kalıntıları uzaklaştırması bakımından fretting aşınmayı azaltabilmektedir. Genellikle gresle yağlama fretting hasarının önlenmesinde başvuru en yaygın metot olarak görülmektedir.



Şekil 3.3. Mo₂S kaplanmış çelik yüzeyler için çevrim sayısı ile sürtünme enerjisinin değişimi (Waterhouse, 1981).

Katı yağlayıcılar içinde ise en önemlisi molibden sülfittir. Waterhouse molibden di sülfür özellikle başlangıç safhasında fretting aşınmayı önlemede etkili olduğunu, ancak daha sonra kaplamanın zayıfladığını ve koruma özelliğini kaybettiğini ifade etmektedir. Ayrıca molibden di sülfitin yüzeye bir reçine ile bağlanmasının filmin koruyucu özelliğini artırdığı tesbit edilmiştir (Waterhouse, 1981).

3.5.5. Soğuk Yüzey İşlemleri

Bu tür işlemler genel olarak malzemeyi iki yönden etkilemektedir. Birincisi, malzemenin soğuk deformasyon sertleşme kapasitesine bağlı olarak yüzeyin sertliğini artırmak, ikincisi ise yüzey tabakalarını sıkıştırmaktır. Bu özelliklerin her ikisi de fretting açısından yararlı olmaktadır (Waterhouse, 1981).

4. NORMAL YORULMA

Yorulma tekrar eden şekil değiştirme ve gerilmelere maruz kalan malzemelerde meydana gelen ilerleyen yerel ve sürekli yapısal bir değişimdir. Belirli bir devir sayısından sonra çatlama veya kırılma ile ortaya çıkar (Czyryca, 1992).

Yorulma kırılmaları; plastik şekil değiştirme, çekme gerilmesi ve çevrimli gerilmenin aynı zamanda tesiri ile meydana gelir. Bu nedenle bu üç faktörden herhangi birinin olmaması halinde yorulma çatlakları oluşmayacak ve ilerlemeyecektir. Çevrimli gerilme ve şekil değiştirme çatlakların başlamasında, çekme gerilmeleri ise oluşan bu çatlakların ilerlemesinde etkili olurlar (Czyryca, 1992).

Yorulma süreci üç safhadan ibarettir.

- * Çatlağın başlamasına yol açan başlangıç yorulma hasarı,
- * Çatlağın ilerleyerek, kalan kesitin uygulanan yükleri taşıyamayacak kadar zayıflaması
- * Kalan kesitin ani olarak kırılması.

Yorulma çatlağı genellikle malzemelerin statik akma mukavemetinin altındaki tekrar eden gerilmelerden kaynaklanmakta ve şekil değiştirmenin en şiddetli olduğu bölgelerde başlayarak ilerlemektedir. Parçanın geometrik, fiziksel ve metalurjik özellikleri gerilmeyi yoğunlaştırmaya eğilim gösterir ve yorulma hasarının muhtemel bölgesini oluştururlar. Bu yüzden gerilme yoğunlaşması metallerin yorulmasında temel bir faktördür. Ayrıca malzemelerin çeşitli türlerde hatalar içermesi ve gerilme yoğunlaşmasına sebep olan bu bölgelerde şekil değiştirmenin artması yorulma çatlaklarının başlamasında etkili olur. Mikroskopik düzeyde ise, yorulma sürecinin en önemli özelliği, tane sınırlarında veya devamlı kayma bantlarında çatlakların gelişimini müteakip akma gerilmesini aşan tersinir gerilmelerin tesiri altında bir veya daha fazla çatlağın oluşumudur (Esin 1981).

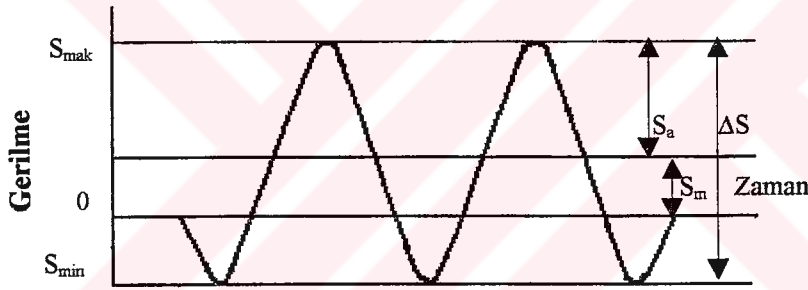
Herhangi bir numune veya yapının yorulma ömrü, hasarın meydana gelmesine sebep olan gerilme çevrimlerinin toplam sayısıdır. Bu sayı gerilme durumu, dalga şekli, yorulma ortamı ve malzemenin fiziksel ve metalurjik durumunu içeren bir çok değişkenin fonksiyonudur (Czyryca, 1992 ; Boyler 1986).

4.1. Gerilme Oranı

Gerilme oranı; bir çevrimde belirli iki gerilmenin matematiksel oranıdır. Yaygın olarak kullanılan oranlardan, A ; değişen gerilme genliğinin ortalama gerilmeye

oranıdır ($A = S_a / S_m$). R ise minimum gerilmenin maksimum gerilmeye oranıdır ($R = S_{min} / S_{max}$).

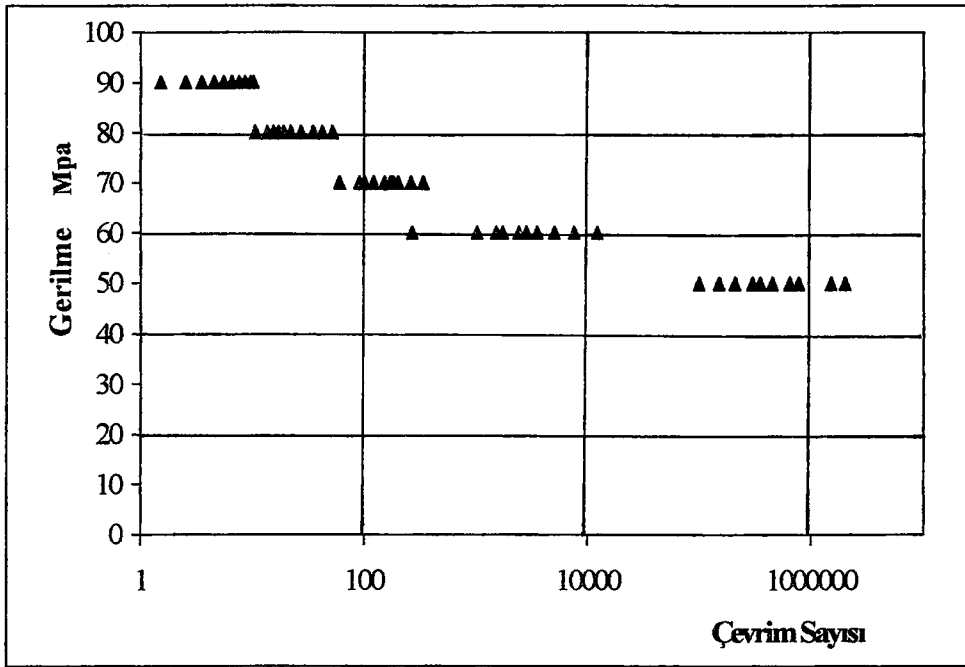
Eğer gerilmeler tamamen tersinir ise gerilme oranı -1 , kısmen tersinir ise R birden küçük negatif bir sayı olmaktadır. Eğer gerilme yüksüz ve maksimum bir gerilme arasında değişiyorsa $R = 0$, gerilme iki çekme gerilmesi arasında değişiyor ise, gerilme oranı R birden küçük pozitif bir sayı olmaktadır. Gerilme oranının 1 olması gerilmede değişimin olmadığını gösterir. Bu durumda yorulmadan ziyade sürünme söz konusudur. Uygulanan gerilmeler üç parametre ile tanımlanır. Ortalama gerilme S_m ; bir çevrimde maksimum ve minimum gerilmelerin matematiksel oranıdır. $S_m = (S_{max} + S_{min}) / 2$. Tamamen tersinir çevrimli bir deneyde ortalama gerilme sıfırdır. Gerilme aralığı S_r ; bir çevrimde maksimum ve minimum gerilmeler arasındaki farktır ($S_r = S_{max} - S_{min}$). Gerilme genliği S_a ; gerilme aralığının yarısıdır ($S_a = S_r / 2 = (S_{max} - S_{min}) / 2$). (Boyer 1986). Şekil (4.1) de çevrimli gerilme ile ilgili deney parametrelerini tanımlayan grafik verilmiştir.



Şekil 4.1. Çevrimli gerilme ile ilgili parametreler (Boyer, 1986)

4.2. S - N Eğrileri

Yorulma deneylerinin sonuçları genellikle yarı logaritmik bir diyagramda, çevrim sayısına (N) karşı gerilme genliği, maksimum gerilme veya minimum gerilme olarak gösterilir. Çevrim sayısı için logaritmik, gerilme için lineer veya logaritmik skala kullanılır. Şekil (4.2.) de orta mukavemetli çelikler için S - N eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.2. Orta mukavemetli çelikler için S-N eğrisi (Boylar, 1986).

4.3. Kırılma Yüzeyi Karakteristikleri

Yorulma kırılması yüzeylerinde genellikle nisbeten daha kolay tesbit edilebilen en karakteristik özellik, yorulma çatlak kaynağı etrafında "kumsal izlerine" benzer izlerdir. Bu izler kırılma yüzeyinin oksidasyonu ile frekans ve yükteki değişmelerin bir sonucu olarak meydana gelir. yorulma çatlağının ilerlemesi ile ilgili kırılma bölümü genellikle pürüzsüz ve uygulanan çekme gerilmesine dik yönelmiştir. Son kırılma bölgesi ise aynı malzemenin kırılma tokluğu numuneleri veya darbe numunelerinin kırılma yüzeylerine benzerlik göstererek genellikle lifli bir yapıya sahiptir. son kırılma bölgesinin boyutları, yükün büyüklüğüne ve şekli ise kırılan parçanın yükleme yönüne, büyüklüğüne ve biçimine bağlıdır (Dawling , 1993). Tok malzemelerde, son kırılma bölgesi iki farklı tarzda kırılma gösterir.

- 1- Aynı düzlemde ve yorulma bölgesinde genişleyen çekme kırılması
- 2- Çekme kırılmasına sınır olan kısmın yüzeyine 45° de kesme kırılması

Yeterli tokluğa sahip ince metal levhalarda son kırılma nisbeten farklı meydana gelir. Yorulma bölgesinden çatlak ilerlerken levha yüzeyi ve yükleme yönü ile takriben 45°'lik bir açı meydana gelinceye kadar, kırılma düzlemi çatlağın ilerleme yönündeki

bir eksen etrafında döner. Kırılma düzlemi yük yönüne 45° eğik olarak ya tek kesme ya da çift kesme düzleminde meydana gelir (Czyryca, 1992).

Yorulma kırılması yüzeylerinin elektron mikroskopu ile incelemelerinde ise, en belirgin özellik, yorulma çizgileri olarak isimlendirilen belirli aralıklara sahip paralel çizgilerdir. Yorulma çizgileri mikroskopik çatlak ilerleme yönüne dik olarak yönelmişlerdir ve üniform yükleme ile genellikle yorulma kaynağından başlamak üzere aralıklarda artış görülebilir. Her bir çizgi tek bir gerilme çevriminin bir sonucudur. Ancak her gerilmenin bir çizgi meydana getirmesi beklenmemelidir. Çizgi aralığı uygulanan gerilmelerin seviyesine bağlıdır. Çizgilerin belirginliği ise, malzemenin sünekliliğine bağlıdır ve yorulma sınırından daha yüksek gerilme seviyelerinde daha belirgin olurlar (Czyryca, 1992 ; Samuels 1993).

4.4. Yorulma Mekanizması

Mikroskopik ölçekte incelendiğinde bütün malzemeler yön ile özellikleri değişen ve homojen olmayan bir yapıya sahiptir. Homojensizlik sadece tane yapısı sebebiyle değil, aynı zamanda küçük boşlukların varlığından dolayı veya farklı kimyasal parçacıklardan kaynaklanabilmektedir. Üniform olmayan böyle bir mikroyapıdan dolayı, gerilmeler üniform olmayan bir şekilde dağılır. Gerilmelerin şiddetli olduğu bölgeler ise genellikle yorulma hasarlarının başladığı noktalardır (Dowling, 1993).

Bir yorulma sürecini dört safhada incelemek mümkündür.

* Çatlak Başlaması:

Uygun bir ısıtma işlemi ile giderilebilen yorulma hasarının ilk safhasını ihtiva eder.

* Kayma Bandı Çatlak Gelişimi:

Yüksek kesme gerilmesine sahip düzlemlerde ilk çatlağın derinleşmesini ihtiva eder. Genellikle "birinci safha çatlak gelişimi" olarak isimlendirilir.

* Yüksek Çekme Gerilmesine Sahip Düzlemlerde Çatlak Gelişimi:

Maksimum çekme gerilmesine dik yönde çatlağın ilerlemesini ihtiva eder. Genellikle "ikinci safha çatlak gelişimi" olarak isimlendirilir.

* Son Safha:

Çatlağın belirli bir uzunluğa erişip, kalan kesitin uygulanan yükü taşıyamayacak duruma gelmesi.

*** Son Safha:**

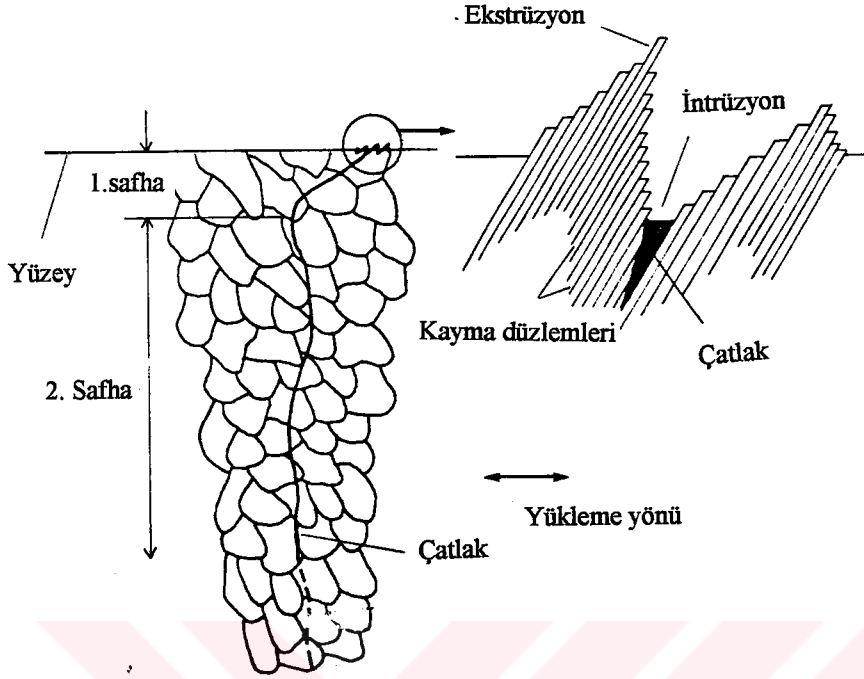
Çatlağın belirli bir uzunluğa erişip, kalan kesitin uygulanan yükü taşıyamayacak duruma gelmesi.

Yukardaki her bir safhanın toplam hasar çevrimine göre izafi oranları malzeme ve deney şartlarına göre değişmektedir. bununla beraber bir yorulma çatlağı numunenin toplam ömrünün % 10'dan önce oluşabilmektedir (Dieter 1986).

Başlangıçta, akma gerilmesinin altında uygulanan gerilmelerde belirli bir çevrim sayısından sonra çevrimin çekme yarısında deney numunesinin yüzeyindeki malzeme plastik olarak şekil değiştirmeye başlar ancak malzemenin geneli elastik olarak kalır. Malzeme genelinin elastik zorlamalarından dolayı, çevrimin basma yarısında yüzeyin plastik malzemesi tekrar elastik duruma geri döner. Belirli bir zaman sonra öyle bir safhaya ulaşılır ki, yüzey malzemesi artık elastik duruma geri dönemez ve sürekli plastik olarak kalır. Bu süreç "tersinir olmayan plastik deformasyon" olarak isimlendirilmekte ve malzeme yorulma ile sertleşmektedir. Bu safhada uygulanan gerilmeye 45°'lik düzlemlerdeki yüzeyde kayma meydana gelir. Ömrün takriben % 5' i civarında "devamlı kayma bantları" (PSB) olarak isimlendirilen yerel bantlarda kayma yoğunlaşmaya başlar. Bu bantlar başlangıçta çoklu kutuplar ve ikiz kutuplar düzeninde ana dislokasyonlardan ibarettir (Sarıtaş, 1995).

Çevrim devam ederken ilk bantlar arasındaki bantlarda kayma meydana gelir ve bu bant büyük oranda ikincil dislokasyonlardan ibarettir. Malzeme tamamen kayma bantları ile dolduğunda, (çalışma sertleşmesi) daha az ikincil dislokasyonlara sahip olmasından dolayı yumuşak olan ilk kayma bantları kaymaya başlar ve devamlı kayma bantları gelişir. Bu bantlar yorulma çatlaklarının başlama yeridir.

Yorulma deformasyonuna has önemli bir yapısal özellik "kayma bandı ekstrüzyonları" ve kayma bandı intrüzyonları" olarak isimlendirilen tepelerin ve yivlerin yüzeyde oluşmasıdır. Ekstrüzyon ve intrüzyonların oluşumu ile ilgili olarak Cotrell, Şekil (4.3.) de görüldüğü gibi, kaymanın kayma düzlemlerinde aynı anda meydana geldiğini ileri sürmüştür. Bir intrüzyon esas olarak küçük bir mikro çatlaktır. Şekilde görüldüğü gibi, çatlak önce uygulanan gerilmenin kesme elemanları ile belirlenen bir yönde ilerlemekte (safha 1), hemen sonra uygulanan çekme gerilmelerinin tesiri ile yön değiştirmektedir (safha 2) (Samuels 1993).



Şekil 4.3. Çatlak oluşumunun şematik olarak gösterilmesi (Samuels, 1993).

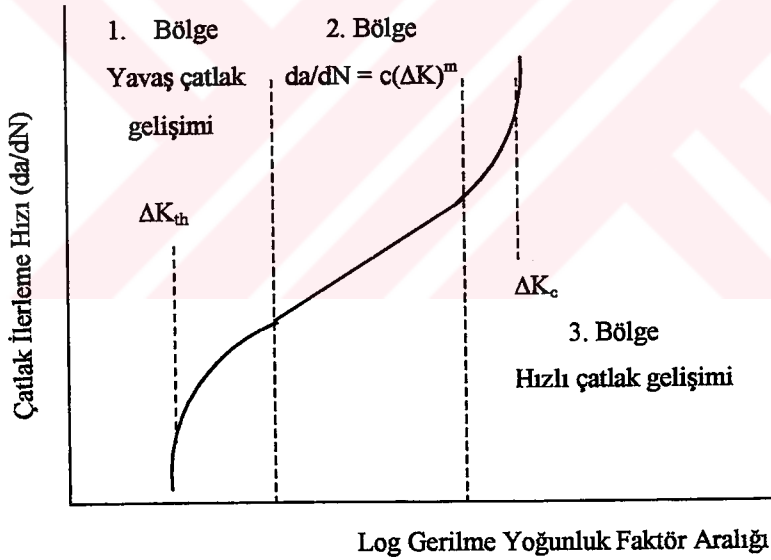
İkinci mekanizma Mott tarafından ileri sürülmüştür. Bu mekanizma metalin kristal içerisinde bir boşluk bırakarak yüzeyden ihraç edilmesine bağlı olarak vida dislokasyonlarının çapraz kaymasını ihtiva eder ve bu boşluklar bir mikroçatlak gibi davranırlar. Aynı zamanda yorulma esnasında devamlı kayma bantlarında oluşan aralıklar birer mikroçatlak gibi davranan boşlukları oluşturmak üzere yoğunlaşabilirler. Ayrıca kusurların yığılması, dislokasyonlara bağlı olarak ya gerilme yoğunlaşması ile ya da hacim değişimi ile çatlamaya yol açarak kayma düzleminde kristal bağı bozabilirler (Sarıtaş, 1995).

Çatlaklar yukarıda ifade edilen mekanizmaların herhangi birine uygun olarak başlayabilmektedir. Bununla beraber alaşımlama ve üretim yöntemlerinden kaynaklanan segregasyon, inklüzyon, ikinci faz partikülleri ve yapıyı bozan diğer faktörler de çatlak başlama sürecinde önemli tesirlere sahiptir (Czyryca, 1992).

Çatlağın İlerlemesi ;

Yorulma çatlakları şekil (4.4.) de görüldüğü gibi, üç safhada ve üç farklı tarzda ilerlerler. Birinci safha kesme, ikinci safha çekme ve üçüncü safha bir yırtma tarzıdır. Yorulma çatlak gelişimi ile ilgili bilgiler genellikle çatlağın uzunluğuna bağlı olan çatlak ucundaki gerilme yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak çevrim başına çatlak gelişme hızı şeklinde ifade edilmektedir.

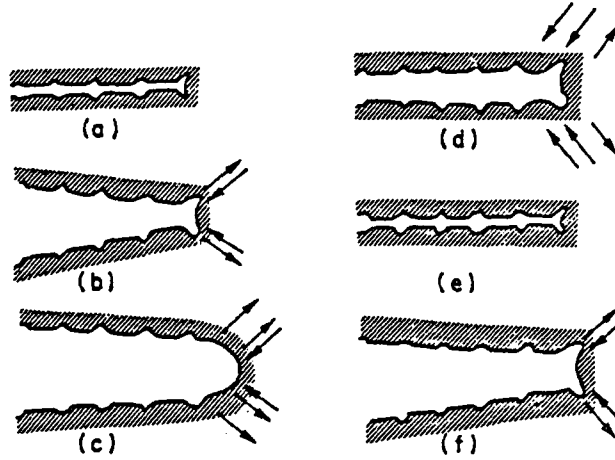
Ortadaki (2. safha) sürekli durum bölgesi, diyagramda gösterildiği gibi Paris Erdoğan denklemi ile tanımlanabilir. Yorulma ömrünün önemli bir kısmı oldukça yavaş gelişme hızlarındaki mikro çatlakların ilerlemesinde harcanabilmektedir. Bu çatlakların gelişmesi ilk safhalarda çatlağın boyutuna bağlı olarak çatlağın ucundaki gerilme yoğunlaşması ile kontrol edilir. Uygulanan gerilmeye 45°'deki kayma düzlemleri boyunca kesme bu safhada çatlakların gelişmesine sebep düzlemleri boyunca kesme bu safhada çatlakların gelişmesine sebep olur. Bu gelişme hızları atomik boyutludur ve yerel dislokasyon ve kristal yapılarına oldukça hassastır.



Şekil 4.4. Çatlak gelişim safhalarının şematik gösterimi (Saritaş, 1995).

Çevrim devam ederken mikro çatlaklar (ΔK_{th}) eşik gerilme yoğunluğundan daha büyük bir çatlak ucu gerilme yoğunluğu kazanarak makro çatlaklara dönüşürler (şekil 4.4.). Çatlak birinci safhadan ikinci safhaya dönüşür ve çatlama modeli kesmeden çekme modeline değişir. Bu safhada çatlak şekil (4.5) de görüldüğü gibi kesme

deplasmanları meydana getiren, çatlak uçlarına kenar dislokasyon ilavesiyle sürekli olarak ilerlerler. Şekil (4.5.) de çatlak ilerleme mekanizması görülmektedir.



Şekil 4.5. İkinci safhada çatlak gelişiminin şematik gösterilmesi (Laird, 1979)

Bu mekanizma "plastik – körleşme süreci" olarak isimlendirilmekte ve geçerli bir model olarak kabul edilmektedir. Başlangıçtaki yüklenmemiş çatlak ucu şekil (4.5.a) da görülmektedir. Çekme yükü uygulanırken, çatlak ucunun çift çentiğindeki keskin bantlarda kayma yoğunlaşmaya başlar ve çatlak yukarı doğru açılır. Kesme yönünde yeni bir yüzey ve bir "kulak" oluşur (Şekil 4.5.b,c). Çevrimin basma yarısında ise, çatlak içeriye doğru itilir ve şekil (4.5.d,e) de görüldüğü gibi, arkasında bir kulak bırakarak kapanır. Bu kulaklar yorulma kırılma yüzeyinde görülen küçük paralel çizgilerdir (Laird, 1979 ; Sarıtaş, 1995)

Çatlak çok yüksek hızlara ulaşmak için yeterli büyüklüğe sahip olunca yırtma modeline dönüşür. Malzemenin kalan kesiti artık uygulanan yüke dayanabilecek durumda değildir ve son çevrimde kırılma ani bir şekilde meydana gelir (Sarıtaş, 1995).

4.5. Yorulmaya Tesir Eden Faktörler

4.5.1. Gerilme Yoğunlaşması

Yorulma mukavemeti, çentik veya delik gibi gerilme artırıcıların bulunması halinde önemli ölçüde azalmaktadır. Makina elemanları flanş, delik, vida dişleri, kama yuvaları, sıkı geçmeler vb. gerilme artırıcılar içermesinden dolayı, bu kısımlarda yorulma çatlaklarının başlama ihtimali artmaktadır. Bu bakımdan yorulma hasarlarını azaltmasının başlıca yollarından biri doğru tasarım ve imalat ile mümkün olduğunca

gerilme artırıcı faktörlerin azaltılmasıdır. Ayrıca gerilme yoğunlaşması, gözenek, kalıntı, yerel aşırı ısınma, dekarbürizasyon, ikincil (çökelmiş) fazlar gibi metalografik süreksizlikler ve yüzey pürüzlülüğünden de kaynaklanmaktadır (Dieter, 1988).

4.5.2. Boyut

Yorulma numunelerinin boyutlarının değişmesi, esas olarak iki faktörde değişime neden olur. Birincisi, çapın artması numunenin yüzey alanı ve hacmini artırır. Yüzeyin artması yorulmanın genellikle yüzeyden başlaması nedeniyle oldukça önemlidir. İkincisi burulma veya eğme olarak yüklenen çentikli veya sade numuneler için çaptaki artış genellikle çap boyunca gerilme mertebesini azaltır ve yüksek gerilmeye maruz kalan malzeme hacmini artırır (Dieter, 1988).

4.5.3. Yüzey Etkileri

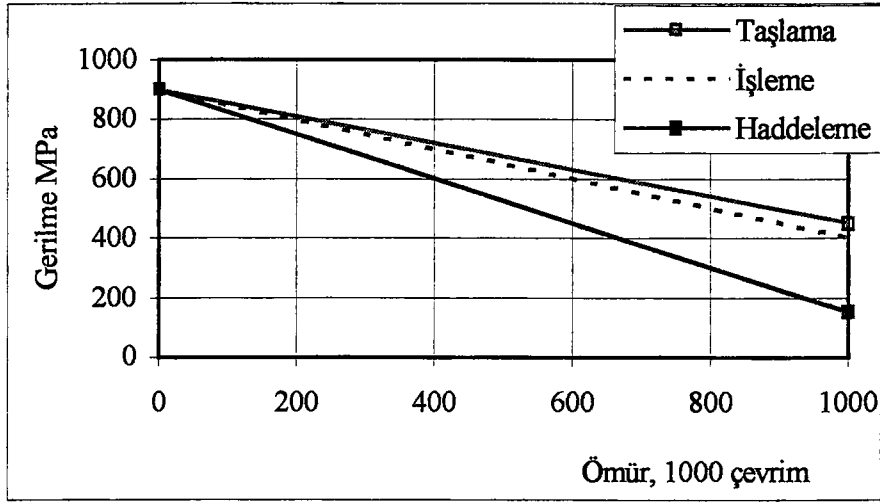
Genel olarak bütün yorulma hasarları yüzeyde başlar. Eğme ve burulma gibi yüklemenin genel tipleri için maksimum gerilme yüzeyde meydana gelir ve hasar burada başlar. Yorulma özelliklerinin yüzey şartlarına çok hassas olduğuna dair kesin bir görüş birliği vardır.

Bir yorulma numunesinin yüzeyini etkileyen faktörler genel olarak 3 bölüme ayrılabilir.

- a) Yüzey pürüzlülüğü veya yüzeydeki gerilme artırıcılar,
- b) Metal yüzeyin yorulma mukavemetindeki değişimler,
- c) Yüzeyin artık gerilme durumu.

a) Yüzey Pürüzlülüğü

Farklı üretim yöntemleri ile meydana gelen yüzey pürüzlülükleri yorulma özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Gerilme artırıcıları esas çekme mukavemetinin yönü ile paralel olarak parlatılan numuneler, yorulma deneylerinde en yüksek değerleri verirler. Yorulma mukavemetinde yüzey pürüzlülüğünün etkisi Şekil (4.6.) da görülmektedir (Czyryca, 1992).



Şekil 4.6. çeliklerin yorulma özelliklerinde yüzey şartlarının etkisi (302 - 321 HB) (Czyryca, 1992)

b) Yüzey Özelliklerindeki Değişmeler

Yorulma hasarlarının yüzey durumuna bağlı olmasından dolayı yüzey malzemesinin yorulma mukavemetinin değişimi yorulma özelliklerini önemli ölçüde değiştirecektir. Nitrürasyon ve karbürizasyon ile çelik parçalar üzerinde daha sert ve daha mukavemetli yüzeylerin oluşumu ile yorulma mukavemetinde belirgin iyileşmeler sağlanabilmektedir. Nitrürasyon ve karbürizasyon ile benzer şekilde alevle sertleştirme ve indüksiyon sertleştirme de yorulma mukavemetini artırabilmektedir (Dieter, 1988).

Metal kaplamalar malzemenin yorulma mukavemetinde olumsuz tesirler gösterebilmektedir. Karbon ve düşük alaşımlı çelikler, özellikle yüksek sertliğe sahip çelikler bileşik asit veya alkali temizleme işlemleri ve kaplama esnasında hidrojen absorpsiyonu nedeniyle hidrojen gevrekliğine eğilimlidirler. Kadmiyum gibi yumuşak kaplamaların, yorulma mukavemetinde çok küçük bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Krom gibi sert kaplama malzemeleri ise, genellikle ana metalde çökme olduktan sonra çekme gerilmeli bir durumdadır. Bu nedenle çatlaklar kaplama malzemesinde gelişir ve ana metal de çatlamaya neden olurlar (Czyryca, 1992).

b) Yüzey artık Gerilmesi

Yüzeyde uygun bir artık basma gerilmesi oluşumu yorulma mukavemetinin artırılmasında en etkili metottur. Artık basma gerilmeleri genellikle mekanik olarak plastik deformasyon ile sünek malzemelere uygulanmaktadır (Callister, 1991).

4.5.4. Sıcaklık

Oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda metaller üzerinde yapılan yorulma deneylerinde, azalan sıcaklıkla yorulma mukavemetinin arttığı tesbit edilmiştir. Buna rağmen, düşük sıcaklıklarda çeliklerin çentik hassasiyeti artmaktadır. Oda sıcaklığının üzerinde ise artan sıcaklıkla metallerin yorulma mukavemeti genel olarak azalmaktadır. Bu safhada yorulma hasarından sürünme hasarına geçiş hasar tipini de değiştirecektir.

4.5.5. Frekans

Frekansın yorulma deney sonuçlarına etkisi kesin olarak belirlenememiştir. Genellikle uygulanan 200 -10000 çevrim / dakika'lık frekansın deney sonuçlarına pek etki etmediği, daha düşük frekanslarda ise yorulma dayanım sınırının azaldığı kabul edilmektedir (Çimenoglu ve Kayalı 1991).

4.5.6. Metalurjik Değişkenler

4.5.6.1. Tane Boyutu

Yüksek çevrimli şekil değiştirme altında, (düşük çevrimli yorulma) birçok metalin yorulma ömrü tane boyutundan bağımsızdır. Buna karşın düşük çevrimli şekil değiştirme altında (yüksek çevrimli yorulma) çoğu metalin yorulma ömrü tane büyüklüğünün azalması halinde artar. Bu etkinin tane sınırlarının yorulma çatlaklarının ilerlemesini engelleyici rol oynamalarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Çimenoglu ve Kayalı 1991) Bazı alaşımlarda tane büyüklüğündeki azalma ile meydana gelen yüksek çevrimli yorulma dayanımındaki iyileşme, diğer olumsuz özelliklerle dengelenir. Örneğin tane boyutundaki azalmanın bazı çeliklerde yorulma sınırını yükseltmesine karşılık, küçük tane boyutu çentik hassasiyetini artırmaktadır (Czyryca, 1992).

4.5.6.2. Alaşımlama

Yorulma mukavemetinde kimyasal bileşimin etkisi, yaklaşık olarak çekme mukavemetindeki tesiri ile orantılıdır. Alaşımlamanın en önemli etkisi malzemenin tane boyutunu küçültücü etkisidir. Sade karbonlu çeliğin yorulma sınırı genellikle karbon

içeriği ile artmaktadır. Mo, Cr ve Ni' de benzer etkilere sahiptir. % 0.01'lik sülfür içerikleri yorulma sınırı üzerinde etkisi yoktur.

4.5.6.3. İkinci Fazlar

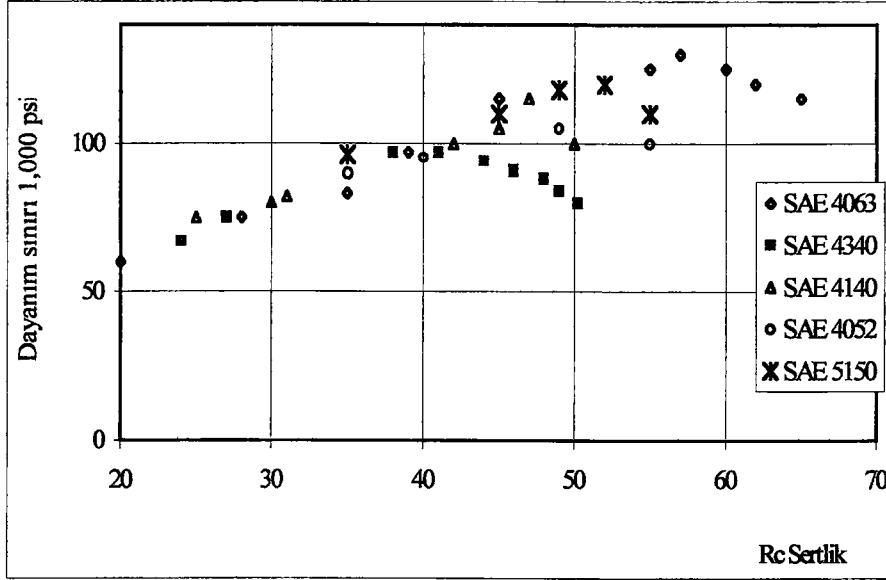
Metallurjik sistemde çoğu zaman bulunan ikinci fazlar çatlak ilerlemesini başlıca üç şekilde etkilerler.

- * İkinci fazın varlığı ile meydana gelen kafes şekil değişimi,
- * Boyut, biçim ve ikinci fazın dağılımı ile belirlenen gerilme yoğunlaşması,
- * İkinci fazlar çeşitli şartlar altında çatlak ilerleme hızına mani olduklarından veya hızlandırabildiklerinden dolayı çatlak oluşumu, ilerleme kinetikleri ve mekanizması üzerinde belirgin tesirlere sahiptir (Czyryca, 1992).

4.5.6.4. Isıl İşlem

Yorulma özelliklerinde bazı metallurjik değişkenlerin etkisi ile, aynı değişkenlerin çekme özellikleri üzerindeki etkisi arasında çoğu zaman bir paralellik vardır. Ancak iki yapısal durumda çelik aynı çekme mukavemetine sahip olmasına rağmen perlitik yapı, perlit içerisinde bulunan karpit lamellerin daha yüksek çentik etkisine sahip olmasından dolayı yorulma dayanımı daha düşüktür.

Genel olarak su verilmiş ve temperlenmiş mikroyapılar ısıtıl işlem gören düşük alaşımlı çeliklerde optimum yorulma özelliklerine sahiptir. Bununla beraber takriben 40 Rc üzerindeki sertlik düzeyinde ostemperleme ile meydana gelen beynitik yapı, aynı sertliğe sahip su verilmiş ve temperlenmiş yapıdan yorulma özellikleri bakımından daha iyidir. Elektron mikroskopu ile yapılan incelemelerde su verilmiş ve temperlenmiş yapının zayıf performansı, martenzitin temperlenmesi esnasında oluşan ince karbür filimlerinin gerilme yoğunlaştırma etkilerinden kaynaklanmaktadır. Su verilmiş ve temperlenmiş çelikler için yorulma limiti çeliğe bağlı olmak üzere 45 - 55 Rc sertlik üzerine kadar temperleme sıcaklığının azalmasıyla yorulma sınırı artmaktadır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Sertliğin bir fonksiyonu olarak alaşım çeliklerinin yorulma sınırı (Dieter, 1986).

Yüksek sertlik düzeylerinde yorulma özellikleri inklüzyonlara artık gerilmelere ve yüzey işlemlerine oldukça hassastır. Dekarbürizasyon ve martenzitik olmayan dönüşüm ürünlerinin çok küçük miktarları dahi yorulmayı etkilemektedir. Su verilmiş ve temperlenmiş çeliklerin yorulma özelliklerinde artık ostenitin küçük miktarlarının etkisi tam olarak tesbit edilememiştir (Dieter, 1986).

Malzemelere uygulanan ısı işlemler daima kontrollü ısıtma ve soğutma işlemlerini gerektirir. Ostenitin martenzite dönüşümü tercih edilmeyen şartlarda çatlama ile sonuçlanan genişleme ile meydana gelir. Soğutma çatlaklarının oluşumunu hızlandıran şartlar; çok şiddetli soğutma ortamı, keskin kenarlar, kaba pürüzler ve çok yüksek sertleştirme sıcaklıklarıdır (Czyryca, 1992).

5. BİLYALI DÖVME

Genellikle metal bir yüzeyin deformasyonu, şekil değiştiren yüzey tabakalarında artık basma gerilmeleri oluşumuna bağlı olarak yorulma özellikleri açısından yararlı olmaktadır. Yüzeyde mekanik olarak artık basma gerilmeleri oluşturmanın birçok yöntemi vardır. Bunlardan bazıları şekil değiştirme sertleşmesi, soğuk haddeleme, dövme ve bilyalı dövme işlemi olarak sayılabilir.

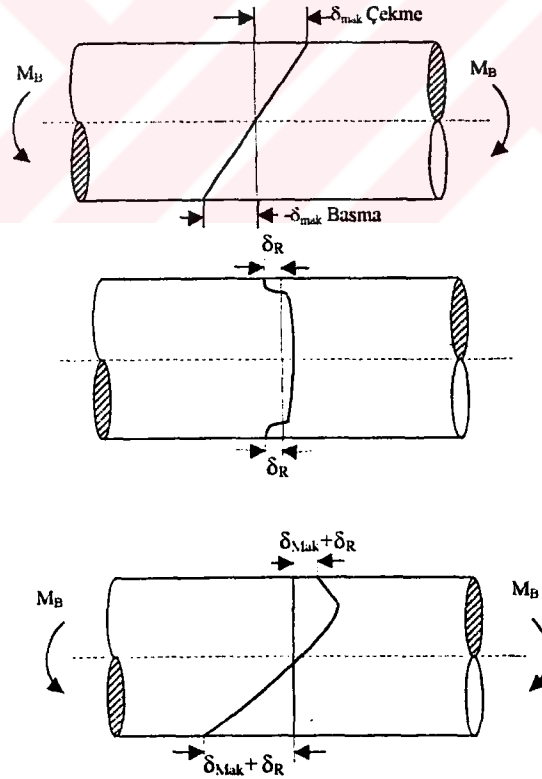
Bilyalı dövme; kontrollü şartlar altında, çok sayıda bilyadan meydana gelen bir bilya akımının belirli hızlarda, metal yüzeye çarpması ile yüzey tabakalarında basma gerilmelerinin oluşturulduğu soğuk çalışma metodudur.

Bilyalı dövme işlemi, yöntem olarak kum püskürterek yüzey temizleme ve çekiçle dövme işlemine benzetmekle beraber bilya enerjisinin ve yönünün kontrol edilebilmesi ve işlemin esas gayesi açısından farklıdır. Bilyalı dövme işleminin başlıca amacı, yorulma mukavemetini artırmaktır. Yorulma performansındaki iyileşme nedeniyle makina elemanlarının daha az ağırlıklarda üretilebilmesine imkan sağlaması açısından özellikle uçak ve otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Yöntem ayrıca, çelik üzerinde gümüş tabakanın adhezyonunun kontrol edilmesinde, ince metal parçaların istenilen formda şekillendirilmesinde, yüzey sertleştirmede, gerilmeli korozyon çatlamasına neden olan çekme gerilmelerini hafifletmek amacıyla parçaların içindeki gözeneklerin pervaz ve çentiklerin zararlı gerilme yoğunlaşma tesirlerinin azaltılmasında kullanılabilmektedir. Ayrıca dövme işlemi sonucunda yüzey temizliği de sağlanmış olmaktadır (Fuchs 1976 ve Metals Handbook 1990).

Bilyalı dövme işleminde dövülmesi istenen malzemeye göre daha sert, genellikle küre şekilli bilyaların hedef malzeme üzerine batmasını sağlayacak büyüklükte bir hız verilerek fırlatılması esastır. Bilya malzemesi olarak dökme demir, çelik, seramik ve cam kullanılmaktadır (Varol ve Meriç 1993).

Yüksek hıza sahip bilya akımının metal bir yüzeye çarpması halinde, dövülen malzeme yüzeyinde plastik akma olurken, iç kısımlar elastik olarak şekil değiştirir. Kalıcı deforme olmuş yüzey bölgesi genişlemeye çalışırken, elastik deforme olan iç bölgeler buna engel olmaya çalışır. İç bölgeler genişlemeye çalışan yüzey bölgesine basma, ilk boyutuna dönmeye çalışan iç bölgelere ise kalıcı deforme olmuş yüzey

bölgesi çekme kuvveti uygulayacaktır. Böylece bilyalı dövülmüş parçanın enine kesitinde homojen olmayan kalıcı deformasyonun neden olduğu artık gerilme profili oluşacaktır. Bu gerilme profili diğer bazı yüzey işlemlerinde de görülmektedir. Bilyalı dövme sonrası dövülen parçanın yüzey bölgesinde bilyanın taşıdığı kinetik enerjiye bağlı olarak 0,5 mm. derinliğe kadar ulaşabilen artık basma gerilmeli bir tabaka oluşurken, iç bölgelerde artık çekme gerilmesi oluşmaktadır (Saritaş ve Varol 1997; Aran 1989). Tipik bir kalıcı gerilme profili şekil (5.1.) de görülmektedir. Şekil (5.1a) da artık gerilme bulunmayan bir kırışteki elastik gerilme dağılımı, şekil (5.1b) de ise, bilyalı dövme ile elde edilen bir artık gerilme dağılımı görülmektedir. Burada yüzeydeki yüksek artık basma gerilmeler kesitin içi boyunca çekme artık gerilmeleri ile dengelenmelidir. Şekil (5.1c) de ise artık gerilmeler ve harici eğme gerilmelerinin cebirsel toplamı nedeniyle gerilme dağılımı görülmektedir. Burada da yüzeydeki maksimum çekme gerilmesi, yüzey artık basma gerilmesine eşit bir miktar ile azalmaktadır. Maksimum çekme gerilmesi numunenin içerisindeki bir noktaya yer değiştirmiştir. Bu gerilmenin büyüklüğü artık gerilme dağılımı ve uygulanan gerilmenin derecesine bağlıdır (Dieter 1986).



Şekil 5.1. Bilyalı Dövülmüş Bir Parçada Oluşan Artık Gerilme Profili (Dieter 1986)

51. Dövmeye Şiddeti

Dövmeye şiddeti, bilyadan iş parçasına ne kadar enerji transfer edildiğini belirleyen, çeşitli faktörlere farklıdır. Belirlenen hedeflere ulaşabilmek için öncelikle doğru yoğunlukta bir işlem uygulanması ve yoğunluğun doğru ölçümü gereklidir.

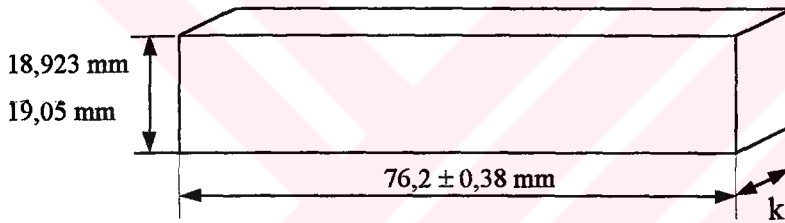
Dövmeye şiddetinin ölçümü 1963 yılında yılında Almen tarafından geliştirilmiş ve günümüzde de Almen şeritleri ve Almen Gage'i kullanılmaktadır. Soğuk haddelenmiş 1070 yay çeliğinden imal edilen bu şeritler 44 - 50 Rc sertliğe sahiptir. Almen şeritleri üç kategoride standartlaştırılmıştır .

N Şeritleri, Hafif dövmeye şiddetleri için

A Şeritleri, Orta dövmeye şiddetleri için

C Şeritleri, Ağır dövmeye şiddetleri için

kullanılmaktadır. Şekil (5.2.) de Almen test şeritlerinin boyutları görülmektedir.



N İçin ; $k = 0,0787 \pm 0,025 \text{ mm}$

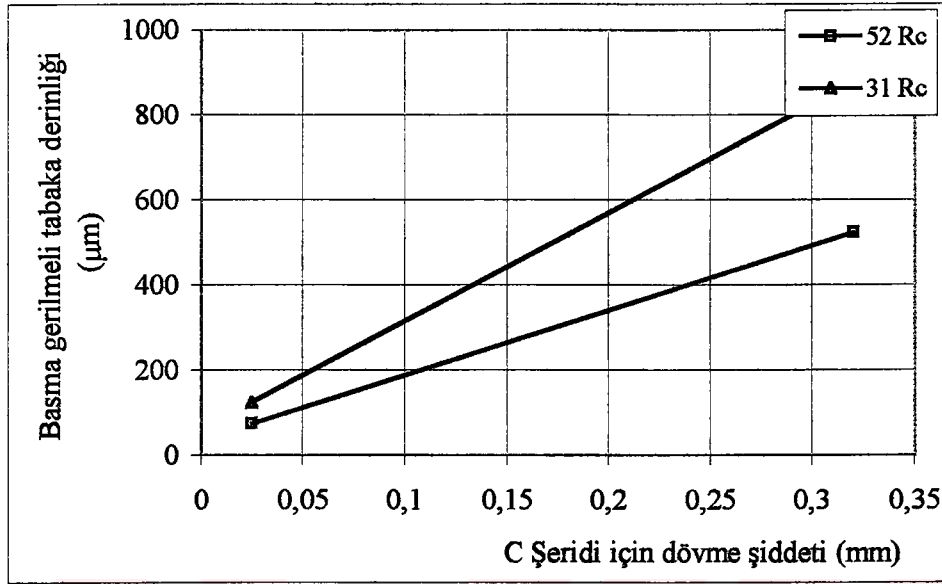
A İçin ; $k = 1,295 \pm 0,025 \text{ mm}$

C İçin ; $k = 2,387 \pm 0,025 \text{ mm}$

Şekil 5.2. Almen Test Şeritlerinin Ölçüleri (ASM ,1990)

Dövmeye şiddetinin ölçümü için, uygun Almen şeridi tutucuya tesbit edilerek bir yüzeyi dövmeye işlemine tabi tutulur. Tutucudan çıkarılan şerit, dövmenin tesiri ile dövülen yüzeyi konveks şeklinde eğilir. Eğim standart Almen Gage'i ile dövülme-yen yüzeyde ölçülür. Şerit eğiminin miktarı dövmeye şiddetini göstermektedir (ASM Handbook 1990). Farklı sertlik değerlerine sahip numunelerde, aynı büyüklükte dövmeye şiddetlerinin uygulanması halinde meydana gelen basma gerilmeli tabakanın kalınlığı

değişmektedir. Şekil 5.3. de farklı sertlik değerine sahip malzemelerde Dövme şiddeti ile basma gerilmeli tabaka derinliğinin değişimi görülmektedir (ASM Handbook,1990).



Şekil 5.3. İki farklı sertliğe sahip çelik için dövme şiddeti ile basma gerilmeli tabaka derinliğinin değişimi (ASM Handbook,1990).

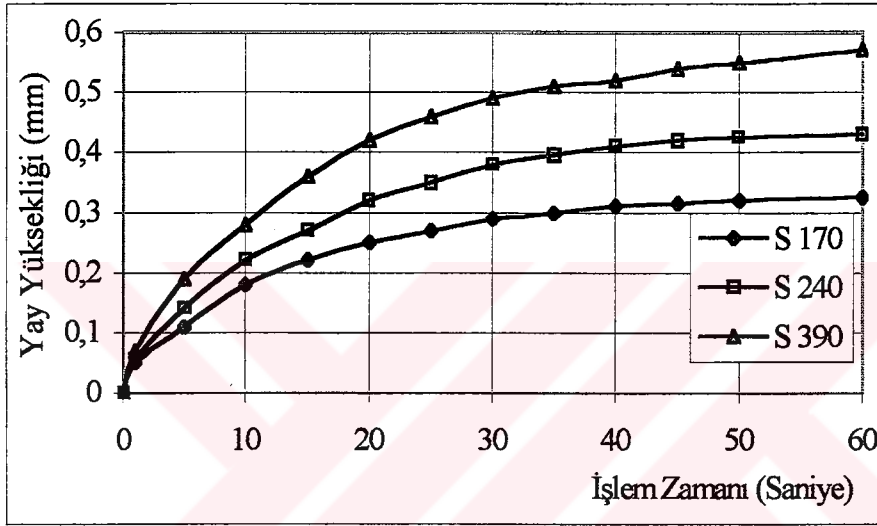
5.2. Dövme Şiddetini Etkileyen Faktörler

Dövme şiddetini etkileyen başlıca faktörler,

- Bilya hızı
- Bilya boyutu
- Çarpma açısı
- İşlem zamanı

a) Bilya Hızı: Bilya hızının artması iş parçasına transfer edilen enerjisinin miktarını da artırır ve dövme şiddeti büyür (Metals Handbook 1990). Meguid ve Duxbury (1981) shot peening ile ilgili değişkenleri araştırarak, artan ortalama bilya hızının iş parçasının yüzeyinde nüfuziyet derinliğini artırdığını ve Almen şeridinin daha büyük yay yüksekliği ile sonuçlandığını tesbit etmişlerdir. Ancak bilya hızı büyüdükçe bilyaların kırılma miktarı ve yüzey pürüzlülüğü artmaktadır.

b) Bilya Boyutu: Bilya büyüklüğü artarken, daha çok enerji iş parçasına nakledilir ve bundan dolayı yay yüksekliği artar. Bu tesbit Meguid ve Duxbury (1981) tarafından ifade edilmiştir (Şekil 5.4.). Bilya hızı ve işlem süresi sabit olması halinde bilya çapının büyümesi plastik deformasyona uğramış basma gerilmeli tabaka derinliğinin artmasına sebep olurken, doyum oranında bir azalma meydana gelmektedir. Bilya boyutunun seçiminde bilyaların her yere ulaşabilmesi bakımından iş parçasının şekli etkili olmaktadır (Metals Handbook 1990). Ayrıca küçük bilya ile meydana gelen pürüzlülük daha yüksek olmaktadır.



Şekil 5.4. Çeşitli Bilya Çapları İçin Yay Yüksekliğinde İşlem Zamanının Tesiri (Meguid ve Duxbury, 1981)

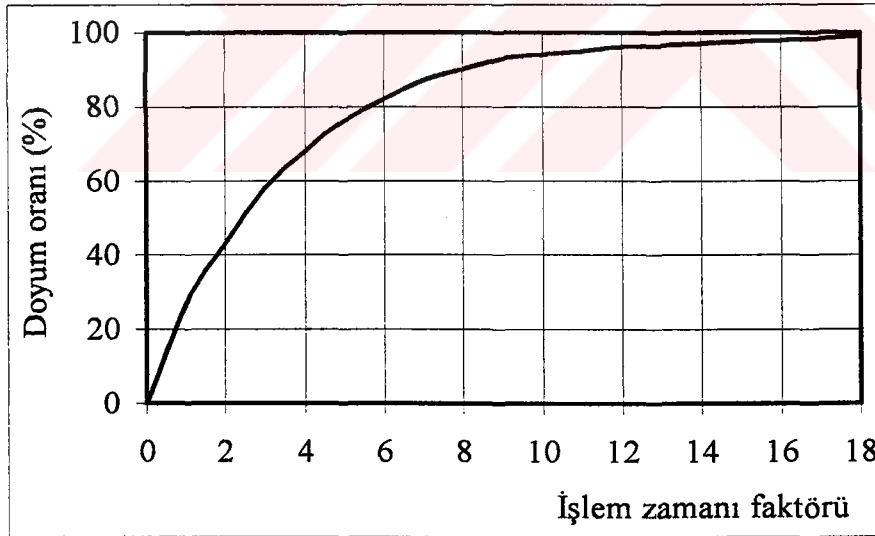
c) Çarpma Açısı : Dövme şiddeti üzerinde çeşitli çarpma açılarının tesiri henüz tam olarak tesbit edilmemiştir. Ancak 90°'lik bir açıda daha çok enerjinin iş parçasına transfer edildiği varsayılır. Bununla beraber bilyaların geriye dönmelerini engellemek amacıyla genellikle, normalden hafif bir açıda dövme işleminin yapılması uygundur. 90°'den 45°'ye azalan nozul açısı yüzey pürüzlülüğünde artışa neden olmaktadır. Düşük bir çarpma açısının kullanılma mecburiyeti karşısında bilya büyüklüğü ve hızındaki artışa ihtiyaç duyulabilir (Metals Handbook 1990).

d) İşlem Zamanı: İş parçası bilya akımına maruz kalırken Almen şeridinin yay yüksekliği önce hızlı bir şekilde artar, daha sonra artış hızı düşer. Bu noktada doyuma ulaşılır. İşleme devam edilmesi aşırı dövme nedeniyle zararlı olabilmektedir.

5.3. Doyum Oranı

Burakowski ve Nakonieczny (1981) tarafından Doyum Oranı, "yüzeyin bilya akımı ile hangi oranda dövüldüğünün bir ölçüsüdür" şeklinde tanımlanmıştır. Bilyalı dövülen parçalarda %100 doyum oranı elde edilmeden yorulma dayanımı karakteristiklerinde herhangi bir iyileşme sağlanamamaktadır (Metals Handbook 1990). Doğru ölçümün % 98 doyum oranı üzerinde yapılabileceğinden dolayı, bu değer tamamen doyumu temsil etmek üzere seçilebilir. Doyum oranı ile işlem zamanı arasında belirli bir ilişki vardır. Şekil (5.5)'de bilyalı dövmede işlem zamanının bir fonksiyonu olarak doyum oranı arasındaki ilişki görülmektedir.

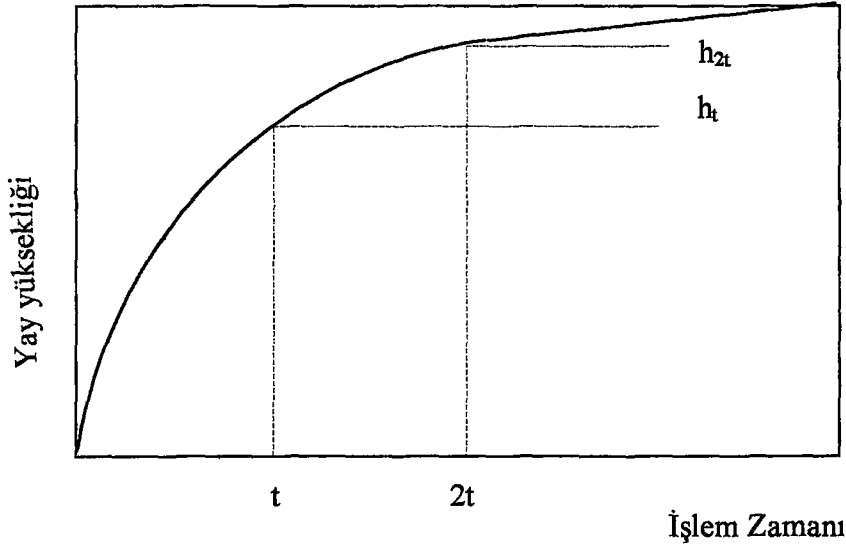
Doyum oranının tesbit edilmesinde kullanılan birçok yöntem vardır. Bunların en basitleri dövülen parçanın yüzeyinin $\times 10$ büyütme ile optik mikroskopta incelenmesidir. Diğer bir yöntem ise, işlem öncesi malzeme yüzeyinin bir "Fluorescent tracer" ile boyanmasıdır. Dövme tesiriyle "Tracer" kalkacağından dövülmeyen alanlar açıkça görülmektedir. Ancak bu yöntemler zaman ve güvenilirlik açısından uygun olmadığından, doyum oranının Almen eğriligidinden hareket edilerek tesbit edilmesi tercih edilmektedir.



Şekil 5.5. İşlem zamanının doyum oranına etkisi (ASM Handbook, 1990)

Şekil (5.6)'da işlem zamanı ile eğrilik yüksekliği arasındaki ilişki yardımı ile doyum oranının belirlenmesi gösterilmektedir. (t) ve (2 t) işlem sürelerindeki yay yüksekliği

arasındaki fark % 10 veya daha az olması halinde t süresinde doyum oranının tam olduğu kabul edilmektedir (Metals Handbook 1990).



Şekil 5.6. Dövme süresi ile yay yüksekliği ilişkisinden doyum oranının tesbit edilmesi (ASM,1990).

5.4. Bilyaların Tipi ve Kalitesi

Bilyalı dövme ortamının seçimi, iş parçasının sertliği istenen dövme şiddeti ve artık gerilme dağılımının tabiatı, iş parçasının yüzeyinin kimyasal yapısı ve ekonomik faktörler dikkate alınarak yapılmaktadır. bilya numaraları S70'den S930 aralığında MIL-S-13165 ile standartlaştırılmıştır.

İdeal olarak bilyalar küresel olmalı ve yuvarlak bilyaların sistemdeki yüzdesi kesinlikle %85'in altına düşmemelidir. Çünkü şekli bozulmuş, keskin kenarlara sahip kırılmış bilyalar dövülen yüzeyde derin çentikler oluşturabilmektedir (Metals Handbook1990).

Bilyalı dövme işleminde kullanılan başlıca bilya tipleri,

a) Döküm Çelik Bilya: Sertliği 40 - 50 Rc'ye eşittir. Dövme etkisini maksimum düzeyde elde edebilmek için bilya sertliği en az iş parçası kadar olmalıdır. Sert metal malzemelerin dövülmesi için sertliği 57- 60 Rc olan bilyalar kullanılmaktadır. Döküm çelik bilyalar en yaygın kullanılan bilya tipidir.

b) Dökme Demir Bilyalar: Sertliği 58 - 65 Rc'ye eşittir. Bu tür bilyalar kırılğan olduklarından ideal değildir.

c) **Cam Bilyalar:** Sertliği 46 - 50 Rc'ye eşittir. Diğer malzemelerle iş parçasının kirlenme ihtimalinin olduğu durumlarda ve düşük dövme şiddetleri için uygundur.

d) **Seramik Bilyalar :** (ZrO_2 gibi) Kırılmaya karşı yüksek dirence sahiptir. Çelik bilyalarla mukayese edilebilmektedir.

e) **Kesik Tel Bilyalar:** Çekilen tel eşit ölçülerde kesilip yuvarlatılarak elde edilmektedir. Her bir tane aynı boyutlara sahip olmasından dolayı kullanımı uygundur.

f) **Paslanmaz Çelik bilyalar:** Korozyon ortamlarda kullanılan pahalı bir seçenektir.

5.5. Bilyalı Dövme Sistemleri

a) **Pnömatik Sistemler:** Pnömatik sistemde, bilyalar iş parçasına basınçlı hava ile püskürtülmektedir. Nozul (meme) yüzey üzerine bilya akımını yönlendirecek şekilde ayarlanabilmektedir.

b) **Santrifüj Sistemler:** Bu sistemde bilyalar yüksek hızda dönen bir çark vasıtasıyla yönlendirilirler. Pnömatik sistemle mukayese edildiğinde, hız kontrolü ve enerji etkinliği açısından daha üstün özelliklere sahiptir (Metals Handbooks 1990).

5.6. Bilyalı Dövme İşleminin Yorulmaya Etkisi

Malzemelerin yüzeylerinde artık basma gerilmeleri oluşturmak üzere uygulanan yüzey işlemleri, genellikle, basma gerilmeli tabaka altındaki yüzeye paralel çatlak başlaması ve ilerlemesine neden olmaktadır. Nakonieczny (1981)'e göre, yüzey tabakalarındaki gerilme dağılımı yorulma ömründe temel bir etkiye sahiptir, çekme ve basma gerilmeleri arasında yüzeye dik düşük bir gerilme derecesi yüksek bir dereceden daha faydalıdır.

Wang ve arkadaşları (1987), farklı Alüminyum alaşımları ve çeliklerin farklı tiplerinde bilyalı dövmenin etkisini araştırmışlar ve bilyalı dövmenin yüzey tabakalarında çevrimli plastik şekil değiştirmenin meydana geldiği bir süreç olduğunu ifade etmişlerdir. Dövme işleminden sonra yüzeyde ince bir ikincil tane büyüklüğü boyutu ve yüksek bir dislokasyon yoğunluğu yorulma özelliklerinin iyileşmesinde yararlı olmaktadır.

Wang, Li ve Wu (1987) 7075 Alüminyum alaşımı üzerinde yaptıkları yorulma deneylerinde, bilyalı dövülmeyen alaşım yüzeyinde kayma bantlarının kaba bir dağılım

sergilediğini ve bilyalı dövülen alaşımda ise, kayma bantlarının çok ince bir dağılım gösterdiğini tesbit etmişlerdir. Bilyalı dövme ile meydana gelen mikroyapısal destekleme iyileşen yorulma özelliklerinde önemli rol oynamaktadır.

Bilyalı dövme işleminin yorulma ömürleri üzerindeki etkisi Fuchs (1981), tarafından aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

a) Bilyalı dövme, kısa yorulma ömürlerinden ziyade uzun yorulma ömürlerinde daha fazla etkiye sahiptir.

b) Bilyalı dövme, yüksek mukavemetli malzemelerde düşük mukavemetli malzemelere nazaran daha fazla etkiye sahiptir.

c) Bilyalı dövme işlemi, uygun şekilde işlenmiş pürüzsüz numunelerden ziyade çatlak eğilimli yüzeylere sahip parçalarda daha fazla etkiye sahiptir.

Bilyalı dövülen paslanmaz çelik ve nikel çelik numuneler üzerinde fretting yorulmanın etkileri Waterhouse ve Saunders (1979) tarafından incelenmiş ve kontrollü bilyalı dövme işleminin yorulma davranışında önemli bir tesire sahip olduğu ifade edilmiştir. Waterhouse (1965) yüzeyde çatlakların sayısındaki artmanın bu çatlakların uçlarında gerilme yoğunluğunda azalmaya neden olduğunu ve sonuç olarak yorulma çatlak gelişim hızlarında bir azalma meydana geldiğini ifade etmiştir.

Waterhouse ve Trowsdale (1992), Al – 4Cu – 1Mg malzemesi üzerinde fretting yorulmada yüzey pürüzlülüğü ve artık gerilmenin etkisini incelemişler ve artık basma gerilmesinin fretting ile başlayan yorulma çatlaklarının ilerlemesini önemli ölçüde yavaşlattığını tesbit etmişlerdir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, 35 Cr 4 çeliğinin fretting ve normal yorulma davranışları ile bu davranışların iyileştirilmesi yönünde uygulanabilecek ısıt işlemlerin ve bilyalı dövme işlemlerinin etkisi incelenmiştir. Deneylere hazırlık safhaları, deneyler ve ölçümler işlem sırasına göre Şekil 6.1. de özetlenmiştir.

6.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme

Deneysel çalışmada, malzeme bileşimi Tablo 5.1. de verilen 35 Cr 4 çeliği kullanılmıştır. Malzemenin bileşimi DBLF, RS 1000 marka bir spectrometre ile tesbit edilmiştir.

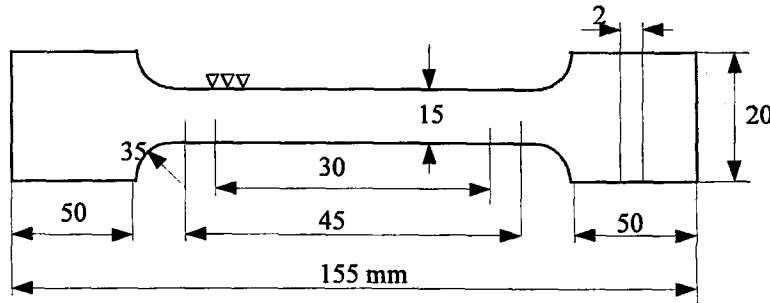
Tablo 6.1. Deneylerde kullanılan malzemenin kimyasal analizi.

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V
.325	.201	.751	.018	.010	.0004	.622	.085	.024	.212	.020	.003

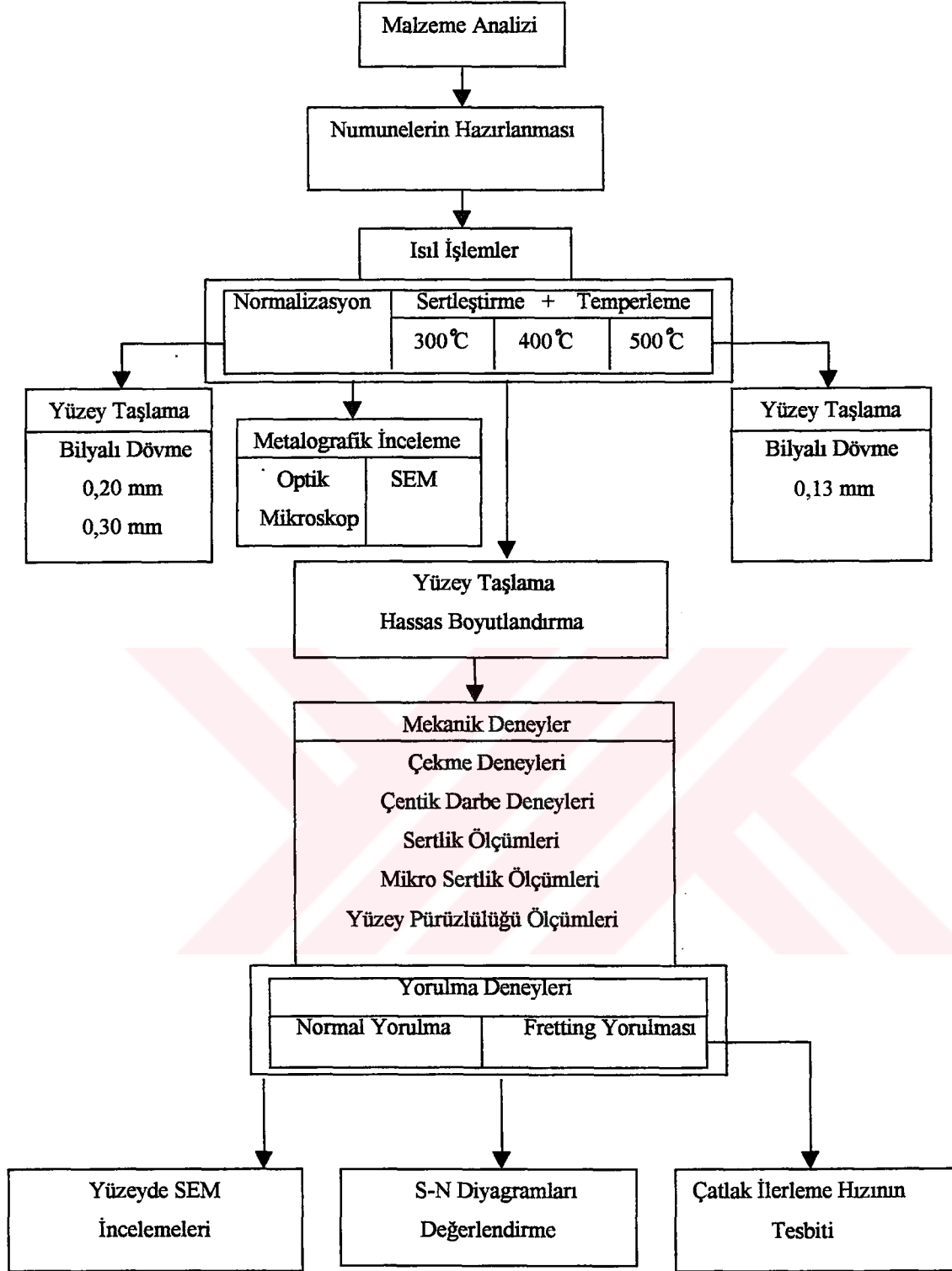
6.2. Numunelerin Hazırlanması ve Deneylerin Yapılışı

Numuneler Asil Çelik firmasından temin edilen 7mm kalınlığında ve 50 × 1000 mm ölçülerindeki yaprak yaylardan hazırlanmıştır.

Çekme deneyleri için boyutları Şekil 6.2 de verilen numuneler kullanılmıştır. Numunelerin hazırlık safhasında; yaprak yaylar belirlenen ölçülerde işlendikten sonra, kalınlıkları frezede 3mm ye düşürülmüş ve ısıt işlemler uygulanmıştır. Yüzey taşlama tezgahında taşlanıp kalınlıkları 2 mm' ye indirilmek suretiyle standart boyutlara getirilmiştir.

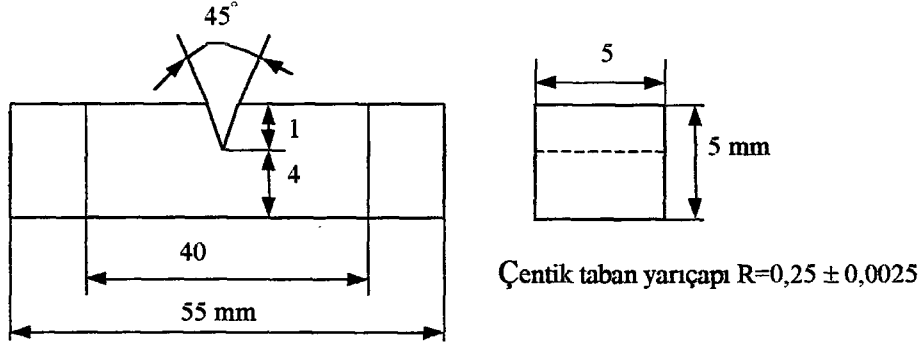


Şekil 6.2. Çekme numunelerinin ölçüleri (Kayalı, 1983)



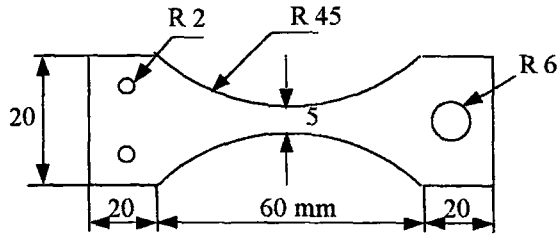
Şekil 6.1. Deneyisel çalışmaların akış diyagramı

Çentik darbe deneyleri "TS 269 Metalik Malzemede Vurma Deneyi (Charpy ve İzod)" standartlarına göre, boyutları Şekil 6.3 de verilen numuneler üzerinde yapılmıştır. Numuneler belirlenen ölçülerde frezede işlenip ısıtıl işlemler uygulanmış ve daha sonra yüzeyleri taşlandıktan sonra yine frezede çentik açmak suretiyle deneylere hazırlanmıştır.



Şekil 6.3. Çentik darbe deneylerinde kullanılan numune ölçüleri (TS 269)

Yorulma deneylerinde kullanılan numunelerin boyutları Şekil 6.4 de verilmiştir. Numunelerin hazırlanması için, yaprak yaylar şahmerdanda sıcak dövülerek kalınlıkları takriben 3,5 mm ye kadar düşürülmüştür. Daha sonra deneylerde kullanılan numune ölçülerinde işlenip, frezede kalınlıkları 1,7 mm ye indirilmiştir.



Şekil 6.4. Yorulma numunelerinin ölçüleri (ASM Handbook, 1992)

Belirlenen ısıtıl işlemler uygulandıktan sonra, numuneler TYT 400 düzlem taşlama tezgahında 0,02 mm talaş vermek suretiyle, numunelerin boyu doğrultusunda ve her iki yüzeyden talaş kaldırarak 1 mm kalınlığa kadar taşlanmıştır. Taşlanan bütün numunelerde, taşlama tezgahına eşit ilerleme hızı ve talaş derinliği vermek suretiyle

yüzey kalitesinin mümkün olduğunca iyi ve bütün numunelerde yüzey pürüzlülüğünün eşit olmasına özen gösterilmiştir. Elde edilen yüzey pürüzlülükleri profilometre ile tesbit edilmiştir.

Çekme, çentik darbe ve yorulma deneyleri için numunelere dört farklı ısı işlem uygulanmıştır.

- a) **Normalizasyon** ; Numuneler 850 °C sıcaklıkta 15 dakika fırında bekletilip, daha sonra havada soğutulmuşlardır.
- b) **Sertleştirme ve Temperleme** ; Bu işlem için numuneler 850 °C sıcaklıkta 15 dakika süre ile bekletilip therm R cinsi yağda soğutulmuşlardır. Daha sonra 300, 400, ve 500 °C sıcaklıklarda ½ saat temperlenip havada soğutulmuşlardır. Sertleştirme ve temperleme sonrası sertlik değerleri ölçülmüştür.

Bilyalı dövme işlemleri için, normalleştirme ve 500 °C de temperleme işlemi uygulanan numuneler seçilmiştir. Daha önce yapılan normalizasyon işlemini müteakip numuneler üzerinde yapılan optik mikroskop incelemelerinde belirli ölçüde martenzit fazının bulunması üzerine bilyalı dövme işlemi uygulanacak numuneler, fırında 850 °C sıcaklıkta 15 dakika süre ile bekletilmiş, fırın sıcaklığı 700 °C ye düşünceye kadar fırında tutulup, daha sonra havada soğutulmuşlardır.

Normalizasyon ısı işlemi uygulanan numunelere 0,20 mm ve 0,30 mm, 500 °C de temperleme işlemi uygulanan numunelere ise, 0,13 mm lik dövme şiddetlerinde bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Düşük sıcaklıklarda temperlenmiş numunelerde, bilyalı dövme sonucu yüzeyde çatlakların oluşabileceği düşüncesi ile 500 °C de temperlenmiş numuneler seçilmiş ve düşük dövme şiddeti uygulanmıştır.

Dövme şiddetinin tesbit edilmesinde “ Almen A ” şeritleri kullanılmış ve şeritlerin eğrilik yükseklikleri “ Almen gauge ” kullanılarak tesbit edilmiştir. Bilyalı dövme işleminde 45-55 Rc sertliğinde S110 çelik bilyalar kullanılmıştır. Bu değer inç olarak ölçülen bilya çapının 10000 ile çarpılması ile elde edilen bir değerdir (ASM Handbook, 1990).

Bilyalı dövme işlemi için, Eskişehir 1. Hava İkmal Bakım Komutanlığı bünyesinde bulunan IEPCO Micropeen – peenmatic 2000 S bilyalı dövme tezgahı kullanılmıştır.

Dövme sonrası numunelere herhangi bir işlem uygulanmamıştır. Ancak, numune yüzeylerinin korozyona eğilimlerinin artacağı dikkate alınarak, deney safhasına kadar numuneler gres yağı ile yağlanarak bir ölçüde korumaya alınmıştır. Uygulanan dövme şiddetlerine ait işlem şartları Tablo 6.2. de görülmektedir.

Tablo 6.2. Bilyalı dövmeğe ait işlem şartları

Isıl İşlem	Dövme Şiddeti	Bilya Tipi	İşlem Süresi	Hava Basıncı
Normalizasyon	0,20 mm (8 A)	S110	15 sn	80 PSI
Normalizasyon	0,30 mm (12 A)	S110	85 sn	80 PSI
500 C Temp.	0,13 mm (5 A)	S110	20 sn	50 PSI

6.2.1. Çekme Deneylerinin Yapılışı

Çekme deneyleri, boyutları Şekil 6.2. de verilen çekme numuneleri üzerinde yapılmıştır (Kayalı , 1983). Bu işlem için 50000 N çekme kapasiteli Hounsfield dijital çekme cihazı kullanılmış ve uzama – gerilme değerlerini gösteren diyagramlar çizdirilmiştir. Bu işlem için, normalleştirilmiş ve 300, 400 ve 500 °C sıcaklıklarda temperleme işlemi uygulanmış numunelerden üçer adedi çekme deneyine tabi tutulmuş ve sonuç olarak bu üç deneyin ortalaması alınmıştır.

6.2.2. Çentik Darbe Deneylerinin Yapılışı

Çentik darbe deneyleri, TS 269 " Metalik Malzemede Vurma Deneyi (Charpy ve İzod)" standartlarına göre, boyutları Şekil 6.3. de verilen numuneler üzerinde oda sıcaklığı şartlarında yapılmıştır. Normalleştirilmiş ve 300, 400 ve 500 °C sıcaklıklarda temperleme işlemi uygulanmış üçer adet numune üzerinde çentik darbe deneyleri yapılmıştır. Her bir işlem grubu için bu üç değerin ortalaması alınarak darbe dayanımları belirlenmiştir.

6.2.3. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mitutoyo Surf test 211 cihazında yapılmıştır. Bilyalı dövme işlemi uygulanan ve ısıtma işlemi sonrası taşlanan numunelerin R_a , R_y , R_z değerleri tesbit edilerek, grafikleri çıkarılmıştır.

6.2.4. Sertlik ölçümleri

Deney numunelerinin sertlikleri 5 kg yük altında Vickers sertlik skalasında ölçülmüştür. Her ısıtma işlemi için üç numune üzerinde beş sertlik ölçülüp, daha sonra bunların ortalamaları sertlik değeri olarak alınmıştır.

6.2.5. Mikro sertlik ölçümleri

Bilyalı dövülen numunelerin deformasyon sertleşmesi derinliğini belirlemek amacıyla, enine kesit boyunca mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. Bunun için numuneler bakalit içerisine alınarak, yüzeyi mikroskopta incelenebilecek kalitede parlatılmıştır. 50 gr'lık yük kullanmak suretiyle, ölçümler Leitz Wetzlar microhardness sertlik cihazında yapılmıştır. Her bir dövme şiddeti için iki numune üzerinde 50 μm aralıklarla ölçüm yapıp, daha sonra ölçülen değerlerin ortalamaları alınmıştır.

6.2.6. Metalografik İncelemeler

Deney numunelerinin mikro yapılarını belirlemek için bakalite alınan numuneler 1200 meşlik zımpara ile zımparalanmış ve daha sonra 6 ve 1 μm elmas pasta ile parlatılmıştır. Parlatılan numuneler % 2 Nitalde dağlanarak mikroskopta incelenmeye hazır hale getirilmişlerdir. Dağlama işlemi sonrasında numunelerin mikro yapıları hem optik hem de SEM mikroskopunda incelenmiş, ayrıca kırık yüzeylerden fotoğraflar alınmıştır.

6.2.7. Yorulma Deneylerinin Yapılışı

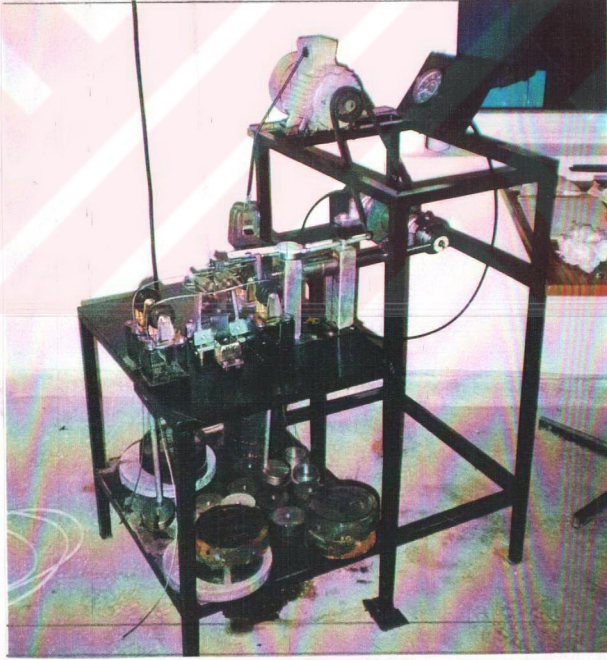
Yorulma deneyleri, normal ve fretting yorulma olarak iki farklı şekilde yapılmıştır. Fretting yorulma için öncelikle normalizasyon ısı işlemi uygulanan numunelerde 1 - 1,5 - 2 kg 'lık yük kullanmak suretiyle deneyler yapılmış ve normal yükün fretting yorulmaya tesiri incelenmiştir. Daha sonraki deneylerde ise, bütün numunelere 2 kg 'lık normal yük uygulanarak, normalleştirilmiş ve 300, 400 ve 500 °C de temperlenmiş numunelerin deneyleri tamamlanmıştır. Ayrıca, normalleştirilmiş numunelere 0,20 ve 0,30 mm, 500 °C de temperlenmiş numunelere ise, 0,13 mm dövme şiddeti ile yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış ve yine 2 kg normal yük altında yorulma deneyleri yapılarak S-N grafikleri çıkarılmıştır. Numune ve fretting papuçlar deneylerden önce asetonla temizlenmiş ve her deney için fretting papuçlar değiştirilmiştir.

Aynı değişkenler normal yorulma deneyleri için de uygulanmıştır. Herbir grup için enaz 8 adet numune kullanılmış ve deneyler $2 \cdot 10^6$ çevrim sayısında kesilmiştir. Deneyler tarafımızdan imal edilen, düzlem eğmeli bir yorulma deney düzeneğinde yapılmış ve gerilme oranı, $R = -1$ olarak uygulanmıştır.

0,55 kw güce ve 1400 d/dk lık devir sayısına sahip bir elektrik motorundan alınan hareket, kayış kasknak tertibatı ile 767 d/dk ya düşürülmüş ve ayarlanabilir bir kam vasıtası ile, hareket lineer bir yataktan geçirilmek suretiyle numuneye uygulanmıştır. Numunenin bir ucu ankastre giriş şeklinde sabitlenmiş ve eğme kuvveti numunenin diğer ucundan rulmanlı bir mafsallı vasıtasıyla uygulanmıştır. Numune üzerinde ayarlanabilir kam ile elde edilen sehim, bir komparatör vasıtası ile okunarak uygulanan gerilme, sehimden hareketle teorik olarak hesaplanmıştır. Düzeneğe yerleştirilen bir sayaç aracılığı ile numunenin kırılmasına kadar geçen süre içerisinde kaç devir yaptığı tesbit edilmiştir. Numune kırıldığında motorun durması için bir elektrik devresinden yararlanılmıştır. Numune üzerinden 12 v akım geçirmek suretiyle numune kırıldığı anda bir röle vasıtası ile kontaktör uyarılarak motorun durması sağlanmıştır.

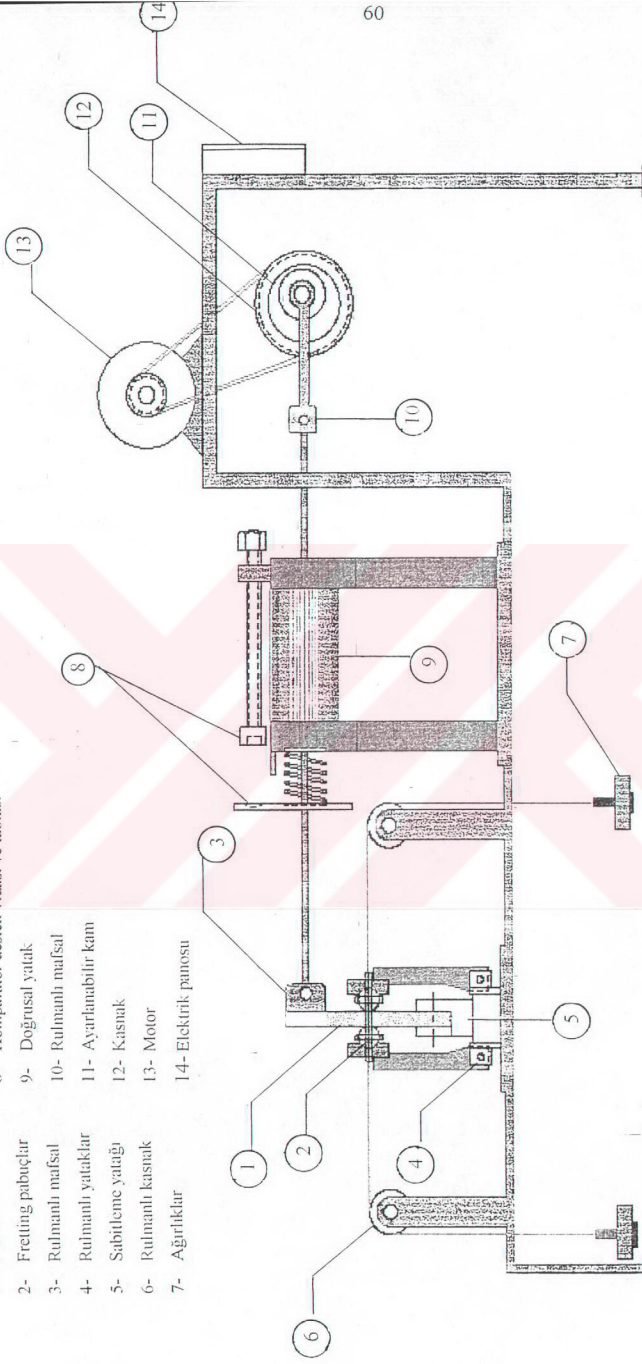
Fretting yorulma deneyleri için yukarda belirtilen deney düzeneğine, numune üzerinde fretting tesiri sağlayacak ilave bir düzenek yerleştirilmiştir. Fretting yastıklarının bağlandığı kollar, rulmanlı yataklarla alt tablasına tesbit edilmişlerdir ve numunenin

eğilme yönünde hareket edebilecek özelliktedirler. Fretting yastıklar bu kolların üst kısımlarına sabitlenmiş ve numunenin orta noktası ile her iki taraftan temas halindedir. Fretting yastıklar deney numuneleri ile aynı malzemedendir olup, normalizasyon ısı işlemi görmüş ve daha sonra taşlanmış, 12 mm çapında silindirik elemanlardır. Yastıklar numunenin sehim yapması esnasında kenar etkilerinden sakınmak amacıyla silindirik olarak seçilmişlerdir. Kollar üzerine karşılıklı olarak bağlanan ince çelik halatlar bir kasnaktan geçirilerek üzerine ağırlıklar asılmıştır. Böylece, yastıkların asılan ağırlık ölçüsünde numuneye baskı uygulaması ve çizgisel bir temas alanının meydana gelmesi sağlanmıştır. Çalışma esnasında temas noktasındaki kayma, yastık ve numunenin birbirlerine göre izafi yer değiştirmelerinden dolayı meydana gelmekte ve bu kayma hareketi frettinge sebep olmaktadır. Şekil (6.5) de deney düzeneğinin krokisi, resim (6.1) de ise fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 6.1. Deney düzeneğinin fotoğrafı

1- Numune
2- Fretting pabuçlar
3- Rulmanlı mafsal
4- Rulmanlı yataklar
5- Sabitleme yatağı
6- Rulmanlı kasnak
7- Ağırlıklar
8- Komparatör destek vidası ve tablası
9- Doğrusal yataklar
10- Rulmanlı mafsal
11- Ayarlanabilir kam
12- Kasnak
13- Motor
14- Elektrik panosu



Şekil 6.5. Deney düzeneğinin şematik resmi

Yorulma deneylerinde numunelere uygulanan gerilmeler teorik olarak, numunelerde meydana gelen sehinden hesaplanmıştır. Elastik sınırlar içerisinde numunenin sabitleme ve yükün uygulanma durumuna göre sehim,

$$f = PL^3 / 3EI \quad (6.1.)$$

denklemini ile ifade edilmektedir. Bu denklemden "P" terimi bulunmuş ve,

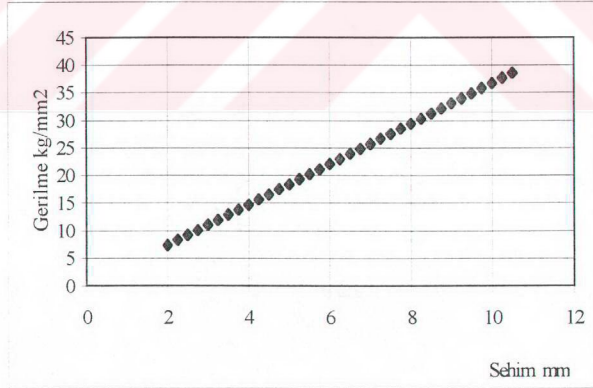
$$M = PL \quad (6.2)$$

Moment denkleminde, numunenin tam orta noktasına tesir eden moment hesaplanmıştır. Son olarak,

$$\sigma = Me / W \quad (6.3.)$$

gerilme denkleminde "M" ve "W" değerleri yerine yazılarak numuneye uygulanan gerilme değerleri elde edilmiştir.

Bu işlem basamakları 0,25 mm aralıklarla tekrarlanıp, numuneye uygulanacak sehilerin tekabül ettiği gerilmeler tesbit edilmiş, tablo haline dönüştürüldükten sonra deneylere başlanmıştır. Şekil (6.7.) de kalibrasyon eğrisi görülmektedir.



Şekil 6.6. Gerilme kalibrasyon eğrisi

6.2.8 Fretting Yorulma Çatlaklarının İlerleme Hızları Deneylerinin Yapılışı

Bu deneylerde; temperleme sıcaklığının, normal yükün ve bilyalı dövme işlemlerinin, fretting yorulma çatlaklarının başlama ve ilerleme hızlarına etkisi incelenmiş ve bu amaç doğrultusunda çevrim sayısına karşı çatlak boyu optik mikroskop vasıtası ile ölçülmüştür. Ölçümler numunenin fretting bölgesindeki her iki kenar yüzeyinde yapılmış ve tesbit edilen çatlakların ortalaması alınmıştır. Çatlak boyunun tesbitini kolaylaştırmak amacıyla, numunelerin kenar yüzeyleri 1200 meşlik zımpara ile zımparalanmış ve daha sonra 6 ve 1 μm elmas pasta ile parlatılmıştır. İlk 10000 çevrim sayısından sonra deneylere ara verilip, çatlak boyu optik mikroskop ile ölçülmüş ve deneylere devam edilmiştir. Daha sonraki ölçümler her 5000 çevrimde tekrarlanmıştır. Çatlak boyu 100 μm civarında iken, yani çatlakların ikinci safhadaki ilerleme eğilimleri belirlendikten sonra deneyler bitirilmiştir. Çatlak ilerleme hızlarının tesbiti için, ölçüm yapılan her bir çevrim sayısı ve çatlak boyu ile ikinci ölçümün yapıldığı çevrim sayısı ve bu çevrimdeki çatlak boyu arasındaki farklar bulunarak, çatlak ilerleme hızları tesbit edilmiştir.

7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

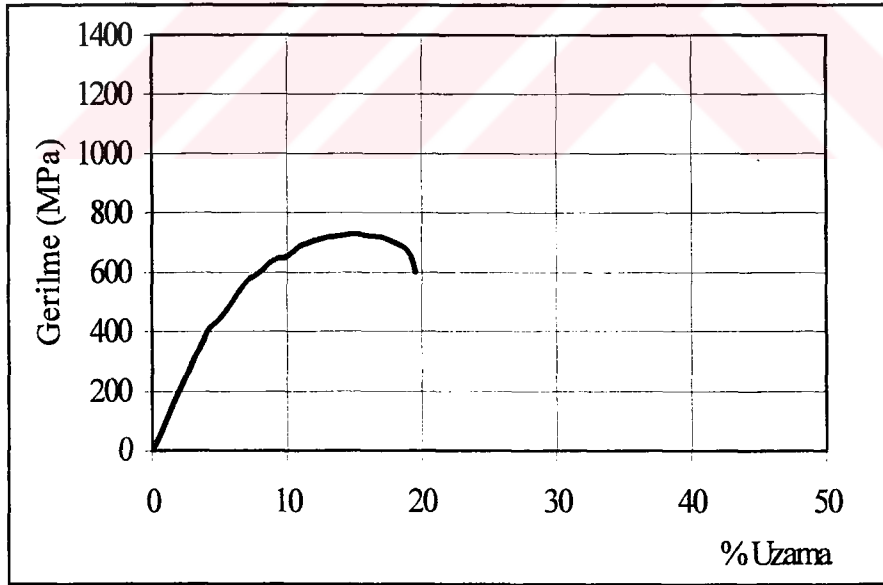
7.1. Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme Deneyi Sonuçları Tablo (7.1) de toplu halde verilmiştir.

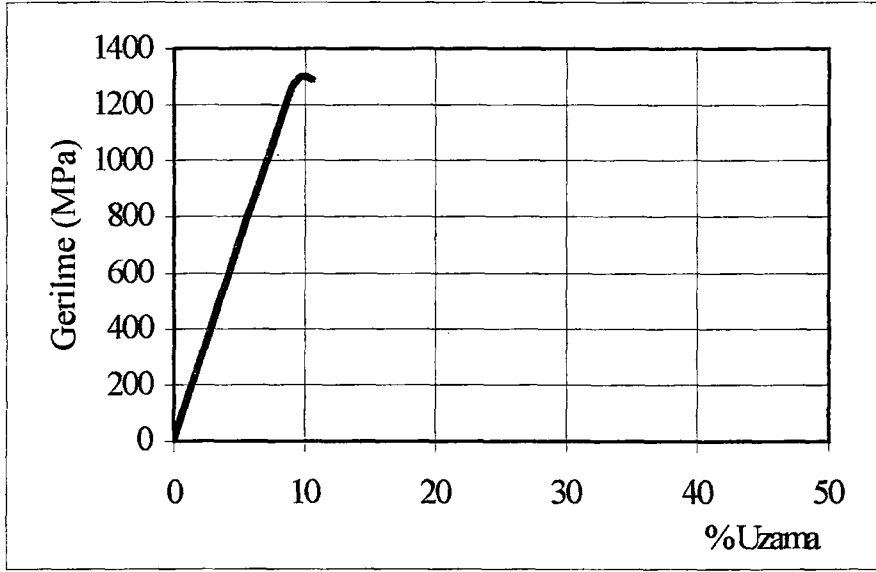
Tablo 7.1. Çekme deneyi sonuçları

Isıl işlem	Çekme mukavemeti MPa	Akma mukavemeti MPa	% Uzama	$\sigma_{\epsilon} \times \% U$
Normalizasyon	730	420	19,5	14235
300 °C Temp.	1300	1280	10,4	13520
400 °C Temp.	1100	1060	12,2	13420
500 °C Temp.	1000	920	17	17000

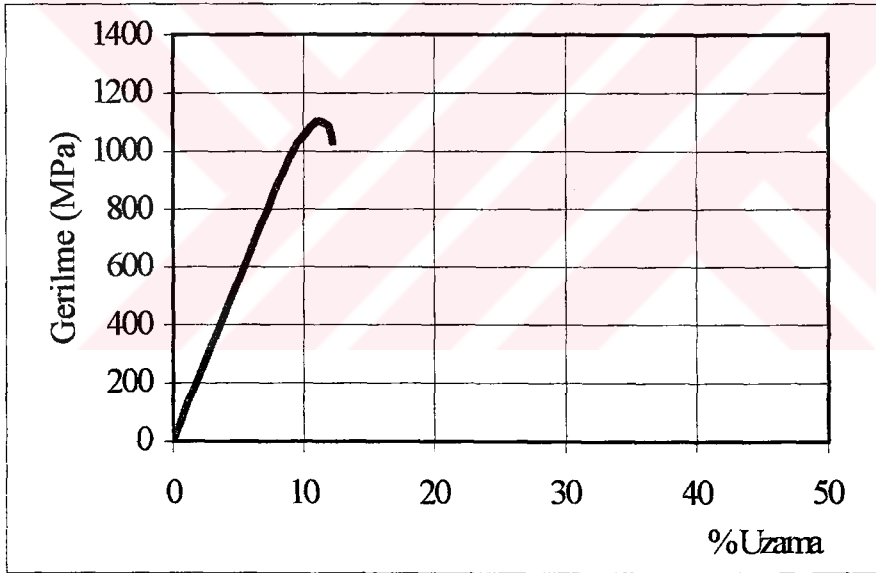
Her bir ısıl işlem için gerilme – uzama eğrileri ise, Şekil (7.1), (7.2), (7.3) ve (7.4) de verilmiştir.



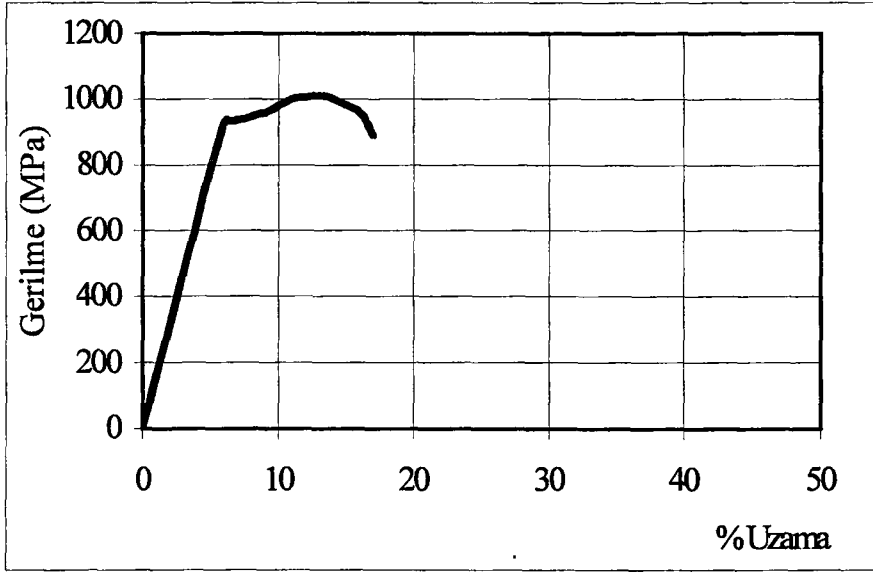
Şekil 7.1 Normalizasyon ısıl işlemi uygulanmış numunelerin gerilme – uzama eğrisi



Şekil 7.2. 300°C de temperlenmiş numunelerin gerilme – uzama eğrisi



Şekil 7.3. 400°C de temperlenmiş numunelerin gerilme – uzama eğrisi



Şekil 7.4 500 °C de temperlenmiş numunelerin gerilme – uzama eğrisi

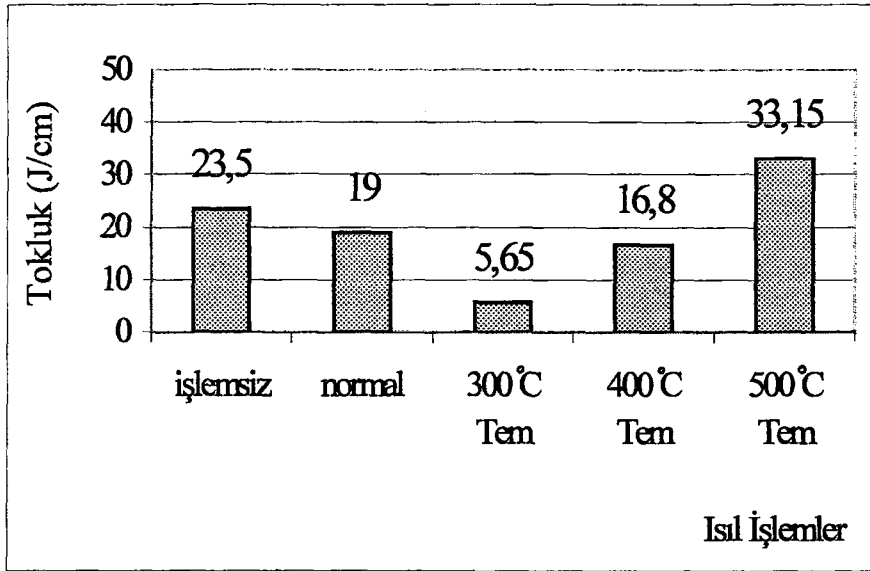
Gerilme – uzama eğrileri ve Tablo (7.1) de görüldüğü gibi, normalize edilmiş numunelerde plastik deformasyon bölgesi diğer numunelerden daha geniş olduğundan daha sünektir. Su verilmiş temperlenmiş numunelerde ise, beklendiği gibi artan temperleme sıcaklığı ile süneklik artmaktadır. 300 ve 400 °C de temperlenmiş numunelerde akma noktası belirgin değildir ve kırılma uzaması daha düşüktür. Bu numunelerin akma mukavemetleri % 0.2 uzamaya karşılık gelen gerilme değerinden tesbit edilmiştir.

7.2. Çentik Darbe Deneyi Sonuçları

Numunelerin charpy yöntemi ile oda sıcaklığında belirlenen çentik darbe değerleri Tablo (7.2) de ve grafik olarak Şekil (7.5) de verilmiştir.

Tablo 7.2 Çentik darbe deneyi sonuçları

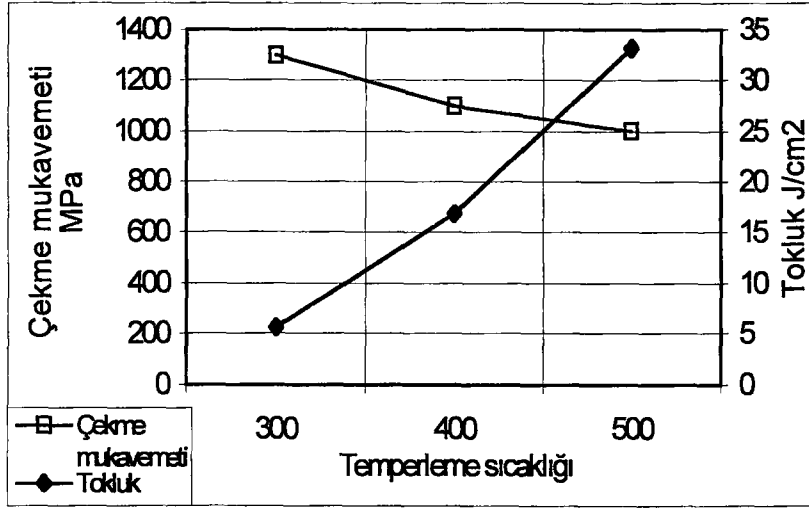
İşlemsiz J/cm ²	Normalizasyon J/cm ²	300 °C Temp. J/cm ²	400 °C Temp. J/cm ²	500 °C Temp. J/cm ²
23.5	19	5.65	16.8	33.15



Şekil 7.5. Çentik darbe deney sonuçlarının grafik olarak değerleri

Şekil (7.5) de görüldüğü gibi 500 °C de temperlenmiş olan numunelerin tokluk değeri en yüksektir. Bunu sırası ile işlemsiz, normalize edilmiş numuneler ve 400 °C de temperlenmiş numuneler izlemektedir. Normalleştirilmiş numunelerde darbe direncinin işlemsiz numunelere göre düşük olmasının sebebi Resim (2) de görüldüğü gibi, hızlı soğuma nedeniyle yapıda martenzit fazının bulunmasıdır. Su verilip temperleme işlemi uygulanan numunelerde ise, 300 °C de temperlenen numunelerin tokluk değeri en düşüktür ve temperleme sıcaklığının artması ile tokluk değerinin arttığı tesbit edilmiştir.

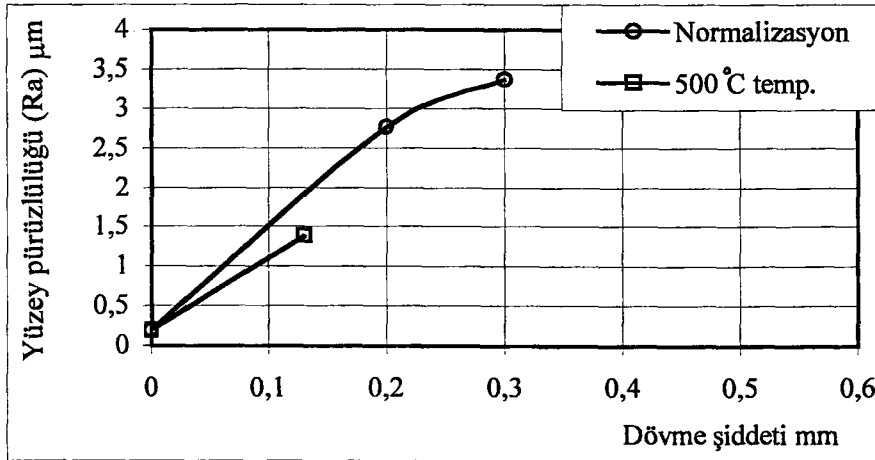
Bu sonuçlar gerilme – uzama eğrileri ile birlikte düşünüldüğünde, gerilme – birim şekil değiştirme eğrilerinin altındaki alana (deformasyon işi) göre, çekme mukavemeti değerleri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Hem çekme hem de çentik darbe deneyi sonuçları numunelerde ısıl işlemlerle elde edilen mikroyapı ile uygunluk arz etmektedir. İşlemsiz ve normalleştirilmiş numunelerde hakim yapı süneklik özelliği yüksek olan ferrit ve perlit karışımıdır. Su verilip temperlenmiş numunelerde oluşan yapı ise, temperlenmiş martenzit olduğundan çekme mukavemeti artmasına karşılık tokluk ve süneklik değerleri düşmektedir. Şekil (7.6) da temperleme sıcaklığı ile çekme mukavemeti ve tokluk arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 7.6. Temperleme sıcaklığına göre çekme mukavemeti ve tokluk değişimi

7.3. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Yüzey taşlamanın ve yüzey taşlama sonrası uygulanan farklı dövme şiddetlerinin yüzey pürüzlülüğüne tesiri, Şekil (7.7) ve Tablo (7.3) de görülmektedir. Yüzeyi sadece taşlanmış numunelerde yüzey pürüzlülük değeri çok düşük iken bilyalı dövme işlemiyle dövülen numune yüzeylerinde plastik deformasyona bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Tablo (7.3) incelendiğinde artan dövme şiddetinin de yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde artırdığı görülmektedir.



Şekil 7.7. Bilyalı dövme işleminin yüzey pürüzlülüğüne (Ra) tesiri

Tablo 7.3. Yüzey pürüzlülük değerleri

Dövme şiddeti	İşlem	Yüzey pürüzlülüğü μm
Yüzey taşlama ve 0,20 mm	Normalizasyon	Ra = 2,77 Ry = 16,2 Rz = 12,8
Yüzey taşlama ve 0,30 mm	Normalizasyon	Ra = 3,37 Ry = 21,1 Rz = 16,7
Yüzey taşlama ve 0,13 mm	500 °C Temperleme	Ra = 1,38 Ry = 9,0 Rz = 7,0
Yüzey taşlama	Isıl işlemler	Ra = 0,2 Ry = 0,5 Rz = 0,4

7.4. Sertlik Ölçüm Sonuçları

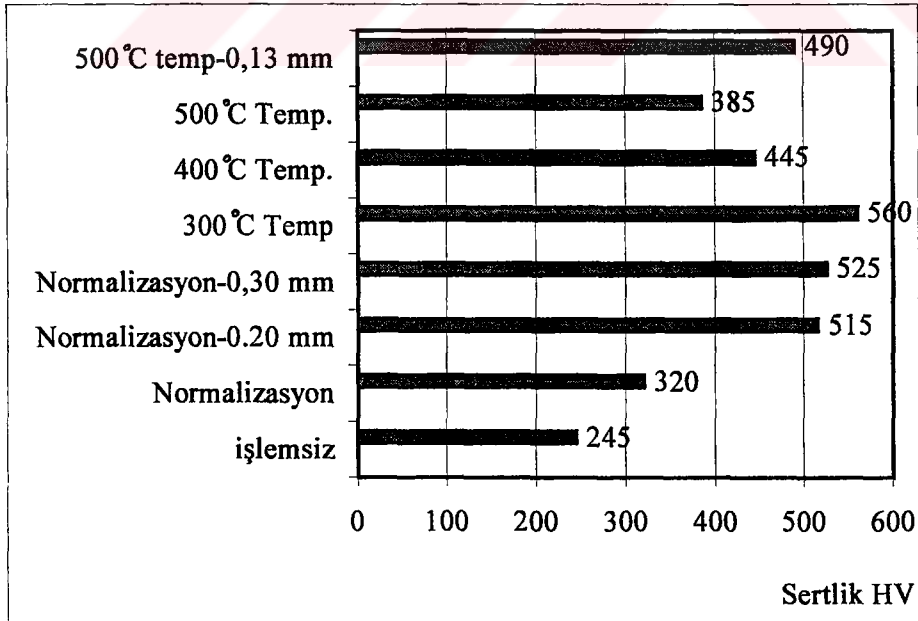
Isıl işlem uygulanmış ve ısıtma işlem sonrası bilyalı dövülmüş numunelerde sertlik ölçüm sonuçları Tablo (7.4) de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi temperlenmiş numuneler arasında en yüksek sertlik 300 °C de temperlenmiş numunelerde elde edilmiştir. Temperleme sıcaklığına bağlı olarak sertliğin düştüğü görülmektedir (Şekil 7.8).

Isıl işlemlerde görülen sertlikteki değişim, sıcaklık arttıkça iç yapının troositten sorbite dönüşmesine bağlanabilir (Avner, 1974). Yani, su verme sonucu oluşan martenzit, 300 °C de temperlendiğinde tetragonal yapısını değiştirerek hegzagonal sıkı paketli geçiş karbürüne (ϵ karbür) ve düşük karbonlu martenzite dönüşür. Bu durum sertlikte bir miktar düşme meydana getirir. Temperleme sıcaklığı arttıkça ϵ karbürü ortorombik sementite dönüşürken, düşük karbonlu martenzitte, kübik hacim merkezli ferrite dönüşür. Kalıntı ostenit ise alt beyrite dönüşür. Süneklik bir miktar artarken, sertlik azalır (40 – 50 Rc arasında). 400 C nin üzerindeki temperlemelerde sementit

parçacıkları büyürken ferrit oranı artar Bu yapı sorbit olarak bilinmektedir. (Avner, 1974).

Tablo 7.4. Sertlik ölçüm sonuçları

İşlem	Sertlik HV
İşlemsiz	245
Normalizasyon	320
300 °C Temperleme	560
400 °C Temperleme	445
500 °C Temperleme	385
Normalizasyon + 0,20 mm dövme şiddeti	515
Normalizasyon + 0,30 mm dövme şiddeti	525
500 °C Temperleme + 0,13 mm dövme şiddeti	490



Şekil 7.8. İşlemlere göre sertlik dağılımı

Yukardaki bilgiler doğrultusunda, temperlenmiş numunelerde elde edilen sertlik sonuçlarının literatür bilgileri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

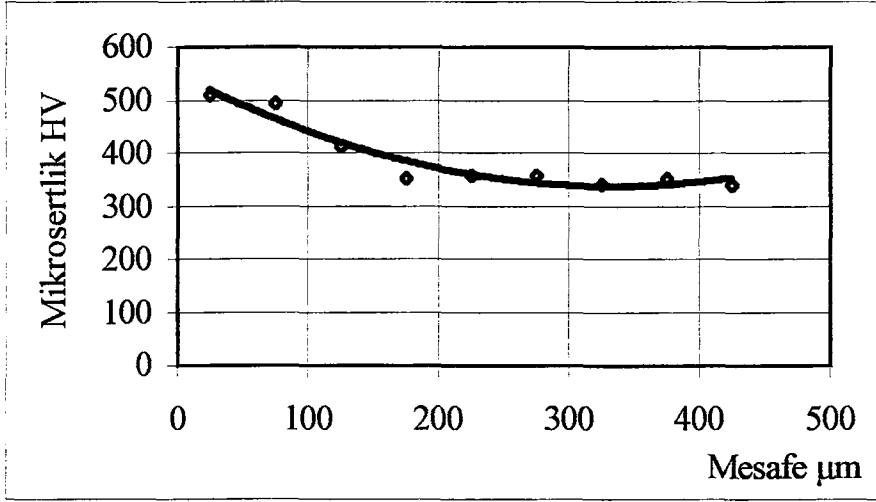
Normalleştirilmiş ve 500 °C de temperlenmiş numunelere uygulanan bilyalı dövme işleminde ise yüzeyin plastik deformasyonu dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak dövme şiddeti arttıkça sertliğin arttığı görülmektedir.

7.5. Mikrosertlik Ölçüm sonuçları

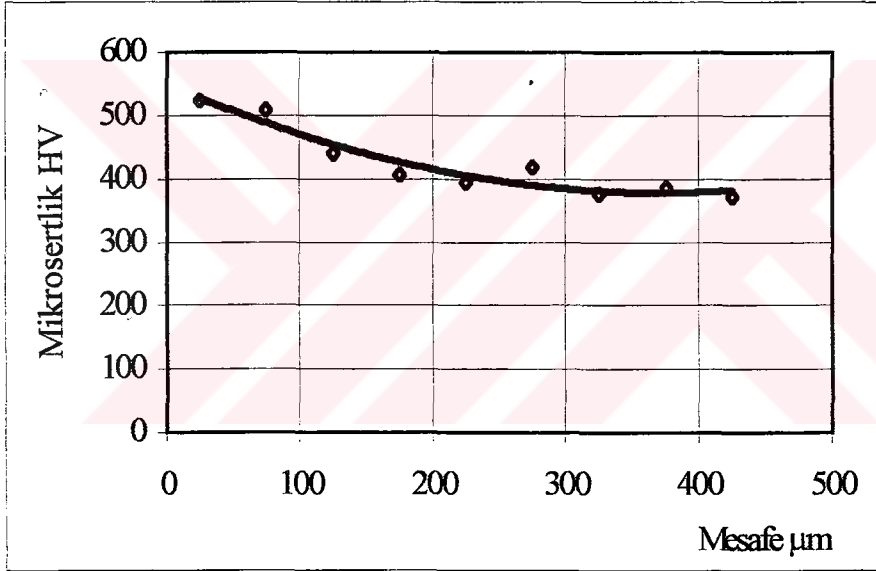
Normalleştirilmiş ve 500 °C de temperlenmiş numunelere uygulanan farklı şiddetlerde bilyalı dövme işlemi sonucu numunelerde enine kesit boyunca meydana gelen sertlik değerleri Tablo (7.5) de ve Şekil (7.9), (7.10) ve (7.11) de grafik olarak verilmiştir.

Tablo 7.5. Bilyalı dövülen numunelerde enine kesit boyunca sertlik dağılımı

Mesafe (μm)	Normalizasyon 0,20 mm	Normalizasyon 0,30 mm	500 °C Temp. 0,13 mm
25	509	524	466
75	494	509	412
125	412	441	412
175	353	407	418
225	358	395	423
275	358	418	408
325	341	375	402
375	352	385	415
425	340	372	409



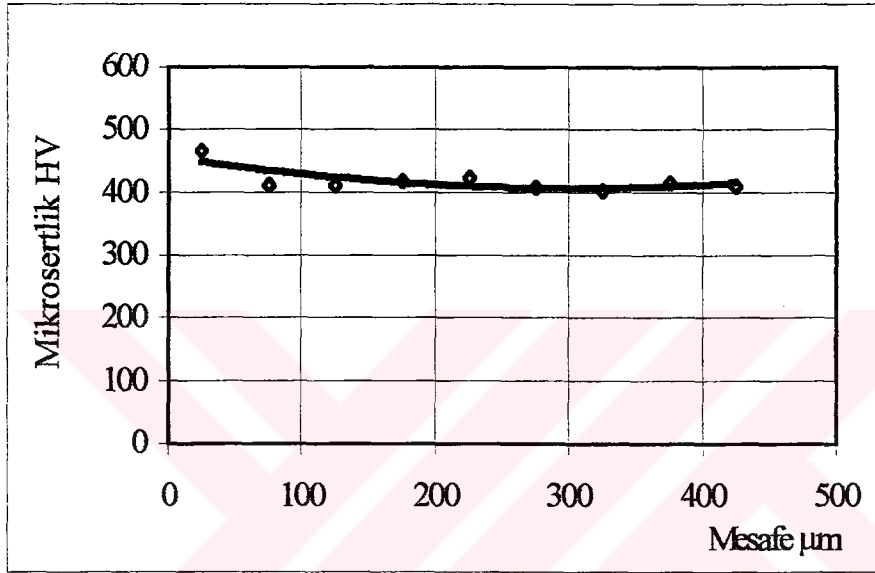
Şekil 7.9. Normalizasyon ve 0,20 mm dövme şiddetli numunelerde enine kesit boyunca sertlik dağılımı



Şekil 7.10. Normalizasyon ve 0,30 mm dövme şiddetine sahip numunelerde enine kesit boyunca sertlik dağılımı

Tablo ve şekiller incelendiğinde, bilyalı dövme sonucunda en yüksek sertlik değerinin yüzeyde meydana geldiği ve iç kısımlara doğru sertliğin azaldığı görülmektedir. Belirli bir deformasyon sertleşmeli tabaka derinliğinden sonra, sertlik yaklaşık olarak aynı kalmaktadır. Bu tabaka derinliği normalleştirilmiş numunelerde, 0,20 mm dövme şiddeti için takriben 270 μm , 0,30 mm dövme şiddeti için yaklaşık

olarak 300 μm ' dur. 500 $^{\circ}\text{C}$ de temperlenmiş numunelerde ise 250 μm dur. Dövme şiddeti arttıkça deformasyon şiddetine bağlı olarak yüzeyde oluşan sertlik ve sertleşen tabaka derinliği artmaktadır. 500 $^{\circ}\text{C}$ de temperlenmiş numunelerde ise, dövme şiddetinin daha az olması nedeniyle, deformasyon sertleşmeli tabaka kalınlığı diğer numunelere nazaran daha küçüktür. Ancak oran olarak düşünüldüğünde, aynı dövme şiddetlerinin uygulanması halinde 500 $^{\circ}\text{C}$ de temperlenmiş numunelerin basma gerilmeli tabaka kalınlığının, normalleştirilmiş numunelere göre daha fazla olacağı söylenebilir.

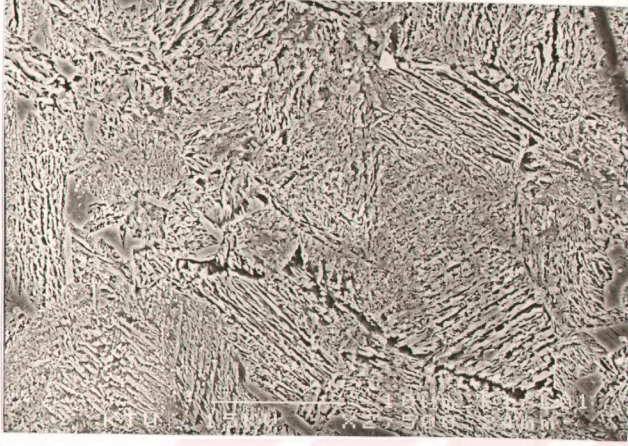


Şekil 7.11. 500 $^{\circ}\text{C}$ de temperlenmiş ve 0,13 mm dövme şiddetine sahip numunelerde enine kesit boyunca sertlik dağılımı

7.6. Mikroyapı Sonuçları

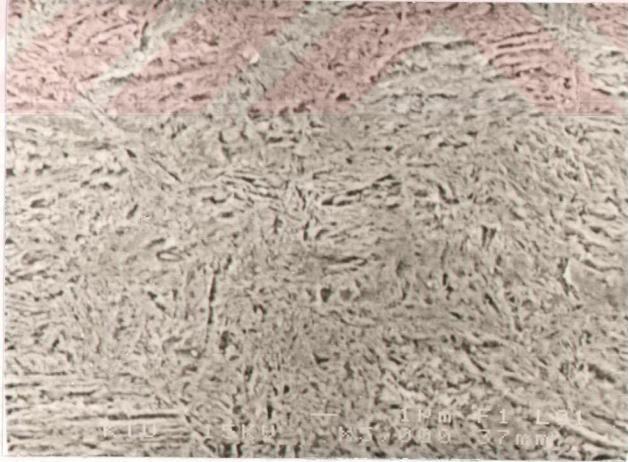
Yorulma deneylerinde kullanılan numunelerin mikroyapıları optik ve taramalı elektron mikroskopu ile incelenmiş ve üretici firmadan temin edilen malzemenin orjinal yapısının ferrit ve perlitten oluştuğu tesbit edilmiştir.

Numunelerin hazırlık safhasında yapılan sıcak dövme ve frezeleme tesirlerini yok etmek ve malzemenin normal yapısını kazanabilmesi için yapılan normalizasyon ısı işlemi sonrasında alınan mikroyapı fotoğrafı Resim (2) de verilmiştir. Fotoğrafta bir kısım ostenitin martenzite dönüştüğü ve yapıda beynit bulunduğu görülmektedir. Bu duruma, numunelerin nisbeten ince olması ve buna bağlı olarak hızlı soğumanın sebep olduğu söylenebilir.



Resim 2. Normalizasyon ısıt işlemleri uygulanan numunelerin mikroyapısı ($\times 2500$)

Su verilip daha sonra 300°C de temperlenmiş numunelerin taramalı elektron mikroskobu ile alınan fotoğrafı Resim (3) de verilmiştir. Temperlenmiş martenzitin mikroyapısı sürekli ferrit matrisi içerisinde dengeli bir şekilde dağılan oldukça küçük sementit parçacıklarından ibarettir ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$)



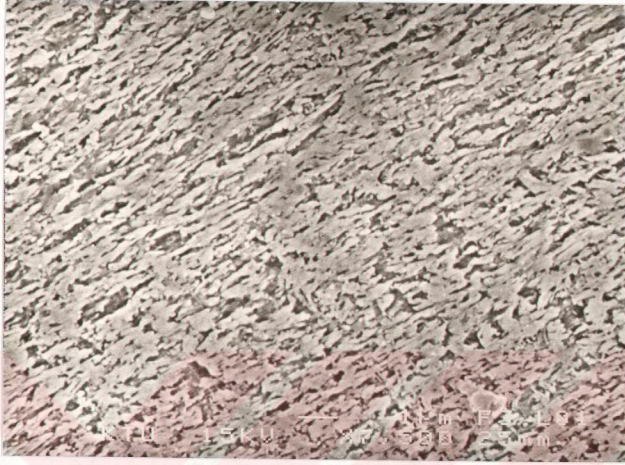
Resim 3. 300°C de temperlenmiş numunelerin mikroyapısı ($\times 5000$)

400 °C de temperlenmiş numunelerin taramalı elektron mikroskopu ile alınan mikroyapı fotoğrafı Resim (4) de verilmiştir. Fotoğraf da görüldüğü gibi yapı temperlenmiş martenzittir.



Resim 4. 400 °C de temperlenmiş numunelerin mikroyapısı ($\times 5000$)

500 °C de temperlenmiş numunelerin taramalı elektron mikroskopu ile alınan mikroyapı fotoğrafı Resim (5) de verilmiştir. Bilindiği gibi karbon difüzyonu martenzit – temperlenmiş martenzit dönüşümünde etkili olduğundan, artan temperleme sıcaklığı karbon difüzyonunu ve sementit taneciklerinin gelişimini hızlandırmaktadır. Sementit parçacıklarının büyüklüğü ise, temperlenmiş martenzitin mekanik davranışlarını etkiler. Artan tane büyüklüğü ferrit sementit fazlarının sınır alanını azaltır ve sonuç olarak daha yumuşak ve daha zayıf bir yapıya neden olur (Callister, 1991). Fotoğraf incelendiğinde, sementit taneciklerinin 400 °C de temperlenmiş numunelere nazaran daha büyük olduğu görülmektedir.



Resim 5. 500 °C de temperlenmiş numunelerin mikroyapısı (× 7500)

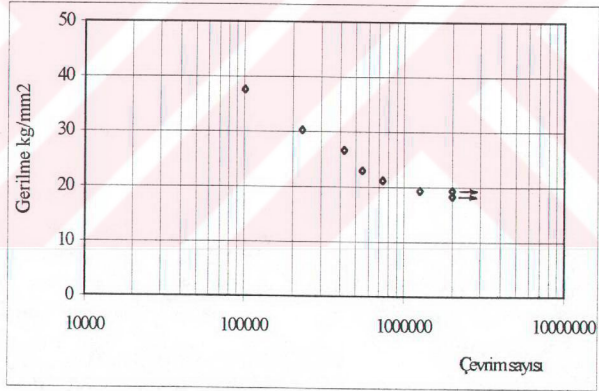
7.7. Yorulma Deney Sonuçları

7.7.1 Normal Yorulma Deney Sonuçları

Aşağıda Şekil (7.12), (7.13), (7.14) ve (7.15) de sırası ile normalizasyon ısıtma işlemi uygulanan ve 300, 400 ve 500 °C de temperlenmiş numunelerin S – N diyagramları, Tablo (7.6), (7.7), (7.8) ve (7.9) da ise, bu deneylere ait sonuçlar verilmiştir.

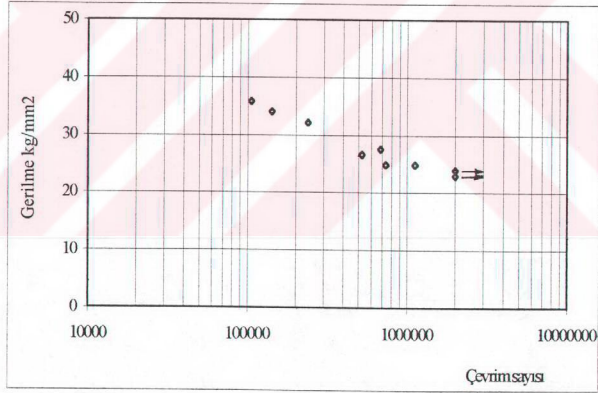
Tablo 7. 6 Normalizasyon ısıtılması gören numunelerde normal yorulma deney sonuçları

Numune No	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
1	6.25	22.95	548405
2	7.25	26.63	420214
3	5	18.36	2.10 ⁶
4	5.25	19.28	2.10 ⁶
5	8.25	30.30	230170
6	10.25	37.65	101030
7	5.25	19.28	1251744
8	5.75	21.12	737754

**Şekil 7.12** Normalizasyon ısıtılması uygulanan numunelerde S – N diyagramı

Tablo 7.7 300 °C de temperlenmiş numunelerde normal yorulma deney sonuçları

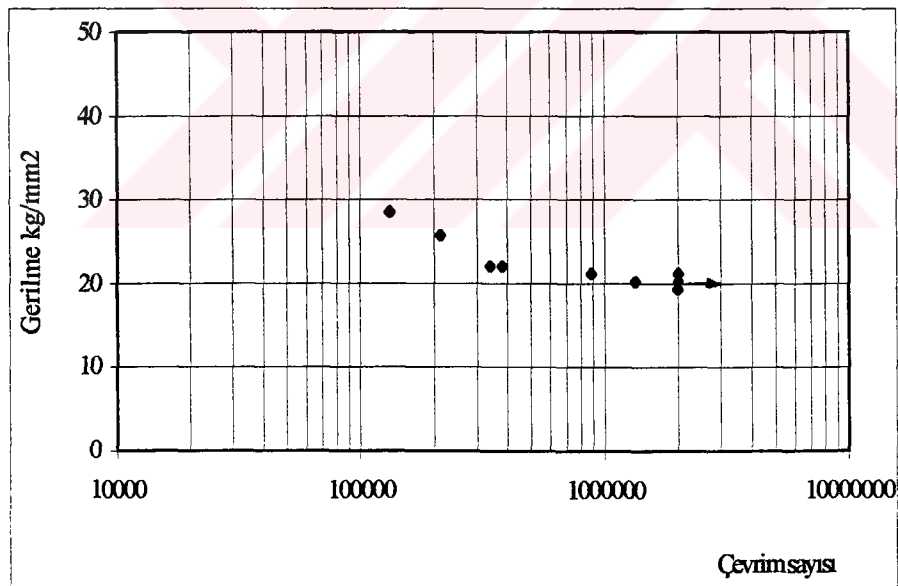
Numune no	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
9	8,75	32.14	238740
10	6,75	24.79	737145
11	6,75	24.79	1120244
12	7.25	26.63	520045
13	6.25	22.95	2.10 ⁶
14	6,50	23.87	2.10 ⁶
15	9,75	35.81	105210
16	7,50	27.55	682410
17	9.25	33.97	142440



Şekil 7.13 300 °C de temperlenmiş numunelerde normal yorulma S-N diyagramı

Tablo 7.8 400°C de temperlenmiş numunelerde normal yorulma deney sonuçları

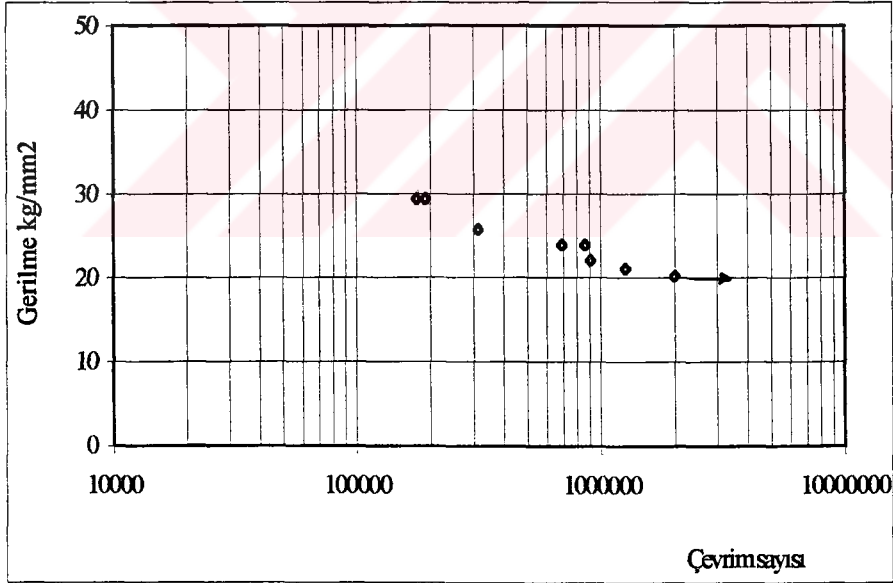
Numune no	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
18	6	22.04	379665
19	5,25	19.28	2.10 ⁶
20	5,50	20.20	2.10 ⁶
21	6	22.04	340548
22	5,75	21.12	886575
23	5,75	21.12	2.10 ⁶
24	5,50	20.20	1345860
25	7,75	28.46	132460
26	7	25.71	212146



Şekil 7.14 400 °C de temperlenmiş numunelerin normal yorulma S-N diyagramı

Tablo 7.9 500°C de temperlenmiş numunelerde normal yorulma deney sonuçları

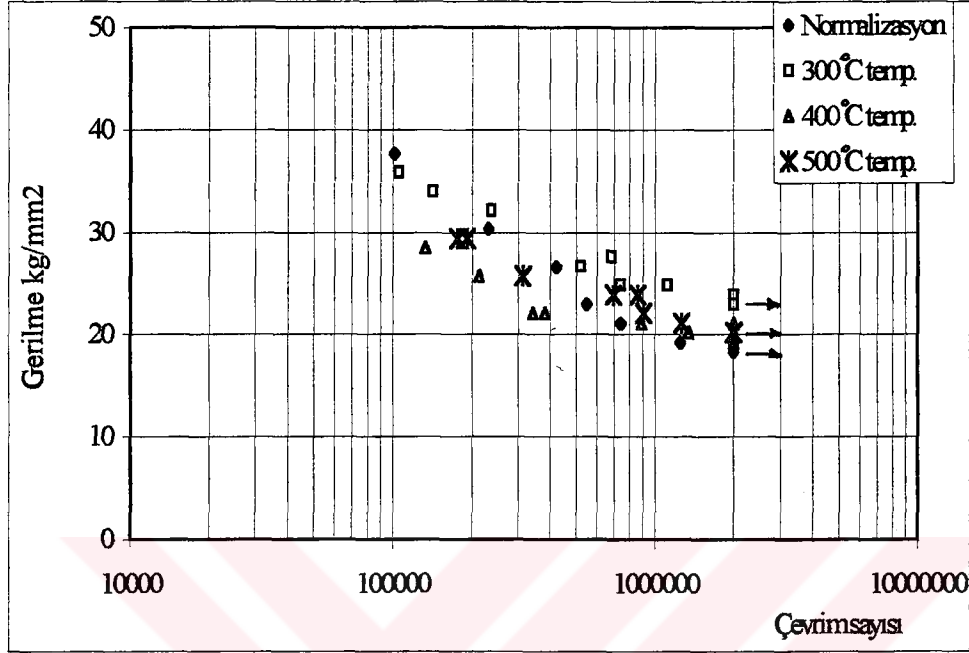
Numune no	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
27	8	29.38	191750
28	8	29.38	176410
29	6.5	23.87	694300
30	6.5	23.87	862210
31	5.5	20.20	2.10 ⁶
32	6	22.04	905102
33	7	25.71	312540
34	5.75	21.12	1262442



Şekil 7.15 500°C de temperlenmiş numunelerin normal yorulma S-N diyagramı

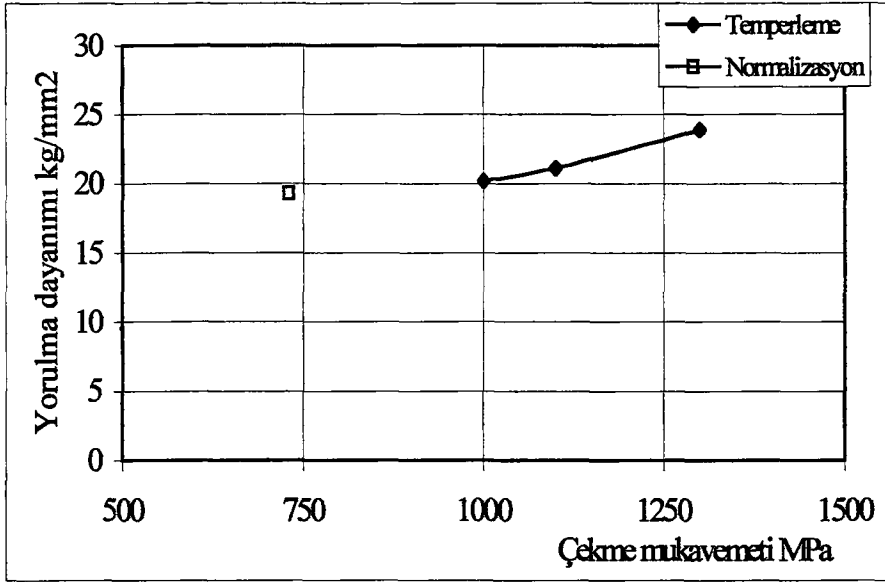
Şekil ve tablolar incelendiğinde, ısı işleme uygulanan numunelerde en yüksek yorulma dayanımının 300°C de temperlenmiş numunelerde olduğu görülmektedir. Artan temperleme sıcaklığı ile yorulma dayanımı düşmektedir. En düşük yorulma dayanımı

ise, normalizasyon ısı işlemi uygulanan numunelerde elde edilmiştir. Şekil 7.16 da ısı işlem uygulanan numunelerin normal yorulma S – N diyagramları toplu halde verilmiştir.

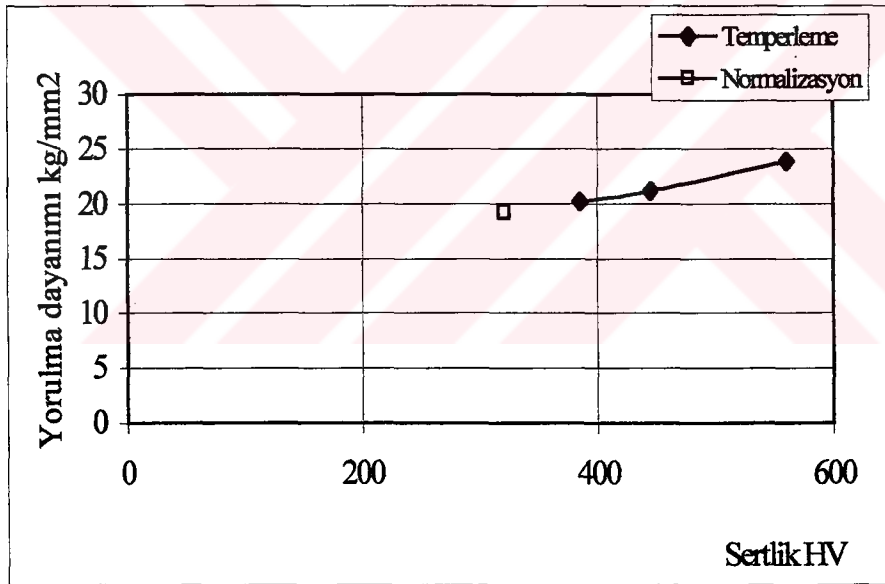


Şekil 7.16 Farklı ısı işlem uygulanan numunelerin S-N diyagramlarının toplu olarak gösterilmesi

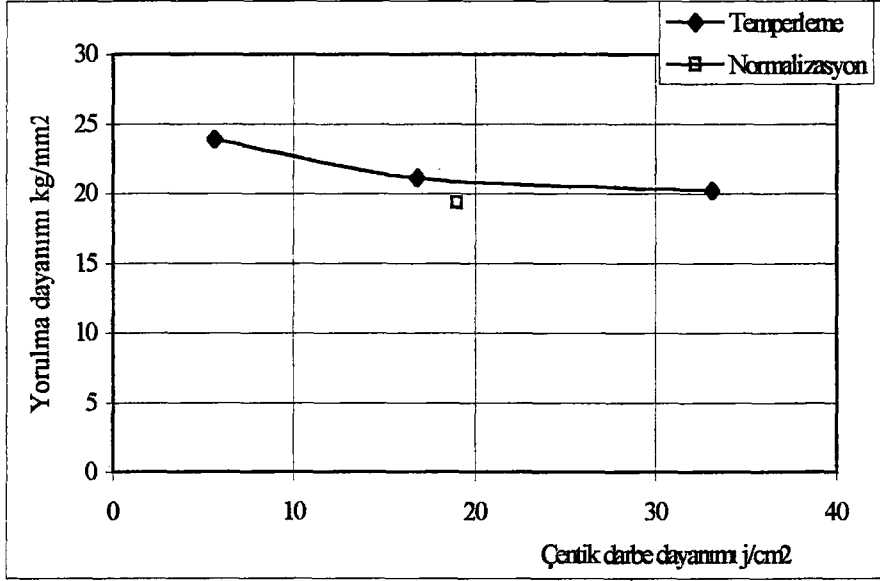
Deneylerde elde edilen yorulma dayanımları malzemenin çekme mukavemeti, sertlik ve çentik darbe dayanımı ile birlikte düşünüldüğünde, yorulma dayanımının artan sertlik ve çekme mukavemeti ile arttığı, buna karşılık çentik darbe değerleri ile azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar literatür bilgileri ile paralellik göstermektedir (Dieter, 1988 ; Callister, 1991). Şekil (7.17), (7.18) ve (7.19) da yorulma dayanımı ile çekme mukavemeti, sertlik ve çentik darbe dayanımı değerleri arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 7.17 Yorulma dayanımı ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki



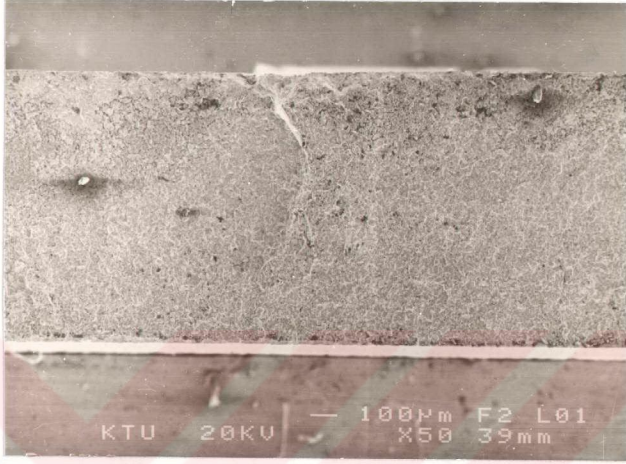
Şekil 7.18 Yorulma dayanımı ile sertlik arasındaki ilişki



Şekil 7.19 Yorulma dayanımının çentik darbe değerleri ile değişimi

Bilindiği gibi, yorulma kırılmaları plastik şekil değiştirme, çekme gerilmesi ve çevrimli gerilmenin aynı zamanda tesiri ile meydana gelmektedir. Bu nedenle bu üç faktörden herhangi birinin olmaması halinde yorulma çatlakları oluşmayacak ve ilerlemeyecektir. Çevrimli gerilme ve şekil değiştirme çatlakların başlamasında, çekme gerilmeleri ise oluşan bu çatlakların ilerlemesinde etkili olmaktadır (Czyryca, 1992). Bu doğrultuda, yorulma mekanizmasına tesir eden temel faktörlerden biri plastik deformasyondur. Plastik deformasyona karşı malzemenin direncinin artırılması beraberinde yorulma dayanımının artmasına sebep olacaktır. Resim (3) de görüldüğü gibi, 300 °C de temperlenmiş numunelerin mikroyapısı temperlenmiş martenzittir. Temperlenmiş martenzit yapısındaki ferrit – sementit faz sınırına bağlı olarak, sert fakat sünekliği ve tokluğu bir ölçüde artırılmıştır. Sert sementit fazı sınırlar boyunca ferrit matrisini güçlendirmekte ve bu sınırlar ayrıca, plastik deformasyon esnasında dislokasyon hareketlerine engel teşkil etmektedirler. Sürekli ferrit fazı ise, sünek ve nisbeten tok bir özelliğe sahiptir (Callister, 1991). 300 °C de temperlenmiş numuneler sertliğinin ve çekme mukavemetinin yüksek olmasına karşın % 10,5 gibi bir uzama özelliğine sahiptir. Yani yapı sert olmasına rağmen tamamen gevrek değildir ve plastik deformasyona karşı direnci diğer numunelere göre yüksektir. Bu özellikler 300 °C de temperlenmiş numunelerin, diğer ısıtma işlem gören numunelere nazaran yorulma

dayanımının yüksek çıkmasının temel sebebi olduğu söylenebilir. Bu numuneye ait kırık yüzeyden alınan fotoğraf, Resim (6) da verilmiştir.

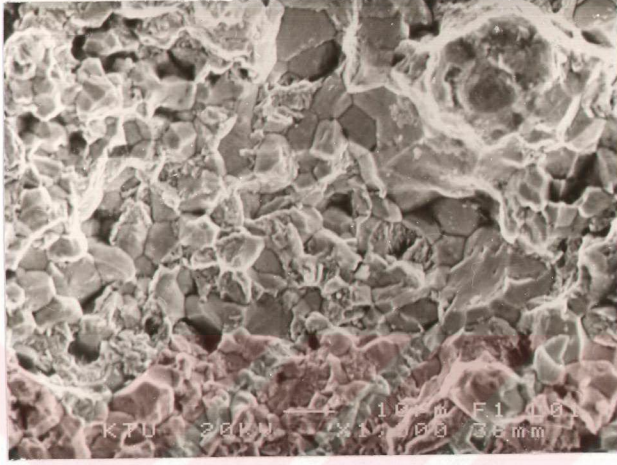


Resim 6. 300 °C de temperlenmiş numunenin kırık yüzey fotoğrafı (x50)

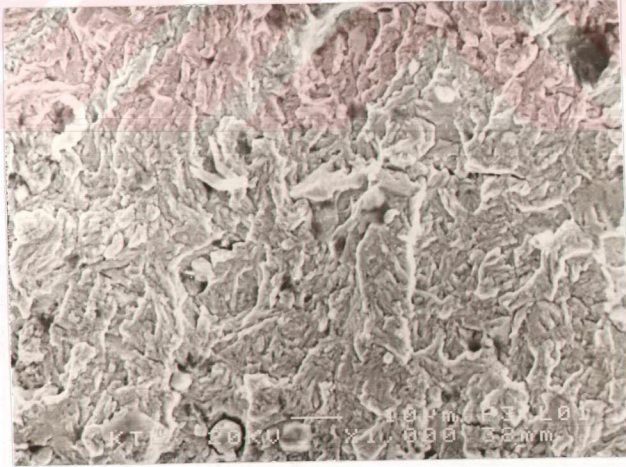
400 °C de temperlenmiş numunelerde mikroyapı temperlenmiş martenzittir, ancak Resim (4) deki mikroyapı fotoğraflarında görüldüğü gibi, sementit taneleri büyümüş ve buna bağlı olarak, malzemenin sertliği ve çekme mukavemeti azalmış, sünekliği ise artmıştır. Bu numunenin kırık yüzey fotoğrafı Resim (7) de verilmiştir.

500 °C de temperlenmiş numunelerde ise, temperleme sıcaklığının daha da artması karbon difüzyonunu hızlandırmış ve sementit parçacıklarının büyümesine neden olmuştur. Bilindiği gibi, sementit tanelerinin büyüklüğü temperlenmiş marteze mekanik özelliklerini etkilemektedir. Artan tane büyüklüğü ferrit – sementit faz sınır alanını azaltmakta ve malzemenin daha yumuşak ve zayıf olmasına neden olmaktadır (Callister, 1991). Mikroyapıdaki bu değişim numunelerin çekme mukavemetinin ve sertliğinin azalmasına, sünekliğinin ise artmasına sebep olmuştur. Sonuç olarak artan temperleme sıcaklığı ile yorulma dayanımındaki düşme sebebi, yukarıda ifade edilen özelliklere bağlı olarak, malzemenin plastik deformasyona karşı direncinin azalmasına

bağlanabilir. Bu durum Resim (8) de verilen kırık yüzey fotoğrafında açıkça görülmektedir.



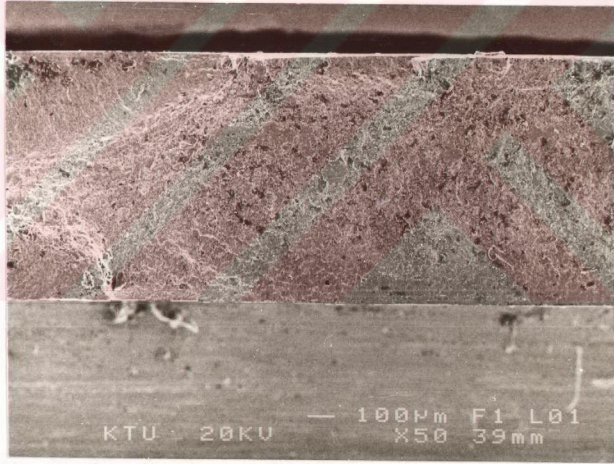
Resim 7. 400 °C de temperlenmiş numunenin kırık yüzey fotoğrafı (× 1000)



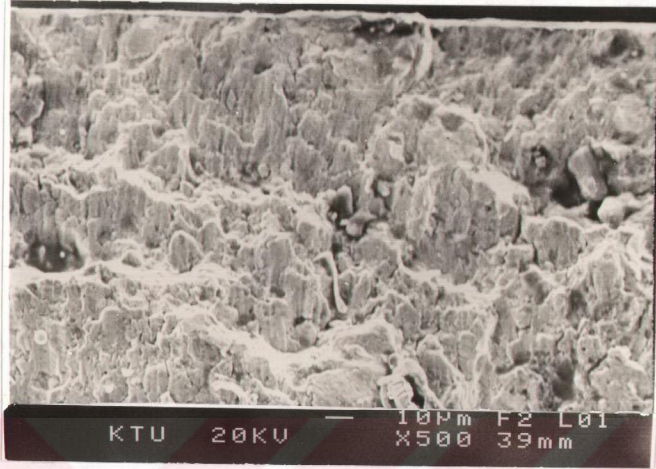
Resim 8. 500 °C de temperlenmiş numunenin kırık yüzey fotoğrafı (×1000)

Temperleme sıcaklığının artması ile yorulma dayanımının düşmesi numunelerin çekme dayanımları ve aynı zamanda plastik deformasyona karşı dirençlerine bağlı olduğu kırık yüzeylerden alınan fotoğraflardan anlaşılmaktadır.

Normalizasyon ısı işlemi uygulanan numunelerin esas yapısı ferrit-perlittir ve temperlenmiş numunelere göre oldukça sünek ve tokluk özelliği yüksek, çekme mukavemeti ise düşüktür. Resim (9) da normalleştirilmiş numunenin kırık yüzeyinden alınan fotoğraf verilmiştir. Bu yüzeyin daha büyütülmüş fotoğrafı ise, Resim (10) da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi bu numunede plastik deformasyonun yüksek olduğu söylenebilir. Yine aynı nedenlere bağlı olarak, plastik deformasyona direncin az olması, bu numunelerin yorulma dayanımlarının düşük olmasında etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Temperlenmiş bir yapının yorulma özelliklerinin perlitik bir yapıdan daha iyi olduğu literatürde de belirtilmektedir (Reed-Hill ve Abbaschian, 1994).



Resim 9. Normalleştirilmiş numunenin kırık yüzey fotoğrafı (x50)

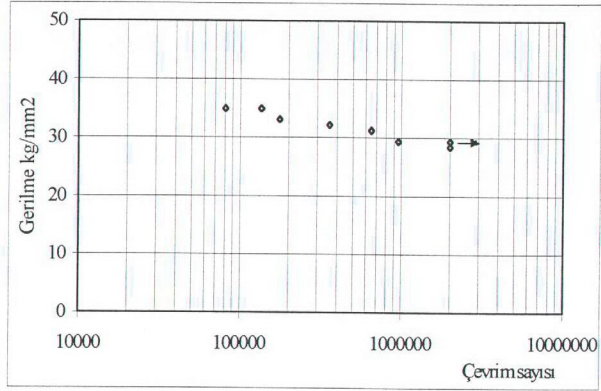


Resim 10. Normalleştirilmiş numunenin kırık yüzey fotoğrafı (x500)

Şekil (7.20) ve (7.21) de normalizasyon ısı işlemi sonrasında 0,20 ve 0,30 mm dövme şiddetinde bilyalı dövme işlemi uygulanan numunelerin S - N diyagramları, Tablo (7.10) ve (7.11) de bu diyagramlara ait deney sonuçları verilmiştir.

Tablo 7.10 Normalleştirilmiş ve 0,20 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerin normal yorulma deney sonuçları

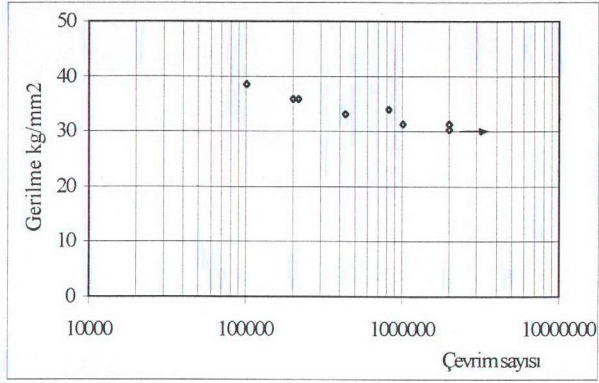
Numune no	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
35	9.50	34.89	80535
36	9	33.06	174876
37	7.75	28.46	2.10 ⁶
38	8	29.38	959517
39	8	29.38	2.10 ⁶
40	8.50	31.22	652717
41	9.50	34.89	135282
42	8.75	32.14	358760



Şekil 7.20 Normalleştirilmiş ve 0,20 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerde normal yorulma S-N diyagramı

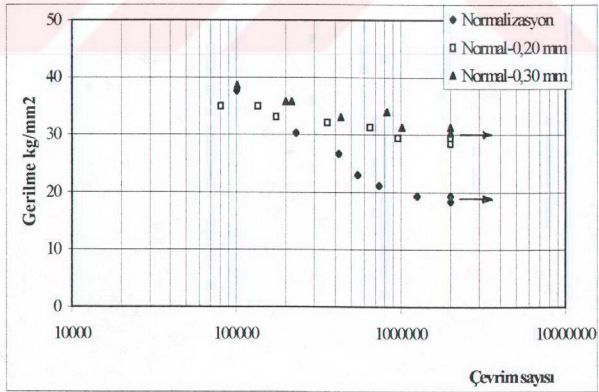
Tablo 7.11 Normalleştirilmiş ve 0,30 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerin normal yorulma deney sonuçları

Numune no	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
43	9.75	35.81	200187
44	9.75	35.81	217061
45	9	33.06	433355
46	8.50	31.22	1013974
47	8.25	30.30	2.10 ⁶
48	8.50	31.22	2.10 ⁶
49	10.50	38.57	101410
50	9.25	33.97	825440



Şekil 7.21. Normalleştirilmiş ve 0,30 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerin normal yorulma S-N diyagramı

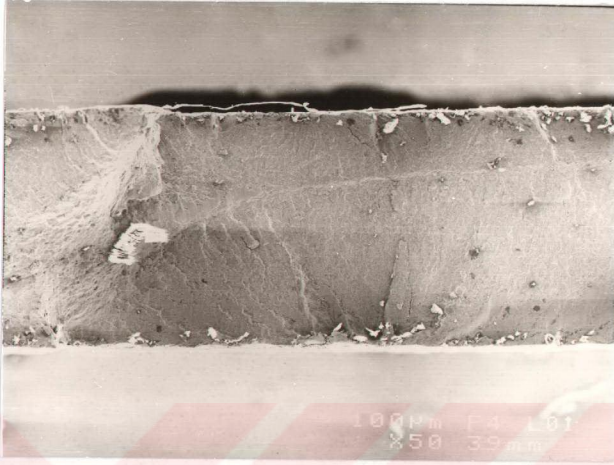
Şekil ve tablolar incelendiğinde, bilyalı dövülen numunelerde artan dövme şiddeti ile yorulma ömrünün arttığı görülmektedir. Bu sonuçlar sadece ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin S – N diyagramı ile birlikte düşünüldüğünde ise, yorulma dayanımının bilyalı dövme işlemiyle önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Şekil (7.22) de normalleştirilmiş numunelerde elde edilen S – N eğrileri toplu halde verilmiştir.



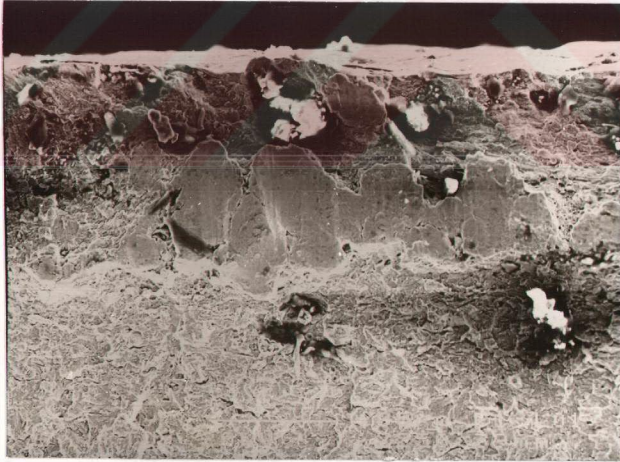
Şekil 7.22. Normalleştirilmiş numunelerde bilyalı dövme işlemi ile yorulma dayanımının değişimi

Mikrosertlik ölçüm sonuçlarında açıklandığı gibi, bilyalı dövme işlemi ile metal yüzeyin plastik akmasına bağlı olarak yüzeyde basma gerilmeli bir tabaka meydana gelmiş ve dövme şiddeti arttıkça dövülen malzeme yüzeyinde plastik deformasyona uğrayan tabaka derinliği artmıştır. Sertlik ise, yüzeyde en yüksek olmak üzere iç kısımlara doğru azalmaktadır. Daha önce ifade edildiği gibi, yorulmaya tesir eden temel faktörlerden biri de çekme gerilmesidir (Czyryca, 1992). Bilyalı dövme işlemi ile yüzeyde basma gerilmeli bir tabaka oluşturulması, dışardan uygulanan çekme gerilmelerinin tesirini bir ölçüde azaltmaktadır. Bunun sonucu olarak yorulma dayanımının arttığı söylenebilir. Bu konudaki yapılan araştırmalar bu sonucu doğrulamaktadır (Nakoneczny, 1991 ;Saritaş, 1997 ;Was ve Pelloux, 1979)

Bilyalı dövülen numunelerde S – N eğrisinin daha yatık olmasının, çatlak ilerleme hızının diğer numunelere göre daha yavaş seyretmesinden kaynaklandığı ve durumun yorulma dayanımının artmasında etkili olduğu tahmin edilmektedir. Bilyalı dövme işlemi yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak çatlak sayısını artırmasına rağmen, dövme şiddetine göre çatlakların başlama safhasında ve özellikle ilerleme safhasında etkili olmaktadır. Resim (11) ve (12) de normalleştirilmiş ve 0.30 mm dövme şiddetinde dövülmüş numunelerin kırık yüzeyinden alınan fotoğraflar verilmiştir. Resim (11) de çatlakların birçok yerde başladığı görülmektedir. Resim (12) de ise, bilyalı dövme işlemi ile yüzey altı çatlaklarının oluştuğu görülmektedir. literatürde bilyalı dövme işleminin yüzeyin yanısıra, basma gerilmeli tabaka altında yüzeye paralel çatlak oluşumuna ve ilerlemesine neden olabileceği belirtilmektedir (Nakoneczny, 1991). Diğer bir çalışmada ise yüzey altı çatlaklarının çoğu zaman bulunduğu ifade edilmektedir (Was ve Pelloux, 1979) Kırık yüzeyde görülen sürtünme bölgesinin yüzey altında olması bu durumu doğrulamaktadır. Yorulma çatlaklarının ilerlemesi artık basma gerilmeli tabaka ile engellenmektedir (ASM Handbook, 1990). Bu durum çatlak ilerleme deneylerinde de görülmüştür.



Resim 11. Normalleştirilmiş ve 0,30 mm dövme şiddetinde dövülmüş numunenin kırık yüzey fotoğrafı ($\times 50$)

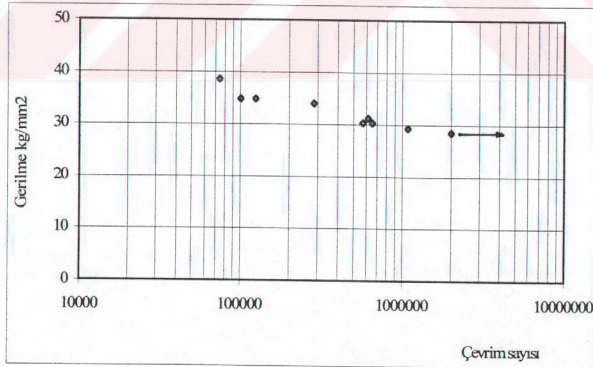


Resim 12. Normalleştirilmiş ve 0,30 mm dövme şiddetinde dövülmüş numunenin kırık yüzey fotoğrafı($\times 500$)

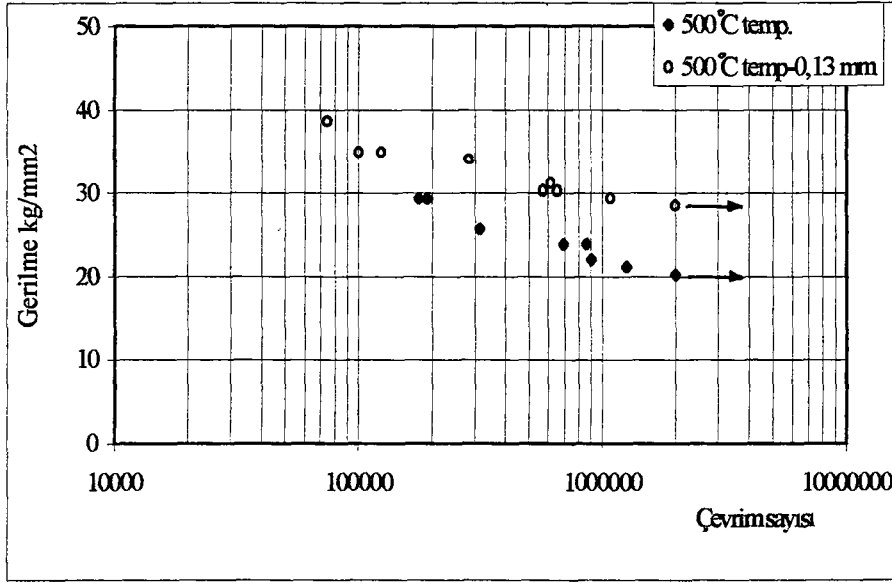
Şekil (7.23) de 500 °C de temperlenmiş numunelere uygulanan 0,13 mm dövme şiddetinden sonra elde edilen S – N eğrisi, Tablo (7.12) de deney sonuçları verilmiştir. Şekil (7.24) de ise, sadece ısı işlemleri ve ısı işlemleri sonrası dövme işlemi uygulanan numunelerin S – N eğrileri birlikte verilmiştir.

Tablo 7.12 500 °C de temperlenmiş ve 0,13 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerin normal yorulma deney sonuçları

Numune no	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
51	8.25	30.30	571415
52	8.25	30.30	655018
53	7.75	28.46	2000000
54	8.50	31.22	614367
55	9.50	34.89	124254
56	9.50	34.89	100477
57	9.25	33.97	282842
58	10.50	38.57	74195
59	8	29.38	1089786



Şekil 7.23. 500 °C de temperlenmiş ve 0,13 mm dövme şiddeti ile dövülen numunelerin normal yorulma S- N diyagramı

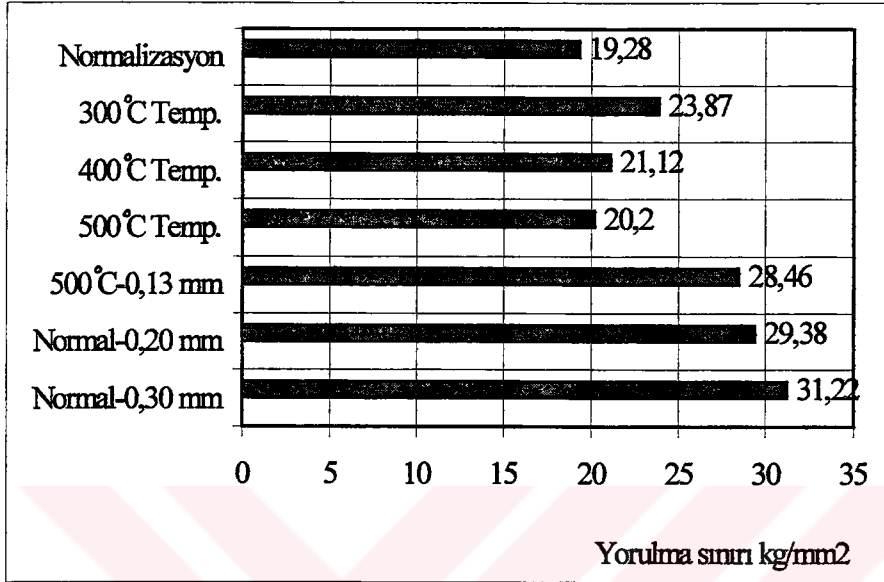


Şekil 7.24. 500 °C temperleme ve 500 C temperleme sonrası bilyalı dövme işlemi uygulanan numunelerin normal yorulma S-N diyagramları

Şekil (7.24) de görüldüğü gibi, 500 °C de temperlenmiş numunelerin yorulma dayanımı bilyalı dövme işlemi uygulandıktan sonra önemli ölçüde artmıştır. Normalizasyonlu numunelerde basma gerilmeli tabaka kalınlığı, 500 °C de temperlenmiş numunelerde meydana gelen basma gerilmeli tabaka kalınlığından daha fazla olmasına rağmen, 500 °C de temperlenmiş numunelerde oran olarak daha fazla bir iyileşme görülmektedir. Bunun sebebi daha önce ifade edildiği gibi, yine yüzeyde meydana gelen basma gerilmelerinin, deformasyon sertleşmesine sahip tabaka boyunca çekme gerilmelerinin tesirini hafifletmesidir. Ayrıca bu numunelerin normalleştirilmiş numunelere göre mekanik özelliklerinin daha iyi olması ve plastik deformasyona dirençli olması, yorulma dayanımındaki iyileşmede etkili olmuştur.

Şekil (7.25) de işlem şartlarına göre normal yorulma sınırının değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, uygulanan deney şartlarında en yüksek yorulma dayanımı normalizasyon ısı işlem sonrasında 0,30 mm dövme şiddeti uygulanan numunelerde elde edilmiştir. Bu numunelerde yorulma dayanımında % 62 oranında artış sağlanmıştır. Ancak bu sonucun dövme şiddetinin yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 500 °C de temperlenen numunelerde dövme şiddetinin düşük olmasından dolayı, yorulma dayanımı daha düşük elde edilmiştir. Bu numunelerde bilyalı dövme işlemi sonrasındaki yorulma ömründeki artış oranının daha yüksek

olduğu görülmektedir. Bu numunelerde 0,13 mm dövme şiddeti uygulanması ile yorulma dayanımında % 41 oranında bir artış elde edilmiştir. Sonuç olarak 500 °C de temperlenmiş numunelerde dövme şiddetinin artırılması halinde yorulma dayanımında daha fazla artışların olacağı beklenebilir.



Şekil 7.25. İşlem şartlarına göre normal yorulma sınırının değişimi

7.7.2 Fretting Yorulma Deneyi Sonuçları

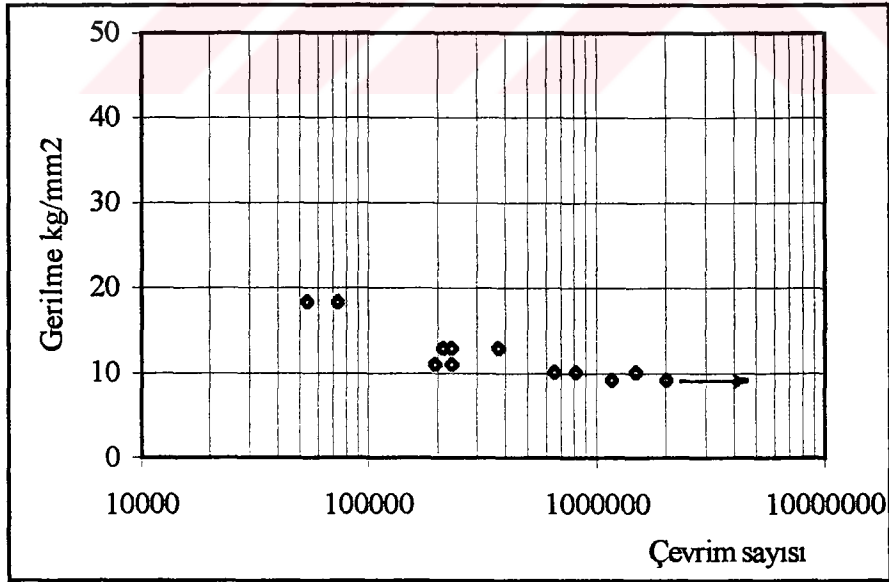
Fretting yorulma deneylerinin sonuçları üç safhada incelenmiştir. Birinci kısımda, normal yüke bağlı olarak artan temas basıncıyla değişen yorulma dayanımı, ikinci kısımda ısıtma işlemlerin yorulma dayanımına tesiri, üçüncü kısımda ise, bilyalı dövme işlemi ile yorulma dayanımının değişimi değerlendirilmiştir.

Şekil (7.26), (7.27) ve (7.28) de normalizasyon ısıtma işlemi uygulanan numunelerde sırası ile 1 - 1,5 - 2 kg normal yük altında fretting yorulma S – N eğrileri Tablo (7.13), (7.14) ve (7.15) de ise, bu deneylere ait sonuçlar verilmiştir.

Şekil ve tablolar incelendiğinde, artan normal yüke bağlı olarak temas basıncının artmasının yorulma dayanımını düşürdüğü görülmektedir. Bilindiği gibi, pratikte temas basıncı artarken kayma genliği de azalmaktadır. Böyle durumlarda yükteki artma aşınma hacmini azaltmaktadır. Kayma genliğinin sabit tutulması halinde ise aşınma hacmi ve normal yük arasında hemen hemen orantılı bir ilişki vardır (Zhang ve Zhu,

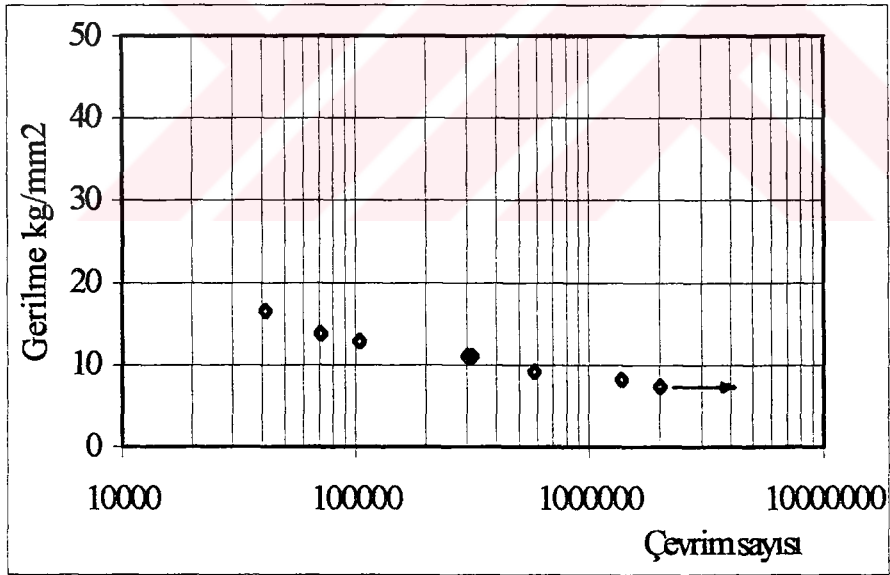
Tablo 7.14 Normalizasyon ısıt işlemleri gören numunelerde fretting yorulma sonuçları ($p=1,5$ kg)

Numune no	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
68	5	18,36	53690
69	5	18,36	72865
70	3,5	12,85	371995
71	2,5	9,16	1168141
72	3	11,01	231634
73	3	11,01	195585
74	2,75	10,08	1476475
75	2,5	9,16	$2 \cdot 10^6$
76	3,5	12,85	232401
77	2,75	10,08	652717
78	3,5	12,85	212459
79	2,75	10,08	809952

**Şekil 7.27.** Normalizasyon ısıt işlemleri gören numunelerde fretting yorulma S-N diyagramı ($p=1,5$ kg)

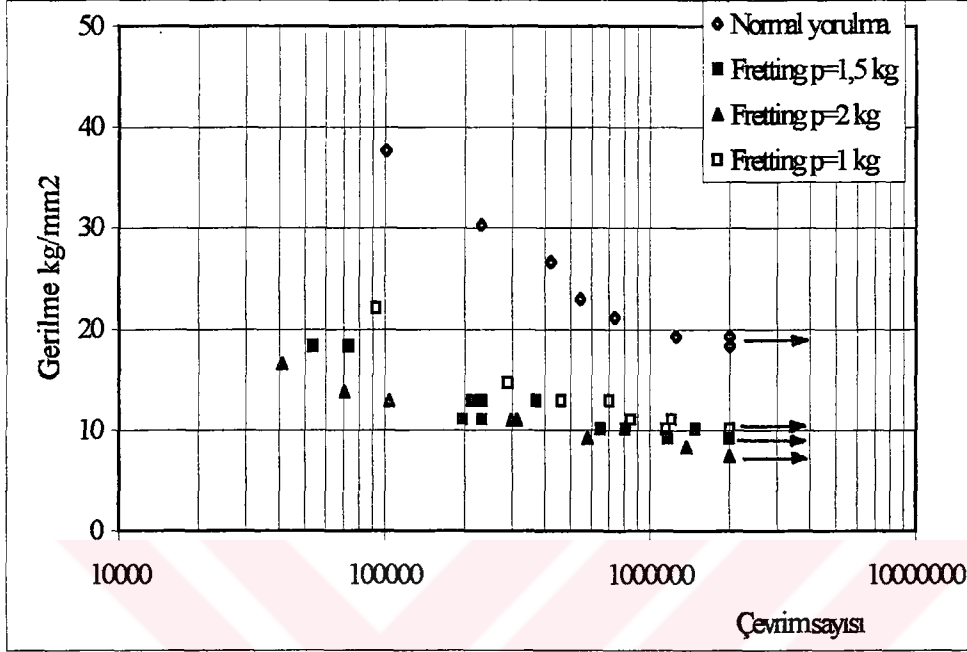
Tablo 7.15 Normalizasyon ısıtıl işlem uygulanan numunelerde fretting yorulma sonuçları (p=2 kg)

Numune no	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
80	3,5	12,85	103545
81	2	7,34	2.10 ⁶
82	2,25	8,25	1372930
83	3	11,01	299130
84	3	11,01	313703
85	3,75	13,77	70564
86	4,50	16,53	41190
87	2,50	9,16	582020



Şekil 7.28 Normalizasyon ısıtıl işlem uygulanan numunelerde fretting yorulma S-N diyagramı (p=2 kg)

Şekil (7.29) da normalizasyon ısıl işlemi uygulanan numunelerin normal yorulma S – N diyagramı ve farklı normal yük altında normalleştirilmiş numunelerin fretting yorulma S – N diyagramları birlikte verilmiştir.



Şekil 7.29. Normalizasyon ısıl işlemi uygulanan numunelerde normal ve fretting yorulma deneylerinin S-N diyagramları

Şekil (7.29) da görüldüğü gibi, fretting şartlarında yorulma ömrü normal yorulmaya göre önemli ölçüde düşmüştür. Bu tamamen fretting yorulmanın ilk aşamasında etkili olan fretting aşınmasından kaynaklanmaktadır. Numune yüzeylerinde meydana gelen aşınma gerilme yoğunlaşmasına neden olarak yorulma çatlaklarının başlama safhasını hızlandırdığı ve sonuçta yorulma dayanımının düştüğü görülmektedir (Brady, 1990 ; Nowell ve O'Connor, 1987).

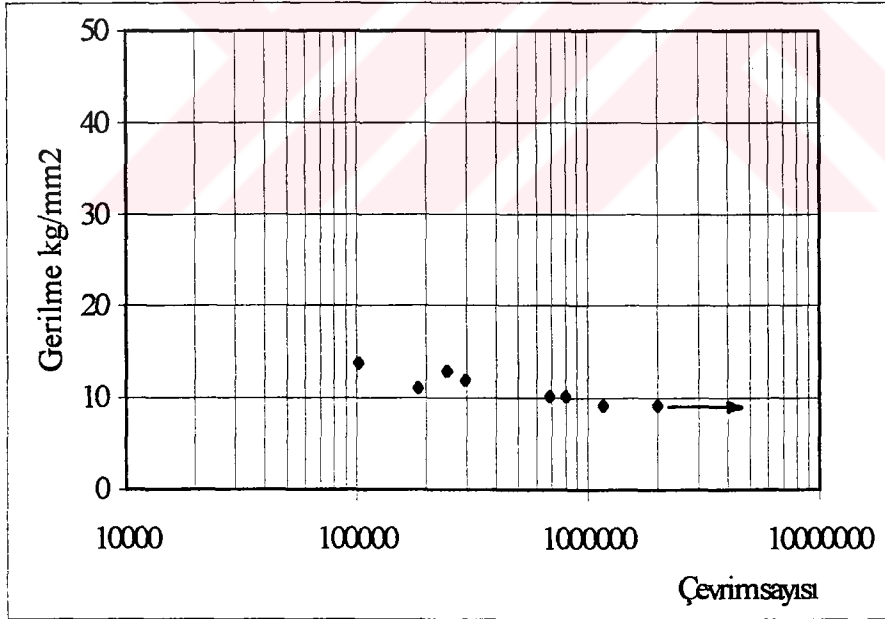
Artan normal yüke bağlı olarak yorulma dayanımındaki düşme numune ve yastık malzemesi arasındaki sürtünme kuvvetinin artmasına bağlanabilir. Daha önce ifade edildiği gibi, normalleştirilmiş numunelerde yapı oldukça sünek ve sertliği düşüktür. Bu özellikler de aşınmayı artıran faktörler olarak söylenebilir.

Şekil (7.30), (7.31) ve (7.32) de sırası ile 300, 400, 500 °C de temperlenmiş numunelerin fretting yorulma deneylerinde elde edilen S – N diyagramları ve tablo

(7.16), (7.17) ve (7.18) de deney sonuçları verilmiştir. Şekil (7.33) de ise, bu numunelerin S – N diyagramları toplu halde verilmiştir.

Tablo 7.16 300°C de temperlenmiş numunelerde fretting yorulma deney sonuçları (p=2 kg)

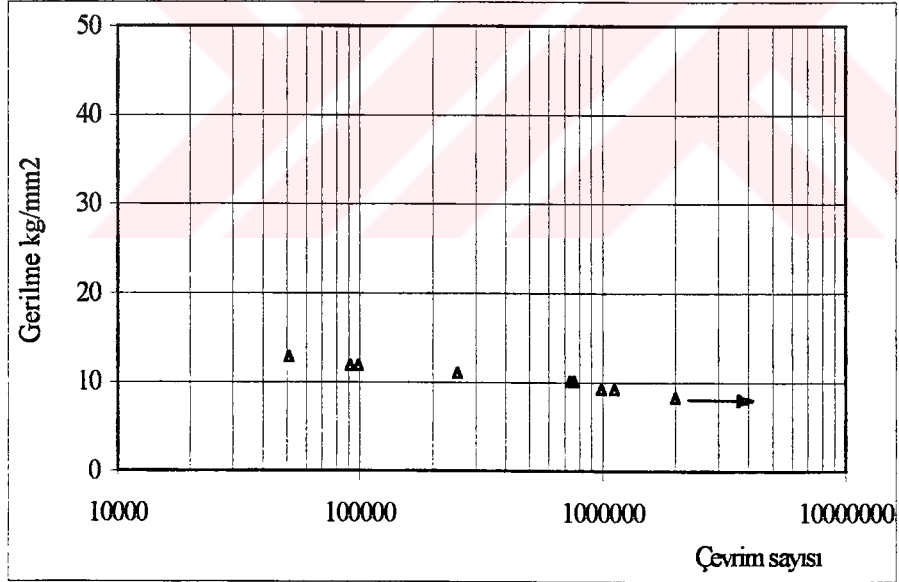
Numune no	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
88	3	11.01	185730
89	2,50	9.16	2.10 ⁶
90	2,75	10.08	803495
91	2,75	10.08	682630
92	3,75	13.77	102445
93	2,50	9.16	1165280
94	3,50	12.85	245240
95	3,25	11.90	295867



Şekil 7.30. 300°C de temperlenmiş numunelerde fretting yorulma S-N diyagramı (p=2 kg)

Tablo 7.17 400°C de temperlenmiş numunelerde fretting yorulma deney sonuçları (p=2 kg)

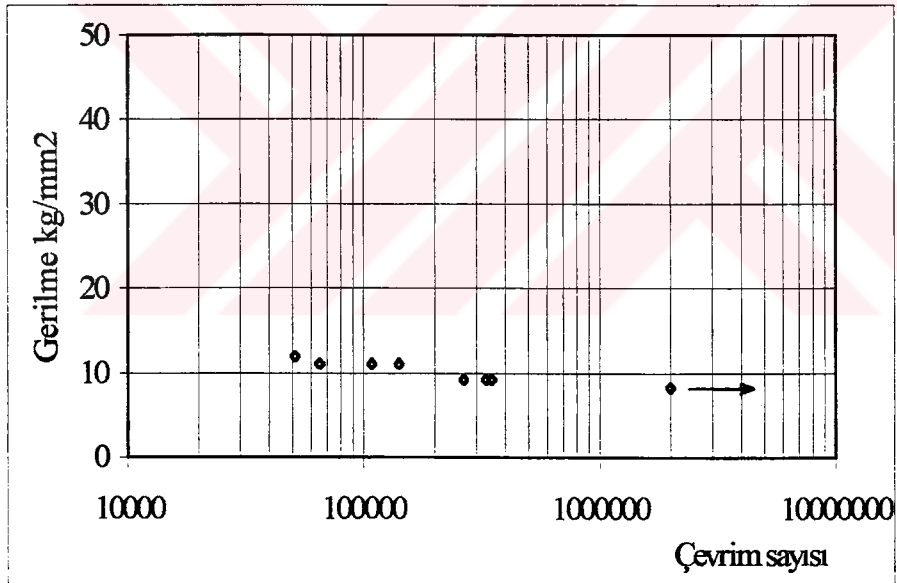
Numune no	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
96	2.75	10.08	763165
97	2.75	10.08	735210
98	3.25	11.90	98710
99	2.50	9.16	990300
100	3.50	12.85	50855
101	2.25	8.25	2.10 ⁶
102	3.25	11.90	91040
103	3	11.01	252720
104	2.50	9.16	1112020



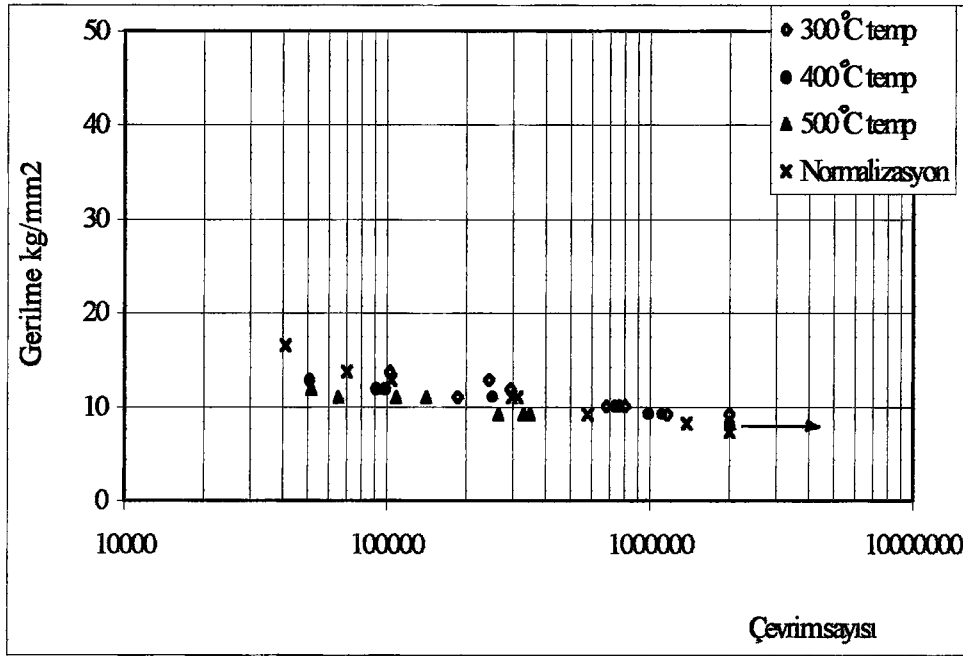
Şekil 7.31. 400°C de temperlenmiş numunelerde fretting yorulma S-N diyagramı (p=2 kg)

Tablo 7.18 500°C de temperlenmiş numunelerde fretting yorulma deney sonuçları (p=2 kg)

Numune no	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
105	3	11.01	141235
106	3	11.01	108380
107	2.50	9.16	349275
108	2.25	8.25	2000000
109	2.50	9.16	264905
110	2.50	9.16	330100
111	3	11.01	65195
112	3.25	11.90	51448

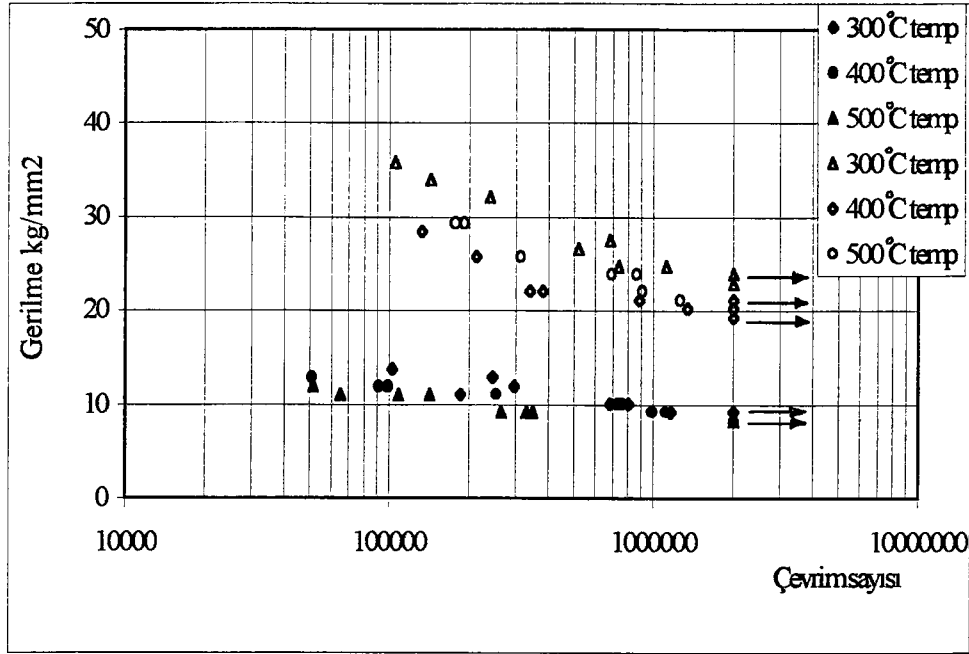


Şekil 7.32. 500°C de temperlenmiş numunelerde fretting yorulma S-N diyagramı (p=2 kg)



Şekil 7.33. Normalizasyon ve temperleme sıcaklığına göre fretting yorulma S-N diyagramları

Şekil ve tablolar incelendiğinde, en yüksek yorulma dayanımının 300 °C de temperlenmiş numunelerde olduğu görülmektedir. Temperleme sıcaklığının artması ile yorulma dayanımı düşmektedir. En düşük yorulma dayanımı ise normal yorulma deneylerinde olduğu gibi, normalizasyon ısı işlemi uygulanan numunelerde elde edilmiştir. 400 °C ve 500 °C de temperlenmiş numunelerin yorulma dayanımları, ölçüm duyarlılığı içerisinde yaklaşık olarak aynı çıkmıştır. Şekil (7.34) de temperleme sıcaklıklarına göre normal ve fretting yorulma S – N diyagramları toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.34. Temperleme sıcaklığına göre normal (0,Δ,◇) ve fretting (●,▲,◆) yorulma S-N diyagramları

Şekil (7.34) de görüldüğü gibi, temperlenen numunelerde fretting yorulma dayanımı normal yorulmaya göre 2 kat düşmektedir. Bu sonuçlar literatürde ifade edilen, yorulma dayanımının fretting şartlarında 1.5 – 10 kat düştüğü doğrultusundaki bilgilerle uygunluk göstermektedir (Troshchenko ve vd., 1989).

Bilindiği gibi, fretting yorulma iki safhadan meydana gelmektedir. Birinci safhada temas eden yüzeyler arasında meydana gelen aşınma nedeniyle frettinge maruz kalan bölgede gerilme yoğunlaşmasına bağlı olarak çatlakların başlaması ve tekrarlı gerilme ile sürtünme kuvvetinin tesiri ile belirli bir uzunlukta ilerlemesi, ikinci safhada ise çatlakların normal yorulmada olduğu gibi çekme gerilmelerinin tesiri ile ilerlemesidir. Bu bakımdan frettingle meydana gelen yorulma dayanımındaki azalmayı öncelikle aşınma açısından değerlendirmek uygun olacaktır.

Deneylerde elde edilen sonuçlar kullanılan malzemelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri ile yakından ilgilidir. 300 °C de temperlenmiş numunelerde mikroyapının sertlik düzeyi yüksek temperlenmiş martenzit olması ve aşınma direncinin diğer numunelere nazaran yüksek olması bu numunelerin yorulma dayanımının yüksek çıkmasında etkili olduğu düşünülebilir. Ayrıca yastık malzemeye normalizasyon ısı işlem uygulanmış olması numuneden ziyade yastık elemanın aşınmasını artırmış olması

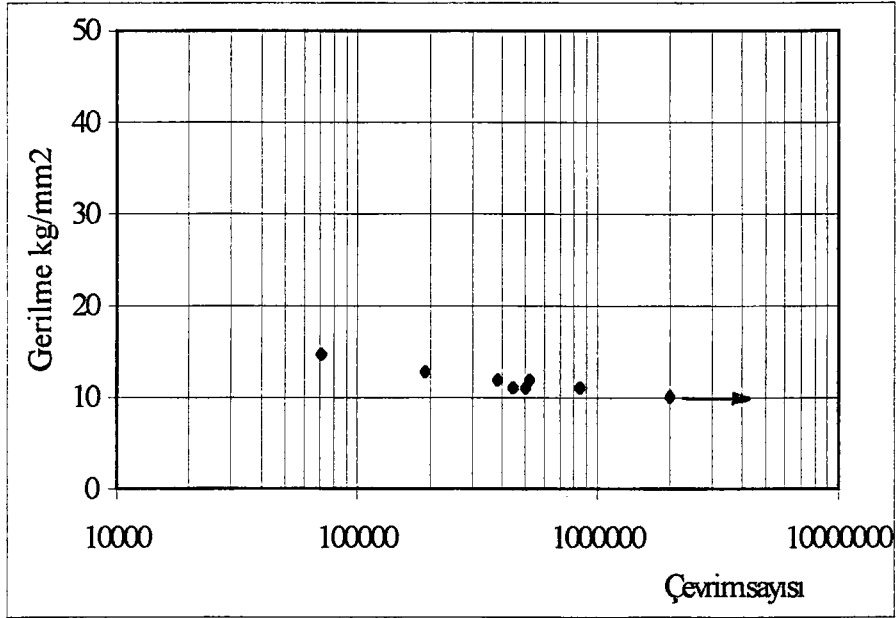
diğer bir faktör olarak düşünülebilir. Bu sonuçların literatürle aynı doğrultuda olduğu görülmüştür (Reeves ve Hoepner, 1978 ; Waterhause, 1965).

Diğer numunelerde ise numune ve yastık eleman arasındaki sertliğin nisbeten birbirlerine daha yakın olması numunelerde belirli ölçüde aşınmaya neden olarak yüzey hasarını artırmıştır. Numune yüzeyinde meydana gelen aşınmanın gerilme yoğunlaşmasına bağlı olarak yorulma çatlaklarının başlamasını hızlandırarak, yorulma ömrünün aynı düzeyde düşmesine sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil (7.35) ve (7.36) da normalizasyon ısı işlem sonrası 0,20 ve 0,30 mm dövme şiddetinde bilyalı dövme işlemi uygulanan numunelerin S – N diyagramları, Tablo (7.19) ve (7.20) de ise bu deneylere ait sonuçlar verilmiştir.

Tablo 7.19. Normalleştirilmiş ve 0,20 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerin fretting yorulma deney sonuçları

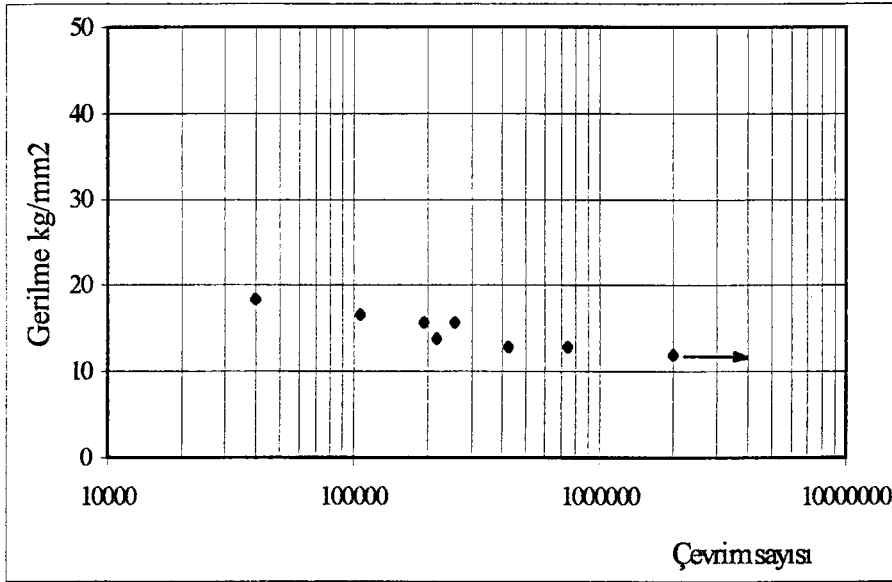
Numune no	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
113	3.50	12.85	191750
114	3.25	11.90	521560
115	3	11.01	444860
116	3	11.01	501618
117	2.75	10.08	2.10 ⁶
118	3.25	11.90	383500
119	4	14.69	70840
120	3	11.01	842580



Şekil 7.35. Normalleştirilmiş ve 0,20 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerin fretting yorulma S-N diyagramı

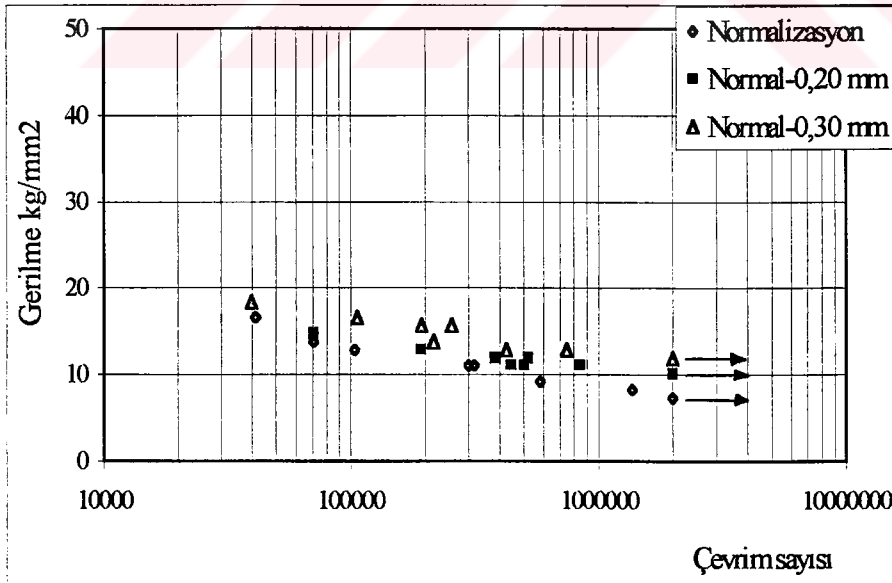
Tablo 7.20 Normalleştirilmiş ve 0,30 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerin fretting yorulma deney sonuçları

Numune no	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
121	5	18.36	39884
122	4.25	15.61	255411
123	4.25	15.61	192517
124	3.50	12.85	424918
125	3.25	11.90	2.10 ⁶
126	3.75	13.77	216294
127	3.50	12.85	745820
128	4.50	16.53	106465



Şekil 7.36. Normalleştirilmiş ve 0,30 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerin fretting yorulma S-N diyagramı

Şekil ve tablolarda bilyalı dövme işlemi ile yorulma dayanımının arttığı görülmektedir. Artan dövme şiddetiyle bu artış daha belirgin olmaktadır. Şekil (7.37) de normalleştirilmiş ve normalizasyon sonrası bilyalı dövme işlemi uygulanan numunelerin S – N eğrileri toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.37. Normalizasyon ve normalizasyon sonrası bilyalı dövme uygulanmış numunelerde dövme şiddetine göre fretting yorulma S-N diyagramları

(7.5). bölümde ifade edildiği gibi, bilyalı dövme işlemi sonrasında numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliği artmış ve belirli bir derinliğe kadar deformasyon sertleşmesine sahip bir tabaka meydana gelmiştir. Bu tabaka yüzeyde çekme gerilmelerinin tesirini azaltarak yorulma dayanımına olumlu yönde tesir etmektedir. Yorulma dayanımındaki bu artış yüzey açısından değerlendirilecek olursa; bilindiği gibi yüzey pürüzlülüğü gerilme yoğunlaşmasına neden olmasından dolayı normal yorulma dayanımını düşürmektedir. Ancak fretting yorulmada yüzey pürüzlülüğünün olumsuz tesirinin yanında faydalı denebilecek bir tesire de sahiptir. Bu da teğetsel gerilmeyi bir dereceye kadar absorbe etmesi ve pürüz sebebiyle aşınma taneciklerinin temas eden yüzeylerden kolaylıkla kaçabilmesidir (Waterhouse, 1972).

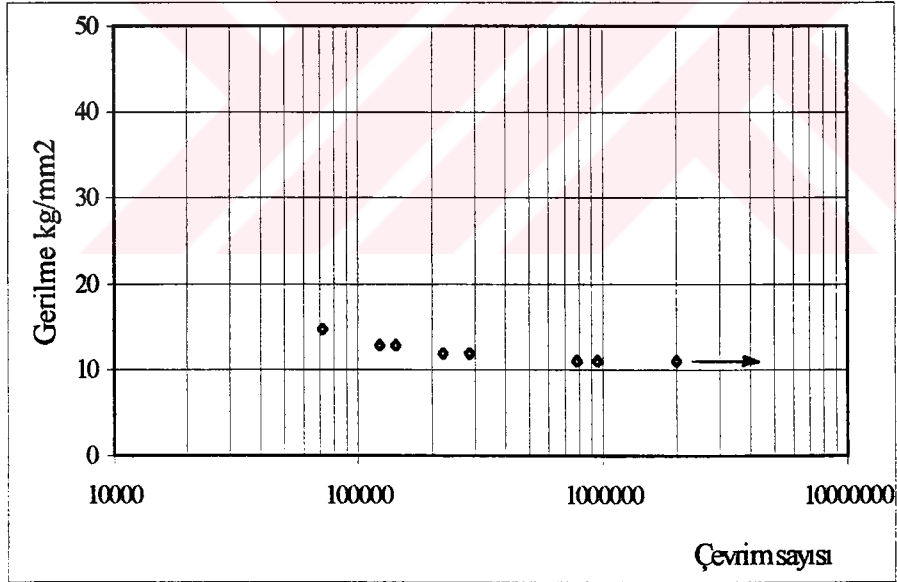
Bilyalı dövme işleminin asıl etkisi ise, yüzey sertliğini artırmasıdır. Yüzey sertliğine bağlı olarak aşınma miktarının da azaldığı düşünülebilir. İç yapı açısından ise, yüzeyden itibaren belirli bir derinliğe kadar basma gerilmeli bir tabakanın meydana gelmesinin yorulma çatlaklarının oluşum ve ilerleme sürecini geciktirerek yorulma dayanımını artırdığı söylenebilir.

Şekil (7.38) de 500 °C de temperlenmiş numunelere uygulanan 0,13 mm dövme şiddetine sahip bilyalı dövme işleminden sonra elde edilen S – N diyagramı, Tablo (7.21) de bu deneylere ait sonuçlar verilmiştir. Şekil (7.39) da ise, 500 °C de temperlenmiş numunelerle, ısı işlem sonrası bilyalı dövülmüş numunelerin S – N diyagramları birlikte verilmiştir.

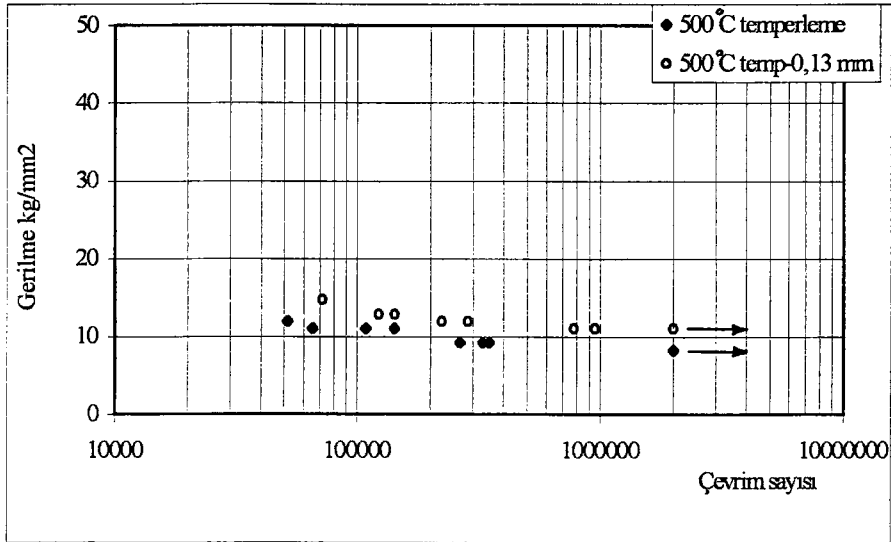
Şekil (7.39) da görüldüğü gibi, 500 °C de temperlenmiş numunelerde de bilyalı dövme işlemi ile yorulma dayanımının arttığı görülmektedir. Yorulma ömründeki bu artış daha önce ifade edilen yüzey sertliği ve basma gerilmeli tabakadan kaynaklandığı söylenebilir.

Tablo 7.21 500°C de temperlenmiş ve 0,13 mm dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerin fretting yorulma deney sonuçları

Numune no	Sehim mm	Gerilme Kg/mm ²	Çevrim sayısı
129	3.50	12.85	122700
130	3	11.01	782340
131	3	11.01	2000000
132	3.25	11.90	284557
133	3.50	12.85	142662
134	3.25	11.90	222430
135	4	14.69	71860
136	3	11.01	951582

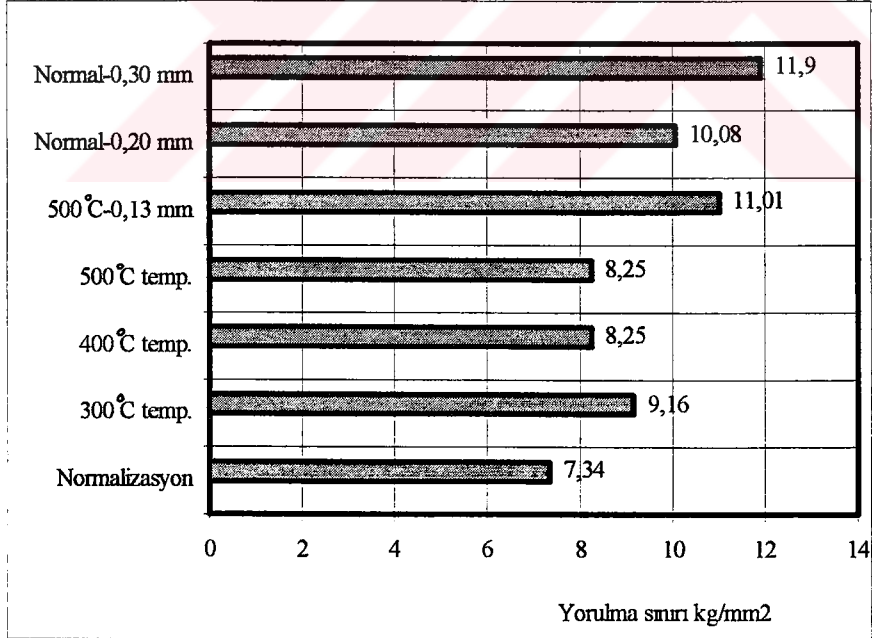


Şekil 7.38. 500°C de temperlenmiş ve 0,13 mm dövme şiddeti ile dövülen numunelerin fretting yorulma S-N diyagramı



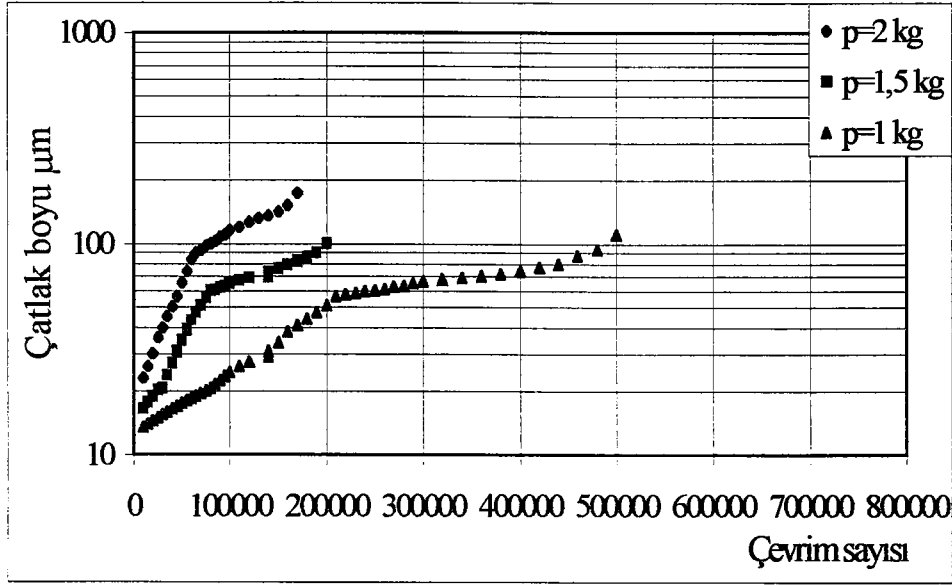
Şekil 7.39. 500°C temperleme ve 500°C temperleme sonrası bilyalı dövme işlemi uygulanan numunelerin fretting yorulma S-N diyagramları

Aşağıda şekil (7.40) da uygulanan deney şartlarında numunelerde elde edilen yorulma sınırları toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.40 İşlem şartlarına göre fretting yorulma sınırının değişimi

normal yük altında yapılan fretting yorulma deneylerinde elde edilen çevrim sayısı ve çatlak boyu arasındaki ilişki toplu halde verilmiştir.



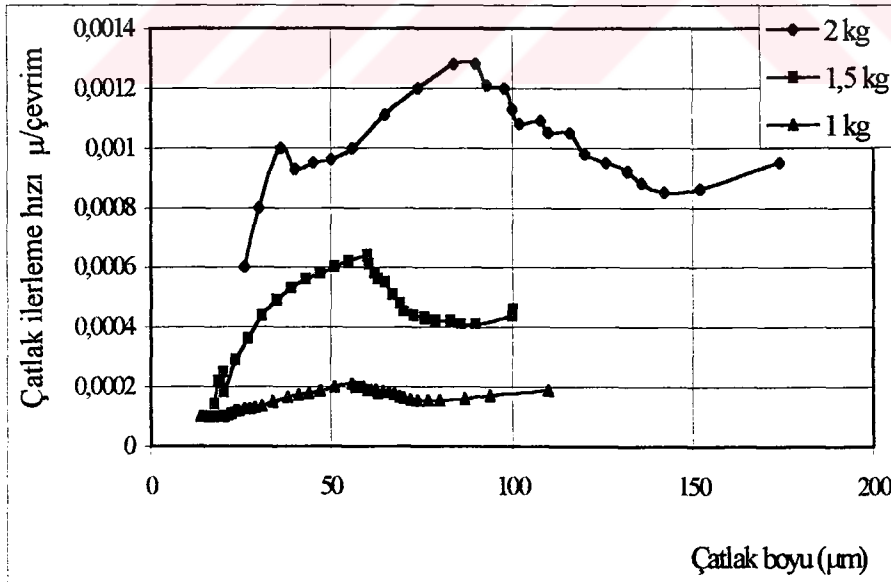
Şekil 7.41 Normalleştirilmiş numunelerde baskı ağırlığına göre çatlak boyu ve çevrim sayısı ilişkisi
($\sigma = 11,01 \text{ kg/mm}^2$)

Şekilde görüldüğü gibi, ilk tesbit edilen çatlak boyu normal yükteki artışa bağlı olarak artmakta, daha sonra uygulanan normal yüke göre farklı hızlarda ilerlemektedirler. 1 kg normal yük uygulanan numunede daha yavaş bir ilerleme eğilimi

görülmektedir. 2 kg ve 1,5 kg normal yük uygulanan numunelerde sürtünme kuvvetinden dolayı meydana gelen aşınma şiddetine paralel olarak, çatlaklar daha hızlı ilerlemektedir. Bilindiği gibi tekrarlı gerilme ve sürtünme gerilmesinin bileşimi çatlakların başlamasında olduğu gibi, ilerlemesini de hızlandırmaktadır. Normal yükün artması teğetsel gerilmeyi artırmakta, bu da aşınma miktarına bağlı olarak gerilme yoğunlaşmasını artırmaktadır (Bryggman ve Soderberg, 1986 ; Zhang, 1989)

Çatlaklar uygulanan normal yüke göre, belirli bir çatlak derinliğine karşılık gelen büküm noktasından sonra ise, daha yavaş bir ilerleme eğilimi göstermektedir. Normal yüke bağlı olarak büküm noktasındaki çatlak derinliğinin artması, yüzeyde meydana gelen teğetsel gerilmenin malzemenin daha derinliklerine tesir etmesinden kaynaklanmaktadır (Sato ve vd., 1986). Bilindiği gibi çatlak ilerleme hızı sadece gerilme düzeyinin değil, aynı zamanda çatlak boyutları ve malzeme özelliklerinin bir fonksiyonudur (Callister, 1991) Büküm noktasından sonra çatlaklar normal yorulmada olduğu gibi, tekrarlı gerilmelerle hemen hemen birbirlerine paralel olmakla beraber, büküm noktasında sahip oldukları çatlak boylarına göre ilerleme eğilimi gösterdikleri söylenebilir (Reed-Hill ve Abbaschian, 1994 ;Dowling, 1993).

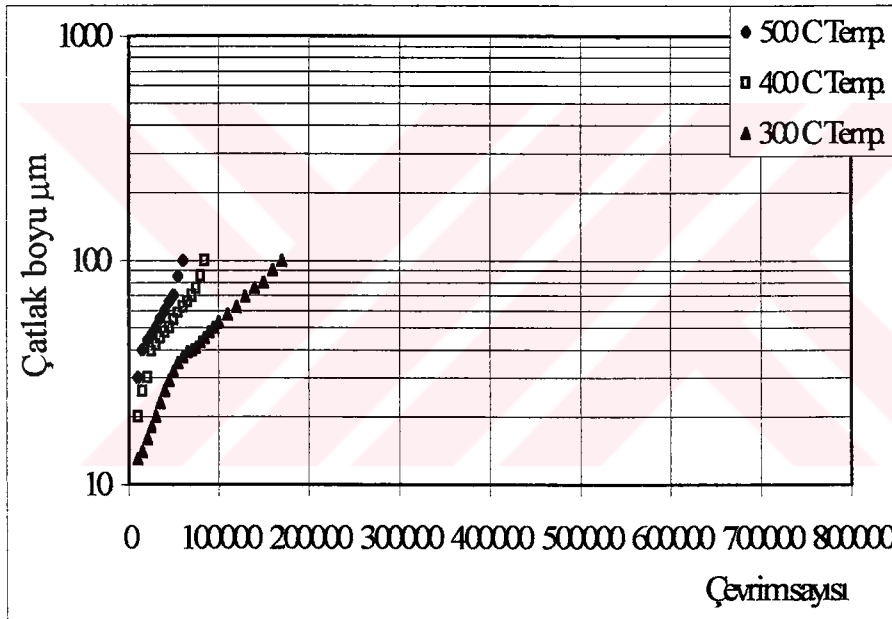
Şekil (7.41) den elde edilen çatlak boyu (a) ve çatlak ilerleme hızı (da/dN) arasındaki ilişki şekil (7.42) de verilmiştir.



Şekil 7.42 Normalleştirilmiş numunelerde baskı ağırlığına göre çatlak ilerleme hızları

Şekilde görüldüğü gibi, bütün numunelerde çatlak ilerleme hızı (da/dN) önce artmakta, daha sonra temas basıncına bağlı olarak belirli bir çatlak boyundan itibaren düşmekte ve tekrar artma eğilimi göstermektedir. Bu durum belirli bir çatlak boyundan sonra azalan fretting etkisi ve çatlak ucundaki şekil değiştirme ve gerilmedeki azalmaya bağlanabilir. Ayrıca çatlak yüzeylerinin fretting pabuçlar tarafından bastırılmasına bağlı olarak çatlak yüzeylerinin temasının neden olduğu çatlak kapanmasının etkili olduğu söylenebilir (Sato ve Kodama, 1986). Daha sonra ise, çatlak boyuna bağlı olarak çatlak ilerleme hızı artma eğilimi göstermektedir.

Şekil (7.43) de 2 kg normal yük altında farklı temperleme sıcaklıklarına göre elde edilen çevrim sayısı ve çatlak boyu arasındaki ilişki toplu halde verilmiştir.



Şekil 7.43 Temperleme sıcaklıklarına göre çatlak boyu ve çevrim sayısı ilişkisi ($\sigma = 11,01 \text{ kg/mm}^2$)

Şekil (7.43) de görüldüğü gibi, temperleme sıcaklığı arttıkça ilk tesbit edilen çatlak boyu artmaktadır. Bu durum temperleme sıcaklığına bağlı olarak malzeme sertliğindeki azalma ile ilgili olduğu söylenebilir. Bilindiği gibi, yüzey sertliği arttıkça aşınma ile meydana gelen yüzey hasarı azalmakta ve çatlak oluşumu gecikmektedir (Husheng ve vd., 1991 ;Brady, 1990).

Çatlaklar yüzeydeki aşınma şiddetine bağlı olarak belirli bir eğimle ilerledikten sonra, büküm noktasına karşılık gelen çatlak boyu, temperleme sıcaklığı ile birlikte artmaktadır. Bu safhadan sonra fretting tesirinin azalmasına bağlı olarak, çatlaklar normal yorulmada olduğu gibi tekrarlı gerilme ile ilerlemektedir. Şekilde artan temperleme sıcaklığına göre çatlakların daha hızlı ilerledikleri görülmektedir. 500 ve 400 °C de temperlenmiş numunelerde daha hızlı bir çatlak ilerleme eğilimi görülürken, 300 °C de temperlenmiş numunede ise nisbeten daha yavaş ilerlemektedir. Bu durumun fretting tesirinin azaldığı ve normal yorulma şartlarının etkili olduğu büküm noktasındaki çatlak uzunluğuna bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bilindiği gibi, normal yorulmada ilerleyen bir çatlak uzunluğunun (a) çevrim (N) ile değişimi, çatlak ilerleme hızı (da/dN) olarak tanımlanmakta ve Paris – Erdoğan tarafından ifade edilen bir çevrimdeki gerilim şiddet aralığı (ΔK) cinsinden ifade edilmektedir.

$$da / dN = C (\Delta K)^m \quad (7.1)$$

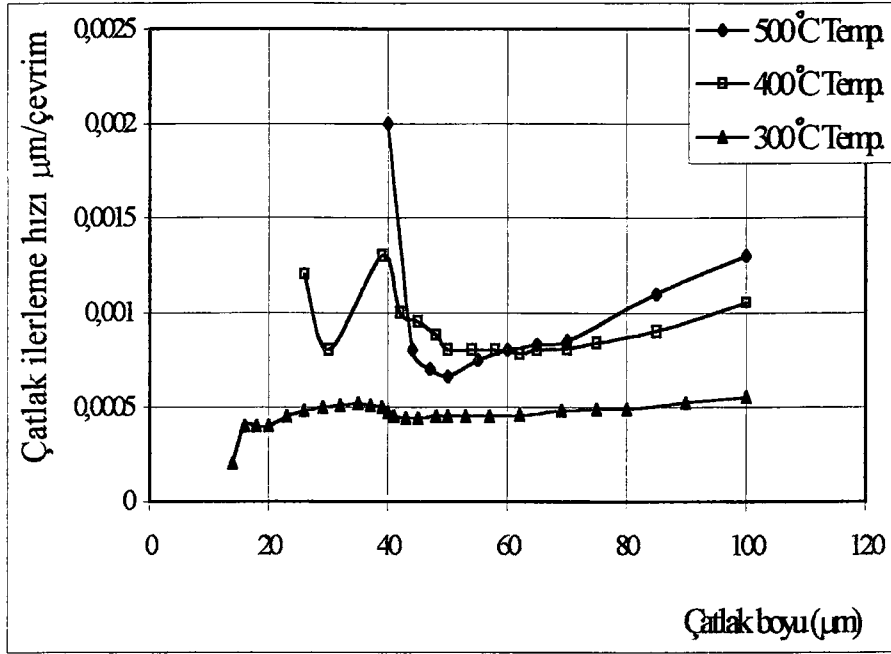
$$\Delta K = (K_{\max} - K_{\min}) \quad (7.2)$$

$$K_{\min} = 0$$

$$\Delta K = \sigma_{\max} (\pi a)^{1/2} \quad (7.3)$$

Denklemden görüldüğü gibi, gerilme yoğunluk faktörü çatlak boyunun kare kökünün bir fonksiyonudur ve çatlak ilerleme hızı üzerinde önemli bir tesire sahiptir (Stephens ve vd., 1997 ; Goel ve Chand, 1994 ; Sengupta, 1994). Bu bakımdan çatlak uzunluğu arttıkça çatlak hızı da artmaktadır.

Şekil (7.43) den elde edilen çatlak boyu (a) ve çatlak ilerleme hızı arasındaki ilişki şekil (7.44) de verilmiştir:

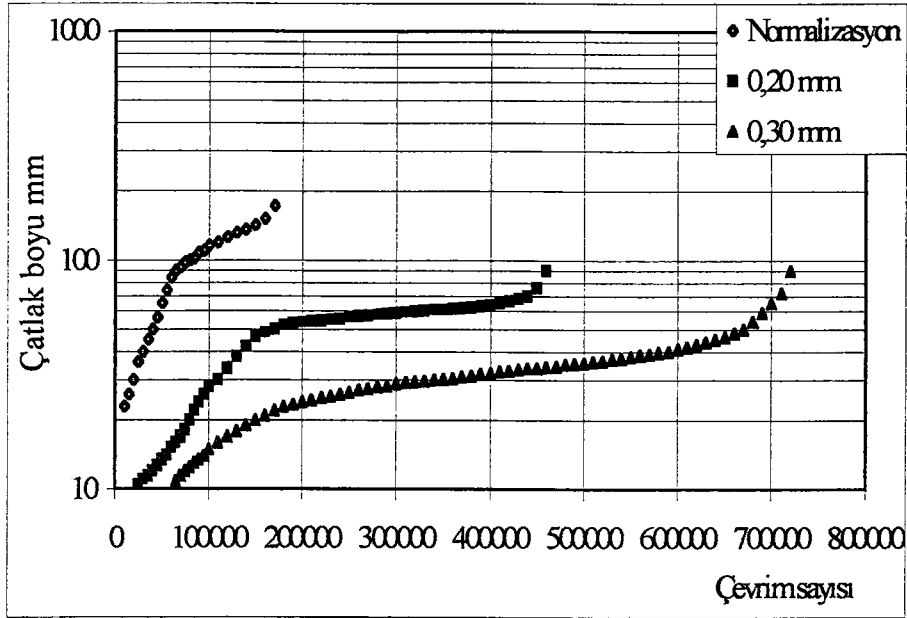


Şekil 7.44 Temperleme sıcaklığına göre çatlak ilerleme hızları

Şekilde görüldüğü gibi, 500 °C de temperlenmiş numunede ilk tesbit edilen çatlak boyu daha fazla iken azalan fretting tesirine bağlı olarak çatlak ilerleme hızı düşmekte ve 400 °C de temperlenmiş numunedeki çatlak ilerleme hızına yaklaşmaktadır. 300 °C de temperlenmiş numunede ise, daha düşük bir çatlak ilerleme hızı görülmektedir.

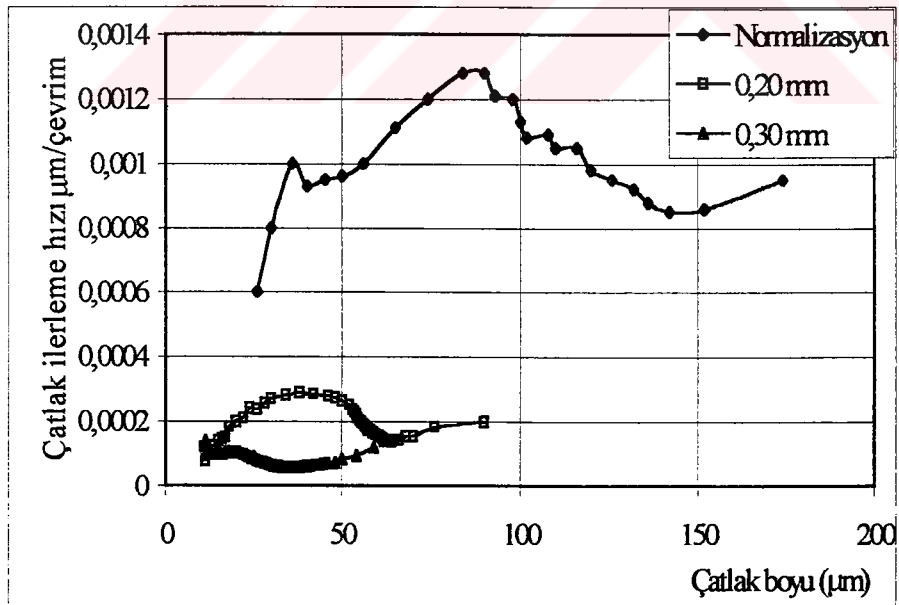
Şekil (7.45) de normalleştirilmiş ve daha sonra 0,20 mm ve 0,30 mm dövme şiddetlerinde bilyalı dövme işlemi uygulanan numunelerle, fretting yorulma deneylerinde elde edilen çevrim sayısı ve çatlak boyu arasındaki ilişki toplu halde verilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi, bilyalı dövülmüş olan numunelerde normalizasyon ısı işlemi uygulanan numunelere göre çatlaklar daha geç başlamakta ve yine dövme şiddetine bağlı olarak çatlakların başladığı çevrim sayısı artmaktadır. Bu durum bilyalı dövme işleminde aşırı dövmenin yapılmadığını göstermektedir. Çatlakların daha geç başlaması, bilyalı dövme sonucu yüzey sertliğinin artmasına bağlanabilir. Frettingin etkili olduğu büküm noktasına kadar ve büküm noktasından sonra çatlakların daha yavaş bir ilerleme eğilimi göstermesi ise, yüzey altında belirli bir derinliğe kadar ulaşan basma gerilmeli tabakanın çatlakların ilerlemesini yavaşlatmasından kaynaklandığı söylenebilir (Was ve Pelloux, 1979).



Şekil 7.45 Normalleştirilmiş ve bilyalı dövülmüş numunelerde çatlak boyu ve çevrim sayısı ilişkisi
($\sigma = 11,01 \text{ kg/mm}^2$)

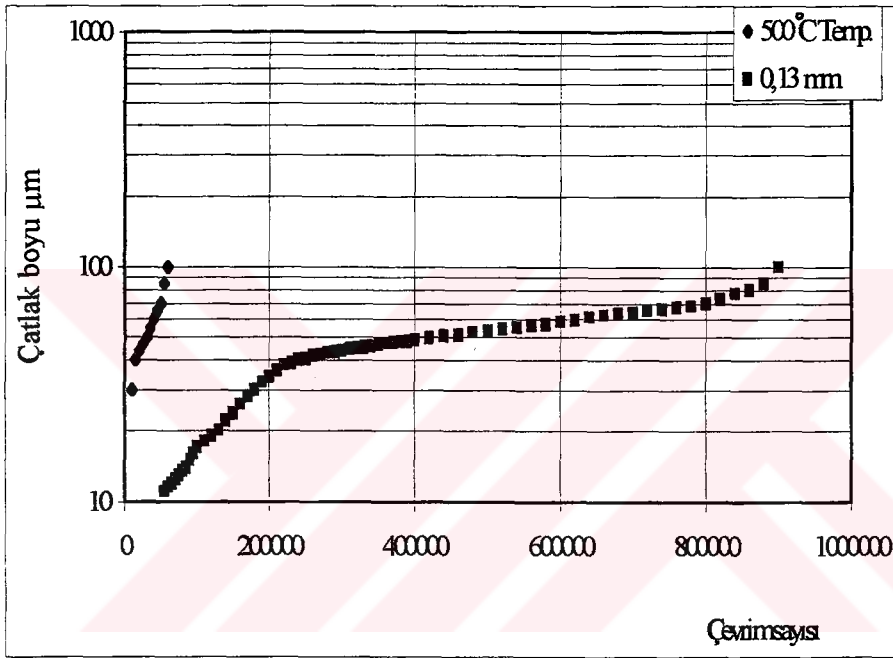
Şekil (7.45) den elde edilen çatlak boyu (a) ve çatlak ilerleme hızı (da/dN) arasındaki ilişki şekil (7.46) da verilmiştir.



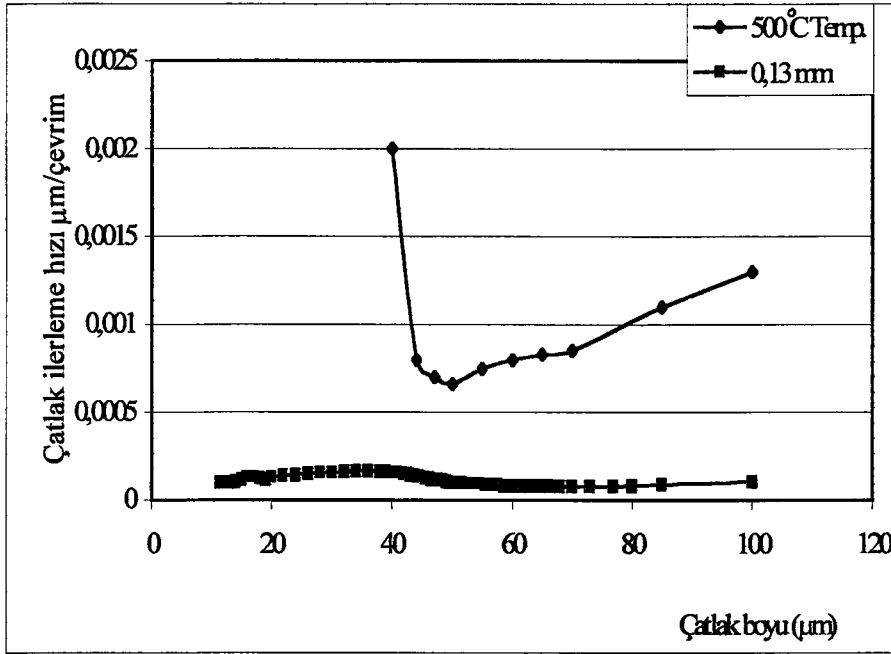
Şekil 7.46 Normalleştirilmiş ve bilyalı dövülmüş numunelerde çatlak ilerleme hızları

Şekilde bilyalı dövme işlemi ile çatlak ilerleme hızlarının önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Dövme şiddetinin artırılmasına bağlı olarak çatlakların ilerleme hızı daha da düşmektedir. Bu durum daha önce ifade edildiği gibi, basma gerilmeli tabakanın çatlakların ilerlemesini yavaşlatmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil (7.47) de 500 °C de temperlenen ve temperleme sonrası 0,13 mm dövme şiddetinde bilyalı dövme işlemi uygulanan numunelerde çevrim sayısı ve çatlak boyu arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil (7.47) den elde edilen çatlak boyu (a) ve çatlak ilerleme hızı (da/dN) arasındaki ilişki ise, şekil (7.48) de verilmiştir.



Şekil 7.47 500 °C de temperlenmiş ve temperleme sonrası bilyalı dövülmüş numunelerin çatlak boyu ve çevrim sayısı ilişkisi ($\sigma = 11,01 \text{ kg/mm}^2$)



Şekil 7.48 500°C de temperlenmiş ve bilyalı dövülmüş numunelerde çatlak ilerleme hızları

Şekil (7.47) de bilyalı dövme işlemi ile çatlak başlama çevriminin, Şekil (7.48) de ise çatlak ilerleme hızının önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Bu durum diğer numunelerde olduğu gibi, bu dövme işleminde de aşırı dövmenin yapılmadığını göstermektedir. Bilyalı dövülen numunede büküm noktasına kadar (Şekil 7.47), yüzeydeki teğetsel gerilmenin etkisi ile çatlak hızı nisbeten fazla iken, büküm noktasından sonra teğetsel gerilmenin etkisinin azalmasından dolayı, yüzey altındaki basma gerilmesine bağlı olarak, çatlakların çok yavaş ilerledikleri görülmektedir. Bu durum belirli bir çatlak boyundan sonra azalan fretting etkisi ve çatlak ucundaki şekil değiştirme ve gerilmedeki azalmaya bağlanabilir. Bu sonuçlar bilyalı dövme işleminin yorulma çatlaklarının başlangıç ve ilerleme safhalarını geciktirmesi ile ilgili literatürle uyum içerisinde (ASM Handbook, 1990).

8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Normal yorulma deneylerinde; ısıtıl işlem uygulanan numuneler içerisinde en yüksek yorulma dayanımı 300 °C de temperlenmiş numunelerde elde edilmiştir. Bunu 400 °C ve 500 °C de temperlenmiş numuneler izlemektedir. En düşük yorulma dayanımı ise, normalleştirilmiş numunelerde elde edilmiştir. Sonuçlar, numunelerdeki mikroyapıya bağlı olarak malzemenin plastik deformasyona karşı direnci ile yakından ilgili olduğunu ortaya koymaktadır. Yorulma dayanımı deney şartlarında sertlik ve çekme mukavemeti ile artmakta, buna karşılık çentik darbe mukavemeti ile azalmaktadır.

Temperleme sıcaklığı arttıkça sementit taneleri büyümekte ve buna bağlı olarak malzemenin sertliği ve çekme mukavemeti düşmektedir. Plastik deformasyona karşı malzemenin direncinin azalması, yorulma dayanımının düşmesinde etkili olmaktadır.

Normalizasyon ısıtıl işlemi uygulanan numunelerde esas yapı ferrit ve perlitten meydana gelmektedir. Çekme mukavemeti ve sertliği düşük sünekliği ise oldukça yüksektir. Bu ısıtıl işlemle elde edilen yapının da plastik deformasyona karşı direncinin az olması, yorulma dayanımının düşmesine sebep olmaktadır. Çekme deneyi sonuçları ile yorulma dayanımlarının karşılaştırılması, bu sonuçları doğrulamaktadır.

Normalizasyon ısıtıl işlemi uygulanan numunelerde bilyalı dövme işlemi ile yorulma dayanımı önemli ölçüde artmaktadır. Deneylerde en yüksek dövme şiddeti olan 0,30 mm dövme şiddetinin uygulanması ile yorulma dayanımında % 62 oranında bir artış sağlanmıştır. Yüzeyde ve yüzey altında meydana gelen basma gerilmeli tabaka yüzeydeki çekme gerilmelerinin tesirini azaltarak veya yok ederek yorulma dayanımını artırmaktadır.

500 °Cde temperlenmiş numunelere uygulanan bilyalı dövme işlemi de yine yorulma dayanımını artırmaktadır. Yorulma dayanımındaki artış % 41 olarak tesbit edilmiştir. Dövme şiddetleri dikkate alındığında, oran olarak bu numunelerde elde edilen yorulma dayanımı normalleştirilmiş numunelere göre daha yüksek elde edilmiştir.

Normal yorulma deneyleri için, ısıtma işlemi uygulanmış numunelerle, bilyalı dövülmüş numunelerin yorulma dayanımları mukayese edildiğinde, soğuk deformasyon yöntemlerinden biri olan bilyalı dövme işleminin daha etkili olduğu görülmektedir.

Kırık yüzey fotoğraflarından, bilyalı dövme işleminin yüzeyde ve yüzey altında çatlak sayısını artırdığı tesbit edilmekte, ancak bu çatlakların ilerlemesinin basma gerilmeli tabaka ile engellendiği ve buna bağlı olarak yorulma dayanımının arttığı sonucuna varılmıştır.

Bilyalı dövme işleminde dövme şiddeti arttıkça numune yüzeylerinde meydana gelen plastik deformasyona uğrayan tabaka derinliği artmaktadır. Aynı dövme şiddetleri uygulanmamakla beraber, oran olarak düşünüldüğünde dövülen malzemenin sertlik değeri arttıkça deformasyon derinliğinin de arttığı tesbit edilmiştir.

Fretting yorulma deneylerinde, ısıtma işlemi uygulanan numuneler arasında önemli bir fark olmamakla beraber, en yüksek yorulma dayanımı 300 °C de temperlenmiş numunelerde elde edilmiştir. Artan temperleme sıcaklığı ile yorulma dayanımı düşmektedir. En düşük yorulma dayanımı normalleştirilmiş numunelerde elde edilmiştir. 300 °C de temperlenen numunelerde elde edilen yorulma dayanımı normalleştirilmiş numunelere göre % 25 daha yüksektir. Normal yorulmada elde edilen sıralama bu deneylerde de geçerlidir, ancak fretting yorulmanın birinci safhasında etkili olan aşınma nedeniyle yorulma çatlakları erken safhalarda başlamakta ve fretting yorulma dayanımını, normal yorulmanın takriben yarı değerine düşürmektedir. Yorulma dayanımındaki artışın ise, malzemenin yüzey sertliğine bağlı olarak aşınmaya ve plastik deformasyona karşı dirençten kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Baskı ağırlığındaki artış fretting yorulma dayanımını düşürmektedir. Temas basıncının artması yüzeydeki teğetsel gerilmeyi artırmakta ve buna bağlı olarak aşınma şiddetinin arttığı görülmektedir. Aşınmanın ise, yüzeyde gerilme yoğunlaşması oluşturarak yorulma dayanımının düşmesinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Fretting yorulma deneylerinde normalleştirilmiş numunelere uygulanan bilyalı dövme işlemleri ısıtma işlemlere göre, yorulma dayanımında daha belirgin bir artış sağlamaktadır. Artan dövme şiddetine bağlı olarak yorulma dayanımı artmaktadır.

500 °C de temperlenmiş numunelere uygulanan bilyalı dövme işleminde dövme şiddetinin düşük olmasına rağmen ısıtma işleme göre, fretting yorulma dayanımında % 34 oranında bir artış tesbit edilmiştir. Bu bakımdan, bu numunelerin

dövme şiddetlerinin artırılması halinde yorulma dayanımında önemli artışların olacağı söylenebilir. Bilyalı dövme işlemi ile yüzeyde sertliğin artması, fretting yorulmanın ilk safhasında etkili olan aşınmayı azaltmakta ve basma gerilmeli tabaka vasıtasıyla çatlakların ilerlemesini geciktirerek yorulma dayanımının artmasına sebep olmaktadır.

Çatlak ilerleme hızlarının tesbit edilmesi ilgili deneylerde, çatlak ilerleme eğrilerinin iki kısımdan meydana geldiği tesbit edilmiştir. İlk safha çatlakların hızlı ilerlediği bölge, ikinci safha ise nisbeten daha yavaş ilerlediği bölgedir. Deneylerde normal yükteki artışla beraber çatlakların başladığı çevrim sayısı azalmakta ve ilerleme hızı artmaktadır. Belirli bir çatlak derinliğinden sonra ise, daha yavaş bir ilerleme eğilimi göstermektedirler. Bu sonuçların normal yükteki artmaya bağlı olarak yüzeyde meydana gelen teğetsel gerilmeden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Çatlaklar yüzeyde aşınma şiddetine paralel olarak erken başlamakta ve teğetsel kuvvetin etkili olduğu derinliğe kadar hızlı ilerlemekte, daha sonra bu kuvvetin azalmasına bağlı olarak daha yavaş bir ilerleme eğilimi göstermektedirler.

Isıl işlem uygulanan numunelerde 300°C de temperlenmiş numunenin çatlak ilerleme hızı diğerlerine göre daha yavaştır. Temperleme sıcaklığı arttıkça, çatlak ilerleme hızı da artmaktadır. Çatlakların ilk ilerleme safhasında malzeme sertliğine bağlı olarak yüzeyde meydana gelen aşınma çatlakların başlamasında ve ilerlemesinde etkili olmaktadır. İkinci safhada yani, fretting tesirinin ihmal edildiği bölgede ise, çatlakların boyutlarının ilerleme hızında etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Normalleştirilmiş numunelere uygulanan bilyalı dövme işlemi aşırı dövme şiddetleri uygulanmadığı takdirde hem çatlakların başlama safhasında hem de ilerleme safhasında etkili olmaktadır. Bilyalı dövülmüş numunelerde çatlakların daha geç başlaması aşırı dövme işleminin yapılmadığını göstermektedir. Bu bakımdan yorulma dayanımı açısından optimum dövme şiddetlerinin denenmesi gerektiği söylenebilir. Bilyalı dövme işlemi ile yüzeyde meydana gelen sertlik aşınma miktarını azaltarak çatlakların başlamasını ve ilerlemesini geciktirmektedir. İkinci safhada ise, yüzey altında meydana gelen basma gerilmeli tabaka çatlak ucundaki çekme gerilmesini azaltarak çatlakların ilerlemesini yavaşlatmaktadır.

500°C de temperlenen numunelere uygulanan bilyalı dövme işlemi de yine aynı sebeplere bağlı olarak çatlakların başlamasını ve ilerlemesini oldukça yavaşlatmaktadır. Normalleştirilmiş numunelerle mukayese edildiğinde, bu

numunelerin mukavemet değerlerinin yüksek olmasının, çatlak ilerlemesinin daha yavaş olmasına neden olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak, ısıı işlemlerin fretting ve özellikle normal yorulma mukavemetine olumlu tesirlerinin olmasına rağmen, soğuk deformasyon işlemlerinden bilyalı dövme işleminin, fretting ve normal yorulma dayanımları açısından daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bilyalı dövme işlemi uygulanacak numunelerde yüzey çatlaklarının artmasını engellemek amacıyla belirli ölçüde sünekliğin olmasının yanısıra, malzemenin mukavemet değerlerinin de yüksek olması gerektiği kanaatine varılmıştır.ayrıca, fretting yorulmada aşınmanın önemli bir faktör olması nedeniyle, yorulma dayanımı ile ilgili çalışmalarda aşınma mekanizmasının da dikkate alınması gerekmektedir. Çalışmalarda kullanılan malzeme için, deneylerde takip edilen işlem şartları dikkate alındığında, en uygun işlemin malzemenin yağda sertleştirildikten sonra 500 °C de temperlenmesi ve bilyalı dövme işleminde geçirilerek kullanılması olduğu ortaya çıkmaktadır. Ancak bu şartlara ek olarak, bilyalı dövme işleminde farklı dövme şiddetlerini deneyerek en uygun dövme şiddeti tesbit edilmelidir. Ayrıca 500 °C nin altındaki temperleme sıcaklıkları ve farklı dövme şiddetleri uygulayarak en uygun temper sıcaklığı ve bilyalı dövme şiddeti ilişkisi bulunmalıdır.

9. KAYNAKLAR

- ALIC, J. A., HAWLEY, A. L., ve UREY, J. M., (1979) Formation of fretting fatigue cracks in 7075-77351 aluminium alloy. **Wear.** 56. 351.
- ALIC, J. A., ve HAWLEY, A. L., (1979) On the early growth of fretting fatigue cracks. **Wear.** 56, 377.
- ARAN, A., (1989) Makine parçalarının tasarım ve imalatında artık gerilmelerin önemi. **Mühendis ve Makine.** Sayı :356.
- ASM., (1990) **Metals Handbook**, Surface cleaning, finishing and coating. V: 4. American Society for Metals. 9. Baskı.
- BETHUNE, B., ve WATERHOUSE, R. B., (1968) Electrochemical studies of fretting corrosion. **Wear.** 12, 27.
- BİLL, R. C., (1982) Review of factors that influence fretting wear. **ASTM.** STP-780, 165.
- BLOCH, H. P., ve GEITNER, F. K., (1990) **Practical Machinery Management for Process Plants, Machinery Failure Analysis and Troubleshooting.** 3. Baskı. USA.
- BOYLER, H. E., (1986) **Atlas of Fatigue Curves.** American Society for Metals. Metals Park. Ohio
- BRADY, B. G., (1990) Fretting wear. **SAE. Technical Paper Series.** Aerospace Technology Conference and Exposition Long Beach. Aralık 1-4. California.
- BRYGGMAN, U., ve SODERBERG, S., (1986) Contact condition in fretting. **Wear.**

107, 245.

BURAKOWSKI, T., ve NAKONIECZNY, A., (1981) **Shot peening**. First International Conference on Shot peening. Eylül 14-18. Paris.

CALLISTER, W. D., (1991) **Materials Science and Engineering**. Wiley International Edition. 2. Baskı. USA.

CAMPBELL, L., (1979) **Mechanism and Theories of Fatigue**. American Society for Metals. Metals Park 44073. Ohio.

CZYRYCA, E. J., (1992) **ASM Handbook**, Mechanical Testing. 8, 4. Baskı. USA.

DIETER, E. D., (1986) **Mechanical Metallurgy**. 3. Baskı. USA.

DOBROMIRSKI, J., ve SMITH, I. O., (1987) Metallographic aspects of surface damage, surface temperature and crack initiation in fretting fatigue. **Wear**. 117, 347.

DOWLING, E. N., (1993) **Mechanical Behaviour of Materials**, Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue College of Engineering. Virginia Polytechnic Inst. and State University. Virginia.

ENDO, K., GOTO, H., ve NAKAMURA, T., (1969) The effects of frequency on fretting fatigue. Trans. **JSME**. 35, 498.

ENDO, K., ve GOTO, H., (1976) Initiation and propagation of fretting fatigue cracks. **Wear**. 38, 311.

ENDO, K., ve GOTO, H., (1978) Effects of environment on fretting fatigue. **Wear**. 48, 347.

- ENDO, K., ve GOTO, H., (1980) Fretting fatigue **JSLE**. Japan Society of Lubrication Engineers. 25, 3.
- ESİN, A., (1981) **Property of Materials for Mechanical Design**. Middle East Technical University. Gaziantep.
- FENG, M., ve RİGHMİRE, B. G., (1956) A experimental study of fretting. **Proc. Inst. Mech. Engineers**. 170, 1055.
- FIELD, J. E., ve WATERS, D.M., (1967) Fretting fatigue strength of en 26 steel, effect of mean stress, slip range and clamping condition. **NEL**. 275.
- FUCHS, H. O., (1976) Shot peening. **Mechanical Engineer's Handbook**. 22. Bölüm. J. Wiley Sons Inc. USA.
- FUCHS, H. O., (1981) **Shot peening**. First International Conference on Shot peening. Eylül 14-18. Paris.
- 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.
- GOEL, H. S., ve CHAND, S., (1994) A fatigue crack growth model for single overload tests. **Transactions of the ASME**. 116, 168-172.
- GOSS, G. L., ve HOEPPNER, D. W., (1974) Normal load effects in fretting fatigue of titanium and aluminium alloys. **Wear**. 27, 153.
- GOTO, H., ve ASHİDO, M., (1987) The influence of oxygen and water vapour on the Friction and wear of an aluminium alloy under fretting condition. **Wear**. 110, 141.

- HAMDY, M. M., ve WATERHOUSE, R. B., (1981) The fretting wear of Ti – 6Al – 4 V and aged inconel 718 at elevated temperatures. **Wear.** 71, 237.
- HOEPNER, D. E., ve GOSS, G. L., (1974) A fretting fatigue damage threshold concept. **Wear.** 27, 61.
- HOEPPNER, D. W., (1981) Environmental effects in fretting fatigue. **Fretting Fatigue.** Applied Science Publishers LTD. London.
- HOEPPNER, D. W., ve GOSS, G. L., (1971) Research on the mechanism of fretting fatigue, corrosion fatigue, chemistry, mechanics and microstructure. **NACE-2.** National of Association of Corrosion Engineers. 608.
- HORGER, O.J., (1953) Influence of fretting corrosion on the fatigue strength of fitted members. **ASTM.** STP-144. 40.
- HURRICKS, P. I., (1970) The mechanism of fretting - a review. **Wear.** 15, 389.
- İTO, S., (1959) Fretting wear of a bearing steel. **Trans. JSME.** 62, 410.
- KAYABA, I., ve IWABUCHI, A., (1979) The effects of slip amplitude on fretting wear. **Tech. Reports.** Tohoku University. 44, 603.
- KAYABA, T., ve IWABUCHI, A., (1979) The influence of hardness on fretting wear. **JSLE.** 24, 598.
- KAYALI, E. S., ve ÇİMENÖĞLU, H., (1991) **Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları.** İTÜ. Kimya - Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi. İstanbul.
- KENNEDY, P. J., PETERSON, M. B., ve STALLINGS, L., (1982) An evaluation of Fretting at small slip amplitudes. **ASTM.** STP - 780, 3.

- KENNEDY, P. J., STALLINGS, L., PETERSON, M. B., (1984) A study of surface damage at low amplitude slip. **ASLE. Trans.** 27, 305.
- KIKAI, N., ve RONBUNSHU, G., (1993) Effects of carbide size on fatigue properties of P/M high speed steel. **A Hen Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers.** 59, 2213.
- KOVALEVSKII, V. V., (1981) The mechanism of fretting fatigue in metals. **Wear.** 67, 271.
- LIEURADE, H. P., ve BIGNONNET, A., (1987) **Shot peening.** Third International Conference on Shot peening. Garmisch - Partenkirchen, Ed. H. Wohlfahrt. Kasım 12-16.
- LIU, H. W., CORTEN, H.T., ve SINCLAIR, G.H., (1957) Fretting fatigue strength of titanium alloy. RC 130B. Proc. **ASTM.** 57, 623.
- MEGUID, S. A., ve DUXBURY, J. K., (1981) **Shot peening.** First International Conference on Shot peening. Eylül 14 -17. Paris.
- MILLMAN, R. S., ve SLEIGHTHOLME, A., (1985) Sliding fretting wear of mild steel fins on stainless steel flats in CO₂ atmosphere. **Wear.** 106, 77.
- NAKONIECZNY, A., (1981) **Shot peening.** First International Conference on Shot peening. Eylül 14 -18. Paris.
- NISHIOKA, K., ve HIRAKAWA, K., (1968) Fundamental investigation of fretting fatigue Tran. **JSME.** 34, 1635.
- NISHIOKA, K., ve HIRAKAWA, K., (1968) Fundamental investigation of fretting fatigue. Trans. **JSME.** 24, 1183.

- NISHIOKA, K., ve HIRAKAWA, K., (1970) Fundamental investigation of fretting fatigue. Trans. **JSME**. 37, 1051.
- NOWELL, D., HILLS, D. A., ve O'CONNOR, J. J., (1987) An analysis of fretting fatigue. **Proc. Int. Conf. On Tribology**. Inst. Mechanical Engineers. 965.
- OHMAE, N., ve ISUKIZOE, I., (1974) The effect of slip amplitude on fretting. **Wear**. 27, 281.
- OVERS, M. P., ve WATEHAUSE, R. B., (1983) Fretting wear of two weldable Structural steels (HY 80 and 50 D) in seawater. Proc. Inter. Conf. Wear of Materials. **ASIME**. Newyork. 541.
- PEARSON, B. R., WATERHAUSE, R. B., (1984) The fretting of steels in seawater. **Proc. of Seminar. Tribology offshore** Inst. Mech. Engineers. London
- REED, F. E., ve BATTER, J. F., (1960) An experimental study of fretting and galling in dental couplings. **ASLE**. Trans. 2, 159.
- REED-HILL, R. E., ve ABBASCHIAN, R., (1994) **Physical Metallurgy Principles**. 3. Baskı. USA.
- REED-HILL, R. E., ve ABBASCHIAN, R., (1994) **Physical Metallurgy Principles**. 3. Baskı, PWS Publishing Company, Boston.
- REEVES, R. K., ve HOEPNER, D. W., (1978) Microstructural and environmental Effects on fretting fatigue. **Wear**. 47, 221.
- REEVES, R. K., ve HOEPPNER, D. W., (1987) Scanning electron microscope analysis of fretting fatigue damage. **Wear**. 48, 87.

RENZHI, W., XIANGBIN, L., YOUGGUI, T., ve MINGGAO, Y., (1981) **Shot** Conference on Shot peening. Garmisch -Partenkirchen, Ed. H. Wohlfahrt. Kasım 12 -16.

SAMUELS, L. E., (1993) **Metals Engineering, A Technical Guide.** ASM International. Metals Park. 3. Baskı. Ohio.

SARITAŞ, S., (1995) **Engineering Metallurgy and Materials.** Gazi Üniversitesi. Yayın no: 22. Ankara

SARITAŞ, S., PROCTER, R. P. M., ve GRANT, W. A., (1989) Effect of ion Implantation on fatigue, fretting and fretting corrosion of Ti – 6Al – 4V. **Materials Science and Engineering.** A115, 307-314.

SARITAŞ, S., ve VAROL, R., (1997) **Bilyalı dövme işlemlerin demir esaslı T/M Parçaların yorulma özellikleri üzerine etkisinin araştırılması.** Sinter Metal İmalat Sanayi A.Ş. için hazırlanan rapor.

SATO, J., SHIMA, M., ve SUGAWARA, T., (1985) A fundamental study of fretting Damage to glass using an improved apparatus. **Wear.** 106, 53.

SATO, J., SHİMA, M., IGARASHI, J., TANAKA, M., ve WATERHAUSE, R. B., (1981) Studies on fretting. 1. Bölüm, **JSLE.** 26, 207.

SATO, K., FUJI, H., ve KODAMA, S., (1986) Crack propagation behaviour in fretting fatigue. **Wear.** 107, 245.

SATO, K., FUJI, H., ve KODAMA, S., (1986) Crack propagation behaviour in fretting fatigue. **Wear.** 107, 245.

SENGUPTA, A., PUTATUNDA, S. K., ve BALOGH, M., (1994) Fatigue crack

Growth behavior of a new single crystal nickel-based superalloy (CMSX-4) At 650 C. **Journal of Materials Engineering and Performance.** 3, 540 - 550.

SODA, N., ve AOKI, A., (1959) Fretting corrosion. **Trans. JSME.** 25, 995.

SODEBERG, S., BRYGGMAN, U., ve MC CULLOUGH, I., (1986) Frequency effects In fretting wear. **Wear.** 110, 19.

SODERBERG, S., COLVIN, T., SALAMA, K., ve VINGSBO, O., (1986) Ultrasonic Fretting wear of a plain carbon steel. **Journal of Engineering Materials and Technology.** 108, 153.

SPROLES, E. S., ve DUQUETTE, D. J., (1978) The mechanism of material removal in fretting. **Wear.** 49, 339.

STEPHENS, R. R., STEPHENS, R. I., VEIT, A. L., ve ALBERTSON, T. P., (1997). Fatigue crack growth of β -21S titanium alloy under constant amplitude and miniTWIST flight spectra at 25 C and 175 C. **Journal of Engineering and Technology.** 119, 387-391.

STOTT, F. H., LIN, D. S., ve WOOD, G. C., (1973) The structure and mechanism of formation of the glaze oxide layers produced on nickel based alloys during wear at high temperature. **Corrosion Science.** 13, 449.

STOWERS, I. F., ve RABINOWICZ, E., (1973) The mechanism of fretting wear. **Trans. ASME. J. Lubrication Technology.** 65

SUH, N. P., (1973) The delamination theory of wear. **Wear.** 25, 111.

SYRETT, B. C., ve WING, S. C., (1978) An electrochemical investigation of fretting corrosion of surgical implant materials. **Corrosion.** 34, 379.

- TOMOHISA, N., YOSHİHARU, M., ve NOBUHIRO, T., (1993) Effect of carbide size fatigue properties of P/M high speed steel. **Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers**. Bölüm A, 59, 2213 -2219.
- TROSHCHENKO, V. T., TSYBANEV, G. V., ve KHOTSYANOVSKII, A. O., (1989) **Life of steels in fretting fatigue**. Plenum Publishing Corporation. Academy of Sciences of the Ukrainian, Kiev.
- VAROL, R., ve MERİÇ, C., (1993) Bilyalı dövme teori ve uygulaması. **Makine ve Mühendis**. Cilt 34, sayı 405.
- WANG, R., LI, X., ve WU, H., (1987) **Shot peening**. Third International Conference On Shot peening. Garmisch -Partenkirchen, Ed. H. Wohlfahrt. Kasım 12-16.
- WAS, G. S., ve PELLAUX, R. M., (1979) The effect of shot peening on the fatigue behaviour of alloy 7075 - T6. **Metallurgical Transactions A**, 10A.
- WATERHOUSE, R. B., ve TAYLOR, D. E., (1970) The relative effects of fretting and Corrosion on the fatigue strength of a eutectoid steel. **Wear**. 15, 449.
- WATERHOUSE, R. B., (1955) Fretting corrosion. **Proc. Inst. Mech. Engineers**. 169, 1157.
- WATERHOUSE, R. B., (1965) An assesment of the fretting fatigue damage produced On mild steel by certain nonferrous metals and alloys. **Proc. Inst. Mech. Engrs**. 179, 258.
- WATERHOUSE, R. B., (1965) Corrosion fatigue. **Corrosion**. 2. Baskı. Butterworth, London.
- WATERHOUSE, R. B., (1972) **Fretting Corrosion**. Pergamon Press. Oxford.

WATERHAUSE, R. B., (1981) Theories of fretting. **Fretting Fatigue**. Applied Science Pub. LTD . Ripple Road, Barking, Essex.

WATERHAUSE, R. B., (1984) Fretting wear. **Wear**. 100, 107.

WATERHAUSE, R. B., ve SAUNDERS, D. A., (1979) Fretting fatigue. **Wear**. 53, 381.

WATERHAUSE, R. B., ve TAYLOR, D. E., (1971) The initiation of fatigue cracks in a % 0,7 carbon steel by fretting. **Wear**. 17, 139.

WATERHAUSE, R. B., ve TAYLOR, D. E., (1974) Fretting debris and the delamination theory of wear. **wear**. 29, 337.

WATERHAUSE, R. B., ve TROWSDALE, A. J., (1992) Residual stress and surface Roughness in fretting fatigue. **Journal of Physics D: Applied Physics**. 25, 236 -239.

WATERHAUSE, R.B., (1977) The role of adhesion and delamination in the fretting wear of metallic materials. **Wear**. 45, 355.

WHARTON, M. H., TAYLOR, D. E., ve WATERHAUSE, R. B., (1973) Metallurgical Factors in the fretting fatigue behaviour of 70/30 brass and 0,7 % carbon steel. **Wear**. 23, 251.

WHARTON, M. H., ve WATERHAUSE, R. B., (1980) Environmental effects in the Fretting fatigue of Ti – 6Al – 4V **Wear**. 62, 287.

ZHANG, X., ZHANG, C., ve ZHU, C., (1989) Slip amplitude effects and microstructural characteristics of surface layers in fretting wear of carbon steel. **Wear**. 134, 297-309.