

**T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI ÇELİKLERİN YORULMA AŞINMASINDA
MALZEME SERTLİĞİNİN AŞINMA ÜZERİNE ETKİSİ**

**Makine Mühendisi
Ayhan DEMİR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği A.B.D.**

Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Cenk MISIRLI

**2012
EDİRNE**

T. C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI ÇELİKLERİN YORULMA AŞINMASINDA
MALZEME SERTLİĞİNİN AŞINMA ÜZERİNE ETKİSİ

Ayhan DEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Yrd. Doç. Dr. Cenk MISIRLI

EDİRNE 2012

**FARKLI ÇELİKLERİN YORULMA AŞINMASINDA
MALZEME SERTLİĞİNİN AŞINMA ÜZERİNE ETKİSİ**

Ayhan DEMİR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

2012

**TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Kabul ve onay sayfası

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Mustafa ÖZCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans/Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Taner TIMARCI
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tez tarafımca (tarafımızca) okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans/ Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Cenk MISIRLI
Tez Danışmanı

Bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makina Mühendisliği Anabilim Dalında bir Yüksek lisans/ Doktora tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Prof. Dr. Mümin ŞAHİN

.....

Yrd. Doç. Dr. Cenk MISIRLI

.....

Yrd. Doç. Dr. İlhan UMUT

.....

Tarih: 25/12/2012

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

İlgili tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını beyan ederim.

25/12/2012
Ayhan DEMİR

Yüksek Lisans Tezi
Farklı Çeliklerin Yorulma Aşınmasında
Malzeme Sertliğinin Aşınma Üzerine Etkisi
T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada, sertleştirilmeye tabi tutularak farklı sertlik değerleri elde edilmiş AISI 4140 çelik malzemesinin yorulma dayanımına etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan numuneler 40, 46 ve 52 HRC sertlik değerine getirilerek deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda tornalanmış, 40, 46 ve 52 HRC sertleştiriliş numunelerin yorulma dayanımları sırası ile 455, 760, 778 ve 728 MPa olarak bulunmuştur. 46 HRC sertleştirilmiş numunede yorulma dayanımı en iyi çıkmıştır. Ayrıca bu araştırmada, AISI 1045 çeliğinin yorulma davranışı üzerinde indüksiyonla sertleştirmenin etkisi incelenmiştir. Sonuçlar indüksiyonla sertleştirilmiş AISI 1045 çeliğinin yorulma davranışlarında, işlemsizlerle karşılaştırıldığında, % 30 civarında iyileşme sağlandığını işaret etmektedir.

Yıl : 2012

Sayfa Sayısı : 110

Anahtar Kelimeler : Sürtünme, Aşınma, Sertlik, Yorulma, Çelikler.

Master Thesis
Effect Of The Material Hardness
on Fatigue Wear Of The Different Steels
Trakya University Institute of Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

In this work, an AISI 4140 steel material having different hardness been examined due to the effect of fatigue. The sample materials used in the work first had been brought to 40, 46 and 52 HRC hardness grades and then the experiments were carried out. At the end of the experiments, the fatigue strenghts of the materials which were turned and quenched to the HRC 40, 46 and 52 grades have been found to be 455, 760, 778 and 728 MPa respectively. Fatigue strength has been found to be the best in 46 HRC quenched specment. Also in the present investigation is designed to assess the affect of the induction hardening treatment on the fatigue behaviour of AISI 1045 steel. The results showed that the fatigue behaviours of induction hardened AISI 1045 steel were improved around 30% compared to untreated.

Year : 2012

Number of Pages : 110

Keywords : Friction, Wear, Hardness, Fatigue, Steels.

ÖNSÖZ

Yorulma ve aşınma, madencilik, tarım ve makine gibi birçok endüstriyel sektördeki makine elemanlarının ve mühendislik malzemelerinin ömrünü önemli ölçüde azaltarak, iş, zaman, para ve malzeme kayıplarına sebep olmaktadır. Aşınma, malzemenin kendisine ait bir özellik olmayıp, mühendislik sisteminin bir özelliğidir. Bunun için, her çalışma ortamında yüksek aşınma direnci gösterecek bir malzeme üretmek hem zordur hem de maliyetlidir. Bu probleme getirilebilecek en iyi çözüm ise; çalışma şartlarına uygun malzeme seçimi, sertlik ve mikro yapı optimizasyonudur.

Yorulma ve aşınma direncini etkileyen birçok kıstas bilim adamları tarafından deneysel çalışmalar neticesinde ortaya konulmuştur. Aşınma direncini olumlu yönde etkileyen kıstasların başında malzeme sertliği ve mikro yapı gelmektedir. Sertliği etkili bir şekilde arttırmanın yolu ise, malzemenin karbon oranını arttırmak ve uygun alaşım elementlerinin ilavesi olabilir. Ayrıca aynı mekanik özellikleri gösteren iki malzemenin farklı mikroyapıya sahip olmalarından dolayı farklı aşınma davranışı gösterdikleri belirlenmiştir.

Netice olarak; teknik ve ekonomik olarak, yorulma ve aşınmayı minimum düzeye indirebilmek için, malzeme çalışma ortamı ve mikro yapı analizinin ardından uygun şartlar altında test edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, sertleştirilmeye tabi tutularak farklı sertlik değerleri elde edilmiş AISI 4140 çelik malzemesinin yorulma dayanımına etkisi incelenmiştir. Ayrıca AISI 1045 çeliğinin yorulma davranışı üzerinde indüksiyonla sertleştirmenin etkisi incelenmiştir. Araştırmalar esnasında yapılan deneyler için gerekli malzemelerin satın alınması, ısıtma işlemi fırının yenilenmesi, indüksiyon yüzey sertleştirmesinin yapılması ve analiz işlemleri gibi önem arz eden tüm gereksinimler Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi Fonu tarafından desteklenen 2011 / 153 numaralı projeden karşılanmıştır.

Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde bana yol gösteren, bu alanda çalışmam için beni teşvik eden ve desteğini esirgemeyen çok değerli danışmanım Yrd. Doç. Dr. Cenk MISIRLI'ya, eleştiri ve yön gösterimleriyle çalışmalarıma katkıda bulunan Makina Mühendisliği Bölümü Öğretim Elemanlarına ve her koşulda bana destek veren sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER.....	xi
SİMGELER DİZİNİ	xvii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xix
TABLolar LİSTESİ.....	xxi
BÖLÜM 1. ÇELİKLER.....	1
1.1. Çeliklerin Genel Tanımı	1
1.2. Çeliklerin Kullanım Yerlerine Göre Sınıflandırılması	1
1.2.1. Takım çelikleri.....	2
1.2.1.1. Soğuk iş takım çelikleri.....	2
1.2.1.2. Sıcak iş takım çelikleri	2
1.2.1.3. Yüksek hız takım çelikleri.....	3
1.2.1.4. Plastik kalıp çelikleri.....	3
1.2.2. Otomat çelikleri	3
1.2.3. Yay çelikleri	3
1.2.4. İmalat çelikleri	4
1.2.5. Sementasyon çelikleri	4
1.2.6. Islah çelikleri	4
1.2.7. Paslanmaz çelikler	5
1.2.7.1. Ostenitik paslanmaz çelikler.....	6

1.2.7.2. Ferritik paslanmaz çelikler	9
1.2.7.3. Çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler.....	11
1.2.7.4. Martenzitik paslanmaz çelikler.....	12
1.2.7.5 Çökelme yoluyla sertleşebilen (yaşlandırılabilen) paslanmaz çelikler	14
1.2.7.6. Paslanmaz çeliklerin aşınma davranışları.....	15
1.3. Alaşım Elementlerinin, Çeliklerin Yapı ve Özelliklerine Etkisi.....	17
1.3.1. Karbon etkisi.....	18
1.3.2. Mangan etkisi.....	18
1.3.3. Silisyum etkisi	19
1.3.4. Fosfor etkisi	19
1.3.5. Kükürt etkisi	20
1.3.6. Krom etkisi	20
1.3.7. Nikel etkisi.....	21
1.3.8. Molibden etkisi	21
1.3.9. Vanadyum etkisi	21
1.3.10. Volfram etkisi	21
1.3.11. Azot etkisi.....	21
1.3.12. Alüminyum etkisi.....	22
1.3.13. Fosforun etkisi	22
1.3.14. Hidrojenin etkisi.....	22
1.3.15. Oksijenin etkisi	22
1.3.16. Alaşım elementlerinin, ferrite etkisi.....	22
1.3.17. Alaşım elementlerinin karbürlere etkisi	23
1.4. Çelikte Sertleşebilirlik	24
1.4.1. Islah işlemi.....	24
1.4.2. Yüzey Sertleştirme İşlemleri	25
1.4.2.1. Alevle ve indüksiyonla sertleştirme.....	25
1.4.2.2. Lazer ile sertleştirilme	27
1.4.2.3. Karbonlama (sementasyon)	27
1.4.2.4. Nitrürleme.....	29
1.4.2.5. Siyanürleme ve karbonitrürleme.....	30

1.4.2.6. Plazma difüzyonu ile yüzey kaplama.....	31
1.4.2.7. Plazma püskürtülmesi ile yüzey kaplama.....	31
1.4.2.8. İyon implantasyonu ile yüzey kaplama.....	31
1.4.2.9. Kimyasal buhar yığılma (cvd) ile yüzey kaplama	32
1.4.2.10. Fiziksel buhar yığılma (pvd) ile yüzey kaplama.....	32
1.5. Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması	33
1.5.1. Düşük (% 0,10 – 0,25) karbonlu çelikler	33
1.5.2. Orta (% 0,25 – 0,55) karbonlu çelikler	34
1.5.3. Yüksek (% 0,55 – 1,00) karbonlu çelikler.....	34
BÖLÜM 2. SÜRTÜNME ve AŞINMA.....	36
2.1. Sürtünme.....	36
2.1.1. Kayma sürtünmesi	38
2.1.2. Yuvarlanma sürtünmesi.....	39
2.2. Sürtünme Mekanizmaları.....	40
2.2.1. Kuru sürtünme	40
2.2.2. Sınır (yarı sıvı) sürtünme.....	40
2.2.3. Sıvı (film) sürtünme	41
2.3. Sürtünme Katsayısı Değerleri).....	42
2.4. Aşınma	42
2.5. Aşınmanın Temel Unsurları.....	44
2.5.1. Ana malzeme (aşınan).....	44
2.5.2. Karşı malzeme (aşındıran).....	44
2.5.3. Ara malzeme.....	45
2.5.4. Yük.....	45
2.5.5. İzafe Hareket	45
2.6. Aşınmayı Etkileyen Faktörler	46
2.6.1. Malzeme seçimi	46

2.6.2. Sürtünme	46
2.6.3. Yüzeye uygulanan yük	46
2.6.4. Sürtünme mesafesi	47
2.6.5. Yüzey sertliği	47
2.6.6. Yüzey pürüzlülüğü	47
2.6.7. Yağlama.....	47
2.7. Aşınma Mekanizmaları.....	48
2.7.1. Oluşum mekanizmalarına göre aşınma mekanizmaları	48
2.7.1.1. Adhesiv aşınma (yapışma aşınması)	48
2.7.1.1.a. Adhesiv Aşınma Aparatı Modeli ve Hesabı	51
2.7.1.2. Abrasiv aşınma (mikro kesilme, şekil değiştirme aşınması)	53
2.7.1.2.a. Abrasiv aşınma aparatı modeli ve hesabı	57
2.7.1.3. Tabaka Aşınması.....	59
2.7.1.4. Yorulma (titreşim) aşınması	59
2.7.1.4.a. Yorulma aşınması aparatı modeli ve hesabı	61
2.7.2. Hasarın fiziksel görünüşüne göre aşınma mekanizmaları.....	63
2.7.2.1. Kayma aşınması	63
2.7.2.1.a. Taneli mineraller tarafından oluşturulanlar	63
2.7.2.1.b. Metal-metal aşınması	63
2.7.2.2. Koroziyon aşınma (korozyon aşınması)	63
2.7.2.2.a. Koroziyon aşınma aparatı modeli ve hesabı.....	66
2.7.2.3. Eroziyon aşınma (erozyon veya tribo oksidasyon aşınması)	67
2.7.2.3.a. Katı partikül erozyonu	68
2.7.2.3.b. Sıvı su damlası erozyonu	69
2.7.2.3.c. Katı partikül taşıyan akışkan ortam erozyonu.....	69
2.7.2.3.d. Kaviteleme erozyonu	69
2.7.2.3.e. Elektro erozyon	69
2.7.2.4. Yuvarlanma Aşınması	70
2.7.3. Aşınmanın aldığı özel adlara göre aşınmalar	70
2.7.3.1. Ögütme aşınma	70
2.7.3.2. Oymalı aşınma	71
2.7.3.3. Kazımalı aşınma.....	71

2.8. Aşınmaya Dirençli Malzemeler	72
2.8.1. Aşınmaya dirençli martensitik, perlitik ve ostenitik çelikler.....	72
BÖLÜM 3. AŞINMA DENEYLERİ ve ÖLÇÜM METODLARI.....	74
3.1. Model Deney Yöntemleri	74
3.2. Aşınma Deney Cihazları.....	76
3.2.1. Pim - disk cihazı	76
3.2.2. Levha - kayış cihazı	76
3.2.3. Dört bilya düzeneği.....	77
3.3. Aşınma Ölçüm Metodları	78
3.3.1. Ağırlık farkı metodu.....	78
3.3.2. Kalınlık farkı metodu	79
3.3.3. İz değişim metodu.....	80
3.3.4. Radyoizotop metodu	80
BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	81
4.1. Giriş	81
4.2. AISI 4140 Çeliğinin Sertlik-Yorulma Dayanımı İlişkisi.....	81
4.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması	81
4.2.2. Deney cihazları	85
4.2.3. Deneyin yapılışı	86
4.2.4. Deney sonuçlarının değerlendirmesi.....	86
4.3. AISI 1045 Çeliğinin Yorulma Dayanımının İncelenmesi	92
4.3.1. Deney numunelerinin hazırlanması	92
4.3.2. Deney cihazları	95
4.3.3. Deneyin yapılışı	95
4.3.4. Deney sonuçlarının değerlendirmesi.....	96
BÖLÜM 5. SONUÇLAR	100

KAYNAKLAR.....	101
ÖZGEÇMİŞ.....	110

SİMGELER DİZİNİ

A	Arrhenius sabiti
A_r	Gerçek temas alanı
°C	Santigrad derece
d	Malzeme yoğunluğu
D	Silindir veya kürenin çapı
D_p	Nüfuziyet etki derecesi
F_r	Yuvarlanma sırasındaki sürtünme direnci
F_s	Kaymayı başlatan kuvvet
F_n	Temas yüzeyine etki eden normal kuvvet
Fr	Yuvarlanmadaki sürtünme direnci
H	Sertlik
k	Malzeme ve yüzey şartlarına bağlı sabit
L	Kayma mesafesi
m	Metre
mm	Milimetre
μ_s	Statik sürtünme katsayısı
μ_k	Kinetik sürtünme katsayısı
N	Uygulanan yük
Q	Aktivasyon enerjisi
R_g	Gaz sabiti
S	Malzemenin kesme gerilmesi
S	Aşınma yolu
T	Reaksiyon sıcaklığı
W_a	Aşınma oranı
W	Yük
V	Aşınma şiddeti
v	Kayma hızı

Kısaltmalar Dizini

Al	Alüminyum
ASTM	American society for testing and materials
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
C	Karbon
Cr	Krom
CVD	Kimyasal yolla buhar biriktirme
DIN	Uluslararası alman standardı
Fe	Demir
HMK	Hacim merkezli kübik yapı
Mo	Molibden
PACVD	Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme
PVD	Fiziksel yolla buhar biriktirme
RSD-C	Rockwell C sertlik değeri
Ti	Titanyum
V	Vanadyum
W	Wolfram
YMK	Yüzey merkezli kübik yapı

ŞEKİLLER LİSTESİ

ŞEKİL 1.1. Ostenitik paslanmaz çeliğin metalografik yapısı	9
ŞEKİL 1.2 Ferritik paslanmaz çeliğin iç yapısı.....	11
ŞEKİL 1.3. Martenzitik paslanmaz çeliğin iç yapısı	14
ŞEKİL 1.4. Ferit içinde çözünen elementlerin çeliğin sertliğine etkisi	23
ŞEKİL 2.1. Tribolojik sistemlerin kinematikleri.....	36
ŞEKİL 2.2. Statik ve dinamik sürtünme esnasında cisme etki eden kuvvetler	38
ŞEKİL 2.3. Kuru, sıvı ve yarı sıvı sürtünmeleri.....	41
ŞEKİL 2.4. DIN 50320 normuna göre tribolojik sistem.....	44
ŞEKİL 2.5. Aşınmanın anahtar kelimeleri ve temas tiplerinin tanımlamaları	48
ŞEKİL 2.6. Adhesiv aşınma	49
ŞEKİL 2.7. Adhesiv aşınma mekanizmasının oluşumu.....	49
ŞEKİL 2.8. Adhesiv aşınmada aşınma bölgeleri.....	50
ŞEKİL 2.9. Adhesiv Aşınma Aparatı Modeli	51
ŞEKİL 2.10. Abrasiv aşınma.....	53
ŞEKİL 2.11. Abrasiv aşınma mekanizmaları: mikro kesilme, kırılma, yorulma	53
ŞEKİL 2.12. Üç elemanlı Abrasiv aşınma	54
ŞEKİL 2.13. Abrasiv aşınma mekanizmaları	55
ŞEKİL 2.14. Saf metallerin, abrasiv aşınma dirençleri üzerine, sertliğin etkisi	56
ŞEKİL 2.15. Abrasiv aşınma aparatı modeli.....	57
ŞEKİL 2.16. Konik bir çentme ile abrasiv aşınmanın modeli.....	57
ŞEKİL 2.17. Yorulma aşınması.....	60
ŞEKİL 2.18. Yorulma aşınmasında malzeme yüzeyinde oluşan gerilmeler.....	60
ŞEKİL 2.19. Yorulma Aşınma Aparatı Modeli.....	61
ŞEKİL 2.20. Koroziyon aşınma	64
ŞEKİL 2.21. Koroziyon aşınma	65
ŞEKİL 2.22. Korozyon aşınma aparatı modeli	66
ŞEKİL 2.23. Tribo oksidasyon aşınması.....	68
ŞEKİL 2.24. Aşındırıcı çarpma hızının erezyona etkisi	68

ŞEKİL 2.25. Öğütmeli aşınmanın şematik gösterimi	71
ŞEKİL 2.26. Kazımalı aşınma.....	72
ŞEKİL 3.1. Model deney sistemleri.....	75
ŞEKİL 3.2. Pim - disk cihazının şematik görünümü	76
ŞEKİL 3.3. Levha - kayış cihazının şematik görünümü	77
ŞEKİL 3.4. Dört bilya test düzeneği.....	78
ŞEKİL 4.1. AISI 4140 çeliğinin çekme numunesi haline getirildiği torna tezgahı.....	82
ŞEKİL 4.2. Çekme numunesi haline getirilen AISI 4140 çeliğinin boyutları	83
ŞEKİL 4.3. Sertleştirme işleminin yapıldığı ısıtma fırını.....	84
ŞEKİL 4.4. Yorulma deneylerinin yapıldığı INSTRON 8501 dinamik test cihazı.....	87
ŞEKİL 4.5. AISI 4140 tornalanmış-sertleştirilmemiş numunesinin S-N grafiği	88
ŞEKİL 4.6. AISI 4140 çeliği numunesinin 40 HRC sertlik değerindeki S-N grafiği	89
ŞEKİL 4.7. AISI 4140 çeliği numunesinin 46 HRC sertlik değerindeki S-N grafiği	90
ŞEKİL 4.8. AISI 4140 çeliği numunesinin 52 HRC sertlik değerindeki S-N grafiği	91
ŞEKİL 4.9. AISI 1045 çeliğinin çekme numunesi haline getirildiği torna tezgahı.....	92
ŞEKİL 4.10. Çekme numunesi haline getirilen AISI 1045 çeliğinin boyutları	93
ŞEKİL 4.11. İndüksiyonla yüzey sertleştirme cihazı.....	94
ŞEKİL 4.12. İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi test cihazı uygulama örneği.....	94
ŞEKİL 4.13. Yorulma deneylerinin yapıldığı INSTRON 8501 dinamik test cihazı.....	95
ŞEKİL 4.14. AISI 1045 çeliğinin yüzey mesafesi ile sertlik arasındaki ilişki.....	96
ŞEKİL 4.15. İndüksiyonla sertleştirilmemiş AISI 1045 çeliğinin S-N grafiği	97
ŞEKİL 4.16. İndüksiyonla sertleştirilmiş AISI 1045 çeliği için S-N grafiği	98

TABLÖLAR LİSTESİ

TABLO 1.1. Ostenitik paslanmaz çeliklerin bileşimi (%)	8
TABLO 1.2 Ferritik paslanmaz çeliklerin bileşimleri (%).....	10
TABLO 1.3 Dupleks paslanmaz çeliklerin bileşimi (%)	12
TABLO 1.4. Martenzitik paslanmaz çeliklerin bileşimleri (%)	13
TABLO 1.5. Çelikler ve uygulandığı yerler.....	16
TABLO 1.5. Çelikler ve uygulandığı yerler (devam).....	17
TABLO 2.1. Malzeme özelliklerinin adhesiv aşınmaya etkisi.....	51
TABLO 4.1. AISI 4140 çeliğinin kimyasal kompanzasyonu (ağırlıkça %)	82
TABLO 4.2. Su verilmiş ve temperlenmiş AISI 4140 çeliğinin mekanik özellikleri.....	83
TABLO 4.3. Deneylerde kullanılan numune grupları	84
TABLO 4.4. Isıl işlem değerleri	85
TABLO 4.5. Yorulma deneyinde elde edilen neticeler.....	87
TABLO 4.6. AISI 1045 çeliğinin kimyasal kompanzasyonu (ağırlıkça %)	92
TABLO 4.7. İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi işlem parametreleri.....	95
TABLO 4.8. Yorulma deneyleri neticesinde elde edilen yorulma limitleri.....	99

BÖLÜM 1

ÇELİKLER

1.1. Çeliklerin Genel Tanımı

Çelik, egemen elementleri karbon ve demir olan alaşımdır. Karbon miktarı % 1,5 oranına kadardır. Eğer karbon çeliğinden bahsediliyorsa, yapısındaki karbon yüzdesine; alaşımlı çelikten bahsediliyorsa, başlıca alaşım elementlerinin yüzdesine göre tasnif edilir [1].

Karbon miktarı % 0,6 – 1,2 arasında olan çelikler alaşımsız takım çeliği, % 0,6' dan az karbonlu çelikler yapı çelikleri olarak tanımlanır. Yapı çeliklerinde % 0,04 – 0,6 karbon miktarları ile yüksek dayanıklılık, yüksek süneklik ya da iyi şekillendirilebilme amaçlanır. Çok az karbon içeren çelikler yumuşak çelik olarak adlandırılır ve özellikle elektronikte önemli oranda kullanılırlar [2].

1.2. Çeliklerin Kullanım Yerlerine Göre Sınıflandırılması

Tanım ve kullanımda kolaylık sağlama amacıyla çelikler; üretim metotlarına göre, kimyasal bileşimlerine göre ve kullanım yerlerine göre farklı şekillerde sınıflandırılmışlardır [3].

Çelikler kullanım yerlerine göre şu şekilde sınıflandırılırlar:

- Takım çelikleri.
- Otomat çelikleri.
- Yay çelikleri.
- İmalat çelikleri.

- Sementasyon elikleri.
- Paslanmaz elikler.
- Islah elikleri.

1.2.1. Takım elikleri

Metal ve metal dışı malzemelerin çeşitli yöntemlerle şekillendirilmesi veya doğrudan kullanım amacıyla şekil verilmesi işleminin ana malzemesi büyük oranda takım elikleridir. şekillendirme ya da form verme maksadıyla kullanılan takım gruplarından, kullanım amacı ve koşullarına bağlı olarak; yüksek aşınma direnci, yüksek çekme dayanımı, yüksek akma dayanımı, yeterli süneklik, yüksek darbe dayanımı, yüksek sertlik ve tokluk özelliği gibi birçok fiziksel ve mekanik özellikler beklenir.

Takım elikleri; soğuk iş takım çelikleri, sıcak iş takım çelikleri, yüksek hız takım çelikleri ve plastik kalıp çelikleri olmak üzere dört grupta sınıflandırılır.

1.2.1.1. Soğuk iş takım elikleri

Oda sıcaklığında çalışan kalıp ve takımlarda, yüksek sıcaklıklara dayanım gerekmediğinden, çok iyi aşınma dayanımı ve tokluğu sağlayacak şekilde alaşımlandırılır. Piyasadaki kesme, bükme kalıpları, bıçaklar, baskı makaraları, zimbalar, pres takımları, soğuk ekstrüzyon takımları vb. soğuk iş takım çeliklerinden üretilir.

1.2.1.2. Sıcak iş takım elikleri

Oda sıcaklığında şekillendirilemeyen demir, elik ve diğer metallerin ısıtılarak şekillendirilmesi için kullanılır. Sıcak iş takım çeliklerinde; yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerini koruyabilmesi, yüksek sıcaklıkta aşınma dayanımlarının yüksek olması ve ısı iletkenliklerinin yüksek olması gibi özellikler aranır. Enjeksiyon döküm kalıpları, ekstrüzyon kalıpları, dövme kalıpları, kalıp ve boru presleri ve aksamaları, delici zimbalar ve kalıpları vb. sıcak iş takım çeliklerinden yapılır.

1.2.1.3. Yüksek hız takım çelikleri

İyi sertleşebilirliğe sahip oldukları için, bunlardan yapılan takımlar tuz banyosunda ya da hava bile sertleşebilirler. Yüksek hız çeliklerinin en genel uygulama alanı talaş kaldırma takımlarıdır. Yüksek sıcaklıklarda göstermiş oldukları yüksek mukavemetlerinden dolayı, yüksek hız çelikleri, sıcak iş takım çelikleri olarak kullanılırlar.

1.2.1.4. Plastik kalıp çelikleri

İmalat ve kalıp sektörünün kayda değer kullanım alanına sahip çelik grubudur. Her türlü plastik bazlı malzemelerin çeşitli yöntemlerle şekillendirilmesi bu grup çeliklerle gerçekleştirilmektedir. Plastik kalıp çelikleri, kullanılan plastik hammaddenin cinsine göre aşınmaya, basınca ve korozyona maruz kalırlar [2].

1.2.2. Otomat çelikleri

Otomat çeliği imalatında genellikle küçük parçalar üretildiğinden dolayı daha çok, karbon miktarı yaklaşık % 0,10 – 0,60 arasında olan alaşımsız sementasyon ve ıslah çelikleri kullanılır ve talaşlı işlenebilirliği için normal çeliklere nazaran daha fazla kükürt ve mangan katılır. Bunlar otomat çeliği olarak tanımlanırlar. Kükürt ve mangan birlikte mangan sülfürü oluşturur ve metalik yapıda kırılmalık sağlayarak, kısa kırılmalık talaş meydana getirir [4].

1.2.3. Yay çelikleri

Yayların çok büyük bir kısmı yay çeliklerinden meydana gelmektedir. Yay çelikleri, daha çok çelik çubuk, tel ya da bant olarak temin edilebilir ve yay formu ve ölçülerine göre sıcak ya da soğuk olarak yay form verilir [4].

Yay çelikleri elastiki, sürekli titreşime dayanıklı ve yüksek dayanıma sahiptirler. Genel olarak makinelerde ve taşıt yapımında kullanılırlar [5].

1.2.4. İmalat çelikleri

Karbonlu çelikler olarak da tanımlanan imalat çeliklerinin içerisinde % 1,7' ye kadar karbon bulunur. Karbon oranındaki her değişim, çeliğin özelliklerinin de değişimi anlamına gelir [3].

Yapı çeliği, çelik döküm ve bazı takım çelikleri, düşük karbonlu çeliklere örnek olarak verilebilir. Bu çeliklere genellikle sıcak haddeleme, normalizasyon, presleme ve gerilme giderme tavlama veya soğuk çekme işlemleri uygulanmıştır. Orta karbonlu çelikler, talaş kaldırma işlemi gerektiren iş parçaları için uygundur. Kabuk sertleştirme, toklaştırma veya temperleme ile sertleştirme işlemleri bu çeliklere uygulanabilecek işlemlerdir. Sertleştirilebilen takım çelikleri, yüksek karbonlu çeliklerdir [6].

1.2.5. Sementasyon çelikleri

Sementasyon çelikleri, yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı, çekirdekte ise daha yumuşak ve tok özellik istenen, değişken ve darbeli zorlamalara dayanıklı parçaların imalatında kullanılan, düşük karbonlu, alaşımsız ve alaşımlı olarak çeşitlendirilen çeliklerdir.

Parçaya bu özelliklerin kazandırılması, çelik yüzeyine, belli derinliklere kadar karbon emdirilmesi suretiyle olur. Sementasyon çelikleri; dişliler, miller, dişli miller, zincir dişliler, kılavuz yatakları, merdaneler vb. parçaların imalatında etkin olarak kullanılırlar [2].

1.2.6. İslah çelikleri

Genel olarak ıslah çeliklerinden, yüksek dayanım ve süneklik birlikte istenir ve sertleştirildikten sonra yüksek sıcaklıkta menevişlenirler. Nispeten yüksek karbon oranlarına sahiptirler. Kükürt miktarı belirli sınırlar arasında değişen, alaşımsız ve alaşımlı ıslah çelikleri de geliştirilmiştir. Kalın kesitlerde, yeterli sertleştirme derinliği ancak alaşımlı çeliklerde sağlanabilir ve çok yönlü olarak kullanılabilirler. İslah

Çelikleri; alaşımsız ıslah çelikleri, mangan alaşımlı ıslah çelikleri, krom alaşımlı ıslah çelikleri, krom-molibden alaşımlı ıslah çelikleri seklinde sınıflandırılabilir.

Ayrıca bu çelikler, sertleştirilebilirlik derecelerine göre düşük, orta ve yüksek sertleşebilir olarak gruplandırılır. Islah elikleri, ıslah işlemi sonunda kazandıkları üstün mekanik özelliklerinden dolayı çeşitli makine ve motor parçaları, dövme parçaları, çeşitli miller, muhtelif yaylar ve yay özelliği beklenen aksamalar, dişli miller ve akslar, kumanda ve tahrik parçalarında kullanılırlar [2].

1.2.7. Paslanmaz elikler

Paslanmaz elik, yüksek alaşımlı çeliklerin bir bölümüne verilen isimdir. 1913 yılında, tüfek namluları için çeşitli metalleri birleştirerek deneyler yaparken bazılarının paslanmaya karşı dirençli olduklarını fark eden Harry Brearley tarafından keşfedilmiştir.

Paslanmaz eliklerin yüzeylerinde oluşan ince ve yoğun kromoksit tabakası, korozyona karşı yüksek dayanım sağlar ve oksidasyonun daha derine doğru ilerlemesini engeller.

Paslanmaz eliklerin kimyasal bileşimleri değiştirilerek farklı özelliklerde alaşımlar elde edilebilir. Krom miktarı yükseltilerek veya nikel, molibden gibi alaşım elementleri katılarak korozyon dayanımı artırılabilir. Bunun dışında bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum, azot, kükürt ve selenyum gibi elementlerin eklenmesi ile korozyon dayanımına ek olarak başka özellikler de kazandırılabilir. Böylece tasarımcılar ve imalatçılar değişik kullanım amaçları için en uygun paslanmaz çeliği seçebilirler. Paslanmaz eliklerde içyapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri, önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır.

Paslanmaz elikler, tamamen ostenitik ile tamamen ferritik özellikler aralığında değişen, kimyasal bileşim ve yapısal farklara göre; ostenitik paslanmaz çelikler, ferritik paslanmaz çelikler, martenzitik paslanmaz çelikler, çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler ve çökme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler olmak üzere dört ana gruba ayrılırlar. Endüstride en yaygın olarak kullanılanlar ostenitik ve ferritik çelikler olup, tüm paslanmaz çelikler içerisindeki kullanım oranları % 95 civarındadır [7,8].

1.2.7.1. Ostenitik paslanmaz elikler

Ostenitik paslanmaz elikler, % 6 – 22 Ni içeren alaşımlardır. Ferritik paslanmaz çelikler gibi, ısıl işlem ile sertleştirilemezler [7].

Toplam paslanmaz elik etimi içinde, ostenitik çeliklerin payı % 70' tir. 200 ve 300 serilerini içeren ostenitik paslanmaz çelikler aralarında en çok kullanılan 304 kalitedir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin temel alaşım elementi krom ve nikeldir [8].

Ostenit paslanmaz çelikler  guruba ayrılabilir:

- Tip 201, 202, 301, 302, 303, 304, 305, 308, 309, 310, 316 ve 317 gibi normal stabilize edilmemiş bileşimler.
- Başlıca rnekleri tip 321, 347 ve 348 olan stabilize bileşimler.
- Tip 304L ve 316L gibi çok düşük karbonlu bileşimler. Stabilize edilmemiş bileşimler. Isıl işlemle sertleştirilemezler fakat soğuk işlenme ile sertleşirler [9].

Karbon miktarı % 0,03' den az ise karbür oluşmaz ve elik oda sıcaklığında tamamen ostenitik olarak kalır. YMK ostenitik paslanmaz çeliklerin süneklik, sekillendirilebilirlik ve korozyon dirençleri mükemmeldir. Ostenitik paslanmaz çelikler ferromanyetik değildirler. Yüksek nikel ve krom miktarı bu çeliklerin maliyetinin artmasına neden olur. % 0,03' den fazla karbon içeren ostenitik paslanmaz çelikler, taneler arası korozyona karşı hassas olabilirler [10].

Döküm, sıcak ve soğuk sekillendirme ile üretilen bu malzemelerde 800 – 450 C sıcaklık aralığında krom karbürün çökelmesinden dolayı korozyon meydana gelmektedir. Bu durumu önlemek amacıyla 1100 C sıcaklıkta yeteri kadar beklendikten sonra hızlı bir şekilde soğuma yapılır. Isı ve korozyon gerektiren yerlerde kullanılan bu çeliklerin ısı iletim katsayıları yumuşak çeliklerin % 30' u kadar ve genleşmeleri ise onlardan % 50 daha fazladır. Bu sebeptendir ki, kaynak yapılırken çok dikkatli olunmalı ve Nb içeren ostenitik elektrotlar kullanılmalıdır.

Makine ve imalat sanayinde çeşitli uygulamalar, asansörler, bina ve dış cephe kaplamaları, mimari uygulamalar, gıda işleme donanımları, mutfak gereçleri, kimya tesisleri ve ekipmanları, bilgisayar klavye yayları ve mutfak evyeleri, ostenitik paslanmaz çeliklerin kullanım alanlarından bazılarıdır.

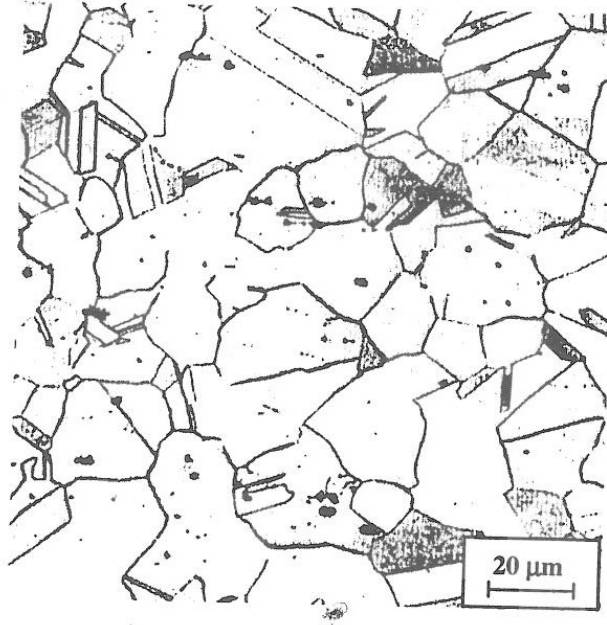
Ostenitik paslanmaz çeliklerin başlıca özellikleri şu şekildedir:

- Mkemmek korozyon direncine sahiptirler.

- Kaynak edilebilme kabiliyetleri mükemmeldir.
- Sünec olduklarından kolay şekillendirilebilirler.
- Hijyeniktirler, temizliği ve bakımı kolaydır.
- Yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahiptirler.
- Düşük sıcaklıklarda mekanik özellikleri mükemmeldir.
- Manyetik değildirler (tavlanmış halde).
- Mekanik dayanımları sadece pekleşme ile artırılabilir.

Tablo 1.1. Ostenitik paslanmaz çeliklerin bileşimi (%)

Tür	ASTM	C	Cr	Ni	Mo	Diğer
Ostenitik	201	0,05	17	5	-	Mn
	301	0,1	17	7	-	-
	304L	0,02	18,3	9,2	-	-
	304	0,04	18,3	8,7	-	-
	304LN	0,02	18,3	8,7	-	-
	321	0,04	17,3	9,2	-	Ti
	S30430	0,01	18	9	-	Cu
	304L	0,02	18,3	10,2	-	-
	305	0,02	18	11,5	-	-
	316L	0,02	17,3	11	2,2	-
	316	0,04	16,8	10,7	2,2	-
	316LN	0,02	17,5	11	2,2	-
	316Ti	0,04	17	11	2,2	Ti
	316L	0,02	17	11,7	2,7	-
	318	0,04	17	11	2,7	-
	316L	0,02	17,3	12,7	2,7	-
	317L	0,02	18,3	12,2	3,2	-
	317LN	0,02	17	11	3,02	-
	S31726	0,02	17,3	12,7	4,2	-
	N08904	0,01	20	25	4,5	Cu
	S31254	0,01	20	18	6,1	Cu
	S32654	0,01	24	22	73	Mn,Cu



Şekil 1.1. Ostenitik paslanmaz çeliğin metalografik yapısı [11].

1.2.7.2. Ferritik paslanmaz çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler, % 11 – 30 Cr, yaklaşık % 0,12' den az karbon içerirler. Korozyon rezistansı ve işlenebilirlik gibi özelliklerini geliştirmek için, nispeten küçük miktarlarda diğer alaşım elementleri eklenir [7].

Ferritik paslanmaz çelikler, sertleştirilemeyen Fe-Cr alaşımlarıdır. 405, 409, 430, 442, 446, bu grupta yer alan en tipik ürünlerdir [8].

Tavllanmış durumda en yüksek işlenebilirlik, korozyon direnci ve yumuşaklıklarını kazanırlar. Bu sebeple ferritik paslanmaz çeliklere uygulanan tek ısıtım işlem tavlama işlemidir. Bu işlem kaynak ve soğuk işlemlerden kalan gerilmelerin alınmasını ve daha homojen bir yapı elde edilmesini sağlar. Ferritik paslanmaz çelikler genellikle 475 °C gevrekleşme bölgesinin üzerindeki sıcaklıklarda ve ostenit teşekkül bölgesinin altındaki sıcaklıklarda tavlantı yapılır. Ferritik paslanmaz çelikler 400 – 525 °C bölgesinde uzun süre kaldıkları ya da bu bölgede yavaş soğutuldukları takdirde bir gevrekleşme olayı görülür. Isıl işlemlerle bu gevrekleşme durumu ortadan kaldırılabilir [9].

Ferritik paslanmaz çelikler % 30 kadar krom ve % 0,12'den az karbon içerirler. Ferritik paslanmaz çelikler HMK yapılı olmalarından dolayı, iyi dayanım ve orta seviyedeki sünekliğe sahiptirler. Karbon ve krom içeriği yüksek olduğunda, karbür parçacıklarının çökmesi kırılganlığa neden olur. Ferritik paslanmaz çelikler, mükemmel korozyon direncine, orta seviyede şekillendirilebilirliğe sahip ve nispeten ucuzdurlar [10].

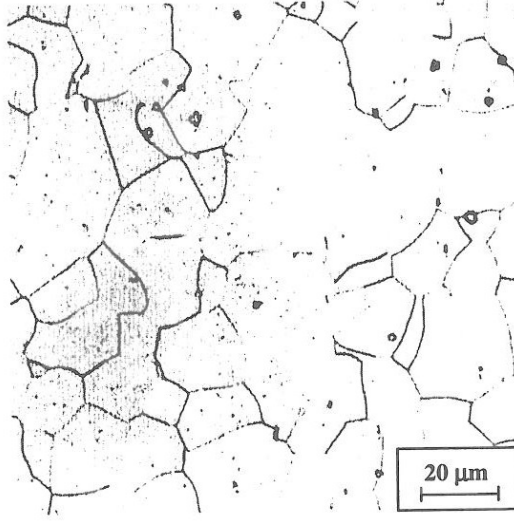
Yüksek alaşımlı ferritik paslanmaz çeliklerin büyük çoğunluğu sadece levha ve boru şeklinde üretilirler. Genellikle dolgu metali kullanılmadan TIG yöntemi ile kaynak edilirler. Ferritik paslanmaz çeliklerin kullanım alanlarına, mutfak gereçleri, dekoratif uygulamalar, otomobil şasi parçaları, egzoz elemanları, sıcak su tankları örnek olarak verilebilir.

Ferritik paslanmaz çeliklerin başlıca özellikleri şu şekildedir:

- Orta ila iyi derecede olan korozyon direnci, krom miktarının artması ile iyileşir.
- Isıl işlemle dayanımları artırılmaz ve sadece tavlanmış durumda kullanılırlar.
- Manyetikler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür.
- Ostenitik çelikler kadar kolay şekillendirilemezler.

Tablo 1.2 Ferritik paslanmaz çeliklerin bileşimleri (%)

Tür	ASTM	C	Cr	Ni	Mo	Diğer
Ferritik	409	0,02	12	-	-	Ti
	S41050	0,02	11,5	0,04	-	-
	410S	0,04	12	-	-	-
	430	0,04	16,5	-	-	-



Şekil 1.2 Ferritik paslanmaz çeliğin iç yapısı [11].

1.2.7.3. Çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler

Diğer paslanmaz çelikler gibi bunlarda demir-krom-nikel alaşımlarıdır. Ancak çift faz içerirler. Bu tür çelikler korozyon ve mekanik özellikler açısından, faz yapıları gereği ferritik ve ostenitik paslanmaz çelikler arasında yer alırlar. Gerilmeli ve taneler arası korozyona karşı dirençleri çok iyidir. Bu sebeple, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık gerektiren yerlerde kullanılırlar [12].

Hemen hemen eşit miktarda ostenit ve ferrit içeren bir mikro yapının oluşturulması ile elde edilirler. Bu çelikler tam olarak % 24 krom ve % 5 nikel içerirler. 200, 300 veya 400 ile tanımlanan grupların hiçbirine girmez. Çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler, daha yüksek akma dayanımına sahip olmaları nedeniyle ostenitik ve ferritik paslanmaz çeliklere göre daha üstün avantajlar sunarlar. Çift fazlı mikro yapı, % 21 – 25 Cr ve % 5 – 7 Ni içeren çeliğin 1000 – 1050 °C sıcaklıkta tavlınması ve ardından hızlı bir şekilde soğutulması ile elde edilir [8].

Çift fazlı paslanmaz çelikler, genellikle kimyasal aparat imalatında, arıtma tesislerinde, deniz veya off-shore teknolojisinde kullanım alanı bulmaktadırlar.

Çift fazlı paslanmaz çeliklerin başlıca özellikleri şu şekildedir:

- Yüksek gerilmeli korozyon direncine sahiptirler.
- Klor iyonu bulunan ortamlarda daha yüksek korozif dayanım gösterirler.

- Ostenitik ve ferritik çeliklerden daha yüksek mekanik dayanım sağlarlar.
- İyi kaynak edilebilirlik ve şekil alma kabiliyeti vardır.

Tablo 1.3 Dupleks paslanmaz çeliklerin bileşimi (%)

Tür	ASTM	C	Cr	Ni	Mo	Diğer
Dupleks	329	0,02	25	5	1,5	-
	S31803	0,02	22	5,5	3	-
	S32750	0,02	25	7	4	-

1.2.7.4. Martenzitik paslanmaz çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler, % 12 – 17 Cr, % 0,1 – 1 C içerirler ve ısıtma işlemi ile sertleştirilebilirler [7].

Ferritik gruptaki paslanmaz çeliklere benzer kimyasal analizlere sahiptirler ancak daha yüksek oranda karbon ve daha düşük oranda krom içerirler. Bu nedenle ısıtma işlemiyle sertleştirilebilir. 403, 410, 416 ve 420 bu grupta yer alan en tipik ürünlerdir [8].

Martenzitik paslanmaz çeliklerin ısıtma işlemleri düz karbon veya düşük alaşımlı çeliklere çok benzer; dayanım ve sertlik daha çok karbon yüzdesine bağlıdır. Paslanmaz çelikler ile diğer çelikler arasındaki tek fark paslanmaz çeliklerin sertleşebilme kabiliyetlerinin çok yüksek olması ve havada soğutma ile 300 mm kadar kalınlıktaki kesitlerin merkezlerinde azami sertlik sağlanabilmesidir. Martenzitik paslanmaz çelikler ısıtma işlemi değişkenlerine çok hassas olduklarından ısıtma işleminde yapılan hatalar dolayısıyla hurda yüzdesi de oldukça yüksektir. Bu çelikler çok pahalı olduklarından üstün korozyon direnci mutlak şart olmadığı takdirde kullanılmazlar [9].

Krom miktarı genellikle % 17' den azdır. Aksi takdirde, ostenit alanı çok küçülür. Düşük krom içeriği, karbon içeriği % 0,1'den % 1' e kadar değişen farklı sertlikteki martensitlerin oluşturulmasını sağlar. Kromun yüksek sertleşebilirlik sağlamasından dolayı, hava ve yağda soğutma ile martensit oluşturulabilir. Martenzitik paslanmaz çeliklerin temperleme eğrileri yüksek alaşımlı takım çeliklerinin temperleme

ergilerine benzer. Temperleme sıcaklığı 500 °C' ye erişinceye kadar çok az yumuşama olur. Temperlenmiş martensitik paslanmaz çeliklerde, düşük krom içeriği diğer paslanmaz çeliklerden daha az korozyon direncine sahip olmasına neden olur [10].

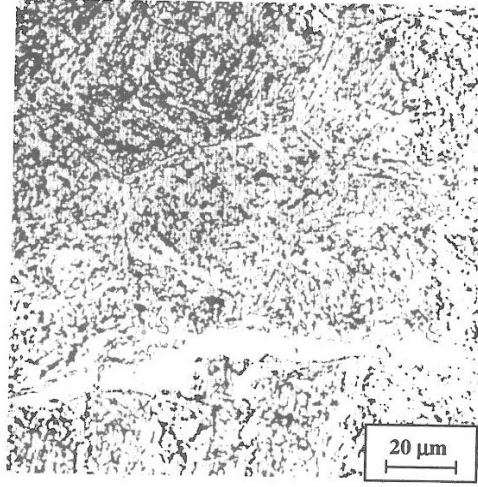
Bu çelikler, yüksek mukavemet ve aşınma direnci gerektiren; tekstil, gıda, kâğıt ve boya sanayisinde, kesici ve karıştırıcı eleman yapımında, türbin kanatları, pompa ve konkasör çekiçleri gibi parçaların, gibi parçaların imalinde kullanılırlar. Martenzitik paslanmaz çeliklerin diğer kullanım alanları, bıçaklar, ameliyat aletleri, miller ve pimlerdir.

Martenzitik paslanmaz çeliklerin başlıca özellikleri şu şekildedir:

- Orta derecede korozyon direncine sahiptirler.
- Isıl işlem uygulanabilir, böylece yüksek dayanım ve sertlikler elde edilebilir.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür.
- Manyetikler.

Tablo 1.4. Martenzitik paslanmaz çeliklerin bileşimleri (%)

Tür	ASTM	C	Cr	Ni	Mo	Diğer
Martenzitik	S42010	0,20	13	-	-	-
	420	0,30	12,5	-	-	-
	-	0,03	16	5	1	-
	S32304	0,02	23	4,5	-	-



Şekil 1.3. Martenzitik paslanmaz çeliğin içyapısı [11].

1.2.7.5 Çökelme yoluyla sertleşebilen (yaşlandırılabilen) paslanmaz çelikler

Çökme sertleşmeli (yaşlandırılabilir) paslanmaz çelikler, genellikle % 10 – 30 Cr ve beraberinde değişen miktarlarda nikel ve molibden içerirler [7].

Bu tip paslanmaz çelikler, hem korozyona karşı dayanıklılıkları iyi, hem de mukavemet ve tokluk oranı yüksektir. Bu sebeple, yüksek mukavemet, tokluk ve korozyon direnci gerektiren uçak, uzay ve savunma sanayi için geliştirilmişlerdir. Bu çeliklerin diğer kullanım alanları, pompa ve vana şaftlarıdır [12].

Çökelme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliklerin özellikleri katı eriyik mukavemetleşmesi, pekleşme, yaşlandırma mukavemetleşmesi ve martensitik reaksiyondan kaynaklanır. Düşük karbon içerdiğinde bile, yüksek mekanik özellikler elde edilir [10].

Alüminyum gibi katı çözeltiliye girme ve yaşlandırma (çökeltme) ısı işlemi ile çeliğe sertleşebilme olanağı sağlayan alaşım elementleri içerirler. Bu çelikler ayrıca martensitik, yarı ostenitik ve ostenitik tip çökelme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler olmak üzere alt guruplara ayrılırlar [8].

Çökelme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler başlıca özellikleri şu şekildedir:

- Orta ila iyi derecede korozyon direnci vardır.

- Çok yüksek mekanik dayanım gösterirler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri iyidir.
- Manyetikirler.

1.2.7.6. Paslanmaz çeliklerin aşınma davranışları

Paslanmaz çeliklerin yüzey işlemleri ve aşınma davranışları üzerine araştırmacılar tarafından yapılmış farklı çalışmalar literatürde mevcuttur.

Sun ve Çimenoglu krom nikelli çeliklerde aşınma davranışlarını incelediler. Yüksek Cr ve Ni'li çeliklerin özelliklerinin matris, karbür ve intermetaliklerden oluşan mikro yapı ile yakından ilgili olduğu görüldü. Matris, bileşime bağlı olarak ferritik veya ostenitik olabilir. Bileşimde bulunan Cr, ferriti Ni ise östeniti kararlı hale getiren ana alaşım elementleridir. Bu çeliklere ilave edilen alaşım elementlerinin amacı mekanik özellikleri iyileştirmek, aşınma ve korozyon direncini arttırmaktır. Cr korozyon direncini geliştirirken, Ni yüksek sıcaklık direncini arttırmaktadır. Sun ve Çimenoglu tarafından incelenen çelikler içerisinde Cr oranı düşük ve Ni oranı yüksek çelikte, % 20 oranında daha düşük sertlik ve % 600 oranında daha yüksek darbe enerjisi gözlemlendi. Cr içeriğinin yüksek olması, mikro yapıdaki karbür miktarını artırdığına ve böylece sertliğin artmasına, tokluğun da azalmasına neden olduğu kanısına vardılar [13].

Alphonsa ve diğerleri, yaptıkları bir çalışmada AISI 420 paslanmaz çeliğinin yüzey aşınma özelliklerini arttırmak için plazma nitrürleme işlemi uygulamışlardır. Deneyler sonrası, yüzeyde oluşan sertlik, kristal yapı, mikro yapı, kimyasal bağ özellikleri X-ray diffraction (XRD), Scanning electron microscopy (SEM), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Auger electron spectroscopy (AES) teknolojilerini kullanarak incelemişler. Yüzeyden iç kısımlara doğru yaklaşık 60 µm mesafede 1300 HV sertlik elde etmişler. Baskın faz Fe₃N olarak görülmüş bunun yanında CrN ve Fe₄N fazları da gözlemlenmiş. Aşınma özelliklerinin de belirgin şekilde arttığını Alphonsa ve diğerlerinin çalışmaların da gözlemlemişlerdir [14].

Taktak, bir çalışmada AISI 440C ve 52100 çeliklerini kutu ortamında borlanmış ve 600 °C' ye kadar aşınma davranışlarını incelemiştir. Sıcaklığın artmasıyla sürtünme katsayısı ve aşınma hızında artışlar görmüştür [15].

Tablo 1.5. Çelikler ve uygulandığı yerler [16].

	Malzeme Numarası	DIN	SAE AISI	Kullanıldığı Yerler
İMALAT ÇELİKLERİ	1.0401 1.0402 1.0532	C 15 C 22 St 50-2	1010 1020 1030	Cıvata, somun, delme ve frezeleme aparatları gövde ve şablonları
	1.0570 0.0577 1.0501 1.0503 1.1191	St 52-3 St 52 C 35 C 45 Ck 45	— — 1040 1045 1043	Dişli çarklar, kazmalar cer kancaları v.s.
	1.1210 1.0601 1.0603 1.0605	C 53 C 60 C 67 C 75	1050 1060 1070 1080	Dişli çarklar, çok fazla gerilmeli torna parçaları yağda sertleşebilir. Oto dişlileri krank milleri v.s.
	1.7033 1.7035 1.7218 1.7225 1.7228 1.6546	34 Cr 4 41 Cr 4 25 CrMo 4 42 CrMo 4 50 CrMo 4 40 NiCrMo 2	5130 5140 4130 4140 4150 8640	Yüksek direnç gösteren makine parçaları, keskiler, bıçaklar v.s.
	1.6582 1.8159 1.5755	34 CrNiMo 6 50 CrV 4 31 NiCr 14	4340 6150 3330	Üst yüzey sertleşmesi gereken parçalar, akslar, giyotin bıçakları
	1.5752 1.5919 1.5920 1.7131 1.7147	14 NiCr 4 15 CrNi 6 18 CrNi 8 16 MnCr 5 20 MnCr 5	3315 3115 — 5115 5120	Küçük boyutlu pinyon dişliler Büyük boyutlu pinyon dişliler
	1.6523	21 NiCrMo 2	8620	Dişli çarklar, orta dayanımlı parçalar
	1.0904 1.0906 1.0908	55 Si 7 65 Si 7 6 Si 7	9255 — 9260	Basma yayları, çekme yayları, yaylı rondelalar, çanak yaylar
	1.0711 1.0715 1.0726	9 S 20 9 SMn 36 35 S 20	1117 — 1137	Hızlı otomatlar, yumuşak çelik, dinlendirilmeden döküm ıslah çelikleri

Tablo 1.5. Çelikler ve uygulandığı yerler (devam) [16].

SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİKLERİ	1.2436 1.2601 1.2379 1.2210 1.2510 1.2842 1.2542 1.2080	X 210 CrW 12 X 165 CrMoV 12 X 155 CrVMo 121 115 CrV 3 100 MnCrW 4 90 MnCrV 8 45 WCrV 7 X 210 CrW 12	D6 — D2 L2 D1 D2 S1	Kesme takımları, talaşlı imalat takımları, makine bıçakları, ölçü aletleri, plastik işleme takımları, keskiler, çapak alma takımları
SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİ	1.2343 1.2344 1.2365 1.2713 1.2714 1.2567	X 38 CrMoV 51 X 40 CrMoV 51 X 32 CrMoV 33 55 NiCrMoV 6 56 CrNiMo 7 X 30 WCrW 53	H11 H13 H10 L6 L6	Sıcak kesme takımları, delici zimbalar, kalıplar, kalıp ve boru presleri, pres mandrenleri, pres takımları
HAVA ÇELİKLERİ	1.3207 1.3343 1.3243	S 10-4-3-10 S 6 S 2 S 65-2-5	— M2 M41	Helisel matkaplar, kılavuzlar, raybalar, havşa matkapları, daire testereleri, her türlü freze bıçakları
PASLANMAZ ÇELİKLER	1.4006 1.4021 1.4301 1.4435 1.4841	X 10 Cr 13 X 20 Cr 13 X 5 CrNi 189 X 2 CrNiMo 1812 X 15 CrNiSi 2520	410 420 304 316 L 310	Yüksek mukavemet gereken yerler Su ve buhar etkilerine dayanıklı malzemelerin yapımında

1.3. Alaşım Elementlerinin, Çeliklerin Yapı ve Özelliklerine Etkisi

Çelikler, karbondan başka farklı oranlarda alaşım elementleri de içerirler. İçerisine karbon dışında istenilerek başka elementlerin, özellikle metallerin katıldığı çeliklere alaşımlı çelikleri adı verilir. İçerisine katılan elementin miktarına göre çelikler; düşük, orta ve yüksek alaşımlı çelikler olarak üç guruba ayrılır [17].

Yüksek mukavemet, yüksek aşınma dayanımı, yüksek korozyon direnci ve yüksek sertlik gerektirmeyen uygulamalar için karbon çelikleri veya alaşımsız çelikler yaygın olarak kullanılır. Fakat alaşımsız çeliklerin sertleşme kabiliyeti yeterli olmadığından istenilen mukavemet özelliklerine her zaman cevap vermeyebilirler. Diğer taraftan sertleştirilen çeliklerde iç gerilmelerin giderilmesi ve tokluğun artırılması amacıyla menevişleme yapılır. Buda çeliğin sertlik özelliğini yükselen sıcaklıkla etkiler. Bu ve buna benzer sebeplerden dolayı alaşımsız çeliklerin yüksek mukavemet ve sertlik gerektiren yerlerde kullanılması mümkün olmaz. Alaşımsız

Çeliklerin kullanımını kısıtlayan etkenler, alaşım elementi ilavesiyle önemli ölçüde ortadan kaldırılabilir.

eliklere alaşım elementi ilave edilmesinin başlıca amaçları şunlardır:

- Sertleşme kabiliyetini iyileştirmek.
- Sertlik ve mukavemetini arttırmak.
- Mekanik özelliklerini iyileştirmek.
- Tokluğu arttırmak.
- Aşınma direncini arttırmak.
- Korozyon direncini arttırmak.
- Manyetik zellikleri iyileştirmektir [12].

1.3.1. Karbon etkisi

Çeliğin mekanik özelliklerini en fazla etkileyen temel alaşım elementidir. Karbon miktarının artmasıyla elik bünyesindeki perlit artar. Dolayısıyla eliğin sertlik ve dayanımı önemli ölçüde artar. % 0,8 karbona kadar çekme gerilmesi, mukavemet özellikleri ve akma sınırı değeri artarken bu değerden sonra kırılganlık artar. Karbon miktarının artması, aynı zamanda, sünekliği, dövülebilirliği, derin çekilebilirliği, kaynak kabiliyetini ve kesilme özelliğini zayıflatır. Yüksek karbonlu çeliklerin ısıl işleminde çatlama riski de fazladır [16,18].

1.3.2. Mangan etkisi

Bütün ticari alaşımsız çeliklerde % 0,03 ile % 1 oranları arasında mangan bulunur. Mangan çeliğe ferromangan şeklinde deoksidasyon elementi olarak verilir. % 0,8'i aşan oranlarında manganlı elik alaşımlarından söz edilir. Çekme dayanımı ve akma sınırı % 0,7 mangan değerine çıkıncaya kadar, uzamada fazla düşme olmadan artma gösterir.

Mangan, çeliğe genellikle cevherden intikal eder, fakat özellikleri iyileştirdiğinden belirli bir oranda çeliğin içerisinde bulunması istenir. Mangan, eliğin dayanımını arttırır, fakat sünekliğini biraz azaltır. Kaynak kabiliyetine olumlu etkide bulunur ve çeliğin yüzey kalitesini iyileştirir. Paslanmaya, aşınmaya ve az miktarda

ısıya karşı olan dayanıklılığını artırır. Az miktardaki mangan içeriği çentik darbe mukavemetini olumlu yönde etkiler ve kritik soğutma hızını aşırı derecede düşürür. Buna karşılık artan mangan içeriği tane irileşmesine sebep olur. Yüksek karbonlu çeliklere, düşük karbonlu çeliklerden daha çok etki eder [4].

Yüksek oranda mangan manyetik özelliği yok eder ve sertleştirilebilirliği iyileştirir. Kesici kenarın zarar görmesinin engellenmesi için güçlendirilmesi gerekir. Aşınma ilerledikçe talaşın kesici kenara yapışma riski ortaya çıkar [6].

1.3.3. Silisyum etkisi

Silisyum, tıpkı mangan gibi bütün çeliklerde bulunan bir elementtir. Ticari çelikler genellikle % 0,05 – % 0,3 oranları arasında silisyum içerir. Silisyum, ferrit içerisinde çözünerek çeliğin sünekliğini fazla azaltmadan, mekanik direnci ve özgül ağırlığı artırır. Ayrıca, silisyum dioksit (SiO_2) oluşturarak sıvı çeliğin oksijenini büyük ölçüde alır ve böylece çeliğin kalitesini iyileştirir. Silisyum dökme demirlerde grafit yapıcı bir element olarak kullanılır [16].

Silisyum, esnekliği eksi yönden etkilerken, her % 1 artış için çekme dayanımını 10 kg/mm^2 , akma sınırını da benzer oranda attırır. Bileşiminde % 14 civarında silisyum bulunan çelikler kimyasal reaksiyonlara karşı dayanıklı olduklarından dövülemezler. Çeliklerin sakinleştirilmesi için kullanılır [18].

1.3.4. Fosfor etkisi

Çeliklerdeki fosfor oranı genelde % 0,04' ün altında tutulur. Ancak bazı çeliklerin kesme özelliklerini iyileştirmek için fosfor oranı % 0,07 – 0,12 arasında tutulur. Ne var ki, yüksek oranlardaki fosfor, yapı içerisinde sert ve gevrek demir fosfür bileşiğinin oluşmasına yol açar [11].

Genel olarak çelikte zararlı olarak bilinen fosfor, çentik darbe mukavemeti ve kaynak edilebilirliği azaltırken, çekme mukavemeti ve korozyon direncini artırır. Kaynak esnasında çatlama olasılığını artırır [5,18].

1.3.5. Kükürt etkisi

Demir sülfür halinde tane sınırlarına çökelerek ve 900 °C civarında plastikliğini kaybederek çeliği sıcakta kırılıcı yapar. Bu durum ancak mangan miktarının artırılmasıyla önlenabilir. Mangan sülfür tane sınırlarında yer almasa da, düşük mukavemetiyle çelik talaşını kırılğan hale getirerek, talaş kırılmasını kolaylaştırır (otomat çelikleri) [18].

Çeliğin işlenebilme özelliğinin arttırılması gerekmediği durumlarda fosfor gibi istenmeyen bir elementtir. Çeliği kırılğan yapar ve haddelenmesini güçleştirir. Müsaade edilen miktar en çok %0,025 – 0,030 arasında sınırlandırılır [16].

1.3.6. Krom etkisi

Krom, çeliğin dayanma özelliğini arttırırken, esnekliği çok az miktarda olumsuz yönde etkileyen bir alaşım elementidir. Her % 1 krom artışında malzemenin çekme dayanımı 80 – 100 (N/mm²) artma gösterir. Sertleştirici ve tane küçültücü etkileri vardır. Çeliğin sıcağa direncini arttırır, tufan oluşumunu önler. İçeriğinde yüksek oranda krom bulunması, çeliğin paslanmaya ve aşınmaya karşı dayanımını arttırır. Kromlu paslanmaz çeliklerde krom oranı arttıkça, kaynak edilebilme yeteneği azalır [16].

Kromlu çeliklerin yapıları tamamen ferritiktir. Isıl işlemlerden geçirildikten sonra kullanılır. Soğuk ve sıcak iş çeliklerinde, kesme işlerinde kullanılan makinalarda krom vazgeçilmez bir elementtir.

1.3.7. Nikel etkisi

Her % 1 Ni için çekme dayanımı yaklaşık olarak 4 kgf/mm², akma sınırı ise daha büyük ölçüde artar. Nikel kritik soğuma hızını kuvvetle azaltarak sertleşme kabiliyetini artırır. Böylelikle kalınlığı fazla olan parçalarda derinlere kadar sertleşme sağlanabilir [18].

Nikel, çelikte özellikle kromla birlikte bulunduğu zaman, sertliğin derinliklere inmesini sağlar. Krom nikelli çelikler paslanmaya, tufallanmaya ve ısıya dayanıklıdır.

Özellikle düşük sıcaklıklarda, makine yapı çeliklerinin çentik direncini artırır. Nikel, ıslah ve sementasyon çeliklerinin de direncini artırır [16].

1.3.8. Molibden etkisi

Karbür oluşumuna yatkın bir alaşım elemanıdır. Çeliğin çekme mukavemetini, ısı ve tavlama ortamına dayanıklılığını artırırken, dövülebilme kabiliyetini azaltır [5].

Molibden, aşınma dayanıklılığı, derinliğine sertleştirme, kaynak edilebilme, temper gevrekliğini giderme ve kesme yeteneğini düzeltme gibi özelliklerin arandığı durumlarda önemli bir alaşım elemanıdır. Tane küçültücü etkisi vardır.

1.3.9. Vanadyum etkisi

Oluşturduğu karbürle takım çeliklerinin yüksek sıcaklıktaki mukavemet değerini artırır, genellikle kesici uçların uzun zaman kesiciliğini sağlar. Çeliklerde aşırı tav duyarlılığını azaltır. Vandanyum karbürler yüksek sıcaklıklarda ve çok güç çözüldüklerinden, vandanyumlu çeliklere normal sertleşme sıcaklıklarından su verme halinde de sertleşme kabiliyeti kısmen azalır [16,18].

1.3.10. Volfram etkisi

Volfram, çelikte Talas kaldırılabilirliği azaltır. Özellikle yüksek hız ve sıcak iş çeliklerinde kullanılır. Çelikte keskinlik dayanıklılığını artırır [5].

1.3.11. Azot etkisi

Azot, az da olsa, çeliklerde gevrekleşmeye sebep olur. Üretim yöntemlerine bağlı olarak çelikler farklı oranlarda azot içerirler. Örneğin, Thomas çeliklerinde % 0,03 olan azot oranı, Siemens-Martin çeliklerinde % 0,01'den daha azdır [11].

1.3.12. Alüminyum etkisi

Sıvı çelik üzerinde rahatlatıcı etki gösterir. % 0.1' e kadar olan katkılarda tane inceltici etkisi vardır. Azotla birleştiği için zamanla yaşlanma ve sertleşmeyi önler. Korozyonik sıvı ortamda yırtılma özelliğini azaltıcı etki gösterir. Cr ve Si ile beraber tufal dayanaklığını artırır. Nitrürasyon çeliklerinde ana eleman olarak kromla beraber alüminyum bulunur [19,18].

1.3.13. Fosforun etkisi

Paslanma ve aşınmaya dayanıklılığı artırsa da, çentik vurma tokluğunu kuvvetle azaltır. Ayrıca kaynak esnasında çatlama olasılığını da artırır [18].

1.3.14. Hidrojenin etkisi

Atom halindeki hidrojen, çapının küçük olması sebebiyle, katı haldeki çelikte kolaylıkla yayınıp, özellikle kristal hatalarının bulunduğu yerlerde molekül hale geçebilir. Böylelikle oluşan çok yüksek gaz basıncı, çoğunlukla şekil değiştirme esnasında mikro çatlakların oluşmasına sebep olabilir [18].

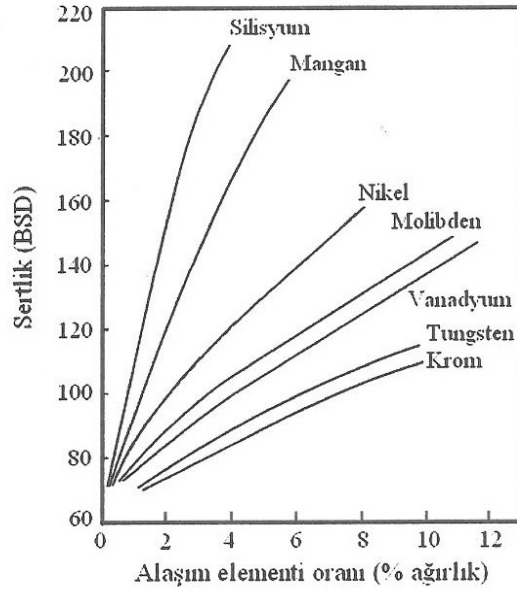
1.3.15. Oksijenin etkisi

Semir oksit, demir sülfür ile 930 °C' de eriyen bir ötektik oluşturarak çeliğin sıcakta kırılgan hale getirir [18].

1.3.16. Alaşım elementlerinin, ferrite etkisi

Teknik olarak bütün alaşım elementleri ferrit içerisinde az da olsa bir miktar çözünürler, ancak bazı elementler karbür oluşturmazlar. Nikel, alüminyum, silisyum, bakır ve kobalt gibi elementler ferrit içerisinde yüksek oranda çözünürler. Karbonun olmaması durumunda, ikinci grup elementler ferrit içerisinde önemli ölçüde çözünebilirler. Karbürün oluşması için çelikte yeterli oranda karbon bulunması gerekir.

Ferit içerisinde çözölen herhangi bir element, katı çözölti sertleşmesi ilkelerine uygun olarak ferritin sertlik ve mukavemetini arttırır. Demirin mukavemetini arttırma etkisi bakımından alaşım elementleri krom, vanadyum, molibden, nikel, mangan ve silisyum sırasını izler [11].



Şekil 1.4. Ferit içinde çözönen elementlerin çeliğın sertliğine etkisi [11].

1.3.17. Alaşıım elementlerinin karbürlere etkisi

Çelik içerisinde bulunan bütün karbürlerin çeliğın oda sıcaklığındaki mukavemetine etkileri hemen hemen aynı olup, bu etkiler çeliğın kimyasal bileşimine bağılı değildir. Yani karbürlere kimyasal bileşime bağılı kalmadan, çeliğın oda sıcaklığındaki mukavemetini benzer biçimde etkiler.

Karbür yapıcı elementler, çeliğın ostenitleme sıcaklığı ve tavlama süresini önemli ölçüde etkiler. Karmaşık karbürlere bazıları, ostenit fazı içerisinde çözünmezler. Bu tür karbürlere ostenitin karbon ve alaşıım elementi oranlarını, çeliğın kimyasal bileşimindeki oranların altına düşürürler. Çözünmeyen karbürlere, tane büyümesini de engeller. Bu sebepten karbürlere çeliklerin serleşme yeteneğini olumsuz etkiler. Karbürlere ostenit içerisinde çözünmesi durumunda karbür yapıcı elementler

Çeliğin sertleşme yeteneğini büyük ölçüde iyileştirirler, yani daha fazla sertleşme sağlarlar [11].

1.4. Çelikte Sertleşebilirlik

Demir malzemeler, üretim işleminde ilgili olarak belirli bir oranda karbon içerirler. Karbon oranı, demiri büyüklüğü oranında gevrek yaparken, ısı işlem yoluyla, sertleşebilirlik gibi birçok niteliklerin iyileştirilmesi bakımından önemlidir [5].

Sertleşebilirlik, eliğin su verme işlemiyle martenzite dönüşümü sonucu sertleşme kabiliyetidir. Sertleşebilirlik, su vermeyle elde edilen sertliğin derinliğini saptar. Bu derinlik, martenzitin yüzeyden itibaren yarı miktarına indiği mesafe olarak belirtilir. Yüksek sertleşebilirliğe sahip bir çeliğin karakteristik özelliği; onun büyük bir sertleşme derinliği göstermesi veya büyük parçalar halinde tam olarak sertleşebilmesidir [20].

1.4.1. Islah işlemi

Sertleştirme ve meneviş işlemleri birbiri ardına uygulandığında ıslah işlemi olarak adlandırılır. Uygun ıslah işlemi yapabilmek için, sertleştirme sıcaklığının doğru seçilmesi gerektiğinden, çeliğin karbon miktarı ve alaşım durumu tam olarak bilinmelidir. Bir eliğin ıslah derinliği, yalnızca sertleştirme işlemine bağlı değil, aynı zamanda menevişleme sıcaklığı ve süresi ile de ilgilidir [4].

Islah işlemine uygun olarak üretilmiş çelikler vardır. Islah elikleri düşük alaşımli çeliklerdir ve alaşım elementi soğuma hızını düşürürler. Parça kalınlaştıkça tamamen ıslah edilmenin mümkün olabilmesi için, içyapılarında daha çok alaşım elementi bulundurmalarıdır. Dişli arklar, tertibat parçaları, motorlar ve motorlu araçlar gibi fazla zorlama gören parçalar, ıslah çeliklerinden imal edilirler. 30 CrNiMo 8' den yapılmış yaprak yaylar, 34 CrMo 4' ten yapılmış krank milleri, 42 CrMo 4' ten yapılmış elektrik motoru milleri, Cr 45' ten yapılmış dişli kutusu ve vites atalları, 41 Cr 4' ten yapılmış dişli arklar, 40 Mn 4' ten yapılmış kam milleri, 50 CrV 4' ten yapılmış ısıya dayanıklı yaylar ıslah işleminin uygulandığı çelikler ve kullanıldığı alanlara örneklerdir [3].

1.4.2. Yüzey Sertleştirme İşlemleri

Yüzey sertleştirme işlemleri, istenilen yüzeyleri sert ve aşınmaya dayanıklı hale getiren ve darbeli çalışmalarda, tokluğun istendiği durumlarda, yapılan işlemlerdir. Bu işlemler ile gerekli darbe dayanımını sağlayacak toklukta yumuşak çelik parçaların yüzeyinde aşınma dayanımını sağlayan ince, sert bir tabaka oluşturulur. Yüzey sertleştirme işlemleri sonucunda parçanın aşınma dayanımı yanında yorulma dayanımı da önemli ölçüde artar.

Başlıca yüzey sertleştirme işlemleri şunlardır:

- Alevle sertleştirme.
- İndüksiyonla sertleştirme.
- Lazer ile sertleştirme.
- Karbonlama (sementasyon).
- Nitürleme.
- Siyanürleme.
- Karbonitrürleme.
- Plazma difüzyonuyla yüzey kaplama.
- Plazma püskürtmeyle yüzey kaplama.
- İyon implantasyonu ile yüzey kaplama.
- Kimyasal buhar yığılma (cvd) ile yüzey kaplama.
- Fiziksel buhar yığılma (pvd) ile yüzey kaplama.

Alevle veya endüksiyonla sertleştirme işlemlerinde parçanın yüzeyi yerel bir su verme işlemiyle sertleştirilir. Diğer işlemlerde ise sertleştirme parça yüzeyinin bileşimi değiştirilerek (karbon ve / veya azot içeriği artırılarak) sağlanır.

1.4.2.1. Alevle ve indüksiyonla sertleştirme

Bu ısıtma işlemde çelik parça yüzeyinin istenen yeri Demir – Sementit diyagramında belli olan kritik sıcaklığın üstüne kadar hızlı bir şekilde ısıtılır ardından su verilerek sertleştirilir. Metallerde ısı iletimi çok hızlı olduğundan, kabuk kalınlığını istenildiği kadar ince tutabilmek için ısıtma gücü son derece yoğun, ısıtma süresi 5 – 10 saniye gibi kısa olmalıdır [21].

Gerekli yoğun ısıtma gücü, alevle sertleştirmede, metan, propan veya asetilen gibi bir yanıcı gaz bir üfleçte oksijen ile yakılarak; endüksiyonla sertleştirmede ise, yüksek frekanslı bir alternatif akım kaynağına bağlı bakır sargılar yardımıyla parça yüzeyinde oluşturulan endüksiyon akımları ile sağlanır.

Yapılacak olan ısıtma sisteminde çok çeşitli şekil ve boyutlarda üfleç veya bakır sargılar kullanılabilir. Soğutma ortamı olarak, su, yağ, hava veya çeşitli sıvı karışımlar kullanılabilir. Uygun yöntem, araç ve gereç seçildiğinde, alevle veya endüksiyonla yüzey sertleştirme işlemleri sonucunda elde edilebilecek kabuk kalınlığının maksimum değeri çeliğin sertleştirilebilirliği tarafından belirlenir ve genellikle bir sorun oluşturmaz. Kabuk kalınlığının minimum değeri ise, yaklaşık olarak alevle sertleştirmede 0,75 mm, endüksiyonla sertleştirmede 0,25 mm' dir, fakat bu değerlere her zaman ulaşamayabilir.

Bu ısıl işlemde elde edilecek yüzey sertliği, çeliğin karbon miktarıyla doğru orantılıdır. % 0,3 karbon içeren çeliklerde en çok 50 RSD-C olan yüzey sertliği karbon miktarıyla artarak % 0,6 – 0,7 karbon içeren çeliklerde 63 RSD-C' ye ulaşır. Çeliğin karbon miktarının % 0,8' in üzerine çıkması durumunda sertlikte düşme gözlenir. Bu düşüşe kalıntı ostenit neden olur. Bu ısıl işlemde yüzey sertliği 50 RSD-C' nin üzerine çıktığından karbon oranına bağlı olarak çelikte çatlama ve çarpılma söz konusu olabileceğinden karbon içeriği % 0,3 ile % 0,6 arasında olmalıdır.

Darbeli ve titreşimli çalışacak parçalar alevle veya endüksiyonla sertleştirildiğinde 150 – 200 °C sıcaklıklarda menevişlenmesi gerekir. Menevişleme yüzey sertliğinde belirli bir düşüşe neden olmasına karşın, genellikle, aşınma ve yorulma dayanımını artırır.

Alevle veya endüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi doğru yapıldığında yüzeyde basma iç gerilmeleri, sertleştirilmiş tabakanın hemen altında ise çekme iç gerilmeleri oluşur. Genelde burma veya bükme yükleri altında çalışan parçalarda yük en yüksek değerine yüzeyde ulaştığı için yorulma çatlakları yüzeyden başlar. Alevle veya endüksiyonla sertleştirilmiş parçaların yüzeyinde oluşan basma iç gerilmeleri ve yüksek yüzey sertliği, çatlak başlangıcını zorlaştırarak yorulma dayanımını artırır. Bu parçalarda yorulma çatlağı, genellikle sertleştirilmiş tabakanın altındaki çekme iç gerilmelerin bulunduğu bölgede oluşur. Sertleştirilmiş tabaka inceldikçe, yüzeydeki

basınç iç gerilmeleri artarken, çekme iç gerilmelerinin olduğu bölge yüzeye yaklaştığından, burada çatlak oluşma olasılığı artar.

Kalın kabukların altındaki çekme iç gerilmeleri daha yüksek olduğundan kalın kabukta yorulma dayanımını olumsuz etkileyebilir. Sonuçta parçanın şekline ve boyutlarına, uygulanan yüke ve gereç özelliklerine bağlı olarak yorulma dayanımının en yüksek olduğu bir optimum sertlik derinliği vardır ve bunu genellikle hızlandırılmış yorulma deneyleri ile bulmak gerekir. Kabuk ile çekirdek arasındaki geçiş bölgesi daraldıkça, kabuğun altındaki çekme iç gerilmeleri azalacağından endüksiyonla sertleştirilmiş parçalar alevle sertleştirilmiş parçalara oranla daha yüksek yorulma dayanımı gösterirler. Parça kesitindeki değişimler veya hatalı işlem nedeniyle çekme iç gerilmeleri yüzeye çıkar ise bu noktalardan başlayan yorulma çatlakları beklenmedik kırılmalara neden olabilir.

1.4.2.2. Lazer ile sertleştirilme

Lazerle yüzey bölgesi sertleştirmede malzeme yüzey bölgesinde ince bir tabakanın lazer kaynaklı ısı ile ostenitik bölge sıcaklığına getirilip yüzeyde martenzitik yapının oluşumu için soğutulması (su verme) işlem adımları mevcuttur. Soğutma için malzemenin kendisi, işlem gören yüzey bölgesi derinliğinin düşük olması nedeni ile çoğunlukla yeterli olmaktadır. Kompleks geometrili parça yüzey bölgelerinin homojen bir biçimde sertleştirilmesinde başarı ile uygulanabilen bir yöntemdir. Lazer maliyetinin yüksekliği, yöntemin seri imalatta kullanımının yaygın olmayışının sebebidir.

1.4.2.3. Karbonlama (sementasyon)

Çeliğe, YMK ostenitik yapıda olduğu üst dönüşüm sıcaklığı olan, A3 üzerindeki sıcaklıklarda karbon ilave edilmesidir. Fe – C diyagramından da anlaşılabileceği üzere alaşımın karbon eritebilirliği 723 °C' de yaklaşık % 0,8 iken 1148 °C'de yaklaşık % 2' ye ulaşır. Gerek maliyet gerek ekipman yetersizlikleri nedeni ile bu işlem uygulamada 850 – 950 °C' de gerçekleştirilir. Düşük karbonlu çelik parçaların yüzeyinin, bu sıcaklıktaki karbon verici bir ortamda, saatlerce tutularak karbonca zenginleştirilip, daha sonra su verilerek sertleştirildiği bir yüzey sertleştirme işlemidir. Su verilme olayından

sonra kazanılan sertlik, çelik yapının karbon oranıyla ilişkilidir. Yaklaşık % 1 karbon içeren çeliğin yüzey tabakası 60 – 65 RSD-C sertliğe ulaşırken yaklaşık % 0,2 karbon içeren çeliğin iç kısımları 40 – 45 RSD-C sertliğe çıkar [21]. Basma iç gerilmeleri içeren sert kabuk, parçanın aşınma ve yorulma dayanımını artırırken, içyapıdaki yumuşak çekirdek gerekli tokluğu sağlar.

Bir başka ifadeyle karbonlama; mil ve dişli çark gibi yüksek zorlamalara maruz kalan makine parçalarının yüzey özellikleri iyileştirilerek, yüksek yüzey sertliği, yorulma dayanımı ve aşınma dayanımı elde etmek için kullanılan yaygın bir yöntem olarak da tarif edilir. Karbonlama işleminde yüzeyde ve kabuk bölgesinde basma, çekirdek bölgesinde ise çekme kalıntı gerilmeleri meydana gelir. Yüzeyde oluşan basma kalıntı gerilmeleri eğme ve burma zorlamalarında faydalı olmaktadır. Sementasyon işlemi, aşınma, eğilme ve burulma yorulma dayanımı ile temas yorulma dayanımlarının yüksek olmasını sağlar.

Sementasyon işlemi yapılmış çeliklerin yüzey kısmında özelliklerini ciddi olarak etkileyen diğer mikro yapılar da meydana gelebilir [22]. Bunlar; kalıntı ostenit, kaba karbürler, tane sınırı karbürleri ve yüzey oksitleri olabilir. Bu mikro yapı ve çelik malzeme yüzeyinde oluşan kabuk malzemenin yorulma dayanımını, temas yorulma dayanımını, sertlik ve aşınma dayanımını etkiler [22].

Karbonlama işleminden sonra, karbon miktarı genellikle yüzeyde en yüksek olacak şekilde çekirdeğe doğru bir azalma gösterir. Etkili sementasyon derinliği, Vickers sertliği 550 VSD olan karbonlanmış ve sertleştirilmiş tabaka ile yüzey arasındaki dikey uzaklık olarak tarif edilmektedir. Etkili sementasyon derinliğine etki eden faktörler; sementasyon sıcaklığı, sementasyon süresi, karbonlama ortamının karbon potansiyeli, çeliğin kimyasal bileşimi, parçanın şekli ve büyüklüğü ve su verme esnasındaki soğutma hızıdır. Soğutma hızına bağlı olarak sementasyon işleminden sonra malzeme yüzeyinde meydana gelen martenzit yapı yorulma ömrüne olumlu yönde etki eder.

Karbonlama işlemi çeşitli karbon verici ortamlarda yapılabilir:

- **Kutu (veya katı ortamda) karbonlama:** parçalar kapalı çelik kutular içinde odun kömürü ve hızlandırıcı kimyasallardan oluşan bir karışımın içine gömülür. Karbon kaynağı kömürden oluşan CO gazıdır. Kutu karbonlama, genellikle kabuk kalınlığının 1 mm den fazla, kabul edilebilir kabuk kalınlığı sapmalarının

en az 0,2 mm olduğu uygulamalarda kullanılır. Karmaşık araçlar gerektirmedinden yatırım maliyeti düşük olduğundan özellikle seri üretim yapmayan düşük kapasiteli işletmeler için uygun bir yöntemdir.

- **Gaz karbonlama:** parçalar kapalı fırınlarda, CO – CO₂ esaslı, metan veya propan içeren gaz karışımlarında karbonlanır. Karbon kaynağı CO gazı veya çeşitli hidrokarbon radikalleridir. Gaz karbonlama seri üretimde yaygın olarak kullanılan kabuk kalınlığının dar sınırlar içinde kontrol edilebilirliği otomasyona ve doğrudan su vermeye elverişli bir yöntemdir.
- **Sıvı (veya tuz banyosunda) karbonlama:** parçalar ergimiş siyanür banyolarına (Na, CN, KCN, NaCO₃, NaCl) daldırılarak karbonlanır. Karbon kaynağı işlem sırasında oluşan CO gazıdır. Sıvı karbonlama genellikle istenen kabuk kalınlığı 1 – 2 mm den fazla olmayan görece küçük ve fazla girintili çıkıntılı olmayan parçalara uygulanır.

Bunlara ilave olarak yüksek sıcaklıkta karbonlama, endüksiyon karbonlama, vakumda karbonlama ve akışkan yatakta karbonlama gibi daha az yaygın karbonlama yöntemleri de vardır.

Hassas parçaların sementasyon işlemlerine bağılı olarak şekil ve boyutlarında değişiklikler olabilir. Bu değişiklikleri en aza indirmek için birçok deney çalışması yapmak gerekir.

1.4.2.4. Nitrürleme

Bu ısıtım işlem parçanın azot verici bir ortamda, 480 – 590°C sıcaklık aralığında, onlarca saat tutularak parça yüzeyinin azotça zenginleştirildiği bir yüzey sertleştirme işlemidir. Ferit bölgede yapılan bu işlemde sonra parçaya su verilmesi gerekmez. Nitrürlemenin diğer yüzey sertleştirme işlemlerine üstünlükleri şöyle sıralanabilir; düşük işlem sıcaklığı ve yavaş soğutma nedeniyle parçanın şekil ve boyut değişim miktarı ve çatlama olasılığı çok küçüktür. Yaklaşık 400 – 500 °C kullanım sıcaklıklarında bile sertlikte önemli bir düşüş olmaz. 70 – 72 RSD-C gibi çok yüksek yüzey sertlikleri elde etmek olasıdır. Aşınma ve yorulma dayanımı genellikle daha yüksektir. Korozyon dayanımı çok daha yüksektir. Bu üstünlüklerine karşın nitrürleme

süreleri uzun olduğundan ve özel çelikler gerektirdiğinden maliyeti diğer yüzey sertleştirme işlemlerine oranla daha yüksektir.

Nitrürleme işlemi genellikle gaz (amonyak) veya sıvı (siyanür banyoları) ortamlarda yapılır. İyon nitrürleme, basınçlı nitrürleme, akışkan yatakta nitrürleme, katı nitrürleme gibi yöntemler de kullanılmaktadır. İyon nitrürleme modern sertleştirme yöntemlerinden birisidir. Nitrürleme süresi kısadır, nitrürleme sonrası elde edilen içyapıların sertliği ve kalınlığı ayarlanabilir, çok karışık parçalar homojen olarak nitrürlenebilir.

Nitrürleme, Al, Cr, Mo gibi nitrür yapıcı katkılar içeren alaşımlı çeliklere uygulanır. Nitrürlenmiş yüzey sertliği ve nitrürleme hızı bu alaşım katkılarının türü ve miktarına bağlıdır. Çeliğin içerdiği alaşım elementlerinin miktarı ve azotun atomal olarak çelik yüzeyinden içeri yayınıp nitrür oluşturma oranı arttıkça yüzey sertliği artar. Başlıca nitrür yapıcı elementler şunlardır: Al, Ti, Cr, Mo ve V.

1.4.2.5. Siyanürleme ve karbonitrürleme

Bu yüzey ısıtma işleminde siyanür banyolarında ve amonyak eklenmiş gaz karbonlama ortamında, 800 – 850 °C sıcaklıklarda yapılan bu işlemlerle çelik yüzeyine yaklaşık eşit miktarlarda karbon ve azot birlikte emdirilir. İzleyen su verme işlemiyle yüzey sertleştirilir. Uygulamada kullanılan işlem süreleri birkaç saat, kabuk kalınlıkları ise en çok birkaç yüz mikron ile sınırlıdır. Yüz mikron üzerinde kalınlıklar için karbonitrürleme daha uygundur. İşlem sıcaklıkları düşük, kabuk kalınlıkları az olduğundan, bu işlemler karbonlamadan daha ekonomiktir.

Yapıdaki azot sertleşebilirliği önemli ölçüde artırarak su verilmesini kolaylaştırırken, martenzit başlangıç sıcaklığını düşürdüğünden yüzeyde önemli miktarda kalıntı ostenite neden olur. Yük taşıyıcı hassas parçalarda, gerilimler nedeniyle martenzite dönüşen kalıntı ostenit boyutsal sorunlara neden olabilir.

Siyanürlenmiş veya karbonitrürlenmiş kabuğun darbe dayancı karbonlanmış kabuğa oranla çok düşük olduğundan, darbeli çalışan parçalarda karbonlama tercih edilmelidir. Kabuk kalınlığının sınırlı olması da birçok uygulamada karbonlamayı gerektirir. Siyanürleme ve karbonitrürleme de işlem sıcaklıkları daha düşük soğutma şartları daha ılımlı olduğundan, çatlama olasılığı ve şekil ve boyut değişimi özellikle

siyanürlemede karbonlamadakine oranla çok daha azdır. Karbonlamaya uygun çeliklerin yanı sıra ıslah çelikleri de aşınma dayanımını artırmak üzere siyanürlenebilir veya karbonitrürlenebilir.

1.4.2.6. Plazma difüzyonu ile yüzey kaplama

Plazma maddenin dört halinden biridir. Maddeler enerji farklarından dolayı hal değiştirirler. Kısaca gaz halindeki bir maddenin enerjisi artırılarak plazma elde edilebilir. Plazma ile yüzey modifikasyonu işlemi plazma haline getirilecek gaz karışımında (plazma nitrürasyondaki azot-hidrojen gaz karışımı gibi) vakum ortamında gerçekleştirilir. Gaz yüksek gerilim altında iyonize olması ile iletken hal alır. Pozitif yüklü gaz iyonları katodik iş parçası tarafından çekilirler. İş parçasının sıcaklığı iyon bombardımanı ile yükseltilir. Çelik ve azotun kimyasal reaksiyonu ile yüzey bölgesinde nitrürler oluşturulur. Hidrojen çelik yüzeyini oksijenden serbest hale getirir ve hızlı bir şekilde azot difüzyonunu sağlar.

1.4.2.7. Plazma püskürtülmesi ile yüzey kaplama

Plazma hamlacı olarak adlandırabileceğimiz düzenek bünyesinde oluşturduğu inert gaz ile yönlendirilmiş plazmaya eklenen kaplama spreyini (tozu) iş parçası yüzeyine yönlendirir ve bu yüzeyler üzerinde parçacıklar deforme edilir ve darbe üzerine yapışır. Plazma püskürtülmüş kaplamanın önemli uygulama alanları türbin kanatlarının korozyon ve oksidasyona karşı korunması için yapılan kaplamalardır [23].

1.4.2.8. İyon implantasyonu ile yüzey kaplama

İyon implantasyonu bir iyonun malzeme yüzey bölgesine az bir derinlikte aşılması olarak özetlenebilir. İmplantasyon yöntemleri içerisinde pratik değeri olan ve uygulama alanı bulan tek yöntem ışıklı boşalma bölgesinin anormal (instabil) boşalma bölümü içinde oluşan plazma ortamında yapılan iyon implantasyonudur.

İyon implantasyonu soğuk bir işlemdir. İşlem gören malzeme çökelek oluşumu, tane büyümesi, boyutsal değişiklikler gibi metalürjik değişikliklere neden olabilen yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmaz.

1.4.2.9. Kimyasal buhar yığma (cvd) ile yüzey kaplama

Danışman ve Kılık'ın bildirdiğine göre Kimyasal buhar yığmayı Squeda yüzeyde filim tabakası elde etmek için gaz veya buhar faz bileşenlerinin kimyasal olarak reaksiyona girdiği ve reaksiyon sonucu oluşan katı ürünlerin malzeme üzerine çöktürüldüğü bir yöntemi olarak belirtmiştir [24].

CVD metodu 1000°C mertebelerinde yüksek işlem sıcaklıkları gerektirmektedir. Yüksek işlem sıcaklıklarının doğuracağı problemleri gidermek için plazma ortamında kimyasal buhar yığma (PACVD) yöntemi uygulanmaktadır. Yöntemle 500°C mertebelerinde işlem gerçekleştirilebilmektedir. PACVD yönteminde reaksiyona girecek parçacıklar reaksiyon kabına girmeden önce buhar halindedir [25].

1.4.2.10. Fiziksel buhar yığma (pvd) ile yüzey kaplama

Fiziksel buhar yığma yöntemi, yüksek vakum ortamında fiziksel olarak üretilen atomların, iyonların veya moleküllerin kaplanacak malzeme üzerine biriktirilmesi olarak özetlenebilir. PVD metodunda reaksiyona giren parçacıklar vakum odasında katı halden buhar haline geçer [25].

PVD uygulamaları kaplama malzemesinin kaplanacak malzemeye transfer metotlarına göre alt metotlara ayrılabilir. Bu metotları, buharlaştırma kaynaklı PVD, Püskürtme kaynaklı PVD şeklinde özetleyebiliriz. Bu yöntemlerin alt kırımları da mevcut olup bu hususlarda yapılmış çalışmalar mevcuttur. Bu detayları, Reaktif gaz ortamında buharlaştırma kaynaklı PVD, DC diyod saçılma (sputtering), RF (radyo frekans) kaynaklı saçılma, Triyod saçılma, Bias saçılma, Magnetron kaynaklı saçılma, Reaktif gaz ortamında saçılma başlıkları altında kapsayan çalışmalar yapılmıştır [24].

1.5. Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması

Maliyetlerinin uygunluğu ve kullanım alanının geniş olması sebebiyle, karbonlu çeliklerin, diğer çeliklere nispeten, kullanım alanı daha yaygın ve üretim hacmi daha büyüktür. 1940'lı yılların başlarında kısa bir süre alaşımlı çelik kullanımı yaygınlaşmış olmasına karşın, alaşım elementlerinin pahalı olması, aşırı derecede tüketilmesi ve mevcut üretimin ihtiyaca cevap veremez hale gelmesi, sade karbonlu çeliklerin kullanımını hızla artırmıştı.

Karbonlu çelikler, üretim maliyetlerinin düşük olması ve ısıtma işlem türlerine olan yakınlıkları nedeniyle günümüzde pek çok parçanın üretiminde en büyük paya sahiptir. Sade karbonlu çeliklere klasik ısıtma işlem yöntemlerini uygulamak kolaylıkla mümkündür [26,27,28,29,30,31].

Sade karbonlu çeliklerin, alaşımlı çeliklere oranla, daha düşük sertleşme yeteneği, kolay ve ucuz temin edilebilirliği, yüzey sertleştirmede derinliğin iyi kontrol edilebilirliği, bu çelikleri daha avantajlı hale getirmektedir [32].

Karbonlu çeliklerin, 1000 serisi kükürdü giderilmemiş olarak 50 türde, 1100 ve 1200 serisi kükürdü giderilmiş olarak yaklaşık 30 değişik türde üretilmektedir. Bunlar karbon içeriğine göre üç temel grupta toplanmaktadır.

1.5.1. Düşük (% 0,10 – 0,25) karbonlu çelikler

Düşük karbonlu çelikler için üç temel ısıtma işlemi uygulanmaktadır:

- Belli üretim işlemleri için çeliklerin fırınlanarak hazırlanmasında kullanılan ısıtma işlemler
- Yüzey sertleştirme işlemleri
- Mekanik özellikleri geliştirmek için uygulanan temperleme ve sertleştirme.

Düşük karbonlu çeliklerin temperlenmesi ve sertleştirilmesiyle elde edilebilen mekanik özellikler genellikle pahalı değildir. Fırınlama işlemine bir örnek olarak, soğuk çekilen telden yapılan soğuk haddelenmiş düşük karbonlu cıvataların üretim işlemleri verilebilir.

Bunların, talaşın uzun ve kıvrık çıkması, serbest ferrit oranının sementite, dolayısı ile perlitte göre yüksek olması ve kesilen parçaya ait talaşın kesici takım

yüzeyine sıvanması nedeniyle, tornada işlenebilirlikleri iyi değildir. İşlenebilme özelliklerinin geliştirilmesi için çoğu kez ısıt işlemler gerekebilir. Kükürt içeriği dışında kalan alaşım elemanları işlenebilirliği pek etkilemez. Bu çeliklerin işlenebilirliği, ısıt işlemlerle artırılabilir.

1.5.2. Orta (% 0,25 – 0,55) karbonlu çelikler

Sahip oldukları yüksek karbon içeriği sebebiyle, genellikle sertleştirilmiş ve temperlenmiş olarak kullanılırlar. Sertleştirme ve temperleme sıcaklığının uygun seçimiyle, çok farklı mekanik özelliklere ulaşılmak mümkündür. En geniş kullanım alanına sahip olan karbonlu çelik türüdür. Mekanik özelliklerinin uygunluğu sebebiyle, akslar, dişli çarklar, zincir baklaları, krank milleri, kaplinler, rotlar ve pek çok diğer makine parçasının üretiminde % 0,25 – 0,55 karbonlu çelikler kullanılmaktadır.

Bu çelikler, daha çok suda sertleştirilirler, ancak derinliğe sertleşmenin arzulanmadığı durumlarda, çatlama ve çarpılmanın önüne geçmek için yağda da sertleştirilebilmektedir. Yüzey ve derinliğine sertleşebilirlikleri; bileşimlerinde bulunan manganez, silisyum ve üretimden gelen diğer artık elementlerin miktarına göre oldukça hassas bir değişim gösterir.

1.5.3. Yüksek (% 0,55 – 1,00) karbonlu çelikler

Orta karbonlu ve perlitik çelik olarak kabul edilen bu çeliklerin; % 0, 25 – 0,55 karbon içerikli çeliklerden işlenebilirlikleri sınırlı, soğuk biçimlendirilebilirlikleri çok zor ve kaynak yeteneklerinin düşük ve üretim maliyetlerinin yüksek olması nedenleriyle, kullanım alanları daha sınırlıdır [26,27,28,29,30,31].

AISI 1070 gibi yüksek karbonlu çelikler, yorulma dirençlerinin yüksekliği nedeniyle, yay ve yüksek çekme dayanımlı halatların üretiminde kullanılabilir. Bunlar tam olarak sertleştirilmiş durumda martemperlenerek, yaklaşık 55 ve daha yüksek Rc değerlerinde, aşırı aşınma etkilerine maruz yerlerde ve çeşitli kesici el aletlerinin yapımında başarı ile kullanılmaktadır [26,27,28,29,30,31].

Bu grup çeliklerden üretilen malzemeler genellikle klasik sertleştirme yöntemleriyle sertleştirilebilmektedir. Ancak sertleştirmede zaman zaman ostemperleme ve martemperleme gibi özel ısıt işlem tekniklerinin kullanıldığı da olmaktadır. Yağda ya

da suda sertleştirmede, karbonlu çeliklerin zorlamaya maruz kalan bölümleri ve kesici kenarlar için su, sertliğin fazla gerekli olmadığı bölümlerde ise, yağ kullanılmaktadır. Yüksek sertlikte yeterli süneklik ve tokluğun elde edilebilmesi, çatlak oluşumunun engellenebilmesi ve çarpılmanın azaltılmasında özel işlemlerin titizlikle uygulanmasına bağlıdır. şaftlar, biyel kolları gibi pek çok makine parçasının üretiminde 1055 ve 1060 gibi çelikler kullanılabilir [33].

Yapıdaki karbon ve manganez miktarına göre, diğer çeliklerin de bu tür uygulamalara elverişli olanları vardır. Yüksek karbonlu çelikler alaşımlı çeliklerle karşılaştırıldığında, onlara göre sertleşebilme yetenekleri daha azdır. Karbon ve manganezin uyumlu olmayan kombinasyonu nedeniyle, bu çelikler derinliğine sertleştirilmeye fazla yatkın değildirler [32].

ekiler, vidalar, çizme takımları, kesici takımlar, baltalar, matkap uçları, bıçaklar ve bant kesicileri gibi pek çok alet ve takımlar bu tür çeliklerden yapılabilir. Bu takımların kesici kenarlarının sertleştirilmesi için genellikle ısıtılmış su ya da yağ banyoları kullanılmaktadır. Tarım aletlerinden abrasiv aşınmaya maruz kalan kısımların büyük bir bölümü bu grup çeliklerden üretilmektedir. Karbonlu elikler, martenzitik yapı oluşturularak sertleştirilip, daha sonra temperlendiklerinde, aynı sertlikteki alaşımlı çeliklerle kıyaslanabilir çekme dayanımı özellikleri gösterebilmektedir. Sertlik açısından karşılaştırıldığında, sade karbonlu çeliklerin yüzey sertlikleri alaşımlı eliklerinkinden daha yüksek olmakta, ancak derinliğine sertleşme yeteneği alaşımlı çeliğe göre daha düşük değerlerde bulunmaktadır [26,27,28,29,30,31,32].

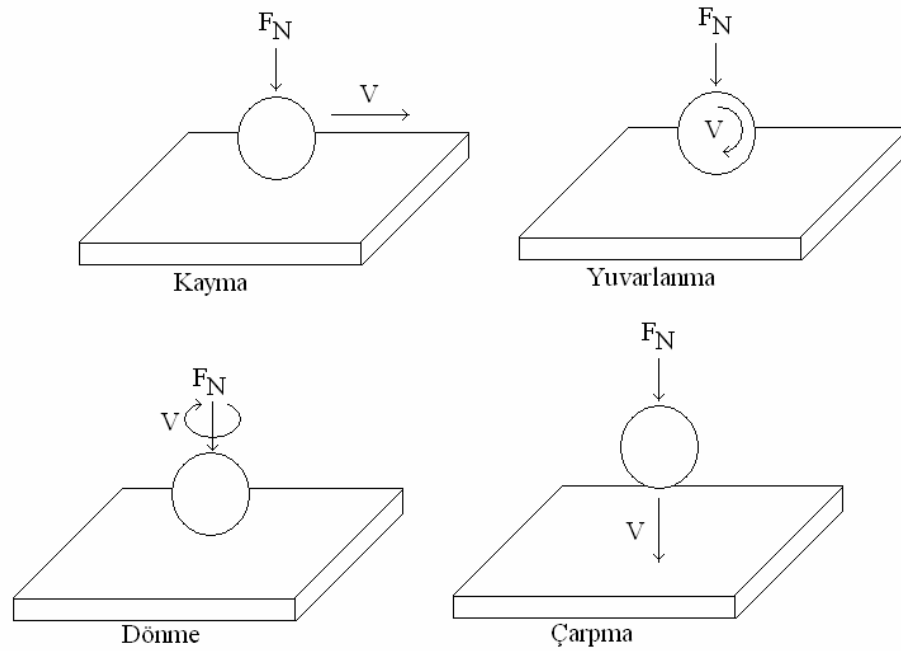
Yüksek karbon içeren bu çeliklerin sünekliğinin ve tokluğunun çok az olması, kesilme ve işlenmelerini güçleştirir. Söz konusu çeliklerin talaş kaldırma işlemlerine hazırlanması, ancak yumuşatma tavı uygulanması ile gerçekleşebilmektedir [26,27,28,29,30,31].

BÖLÜM 2

SÜRTÜNME ve AŞINMA

2.1. Sürtünme

En genel manada sürtünme, temasta olan ve birbirine göre bağıl hareket yapan elemanlar arasında harekete karşı ortaya çıkan direnç olarak tanımlanır. Sürtünme hareketin cinsine göre, kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, dönme veya çarpma şeklinde olmaktadır



Şekil 2.1. Tribolojik sistemlerin kinematikleri.

Temas eden yüzeylerde, sürtünme kuvvetleri güç kaybına, aşınma ise işleme toleranslarının kötüleşmesine sebep olmaktadır. Diğer taraftan, debriyaj ve fren balatası ve de ayakkabı tabanları gibi bazı malzemelerde sürtünme sağlanabilecek özellik istenmesine rağmen, aşınma istenmeyen bir olaydır. Buna karşılık frezeleme ve taslama gibi talaşlı imalat işlemlerinde ise sürtünme için minimum enerji harcayarak maksimum aşınmanın meydana gelmesi beklenir.

Bilindiği gibi, iki malzeme birbirlerine temas edecek şekilde yerleştirilirse, bu malzemelerden birini diğeri üzerinde kaydırmak için uygulanan kuvvete sürtünme kuvveti direnç gösterir.

F_s : Kaymayı başlatan kuvvet.

F_n : Temas yüzeyine etki eden normal kuvvet.

μ_s : Statik sürtünme katsayısı.

μ_k : Kinetik sürtünme katsayısı olmak üzere;

$$F_s = \mu_s \cdot F_n \quad (2.1)$$

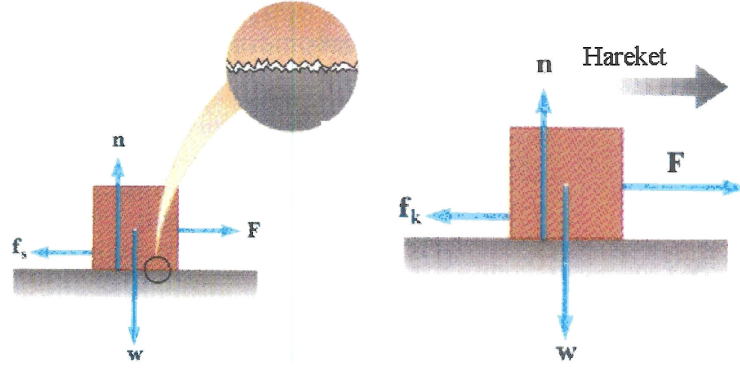
Bağıntısı mevcuttur.

Kayma başladıktan sonra, sürtünme kuvvetinde bir azalma olur ve bu durumda;

$$F_k = \mu_k \cdot F_n \quad (2.2)$$

Bağıntısı yazılabilir.

Burada $\mu_k (<\mu_s)$ ' dir.



Şekil 2.2. Statik ve dinamik sürtünme esnasında cisme etki eden kuvvetler.

Çok iyi torna edilmiş metalik bir malzemenin yüzeyi mikroskop altında incelenirse yüzeyde çok sayıda girinti ve çıkıntıların yani pürüzlerin bulunduğu görülür. Metal yüzeyi parlatıldığında, pürüzlerin boyutunda on misli bir azalma olur fakat yine de yüzeyde pürüzler bulunur.

Ne kadar hassas işlenmiş veya parlatılmış olursa olsun, iki yüzey birbiriyle temas ettiğinde, gerçek temas bir takım pürüzlerin birbirlerine dokunduğu noktalarda olur. Bu durumda, yüzeye etki eden yük, sadece pürüzlerin birbirlerine temas ettiği noktalardan desteklenir ve yüzey alanının küçük bir kısmı yükü taşır.

2.1.1. Kayma sürtünmesi

Birbirine temas eden veya birbiri üzerinde kayan iki yüzey ne kadar hassas işlenseler bile gerçek temas alanı görünür temas alanının 0,01 ila 0,1' i kadardır. Gerçek temas sadece küçük pürüz tepciklerinde meydana gelecektir.

Kayma sırasında teğetsel kuvvet arttırıldığında, temas noktalarındaki birleşmeler kaymaya başlar. Tüm birleşmelerin kesilmesi için gerekli sürtünme kuvveti, birleşmelerde malzemenin gerilmesi ile orantılı olarak değişecektir.

$$F_s = A_r \cdot S \quad (2.3)$$

F_s : Kesme için gerekli sürtünme kuvveti.

A_r : Gerçek temas alanı.

S: Malzemenin kesme gerilmesi.

Pratik uygulamalarda kayma sürtünmesi bazı faktörlerden de etkilenebilmektedir.

2.1.2. Yuvarlanma sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, yüklü bir kürenin veya silindirin, düz bir kütle yüzeyi üzerinde yuvarlanması sırasında oluşur. Yük altındaki silindirin yuvarlanmasında sürtünme direnci, silindirin merkezine uygulanır. Bu sürtünme, aşağıda gösterilen bağıntıya uygun olarak yük ile doğru orantılı ve yuvarlanma elemanın çapı ile ters orantılıdır.

$$F_r = k.(W^n / D^m) \quad (2.4)$$

Burada;

k : Malzeme ve yüzey şartlarına bağlı sabit.

F_r : Yuvarlanma sırasındaki sürtünme direnci.

W : Yük.

D : Silindir veya kürenin çapı.

n, m : DeneySEL sabitlerdir.

Yuvarlanma sürtünme katsayısı " μ_T " kayma sürtünmesinde olduğu gibi aynı yöntemlerle bulunur.

$$\mu_T = F_r / W \quad (5)$$

Genel olarak yuvarlanma sürtünme katsayısı sürtünme katsayısına göre çok düşüktür. Statik ve kinetik sürtünme katsayıları ile yaklaşık olarak aynıdır. [34].

2.2. Sürtünme Mekanizmaları

Sürtünme kavramı, birbiri üzerinde hareket eden yüzeyler arasına yağlayıcı madde bulunup bulunmaması bakımından, temas yüzeylerinin durumuna göre; kuru, yarı sıvı ve sıvı sürtünme olmak üzere üç başlık incelenebilir.

2.2.1. Kuru sürtünme

Genel olarak yabancı maddelerden arındırılmış yüzeylerin atmosfer şartlarındaki sürtünme hali kuru sürtünme olarak kabul edilmektedir. Gerçek anlamda kuru sürtünme, her türlü yabancı maddeden tam olarak arındırılmış, yüzeylerin, mutlak basınçta birbirlerine göre izafi olarak hareket ettirilmeleri durumunda meydana gelmektedir.

Mevcut sistemlerin büyük çoğunluğu normal atmosfer şartlarında çalışmaktadır. Atmosfer şartlarındaki sürtünme durumlarında, yüzeyler çok iyi bir şekilde temizlenmiş olsalar dahi, sürtünme sonucunda sıcaklığı yükselen yüzeylerde çok ince oksit tabakaları oluşmaktadır. Bu oluşum, yüzeylerin sürtünme ve aşınma davranışlarını önemli ölçüde etkilemektedir [35].

2.2.2. Sınır (yarı sıvı) sürtünme

Sürtünen yüzeylerin arasına yağlayıcı olarak tanımlanan maddelerin girmesi veya gönderilmesi durumunda yüzeyler artık kuru olmayacaktır. Bu durumda sürtünme yağlanmış yüzeyler arasında meydana gelecektir. Yağlanmış yüzeyler arasında sınır sürtünmesi ve film sürtünmesi şeklinde tanımlanan sürtünme mekanizmaları oluşmaktadır. Teorik olarak kuru sürtünme ile film sürtünmesi arasındaki sürtünme durumu sınır sürtünmesi olarak tanımlanır.

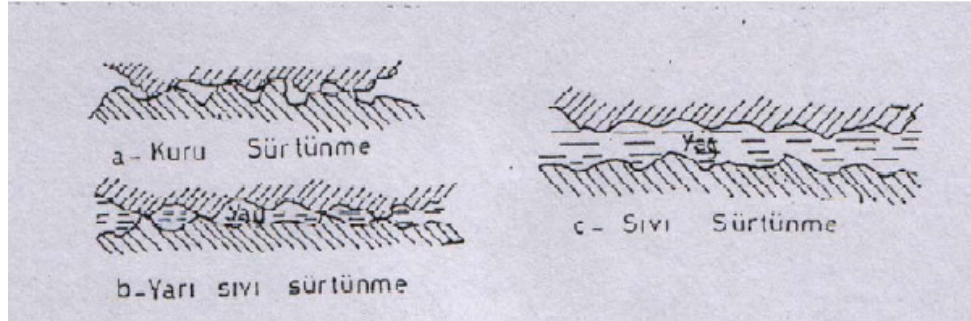
Birbiri ile temasta olan iki metal yüzeyi arasına belirli fiziksel özelliklere sahip üçüncü bir madde (yağlayıcı) koyulup, mevcut yük ve kayma hızı koşullarında kesintisiz bir yağlayıcı film oluşmadığı kabul edildiğinde, sürtünme direncinin üç temel bileşeni olacaktır: Adhesiv bileşen, deformasyon bileşeni ve yağ filminin kayma direnci. Yüzeylerin iyi işlenmesiyle deformasyon direnci, kayma hızının arttırılması ve yağlayıcı maddelere değişik türlerde katkı maddelerinin ilave edilmesiyle de adhezyon

direnci büyük bir azalma gösterecektir. Böylece hem sürtünme direnci hem de aşınma miktarı azalır.

Sınır ve kuru sürtünme durumlarında, sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi, tutma bırakma denilen olayı meydana getirirler. Aşınmış debriyaj ve fren balatalarında, özellikle küçük kayma hızı bölgelerinde bu olay sonucunda meydana gelen sarsıntı ve ses, yine ıslak parmak ucunun bir cam bardak kenarına sürtünmesi sonucunda çıkan yüksek frekanstaki ses titreşimleri tutma-bırakma olayının sonucudur. Pratikte tutma-bırakma titreşimleri, küçük kayma hızları bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Bu olayı engellemek için sistemin yaylanma rijitliğini arttırmak veya sürtünme katsayısının, kayma hızı ile değişim eğilimini azaltmak en uygun çözümlerdir.

2.2.3. Sıvı (film) sürtünme

Yüzeyler arasında bir yağlayıcının bulunması halinde sürtünme direncinin azaldığı deneysel olarak bilinmektedir. En ideal tribolojik ortam, iç sürtünme direnci çok düşük olan kesintisiz bir ara tabakanın oluşumu ile ortaya çıkar. Bu durumda bağlı hareket yapan yüzeyler arasında oluşabilecek adhesiv ve deformasyon dirençleri ortadan kalkar. Uygun ara tabaka yani yağlayıcı seçimi ile kontrol altında tutulabilecek bir sürtünme ve aşınma durumu elde edilir.



Şekil 2.3. Kuru, sıvı ve yarı sıvı sürtünmeleri.

2.3. Sürtünme Katsayısı Değerleri

Vakumda, çok iyi temizlenmiş metal yüzeylerini birbirleri üzerinde kaydırmak mümkün değildir. Kayma kuvveti, birleşme noktalarında yüksek plastisite ve tamamen yapışmaya sebep olur. Bu olay metalden yüzey filmini kaldıran ortamlarda (örneğin H_2) ve atmosfer dışında önemli bir problemdir. Çok miktardaki oksijen veya H_2O , metalik birleşme noktalarında oksit filmi oluşturarak μ değerini büyük ölçüde azaltır.

Altın haricindeki bütün metaller, yüzeylerinde belirli bir kalınlıkta oksit filmi oluştururlar. Pürüz uçlarında oluşan oksit filmleri arasındaki birleşme noktalarının, kayma esnasında ana metalden daha gevrek ve düşük mukavemetli oldukları saptanmıştır. Bu durumda yüzeyler ince oksit tabakası üzerinde, metalin kendisinden daha düşük gerilme değerlerinde kayacak ve buna bağlı olarak μ değeri 0,5 – 1,5 arasında azalacaktır.

Yumuşak metallerin birbirleri üzerinde kaymaları durumunda (örneğin kursun-kursun üzerinde) birleşme noktaları daha zayıftır, fakat alanın daha geniş olması nedeniyle μ değeri daha büyük olur. Sert metallerin kayması durumunda ise (çelik-çelik üzerinde) birleşme noktaları az fakat mukavemetin fazla olması nedeniyle sürtünme yine büyüktür.

2. 4. Aşınma

Günümüz sanayisinde yaygın olarak kullanılan tribolojik sistemlerindeki üç büyük problemten bir tanesi de aşınmadır. Aşınma, teknik olduğu kadar ekonomik bir problemdir. Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir araştırma neticesinde, aşınma mekanizmalarından kaynaklanan malzeme kaybının mali değerinin yıllık yüz milyar dolar olduğu tespit edilmiştir. Bu da brüt milli hâsılanın % 6 – 7' sine tekabül etmektedir.

Aşınma genel anlamda, katı yüzeylerden mekanik yolla istenmeyen bir şekilde malzeme kaybının ortaya çıkması olayıdır. Üretilmiş parçaların değiştirilmesine neden olan kusurların başında gelmektedir. Aşınmaya harcanan maliyet, tamir ve değiştirme surelerinin yol açtığı kayıpların tüm ülkeler için ne kadar büyük olacağı kolaylıkla anlaşılabilir [36].

Moore' a göre aşınma; Kullanılan malzemelerin yüzeylerine gaz, sıvı ve katıların teması neticesinde çeşitli etkenlerle malzemenin yüzeyinden mikro tanelerin kopması sonucu meydana gelen yüzey bozulması olarak tanımlanmıştır.

DIN 50320 ve ASTM G4093 standartlarına göre aşınma, "kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması sonucu mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılmasıyla meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması" şeklinde tanımlanmaktadır. Aşınma, yataklarda, pistonlarda, supaplarda, tekerleklerde, kesici uç ve ağızlarında, dişlilerde kırma ve öğütme değirmenlerinde, yol, toprak ve ziraat makinelerinde, türbin kanatlarında, maden cevheri üretim cihazlarında vb. gibi tüm karşılıklı sürtünmeli çalışan elemanların bulunduğu yerlerde meydana gelmektedir.

Aşınma, bir sistem karşılığıdır, malzeme özelliği değildir. Aşınma, dinamik parametrelerin, çevresel parametrelerin ve malzeme parametrelerinden meydana getirilen bir sürtünme sistemi içerisindeki küçük bir değişiklik ile bile, büyük ölçüde değişiklikler meydana getirir.

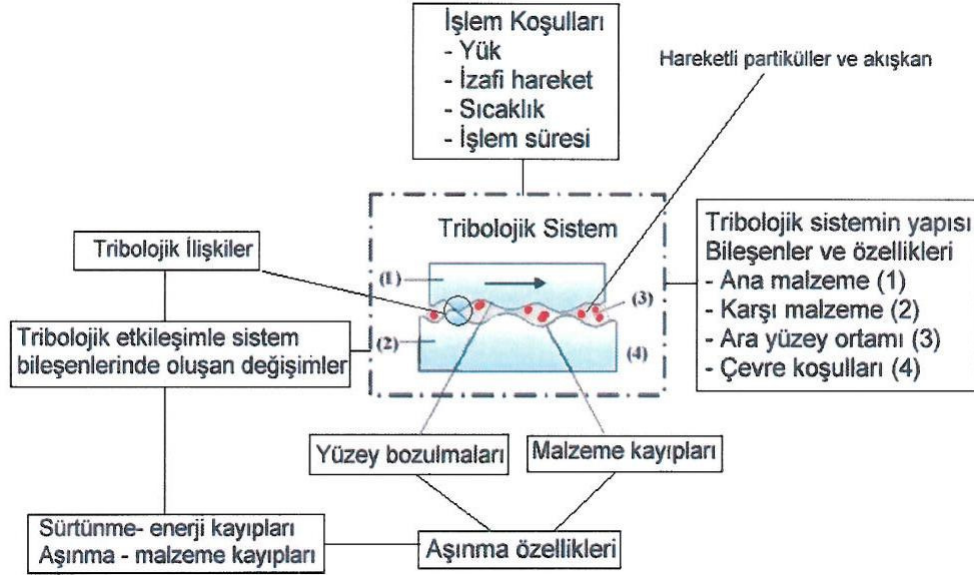
Aşınma temas türleri, aşınma sistemleriyle ilişkili olduğundan, temas ara yüzündeki gerçek ve anlaşılır temas koşulları, bu temas yapılandırmalarıyla ilgili ayrıntılar olmaksızın ortaya çıkmaktadırlar. Temasın şiddeti, bu aşınma mekanizmalarının en basit şekilde ve direkt olarak anlaşılması bakımından elastik temas veya plastik temas olmaktadır. Sürtünme sistemi ise, dinamik parametreler, malzeme parametreleri ve atmosferik parametreler olarak tanımlanmaktadır [37].

Çeşitli makine elemanları ve mühendislik malzemelerinin ömürlerine büyük oranda etki eden aşınma, tamamen ortadan kaldırılamayan bir malzeme hastalığı olsa da; yakın zamanda yapılan çalışmalar neticesinde aşınma karakteristiklerinin malzeme cinsine ve bununla alakalı olarak sürtünme esnasında teşekkül eden yüzey filminin özelliklerine geniş ölçüde bağlı olduğu görülmüştür.

Aşınmayı en etkili önleme yöntemi, servis şartlarıyla uyum gösteren malzeme sertlik ve mikro yapı optimizasyonunu sağlamaktır.

2. 5. Aşınmanın Temel Unsurları

Bir aşınma sisteminde temel elemanlar; ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük (temas kuvveti), izafi hareket ve çevredir. Bütün bu elemanların oluşturduğu sistem, "Tribolojik Sistem" olarak adlandırılır [38].



Şekil 2.4. DIN 50320 normuna göre tribolojik sistem.

2.5.1. Ana malzeme (aşınan)

Fiziksel ve kimyasal özellikleri, yüzey yapısı, şekil durumu tamamen belirli olan ve aşınma özelliği incelenen katı cisim şeklinde tanımlanabilir.

2.5.2. Karşı malzeme (aşındıran)

Aşınmanın oluşumunda başlıca öneme sahip olan karşı sürünme elemanı, katı bir cisim, sıvı veya gaz olabilir. Bu eleman temel sürtünme elemanı ile birlikte bir aşınma çiftini oluşturmaktadır.

2.5.3. Ara malzeme

Esas sürtünme elemanı ile karşı sürtünme elemanı arasında katı, sıvı, gaz, buhar ya da bunların karışımı şeklinde bulunan maddedir. Ara malzeme, herhangi bir nedenle yüzeyler arasına girmiş kum tanelerinden oluşabileceği gibi, aşınma esnasında kopan parçacıklar da bu görevi üstlenebilir.

2.5.4. Yük

Etki eden kuvvetin büyüklüğü, türü (statik, dinamik, darbeli veya titreşimli olup olmadığı), doğrultusu ve zamana göre değişimi yüklemin şiddetini belirleyen etmenleri oluşturur.

2.5.5. İzafi hareket

Temel sürtünme elemanının karşı sürtünme elemanına göre izafi hareketinin cinsi (kayma yuvarlanma ya da çarpma etkilerinden hangisinin ağırlıkta olduğu), büyüklüğü sistemi içine alan ve genellikle sıvı veya gaz halinde bulunan ortamdır. Su, hava ve gazlar en sık rastlanılan çevre ortamlarıdır. Sistem elemanlarının nem ve koroziyon etkileri ile karşı karşıya kalması aşınmayı hızlandırır.

Aşınan malzeme ve aşındıran malzemeler "aşınma çifti" olarak tanımlanmaktadır. Aşınma çifti ile ara malzemeye de beraberce "aşınma kombinasyonu" denilmektedir. Aşınma çifti ile ara malzeme, sert taneli sıvı, gaz ve buhar halinde olabilir. Aşınma sırasında oluşan aşınma parçacıkları da, ara malzeme gibi etki yaparak aşınma olayına katılırlar [30,40,41].

Birbiri ile temas halinde olan iki cismin gerçekte temas yüzeyi görünenden daha azdır. Çünkü temas eden parçaların yüzeyleri ne kadar ince işçiliklerle işlenirse işlensin, bu parçaların yüzeylerinde pürüz diye bilinen girinti ve çıkıntılar mutlaka bulunacaktır. Temas halinde bulunan iki cisim pürüzler vasıtası ile birbirlerine temas ederler [26,27,28,29,30,31,33] .

2.6. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınma, genellikle önceden bilinen bir hasar tipidir. Birbirleri ile temasta olan malzeme yüzeyleri oksit filmleri veya yağlayıcılar ile korunsalar bile, mekanik yüklemeler altında oksit tabakasının veya yağlamanın bozulması, iki yüzeyin birbiriyle doğrudan temasına sebep olabilir. Temas neticesinde meydana gelen sürtünme malzemenin çalışma koşullarındaki ömrünü ve performansını sınırlayan aşınmaya sebep olur. Ancak uygun alınacak bazı tedbirlerle bu olumsuz durumun en aza indirilmeye çalışılır.

Aşınmayı etkileyen faktörlerden bazıları; malzeme seçimi, sürtünme, yüzeye uygulanan yük, kayma mesafesi, yüzey sertliği, yüzey kalitesi, yağlama şeklinde sıralanabilir.

2.6.1. Malzeme seçimi

Aşınma olaylarının birçoğu malzeme seçimi ile ilgilidir. Doğru seçim yapılmadığında istenilen performans elde edilemediği gibi maddi kayıplar da oluşabilir.

2.6.2. Sürtünme

Her ne kadar çok dikkate alınmasa da, sürtünme ile aşınma arasındaki ilişki göz önüne alınmalıdır. Bazı metallerde sürtünme katsayısı düşük olmasına karşın büyük oranlarda aşınma meydana gelebilmektedir. Bununla birlikte sürtünme katsayısının yüksek olduğu bazı durumlarda aşınmanın çok az olduğu görülebilmektedir.

2.6.3. Yüzeye uygulanan yük

Yüzeye uygulanan yük ile aşınmanın, genellikle doğru orantılı olarak arttığı deneysel çalışmalardan elde edilen bulgulardan anlaşılmaktadır.

2.6.4. Sürtünme mesafesi

Sürtünme mesafesinin artması ile birlikte aşınma miktarında zamana bağlı olarak artış meydana gelmektedir.

2.6.5. Yüzey sertliği

Yüzey sertliği aşınmayı etkileyen en önemli parametrelerdendir. Yüzey sertliği arttırılarak aşınma azaltılabilir ya da aşınmadan kaynaklanan yüzey deformasyonu sabit tutulabilir.

2.6.6. Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü 10 ila 70 μm arasında olmalıdır. Eğer yüzey çok temiz ise yüzeyler arasında soğuk kaynak oluşumu artar. Yüzey kaba olarak işlenmiş ise buda aşınmayı daha fazla artmasına sebep olur.

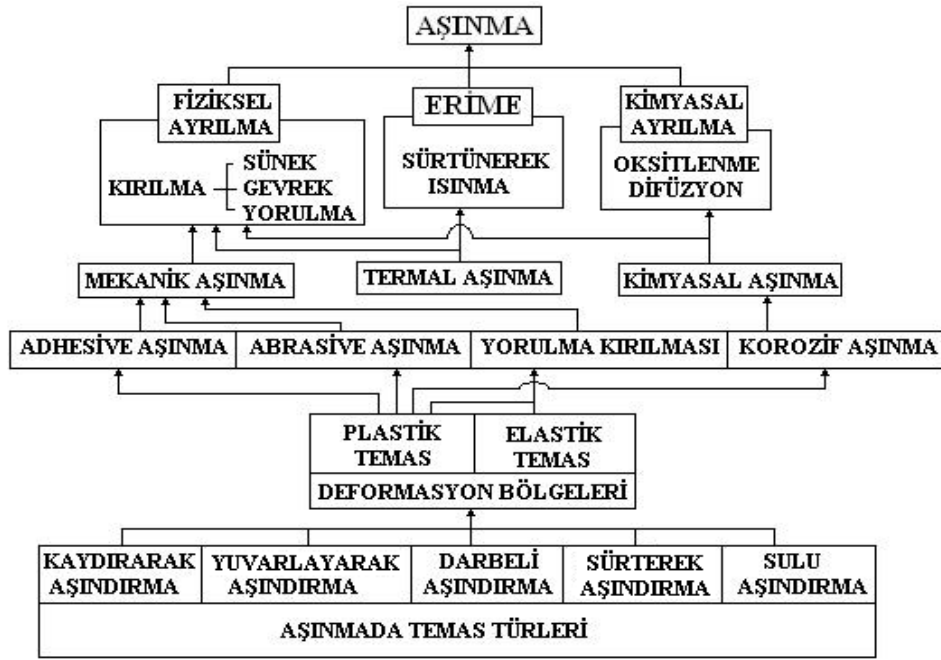
2.6.7. Yağlama

Aşınmaya önleyici önlemlerden bir tanesi de yağlamadır. Sürtünen yüzeyler arasındaki yağlama, metal-metal temasını ve soğuk kaynaklanmayı önler [42].

2.7. Aşınma Mekanizmaları

Pek çok aşınma mekanizması vardır. Bunları aşağıdaki ana başlıklar altında açıklamak mümkündür. Aşınma mekanizmaları;

- **Oluşum mekanizmaları açısından;** adhesiv aşınma, abrasiv aşınma, tabaka aşınması ve yorulma (titreşim) aşınması.
- **Hasarın fiziksel görünüşü açısından;** kayma aşınması, koroziif aşınma, eroziif aşınma ve yuvarlanma aşınması.
- **Aldıkları özel adlar açısından;** öğütmeli aşınma, oymalı aşınma, kazımalı aşınma olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 2.5. Aşınmanın anahtar kelimeleri ve temas tiplerinin tanımlamaları.

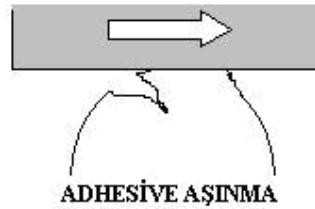
2.7.1. Oluşum mekanizmalarına göre aşınma mekanizmaları

2.7.1.1. Adhesiv aşınma (yapışma aşınması)

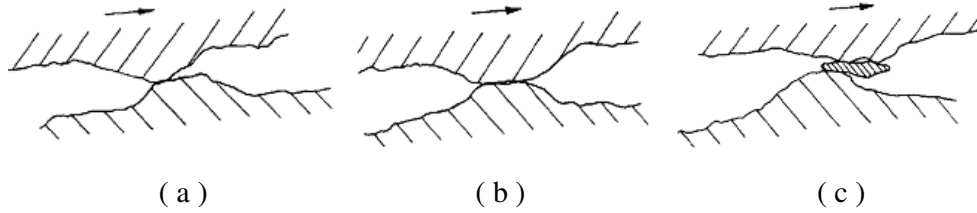
Adhesiv aşınma, birbiriyle kayma sürtünmesi yapan, metal-metal aşınma çiftinde meydana gelen sürtünme olayının bir sonucudur. Birbiriyle temasta bulunan benzer kafes yapılı iki metalik yüzey arasında adhezyon kuvveti dediğimiz bir çekim söz konusudur. Bu kuvvetin meydana gelebilmesi için malzemelerin moleküllerinin birbirine çok yaklaşması gerekir. Temas halindeki iki metal, zaten birbiriyle yüzeylerindeki pürüzler vasıtasıyla etkileşirler. Malzeme ağırlığından veya bir dış kuvvet etkisiyle, çok küçük olan pürüz tepelerine gelecek olan basınç veya gerilme çok büyük olur. Bu kuvveti taşıyamayan pürüzler plastik deformasyona uğrarlar. Bu sırada temas eden yüzey tabakasında kopma, mikro ergime ve mikro düzeyde kaynak olayı meydana gelir. Bunlar, sürtünmenin devamı ile birlikte tekrar yok olur. Bu süreçle,

aşındırıcı parçacıkları oluşturur. Sürtünme olayının ilerleyen safhalarında tam kilitlenme ya da yatak sarma adı verilen durum ortaya çıkabilir [43].

Eğer iki metal aynı sertlikte ise aşınma her iki yüzeyde de oluşur. Metaller arasındaki yağlamanın mükemmel olması, yüzeye etki eden yükün azaltılması ve malzemenin sertliğinin artırılması adhesiv aşınmayı azaltır. Netice olarak adhesiv aşınma; yüzeye etkiyen normal yük, kayma yolu ile ve aşınan malzemenin yüzey sertliği ile orantılıdır [44].



Şekil 2.6. Adhesiv aşınma [37].



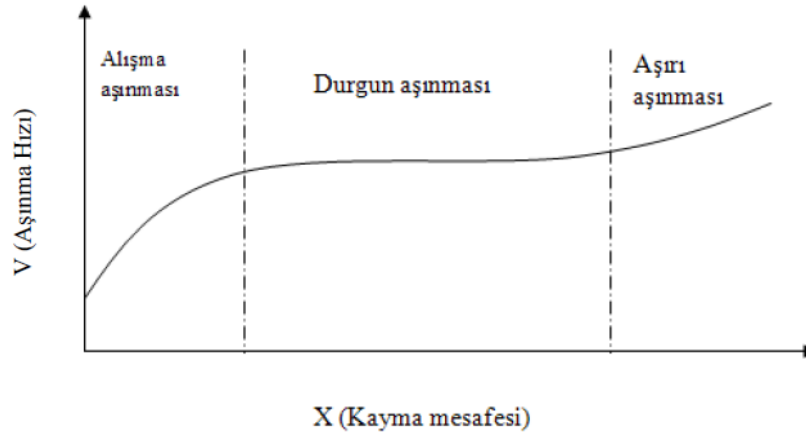
Şekil 2.7. Adhesiv aşınma mekanizmasının oluşumu [45].

Adhesiv aşınmanın önlenmesi için iyi bir yağlamayla sürtünme azalır, ısı uzaklaştırılır. Böylelikle, mikro kaynak bölgeleri önlenir. Ayrıca, birbirini içerisinde çözünmeyen iki metal bir arada kullanılırsa mikro kaynaklanma engellenir. Ama bunun pratikte kullanımı çok sınırlıdır.

Eğer temas eden yüzeylerde çıkıntılar yoksa aşınma meydana gelmez. Dolayısıyla düz yüzeyler kullanmak adhesiv aşınmayı önleyici tedbirlerdendir. Adhesiv aşınmayı meydana getiren metal-metal yüzeylerinde kimyasal filmler oluşturulursa (fosfat kaplama gibi) temas önlenmiş ve aşınma engellenmiş olur [38].

Adhesiv aşınma, üç aşınma bölgesinden meydana gelmektedir. Yüzeyler hareket ettirildiğinde başlangıçta yüzeylerin teması sivri tepeciklerde olduğundan yüksek gerilmeler meydana gelir ve aşınma hızla artar. Sivri noktaların düzleşmesi ile ve kopan partiküllerin yağlar tarafından uzaklaştırılması ile yüzey teması çok geniş bir alana yayılır. Dolayısıyla gerilme düşer ve aşınma miktarı azalır.

Aşınmanın başlangıcına alışma aşınması ya da rodaj denir. Bu aşınma halinde yüklerin yüksek olması tehlikelidir. Tüm yağlamalı sistemlerde rodaj uygun şartlarda gerçekleşir ise faydalıdır. Alışma aşınması ile malzemenin yüzeyi düzgünleşir. Dolayısıyla temas alanı artarak yük düşer. İkinci bölgedeki aşınmaya durgun aşınma denir ve uzun süre önemli bir aşınma meydana gelmez. Tezgâh ve makinelerin ömrünü bu aşınma tayin eder. Durgun aşınma sonunda aşırı aşınma meydana gelir. Bu aşınma durumunda malzeme çiftleri birbirine tamamen yapışabilir.



Şekil 2.8. Adhesiv aşınmada aşınma bölgeleri.

Adhesiv aşınmayı önlemek için alınacak tedbirler şunlardır:

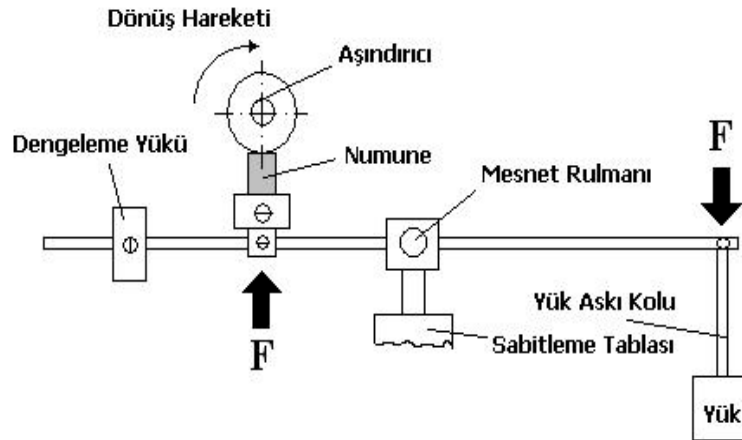
- **Yağlama:** Adhesiv aşınma, sıcaklığın bölgesel olarak arttığı bölgelerde meydana geldiğinden, iyi bir yağlamanın yapılmasıyla hem yüzeyler arasında sürtünme azaltılabilir hem de yağlayıcılar sistemden ısıyı uzaklaştırabilir.
- **Birbirleri içerisinde çözünmeyen metaller kullanmak:** Birbirleri içerisinde çözünmeyen iki metalin bir arada kullanılmasıyla, adhesiv aşınmanın meydana gelişi tamamen ortadan kaldırılabilir.

- **Düz yüzeyler kullanmak:** Eğer birbirleriyle etkileşen yüzeylerde soğuk kaynaşmayı meydana getirecek şekilde karşılaşacak çıkıntılar yok ise, adhesiv aşınma meydana gelmeyecektir.
- **Metal metal temasını önlemek:** Metal yüzeylerde kimyasal filmler oluşturmak, fosfat kaplamalarda olduğu gibi, aşınmayı engeller.

Tablo 2.1. Malzeme özelliklerinin adhesiv aşınmaya etkisi.

Malzeme Özellikleri	Adhesiv Aşınma
Oksitli yüzey	Az
Kübik kristal yapı	Çok
Hegzogonal kristal yapı	Az
Yüksek deformasyon sertleşmesi	Çok
Yüksek sertlik	Çok
Yüksek elastik modül	Çok
Yüksek ergime noktası	Çok
Yüksek yeniden kristalleşme sıcaklığı	Çok
Küçük atom yarıçapı	Çok

2.7.1.1.a. Adhesiv Aşınma Aparatı Modeli ve Hesabı



Şekil 2.9. Adhesiv aşınma aparatı modeli [47].

"a" yarıçapının, dairesel bir temas alanı tarafından desteklemesi ile, aşınma parçalarının muhtemel şiddeti, $2\pi a^3/3$ ile tanımlanan yarım tabaka şiddetinde olmakla, "2a"nın uzaklığına kayma sonrası meydana gelmektedir. Bu varsayımlara dayalı olarak, "L" kayma mesafesi sonrası "n" temas noktaları için muhtemel "V" aşınma oranı;

$$V = n.2/3 \pi a^3.(L/2a) \quad (2.6)$$

Plastik deformasyon ile normal temas basıncından itibaren metal aşınmasının H değerindeki sertliğin eşit olarak, "n" temas yüzeyleri, için toplam hakiki temas, $n\pi a^2$ olarak açıklanmakta;

$$n\pi a^2 = W/H \quad (2.7)$$

(7) Eşitliğinin, (6) eşitliği yerine kullanılmasıyla, "L" kayma mesafesi sonrası normal "W" yüklemeleri altında muhtemel "V" aşınma şiddeti olarak;

$$V = 1/3.(WL/H) \quad (2.8)$$

(8) Eşitliği, adhesiv aşınma şiddetlerinin, normal yüklemelerde kayma mesafesinin orantılı olduğunu ve aşınan malzemenin sertliğiyle, ters olarak orantılı olduğunu göstermektedir.

(7) Eşitliğine bağlı olarak, bu kayma süresince, toplam temas alanına orantılı olmaktadır. Bu değişikliklere izin verdiği için, "a" parametresi " K_{ad} " şeklinde, bir niteleyici olarak (8) eşitliğinde meydana gelmektedir ve aşınma şiddetleri;

$$V = K_{ad}.WL/H \quad (2.9)$$

şeklinde olmaktadır [37].

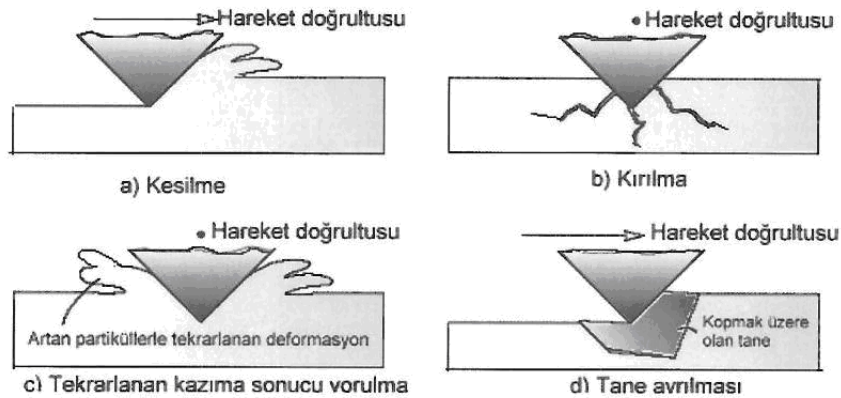
2.7.1.2. Abrasiv aşınma (mikro kesilme, şekil değiştirme aşınması)

Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da isimlendirilen Abrasiv aşınma, bir yüzeyden malzeme kaybına neden olabilen mekanik aşınma yöntemlerinden birisidir. Metal şekillendirmede yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat yöntemleri esasen bu tür aşınmaya dayanmaktadır. Sert parçacıkların yumuşak metale batması da abrasiv aşınmaya neden olabilmektedir. Bir sisteme dışarıdan giren kum vb. parçacıklar veya bir motordaki yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma bu duruma örnek olarak verilebilir.



Şekil 2.10. Abrasiv aşınma [37].

Abrasiv aşınma miktarı aşındırıcı partiküllerin şekli ve boyutunun yanı sıra malzemeyi oluşturan çeşitli fazların abrasyon özelliklerine bağlıdır. Numune sertliğinin aşındırıcıdan daha büyük olması durumunda aşınma miktarında büyük oranda düşüşler ortaya çıkar [45,46].

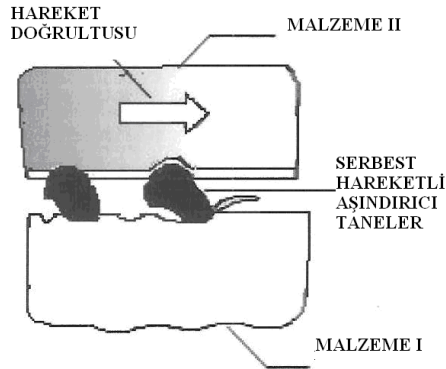


Şekil 2.11. Abrasiv aşınma mekanizmaları: mikro kesilme, kırılma, yorulma ve tane ayrılması.

Endüstriyel makinelerdeki en önemli aşınma türü olan abrasiv aşınmaya genel olarak; traktör, greyder gibi tarım ve iş makinelerinin bıçak ve tırnaklarında, cevher işleme ve öğütme tesislerinde, eleklerde, değirmenlerde, nakil makinelerinde rastlanmaktadır. Bu aşınma, tüm aşınma maliyetinin yaklaşık % 63' ünü oluşturur [37].

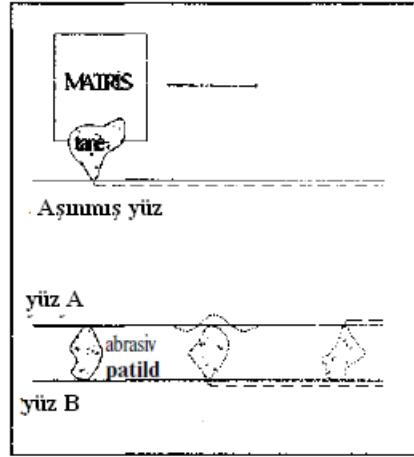
Abrasiv aşınmada sert ve keskin partiküller, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma, iki elemanlı ve üç elemanlı aşınma olmak üzere ikiye ayrılır.

- **İki elemanlı (açık) abrasiv aşınma**, sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir.
- **Üç elemanlı (kapalı) abrasiv aşınmada**, ana ve karşı malzeme arasında serbest hareketli aşındırıcı tanecikler olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden kopan parçacıklar da ara malzeme gibi davranarak üçüncü bir eleman olarak görülebilir.



Şekil 2.12. Üç elemanlı abrasiv aşınma.

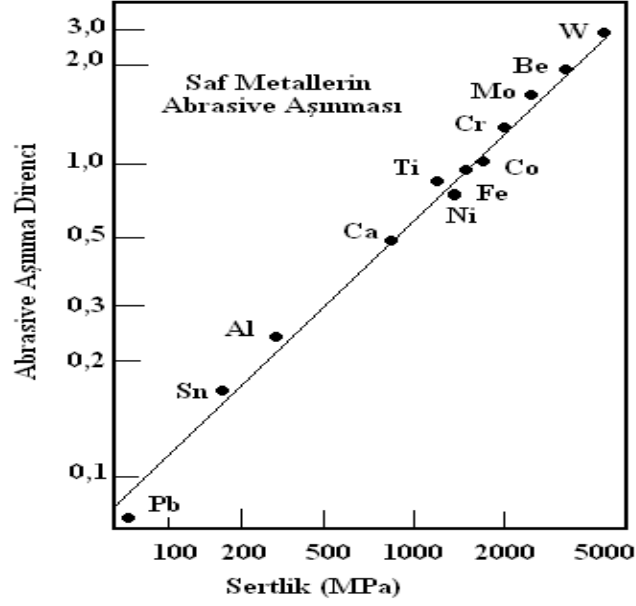
Blickensderfer'in yaptığı farklı deneylerde görülen sonuç aşınma oranının kapalı ve açık sistemlerini her iki sininde aşağı yukarı aynı olduğudur. Aslında kapalı sistem zararları açık sistemden daha fazladır. Çünkü bu olay en fazla yükleme yapılmış kapalı sistemlerde görülür [48].



Şekil 2.13. Abrasiv aşınma mekanizmaları [48].

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

Abrasiv aşınmanın engellenmesinde en etkili yol yüzey sertliğini artırmaktır. Elbette, bu durumda malzemenin gevrek olarak kırılma riski de artacaktır. Sert partiküllerin sistemden uzaklaştırılmasıyla abrasiv aşınma engellenebilir. Sert partiküller, kullanılan hava, su ve yağlarda kullanılan partiküller filtre edilerek sistemden uzaklaştırılırlar. Abrasiv aşınmaya uğrayacak parçanın kolay bir şekilde değiştirilmesine imkân verecek tasarımların yapılmasıyla aşınma ortadan kaldırılabilir.



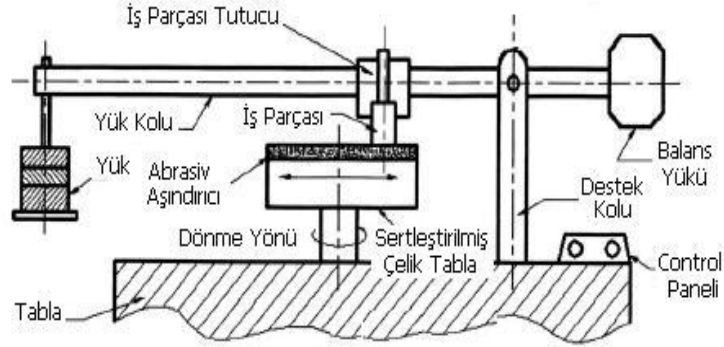
Şekil 2.14. Saf metallerin abrasiv aşınma dirençleri üzerine, sertliğin etkisi.

Abrasiv aşınma uzaklığı, Şekil 2.14.' de görüldüğü üzere, aşınan malzemenin sertliğiyle doğrusal orantılıdır [49].

Abrasiv aşınmanın engellenmesi ya da aşınma hızının en aza indirilmesinde aşağıdaki yöntemlere sağlanabilir:

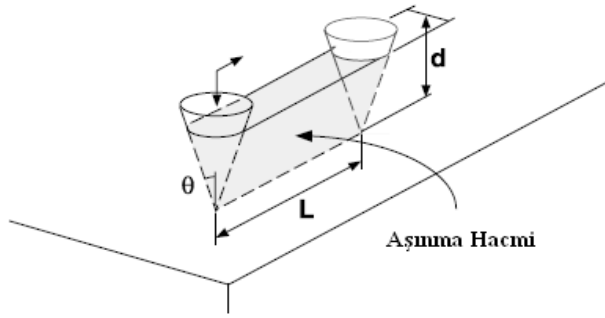
- **Yüzey sertliğini arttırmak:** Abrasiv aşınmanın engellenmesinde veya aşınma hızının azaltılmasında en etkili yol, malzeme yüzey sertliğinin artırılmasıdır. Ancak bu yöntemin, gevrek kırılma gibi, daha büyük problemlere sebep olur.
- **Abrasiv parçacıkları uzaklaştırmak:** Aşınmaya sebebiyet veren sert partiküllerin sistemden uzaklaştırılması ile abrasiv aşınma engellenebilir.
- **Aşınmış parçaları değiştirmek:** Aşınmaya uğrayacak parçanın kolayca değiştirilmesine imkân verecek dizaynlar ile abrasiv aşınma engellenebilir.

2.7.1.2.a. Abrasiv aşınma aparatı modeli ve hesabı



Şekil 2.15. Abrasiv aşınma aparatı modeli.

Şekil 2.15.' de gösterildiği gibi, aşındırıcının çentme derinliğinin "d" olduğu ve bir "θ" açısı ile konik bir şekle sahip olan aşındırıcıda, basitleştirilmiş bir temas modelinin olduğunu varsayılmaktadır [50].



Şekil 2.16. Konik bir çentme ile abrasiv aşınmanın modeli.

Varsayılan bu modele dayalı olarak, bir "L" mesafesi kayma sonrası daha az bir pürüzlülüğe sebep olan muhtemel aşınma hacmi "V" olmaktadır ve bağıntı şu şekilde verilmektedir:

$$V = d^2 \cdot \tan \theta \cdot L \quad (2.10)$$

Plastik temasta aşınma malzemesinin "H" değeri, aşınan malzemenin sertliğini göstermektedir. Normal basınç teması altında olmasıyla; " $\pi (d \tan \theta)^2 / 2$ "'ın hakiki temas alanını verir ve bağıntı;

$$1/2 \pi (d \tan \theta)^2 = W/H_v \quad (2.11)$$

Normal "W" yüklemeleri altındaki muhtemel "V" aşınma şiddeti, (10) eşitliği içine (11) eşitliğinin konulmasıyla; "L" kayma uzaklığı sonrası aşınma şiddeti şu şekilde verilmektedir:

$$V = (2/\pi \tan \theta) \cdot (WL/H_v) \quad (2.12)$$

Abrasiv aşınma içindeki aşınma şiddetinin, daima yiv şiddetine eşit olduğu bilinmektedir. Bu anlamda bir " K_{ab} " parametresi (12) eşitliği içinde meydana gelmektedir ve bu aşınma şiddeti, şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$V = K_{ab} \cdot (WL/H) \quad (2.13)$$

(13) eşitliği, abrasiv aşınma şiddetinin, normal yüklemeler ve kayma uzaklığına bağlı olarak orantılı artmakta ve aşınan malzemenin sertliğine ters orantılı olduğunu göstermektedir [49].

Orantısal " K_{ab} " sabiti, abrasiv aşınma için aşınma katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Bu, aşınma oranlarının tanımlanmasındaki bir çatlama çifti için bir prensip değeridir. " K_{ab} " nin nominal yiv şiddeti bölgesine karşı aşınma şiddeti ve bunun aşınma malzemesinin sünekliğine bağlı olmasının fiziksel anlamı, temas ara yüzeyindeki kırılma gücü ile abrasiv sertliğinin şekli olmaktadır.

Metalin abrasiv aşınmasındaki aşınma katsayı " K_{ab} ", temas koşulları ve malzeme parametreleri üzerine değişiklikler göstermektedir. Adhesiv aşınması içindeki " K_{ab} " ile " K_{ad} " birleşimi bunun nispeten geniş bir aşınma katsayısını veren abrasiv aşınmanın olduğu açıkça görülmektedir. Bu, abrasiv aşınmanın niçin sert bir aşınma olarak meydana geldiğini göstermektedir [51].

Abrasiv aşınma tipi, kayma çizgisi alan teorisinin iki boyutlu tarzlarıyla teorik olarak önceden tahmin edilebilmektedir [52,53].

Teorik tahminler, "D_p" nüfuziyet etki derecesi, "R" aşınma malzemesi, "W" aşınma yüklemesini ve "H" aşındırıcı sertliğini göstermektedir [50].

$$D_p = R \sqrt{\frac{\pi H}{2W}} - \sqrt{\left(\frac{\pi H}{2W}\right) R^2 - 1} \quad (2.14)$$

şeklinde olmaktadır [37].

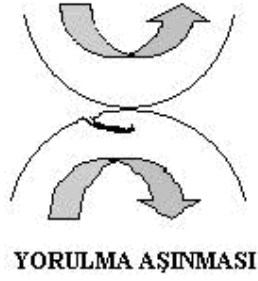
2.7.1.3. Tabaka Aşınması

Bu hadise malzemelerin sürtünme yüzeyinde cereyan eder. Malzeme yüzeyinde mevcut olan veya aşınma olayı esnasında meydana gelen sınır tabakası, ana malzemenin aşınmaya karşı olan direncini önemli miktarda etkiler. Çevredeki gazların ve ara malzemenin etkisiyle meydana gelen aşınma yüzeyi sınır tabakası, çizilmeyle sıyrıldığından daima yeniden meydana gelir. Bu sebeple en önemli özellik aşınma yüzeylerinde meydana gelen tabaka olup, malzemenin rolü ikinci plandadır.

2.7.1.4. Yorulma (titreşim) aşınması

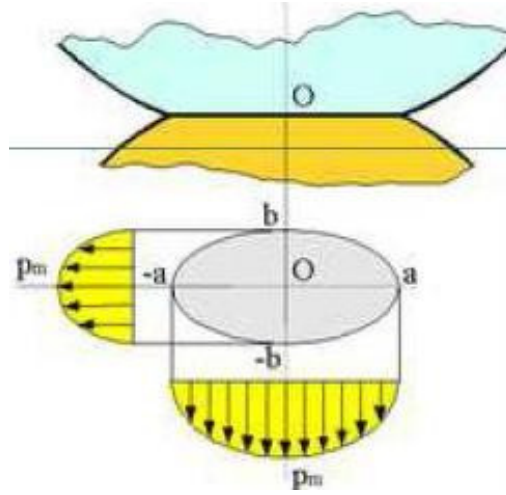
Yorulma (titreşim) aşınması, termodinamik bir kombinasyondur. Belirli sayıda tekrarlanan titreşim zorlamalarında oluşur. Yüzeyde oluşan tekrarlı yük sayısının yüksek veya az oluşuna göre yüksek çevrimli ya da düşük çevrimli yorulma aşınma mekanizmaları oluşur [45,48].

Tribolojik zorlanmalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Neticede, malzeme yüzeyinde mikro çatlaklar oluşur. Deformasyona neden olan etkinin devam etmesi aşınma parçacıklarının ayrılmasına, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur.



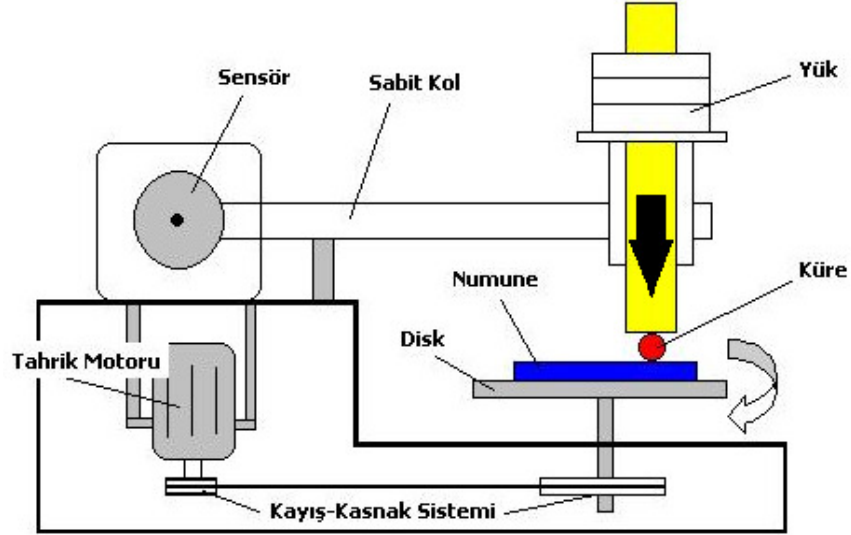
Şekil 2.17. Yorulma aşınması [37].

Bu tip deformasyonlar genellikle dönen ve sürtünen malzemelerin temas bölgelerinde görülür. Dişli çark, rulmanlı yatak ve kam mekanizmaları gibi birbirleriyle sürekli temasta olan parçalarda, temas alanı küçük olduğundan hertz basınçları meydana gelir. Bunlar da yüzeyin hemen altında değişen büyüklüklerde kayma gerilmelerine sebep olurlar böylece parçada yorulma başlamış olur. Bu deformasyon, temas bölgesinde kırılma çatlaması şeklinde olmaktadır [38].



Şekil 2.18. Yorulma aşınmasında malzeme yüzeyinde oluşan gerilmeler [38].

2.7.1.4.a. Yorulma aşınması aparatı modeli ve hesabı



Şekil 2.19. Yorulma aşınması aparatı modeli [37].

Bu tür ezilmeler genellikle dönen ve sürtünen malzemelerin temas bölgelerinde görülür. Bu ezilme temas bölgesinde kırılma çatlama şeklinde olmaktadır. Aşınmadaki dönüşlerin kritik sayısı " N_f ", aşağıdaki gibi deneysel olarak verilen kırılma yoluyla parça aşınmasının meydana gelmesi açısından, " W " normal yükleme ve " n " aşınan elemanların şekillerine bağlı olan bir sabittir [54].

Yuvarlanan numunenin şekline bağlı olarak " n " değerinin, yaklaşık 3 olduğu tespit edilmiştir.

$$N_f = 1/W^n \quad (2.15)$$

Bu deneysel kanun, dönen millerin dizaynında rulmanların dizaynında geniş ölçüde kullanılmaktadır. Bunun temel dayanak noktası, kırılma ya da çatlama olgularının istatistiksel olarak tepki göstermesine imkân vermesidir [55].

Yorulma aşınmasında uygulanan temas baskısı, temas bölgesinde eğilme meydana getirmemektedir. Yerel eğilme, malzeme içindeki mikro hataların mevcudiyeti sebebiyle meydana gelmektedir. Çünkü bu homojen olmama durumu, homojen

malzemenin eğilme gerili-mine fazla maruz kalmaması için, teorik gerilim şeklinde olduğunda, malzemenin eğim gerilimini geçen temas bölgeleri içinde meydana gelmektedir [56].

Yorulma aşınması sırasında oluşan tabakanın, plastik olarak deforme edildiğini varsayarsak (2.15) bağlantısının değiştirilmesiyle verilecek olan " N_f ", düşük dönüş kritik sayısı ile burada " C_s " tek düze olarak kırpmanın etkisi ve " $\Delta\gamma_s$ "nin, etkin kırpma zorlanmasını her kıvrım geçişinde artış gösterdiği ve " D " nin, genellikle 2 olarak bir sabit aldığı yerlerde aşınma parçaları olarak ayrılmaktadır:

$$N_f = (C_s / \Delta\gamma_s)^D \quad (2.16)$$

(2.16) eşitliğindeki ilişkinin meydana gelmesi ve aşınmanın şiddetini üretmek ihtiyacında bulunan plastik deformasyona bağlı olarak, belirli aşınma oranı W_s , aşınma şiddeti/yüklemesi/uzaklığı tarifi r_p 'nin kaymanın toplamına, plastiğin oranı ve k 'nin aşınma malzemesinin ortalama kırpma akış gerilimi olduğu yerlerde, şu şekilde tanımlanmaktadır [53]:

$$W_s = r_p \mu / (k C_s^D \Delta\gamma_s^{1-D}) \quad (2.17)$$

$k = H(\text{Sertlik}) / (3 \times 3^{1/2})$ 'nin (2.12) eşitliği içinde oraya çıkmasıyla, kırılma aşınma katsayısı " K_f ", yukarıda bahsedilen " K_{ad} " ve " K_{ab} " olarak, aynı yolda tanımlanmakta olup:

$$K_f = W_s \cdot H = (3 \times 3^{1/2} r_p \mu) / (k C_s^D \Delta\gamma_s^{1-D}) \quad (2.18)$$

şeklinde olmaktadır [37].

2.7.2. Hasarın fiziksel görünüşüne göre aşınma mekanizmaları

2.7.2.1. Kayma aşınması

2.7.2.1.a. Taneli mineraller tarafından oluşturulanlar

Taneli minerallerin meydana getirdiği kayma aşınması, mineral sertliğine bağlı olarak belirlenir. Metal olmayan sert malzemelerde aşınma, metal malzemelerde olduğu gibi mineral tanelerinin sertliğiyle artar, fakat sert malzemenin aşınma yüzeyinde gevrek kırılmalar meydana gelir. Aşınma esnasında malzeme sertliği, aşınma direncinin büyüklüğünü etkileyen önemli bir faktördür.

2.7.2.1.b. Metal-metal aşınması

Metal-metal sürtünme tiplerinden hidrodinamik sürtünmede genellikle hiçbir aşınma olmaz ve malzeme çiftinin önemi yoktur. Çünkü malzemeler bu anda birbirine temas etmemektedir. Fakat tam yağlama için minimum bir hız gereklidir.

Karışık yağlamada kuvvet kısmen hidrolik, kısmen katı cisimlerin teması ile sağlanır. Bu temas noktalarında malzemelerin özellikleri ve kayma yapan malzeme çiftleri ile yağlayıcı maddenin etkisi vardır.

Özellikle yağsız yüzeylerin sürtünmesinde aşınma durumu malzeme çiftinin yüzeyine bağlıdır. Ayrıca kayma yüzeylerin islenişi (yüzey pürüzlülüğü, işlemi doğrultusu) de aşınmaya büyük ölçüde etki etmektedir.

2.7.2.2. Koroziyon aşınma (korozyon aşınması)

Özellikle koroziyon aşınmada, sıvı ve gazların bulunduğu bir ortamda meydana gelen temaslarda, malzeme yüzeyinde kimyasal ve elektrokimyasal etkilerle reaksiyon ürünleri oluşur. Eğer bu reaksiyon ürünleri yüzeye güçlü bir şekilde yapışır ve ana malzeme gibi davranırsa, aşınma mekanizması aynı ana malzemeninki gibi olabilmektedir. Bazı durumlarda, reaksiyon ürünleri çok daha farklı aşınma mekanizmalarına sebep olmaktadır. [45].

Korozif ortamla katı malzemelerin etkileşimi ile oluşan reaksiyon ürünlerinin baskın olduğu tamamen farklı bir aşınma meydana gelebilir. Korozif ortamla hızlanmış olan bu tribokimyasal aşınma, korozyon aşınması olarak adlandırılır. Korozif aşınmada, tribokimyasal reaksiyonla yüzeyde bir reaksiyon tabakası oluşur. Aynı zamanda, bu tabaka sürtünme ile ortamdan uzaklaşabilir. Bu yüzden reaksiyon tabakalarının kısmen oluşum hızı ve bozulma miktarı aşınma oranını belirler [45].



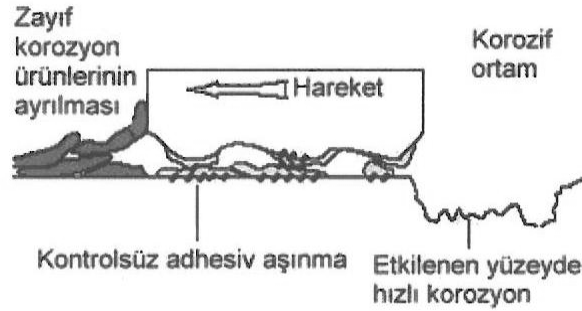
Şekil 2.20. Korozif aşınma [37].

Yüzeydeki kimyasal reaksiyonlar adhesiv aşınmanın önlenmesinde yararlı olmaktadır. Ancak kimyasal reaksiyon kontrolsüz bir şekilde gerçekleşirse, önemli malzeme kayıplarına yol açabilir. Eğer malzeme bir film oluşumu ile korozyona uğramışsa ve aynı anda bir kaymalı temas da varsa, dört durum ortaya çıkabilir:

- Korozyon ve aşınmanın oluşumunu engelleyen sabit bir yağlayıcı film tabakası oluşmuş olabilir.
- Kaymalı temas altında kalan, oluşmuş durumdaki zayıf film kısa ömürlü olur ve bu tabakanın düzenli bir şekilde oluşup tekrar bozulması ise, yüksek oranda aşınmaya neden olabilir. Sürtünme katsayısı bu oluşum esnasında düşük olabilir ya da olmayabilir.
- Koruyucu yüzey filmleri aşınmış olabilir. Kalan film tabakası ve ana malzeme arasında bir galvanik çift oluşabilir ve sonuçta yüzeyde korozyon nedeniyle, çok hızlı aşınmış bir bölge oluşması söz konusu olur.
- Korozif etki ve aşınma işlemleri birbirinden bağımsız olarak hareket ettiği gibi, birbirine eklenerek birlikte de hareket edebilirler.

Yağ gibi korozif etkili kimyasal maddelerin, makine parçalarının yüzeylerinde oluşan yüzey filmlerinin bir kısmını tribolojik zorlamalarla kırması ve aşındırıcı

parçacıkların oluşumuna yol açması, aşınmayı artırır. Triboksidasyon aşınması, metalik malzeme yüzeyinde çatlaklara sebep olur. Yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine neden olur.



Şekil 2.21. Koroziif aşınma.

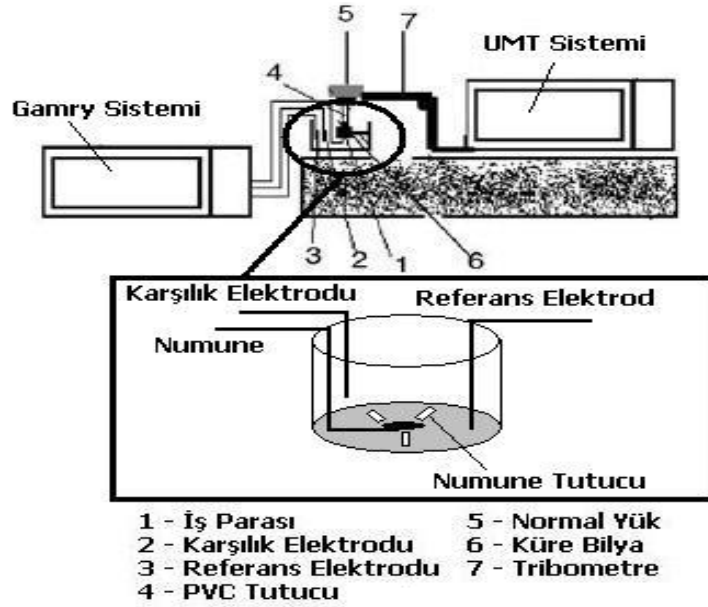
Yüksek korozyona daha çok, kimya, maden ve metalürji sektörleri, nükleer reaktörler, dizel motorlar ve birçok sanayi alanında karşılaşılır. Metalik malzemeler birçok uygulamada yüksek sıcaklıklarda korozif ortamlara maruz kalırlar. Sıcaklık ve ortama bağlı olarak aşınma sekiz farklı şekilde meydana gelebilir. Bunlar; oksitlenme, karbürleme ve metal tozlaşması, nitrülenme, halojen korozyonu, sülfürleme, kül (tuz) çökeleği korozyonu, erimiş tuz korozyonu ve sıvı metal korozyonudur.

Korozif ortamlar oksitleyici ya da redükleyici olarak sınıflandırılır. Oksitleyici atmosfer, yanma için hava veya oksijen girişinin olduğu, yüksek oranda moleküler oksijen (O_2) içeren oksijen aktivitesinin moleküler oksijen konsantrasyonu ile kontrol edildiği ortamlardır. Redükleyici atmosfer ise, oksijen girişinin olmadığı yanmanın oksijensiz şartlarda gerçekleştiği ortamlardır.

Yüksek korozyon aşınma türlerinin en önemlisi oksitlenmedir. Metal ve alaşımlar yüksek sıcaklıklarda hava veya oksitleyici ortama maruz kaldıklarında yüzeylerdeki oksit tabakası doğal olarak büyür. Metalik malzeme ve üzerindeki oksit tabakası farklı ısı genleşme katsayılarına sahiptirler. Oksit tabakası, çalışma ortamındaki ısınma soğuma çevrimleriyle oluşan iç gerilmeler nedeni ile zaman zaman dökülür. Ardından doğal olarak kendini yeniler. Koruyucu oksidin kendini tekrar yenileyemeyecek duruma gelmesi durumunda metal hızla oksitlenir. Oksitlemenin

başlamasının ardından zaman içerisinde pul pul dökülmeler ve yüzeyde malzeme kaybı oluşur [58].

2.7.2.2.a. Koroziif aşınma aparatı modeli ve hesabı



Şekil 2.22. Korozyon aşınma aparatı modeli [59].

Korozif aşınma, metallerin oksidatif aşınmalarını daha çok temsil etmektedir. Çelikle normal atmosferik hava arasındaki oksidatif reaksiyona bağlı olarak çeliğin bir oksit tabakası olduğu ve bu tabakanın kalkma modelinin varsayımıyla, " K_c " koroziif aşınma katsayısının, tarafından açıklandığı gibi, " K_{ad} " ve " K_{ab} " olarak aynı şekilde tespit edildiği ve kesin bir kritik kalınlıktaki yüzeyden ayrıldığı saptanmıştır [60].

Ayrıca, " A " nın Arrhenius sabiti olduğu ve " Q " nun aktivasyon enerjisi, " R_g " nin gaz sabiti, " T " nin sıcaklık, " p " nin oksit sıklığı, " v " nin kayma hızı ve " ξ ", " L "nin, bir aşınma teması yaptığı sürece mesafesi olduğu varsayılmaktadır.

$$K_c = dA / (\xi^2 p^2 v) \exp [-Q / R_g T] \quad (2.19)$$

Korozif aşınma, su içindeki silikon nitratin hidroksiti, sürtünme suretiyle yüzeyden kolayca kaldırılması ve su içindeki çözünme şeklinde olup, yüzeyle çok zayıf bir şekilde birleşme, seramiklerde göstermektedir [61].

Reaksiyon oranı yüksek ise, birçok silikon nitrat hidroksiti, biçimlendirilebilmektedir ve çabucak aşınmaktadır. Bu sebeple, reaksiyon oranı, aşınma oranını tarif etmektedir. Çatlama ısınmasının, temas arabirimindeki kimyasal reaksiyonları da hızlandırdığı varsayılırsa, bunlara karşı oksidatif olmayan seramiklerin kayma aşınması katsayısı K_c hesaplanabilmektedir. Bu, "Q" nun aktivasyon enerjisi, " R_g " nin gaz sabiti, "T" nin reaksiyon sıcaklığı, " ρ " nin oksit sıklığı ve "v" nin de kayma hızı olduğu yerlerde mümkün olmaktadır [62].

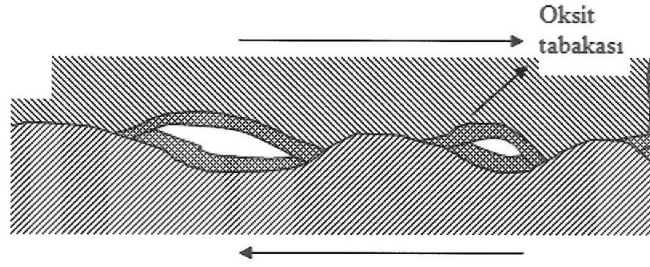
Buradan " K_c ";

$$K_c = A_c / (\rho v) \exp [-Q / R_g T] \quad (2.20)$$

şeklinde olmaktadır.

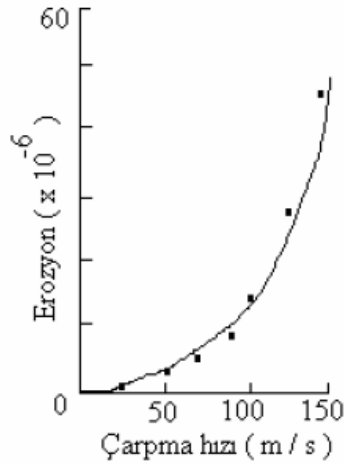
2.7.2.3. Eroziyon aşınma (erezyon veya tribo oksidasyon aşınması)

Tribo oksidasyon denilince ana malzeme ile karşı malzeme arasındaki tribolojik zorlamalardan dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyon anlaşılır. Malzeme yüzeyinin hava ile reaksiyona girerek oluşturduğu yüzey tabakaları (oksit tabakası) aşınmayı azaltmasına rağmen bu yüzey tabakalarının tribo oksidasyon sonucu özelliklerinin değişmesi aşınmayı hızlandırmaktadır. Yağ gibi kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makine parçalarının yüzeylerinde oluşan yüzey tabakalarının bir kısmının tribolojik zorlamalarla kırılması ve aşındırıcı parçacıklar oluşturması aşınmayı hızlandırmaktadır. Tribo oksidasyon özellikle metalik malzeme yüzeylerinde görülür [44].



Şekil 2.23. Tribo oksidasyon aşınması.

Tribo oksidasyon aşınması abrasiv aşınmaya benzer şekilde plastik deformasyon ve gevrek kırılmayı bir arada oluşturabilir. Tribo oksidasyon aşınmasının yapısı aşınan malzemeye, aşındırıcılara, darbelerin durumuna, başlangıçtaki partikül kütleline, hıza ve geliş acısına bağlıdır. Malzemelerin erozyon davranışı aşındırıcının şekli, sertliği, tokluğu ve boyutundan büyük oranda etkilenmektedir [45].



Şekil 2.24. Aşındırıcı çarpma hızının erozyona etkisi [63].

2.7.2.3.a. Katı partikül erozyonu

Akışkan bir ortam (sıvı veya gaz) ile hareketlendirilen aşındırıcı partiküllerin yüksek hızlarla bir katı yüzey üzerine tekrarlı çarpması sonucu darbe etkisiyle oluşan aşınmadır.

2.7.2.3.b. Sıvı su damlası erozyonu

Yüksek hızlarda hareket halindeki sıvı (su) damlalarının bir katı yüzey üzerine tekrarlı çarpması sonucu oluşan şok dalgalarının tahribatı ile meydana gelen aşınma türüdür.

2.7.2.3.c. Katı partikül taşıyan akışkan ortam erozyonu

Yüksek hızlarda hareket halindeki bir katının kendisinden çok daha yavaş su damlalarına tekrarlı çarpmasının ardından şok dalgaların tahribatıyla oluşan aşınmadır.

2.7.2.3.d. Kavitasyon erozyonu

Gaz kabarcıklarının yüksek bir basınç ile malzeme yüzeyinde tekrarlı patlaması sonucu oluşan bir aşınma türüdür. Özellikle su ve kalorifer borularında meydana gelebilir.

2.7.2.3.e. Elektro erozyon

Biri anot diğeri katot olmak üzere kutuplanan elektriksel yüklü iki parça arasındaki akımsal boşalım etkisi ile oluşan bir aşınma türüdür.

Erozif aşınma, aşağıda belirtilen hasarların meydana gelmesi ile tanınabilir:

- **Sert olmayan malzeme yüzeylerinde oluşan kopma:** Örneğin fan pervanelerinin kullanımı sırasında, ortamda bulunan tozların ve sert artikellerin pervanenin konkav tarafında hızlı bir şekilde yuvarlanmaları ve kaymaları sırasında bu aşınma türü oluşur.
- **Malzeme yüzeyinde kanalların veya yivlerin oluşması:** Bu tür aşınma hasarları, gazların veya sıvıların hızlı bir şekilde arttığı sistemlerde akış hızının veya yönünün değiştiği bölgelerde görülür.
- **Köşelerin yuvarlanması:** Eroziyon aşınma meydana geldiği pervane ve türbin kanatları gibi malzemelerin şekillerinde köşelerin yuvarlanması şeklinde değişiklikler meydana gelebilir [64].

Yüksek korozyon aşınmasına; kimya, maden ve metalürji sektörleri, nükleer reaktörler, dizel motorlar ve birçok sanayi alanında karşılaşılır. Metalik malzemeler birçok uygulamada yüksek sıcaklıklarda korazif ortamlara maruz kalırlar ve malzemenin korozyon direnci bu ortamlardan etkilenir. Sıcaklık ve ortama bağlı olarak aşınma sekiz farklı şekilde meydana gelebilir: Oksitlenme, karbürleme ve metal tozlaşması, nitrürlenme, halojen korozyonu, sülfürleme, kül (tuz) çökeleği korozyonu, erimiş tuz korozyonu, sıvı metal korozyonu.

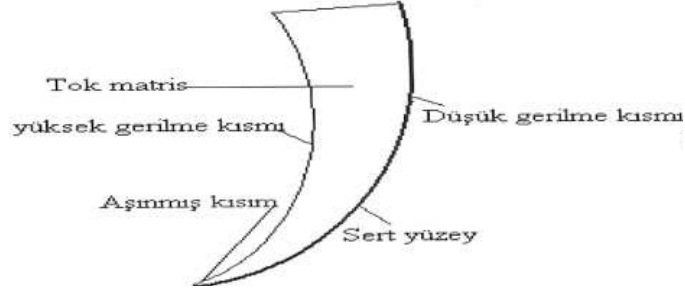
2.7.2.4. Yuvarlanma Aşınması

Birbiri üzerinde yuvarlanarak hareket eden malzemelerde oluşan aşınmadır. Bu aşınma da şüphesiz malzemelerin özelliklerine sıkı sıkıya bağlıdır. Yuvarlanma esnasında aşınma tek bir malzemede oluşabileceği gibi her iki malzemede de değişen miktarlarda oluşabilir. Yuvarlanma aşınmasında yüzeylerin yağlanıp, yağlanmamasının çok büyük tesiri vardır.

2.7.3. Aşınmanın aldığı özel adlara göre aşınmalar

2.7.3.1. Öğütmeli aşınma

Öğütmeli aşınma, yüksek basınçlar altındaki partiküllerin metal yüzeyleri ile düşük hızlarda karşılaşmaları sonucunda, metal yüzeyinden parçacıkların kesilerek veya çok sayıda ufak çizikler açılarak koparılması ile meydana gelir. Bu yüksek basınç ve düşük hız kombinasyonu genellikle hafriyat çalışmalarında kullanılan buldozer ve kepçe gibi ağır iş makinelerinin çalışma koşullarında meydana geldiği için, bu araçların kesici uç yüzeylerinde bu hasar türü meydana gelir. Kepçelerde kullanılan kesici ve batıcı uçların, öğütmeli aşınma sonucunda şekil değişimi meydana gelerek körlenme oluşur.



Şekil 2.25. Öğütmeli aşınmanın şematik gösterimi.

2.7.3.2. Oymalı aşınma

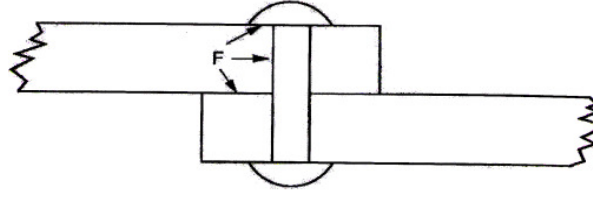
Oymalı aşınma, malzeme yüzeyinin çok yüksek gerilmelerdeki çarpma durumlarında, yüzeyden bir parçanın kesilerek veya kopmasıyla meydana gelir. Bu tip aşınmaya genellikle hafriyat, madencilik, petrol kuyularını delme işlemi ve benzeri koşullarda çalışan malzemelerin kesme ve delme görevi yapan kısımlarında görülür. Bu işlemler sırasında sert abrasiv parçacıkların çok yüksek gerilmeler altında malzeme yüzeyine çarpmaları ile yüzeylerde hızlı bir şekilde hasar oluşumu meydana gelir.

Oymalı aşınma diğer aşınma türlerine göre çok daha hızlı olarak geliştiğinden, bu aşınmaya uğrayan parçaların yenileriyle değiştirilerek kullanılması daha ekonomik olmaktadır.

2.7.3.3. Kazımalı aşınma

Kazımalı aşınma, karşılasan yüzeylerde mikro kaynaşmanın meydana geldiği adhesiv aşınmaya bir miktar benzemektedir. Adhesiv aşınma, birbirleri üzerinden kayan yüzeylerde meydana gelirken, kazımalı aşınma birbirlerine göre hareket etmeyen yüzeylerde meydana gelir. Bu da bu iki aşınma turu arasındaki farktır. Ancak kazımalı aşınma, çok düşük genlikteki titreşim hareketlerinin meydana geldiği sistemlerde, mikro kaynaşmanın oluşmasıyla meydana gelir.

Kazımalı aşınma, vibrasyonlu ortamlarda çalışan somun, perçin gibi bağlantı elemanlarıyla birleştirilmiş sistemlerde otomobil şaftlarının birleşme noktalarında ve yataklarda en yaygın olarak rastlanılan hasar oluşum mekanizmasıdır.



Şekil 2.26. Kazımalı aşınma.

Kazımalı aşınmanın meydana getireceği zararları en aza indirmeye şu yöntemlere başvurulabilir: Vibrasyonun azaltılması veya giderilmesi, ara yüzeydeki kaymaları azaltmak veya gidermek, bağlantı noktalarında elastomer kullanmak, bağlantı noktalarının yağlanması, kırılmayı engellemek.

2.8. Aşınmaya Dirençli Malzemeler

Aşınmaya dayanıklı malzeme seçilerek aşınma sorunu büyük ölçüde çözümlenebilir. Genelde aşınmaya dayanıklı malzemeler, demir dışı malzemeler, demir ve çelik malzemelerin sert kaplama alaşımları ve kobalt-krom-molibden-tungsten alaşımlarıdır. Aşınmaya dayanıklı demir ve çelik malzemeler içerisinde endüstriden en çok kullanılanlar: Çelik malzemeler (martensitik, perlitik ve ostenitik çelikler) ve dökme demir malzemelerdir (küresel grafitli dökme demirler, beyaz ve kokil dökme demirler) [65].

2.8.1. Aşınmaya dirençli martensitik, perlitik ve ostenitik çelikler

Çeliklerin mukavemeti, ekonomikliği ve ısıtılma durumu aşınma dirençli çeliklerin seçiminde göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çelikler genel olarak;

- Isıl işlem yapılmış, C20 çeliği gibi, düşük karbon çelikleri.
- Isıl işlem yapılmış, C95 çeliği gibi, yüksek karbon çelikleri.
- Sertleştirilen karbon veya düşük alaşımlı çelikler, alev ya da indüksiyonla yüzeyi ya da tamamı sertleştirilen çelikler.
- Karbürizasyon ya da karbüritan vasıtasıyla sertleştirilmiş düşük alaşımlı ya da düşük karbonlu çelikler.

- Nitürasyonla setreştirilen orta karbonlu, krom ya da krom alüminyum içeren çelikler.
- Doğrudan sertleştirilen yüksek alaşımlı çeliklerdir.

BÖLÜM 3

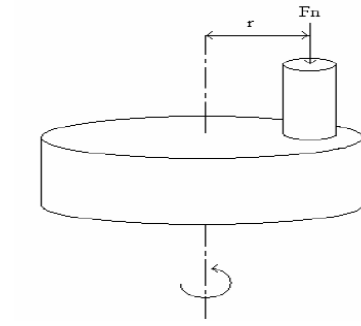
AŞINMA DENEYLERİ ve ÖLÇÜM METODLARI

3.1. Model Deney Yöntemleri

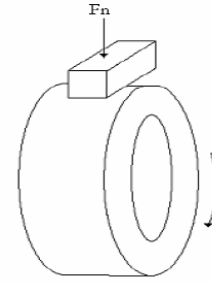
Sistem veya sistem elemanlarının sürtünme ve aşınma davranışlarının belirlenebilmesi için yapılan testler, tasarım açısından oldukça önemlidir. Sürtünme ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyler, gerçek makineler veya model deney düzenekleri kullanılarak yapılmaktadır. Doğrudan makine üzerinde ve gerçek şartlarda yapılan deneyler hem oldukça pahalıdır, hem de karmaşık tribolojik etkiler nedeniyle değerlendirilmeleri zordur. Bu sorunları ortadan kaldırmak için birçok model deney yöntemleri geliştirilmiştir [66].

Sürtünme direnci ve aşınma dayanımının ölçülmesinde kullanılan model deney yöntemlerinin sayısının fazla olmasının sebebi, sürtünme ve aşınma mekanizmalarının ve tribolojik sistemlerin fazla olmasındandır. Bu sebeple günümüzde sürtünme ve aşınma üzerine yapılan çalışmaların çok büyük bir kısmı uluslararası standartlarla belirlenmiş test teknikleri ve parametreleri kullanılarak yapılmaktadır.

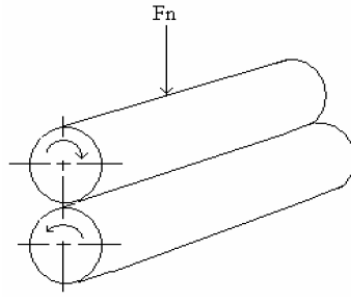
Sürtünme ve aşınma testleri genellikle aynı sistemler üzerinde yapılmaktadır. Buradaki en önemli parametre ölçüm yöntemlerindeki farklılıklardır. Yine test süresi de önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Sürtünme testleri çoğunlukla kısa sürerken, aşınma testleri bazen çok uzun süreler alabilmektedir [67].



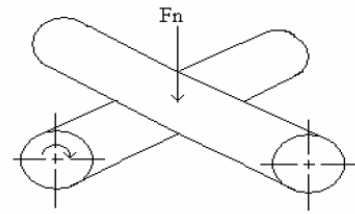
Pim-Disk



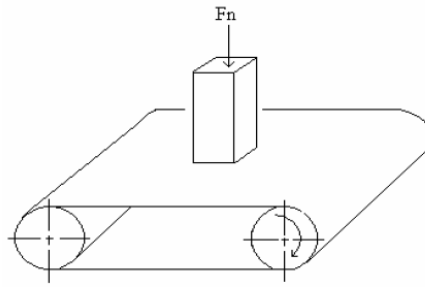
Blok-Halka



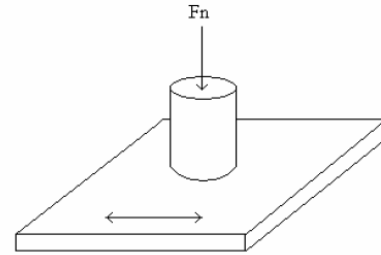
Silindir-Silindir



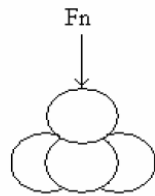
Çapraz Silindir



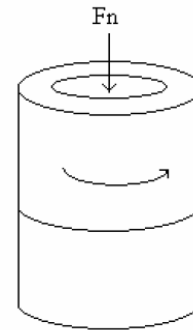
Levha-Kayış



Pim-Levha



Dört Bilya



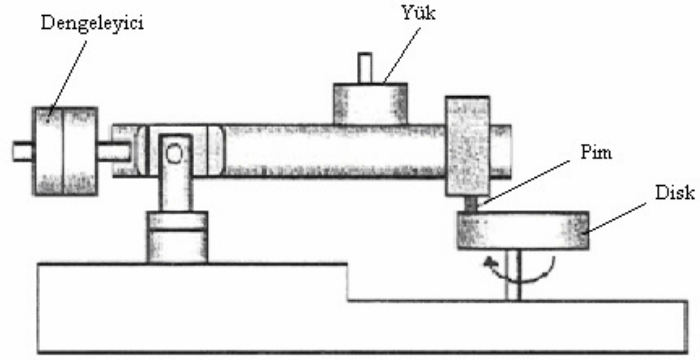
Siebel-Kehl

Şekil 3.1. Model deney sistemleri [66,67].

3.2. Aşınma Deney Cihazları

3.2.1. Pim - disk cihazı

Pim - disk (disk üzerine pim) yöntemi, model test yöntemlerinin en basit ve en yaygın kullanılanlarından birisidir. Deneyde kullanılan yatay döner disk genellikle metal bileşenlerden oluşmaktadır. Deneyde aşınma durumu incelenecek olan numune koni, küre veya silindir şekline sahip bir pimdir. İzafi kayma hızı, diskin merkezi ile pimin temas noktası arasındaki radyal "r" mesafesi değiştirilmek suretiyle ayarlanabilir. Pim üzerinden diske uygulanacak normal yük, mekanik, pnömatik veya bir hidrolik silindir vasıtasıyla sağlanabilir. Bu test tekniği kullanılarak kuru kayma halindeki sürtünme ve aşınma davranışları incelenebilmektedir [67].

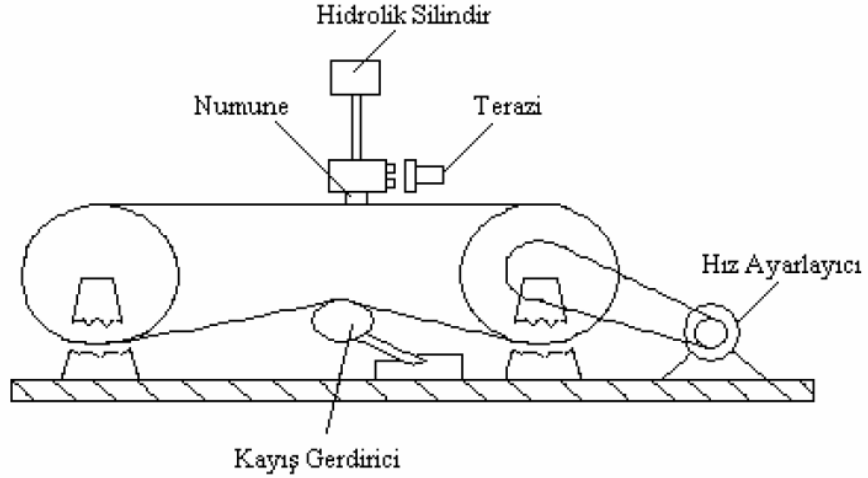


Şekil 3.2. Pim - disk cihazının şematik görünümü [68].

3.2.2. Levha - kayış cihazı

Bu sistem iki geniş silindir ve bu silindirlerin üzerinden geçen eğilebilme özelliğine sahip bir kayıştan meydana gelir. Kayış silindirlerin etrafında dönmekte olup, kayışın gerginliği basit bir gerdirmе mekanizması ile ayarlanabilmektedir. Yine silindirlerden bir tanesi hız ayarlı olup, silindirin devri değiştirilmek suretiyle kayışın hızı değiştirilebilmektedir. Kayış, lastik, çelik şerit veya takviye edilmiş kompozit malzemelerden olabilir. Deneyde aşındırmayı sağlayacak yüzey, kayışın bir yüzüne zımpara kağıdı yapıştırılması veya bir aşındırıcı örtülmesi ile sağlanır.

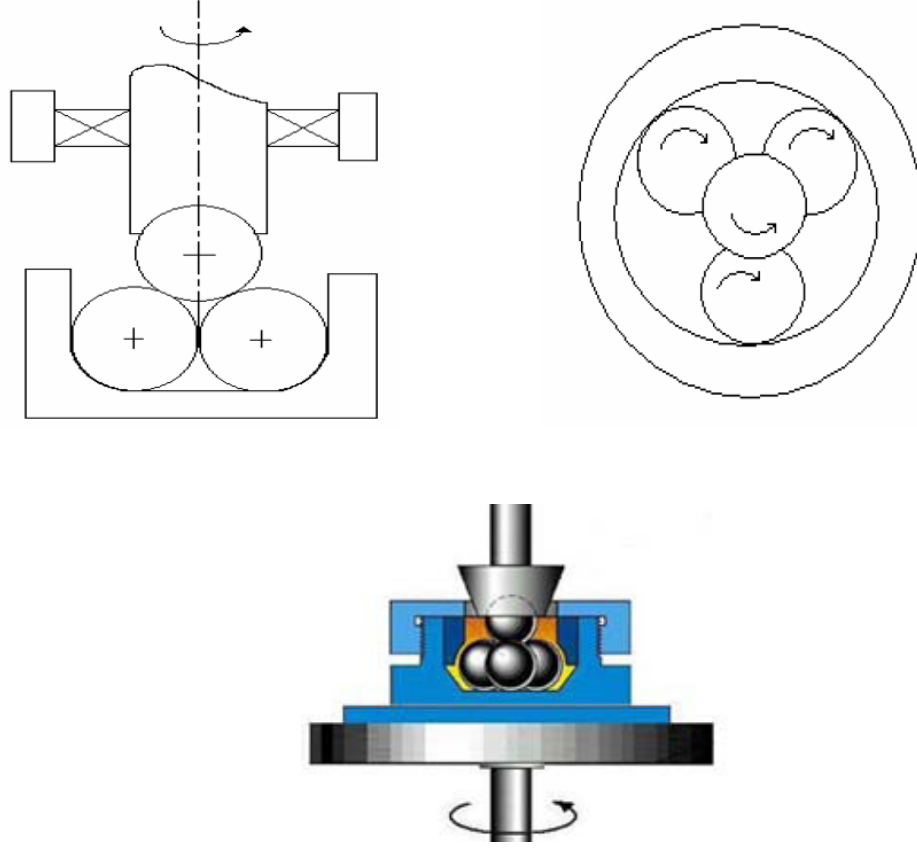
Deneyde kullanılacak olan test numunesi bir hidrolik silindir vasıtasıyla itilmek suretiyle kayış üzerine bastırılarak bir normal yük meydana getirilir. Kayış ve numunenin arasında oluşan sürtünme kuvvetinin tesiriyle numune deformasyona uğrar. Numuneyi tutmakta olan kafa sağ ve sol taraftan yataklanmıştır. Kayışın hareket yönü tarafında bulunan yatağa sürtünme kuvvetinin ölçülmesi için bir terazi yerleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Levha - kayış cihazının şematik görünümü [67].

3.2.3. Dört bilya düzeneği

Bu deneyde dört adet aynı büyüklükte bilya numune olarak kullanılmaktadır. Bu bilyalardan üç tanesi, deney esnasındaki şartlarda rahatça hareket edebilecekleri bir kabın içersine konulmuşlardır. Dördüncü bilya ise kendi şekline uygun olarak oyuk açılmış bir milin içersinde olup diğer üç bilyanın üzerine gelecek şekilde terleştirilmiştir. Mil döndürülmeye başladığında üsteki bilyanın etkisiyle altta bulunan bilyalar zıt yönde dönmeye başlarlar. Dönen bilyalardaki radyal yükün çok az miktardaki artışı yorulma ömründe çok büyük düşüşleri meydana getirecektir. Bunun sebebi de temas alanlarındaki gerilmelerin artmasıdır.



Şekil 3.4. Dört bilya test düzeneği [67].

3.3. Aşınma Ölçüm Metodları

3.3.1. Ağırlık farkı metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesinde olması dâhilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-3} veya 10^{-4} gram hassasiyetinde oldukça duyarlı bir teraziyle yapılır.

Ağırlık farkı metoduna göre, ağırlık kaybı miktarı; aşınma miktarı gram veya miligram olarak ifade edildiğinde, birim sürtünme yoluna karşılık olarak (g/km) veya (mg/km) cinsinden, birim alan için hesap edilecekse, (g/cm²) cinsinden ifade edilir. Hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde ise malzemenin yoğunluğu ve numune üzerine düşen yük hesaba katılarak, birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından yola çıkılarak ağırlık kaybı hesaplanır [66].

Ağırlık farkı ölçümünde en çok aşağıda verilen bağıntı kullanılmaktadır [69].

$$W_a = G / (d.M.S) \quad (3.1)$$

Bu bağıntıda;

W_a : Aşınma oranı (mm^3 / Nm).

G : Ağırlık kaybı (mg).

M :Yükleme ağırlığı (N).

S : Aşınma yolu (m).

d : Malzeme yoğunluğu (mg / mm^3) 'dir.

Aşınma oranının ters değeri de aşınma direnci " W_r " olarak kabul edilmiştir [70].

$$W_r = 1 / W_a \quad (3.2)$$

Ağırlık farkı metodunda en çok kullanılan ölçme yöntemi tartı yöntemidir. Aşındırılan malzeme tartılarak tek bir sayı şeklinde aşınma miktarı bulunur. Tartma işlemi bir kimyasal terazide yapılır. Bu yöntemde malzemenin devamlı temiz olmasına ve üzerinde tortu kalmamasına dikkat edilmelidir. Tartı yönteminin yanı sıra aşınma miktarını radyoaktif izleyiciler kullanarak ölçmek mümkündür. Bu ölçümde aşınma öncesinde veya sonrasında değil, doğrudan aşınmanın meydana geldiği sırada ölçüm yapmak mümkün olmaktadır [71].

3.3.2. Kalınlık farkı metodu

Aşınma sırasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi ve başlangıç değeriyle karşılaştırılması suretiyle aşınma miktarı ölçülmektedir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır [72,73,74]. Kalınlık hassas ölçü aletleri kullanılarak $\pm 1\mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçülmelidir [71].

Kalınlık farkı esasına dayanan ölçümler, çoğu zaman aşınmanın hangi elemanda, ne oranda, düz mü yoksa eğik mi olduğu hakkında net bir bilgi veremediği için daha çok hacimce meydana gelen değişimler dikkate alınmaktadır [67].

3.3.3. İz değişim metodu

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi izlenir. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan aletler, Vickers veya Brinell sertli ölçme uçlarıdır. Bu uçların bıraktığı izlerin boyutlarında meydana gelen değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek değerlendirilir [71].

3.3.4. Radyoizotop metodu

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü α parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçüm yapılabilmesi avantaj sağlar. Fakat ekonomik olmaması nedeniyle ancak özel amaçlarda kullanılır [66].

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Giriş

Bu bölümde, öncelikle uçak yapı parçaları, otomobil aksları, dişliler, miller, iş makinası paletleri ve basınç kapları gibi geniş bir sahada kullanılan AISI 4140 çeliğinin sertlik ve yorulma dayanımı ilişkisinin irdelenmesi amacı ile sertleştirme işlemine tabi tutulmamış, 40, 46 ve 52 HRC sertlik değerlerindeki numune gruplarının yorulma dayanımları yapılan deneyler ile tespit edilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Ardından cer kancası, kanca, cıvata, mil ve dişli imalatında kullanılan AISI 1045 çeliğine uygulanan yüzey sertleştirmenin, yorulma üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneyler için gerekli malzemelerin satın alınması, ısıtılma işlemi fırının yenilenmesi, indüksiyon yüzey sertleştirmesinin yapılması ve analiz işlemleri gibi önem arz eden tüm gereksinimler Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projesi Fonu tarafından desteklenen 2011 / 153 numaralı projeden karşılanmıştır.

4.2. AISI 4140 Çeliğinin Sertlik-Yorulma Dayanımı İlişkisi

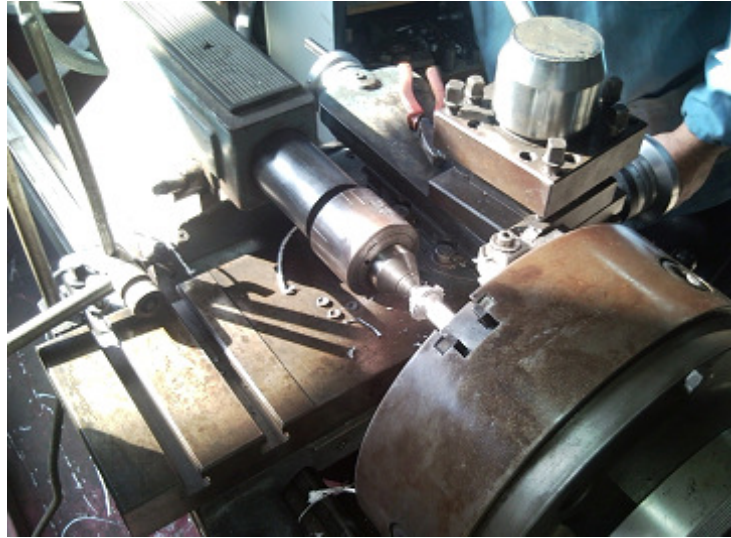
4.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması

Deneylerde kullanılan AISI 4140 çeliğinin spektral analizi neticesinde elde edilen kimyasal kompozisyonu Tablo 4.1.'de verilmiştir.

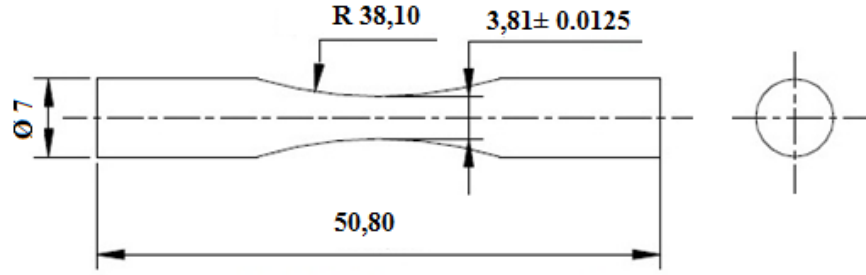
Tablo 4.1. AISI 4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (ağırlıkça %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
%	0,415	0,220	0,840	0,028	0,028	0,970	0,190

AISI 4140 çeliğinin yorulma davranışı inceleneceğinden malzemenin çekme numunesi haline getirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, öncelikle malzemeler Trakya Üniversitesi Ayşekadın Yerleşkesi'ndeki laboratuvarlarda bulunan Şekil 4.1.' deki torna tezgahında, 16 mm çaplı AISI 4140 çelikten, ASTM E-466 ve 468'e göre çapları düşürülerek, Şekil 4.2. 'de verilen çekme numunesi haline getirilmiştir.



Şekil 4.1. AISI 4140 çeliğinin çekme numunesi haline getirildiği torna tezgahı.



Şekil 4.2. Çekme numunesi haline getirilen AISI 4140 çeliğinin boyutları.

Yorulma davranışı üzerinde temas yüzeylerinin durumu önemli bir etken olduğundan talaş kaldırmada işleminin ardından numuneler taşlanmalı ya da çeşitli numaralardaki zımparalar ile yüzey kalitesi artırılmadadır. Bu çalışmada kullanılan numunelerin yüzey kalitesini arttırmak için sırasıyla; 180, 220, 400, 600, 800 ve 1200 numara zımparalar ile eksensel olarak zımparalanmış ve böylece torna/freze tezgahında işleme esnasında meydana gelen dairesel çizikler bertaraf edilmiştir. Tablo 4.2.' de AISI 1045 çeliğinin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.2. Su verilmiş ve temperlenmiş AISI 4140 çeliğinin mekanik özellikleri

Temperleme sıcaklığı (°C)	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Kesit daralması (%)	Sertlik (HRC)
205	1772	1641	8	38	52
315	1551	1434	9	43	47
425	1248	1138	13	49	40
540	951	834	18	58	30
650	758	655	22	63	21

Deney numuneleri torna tezgahında işlenip, zımpara ile yüzey kalitesi artırıldıktan sonra dört ayrı gruba ayrılmıştır. Tablo 4.3' de görüldüğü gibi numunelerin bir kısmı sadece tornalanmış kalan numuneler, Trakya Üniversitesi mekanik atölyesinde bulunan ısıtma işlem fırınında üç gruba ayrılarak 40, 46, 52 HRC sertlikte

sertleştirilmişlerdir. Tornalanmış ve parlatma işlemi yapılmış numuneler ± 1 HRC toleransta istenilen sertlik değerlerine getirilmiştir.

Tablo 4.3 Deneylerde kullanılan numune grupları

14 HRC Tornalanmış	40 HRC Tornalanmış	46 HRC Tornalanmış	52 HRC Tornalanmış
10 Adet numune	10 Adet numune	10 Adet numune	10 Adet numune



Şekil 4.3. Sertleştirme işleminin yapıldığı ısıtıl işlem fırını.

Sertleştirme işlemi, malzeme özelliklerini iyileştirmek ve ağırlığını arttırmadan yüksek dayanım elde edebilmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Yorulma dayanımını arttırmak amacı ile de kullanılan sertleştirme işlemi AISI 4140 çelik malzemesinde farklı sertlik derecelerinde numuneler elde etmede kullanılmıştır.

Tablo 4.4. Isıl işlem değerleri

Sertlik değeri (HRC)	Sertleştirme sıcaklığı (°C)	Sertleştirme süresi (s)	Sertleştirme ortamı	Temperleme sıcaklığı (°C)	Temperleme süresi (dak)
40	930	1	Yağ	425	45
46	930	1	Yağ	315	45
52	930	1	Yağ	205	45

4.2.2. Deney cihazları

Yorulma deneyleri, INSTRON 8501 dinamik test cihazında yapılmıştır. Bu cihaz 0,5-50 Hz frekans aralığında çalışmaktadır. Cihaz, 50 kN kapasitelidir.



Şekil 4.4. Yorulma deneylerinin yapıldığı INSTRON 8501 dinamik test cihazı.

4.2.3. Deneyin yapılışı

Yorulma deneyi için numuneler test cihazına 7 mm' lik pensler yardımıyla bağlanmıştır. Pensler arasındaki mesafe TSE 1143' e uygun olarak numunenin en dar kesitinde oluşacak maksimum gerilme hesaplanarak bulunmuştur.

Yorulma grafikleri ASTM E 739'a göre yapılmıştır. S-N (Wöhler) diyagramında numunelerin kullanım dağılımı ise, sonlu ömür dayanım bölgesinde az, sürekli dayanım bölgesinde mümkün olduğunca çok sayıda olmuştur. Yorulma grafikleri logaritmik ölçek ile çizilmiştir.

Grafiklerin çizimi esnasında öncelikle literatür araştırılması ile numunelerin akma dayanımları tespit edilmiştir. Daha sonra akma sınırından aşağıya doğru belirlenen aralıklar ile inilerek o numune grubunun yorulma dayanım sınırı tespit edilmiştir. Yorulma deneyleri sırasında bir gerilme seviyesinde kopmayan numuneler diğer bir gerilme seviyesinde kullanılmamıştır. Uygulanan gerilme değerinde numune kırılmamış ise deney 10^7 çevrim sayısını geçince kesilmiştir. Deneyler, yorulma cihazında periyodik olarak basma ve çekme yüklemesi ile yapıldığı için R= -1 kabul edilmiştir.

Tamamı laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde, yorulma dayanımı değeri hesaplanırken aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$\sigma = 10.18(LF/d^3) \text{ eşitliğinde;} \quad (4.1)$$

σ : Numune üzerine etkiyen maksimum gerilme (MPa)

L : Çubuğun boyu (mm)

F : Yük (N)

d : Çap (mm)'dir.

4.2.4. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Yorulma dayanımı grafiklerinin oluşturulmasında ilk uygulanan yükler numune gruplarının akma dayanımlarına bağlı olarak belirlenmiştir. Bu başlangıç değerleri, tornalanmış sertleştirilmemiş, 40, 46 ve 52 HRC sertleştirilmiş numuneler için sırası ile

675, 870, 870 ve 960 MPa' dır. Daha sonra numunelere uygulanan gerilmeler kademeli olarak azaltılarak deneylere devam edilmiştir. Bu işlemler sonucunda tornalanmış-sertleştirilmemiş, 40, 46 ve 52 HRC sertleştirilmiş numunelerin yorulma dayanımları sırası ile 455, 760, 778 ve 728 MPa olarak bulunmuştur.

Tablo 4.5. Yorulma deneyinde elde edilen neticeler

	14 HRC Tornalanmış	40 HRC Sertleştirilmiş	46 HRC Sertleştirilmiş	52 HRC Sertleştirilmiş
Yorulma Dayanımı (MPa)	455	760	778	728

Tornalanmış-sertleştirilmemiş numunenin yorulma dayanımı değeri, 40 HRC sertlikteki numunenin yorulma dayanımı ile karşılaştırıldığında; 40 HRC sertlikteki numunenin yorulma dayanımının, tornalanmış-sertleştirilmemiş numunenin yorulma dayanımı değerine göre yaklaşık % 67 artış gösterdiği anlaşılmıştır. 40 ve 46 HRC sertlikteki numunelerin yorulma dayanımı değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Fakat 40-46 HRC sertlikteki numunenin yorulma sınırı 52 HRC sertlikteki numunenin yorulma sınırı ile karşılaştırıldığında yorulma sınırında azalma olduğu tespit edilmiştir.

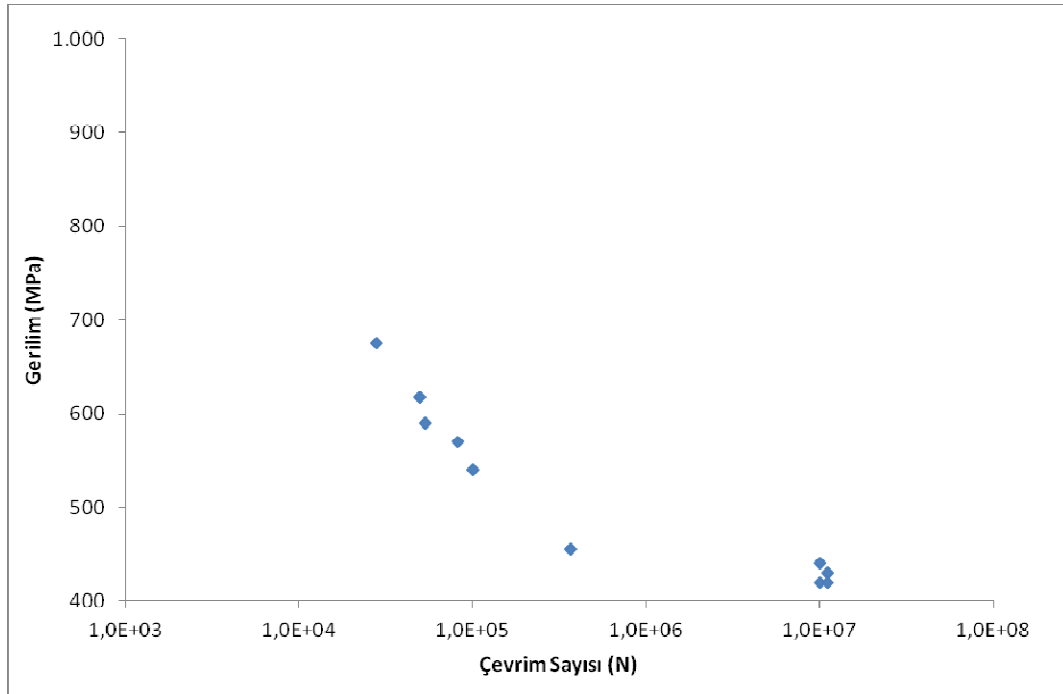
AISI 4140 çeliğinde sertleştirme yorulma dayanımını arttırmıştır. Ancak 52 HRC sertlikteki numunelerde elde edilen kırılgan yapıdan dolayı en yüksek yorulma dayanımına ulaşamamıştır. En iyi yorulma dayanımı 46 HRC sertleştirilmiş numunede olduğu görülmüştür.

46 HRC en yüksek yorulma dayanımı vermiştir. 46 HRC sertlikten sonra yorulma dayanımı azalma göstermiştir.

Lee ve arkadaşlarının, sertlikten dolayı yorulma ömrü gerilmesi için tahmini metotlar isimli çalışmalarında geliştirerek kullandıkları ampirik formülleri bu çalışmadaki çalışmamızdaki sertlik değerlerine uyguladığında, 40 HRC sertleştirilmiş numunelerin yorulma dayanımı 756 MPa olarak elde edilmektedir. Deneyler neticesinde 40 HRC sertleştirilmiş numunenin yorulma dayanımı ise 785 MPa' dır. Her iki netice arasındaki fark 4 MPa'dır. Aynı karşılaştırma 46 ve 52 HRC sertliğindeki AISI 4140

çeliği malzemelere de yapıldığında, 10 ve 24 MPa'lık farklar olduğu gözlenmiştir. Deneyin yapılışı ve sertleştirme koşullarındaki farklılıklar göz önüne alınarak, elde edilen sonuçların tutarlı olduğu kanaatine ulaşılmıştır [75].

Düşük alaşımlı çeliklerde mikro yapının mekanik özelliklere etkisi çok fazladır. Örneğin çeliğin martenzit yapısı en önemli etkiye sahiptir. Çeliğin martenzit hacim oranı arttıkça yorulma dayanımı değeri artmaktadır. Artan bu değerin optimum bir değer olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada AISI 4140 numuneler çeşitli sertlik değerlerine getirilmiş ve yorulma dayanımları karşılaştırılmıştır. Deneyler neticesinde 14, 40, 46 ve 52 HRC sertlikteki numunelerin yorulma dayanımları sırası ile 455, 760, 778 ve 728 MPa'dır. Bu neticelere göre optimum yorulma değeri 46 HRC sertlikte elde edilmiştir [76].

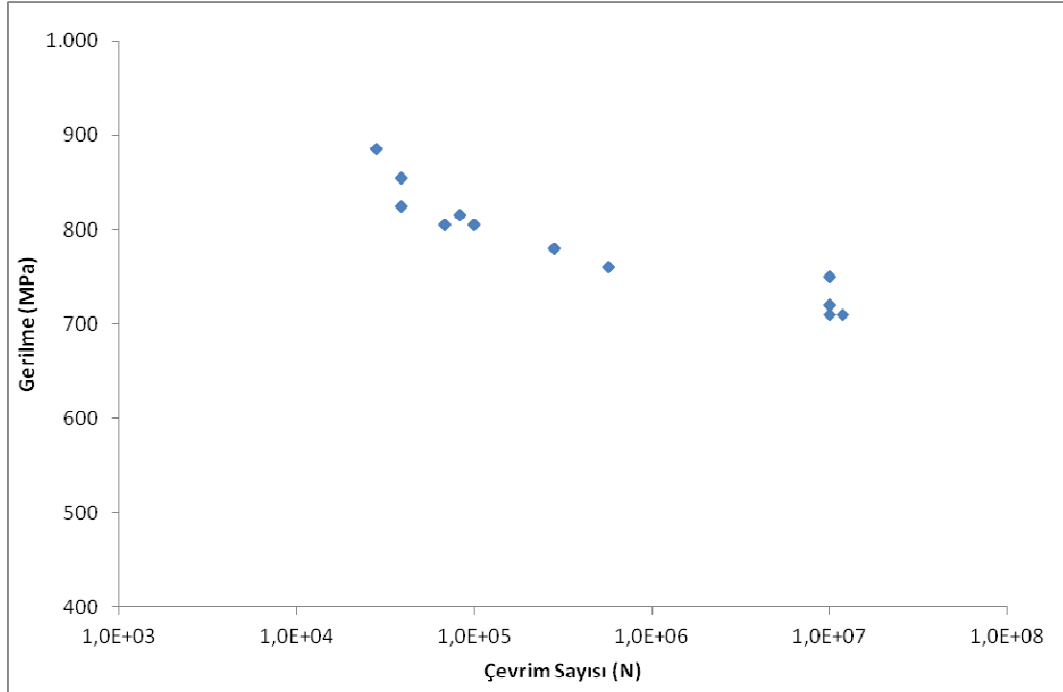


Şekil 4.5. AISI 4140 tornalanmış-sertleştirilmemiş numunesinin S-N grafiği.

AISI 4140 tornalanmış-sertleştirilmemiş numunenin S-N grafiği Şekil 4.5.'de, görülmektedir. Grafik oluşturulurken, öncelikle tornalanmış AISI 4140 çeliğinin akma sınırına yakın bir gerilme uygulanmıştır. Ardından numuneye uygulanan gerilmeler kademeli olarak azaltılarak deneylere devam edilmiştir. Numunenin kaç çevrim sonunda

koptuğu test cihazı üzerindeki sayaç yardımı ile tespit edilmiştir.

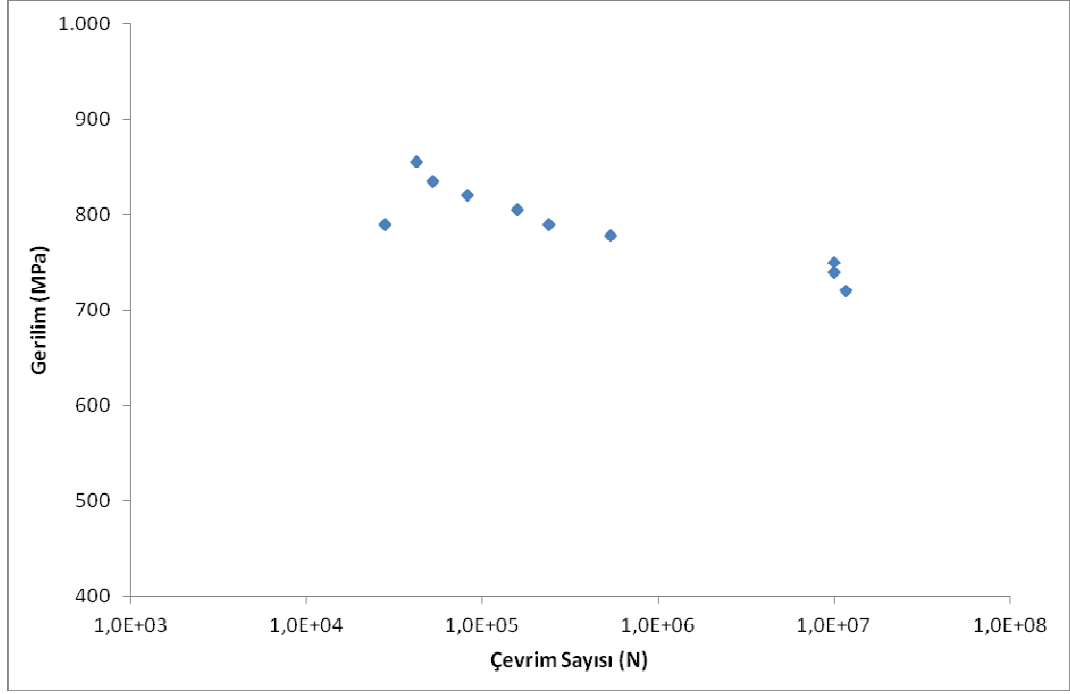
Uygulanan gerilme değerinde numune kırılmamış ise deney 10^7 çevrim sayısına ulaşınca durdurulmuştur. Elde edilen veriler logaritmik olarak grafiğe çevrilmiştir. Bu işlem sonucunda tornalanmış numunenin yorulma dayanımı 470 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.6. AISI 4140 çeliği numunesinin 40 HRC sertlik değerindeki S-N grafiği.

40 HRC sertlik değerindeki AISI 4140 çeliği numunesinin S-N grafiği Şekil 4.6.'da görülmektedir. Grafik oluşturulurken, numuneye ilk olarak 870 MPa gerilme uygulanmıştır. Uygulanan bu gerilme altında numunenin çevrim sayısı sayaç yardımı ile bulunduktan sonra kademeli azalan gerilmeler S-N grafiği çizilmiştir.

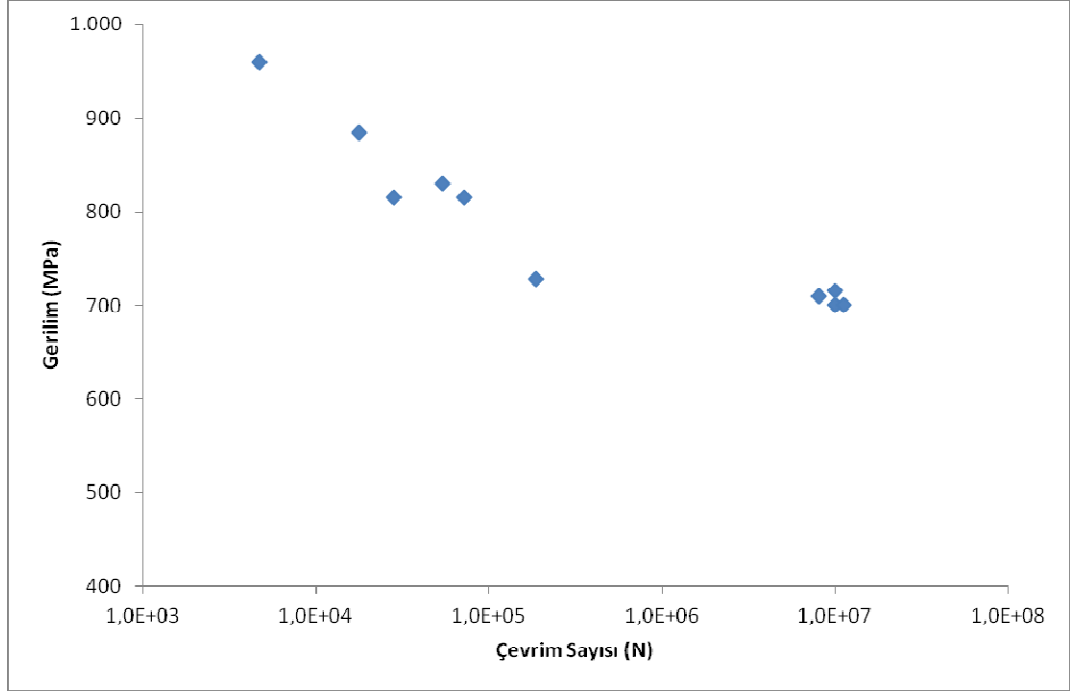
Uygulanan gerilme değerinde numune kırılmamış ise deney 10^7 çevrim sayısına ulaşınca durdurulmuştur. Elde edilen veriler logaritmik olarak grafiğe çevrilmiştir. Bu işlem sonucunda 40 HRC sertleştirilmiş numunenin yorulma dayanımı 760 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.7. AISI 4140 çeliği numunesinin 46 HRC sertlik değerindeki S-N grafiği.

46 HRC sertlik değerindeki AISI 4140 çeliği numunesinin S-N grafiği Şekil 4.7.'de, görülmektedir. Grafik oluşturulurken, numuneye ilk olarak 870 MPa gerilme uygulanmıştır. Daha sonra kademeli azalan gerilmeler uygulanarak S-N grafiği çizilmiştir. Uygulanan gerilmeler sonucunda numunenin kaç çevrim sonunda koptuğu test cihazı üzerindeki sayaç yardımı ile tespit edilmiştir.

Uygulanan gerilme değerinde numune kırılmamış ise deney 10^7 çevrim sayısına ulaşınca durdurulmuştur. Elde edilen veriler logaritmik olarak grafiğe çevrilmiştir. Bu işlem neticesinde 46 HRC sertleştirilmiş numunenin yorulma dayanımı 778 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.8. AISI 4140 çeliği numunesinin 52 HRC sertlik değerindeki S-N grafiği.

52 HRC sertlik değerindeki AISI 4140 çeliği numunesinin S-N grafiği Şekil 4.8.'de, görülmektedir. Grafik oluşturulurken, öncelikle 52 HRC sertleştirilmiş AISI 4140 çeliği numunesinin akma sınırına yakın bir gerilme uygulanmıştır. Numuneye uygulanan ilk gerilme 960 MPa' dır. Ardından numuneye uygulanan gerilme azaltılarak deneylere devam edilmiştir. Uygulanan gerilmeler sonucunda numunenin kaç çevrim sonunda koptuğu test cihazı üzerindeki sayaç yardımı ile tespit edilmiştir.

Uygulanan gerilme değerinde numune kırılmamış ise deney 10^7 çevrim sayısına ulaşınca durdurulmuştur. Elde edilen veriler logaritmik olarak grafiğe çevrilmiştir. Bu işlem neticesinde 52 HRC sertleştirilmiş numunenin yorulma dayanımı 728 MPa olarak tespit edilmiştir.

4.3. AISI 1045 Çeliğinin Yorulma Dayanımının İncelenmesi

4.3.1. Deney numunelerinin hazırlanması

Deneylerde kullanılan AISI 1045 çeliğinin spektral analizi neticesinde elde edilen kimyasal kompozisyonu Tablo 4.6.'da verilmiştir.

Tablo 4.6. AISI 1045 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (ağırlıkça %)

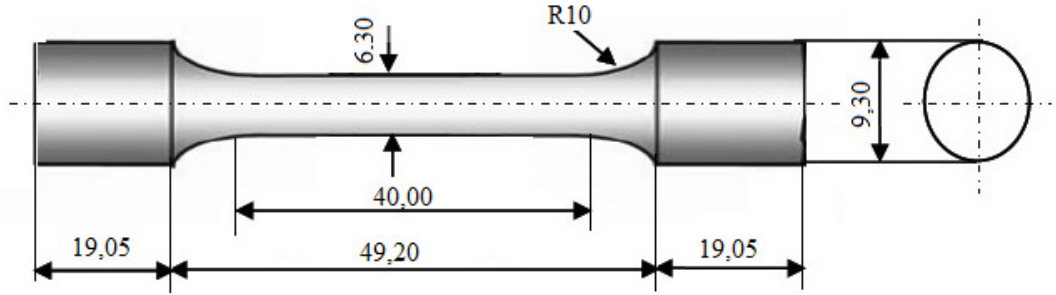
Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
AISI 1045	0,4470	0,2850	0,6570	0,0230	0,0370	0,1980	0,0330	0,1230

AISI 1045 çeliğinin yorulma davranışı inceleneceğinden malzemenin çekme numunesi haline getirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, öncelikle malzemeler Trakya Üniversitesi Ayşekadın Yerleşkesi'ndeki laboratuvarlarda bulunan Şekil 4.1' deki torna/freze tezgahlarında, çekme numunesi haline getirilmiştir.



Şekil 4.9. AISI 1045 çeliğinin çekme numunesi haline getirildiği torna tezgahı.

Bu çalışmada kullanılan çekme numuneleri, Şekil 4.10.' da belirtilen ölçülerde hazırlanmıştır. Yorulma deney numuneleri, 40 mm' lik ölçü uzunluğu ve 6.3 mm' lik çap olacak şekilde silindirik AISI 1045 çeliği malzemeden işlenerek hazırlanmıştır.



Şekil 4.10. Çekme numunesi haline getirilen AISI 1045 çeliğinin boyutları.

Yorulma davranışı üzerinde temas yüzeylerinin durumu önemli bir etken olduğundan talaş kaldırmada işleminin ardından numuneler taşlanmalı ya da çeşitli numaralardaki zımparalar ile yüzey kalitesi artırılmadır. Bu çalışmada kullanılan numunelerin yüzey kalitesini arttırmak için sırasıyla; 180, 220, 400, 600, 800 ve 1200 numara zımparalar ile eksensel olarak zımparalanmış ve böylece torna/freze tezgahında işleme esnasında meydana gelen dairesel çizikler bertaraf edilmiştir.

Sertleştirme işlemi, malzeme özelliklerini iyileştirmek ve ağırlığını arttırmadan yüksek dayanım elde edebilmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Sertleştirme işlemi, Yorulma dayanımını arttırmaktadır. Bu çalışmada, deney numuneleri torna tezgahında işlenip, zımpara ile yüzey kalitesi artırıldıktan sonra ENDER TAV ISIL İŞLEM LTD ŞTİ'deki, 150 kW, 500 kHz, 850-1000 °C, 15 kg kapasiteli AAGES LTD indüksiyon cihazında sertleştirilmiştir.



Şekil 4.11. İndüksiyonla yüzey sertleştirme cihazı.



Şekil 4.12. İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi test cihazı uygulama örneği.

Bu çalışmada, indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi için seçilen işlem parametreleri Tablo 4.7.' de verilmiştir. Su verme işleminde soğutma ortamı olarak su kullanılmıştır. Yeterli tokluk elde etmek için, indüksiyonla sertleştirme işleminden sonra, temperleme uygulanmıştır.

Tablo 4.7. İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi işlem parametreleri

Numune	Frekans (kHz)	Güç (kW)	Isıtma Süresi (s)	Sıcaklık (°C)
AISI 1045	500	25	6	950

4.3.2. Deney cihazları

Yorulma deneyleri, INSTRON 8501 dinamik test cihazında yapılmıştır. Bu cihaz 0,5-50 Hz frekans aralığında çalışmaktadır. Cihaz, 50 kN kapasitelidir.



Şekil 4.13. Yorulma deneylerinin yapıldığı INSTRON 8501 dinamik test cihazı.

4.3.3. Deneyin yapılışı

Yorulma deneyi için numuneler test cihazına pensler yardımıyla bağlanmıştır. Pensler arasındaki mesafe TSE 1143'e uygun olarak numunenin en dar kesitinde oluşacak maksimum gerilme hesaplanarak tespit edilmiştir.

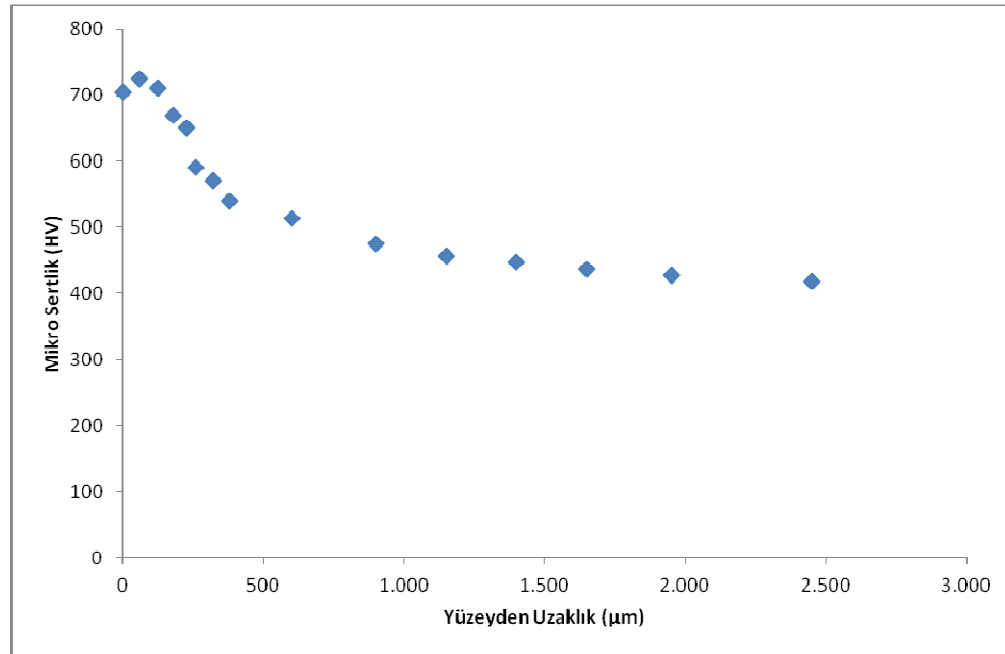
Yorulma deneyleri sırasında bir gerilme seviyesinde kopmayan numuneler diğer

bir gerilme seviyesinde kullanılmamıştır. Yorulma limiti, göz önüne alınan bütün numunelerin 3.10^6 çevrimde kırılmadığı gerilme değeri olarak alınmıştır. Yorulma limitleri, stair case metodunu ihtiva eden JSM S002 standardı kullanılarak elde edilmiştir. Deneyler, yorulma cihazında periyodik olarak basma ve çekme yüklemesi ile yapıldığı için $R = -1$ kabul edilmiştir [77,78,79]

4.3.4. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Isıl işlemsiz malzemenin sertliği 205 HV olarak ölçülmüştür. Sertleştirilmiş numunenin kesitindeki sertlik dağılımı Şekil 4.14.'de verilmiştir.

Sertleştirme işleminden sonra numune yüzeyindeki sertlik değeri 705 HV, maksimum sertlik yüzeyden 0,05 mm mesafede 724 HV olarak tespit edilmiştir. Martenizitik yapının tamamen oluşmaması bu tür bir sertlik farkına sebep olmuştur.

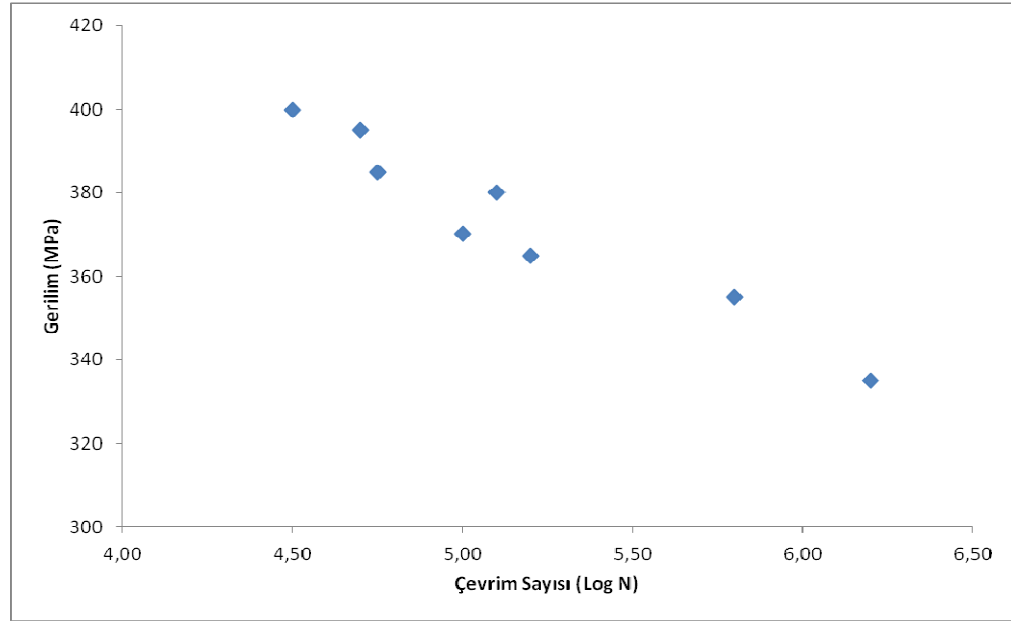


Şekil 4.14. AISI 1045 çeliğinin yüzey mesafesi ile sertlik arasındaki ilişki.

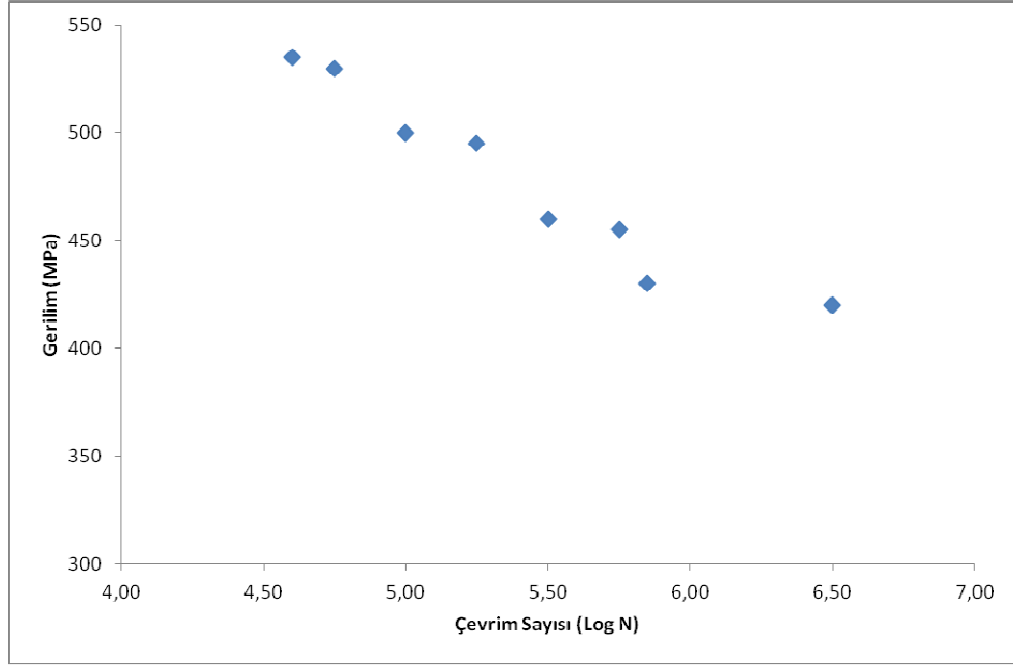
Bu çalışmada sonsuz yorulma ömrü sınırı 3.10^6 çevrim olarak kabul edildi. JSME 002-1981 standart istatistiksel metodu kullanılarak göz önüne alınan durumlar

için S-N eğrileri tespit edildi. Eğimli bölge için dört gerilme genlik seviyesinde toplam sekiz numune ve yatay bölüm stair case metodu ile toplam altı numune olmak üzere bir SN eğrisi için toplam on dört numune kullanıldı.

İndüksiyonla sertleştirme uygulanmamış ve indüksiyonla sertleştirme uygulanmış AISI 1045 çeliği için S-N grafikleri Şekil 4.15. ve Şekil 4.16' da verimiştir. Bu grafikler, yorulma dayanımının, uygulanan gerilme genliğine bağlı olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 4.15. İndüksiyonla sertleştirilmemiş AISI 1045 çeliğinin S-N grafiği.



Şekil 4.16. İndüksiyonla sertleştirilmiş AISI 1045 çeliği için S-N grafiği.

İndüksiyonla sertleştirme uygulanmamış numunelerin yorulma limiti 335 MPa olarak tespit edildi. İndüksiyonla sertleştirilmiş numuneler için yorulma limiti ise 420 MPa olarak tespit edildi. İndüksiyonla sertleştirilmiş numunelerin için yorulma limitinin, indüksiyonla sertleştirme uygulanmamış numunelerin yorulma limitinden yüksek olması, indüksiyonla sertleştirmenin yorulma limitinde yaklaşık % 30' lar seviyesinde artış sağladığını göstermektedir. Bu artışın sebebi, yüzey sertliğinin artması ve yüzeyde bası artık gerilmelerinin oluşmasıdır. Bu durum, yorulma çatlığının başlasına ve yayılmasına karşı direnç oluşturur. Daha önce yapılmış çalışmalardan da bilindiği üzere, indüksiyonla sertleştirme işlemi neticesinde meydana gelen bası gerilmeleri, esas malzemenin akma dayanımına erişmektedir.

Tablo 4.8. Yorulma deneyleri neticesinde elde edilen yorulma limitleri

	İndüksiyonla Sertleştirme Uygulanmamış Yorulma Testi	İndüksiyonla Sertleştirme Uygulanmış Yorulma Testi
Yorulma Limiti (MPa)	335	420

Yorulmada, yüzey bölgesinde dinamik kayma gerilmelerinin etkisi ile meydana gelen dislakasyon hareketinin sebep olduğu çatlak oluşumu, yorulma ömrünün önemli bir bölümünü ihtiva etmektedir. Yüzey mukavemetinin artırılması, dislakasyon hareketini zorlaştırır ve çatlak oluşumunu geciktirir. Böylece malzemenin yorulma mukavemeti de artmış olur. Ayrıca indüksiyonla sertleştirme işleminin oluşturduğu bası gerilmeleri maksimum değişken bileşke geriliminin yüzeyle merkez arasında yüzey altında bir bölgeye ötelenmesine sebep olur. Bu durum yüzeydeki gerilmenin, uygulanan gerilmeye göre daha düşük olmasına sebep olacaktır [80].

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Yorulma ve aşınmaya maruz kalan bütün malzemelerin ömürlerini ve çalışma performanslarını geliştirmek için yorulma ve aşınma sistemleri üzerindeki araştırmalar giderek artmaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalar, malzemelerde, yorulma ve aşınma davranışları ile mekanik özellikler arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu işaret etmektedir. Malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileşmesi ile birlikte aşınma dirençleri de yükseltmektedir. Aynı şekilde, yük artışı ile yorulma ve aşınma oranı arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Yüzeyde oluşan oksitler ise, sürtünme kuvvetini düşürdüğünden yorulma ve aşınma direncini artırmaktadır.

Malzemelere uygulanan ısıtma işlemleri de, yorulma ve aşınma direncini etkilemektedir. Mesela, normalizasyon tavlama uygulanan malzemelerde yorulma ve aşınma direncinde düşüş meydana gelirken, sertleştirmeye tabi tutulan malzemelerde ise iyi bir yorulma ve aşınma direnci elde edilmektedir.

Yapılan çalışmalar neticesinde, farklı sertliklerde, yorulma dayanımının da farklı olduğu, sertlik arttıkça yorulma dayanımının da arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca malzeme yapısının da yorulma dayanımına tesir eden etkenlerden olduğu; düşük karbonlu çeliklerde yorulma ve aşınma direncinin daha düşük olduğu görülmüştür. Ancak malzemeye yapılan krom ve mangan gibi alaşım elementi ilavesi ile aşınma direncinde iyileştirme yapılabildiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. A. Münir CERİT ve Dr. Erdoğan TEKİN, *Makine Mühendisliği El Kitabı Cilt I*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 1994.
2. Emrah ÇINAR, *Tasarımda (Konstrüksiyonda) Malzeme Seçimi*, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Resim ve Konstrüksiyonu Öğretmenliği Lisans Tezi, Ankara, 2007.
3. Y. Saip SERFİÇELİ, *Malzeme Bilgisi*, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, 2000.
4. M. Ali TOPBAŞ, *Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı*, İstanbul, Ekim Ofset, 1998.
5. U. FISCHER, *Metal Meslek Bilgisi*, Milli Eğitim Bakanlığı, 1995.
6. Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR, *Modern Talashlı İmalatın Esasları*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2006.
7. William F. SMITH, *Structure and Properties of Engineering Alloys*, Mcgraw-Hill International Editions, 1993.
8. Can ODABAŞ, *Paslanmaz Çelikler, Temel Özellikleri, Kullanım alanları, Kaynak Yöntemleri*, Eczacıbası - Lincoln Electric, 2004.
9. Macit ÇİĞDEMOĞLU, *Metal Alaşımlarının Isıl İşlemleri*, Makine Mühendisleri Odası, 73, 61-89, 1972.
10. R. Donald ASKELAND, *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri I*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2002.

11. Temel SAVAŞKAN, *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*, Celepler Matbaacılık, Trabzon, 2007.
12. Prof. Dr. Hayri YALÇIN ve Prof. Dr. Metin GÜRÜ, *Malzeme Bilgisi*, Palme Yayıncılık, 2002.
13. Yrd. Doç. Dr. Yavuz SUN ve Hüseyin ÇİMENOGU, *Krom-Nikelli Çeliklerin Aşınma Davranışları*, İ.T.Ü Dergisi, 5, 1, 145-149, 2006.
14. I. ALPHONSA, A. CHAINANI, P. M. RAOLE, B. GANGULI, P. I. JOHN, *A study of martensitic stainless steel AISI 420 modified using plasma nitriding*, Surface and Coatings Technology, 150, 263-268, 2002.
15. Şükrü TAKTAK, *Tribological properties of borided bearing steels at elevated Temperatures*, Surface and Coating Technology, 2006.
16. Derviş DÜZGÜN, *Uygulanmış Makine Elemanları*, TSE Bakanlıklar, 2004.
17. M. Mustafa YILDIRIM, *Malzeme Bilgisi - 3*, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 1984.
18. Şefik GÜLEÇ, *Malzeme Ders Notları*, İTÜ Makine Fakültesi Ofset Atölyesi, 1990.
19. Serkan ERDEM, *Yüksek Karbon İçeriğine Sahip, Yüksek Kromlu, Manganlı ve Alaşımsız Düşük Karbonlu Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 2006.
20. K-E. THELNING, *Çelik ve Isıl İşlemi Bofors El Kitabı*, Hakan Ofset, 1984.
21. Dr. Şakir BOR, *Çelikler ve Yüzey Sertleştirme İşlemleri*, Makine Mühendisleri Odası, 25, 292, 1984.

22. Osman ASİ, Dilek ASİ *Sementasyon Yapılan SAE 8620 Çeliğinde Meydana Gelen Kalıntı Östenit Miktarlarının İncelenmesi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 17, 4, 103-113, 2004.
23. Mümtaz Salih ERDEM ve İbrahim Sinan AKMANDOR, *Uçak Motoru ve Elektrojen Gruplarındaki Gaz Türbini Teknolojisindeki İlerlemeler, Malzeme, Yüzey Teknolojileri ve İmalat Süreçlerindeki Gelişmeler*, Mühendis ve Makine Dergisi, 529, 38-46, 2004.
24. Dr. Şengül DANIŞMAN ve Prof. Dr. Recep KILIK, *Yüksek Vakum Teknolojisi ile Modern Kaplama Teknikleri*, 7. Denizli Malzeme Sempozyumu, 361-368, 1997.
25. American Society for Metals, *Metals Handbok Volume 2: Properties and Selection: Nonferras, Alloys and Pure Metals*, 96-114, 1994.
26. M. Mustafa YILDIRIM, S. Zafer DOĞANTAN, Ahmet ÇAKAN ve Murat PAKDİL, *Mühendislik Malzemeleri I*, MKÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 9, 3, 95-135, İskenderun, 2001.
27. M. Mustafa YILDIRIM, S. Zafer DOĞANTAN, Ahmet ÇAKAN ve Murat PAKDİL, *Mühendislik Malzemeleri III*, MKÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 9, 3, 10-21, İskenderun, 2001.
28. M. Mustafa YILDIRIM, *Çelik Malzemelerde Endüksiyonla Yüzey Sertleştirme*, TMMOB Metalurji Mühendisleri Dergisi, 30, 9, 8-16, 1983.
29. M. Mustafa YILDIRIM, *C40 çeliğinde alevle yüzey sertleştirme işlemi ve uygulamalarda karşılaşılan sorunlar*, IV. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 539-551, Denizli, 1991.
30. M. Mustafa YILDIRIM, *Döküm Tekniği*, Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yayınları, No:132, Fırat Üniversitesi Basımevi, 25-34, Elazığ, 1989.

31. M. Mustafa YILDIRIM, *Lazerle yapılan yüzeysel işlemlerde son uygulama teknikleri*, V. Denizli Malzeme Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Cilt 2, 561-570, Denizli, 1993.
32. ASM Handbook Heyeti, *Properties and Selection of Metals, American Society for Metals*, ASM Metals Handbook, 8, 1, 94-107, 1988.
33. Ahmet ÇAKAN, *AISI 1070 Çeliğinden Üretilen İşlemsiz, Yüzey İşlemeli ve Sert Yüzey Kaplamalı Kesici Takımların Mekanik Özelliklerinin, Mikro yapı ve Kesme Performanslarının İncelenmesi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 2006.
34. Uğur ÖZSARAÇ, *Endüstriyel Yatak Alaşımlarının Aşınma Davranışlarının Karakterizasyonu*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 1999.
35. F. YILMAZ, *Sürtünme ve Aşınma*, 9th International Metallurgy and Materials Congress, 229-256, 1997.
36. Frank KREITH, D. Yogi GOSWAMI and Bela I. SANDOR, *The CRC Handbook of Mechanical Engineering*, CRC Press LLC (pdf form), 3.10, 129-137, 2005.
37. Tülay YILDIZ ve Ali Kaya GÜR, *Aşınma sistemleri*, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 4, 2, 86-91, 2006.
38. Doç. Dr. İrfan AY, *Hasar Analizi Yüksek Lisans-Doktora Ders Notları*, Balıkesir, 2004.
39. Metin Yılmaz GÜRLEYİK, *Metallerin ve Metal Olmayan Sert Malzemelerin Taneli Maddeler Tarafından Sürtünülerek Aşındırılması*, Mühendis ve Makina, 15, 175, 157-168, 1971.

40. Metin Yılmaz GÜRLEYİK, *Metallerin ve Metal Olmayan Sert Malzemelerin Taneli Maddeler Tarafından Sürtünülerek Aşındırılması*, Mühendis ve Makina, 19, 217, 157-168, 1975.
41. Metin Yılmaz GÜRLEYİK, *Makine Mühendisliğinde Aşınma Olayları*, Mühendis ve Makina, 27, 323, 3-14, 1986.
42. D. J. JARREL and F. BEJBL, *Understanding Wear and Friction in Medical-Grade Stainless Steels*, Medical Device&Diagnostic Industry Magazine MDDI Article Index, 1999.
43. M. Ali TOPBAŞ, *Endüstri Malzemeleri II*, Prestij Yayıncılık, 1993.
44. D. DOWSON, *Tribology before Columbus*, Mechanical Engineering, 1973.
45. Bharat BHUSHAN, *Modern Tribology Handbook*, CRC Press LLC (pdf form), Ch. 13 and Ch.7, 2001.
46. Bharat BHUSHAN and B. K. GUPTA, *Handbook of Tribology*, McGraw-Hill, NewYork, 1991.
47. Serkan ÖZEL, *Cu-Sn-Zn-Al Bronz Alaşımli Yü-zeyine Ferromangan Kaplamasının Aşınma Direncine Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2004.
48. Prof. Dr. Mahmut İZCİLER ve Engin BİLGİÇ, *Aşınma Tipleri, Kullanılan Test Cihazları, Ölçüm Yöntemleri*, I. Demir Çelik Sempozyumu ve Sergisi, 819-826, 2001.
49. M. M. KHRUSCHOV, *Principles of Abrasive Wear*, Wear, 28, 69–88, 1974.

50. K. HOKKIRIGAWA and K. KATO, *An Experimental and Theoretical Investigation of Ploughing, Cutting and Wedge Formation During Abrasive Wear*, Tribology Int., 21, 1, 51-57, 1988.
51. E. RABINOWICZ, *Wear Coefficients–Metals*, Wear Control Handbook (M. B. Peterson and W.O WINER), ASME, New York, 1980.
52. J. M. CHALLEN and P. L. B. OXLEY, *An Explanation of The Different Regimes of Friction and Wear Using Asperity Deformation Models*, Wear, 53, 229–243, 1979.
53. J. M. CHALLEN, P. L. B. OXLEY and B. S. HOCKENHULL, *Prediction of Archard's Wear Coefficient For Metallic Sliding Friction Assuming a Low Cycle Fatigue Wear Mechanism*, Wear, 111, 275-288, 1986.
54. Gustaf LUNDBERG. and Arvid PALMGREN, *Dynamic Capacity of Roller Bearings*, Ingeniorsrenten-Skapsakademiens, Nr. 210, 1952.
55. W. WEIBULL, *A Statistical Theory of The Strength of Materials*, IVA Handlinger, (Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, Proceedings) Nr. 151, 1930.
56. K. F. DUFRANE and W. A. GLAESER, 1976, *Rolling-Contact Deformation of MgO Single Crystals*, Wear, 37,21–32.
57. Soner BUYTOZ, *AISI 4340 çeliğinin nitrürasyon ve GTA kaynak yöntemi ile yüzey modifikasyonu işlemleri sonrası mekaniksel davranışlarının araştırılması*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Elazığ, 2004
58. Yrd. Doç. Dr. Özkan SARIKAYA, *Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri*, Sakarya, 2007.

59. X. Y. WANG and D. Y. LI, *Application of an electrochemical scratch technique to evaluate contributions of mechanical and electrochemical attacks to corrosive wear of materials*, Elsevier, Wear 259, 1490-1496, 2005.
60. T. F. J. QUINN, *Wear and Lubrication*, in Proc. Int. Conf. on Tribology-Friction, Inst. Mech. Engrs.Conf. Series, 253–259, 1987.
61. T. E. FISHER and H. TOMIZAWA, *Interaction of Tribochemistry and Microfracture in the Friction and Wear of Silicon Nitride*, Wear, 105, 29–45, 1985.
62. S. KITAOKA, T. TSUJI, Y. YAMAGUCHI and K. KASHIWAGI, *Tribochemical Wear Theory of nonoxide Ceramics in High-Temperature And High-Pressure Water*, Wear, 205, 40-46, 1997.
63. Ian M. HUTCHINGS, *Tribology: Friction and Wear Engineering Materials*, CRC Press, 1992.
64. Hüseyin ÇİMENOGU, E. S. KAYALI, N. ERUSLU, M. ÜRGEN ve Y. TAPTIK, *Hasar Analizi Seminer Notları*, 1997.
65. Hüseyin TURHAN, *Ostenitik Manganlı Çeliğin Aşınma Davranışlarının Araştırılması*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ, 1994.
66. H. UZUNER, *Polimerlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2001.
67. Yavuz SOYDAN ve Lütfullah ULUKAN, *Triboloji: Sürtünme, Aşınma, Yağlama Bilimi ve Teknolojisi*, Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi Teknolojik Yayınlar Serisi No: 1, Sakarya, 2003.

68. T. KOÇER, *Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen Al₂O₃ ve SiC Partikül Takviyeli Al-Mg Metal Matriksli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2002.
69. İbrahim ANLAŞ, *Şasi Temel Ders Kitabı*, M.E.B. Yayınları, İstanbul, 1988.
70. S. SOEMANTRI, A.C. McGEE and I. FINNIE, , *Some Aspects of Abrasive Wear at Elevated Temperatures*, Wear, 104, 77-91, 1985.
71. Levent ŞİŞMAN, *Bir Aşınma Deney Cihazının Tasarım ve İmalatı*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 1999.
72. M. A. MOORE, *A Review Of Two-Body Abrasive Wear*, Wear, 27, 1-17, 1974.
73. M. A. MOORE, *The Relationship Between The Abrasive Wear Resistance, Hardness And Mikrostructure of Ferritic Meraials*, Wear, 28, 59-68, 1974.
74. M. A. MOORE, *The Effect of Particle Shape on Abrasive Wear, Wear of Metarials*, 11, 1-17, 1983.
75. Lee, Kwang-Soo, Song, Ji-Ho, *"Estimation method for strain-life fatigue properties from hardness"*, International Journal of Fatigue, 27, 1-15, 2005.
76. Boyer, H. E. (Ed.), *"Atlas of fatigue curves" Metals Park: American Society for Metals*, 1-12, 1986.
77. Sheng-Kuei Lin, Yung-Li Lee, Ming-Wei Lu., *"Evaluation of staircase and accelerated test methots for fatigue limit distribution"*, International jurnal of fatigue, 75 – 83, 2001.
78. Gope P.C., *"Determination of sample size for estimation fatigue life by using Weibull or lognormal distribution"* International jurnal of fatigue, 745-752, 1999.

79. Nakazava H. And Kodama S., *"Statistical S – N Testing method with 14 specimens: JSME Standard method for determination of S – N curves"*, 1985.

80. Bell, T.-Loh, N.L: J., *Heat Treat.*, 232, 1982.

ÖZGEÇMİŞ

Ayhan DEMİR, 1979 yılında Ankara'da doğdu. İlköğretimini Ankara, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2002 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2010 yılında Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde, yüksek lisans öğrenimine başladı. Evlidir.