

**Cr-Mo ÇELİKLERİNİN AŞINMA VE KOROZİF
AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**2013
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

Samet AYVAZ

**Cr-Mo ÇELİKLERİNİN AŞINMA VE KOROZİF AŞINMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Samet AYVAZ

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2013**

Samet AYVAZ tarafından hazırlanan “Cr-Mo ÇELİKLERİNİN AŞINMA VE KOROZİF AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Yavuz SUN

Tez Danışmanı, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 25/ 06/ 2013

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ACARER (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Bilge DEMİR (KBÜ)

...../...../2013

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Samet AYVAZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Cr-Mo ÇELİKLERİNİN AŞINMA VE KOROZİF AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Samet AYVAZ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Yavuz SUN

Haziran 2013, 79 sayfa

Bu çalışmada, 2,25Cr-1Mo içeren çeliklerin orijinal ve ısıtıl işlem uygulanmış halde aşınma ve koroziif aşınma davranışları incelenmiştir. Çeliklere uygulanan ısıtıl işlem; 940 °C’de 1 saat östenitleme ve ardından 650 °C’de 8 saat bekletilip havada soğutma kademelerinden oluşmaktadır.

Orijinal ve ısıtıl işlem uygulanmış çeliklerin mikroyapı karakterizasyonu için sırasıyla optik ışık mikroskobu (LOM) ve enerji dağılımlı X- ışınları spektroskopisi (EDS) donanımlı taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı kullanılmıştır. Mekanik özelliklerini karakterize etmek için numuneler 500 g yük altında Shmadzu marka sertlik cihazında Vickers cinsinden sertlik testlerine tabi tutulmuştur. Sertlik testlerinin sonucunda ısıtıl işlem görmüş numunelerin sertlik değerinin artığı gözlenmiştir.

Metal-metal aşınma deneyleri, 30 mm yüksekliğinde ve 9 mm çapındaki deney numuneleri kullanılarak, normal atmosferik koşullarda, DIN 1.2379 (62 HRC) kalite soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş diskler üzerinde yapılmıştır. Aşınma deney numunelerine 10-40 N arasında üç farklı yük uygulanmıştır. Deneyler 0.2 m/s kayma hızı, 1000 m, 2000 m ve 4000 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Gerek kayma mesafesi gerekse uygulanan yükün artması ile aşınma miktarı artmıştır. İncelenen çeliklerde, düşük yüklerde (10,20 N) ağırlık kayıpları birbirine yakın seyrederken, yüksek yüklerde (40 N) ağırlık kaybı farkı artmıştır. Isıl işlem uygulanmış çeliklerde yüksek yüklerde daha fazla ağırlık kaybı meydana gelmiştir.

Korozif aşınma deneyleri, konsantrasyonu % 10 olan NaCl ve HCl çözeltileri içerisinde yapılmıştır. Deney numunelerinin boyutları 25x15x9 mm'dir. Deneylerde karşı aşındırıcı malzeme olarak 6 mm çapında yüksek kromlu çelik bilye kullanılmıştır. Korozif aşınma deneyleri 10-40 N arasında 4 farklı yük altında gerçekleştirilmiştir. Deneyler 3 saat süre ile 30 mm/sn hız ve 340 m yol kat edecek şekilde yapılmıştır. Korozif aşınma deneyleri sonucunda tüm yükler altında ısıl işlem görmüş numuneler orijinal numunelere göre daha fazla aşınmıştır.

Anahtar Sözcükler : Cr-Mo celikleri, aşınma, korozif aşınma, mikroyapı ve mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 915.1.092

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF WEAR AND CORROSIVE WEAR PROPERTIES OF Cr-Mo STEELS

Samet AYVAZ

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Yavuz SUN

June 2013, 79 pages

In this study, 2,25Cr-1Mo containing steels of different heat treatment conditions depending on the wear and corrosive wear behavior reported. 2,25Cr-1Mo steels were treated under process of austenitizing (at 940 °C and for 1 hours) and tempering (650 °C temperature of 8 hours).

Optical light microscope (LOM) and scanning electron microscope (SEM) equipped (EDS) device was used in determinations of elemental analyzing and chemical formulazing of intermetallics in the heat treated and original steel microstures. Hardness of the cross section of all examined steels, which were prepared metallographically, was measured using Vickers indenter on a Schimadzu HMV2 model micro-hardness device under a load of 500 g. The hardness of the heat treated steel was higher than the original steel.

Metal-metal wear tests were applied under atmospheric conditions with samples 30 mm in height and 9 mm in diameter on disc of DIN 1.2379 (62 HRC) cold work tool steel. Wear test were carried out under three different loads between 10-40 N. Experiments were applied with 0,2 m/s sliding speed and at 1000m, 2000m and 4000 m sliding distance . Both the increase in sliding distance and applied load increase the amount of wear. While in investigation steels, the change in the weight loss was inconsiderable under low loads (10,20 N), the weight loss increased at high load (40 N) in a given sliding distance. The increase in the weight loss with the applied higher load became evident after the heat treatment.

Corrosive wear tests were applied in concentration of %10 NaCl and HCl solutions with samples 9 mm in height, 9 mm width and 25 mm length. Against abrasive material is 100Cr 6 ball (6mm diameter), used in the experiments. Corrosive wear test were carried out under four different loads between 10-40 N. Experiments were applied with 30 mm/sn speed and at 340 m sliding distance. Corrosive wear resistance of the heat treated steels were found to be lower in according to that of the original steels.

Key Word : Cr-Mo steels, wear, corrosive wear, microstructure and mechanical properties.

Science Code : 915.1.092

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Yavuz SUN 'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Deneysel alıőmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakóltesi öğretim üyesi, çok kıymetli hocalarım Sayın Prof. Dr. Mustafa ACARER, Doç. Dr. Hayrettin AHLATI ve Arő. Gör. Engin ÇEVİK 'e teőekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalıőmalarım için gerekli numunelerin hazırlanmasında yardımını esirgemeyen babam Hikmet AYVAZ 'a teőekkürü borç bilirim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımını esirgmeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
YÜKSEK SICAKLIK ÇELİĞİ.....	3
2.1. YÜKSEK SICAKLIK CrMo ÇELİKLERİ.....	3
2.2. CrMo ÇELİK ÇEŞİTLERİ.....	3
2.2.1. 0,5 Mo Çeliği.....	4
2.2.2. 1Cr-0,5Mo çeliği.....	4
2.2.3. 2,25Cr-1Mo Çeliği.....	4
2.2.4. % 5, % 7 ve % 9Cr'lu çelikler	4
2.2.5. Cr-Mo-V Çelikleri	4
2.2.6. Modifiye edilmiş Cr-Mo-V Çelikleri	5
2.3. Cr-Mo ÇELİKLERİNİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANILDIKLARI YERLER	5
2.4. YÜKSEK SICAKLIK ÇELİKLERİNE UYGULANAN ÇÖKELME SERTLEŞMESİ	11
2.5. CrMo ÇELİKLERİNDEKİ ÇÖKELTİLER.....	15
2.5.1. Karbürler.....	15
2.5.2. Krom Karbür Oluşumu	16

2.5.3. Sigma (σ) Fazı Oluşumu	16
BÖLÜM 3	22
AŞINMA	22
3.1. AŞINMA ZAMAN İLİŞKİSİ	22
3.2. AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER	24
3.2.1. Malzeme Seçimi	24
3.2.2. Sürtünme.....	24
3.2.3. Yüzeğe Uygulanan Yük.....	25
3.2.4. Sürtünme Mesafesi	25
3.2.5. Yüzeğe Sertliği	25
3.2.6. Yüzeğe Pürüzlülüğü	25
3.2.7. Yağlama.....	25
3.3. AŞINMA ÇEŞİTLERİ	25
3.3.1. Adhesiv Aşınma.....	25
3.3.2. Abrasif Aşınma	28
3.3.3. Yüzeğe Yorulması	29
3.3.4. Erozyon Aşınması.....	30
3.3.4.1. Katı Partikül Erozyonu.....	30
3.3.4.2. Sıvı Su Damlası Erozyonu	30
3.3.4.3. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam Erozyonu	30
3.3.4.4. Kaviteasyon Erozyon	30
3.3.4.5. Elektro Erozyon	31
3.3.5. Korozyon Aşınması	31
3.4. AŞINMANIN AZALTILMASI İÇİN GEREKLİ ÖNLEMLER	32
3.5. AŞINMA ÖLÇÜM METODLARI	33
3.5.1. Ağırlık Farkı Metodu.....	33
3.5.2. Kalınlık Farkı Metodu	34
3.5.3. İz Değişimi Yöntemi	34
3.5.4. Radyoizotoplar İle Ölçme.....	34
3.5.5. Bilgisayar Destekli Aşınma Ölçüm Metodu.....	34
3.6. TRİBOSİSTEMLER	35

	<u>Sayfa</u>
3.6.1. Tribotestlerin Sınıflandırılması.....	35
3.7. AŞINMA DENEY YÖNTEMLERİ.....	36
3.8. AŞINMA DENEYLERİNDE KULLANILAN BAZI AŞINMA DENEY CİHAZLARI	39
3.8.1. Düzlem Üzeri Çubuk (Pin On Flat) Deney Cihazı.....	41
3.8.2. Dört Top Deney Aparatı.....	41
3.8.3. Ball On Flat Aşınma Deney Cihazı.....	42
3.8.4. Ball On Disk Deney Cihazı.....	43
3.8.5. Levha – Kayış Deney Cihazı	43
3.8.6. Silindir Üstü Çubuk Deney Cihazı.....	44
3.8.7. Çapraz Silindir Deney Cihazı	45
3.8.8. Plint TE 97 Sürtünme ve Aşınma Deney Cihazı.....	46
BÖLÜM 4	49
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	49
4.1. ANA MALZEME.....	49
4.2. NUMUNE HAZIRLAMA	49
4.3. ISIL İŞLEMLER	49
4.4. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI	50
4.4.1. Mikroyapı Karakterizasyonu.....	50
4.4.2. Mekanik Özellik Karakterizasyonu.....	51
4.5. AŞINMA DENEYLERİ.....	52
4.6. KOROZYON DENEYLERİ.....	53
4.7. KOROZİF AŞINMA DENEYLERİ	54
BÖLÜM 5	55
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	55
5.1. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU VE SERTLİK DENEYLERİ.....	55
5.2. AŞINMA DENEYLERİ SONUÇLARI.....	58
5.3. KOROZYON DENEYLERİ SONUÇLARI	62
5.4. KOROZİF AŞINMA DENEYLERİ SONUÇLARI.....	66

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 6	72
GENEL SONUÇLAR	72
KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ	79

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Petrokimya endüstrisinde kullanılan malzemelerin ağırlıklarına göre dağılımı.....	5
Şekil 2.2.	Cr ve CrMo eklenmiş çeliklerin su verilip temperlendikten sonra akma dayanımlarına etkisi.....	6
Şekil 2.3.	Cr ve CrMo eklenmiş çeliklerin su verilip temperlendikten sonra kırılma tokluğuna etkisi.....	6
Şekil 2.4.	Cr ve Mo eklenmiş çeliklerin mekanik özelliklerindeki değişimler.....	7
Şekil 2.5.	Sıcaklığın etkisiyle mikroyapı değişimleri.....	8
Şekil 2.6.	Aşırı doymuş katı çözeltilerin elde edilme olanakları.....	11
Şekil 2.7.	Çökeltme formlarının şematik görüntüsü.....	13
Şekil 2.8.	X 22CrMoV 121 çeliğinde karbürlerin çökeltmesi.....	14
Şekil 2.9.	10 NiCrWTi 3615 çeliğinde intermetalik bağlantıların çökeltmesi.....	14
Şekil 2.10.	X 10 NiCrWTi 3615 çeliğinde intermetalik bağlantıların çökeltmesi.....	15
Şekil 2.11.	Alaşım elementlerinin karbür yapma eğilimleri.....	17
Şekil 2.12.	980 °C’de yeniden östenitlenen numunelerde çökeltilerin karakteri ve kompozisyonu.....	18
Şekil 3.1.	Aşınma zaman ilişkisi.....	23
Şekil 3.2.	Adhesiv aşınma.....	26
Şekil 3.3.	Bakır esaslı bronz ve pirinç yataklarda kuru ve yağlı ortamlarda sürtünme katsayısı- zaman diyagramı.....	27
Şekil 3.4.	Pürüzlü sert bir yüzey veya abrasif parçacıkların bir yüzeye yapışık olması.....	28
Şekil 3.5.	Yüzeylerden en az birinden daha sert abrasif parçacıkların iki yüzey arasında sıkışması.....	28
Şekil 3.6.	Yorulma aşınması oluşum mekanizması.....	29
Şekil 3.7.	Tribosistemlerin şematik gösterimi.....	36
Şekil 3.8.	Kayma aşınması için kullanılan geometrik düzenekler.....	37
Şekil 3.9.	Deney cihazlarında temas biçimleri.....	38
Şekil 3.10.	Lastik tekerli abrasiv aşınma deney cihazı şematik görünümü.....	39

Şekil 3.11. Abarasiv aşınma deney cihazı şematik görünümü	40
Şekil 3.12. Aşındırıcı partiküllü aşınma deney cihazı	40
Şekil 3.13. Pin on Flat deney cihazı şematik görünümü.	41
Şekil 3.14. Dört top aşınma deney aparatı.....	42
Şekil 3.15. Ball on Flat deney cihazı.....	42
Şekil 3.16. Ball on Disk deney cihazı.....	43
Şekil 3.17. Levha-kayış aşınma deney cihazı.....	44
Şekil 3.18. Silindir üstü çubuk deney cihazı şematik görünümü.	45
Şekil 3.19. Saç metal kesimi.....	45
Şekil 3.20. Çapraz silindir deney düzeneği.	46
Şekil 3.21. Plint firmasının ürettiği ilk TE -97 aşınma deney cihazı.	46
Şekil 3.22. TE 97 deney cihazı ile yapılabilen aşınma deneylerinin şematik görünümü.	47
Şekil 3.23. Aşınma deney cihazlar a) TE-97 Pin on Disk ve b) Block on disk.....	48
Şekil 4.1. Isıl işlemlerde kullanılan Magma Therm marka sıcaklık kontrollü elektrikli direnç fırını	50
Şekil 4.2. Miroyapı incelemelerinde kullanılan Leica DM ILM model optik ışık mikroskobu.....	51
Şekil 4.3. Schimadzu marka HVM Model mikrosertlik cihazı	52
Şekil 4.4. Aşınma testlerinde kullanılan Pin on Disk test sistemi.....	52
Şekil 4.5. Korozif aşınma deneylerinde kullanılan deney cihazı	54
Şekil 5.1. İncelenen çeliklerin LOM görüntüleri a) Orijinal b) Isıl işlem görmüş.....	55
Şekil 5.2. İncelenen çeliklerin SEM görüntüleri ve EDS sonuçları.	56
Şekil 5.3. İncelenen çeliklerin elementel harita (mapping) görüntüleri	57
Şekil 5.4. Farklı yüklerde metal-metal aşınma deneyine tabi tutulan a) orijinal ve b) ısıl işlem uygulanmış numunelerin ağırlık kaybı değerlerinin kayma mesafesi ile değişimi.	59
Şekil 5.5. Metal-metal aşınma deneyleri sonrası incelenen çeliklerin uygulanan yüke bağlı olarak aşınma hızının değişimi.....	60
Şekil 5.6. Orijinal ve ısıl işlem uygulanmış çeliklerin metal-metal aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri	60
Şekil 5.7. Orijinal çeliklerin metal-metal aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri.....	61
Şekil 5.8. Isıl işlem uygulanmış çeliklerin metal-metal aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri	62

Şekil 5.9. % 10 NaCl çözeltisinde yapılan a) orijinal ve b) ısıtılmış uygulanmış çeliklerin korozyon grafiği.	63
Şekil 5.10. % 10 HCl çözeltisinde yapılan a) orijinal ve b) ısıtılmış uygulanmış çeliklerin korozyon grafiği.	64
Şekil 5.11. Korozyon deneyleri sonrası yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri...	65
Şekil 5.12. Korozyon deneyleri sonrası yüzeylerin SEM mikroskop görüntüleri...	65
Şekil 5.13. 5, 10, 20 ve 40 N'da a) % 10 NaCl ve b) % 10 HCl'de hesaplanan aşınma iz alan kayıpları grafiği.	67
Şekil 5.14. % 10 NaCl'de yapılan aşınma deneyleri sırasında numune yüzeylerinde oluşan izlerin optik mikroskop görüntüleri.	68
Şekil 5.15. % 10 HCl'de yapılan aşınma deneyleri sırasında numune yüzeylerinde oluşan izlerin optik mikroskop görüntüleri	69
Şekil 5.16. % 10 NaCl'de yapılan aşınma deneyleri sırasında numune yüzeylerinde oluşan izlerin SEM görüntüleri.....	70
Şekil 5.17. % 10 HCl'de yapılan aşınma deneyleri sırasında numune yüzeylerinde oluşan izlerin SEM görüntüleri.....	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Çökelmeyle sertleştirilebilen demir alaşımları ve çökelme fazları	12
Çizelge 2.2. Krom karbür çökmesinin karbon içeriği, zaman ve sıcaklığa bağlılığı.	16
Çizelge 3.1. Malzeme özelliklerinin adhesiv aşınmaya etkisi	27
Çizelge 4.1. Çeliğin kimyasal bileşimi	49
Çizelge 5.1. İncelenen çeliklerin oda sıcaklığındaki sertlik sonuçları	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Cr _{eş}	: krom eşdeğerliliği
Cr	: Krom
Mo	: Molibden
V	: Vanadyum
Nb	: Niobyum
Ti	: Titanyum
°C	: Santigrat derece
J	: joule(enerji birimi)
Ni	: Nikel
µm	: Mikrometre
NaCl	: Sodyum klorür
HCl	: Hidroklorik asit
Fe	: Demir
N	: Azot
Na	: Sodyum
Ni	: Nikel
C	: Karbon
Wa	: Aşınma Oranı (mm ³ /N.m)
G	: Ağırlık Kaybı (gr)
M	: Yükleme Ağırlığı (N)
S	: Aşınma Yolu (m)
d	: Malzeme Yoğunluğu (gr/cm ³)

KISALTMALAR

- SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
EDS : Elektron Difraksiyon Taraması (Electron Diffraction Scanning)
ITAB : Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM : American Society for Testing and Materials
DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
TS : Türk Standardı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Gelişen teknoloji sayesinde bilim adamlarının üzerinde çalıştığı en önemli konulardan birisi de enerji verimliliğinin artırılmasıdır. Enerji santralleri en önemli enerji üretim sistemleridir. Bu tesislerin verimli ve uzun ömürlü olması ise üretim ve iletim hatlarında kullanılacak olan malzemelerin doğru seçilmesi ile sağlanmaktadır. Enerji santrallerinde bir malzemenin güvenli bir şekilde kullanımı için, malzeme, belirli bir ömre sahip ve ortam koşullarına uygun olmalıdır.

Enerji santralleri ve petrokimya endüstrisi için yüksek kaliteli malzemeler kullanılsa da sürünme, yorulma ve aşınma gibi durumlara bağlı olarak metalurjik bozulmanın farklı formları, yüksek sıcaklıkta uzun süreli operasyonlar sırasında parçaları ve bileşenleri etkileyebilir. Buhar türbinleri, enerji santralleri ve petrokimya tesislerinin ömrünü uzatmak ve yüksek güvenilirliği garanti altına almak ömür değerlendirme teknolojisi, planlanmış tamir faaliyetleri, dönüşüm, modifikasyon yapma ve sabit bir güç kaynağı elde etmek için yapı bileşenlerinin geliştirilmesi gerekmektedir [1].

Petrol rafineleri, kimya endüstrisi ve elektrik güç üretim istasyonlarının imalatında Krom-Molibden alaşımlı (Cr-Mo) çelikler kullanılmaktadır. Petrol endüstrisinde kullanılan 2,25Cr-1Mo-V çeliği yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışmaktadır. Düşük termal genleşme katsayısına sahip bu çelikler, yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışacak daha yüksek sürünme ve korozyon direnci için tasarlanmıştır. Bu çeliklerin özellikleri Cr, Mo, Nb ve Ti gibi güçlü karbür yapıcı elementlerin ilavesi ile kontrol edilir. Bütün metalik malzemelerde olduğu gibi, uzun süre servis sıcaklığında gerilmeye maruz kalması ile Cr-Mo çeliklerin mekanik özellikleri bozunma gösterirler. Yüksek sıcaklık uygulamalarındaki bu çeliklerin özelliklerindeki ana bozunma sebebi sürünme deformasyonu ile ilişkilidir.

Günümüze kadar bu çeliklerden imal edilmiş ve halen kullanılmakta olan tesislerde karşılaşılan en önemli problemler ise, temper gevrekliği, yeniden ısıtma çatlağı, korozyon, oksidasyon, sülfürleşme, hidrojen atağı ve özellikle son yıllarda yapılan çalışmalarda karşılaşılan Tip IV hasarı (Type IV failure) olarak sıralanır. Malzemenin mikroyapısı ve bileşenleri malzemenin mekanik özelliklerini özellikle sürünme, yüksek sıcaklıkta çekme ve darbe dayanımını ve kaynak kabiliyetini etkilemektedir [2].

Literatürde, CrMo çeliklerinin ve kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmada, petrol endüstrisinde, özellikle hidrokrakır tesislerin imalatında kullanılan 2,25Cr-1Mo-V çeliğinin aşınma, koroziyon aşınma ve korozyon özelliklerine etkisi incelenecektir.

Bu çalışma, daha sonra yapılacak olan özellikle ömür tayini konusundaki çalışmalara ışık tutacaktır. Bu çalışma ile ayrıca, Ülkemizde aşınma ve koroziyon alanlarında faaliyet gösteren firmalarla, 2,25Cr-1Mo-V çeliklerini üreten ve kullanan firmalara edinilen bilgi ve deneyimler aktararak bu alanda uluslararası piyasada rekabet gücünün artırılması amaçlanmaktadır. Bu çalışma endüstriyel ölçekte oluşturacağı katma değer yanında, bilimsel açıdan da önemli sonuçları olacaktır.

Bu çalışmada 2,25Cr 1Mo ve 0,1V içeren çeliklerin farklı ısıtma koşullarına bağlı olarak farklı mikroyapıya sahip olmaları sağlanmış ve bu farklı mikroyapının bu malzemenin aşınma, koroziyon aşınma ve korozyon davranışları üzerine etkisi incelenmiştir [1,2].

BÖLÜM 2

YÜKSEK SICAKLIK ÇELİĞİ

Sıcağa dayanıklı çelik olarak, genellikle 400 °C`nin üzerinde kullanılan alaşımsız ve alaşımlı çelikler anlaşılır. Tüm sıcağa dayanıklı malzemeler içerisinde, daha fazla kullanım alanına sahip olduklarından ve büyük ölçüde standartlaştırıldıkları için, sıcağa dayanıklı çelikler sıcakta kullanılan diğer malzemelere nazaran daha fazla önem arz eder. Sıcağa dayanıklı çelikleri, alaşımsız ve düşük alaşımlı çelikler, sıcağa dayanıklı krom çelikleri ve yüksek sıcaklığa dayanıklı östenitik çelikler olarak, üç ana gruba ayırmak mümkündür. Böylece, bu amaçla kullanılacak çelik türlerinin alaşım tipleri hakkında da sınıflandırma yapılmış olmaktadır.

2.1. YÜKSEK SICAKLIK CrMo ÇELİKLERİ

Krom-Molibden çelikleri, petrol rafineleri, kimya endüstrisi, elektrik güç üretim istasyonları için ısı değiştiriciler, basınçlı kazanlar, ısıtma kazanları, hidrokraking tüpleri ve boru imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çeliklerin en önemli avantajı krom ve molibden ilavesi ile geliştirilmiş sürünme dayanımı ve krom ilavesi ile iyileştirilmiş korozyon direncine sahip olmalarıdır. Krom-molibden çeliklerin sürünme dayanımı ferrit matris içerisinde karbon, molibden ve kromun oluşturduğu katı eriyik mukavemetlenmesi ve karbürlerin neden olduğu çökelme sertleşmesinden kaynaklanmaktadır.

2.2. CrMo ÇELİK ÇEŞİTLERİ

Krom-molibden çelikleri 0,5Mo`li çelik, 1Cr-0,5Mo çeliği, 2,25Cr-1,0Mo çeliği, % 5, % 7 ve % 9Cr`lu çelikler, Krom-Molibden-Vanadyum çelikleri ve modifiye edilmiş Krom-Molibden çelikleri olarak sınıflandırılır.

2.2.1. 0,5Mo Çeliği

0,5Mo'li çelik, % 0,15 C içerir ve 455 °C'de boru ve ısıtıcı tüp imalatında kullanılır. Bu sıcaklığın üzerinde, küreselleşme ve grafitleşme oluşması muhtemel hasarları artırabilir. Bu çeliklerin daha yüksek sıcaklıklarda kullanımı grafitleşmeden dolayı durdurulmuştur. Kromlu çelikler grafitleşmeye karşı yüksek dirençli ve bu nedenle 455 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanım için tercih edilebilir.

2.2.2. 1Cr-0,5Mo Çeliği

1Cr-0,5Mo çeliği, 510 °C veya 540 °C servis ortamında çalışacak boru, krakır ve boyler tüplerin imalatı için kullanılır. Buna benzer olarak 1,25Cr-0,5Mo çeliği 590 °C'de kullanılır [1-2].

2.2.3. 2,25Cr-1,0Mo Çeliği

2,25Cr-1,0Mo çeliği, 0,5Mo, 1Cr-0,5Mo ve 1,25Cr-0,5Mo çeliklerinden daha iyi oksidasyon ve sürünme direncine sahiptir. Hidrojen içermeyen ortamlarda 650 °C sıcaklıklarda, hidrojen içeren ortamlarda ise 480 °C'de kullanılır [3].

2.2.4. % 5, % 7 ve % 9Cr 'lu Çelikler

% 5, % 7 ve % 9Cr 'lu çelikler, düşük krom içeren çeliklere göre daha düşük sürünme direncine sahiptir. Bu çeliklerin krom miktarı arttıkça oksidasyon direnci de artmaktadır [3,4].

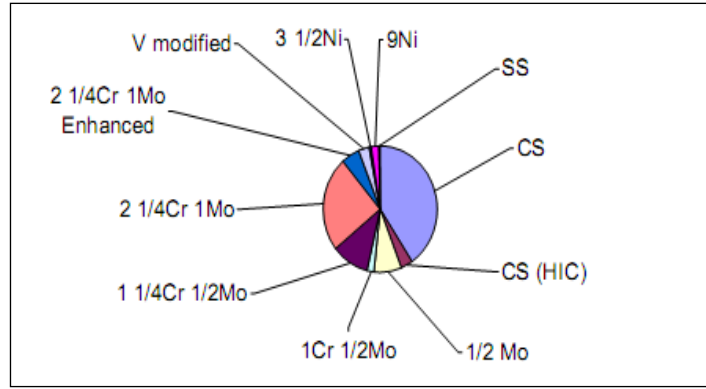
2.2.5. Cr-Mo-V Çelikleri

Krom-Molibden-Vanadyum Çelikleri, daha yüksek karbon içeren bu çelikler normalize ve temperlenmiş yada su verilmiş ve temperlenmiş halde kullanılırlar. Yüksek akma ve sürünme dayanımından dolayı bu çelikler civata, gaz türbinlerindeki kompresör tekerleri, buhar türbini rotorları, ve 540 °C'de çalışacak diğer parçaların

imalatında kullanılır. En yaygın düşük alaşım kompozisyonu % 1Cr, % 1Mo ve % 0,25V içerir.

2.2.6. Modifiye Edilmiş Cr-Mo Çelikleri

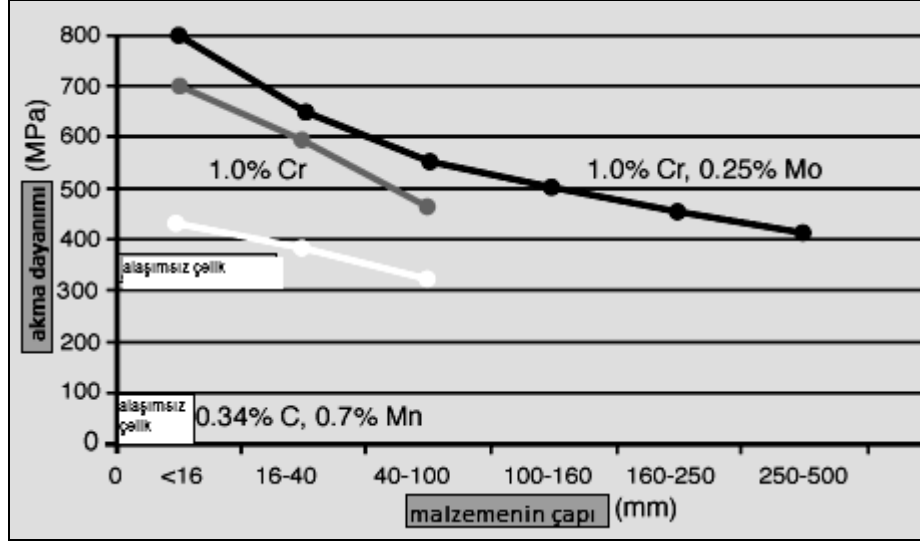
Modifiye edilmiş Krom-Molibden çelikleri kendi arasında üç grupta incelenebilir. Bunlar; Ti, V ve B ile modifiye edilmiş 3Cr-1Mo çeliği, V ve Nb ile modifiye edilmiş 9Cr-1Mo çeliği ve Ti, V ve B ile modifiye edilmiş 2,25Cr-1Mo çeliğidir [5]. 1960'larda günümüze petrokimya endüstrisinde kullanılan malzemelerin kullanım ağırlıklarına göre dağılımı Şekil 2.1'de görülmektedir [6].



Şekil 2.1. Petrokimya endüstrisinde kullanılan malzemelerin ağırlıklarına göre dağılımı [7].

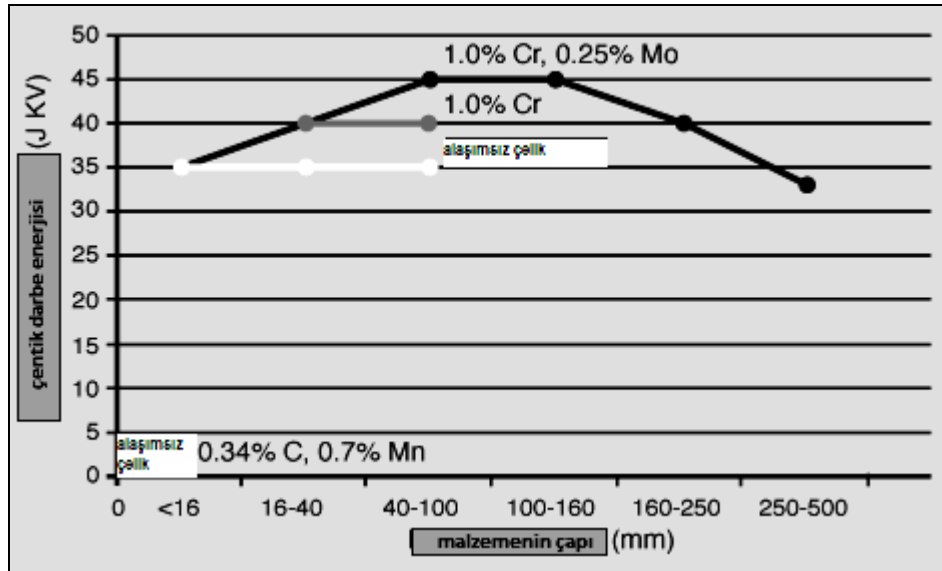
2.3. Cr-Mo ÇELİKLERİNİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANILDIKLARI YERLER

Petrokimya endüstrisinde ve güç jeneratör istasyonlarında sıklıkla kullanılan düşük alaşımli yüksek dayanımlı Cr-Mo çelikleri, düşük termal genleşme katsayısına sahiptirler, yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışacak daha yüksek sürünme ve korozyon direnci için tasarlanırlar. Bu çeliklerin özellikleri Cr, Mo ve Ti ve Nb gibi güçlü karbür yapıcı elementlerin ilavesi ile kontrol edilir. Bütün metalik malzemelerde olduğu gibi, uzun süre servis sıcaklığında gerilmeye maruz kalması ile Cr-Mo çeliklerin mekanik özellikleri bozunma sergiler. Yüksek sıcaklık uygulamalarındaki bu çeliklerin özelliklerindeki ana bozunma sürünme deformasyonu ile ilişkilidir [7].

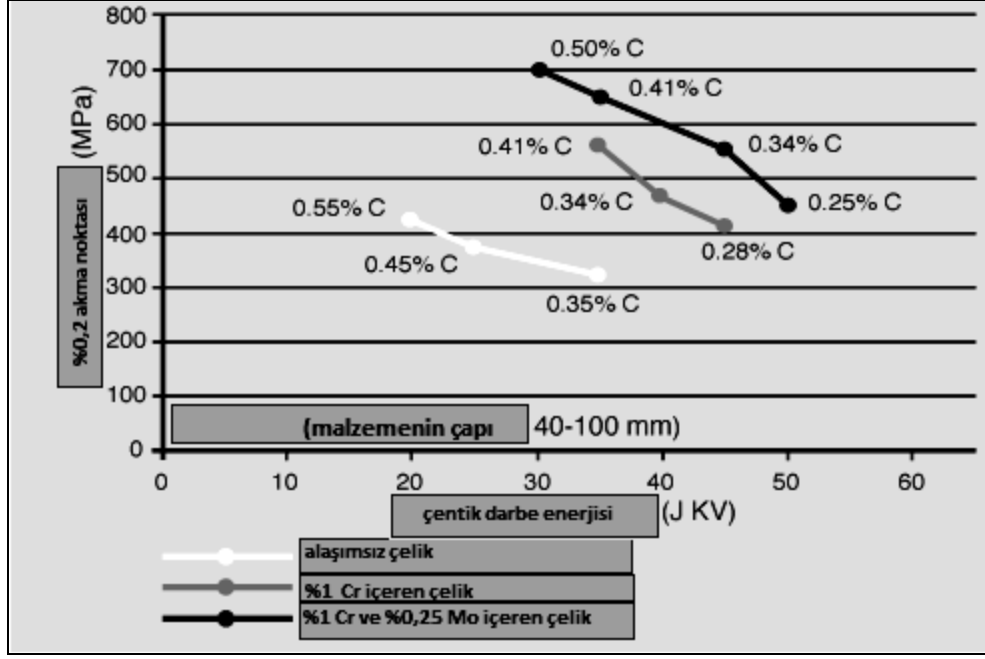


Şekil 2.2. Cr ve CrMo eklenmiş çeliklerin su verilip temperlendikten sonra akma dayanımlarına etkisi [8].

% 1 Cr eklenmesiyle akma dayanımı % 50 artmış ve % 25 Mo eklenmesiyle de malzemenin çapı 100 mm 'den 500 mm 'ye çıkartılmıştır. Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Cr ve CrMo eklenmiş çeliklerin su verilip temperlendikten sonra kırılma tokluğuna etkisi [8].



Şekil 2.4. Cr ve Mo eklenmiş çeliklerin mekanik özelliklerindeki değişimler [8].

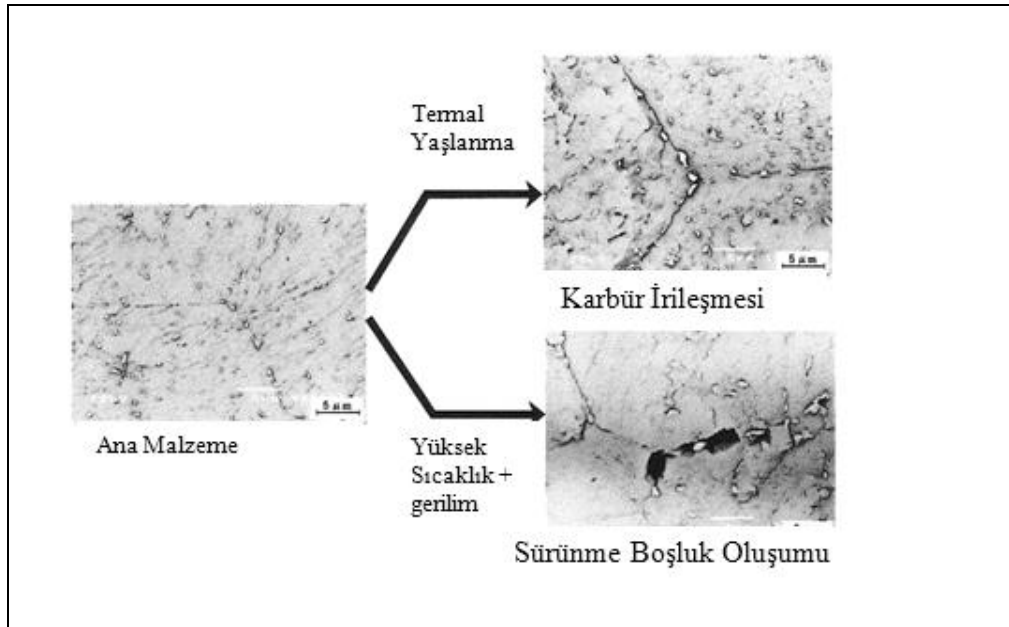
Yüksek dayanım ve yüksek çentik darbe enerjisi için istenen kimyasal bileşim grafiğin sağ üst köşesinden anlaşılmaktadır. % 1 Cr ilavesiyle sade karbonlu çelikte mekanik özelliklerde iyileşme gözlenirken ilave olarak % 0,25 Mo eklenmesiyle de yüksek dayanım ve tokluk değerlerine ulaşılmıştır.

Sıcağa dayanıklı çeliklerde ve süper alaşımlarda olduğu gibi, yüksek sıcaklıklarda malzeme karakteristiğini iyileştirmek için çok sık izlenen yol, hem sıcakta dayanımı ve hem de oksidasyon dayanımını iyileştiren alaşımlama işlemidir. Bazı komponentlerin seçilmesiyle, esas olarak ergime sıcaklığı ve sürünme dayanımını etkilemenin yanında, alaşımların kullanım sıcaklığını ergime sıcaklığının yaklaşık % 80'ine kadar arttırabilen özel elementler ilavesi de mümkündür. Yapısal olarak, katı çözümler ve ince disperse olmuş fazlar, farklı düzene sahiptirler ve müştereken etki yaparlar [1].

Alaşım elementi ilavesiyle rekristalizasyon sıcaklığı ne kadar fazla yükseltilebilirse, sürünme karakteristiği üzerine katı çözümler teşekkülünün etkisi o kadar iyi olur. Alaşım atomları tercihli olarak dislokasyonların çevresinde toplanırlar ve bunların difüzyon katsayısı ne kadar düşükse, dislokasyonları o kadar kuvvetli engellerler

(katı çözeltili dayanıklılaşması). Bu bakışa göre, ostenitik ana yapıya sahip çeliklerde de, ostenitteki difüzyon katsayısı aynı sıcaklıktaki ferrite nazaran daha düşük olduğundan, daha üstün durumdadırlar.

CrMo çeliğinin sürünme dayanımı, normalize durumda, ferrit, beynit veya martenzitik bir mikroyapıda kararlı çökeltilerin oluşumuna bağlıdır. Çökeltiler tane sınırlarında blok oluşturarak kayma düzlemlerinin kaymasını engelleyerek arzu edilen sürünme dayanımını sağlarlar. Sürünmede, başlangıç olarak, çökelmiş karbürlerin yapısal dönüşümlerini, birleşmesini ve karbürlerin çözünmesini içerir. Bu olay, sürünmenin ileri safhasında boşlukların ve mikro çatlakların oluşmasıyla sonuçlanır (Şekil 2.5) [9]. Geçmişte birçok çalışma, mikroalaşım elementinin ostenitte çözünmesini belirlemek üzerine yapılmıştır. Son yıllarda, bileşenlerin kalan ömrünün tahmininde metodolojilerin geliştirilmesi için endüstri büyük önem vermiştir. Bundan dolayı da bu çeliklerin sürünme, yüksek sıcaklıkta çekme ve darbe dayanımları ile bu dayanımlara etki eden mikroyapı ve bileşenleri üzerine literatürde bir çok çalışma mevcuttur [7-10].



Şekil 2.5. Sıcaklığın etkisiyle mikroyapı değişimleri [9].

Rafinerilerde, hem hidrojenin desülfürizasyonu hem de daha ağır hidrokarbonların daha hafif moleküllere parçalanması için reaktörler ve basınçlı kaplara gereksinim

duyulur. Bu işlem yüksek sıcaklıklarda (450 °C) ve yüksek basınçta (100 kg/cm²) hidrojen atmosferinde gerçekleşir. CrMo alaşımlı çelikler yüksek sıcaklıklara ve basınca karşı kullanılırlar ve bu gereksinimleri karşılamak için geliştirilirler. Beşinci kuşak çelikler olan Vanadyumla modifiye edilmiş CrMo çelikleri ilk olarak 1995’de kullanılmıştır. Günümüz rafineri ihtiyaçlarında kullanılan bu çelikler geniş et kalınlığına sahip ekipmanlar için ya dövmeyle ya da levhadan üretilir.

% 2.25-3.8 krom içeren CrMo alaşımları 1920’de Almanya’da 28-70 MPa basınç aralıklarında çalışacak Hidrogenation plant reaktörde kullanılmış ve Birinci nesil çelik olarak adlandırılmıştır.

İkinci nesil çelikler 1960’ların ortalarından 1970’lere kadar modifiye edilerek 10 °C’de 54 J tokluğa sahiptir ve modern hidro proses reaktörlerin imalatında kullanılmıştır. Temper gevrekliği için herhangi bir gözlemde bulunulmamıştır.

Üçüncü nesil çelikler, 1970-1980 arası, impüritelerin kontrolü vurgulanmış ve J faktörü, temper gevrekliğin kontrolü için 180’e sınırlandırılmıştır. Tokluk -18 °C’de 54 J değerlerine kadar çıkartılmıştır.

Dördüncü nesil çelikler, 1980-1990 arası, iyileştirilmiş temper gevrekliği J faktörünün 100’e sınırlandırılmasıyla karakterize edilmektedir. Tokluk özellikleri -32 °C’de 54 J’e kadar iyileştirilmiştir.

Beşinci nesil çelikler, 1990’ların ortalarından başlayarak geliştirilmiş tokluk değerleri -40 °C de 54 J ’e kadar çıkartılmıştır. Ek olarak 2.25Cr-1Mo-0.25V çeliği aşağıda belirtilen iyileştirilmiş özellikleriyle çelik tedarikçileri tarafından geliştirilmiştir.

- a) Yüksek sıcaklıklarda yüksek çekme özellikleri
- b) İyileştirilmiş hidrojen atağı direnci
- c) Geliştirilmiş sürünme dayanımı özellikleri
- d) Hidrojen ayrışmasına düşük hassasiyeti [11].

CrMo çeliğinin esas metalin yanı sıra kaynak metali ve ITAB da büyük önem arz eder. CrMo çeliğinin gerek kaynak metali ve ITAB'ında ve gerekse ısıl işlem süresince karbür çökeltileri, hidrojen hasarında ve sürünme direncinde önemli rol oynar. Bu nedenle, kaynak ve ısıl işlem süresince çökelti gelişimini ölçmek için mikroyapının kontrolü ve mikroyapı ve mekanik özellikler arasında teorik ilişki kurulması çok önemlidir.

Titanyum, niyobyum ve vanadyum içeren modifiye edilmiş CrMo çeliklerinde mikro alaşım elementleri tane inceltmek ve dayanım arttırmak için kullanılır. Bu mikroalaşım elementleri karbürler, nitrürler ve karbonitrürleri oluştururlar. Çökeltilerin tipleri karbon ve azot ile diğer alaşım elementlerin miktarlarına bağlıdır. Titanyum nitrür (TiN) en kararlı olanlarıdır ve demirin ergime sıcaklığının üzerinde çözünme sıcaklığına sahip olarak bilinir. Titanyumkarbür içeren diğer çökeltiler daha düşük çözünme sıcaklığına sahiptir fakat bu, alaşım elementi miktarıyla değişir. Alaşım miktarına ve ısıl işleme bağlı olarak farklı miktarlarda farklı tip çökeltiler oluşur. Bunlar; M_7C_3 , M_5C_2 , Mo_2C , NbC, NbN, VN, M_6C , $M_{23}C_6$ ve Cr_3C olarak yazılan karbür ve nitrürlerdir [13,16]. Ayrıca yine sürünme direncinin önemli olduğu uygulamalarda kullanılan % 15 Cr ve W ve Co içeren çeliklerde dayanım artırma mekanizmasında etkin rol oynayan γ -fazı bulunmaktadır [3].

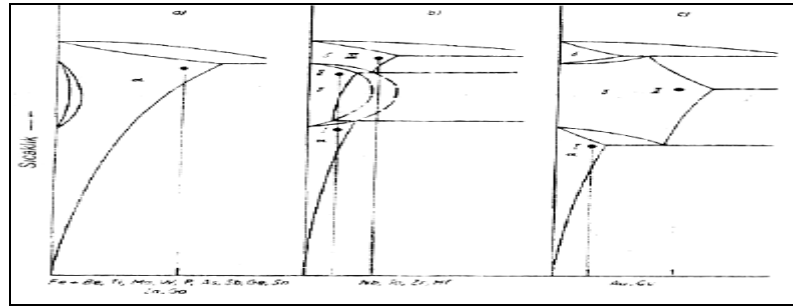
Nawrocki, geleneksel 2,25Cr-1Mo çeliğini HCM₂S olarak adlandırılan yeni ferritik çelikle gerilim giderme çatlak hassasiyeti karşılaştırmasını yapmışlardır [10]. Çalışmada Gleeble termal simülatörü kullanarak iri taneli ITAB yapısı elde etmişlerdir. Bu mikroyapı üzerinde metalografik ve mekanik karakterizasyon çalışmalar neticesinde HCM₂S yeni ferritik çeliğin 2,25Cr-1Mo çeliğine göre gerilim giderme çatlakına karşı daha duyarlı olduğu yazarlar tarafından ifade edilmektedir. Yazarlar bunun nedeninin HCM₂S yeni ferritik çeliğin içerisinde bulunan güçlü karbür yapıcı alaşım elementlerinden V' un varlığına atfetmektedirler. C. G. Pigrova da, düşük alaşımlı Cr-Mo-V çeliğinde 450-700 °C arasındaki sıcaklıklarda temperlenmesiyle demir ve kromca zengin M₃C ve vanadyumca zengin MC karbürlerin oluştuğunu rapor etmiştir [12].

2.4. YÜKSEK SICAKLIK ÇELİKLERİNE UYGULANAN ÇÖKELME SERTLEŞTİRMESİ

Ostenitik çeliklerde, çökeltme sertleştirilmesi uzun zamandan beri teknik olarak kullanılmakta ve bu konuda çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Çizelge 2.1.'de, çeliklerde çökeltme sertleştirilmesinde bulunması gerekli olan alaşım elementleri içeren çelik bileşimleri ve çökeltmeler örnek olarak verilmiştir.

Çeliklerde çökeltme sertleşme olanağı sınırlıdır ve düşen sıcaklıkla birlikte katı çözelti içersinde alaşım elementlerinin çözünebilirliğinin azalmasına dayanır. Çözeltiye alınmış katı çözelti, ani soğumayla aşırı doymuş halde geldikten sonra, dinlendirme yapılarak çökelen partiküllerle dayanım artırılır. Şekil 2.6'de aşırı doymuş katı çözelti elde etme olanakları verilmiştir. Çökeltme ile dayanım arttırmada erişilebilecek özellikler için, yöntemin yanında özellikle çökelen partiküllerin büyüklüğü, sayısı, formu ve dağılımı oldukça önemlidir. Aşırı doymuş çözeltinin durumu, özellikle boş yerler, dislakasyonlar, küçük ve büyük açı tane sınırları gibi kafes hatalarının sayısı ve dağılımı, çökeltme seyrinin büyük ölçüde etkiler. Ayrıca, gerekli çözme tavlama sıcaklığı ve ani soğutmanın hızı da önemlidir.

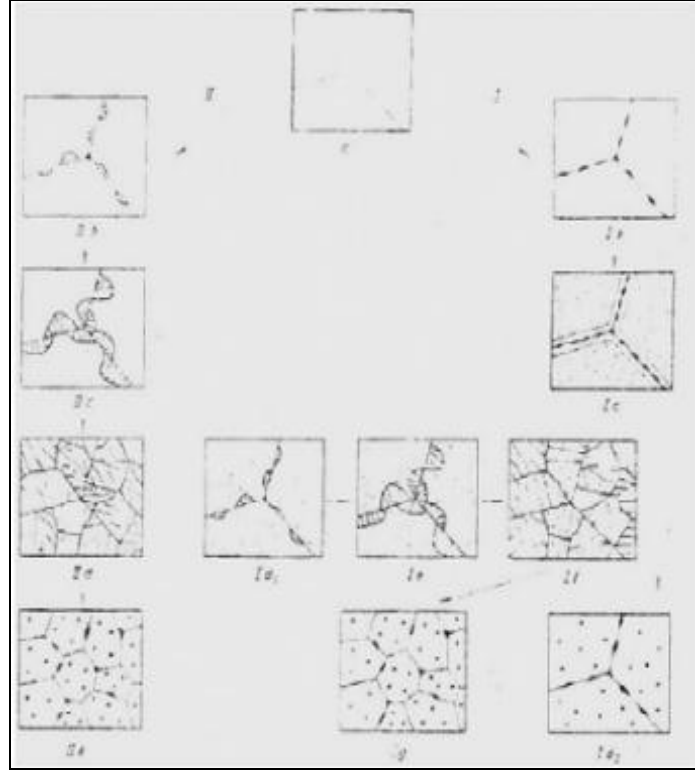
Şekil 2.6.'de şematik olarak I'den III'e kadar ikili soğutma sisteminde soğutmanın koşullarını, sıcaklık değerine göre, aynı soğutma hızlarında ve değişik boş yer konsantrasyonunda vermektedir. Burada belirtilen II işleminde, massiv (b) ya da martensitik (c) dönüşüm meydana gelir. I'de ise yüksek dislakasyon yoğunluğu mevcuttur. belirtilen II işleminde, massiv (b) ya da martensitik (c) dönüşüm meydana gelir. I'de ise yüksek dislakasyon yoğunluğu mevcuttur.



Şekil 2.6. Aşırı doymuş katı çözeltinin elde edilme olanakları [13].

Çizelge 2.1. Çökelmeyle sertleştirilebilen demir alaşımları ve çökelme fazları [13].

Çelik	Bileşim Ağırlığı											Çökelmeler
	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	Co	Mn	Si	P	C	Diğer	
Fe-Cr-Ni Martensitik Alaşımlar												
1	4	17	-	-	-	-	-	-	-	0,05	4Cu 0,3 Nb	Cu
2	6	15	-	-	0,75	-	-	-	-	0,03		Ti bağlantısı
3	3,5	14	2	-	0,4	-	-	-	-	0,03		Chi ve Lavas fazı
4	12	5	3	0,3	-	-	-	-	-	0,02		Bilinmiyor
Fe-Cr-Ni Yarı Östenitik Alaşımlar												Khm(Ni,Al)
5	7	17	0	1,2	-	-				0,05		Düzenli Durum
6	7	17	2,5	1,2	-	-				0,5		Beta-NiAl,Ni ₃ Al
Fe-Cr-Ni Östenitik Alaşımlar												M ₂₃ C ₆ ,Cr ₂ N
7	12	20	-	-	-	-	2	2	0,2	0,4	0,1 N	Ni ₃ Ti,σ-fazı
8	20	20	-	-	3	-	2	-	-	0,06	0,1 Zr	TiB ₂ ,TiC,M ₂₃ C ₆
9	20	20	-	1	2	-	2	-	-	0,06	0,8 B 0,1 Zr	Ni ₃ Ti,σ-fazı TiC,M ₂₃ C ₆ ,AlN
Fe-Cr Martensitik Alaşımlar												
10	20	-	-	0,2	1,5	0				0,02	0,4 Nb	Ni ₃ Ti
11	18	-	5	-	0,4	8				0,02		Ni ₃ TiNi ₃ Mo, Fe ₂ (Ni ₃ Co)
Fe-Ni Yarı Östenitik Alaşımlar												
12	25	-	-	2,5	1,5					0,2	0,4 Nb	Ni ₃ Ti,Laves-Fe ₂ Ti
Fe-Cr Martensitik Alaşımlar												
13	-	14,5	5	-	-	13,5				0,15	0,5 V	Laves –Fe ₂ Mo,Chi-fazı



Şekil 2.7. Çökelme formlarının şematik görüntüsü [14].

Sertleştirilmiş çeliğin özelliklerine, dönüşümün her etabı ayrı etki yapar. Denge fazının teşekkülüne kadar, değişik kademeler meydana gelir ;

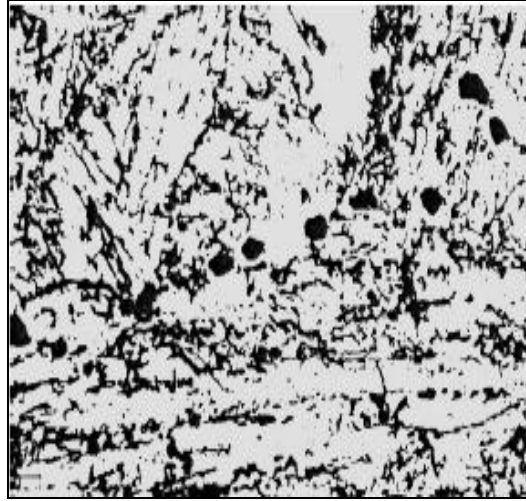
En sondan evvelki etaptaki aşamalar, çoğu zaman yüksek dayanıma sahiptir. Kuskusuz her çökeltide, tüm ara kademeler görülebilir. Örneğin, çeliklerde son teşekkülü pek az durumlarda ortaya çıkmaktadır.

Şekil 2.7’de, çökelmelerin morfolojileri şematik olarak verilmiştir. Ia-Id₂ sıra işleminde sürekli çökelme, lokalize olarak tane sınırlarında ya da matrikste meydana gelmektedir. Örneğin, Ib durumu Şekil 2.8’de verilmiştir. Burada, 710 °C’de 3,5 saat çökelme işleminden sonra, tane sınırlarında kaba M_7C_3 karbürü ve matriks içerisinde $M_{23}C_6$ karbürü meydana gelir.

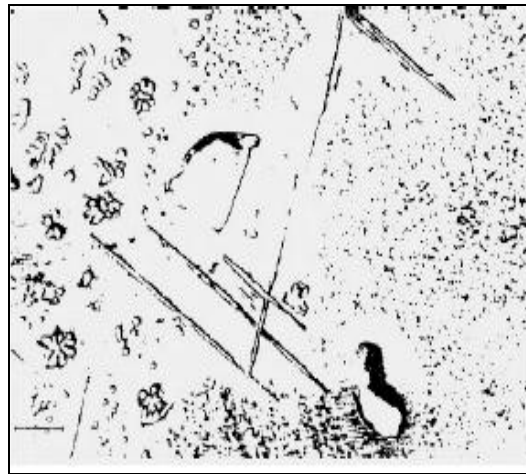
Süreklilikte, bir geçiş fazı olabilir ya da olmaz (Ib ve Ic). Koherant metastabil geçiş fazının mevcut olmasında, daha çok diğer formlardaki koherant olmayan denge fazlarının ortaya çıkmasıyla yok olur. Metastabil γ' -fazı η -fazının teşekkülü ile yok

olur. Kaba lokalize olmuş partiküller, G-fazı olarak tanımlanır. Lokalize fazların görülmesi, genellikle matrikste fakirleşme ile bağlantılıdır ve çevresinde ince dağılmış sürekli çökeltme meydana gelir. Bu duruma gerçek bir örnek olarak, Şekil 2.9'nun yanında Şekil 2.10'da verilmiştir. Şekil 2.10'da, tane sınırlarında daha fazla oluşarak γ' fazı çökelmektedir.

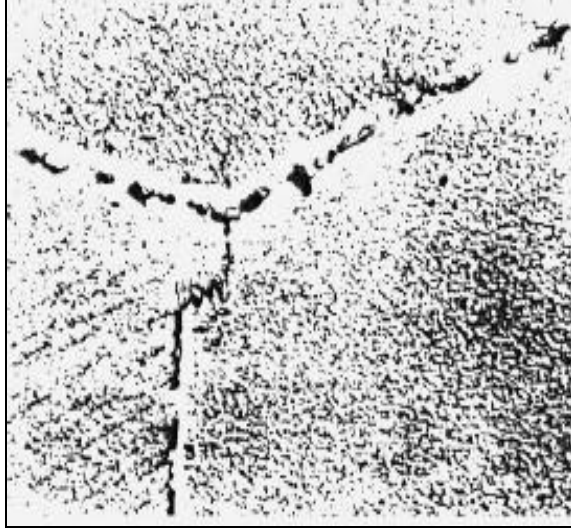
Artan sıcaklıkla birlikte, denge fazı düzene girer ve kabalaşır (Id_2). Metastabil koherent faz yardımıyla kafes gerilmeleri, hücresel ya da süreksiz çökeltme meydana getirebilir. Bu esnada matris rekristalize olur (Id_2 ila f) ve nihai olarak (yüksek sıcaklıkta yada çok uzun dinlendirme sürelerinde) γ denge fazı da düzene girer (Ig).



Şekil 2.8. X 22CrMoV 121 çeliğinde karbürlerin çökeltmesi [13].



Şekil 2.9. X 10 NiCrWTi 3615 çeliğinde intermetalik bağlantıların çökeltmesi [13].



Şekil 2.10. X 10 NiCrWTi 3615 çeliğinde intermetalik bağlantıların çökmesi [13].

Sürekli çökme, eğer sürekli olmayan çökme çekirdeği teşekkül ederse mükemmelden sapar. Bu durumda, II formunda çökme gerçekleşir. Matristeki rekristalizasyonun yanında, bileşim değişmeleriyle martenzit dönüşümü de meydana gelebilir. Bu durum, öncelikle karbon ve kromun çökmesiyle martensit noktasının yükseldiği, ostenitik esas yapıli alaşımlarda görülür.

Çökme olaylarında partikülün gelişmesi difüzyon kontrollüdür. Çeliklerin çökme sertleştirmesinde en etkili partikül boyutları, çoğu zaman mikroskobik tetkik edilebilir değerin altındadır. Çökme sertleştirilmesi etapları, ışık mikroskobunda yalnızca hafif dağlama ile çok zor ayırt edilebilir duruma getirilebilir, bu nedenle tetkikler elektron mikroskoplarında yapılır [13].

2.5. CrMo ÇELİKLERİNDEKİ ÇÖKELTİLER

2.5.1. Karbürler

Krom gibi ferrit oluşturan elementler (krom) aynı zamanda karbür yapıcıdır. Karbür yapıcıların çoğunluğu da demire bağıli olarak ferrit oluşturuocu özelliktedirler. Karbür oluşturan elementlerin karbona olan afiniteleri sırayla aşağıdaki gibidir(soldan sağa artar). Cr, W, Mo, V, Ti, Nb, Ta, Zr [15].

2.5.2. Krom Karbür Oluşumu

Isının etkisi altında kalan bölgenin 427-871 °C sıcaklığa kadar ısınan bölümünde yer alan tane sınırlarında çökelen ve taneler arası korozyonu hızlandıran krom karbürler burada "Hassas Yapı" oluşmasına neden olurlar. Bu oluşum sırasında bir miktar krom, çözültiden tane sınırlarına doğru yer değiştirir ve bunun sonucunda bu bölgesel alanlarda krom miktarında azalma olacağı için korozyon dayanımı düşer [16].

2.5.3. Sigma (σ) Fazı Oluşumu

"Sigma Fazı", çok sert (~700-800 Vickers), manyetik olmayan ve gevrek yapıya sahip metallerearası bir bileşiktir. Röntgen ışını ile yapılan analizde bileşiminin yaklaşık olarak % 52 krom ve % 48 demirden oluştuğu ancak bunun yanında molibden gibi diğer alaşım elementlerini de içerebildiği görülmüştür. Çökeltme başlamadan önce sıcaklık ve değişen bir kuluçka periyodu vardır. Sıcaklık ve çeliğin karbon içeriğine göre en kısa sürede çökeltmenin başladığı bir sıcaklık vardır ki buna kritik sıcaklık adı verilir. (Çizelge 2.2) [16].

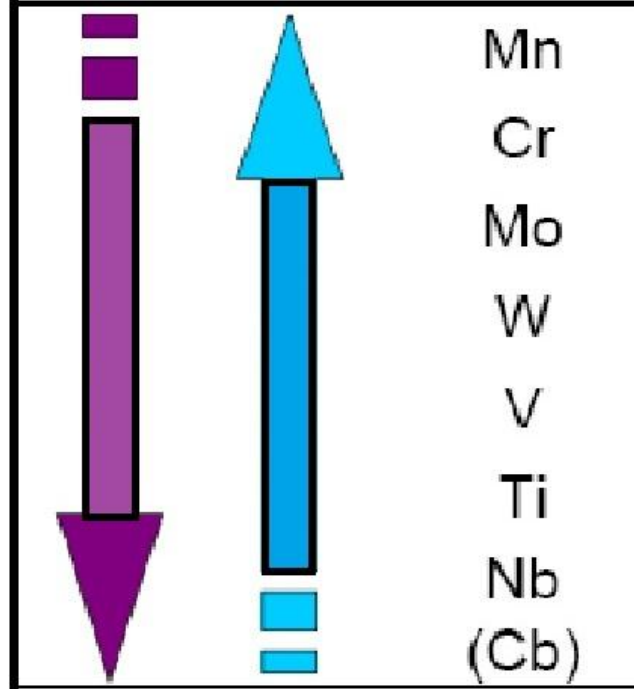
Çizelge 2.2. Krom karbür çökeltmesinin karbon içeriği, zaman ve sıcaklığa bağlılığı [16].

Karbon içeriği (%)	Kuluçka Periyodu (dk)	Kritik Sıcaklık (°C)
0,03	11	650
0,05	7	650
0,06	2,5	670
0,08	0,3	750

Genelde CrMoV çeliklerindeki farklılıklar, karbürlerin tanımlanmasında bir rehber olarak hareket edebilir. Pilling and Ridley temperlenmiş numunelerde dört farklı karbür morfolojisi olduğunu bunların;

- östenit ve çita sınırlarında M_6C , $M_{23}C_6$, and M_7C_3 gibi granular çökeltiler
- matriste, düz çubuk şekilli $M_{23}C_6$, Mo_2C çökeltileri

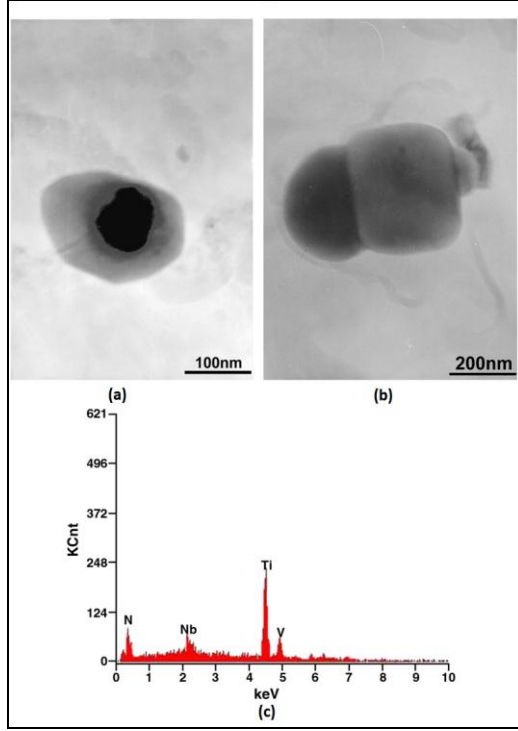
- c) matriste iğne şekilli (Mo_2C) çökeltilerin toplanması
d) Matriste $\text{M}(\text{C}+\text{N})$ gibi paralelkenar şekilli çökeltiler [17].



Şekil 2.11. Alaşım elementlerinin karbür yapma eğilimleri.

M_6C çökeltilerin varlığı kalan ömrün tahmininde önemli bir faktördür. Bu nedenle, karbürlerin büyümesi malzemenin mikroyapı yaşlanmasına referans veri olarak kullanılır. Bazı çalışmalar, hızlandırılmış sürünmenin özellikle östenit tane sınırlarında çökeltilerin irileşmesiyle ve dayanım artırıcı ince çökeltilerin azalmasıyla ilişkili olduğunu bunun da zararlı çökeltilerin oluşumuna neden olduğunu açıklamışlardır. Böyle kavramları yorumlamak için çökeltilerin stokiyometrik gelişim silsilesini düşünmek gerekir. Bazı yayınlarda, baskın M_7C_3 karbürünün M_{23}C_6 ve/veya M_6C karbürlerine irileşerek zamanla dönüşümü genel bir kanıdır [7,18].

980 °C'nin altında, daha düşük yeniden östenitleme sıcaklığında, 50-300 nm boyutlarında çok sayıda çökeltiler vardır. Çökelti morfolojisi, düzensiz küreler, köşeleri yuvarlatılmış küp ve düz yüzeyle küboid şekillerindedir. (Şekil 2.12) [20].



Şekil 2.12. 980 °C’de yeniden östenitlenen numunelerde çökeltilerin a) karakteri, b) karakteri, c) kompozisyonu [20].

Bazısı diğerine yapışır bir partikül karakterinden daha fazlasını sergiler. Analiz sonuçları bu partiküllerin V, Nb ve Ti içerdiğini göstermektedir (Şekil 2.12). Partiküllerin bu morfolojisinden çökeltilerin merkezinin yüzeyiyle karşılaştırıldığında Titanyumca zengin olduğu sonucu çıkartılabilir. Bu muhtemelen TiN’ün başlangıç çökelti olmasından kaynaklanmaktadır. Niyobyum ve Vanadyum daha dış tabakada oluşur ve TiN yüzeyinde şapka-kapak şeklinde büyür. Gerçekte, Ti, V ve Nb benzer kristal yapıya sahip oldukları için, mikro alaşımlı çeliklerde yardımcı çökelti (biri diğeri boyunca çökelen) çok yaygındır ve bir çok çalışma ile kompleks çökelti olarak gözlenmiştir [21,22]. Östenitleme sıcaklığının artışıyla çökeltilerin boyutu ve miktarı azalır [20]. 980-1200 °C arasındaki sıcaklıklarda titanyum, niyobyum karbür veya karbonitrürleri çökeler [23,24].

Östenitleme sıcaklığı 1200 °C’ye çıkartıldığında, birçok partiküller çözünür ve östenit katı çözeltilisine dönüşür. Bu sıcaklıkta sadece TiN vardır. Sadece Vanadyumla alaşımlandırılmış çeliklerde, östenitleme sıcaklığı 1000 °C’yi aştığında, vanadyum çökeltileri matriste tamamen çözünür. Fakat kompleks alaşımlı çeliklerde

(Ti, Nb ve V'li) bu durum böyle değildir. 980 °C'de su verilip 650 °C'de temperlenen çökeltilerin şekil ve boyutları çok farklılık arz eder [20].

TiN partiküllerinin çevresi Nb ve V (N, C) için tercihli çekirdeklenme yeridir. Bunlar TiN'de V ve Nb (C, N)'ün co-precipitation ile sonuçlanır. Bundan dolayı soğuma yada temperleme prosesi süresince V ve N karbonyürlerinin hacim oranını azaltır. TiN üzerinde bu bileşenlerin çekirdeklenmesi ve büyümesi, partiküllerin boyutunu artırır ve muhtemelen tane inceltici etkilerini azaltır. Bu yüzden termal işlem süresince kompozisyon kontrolü için etkili kompozisyon fikri önerilir. Pratik üretimde daha düşük tane irileşme sıcaklığı ve mekanik özelliklerdeki iniş çıkış problemleri TiN morfolojisi ve kararlılığı ile ilgili olabilir.

Qu ve Kuo 2,25 CrMoV çeliğinden yapılan cıvatalarda uzun süre (25,000 saatten fazla) 540 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra oluşan gevrekleşmeyi açıklamak amacıyla mikroyapı ve sertliklerini ve yorulma dayanımlarının incelemiştir [25]. Çalışmada, 2,25 CrMoV çeliğinin uzun süre bu sıcaklıkta maruz bırakılması taneler arası kırılmalara yol açtığı, buna östenit tane sınırlarında fosfor segregasyonunun sebep olduğu bulunmuştur. Bu fosfor segregasyonuna 0,3 pct nin altında molibden içeren karbürün Fe_3Mo_3C (M_6C) oluşmasıyla ferritin içerisindeki molibdenin tüketilmesi eşlik etmiştir. Yazarlar çalışmada, gevrekleşen cıvatalar 680 °C'de yeniden ısıtılarak tane sınırlarındaki fosfor segregasyonu kaldırılarak dolayısıyla tane sınırlarındaki gevrekleşmeyi kaldırdıklarını rapor etmişlerdir. Bununla birlikte ferritteki molibden içeriğinin 0,2 pct' nin altına azaltılmasıyla indirgenmiş molibden ile fosfor temizlenmiştir ve cıvataların gevrekleşme eğilimi yeniden yükselmiştir. Yeniden östenitleştirme, ısıtma ve su verme işlemlerinden sonra bile, cıvataların servis ömrünün orijinal durumdan daha kısa olduğu bulunmuştur.

Baltusnikas, termik santrallerde kullanılan ASTM A182-96 kalite % 0.12 C, 1.1 Cr, 0.54 Mn, 0.26 Mo, 0.26 Si, 0.17 V, 0.019 S ve 0.015 P kompozisyona sahip 12Cr1Mo çeliğinin 600–650–700 °C'de laboratuvar koşulları altında uzun ısıtma işlemine maruz bırakıldığında oluşan mikroyapıları incelemiştir [26]. Numunelere, 550 °C' de 227000 saat ve 700 °C'de 576 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış ve kullanım sırasında perlit sıcaklığın etkisiyle tamamen parçalanmıştır.

Fe'ce zengin M_3C karbürleri daha termodinamik dönüşümler ile Cr ve Mo' ce zengin ayrıcalıklı karbürlere dönüştüğü belirlenen çalışmada ayrıca, 600 °C'de 48 saat temperlemeye maruz bırakılan numunelerde Fe_3C gözlemlendiği rapor edilmiştir. $M_{23}C_6$ karbürleri (metal içerisinde, demir, molibden, krom ve vanadyum) hemen hemen hiç değişmeden kaldığı ancak bir miktar M_7C_3 tespit edilmiştir. 654 saat sonra izotermal yaşlanma sonrası $M_{23}C_6$ ve M_7C_3 difraksiyon pik yoğunluğu artarken, Fe_3C önemli ölçüde azaltıldığı belirlenmiştir.

Dobrzański, düşük alaşımlı CrMoV çeliğinin servis şartlarında uzun süre sıcaklık altında sürünme ortamına maruz kalması sonrasında malzemenin mekanik özellikleri ve yapısal değişimlerini incelemişler [23]. Mikroyapı incelemelerinde ilk durumda 0,5 Cr – 0,5Mo – 0,25V içeren düşük alaşımlı çelikte ferrit ile beynit karışımı ile bazı yerlerde küçük miktarda perlit vardır. Son durumda mikroyapı da çökeltme prosesleri ile dağıtılmış homojen olmayan ferrit vardır. Temel faz bileşenlerinin çökeltmesi ile $M_{23}C_6$ karbürünün oluşmasıyla az miktarda M_6C ve az miktarda MC tipi diğer karbürler oluşmuştur.

P. Bała, J.Pacyna ve J.Krawczyk 35MnCrMoV8-6-4-1 orta karbonlu çeliğin temperleme sırasında mikro yapıdaki faz dönüşümleri ve sertlik değişimleri incelenmişlerdir [27]. Çalışmada, numuneler önce östenitleştirme sıcaklığına çıkarıldıktan sonra su verme işlemi yapılmış daha sonra 210, 320 ve 420 °C'lerde temperleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Isıtma sırasında numunelerde üç temel dönüşüm belirlendiği ve bunların karbür çökeltmesi, M_3C çökeltmesi ve kalıntı östenit olduğu makalede rapor edilmiştir. Çalışmada ayrıca, temperleme sıcaklığının yükselmesi malzemelerin sertliğinde düşüşe sebep olduğu belirtilmektedir.

A. Zieliński et al. düşük alaşımlı CrMoV çeliğinin yüksek sıcaklıklardaki uzun süreli sürünme sonucu yapısal özelliklerdeki değişimi ve servis ömrünün nasıl değiştiğini incelemişlerdir [28]. Yapılan çalışmada, yazarlar, ilk durumda Cr-Mo-V düşük alaşımlı çeliğinin metalografik incelemesinde, çok ince ferritik-perlitik yapılar ile tane sınırlarında ince çökeltmeler ve ferrit taneleri içerisinde dağıtılmış homojen olmayan karbür çökeltmeleri gözlemlemişlerdir. 100,000 saatlik sürünme koşullarından sonra numune taramalı elektron mikroskopuyla incelenmiş ve perlit ve beynit

bölgelerinde bozulmalar göze çarpmıştır. Ferrit tane sınırlarında bazı bölgelerde karbürlerin zincir formu şeklinde çökeldiği gözükmiştir. Benzer mikro yapılar 172,000 saatten sonrada gözükmiştir. Diğer yandan 186,000 saatlik uzun sıcaklıklardaki sürünme etkisinin karakteristiği yapıldığında önemli yapısal bozulmalar olduğu yapıdaki ferrit ile karbür çökmesi ferrit tane içlerinde ve perlit bölgelerinde oluştuğunu ve ferrit tane sınırlarında önemli zincir çökelmeler oluştuğunu çalışmalarında rapor etmişlerdir.

Cheruvu, buhar tribünlerinin servis sırasında yüksek sıcaklıklara maruz kalmasıyla sıcaklığın etkisiyle oksidasyon ve hidrojen gevrekliği, sürünme ve temper gevrekliğini araştırmıştır [20]. Yazar, Cr–Mo–V ve 2,25Cr-1Mo dökme çeliğinin 200,000 saati aşan çalışma koşullarından sonra alınan örnek numuneler üzerinde çalışmıştır. Test sonuçlarında, servis sıcaklığında çok hassas olan iki çelikte de tokluk ve dayanımlarında önemli derecede bozulmalar olmuştur. Cr-Mo-V çeliğine 454 °C’yi aşan sıcaklıklarda yumuşatma tavlamaının uygulanması ile süneklik ve tokluğunda artış olduğu gerilimin kaybolduğu görülmüştür. 2,25 Cr-1Mo çeliğinin servis sırasında yumuşatma işlemine rağmen yüksek sıcaklıklara maruz kalması sebebiyle süneklik ve tokluğunun azaldığı göze çarpmıştır. Bu çeliğin tokluğundaki azalma düzeltilememiştir. 427 °C civarlarında yüksek olmayan servis sıcaklıklarında bile temper gevrekliğinin oluşması nedeniyle sıcaklığın etkisiyle kırılğan sert yapılar oluşabileceğini savunan yazar Cr–Mo–V çeliğinde servis sırasında yüksek sıcaklıklara maruz kalmasıyla temper gevrekliği görülmediğini ifade etmektedir.

2.25Cr–1Mo çeliğinde yorulma hasarı ve özelliklerinin incelenmesi [29,30], yüksek sıcaklıklarda deformasyon hızının ve sıcaklığın etkisi [31], tane sınırı kalıntılarında yeniden ısıtmanın etkisi [32] ve, yine tane sınırlarındaki hasar oluşum prosesi (oyuklanma-boşlukların oluşumu) [33], servis ortamının mekanik özelliklere etkisi kademeli soğutma ile elde edilen mikroyapının mekanik özelliklere etkisi üzerine literatürde çalışmalar mevcuttur. Ancak bu çalışmalarda çökeltelerin mekanik özelliklerine etkisinden bahsedilmemiştir. Sadece J. Dobrzański et al. M_6C , $M_{23}C_6$ ve MC karbürlerin oluşumundan bahsetmişler ancak bunların mekanik özelliklerine etkisini ileriki dönemlerde yapılacak yayınlarda sunulacağını rapor etmişlerdir [23].

BÖLÜM 3

AŞINMA

Aşınma için bir çok tanım yapılmakla beraber DIN 50320' ye göre aşınma; “Kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen istenmeyen yüzey bozulması” şeklinde tanımlanmaktadır. Aşınma sonucunda malzeme kayıpları ile beraber makine parçası üzerinde kalıcı hasarlar meydana gelir. Bu aşınma hasarları önemli ölçüde maddi kayıplara neden olabilmektedir.

Aşınma olayında beş unsur vardır. Bunlar; ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük ve harekettir. Ayrıca sıcaklık faktörü de altıncı parametre olarak değerlendirilebilir.

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 [34].

3.1. AŞINMA ZAMAN İLİŞKİSİ

Aşınma pratikte iki gruba ayrılır.

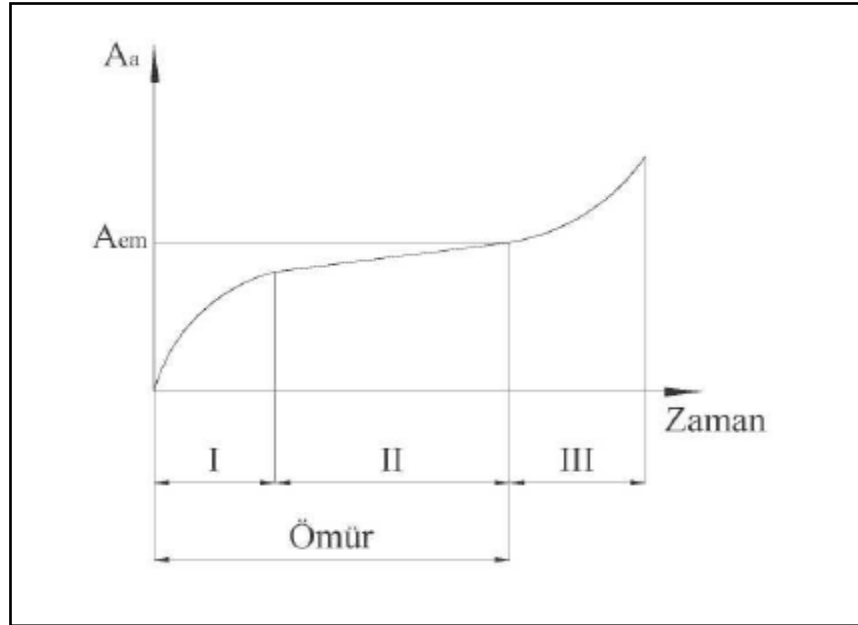
- a) Zaman ile gelişen aşınma,
- b) Aniden meydana gelen aşınma,

Zamanla gelişen aşınmayı üç safhada incelemek mümkündür (Şekil 3.1).

1.Safha (Rodaj Safhası): Bu safha birbirine alıştırma safhasıdır. Bu safhada parçaların ilk çalışması sırasında şiddetli bir aşınma meydana gelir. Bu nedenle parçaların birbiri ile alıştırılması iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleştirilmesi bu safhaya ait önemli şartlardır. Genelde alıştırma, yüksüz ve normal hızlardan daha düşük hızlarda yapılır. Alıştırmmanın iyi ve kısa sürede tamamlanması için bu safhaya ait olan özel yükler kullanılır.

2. Safha: Bu safhada aşınma çalışma sırasında temas noktalarında meydana gelir.

3. Safha: Bu bölgede artan aşınma hızı ile şiddetli aşınma meydana gelir.



Şekil 3.1. Aşınma zaman ilişkisi [35].

Aşınan elemana ait, çalışma şartlarına bağlı olarak müsaade edilen bir aşınma sınırı A_{em} tayin edilirse, aşınma-zaman diyagramından elemanın normal çalışma zamanı (ömür) tespit edilebilir. Bu zamandan sonra parça değiştirilmeli veya tamir işlemi uygulanmalıdır. Aniden meydana gelen aşınmada, parçaların yüzeyleri birdenbire bozulur veya bazı hallerde birbirine kilitlenir ve çalışmaz duruma gelir. Genellikle eş çalışan malzemelerin seçiminde yapılan hatalardan veya yağlamanın yetersiz olmasından meydana gelen aşınma şekli, statik zorlamanın etkisi altındaki kopmanın benzeridir.

Genel olarak aşınma, dış etkiler altında, temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişmelerin sonucudur. Dış etkilerin, fiziksel ve kimyasal değişikliklerinin çokluğu nedeniyle pratikte, bir aşınma hali değil birden çok aşınma hali vardır [36].

3.2. AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Aşınmayı etkileyen birçok değişik faktör bulunmaktadır. Jarrel, D, J., Bejbl, F., bu faktörler arasına aşınmaya en çok etki edenleri kısaca aşağıdaki gibi açıklamışlardır.

- a) Malzeme seçimi
- b) Sürtünme
- c) Yüzeye uygulanan yük
- d) Kayma mesafesi
- e) Yüzey sertliği
- f) Yüzey kalitesi
- g) Yağlama

vb. faktörler etki etmektedir. Bu faktörleri inceleyecek olursak;

3.2.1. Malzeme Seçimi

Birçok zaman aşınma olayı malzeme seçimi ile yakından ilgilidir. Malzeme seçimi doğru yapılmadığında beklenen performans elde edilemediği gibi maddi kayıplara da sebep olabilmektedir.

3.2.2. Sürtünme

Birçok araştırmacı sürtünme ile aşınma arasındaki ilişkiyi göz önüne almamıştır. Fakat bazı metallerde sürtünme katsayısı düşük olmasına karşın büyük oranlarda aşınma oluşabilmektedir. Bununla birlikte sürtünme katsayısının yüksek olduğu bazı durumlarda aşınmanın çok az olduğu görülebilmektedir.

3.2.3. Yüzeğe Uygulanan Yük

Yüzeğe uygulanan yük ile aşınma çok zaman doğru orantılı olarak artığı deneysel çalışmalar ile gözlenmektedir.

3.2.4. Sürtünme Mesafesi

Sürtünme mesafesinin artması ile birlikte aşınma miktarında zamana bağı olarak artış gözlenmektedir.

3.2.5. Yüzeğ Sertliğı

Yüzeğ sertliğı aşınmayı etkileyen en önemli parametrelerden bir tanesidir. Yüzeğ sertliğı artırılarak aşınma azaltılabilir veya aşınmadan kaynaklanan yüzeğ deformasyonu sabit tutulabilir.

3.2.6. Yüzeğ Pürüzlülüğü

Yüzeğ pürüzlülüğü 10 ila 70 µm arasında olmalıdır. Eğer yüzeğ çok temiz ise yüzeğler arasında soğuk kaynak oluşumu artar. Yüzeğ kaba olarak işlenmiş ise bu da aşınmayı daha fazla artmasına sebep olur.

3.2.7. Yağlama

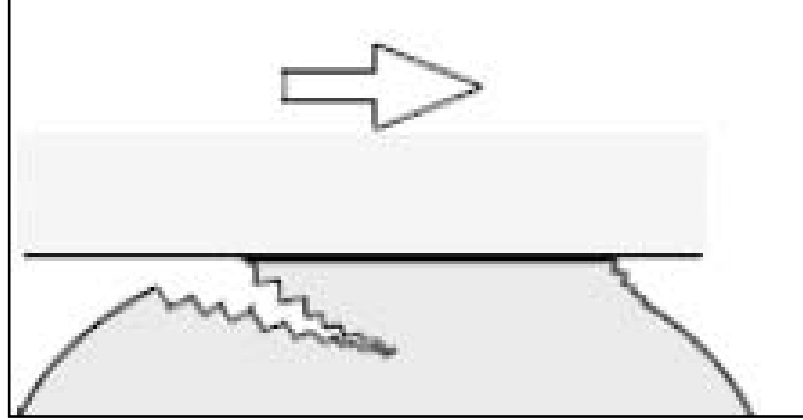
Aşınmaya karşı önleyici önlemlerden bir tanesi de yağlamadır. Sürtünen yüzeğler arasındaki yağlama ile metal metal teması ve soğuk kaynaklanma önenebilir [37].

3.3. AŞINMA ÇEŞİTLERİ

3.3.1. Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma kayma ve yapışma aşınması olarak ta bilinen bir aşınma türüdür. İki düzgün katı cismin yağlamalı veya yağlamasız ortamda kayma teması ile oluşur.

Adhezyon ara yüzeydeki pürüzlerin teması ile meydana gelir ve bu temas noktaları kayma ile kesilir. Bununla birlikte bir yüzeyden kopan parçalar diğer yüzeye yapışabilirler. Kayma devam ettiğinde diğer yüzeye yapışmış olan parçalar tekrar orijinal yüzeye yapışabilir veya her iki yüzeyden bağımsız aşınma partikülü olabilirler [38].



Şekil 3.2. Adhesiv aşınma [38].

Adhesiv aşınma, temas halinde olan birbirine göre bağıl hareket yapan, pratik manada kuru kayma yüzeylerinde, diğer aşınma unsurları önlenirse dahi daima mevcut olan bir aşınma türüdür.

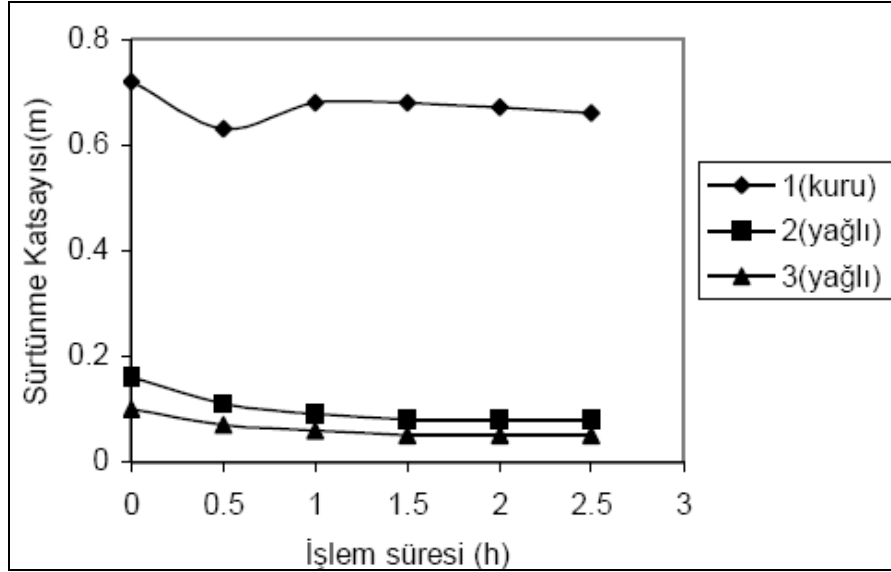
Yüzey ne kadar hassas işlense de gerçek temas alanı görünür temas alanından daima küçüktür. Birbiri üzerine temas eden malzemelere yük uygulandığında temas noktalarında aşırı gerilmeler meydana gelir. Akma sınırı aşıldığında ise küçük kaynak bağları oluşur.

Yük ve sıcaklık kaynak bağlarının oluşumunu hızlandırır. Temas halindeki malzemeler de kaynak veya yapışma olmuşsa hareket ile bu bağ kopacak ve temas noktalarında kırılmalar meydana gelecektir. Genel olarak kırılma yani kopma zayıf olan metalde oluşmaktadır.

Çizelge 3.1. Malzeme özelliklerinin adhesiv aşınmaya etkisi [39].

Malzeme Özellikleri	Adhesiv Aşınma
Oksitli yüzey	Az
Kübik kristal yapı	Çok
Hezagonal 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

Yapılan birçok bilimsel çalışmalar göstermektedir ki metaller arasındaki yağlamanın adhesyon aşınmasına büyük etkisi vardır. Yağlayıcı madde kullanıldığında malzeme transferinin ve sürtünme katsayısında bir azalma meydana geldiği görülmektedir.



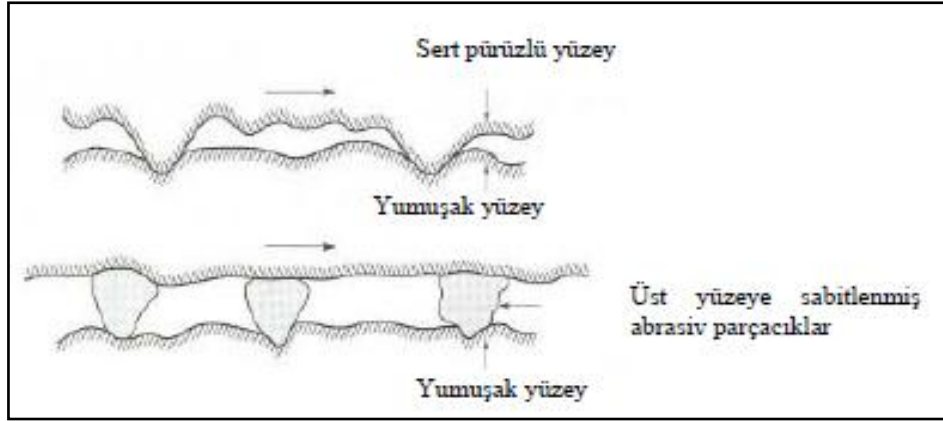
Şekil 3.3. Bakır esaslı bronz ve pirinç yataklarda kuru ve yağlı ortamlarda sürtünme katsayısı- zaman diyagramı [40].

Adhezyon aşınması için aşağıdaki sonuçlar çıkartılabilir.

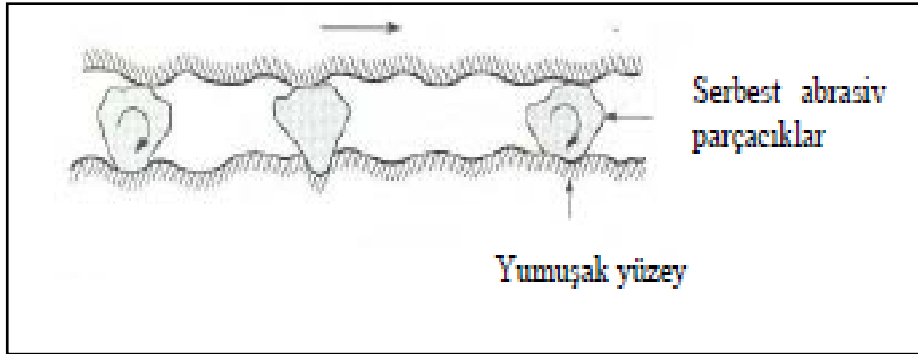
- Adhezyon aşınması uygulanan yük ile
- Kayma mesafesi ile
- Aşınan malzemenin yüzey sertliği ile doğru orantılıdır.

3.3.2. Abrasif Aşınma

Birbiri üzerinde kayan yüzeyler arasında sert ve pürüzlü yüzey veya partiküller ile sistemi hasara uğratan bir aşınma türüdür. Abrasif aşınma için iki genel durum vardır. Birinci durumda sert yüzey iki sürtünen yüzeyin daha sert olanıdır (iki cisimli obrasyon). Bu duruma örnekler öğütme kesme ve talaşlı imalat gibi makine çalışmalarıdır. İkinci durumda sert yüzey üçüncü bir cisimdir, genellikle küçük abrasiv partiküllerdir, diğer iki yüzey arasında bulunur ve yüzeylerden birini veya ikisini de aşındırabilir (üç cisimli abrasyon). Buna örnek serbest abrasif alıştırma ve parlatmadır. Birçok durumda başlangıçta aşınma mekanizması adhesivdir. Adhesif aşınmada aşınma partikülleri oluşur, bu partiküller ara yüzeyde sıkışır ve üç cisimli abrasif aşınmaya neden olur [35].



Şekil 3.4. Pürüzlü sert bir yüzey veya abrasif parçacıkların bir yüzeye yapışık olması [35].



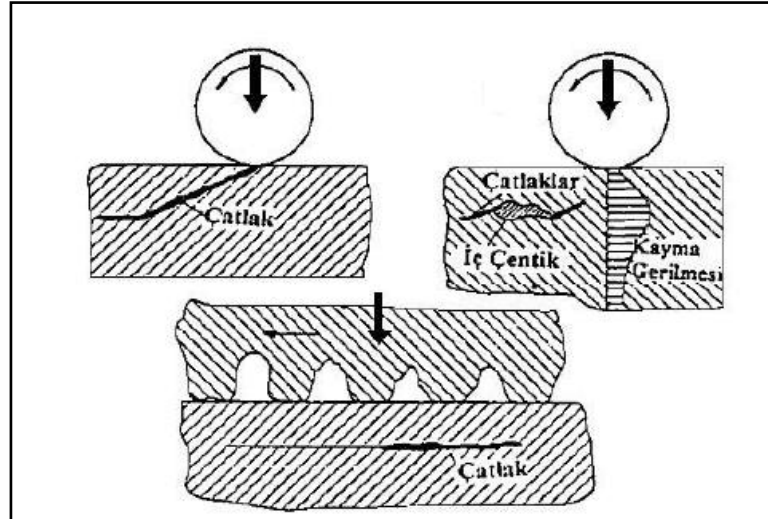
Şekil 3.5. Yüzeylerden en az birinden daha sert abrasif parçacıkların iki yüzey arasında sıkışması [35].

Abrasif aşınma direnci;

- a) Artan sertlik
- b) Azalan deformasyon sertleşme hızı
- c) Ana fazdan daha sert, tok, elastik modülü yüksek ve iri boyutlu partiküller aşınma direncini artırır.
- d) Yabancı partiküller aşınma direncini artırabilir [41].

3.3.3. Yüzey Yorulması

Yüzey yorulması; yüksek basınç altında çalışan parçalarda fazla sayıda yük tekrarlarının ardından, ya yüzey altında gelişen çatlakların yüzeye doğru büyümesi ya da yüzeydeki çatlakların gelişip yüzey altındaki çatlaklarla birleşmesi sonucu yüzeyden malzeme parçacığının kopup ayrılması ile oluşan bir aşınma şeklidir. Yetersiz yağlama nedeni ile ortaya çıkan aşınma hasarlarından farklıdır. İyi yağlama şartlarında bile görülebilir [42]. Yorulma aşınmasına pitting te denilmektedir. Genellikle dişli çark mekanizmaları, araçların kam mili mekanizmaları, rulmanlı yataklarda, demir yolu raylarında, soğuk ve sıcak haddelemede, sirkülasyon pompaları gibi makine elemanlarında görülmektedir. Şekil 3.6'da yorulma aşınması oluşum mekanizması görülmektedir [43].



Şekil 3.6. Yorulma aşınması oluşum mekanizması [44].

3.3.4. Erozyon Aşınması

Bir sıvı ya da gaz akımı tarafından taşınan farklı geometrik boyut ve yapıdaki taneciklerin, temasta buldukları katı yüzeylerinde sürekli darbe etkisi yaparak oluşturdukları hasar erozyon aşınması olarak tarif edilmektedir [45]. Erozyon aşınması farklı durum ve ortamlarda meydana gelebilmektedir.

3.3.4.1. Katı Partikül Erozyonu

Akışkan bir ortam (sıvı veya gaz ortam) ile hareketlendirilen aşındırıcı partiküllerin yüksek hızlarla bir katı yüzey üzerine tekrarlı çarpması sonucu oluşturduğu darbe etkisi ile oluşan bir aşınma türüdür.

3.3.4.2. 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.

3.3.4.3. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam Erozyonu

Yüksek hızlarda hareket halindeki bir katının kendisinden çok daha yavaş su damlalarına tekrarlı çarpması sonrası oluşan şok dalgaların tahribatı ile oluşan aşınma türüdür.

3.3.4.4. Kaviteasyon Erozyonu

Gaz kabarcıklarının yüksek bir basınç ile malzeme yüzeyinde tekrarlı patlaması sonucu oluşan bir aşınma türüdür. Özellikle su ve kalorifer borularında meydana gelen bir aşınma türüdür [43].

3.3.4.5. Elektro Erozyon

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

3.3.5. Korozyon Aşınması

Korozyon aşınması, düşük ve yüksek korozyon aşınması olarak iki şekilde gerçekleşir.

Metalik malzemeler içerdikleri alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak yüzeylerinde 0,1 mikron kadar doğal bir oksit tabakası bulunur. Bu tabaka sayesinde korozif ortamlara karşı direnç gösterirler. Aşındırıcı ortam tarafından metal yüzeyine uygulanan tekrarlı darbeler esnasında yüzeyden malzeme ile beraber oksit tabakası da kalkar. Tekrarlı darbelerin sıklığından veya koruyucu tabakayı oluşturan elementin alaşım içinde zamanla tükenmesinden dolayı oksit tabakası tekrar şekillenmez duruma gelir. Korozyonun beraber geliştiği ve korozyonun aşınma hasarına katkıda bulunduğu bu olaya düşük sıcaklık korozyon aşınması denir. 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 [43].

- a) Oksitlenme
- b) Karbürleme ve metal tozlaşması
- c) Nitrülenme
- d) Halojen korozyonu
- e) Sülfürleme
- f) Kül (tuz) çökeleği korozyonu
- g) Erimiş tuz korozyonu
- h) Sıvı metal korozyonu

Korozif ortamlar oksitleyici ya da redükleyici olarak sınıflandırılır. Oksitleyici atmosfer, yanma için hava veya oksijen girişinin olduğu, yüksek oranda moleküler oksijen (O₂) içeren oksijen aktivitesinin moleküler oksijen konsantrasyonu ile kontrol edildiği ortamlardır. Redükleyici atmosfer ise, oksijen girişinin olmadığı yanmanın oksijensiz şartlarda gerçekleştiği ortamlardır.

En önemli yüksek korozyon aşınma türü 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 ısıl genleşme katsayılarına sahiptirler. Oksit tabakası, çalışma ortamındaki ısınma soğuma çevrimleriyle oluşan iç gerilmeler nedeni ile (metal tabaka ara yüzeyinde) zaman zaman dökülür ve hemen doğal olarak kendini yeniler. Koruyucu oksidin kendini tekrar yenileyemeyecek duruma gelmesi durumunda savunmasız kalan metal ise hızla oksitlenir ve zamanla pul pul dökülerek yüzeyde malzeme kaybı oluşur [42].

3.4. AŞINMANIN AZALTILMASI İÇİN GEREKLİ ÖNLEMLER

- a) Aşınmaya dayanıklı malzeme seçimi; parçanın çalıştığı ortamdaki mevcut aşınma türü ve şiddeti belirtilerek yapılmalıdır.
- b) Parçanın geometrik tasarımı, aşınmayı en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır.
- c) Sadece aşındırıcı ortamla temas halindeki yüzeyler veya tüm yüzey alanı, esas malzemenin özelliklerinden daha üstün özelliklere sahip ve mevcut aşınma türüne daha dayanıklı bir malzeme ile kaplanmalıdır.
- d) Parçanın tamamının aşınmaya dirençli malzemedan üretilmesi yerine, maliyeti azaltmak açısından sadece aşınan yerlerin aşınmaya dirençli malzemelerden üretilmesi daha uygun olacaktır.
- e) Parçanın üretim aşamasında herhangi bir imalat hatasına (gözenek, cüruf, çatlak, kalıcı çekme gerilmeleri, istenmeyen mikro yapı, yüksek yüzey pürüzlülüğü) yer verilmemelidir.
- f) Parça, dayanım limitlerini aşan yükleme şartlarında (yüksek basınç, yüksek sıcaklık ve yüksek hız vb. gibi) kullanılmamalıdır.
- g) Bir yağın vizkozitesi sıcaklığa göre değişir. Vizkozite indeksi büyük olan yağlar, sıcaklık ile özellikleri daha az değişim gösteren yağlardır. Yağlayıcı ile

çalışan ortamlarda yüksek vizkozite değerli ve yüksek basınca dayanıklı yağlar (fosfor ve kükürt katkı) kullanılarak yağ filminin çabuk bozulması önlenebilir. Bununla beraber, katkı yağların oksidasyon aşınmasını arttırıcı bir rol oynadığı da düşünüldüğünde malzeme seçiminde daha dikkatli olunmalıdır.

- h) Soğutucu seçimi, parçanın çalışma ortamına uygun biçimde olmalıdır.
- i) Yağlayıcı ve soğutucunun uygun bir filtreleme işleminden geçirilerek içindeki aşındırıcı partüküllerin sisteme tekrar girmesine engel olunmalıdır.
- i) Yağlayıcının kontrolleri düzenli olarak yapılmalı ve en düşük kullanım limiti belirlenerek belli aralıklarla yenilenmelidir.
- j) Sürtünme elemanları malzeme açısından bir birine uygun seçilmelidir [42].

3.5. AŞINMA ÖLÇÜM METODLARI

3.5.1. Ağırlık Farkı Metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesinde bulunması sebebi ile en çok kullanılan ölçüm metodudur. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10-4 veya 10-5 g hassasiyetinde oldukça duyarlı terazi ile yapılır.

Aşınma miktarı gram ve miligram cinsinden ifade edilmiş ise, alınan yol metre veya kilometre olarak tespit edilmiş bulunan kayma veya sürtünme yoluna göre birim kayma yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g/km), (mg/m) ile ifade edilir. Ağırlık kaybı birim alanı için hesap edilecekse (g/cm²) gibi bir birim ile ifade olunabilir [43].

Ağırlık farkı ölçme yönteminde en çok kullanılan bağıntılar aşağıdaki gibidir.

$$W_a = G/d.M.S$$

W_a: Aşınma oranı (mm³/N.m)

G : Ağırlık kaybı (gr)

M : Yükleme ağırlığı (N)

S : Aşınma yolu (m)

d : Malzeme yoğunluğu (gr/cm³) olarak ifade edilir.

3.5.2. Kalınlık Farkı Metodu

Aşınma esnasında meydana gelecek boyut değışikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeriyle karşılaştırılması sureti ile elde edilir. Kalınlık olarak tespit edilen değeri, hacimsel olarak tespit edilip birim hacimdeki aşınma miktarı elde edilir. Kalınlık hassas ölçme aletleri ile 1µm duyarlılıkta ölçülebilir. Boyutsal değışimin ölçülmesinde sistemin durdurulması gerekmez. Bunun için mekanik (mikrometre), optik (mikroskop), elektronik (lineer deplasman ölçer) yöntemlerde kullanılabilir.

3.5.3. İz Değişimi Yöntemi

Sürtünme yüzeyi bölgesi geometrisi belirli bir iz, plastik deformasyon ile oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun değışimi ölçülür.

Uygulamalarda en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme aletidir. Bilya veya elmas pramitin bıraktığı iz çapındaki değışme mikroskop yardımıyla ölçülmesi suretiyle değışim incelenir.

3.5.4. Rasyoizotoplar İle Ölçme

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü atom parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır.

Aşınmanın büyük hassasiyetle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değıştirmeden ölçü alınabilmesi avantajlarıdır. Fakat ekonomik olmaması nedeniyle özel problemlerin çözümü dışında yaygın bir yöntem değildir.

3.5.5. Bilgisayar Destekli Aşınma Ölçüm Metodu

Bu yöntemlerde aşınma ve aşınma değışkenlerine ait veriler, esas itibarı ile pim disk aşınma test mekanizmasına ilave edilen uygun sensörler vasıtası ile belirlenmektedir.

Aşınma kayıpları ve sürtünme katsayısı verileri bilgisayara A/D-D/A kartlar üzerinden aktararak işlenir. Bu veriler, bir paket programla grafik formlara dönüştürülebilir, istatistiksel analizlere tabi tutulabilir ve diğer hesaplamalarda kullanılabilir. Sistemin duyarlılığı, kullanılan sensörlerin ve kontrol kartının voltaj değerindeki lineer sapmaya bağlıdır [45].

3.6. TRİBOSİSTEMLER

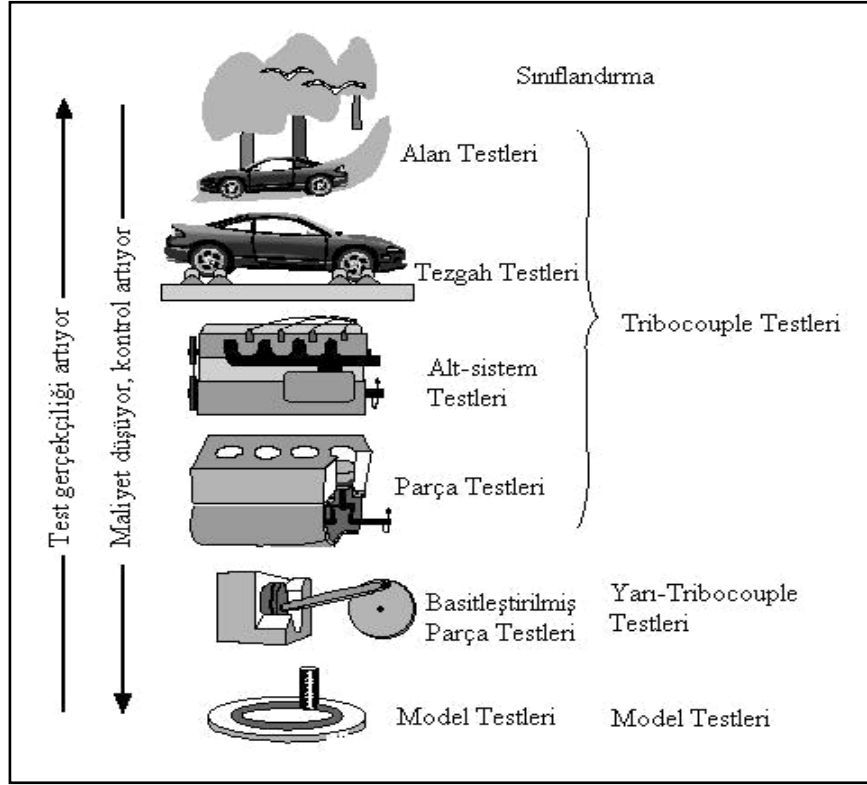
Tribolojinin sözlük anlamı birbiri ile temas eden yüzeyler arasındaki etkileşimi inceleyen bilim ve teknoloji olarak tanımlanmaktadır. Tribolojik araştırmaların amacı yüzey sürtünmelerinin ve aşınmadan kaynaklanan kayıpları azaltmak ve gidermektir. Aşınma tiplerinin çok çeşitli olması ve birçok farklı durumda aşınma probleminin ortaya çıkması, çok sayıda tribotestin gelişmesine neden olmuştur. Genel olarak aşınma araştırmaları şu amaçlarla yapılır;

- a) Sistemlerin ya da sistem elemanlarının verimliliği, ömrü, güvenilirliği, performansı, fonksiyonu, bakım yapılabilirliğinin değerlendirilmesi.
- b) Sistem elemanlarının kalite kontrolü.
- c) Malzemelerin ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarının karakterize edilmesi.
- d) Aşınmanın neden olduğu malzeme kayıplarının araştırılması [46].

3.6.1. Tribotestlerin Sınıflandırılması

Tribotestler birçok şekilde gerçekleşebilir. Tribolojik test metotlarının en uygun sınıflandırması geçerlilik derecesine göre yapılır. Genellikle testlerde yüksek derecede bir gerçekçilik amaçlanır.

Maliyet, test zamanı ve test koşullarının kontrolünün hassasiyeti veya bilimsel çalışmalardan beklenen performansta dikkate alınmalıdır. Birçok değerlendirmede, bir uygulamanın simülasyonu yüksek önceliğe sahip değildir [46].



Şekil 3.7. Tribosistemlerin şematik gösterimi [46].

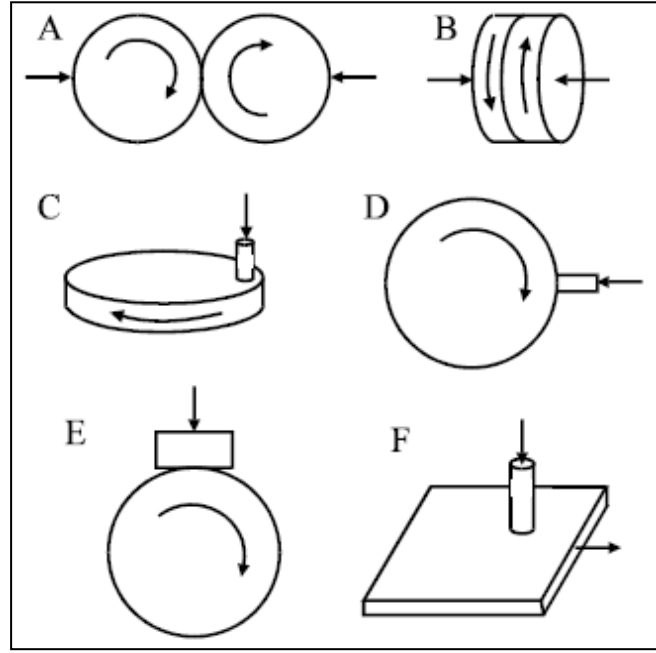
3.7. AŞINMA DENEY YÖNTEMLERİ

Aşınma çalışmalarında birçok değişik deneysel düzenekler kullanılmaktadır. Aşınma için yapılan laboratuvar araştırmaları, genellikle hem oluşan aşınma mekanizmalarının incelenmesini hem de pratik uygulamaların benzeşiminin yapılması ve aşınma oranları ile sürtünme katsayıları için kullanışlı dizayn verilerinin elde edilmesini ortaya çıkarmaktadır. Her iki amaç için de aşınmayı etkileyebilen tüm değişkenlerin kontrol ve ölçümü oldukça önemlidir.

Şekil 3.8'de yaygın olarak kullanılan birkaç tip aşınma ve test aparatlarının geometrik şekilleri görülmektedir. İlk defa 1774 yılında sürtünmeyi ölçmek için kullanılan bir alete isim olarak verilen Tribometre kelimesi bazen birkaç aparat için kullanılmaktadır. Daha fazla son zamanlarda kabaca tibotester ve bunun fiil ile birleşmiş hali oluşan terimler için kullanılmaktadır [47]. Şekil 3.8'de görülen metotlar iki tipe ayrılabilirler. Bunlardan birincisi aşınma oranının her iki kayma

yüzeyinde de aynı malzemeden olsa bile aşınma oranlarının farklı olduğu asimetrik düzendedir.

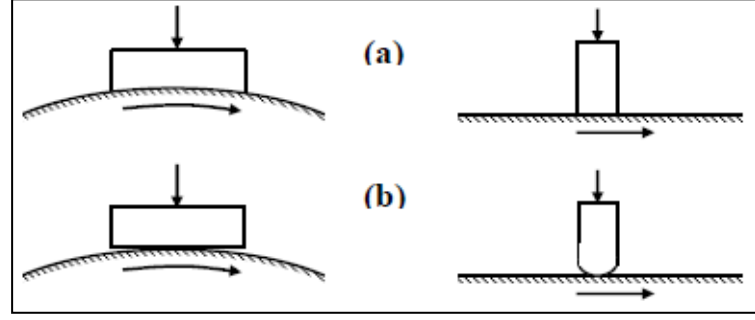
Simetrik düzen, aşınma çalışmasında pek sık kullanılmaz. Bu düzene Şekil 3.8'deki A ve B düzenleri örnek olarak gösterilebilir. Bu düzen tipinde ya çevreleri boyunca temas halinde olan (A) ya da yüzeyleri boyunca temas eden (B) her ikisi de dönen bilezik veya iki disk bulunur.



Şekil 3.8. Kayma aşınması için kullanılan geometrik düzenekler [48].

Çok yaygın olarak asimetrik cihazlarda bir diske karşı bastırılan pim kullanılmaktadır. Bu pim diskin ya düz yüzeyi üzerine (C) ya da kenarına (D) bastırılır. Bu düzen tipi bileziğe karşı bastırılan bir blok (E) veya düz bir yüzey üzerine bastırılan pim (F) şeklinde olabilir.

Test cihazında temas şekilleri belirli bir alan teması (düz bir disk üzerine düz uçlu bir pim veya bir bilezik üzerine tam yerleşmiş bir blok) veya bir nokta yada çizgi teması (bir disk üzerine düz uçlu bir veya bir bilezik düz bir blok) şeklindedir. Bu temas şekilleri Şekil 3.2'de detaylı olarak gösterilmektedir [47].



Şekil 3.9. Deney cihazlarında temas biçimleri [47].

Bazı aşınma test metotları ulusal standartların konusudur. Örneğin bilezik üzeri blok (ASTM G77), çapraz silindir (ASTM G83), disk üstü pim (ASTM G99), disk üstü küre (DIN 50324) ve düz yüzey üzeri döner pim (ASTM G98) [48].

Kayma şartları altındaki aşınma, kayma aralığına ayrıca kayma hızı ve test süresinin her ikisinin birden büyüklüğüne bağlıdır. Kayma hızı sürtünme enerjisinin dağılıma oranına ve böylece iç yüzeydeki sıcaklık oranını etkiler. Bir aşınma testinin sonuçları ile bu aşınma testinin yarı süresi, iki kat hız ile elde edilen bir başka aşınma testinin sonuçlarının aynı olması düşünülemez. Kayma hızı değişken aşınma mekanizması ve oranında ani geçişler olabilir. Aşınma ayrıca kayma yüzeyleri arasındaki nominal temas basıncına da bağlıdır. Temas basıncındaki değişmelerin oluşturduğu geçişleri de içerir. Temas basıncından bağımsız olarak numunenin lineer boyutları da önemlidir. Uzun bir numunenin kenarına yakın bir yerdeki aşınma hasarı, temas bölgesinden geçişi esnasında kısa bir numunedeki aşınma hasarına göre daha etkilidir.

Normal yük, temas alanı, kayma hızı ve test süresindeki büyük değişikliklerden başka diğer çeşitli faktörlerde aşınma testinde hesaba katılmalı ve izlenmelidir. Test sıcaklığı malzemenin mekanik özellikleri üzerine ve sıcaklığın hareket geçirdiği işlemler üzerinde etkisinden dolayı önemlidir. Yağlı sistemlerde yağ viskozitesi üzerine olan etkisinden dolayı test sıcaklığı önemlidir. Atmosferik bileşenler de önemlidir. Su buharı ve oksijen gibi reaktif bileşenler tüm malzemelerde aşınma oranını ve mekanizmasını kuvvetli bir şekilde etkiler. Yağlı sistemlerde, yağ filmlerindeki basınç dağılımı ve bunun sonucu film kalınlığı ve yağlayıcı maddenin miktarı da önemli faktörlerdir.

Pratik uygulamanın laboratuvar benzeşimi kurmanın mümkün olmadığı ve sadece aşınma testinin bir servis deneyi olduğu akla gelebilir. Fakat çıkan sonuçların benzeşimi yapılan gerçek şartlardan çok uzak olduğu bilinmelidir.

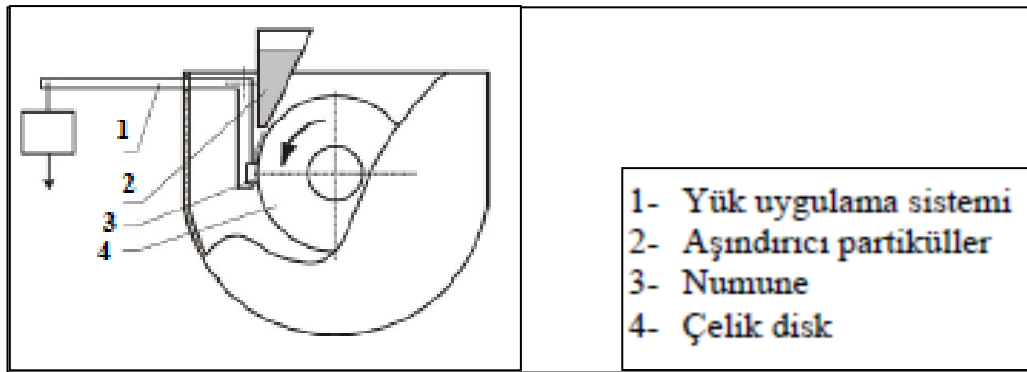
Temas gerilmeleri, temas şartları, kayma hızları ve kimyasal ortam herhangi bir aşınma testinde hepsi çok önemli bileşenlerdir. Sürtünmenin ölçülmesi ile ve testten sonra aşınan yüzeylerin ve aşınma hasarının son muayenesi ile bu önem daha iyi fark edilir. Aşınma mekanizması, servis uygulamalarına olduğu gibi testte de aynıdır. Bir laboratuvar testinin sonuçları güvenle pratik bir probleme uygulanabilir [47].

3.8. AŞINMA DENEYLERİNDE KULLANILAN BAZI AŞINMA DENEY CİHAZLARI

H,Klaasen ve J, Kübarsepp, bazı karpit bileşiklerinin aşınma performansı hakkında deneysel çalışmalar yapmışlardır. Aşınma deneyi için şekil 3.10' da şematik olarak gösterilen lastik(kauçuk) tekerli abrasyon (ASTM G65-94) deney cihazını kullanmışlardır. Bu deney cihazı üç partiküllü abrasif aşınma deneyleri için ideal bir tasarım olmakla birlikte disk üstü blok deneyi içinde rahatlıkla kullanılabilir [49].

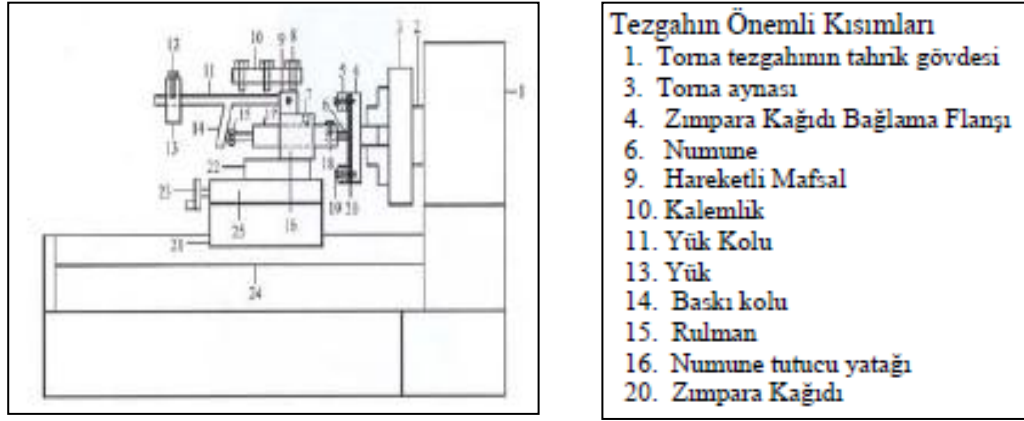
Ayrıca abrasif aşınma deneyleri ASTM standartlarına göre;

- a) G65 Lastik tekerli abrasyon testi(aşındırıcı kuru kum)
- b) G 105 Lastik tekerli abrasyon testi(aşındırıcı ıslak kum)
- c) B 611 Yüksek gerilimin olduğu yerlerde çelik teker kullanılır.



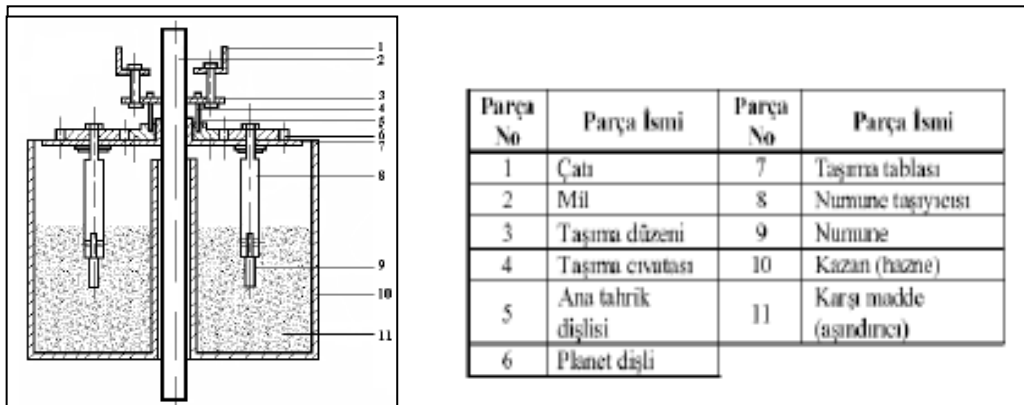
Şekil 3.10. Lastik tekerli abrasiyon deney cihazı şematik görünümü [49].

Y, Taşgın ve M, Kaplan, yaptıkları çalışmada dubleks döküm tekniğiyle üretilen FeCrC katkılı malzemenin abrasiv aşınma davranışını incelemişlerdir. Bu deneysel çalışmada şekil 3.11’de şematik olarak görünen aşınma deney cihazını kullanmışlardır. Deney cihazı esasen bir torna tezgahı üzerine gerekli aparat ve ölçüm sisteminin monte edilmesi ile oluşturulmuştur [50].



Şekil 3.11. Abarasiv aşınma deney cihazı şematik görünümü [50].

N, Y, Sarı ve M, Yılmaz, yaptıkları abrasif aşınma deneyinde şekil 3.12’ de ki aşınma deney cihazını kullanmışlardır. Aşındırıcı tanecik olarak 820 Knopp sertlik değerinde çakmak taşı kullanmışlardır. Aşınma makinesi dönme – karıştırma sistemine göre çalışmaktadır. Kazan içerisindeki aşındırıcı tanecikler içinde planet dişli mekanizması ile hem kendi ekseninde hem de ana mil eksenini etrafında dönenek numuneler zaman ile aşınacaklardır [51].

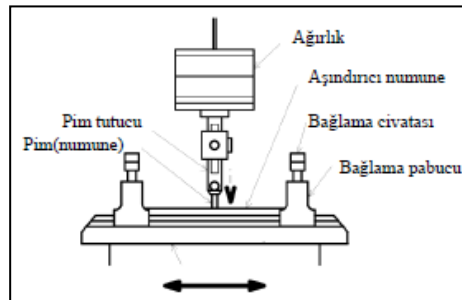


Şekil 3.12 Aşındırıcı partiküllü aşınma deney cihazı [51].

D, Odabaş, ve M, B, Karamış, kaymalı sürtünme yapan malzemelerin aşınana yüzeylerinde meydana gelen plastik deformasyon ısısının hesaplanmasını sağlayan teorik bir model geliştirerek bu teorik modelin geçerliğini araştırmak için çalışmalar yapmıştır. Aşınma deneyleri pim-ring kayma sisteminde değişik yük ve kayma hızı şartları altında gerçekleştirmişlerdir. Kullanılan deney cihazının şematik görünümü şekil 3.18'de görülmektedir. Burada uygulanan normal yük bir hidrolik pompa yardımı ile iç tutucunun üstünde bulunan hazneye gönderilen basınçlı yağın lastik diyaframı şişirmesi ve tutucuyu kaymalı yatağı içinde itmesi şeklinde uygulanmaktadır. Sürtünme ölçülmesinde bir ucu ankastre, diğer ucu serbest olan dikdörtgen kesitli çelik bir kirişin elastik sınır içindeki sehiminden faydalanılmaktadır. Sehim miktarı bir deplasman transduseri ile ölçülmüşlerdir [52].

3.8.1. Düzlem Üzeri Çubuk (Pin On Flat) Deney Cihazı

Düzlem üzerinde çubuk aparatında, sabit duran çubuk üzerinde bir düzlem git-gel hareketi yapar. Bazı durumlarda düzlem sabit ve çubuk hareketlidir. Çubuk, bir bilye, yarım küre uçlu bir ilave veya düz uçlu bir silindir olabilir. Yüksek frekansta küçük bir titreşim genliği kullanarak aşınma testleri yapılabilir [35].

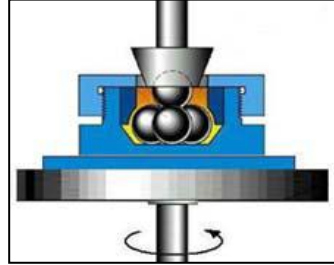


Şekil 3.13. Pin on Flat deney cihazı şematik görünümü [53].

3.8.2. Dört Top Deney Aparatı

Şekil 3.14' te şematik olarak dört top test aparatı gösterilmektedir. Alt taraftaki üç top bir taşıyıcı içerisinde hep birlikte döner ve üst taraftaki topa doğru izafi olarak hareket eder. Üstteki top, yerinde sabittir ve aşağıya doğru normal bir yük uygular.

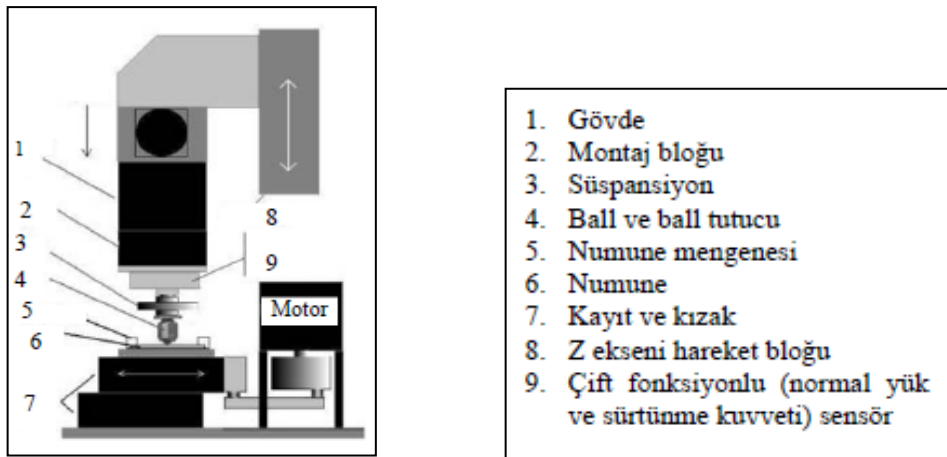
Bilyeler, standart rulmanlı yatak çeliğinden yapılabilir. Bu test, malzeme davranış çalışmalarından çok yağlama performansının değerlendirilmesinde kullanılan bir metottur.



Şekil 3.14. Dört top aşınma deney aparatı [47].

3.8.3. Ball On Flat Aşınma Deney Cihazı

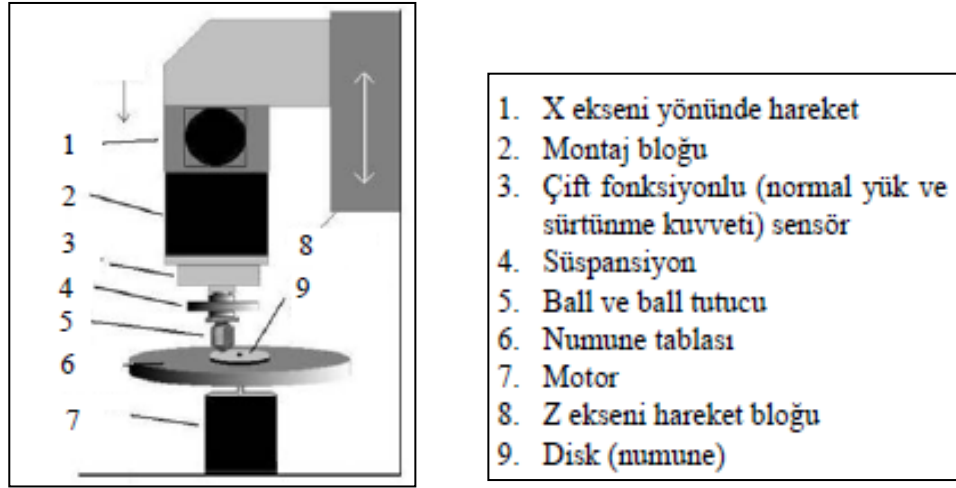
Bu deney liner olarak ileri geri hareket eden düz bir numune yüzeyine belirli bir yük ile temas ettirilen kürenin kayması esasına dayanmaktadır. Şekil 3.15’ deki modelde görüldüğü gibi yük küre üzerinden uygulanmaktadır. Ayrıca aşınma deneyi ile birlikte sürtünme kuvveti deneyleri de yapılabilmektedir. Bu deney cihazının çalışma prensibi motordan alınana dairesel hareket ile kızak üzerinde bulunan kayıt lineer olarak ileri geri hareket ettirilmektedir. Kayıt üzerine bağlama aparatları ile bağlanan numune yüzeyine belirli ölçülerdeki bir kürenin belirlenen yük ile temasına dayanmaktadır. Bu deneydeki önemli parametreler uygulan yük, numunenin hareket uzunluğu, hareket sıklığı ve hızı, test sıcaklığı, test süresi.



Şekil 3.15. Ball on Flat deney cihazı [47].

3.8.4. Ball On Disk Deney Cihazı

Ball on disk deney cihazı ile pin on disk deney cihazının çalışma prensipleri birbirilerine benzerler. Ball on disk deneyinde numune (disk) yüzeyine bir küre belirlenen yük ile temas ettirilmesi ile aşınma gerçekleştirilir. Motordan alınan dairesel hareket ile disk kendi eksenini etrafında dönmesi sağlanır. Küre, bağlama aparatları ile montaj bloğuna bağlanır. Ayrıca kürenin x veya y ekseninde hareket etmesi gereklidir. Şekil 3.16'daki modelde yük düşey olarak küre üzerine uygulanmaktadır.

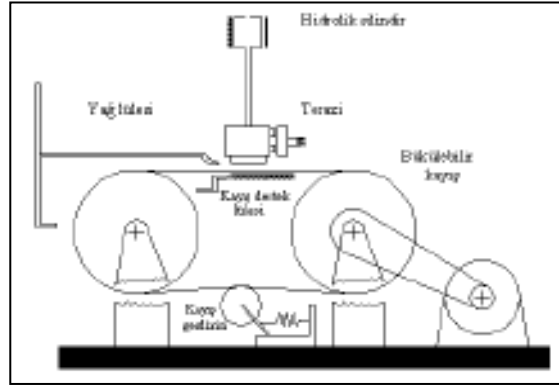


Şekil 3.16. Ball on Disk deney cihazı [54].

3.8.5. Levha – Kayış Deney Cihazı

Bu sistem, iki geniş silindir ve bu iki silindirin üzerinden geçen, eğilebilme özelliğine sahip bir kayıştan meydana gelmektedir. Bu iki büyük silindirden bir tanesi hızı ayarlıdır. Kayış silindirlerin etrafında dönmekte olup gevşeklik şeklinde görüldüğü gibi basit bir gerdirme tekeri ile düzeltilir. Kayış, kumaş, lastik çelik şerit veya takviye edilmiş kompozit malzemelerden olabilir. Deneylerde kullanılacak yüzey tekstürü ise imalatı esnasında kayışın bir yüzüne zımpara kağıdı yapıştırılarak veya aşındırıcı örtülerek sağlanır. İki silindirin arasında kalan kayışın düz kısmı bir hava veya su yastığıyla desteklenmiştir. Kayışın hızında yaklaşık olarak eşit bir hızda akış hızına sahip olan, su yastığını temin eden kayış destek lülesi vardır.

Lüleye gelen suyu kontrol eden, elle ayarlanabilen veya silindirin hızıyla kontrol edilen bir vana vardır. Kayış hareketi ve vananın açılmasıyla birlikte üniform bir su tabakası oluşur.

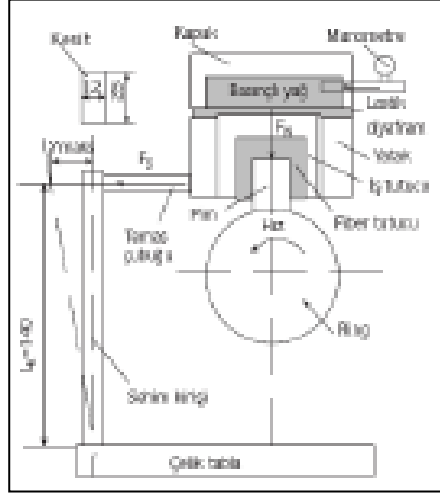


Şekil 3.17. Levha-kayış aşınma deney cihazı [54].

Deneyde kullanılmakta olan test numunesi bir hidrolik silindir vasıtasıyla itilmek suretiyle kayış üzerine bastırılarak bir normal yük meydana getirilir. Kayış ve numunenin arasında oluşan sürtünme kuvveti tesiriyle numune deformasyona uğrar. Numuneyi tutmakta olan kafa sağ ve sol taraftan yataklanmıştır. Kayış hareket yönü tarafında bulunan yatağa sürtünme kuvvetinin ölçülmesi maksadıyla bir terazi yerleştirilmiştir. Vana yardımıyla, yağ besleme lülesi kayışın sürtünen yüzeyinde üniform bir su tabakası meydana getirir. Bu düzenek kayış ile numune arasında oluşturulabilecek çok büyük izafi hızları taşıyabilecek kabiliyettedir. Sistemin en büyük avantajı iç ve dış silindirin düzeneğindeki gibi temas yüzeyinde bir eğrinin olmayışıdır [54].

3.8.6. Silindir Üstü Çubuk Deney Cihazı

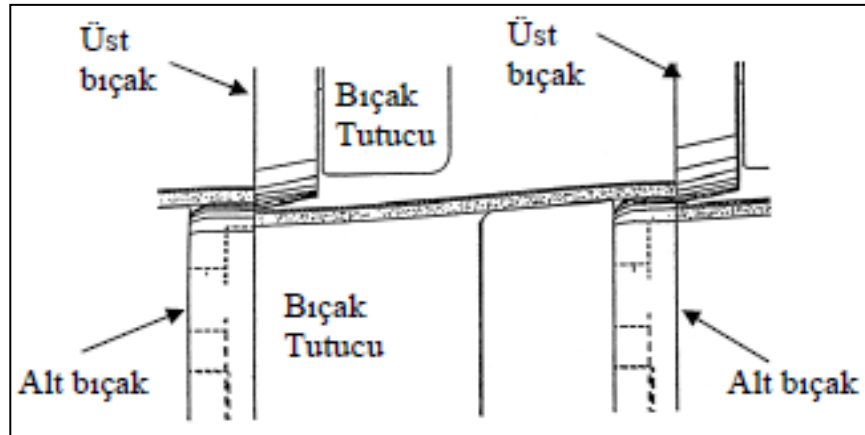
Silindir üzerinde çubuk aparatı pin on disk aparatına benzer. Farkı numunenin yüklemesi dönen silindir üzerine diktir. Numune düzlem veya yarım küresel uç olabilir.



Şekil 3.18. Silindir üstü çubuk deney cihazı şematik görünümü [52].

3.8.7. Çapraz Silindir Deney Cihazı

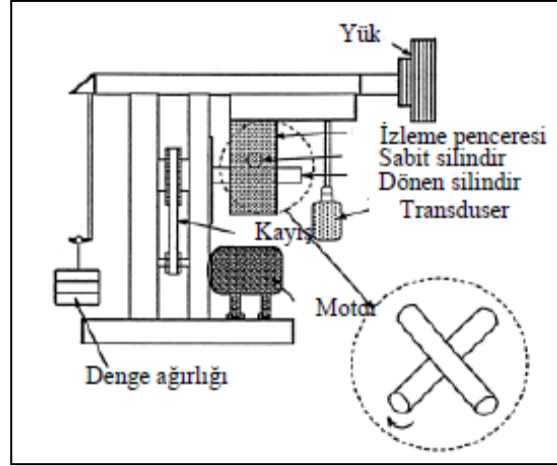
Kağıt kesiminde, kumaş kesiminde, sac metal kesiminde vb. malzemelerin kesiminde aşağıdaki gibi makas sistemi kullanılır. Bu tür kesimlerde bıçakla metal arasında çok küçük temas alanı ve yırtılmalar meydana gelir. Özellikle sac metal kalıplarındaki kesme işlemi buna çok iyi bir örnektir. Bu gibi bıçaklarda aşınma, metal- metal aşınması veya abrasif aşınma şeklinde meydana gelmektedir.



Şekil 3.19. Sac metal kesimi [55].

Bu tür aşınmaların ölçümünde ASTM G78 Çapraz Silindir deney cihazı kullanılır. Çapraz silindir deneylerinde daha çok takım çeliklerinde meydana gelen aşınmalar ile kaplanmış yüzeylerde meydana gelen aşınmalar incelenmektedir.

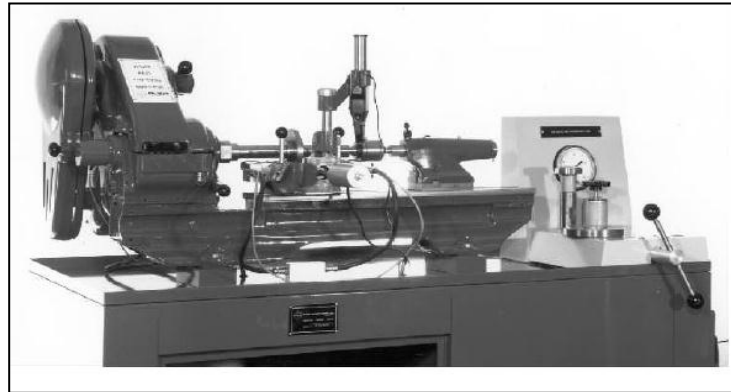
Cihazın çalışma prensibi kendi eksenini etrafında dönen bir silindir ve bu silindire çizgisel temas eden çarpı şeklinde konulmuş sabit bir silindirden meydana gelmektedir. Bu deneyde meydana gelen aşınma önce dönen parçanın dış çapında meydana gelen yivin hacmi ölçülür. Sabit parça üzerinde meydana gelen aşınma lekeleri ölçülür ve bununla birlikte sistemdeki toplam aşınma bulunmuş olur [55].



Şekil 3.20 Çapraz silindir deney düzeneği [55].

3.8.8. Plint TE 97 Sürtünme ve Aşınma Deney Cihazı

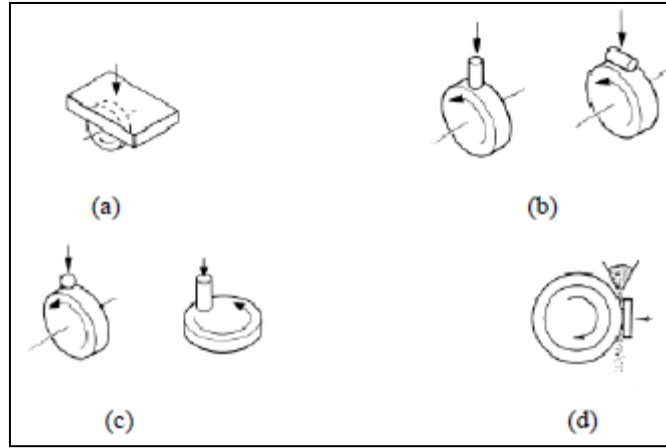
Plint firmasının ürettiği ilk tribolojik test cihazı TE 97 model test cihazıdır. Bu cihazın tasarımı Dr. Michael Plint ve Prof. Duncan Dowson tarafından yapılmıştır [55].



Şekil 3.21. Plint firmasının ürettiği ilk TE -97 aşınma deney cihazı [55].

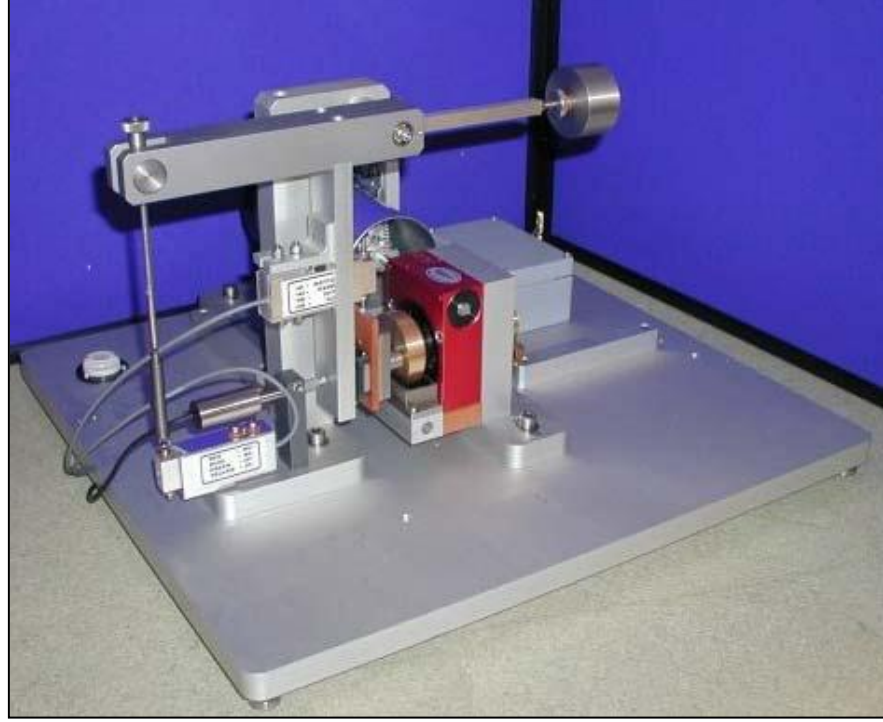
Sürtünme ve aşınma üzerine eski tarihlerden beri birçok çalışma yapılmış ve insanlar asırlar önce tahılları öğütmek için aşınmayı, sürtünmeyi azaltarak büyük kütleli parçaları daha az kuvvetle itebilmek için yağları kullandıkları bilinmektedir. Özellikle yakın tarihimizde sanayi devrimlerinin başlaması ile birlikte aşınma ve sürtünme daha fazla önem kazanmıştır. Birçok ülkede aşınma ve sürtünme yüzünden milyon dolarlarca zarar ettikleri bilinmektedir. Sürtünme ve aşınma deneyleri için birçok deney cihazı kullanılmaktadır. Model aldığımız deney cihazı TE 97 aşınma deney cihazıdır.

TE 97 Sürtünme ve aşınma deney cihazı öğrencilere tırbolojik olayları, kuru ve sıvı kayma, iki ve üç parçalı aşınma, yapışıp bırakma olaylarını incelenmesi için dizayn edilmiştir. Bu cihazın konfigürasyonunda bazı değişiklikler yapılarak değişik deneyler yapılabilir.

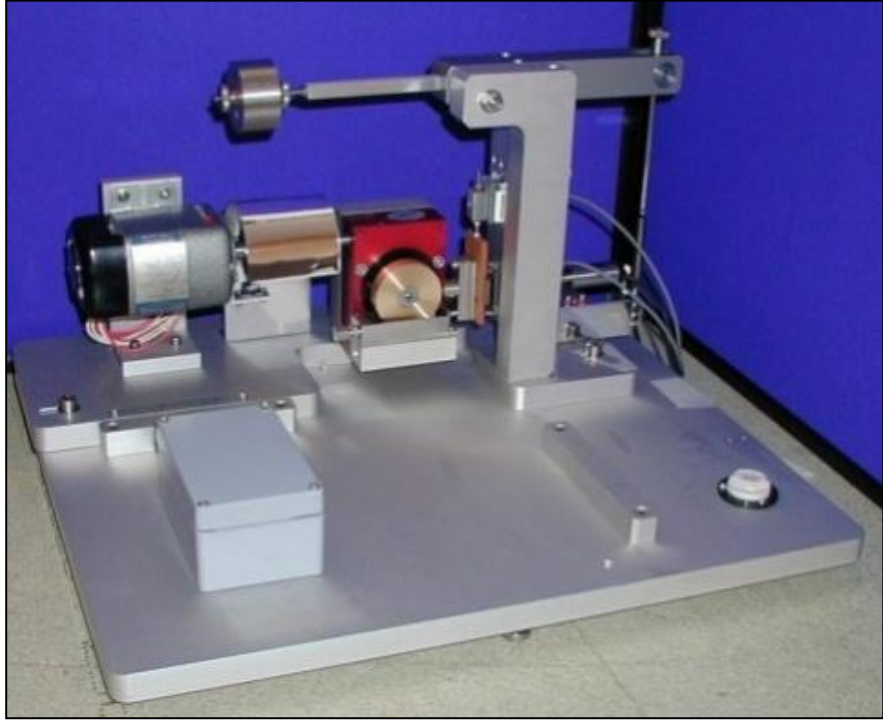


Şekil 3.22. TE 97 deney cihazı ile yapılabilen aşınma deneylerinin şematik görünümü [55].

Şekil 3.23' de görüldüğü gibi şekil (a) da Pin on Disk deneyi yapılmaktadır. Aynı deney cihazı üzerinde motor grubunun yönü değiştirilerek (b) Block on disk veya silindir üstü pim deneyleri yapılabilmektedir [55].



(a)



(b)

Şekil 3.23. Aşınma deney cihazlar a) TE-97 Pin on Disk, b) Block on disk.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. ANA MALZEME

Bu çalışmada, yüksek korozyon, aşınma, sürtünme ve yorulma direnci ile birlikte yüksek darbe dayanımı kabiliyeti bakımından, CrMo çeliklerinden en çok kullanılan 2,25Cr-1Mo çeliği kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Çeliğin kimyasal bileşimi.

	Ağırlıkça (%) Kimyasal Bileşim							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Fe
Ana malzeme	0,15	0,47	0,03	0,03	0,45	2,25	1,0	Kalan

4.2. NUMUNE HAZIRLAMA

Çizelge 4.1’de belirtilen ana malzemeden mikroyapı ve sertlik deneyleri için 10x10x9 mm ebatlarında numuneler, metal-metal aşınma deneyleri için 30 mm yüksekliğinde ve 9 mm çapındaki deney numuneleri, korozif aşınma deneyleri için ise 25x15x9 mm ebatlarında numuneler kesilerek çıkartılmıştır.

4.3. ISIL İŞLEMLER

Hazırlanan numunelerin bir kısmı Karabük Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği malzeme laboratuvarındaki ısıl işlem fırınında (Şekil 4.2) 940 °C’de 1 saat bekletilip suda soğutulmuştur. Ardından 650 °C’de 8 saat bekletilip havada soğutulmuştur.



Şekil 4.1. Isıl işlemlerde kullanılan Magma Therm marka sıcaklık kontrollü elektrikli direnç fırını.

4.4. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

Hem orijinal hem de ısıl işlemine tabi tutulmuş 2.25Cr-1Mo çeliği, aşağıda açıklandığı gibi mikroyapı ve mekanik özellik karakterizasyon çalışmalarına tabi tutulmuştur.

4.4.1. Mikroyapı Karakterizasyonu

Mikroyapı çalışması, standart metalografik prosedüre göre numuneleri hazırladıktan sonra optik ışık mikroskopunda (Şekil 4.2) ve taramalı elektron mikroskopunda (SEM) gerçekleştirilmiştir. Metalografik prosedür, numuneleri 180, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh zımparalarla zımparalama ve ardından elmas solüsyonla parlatma işlemini içermektedir. Mikroyapı resimleri, Leica DFC290 model kamera sistemli Leica DM ILM model optik ışık mikroskopunda ve ZEISS EVO LS10 marka SEM cihazında, dağlanmamış numuneler üzerinden çekilmiştir. SEM ZEISS EVO LS10'da yapılan incelemeler sırasında mikroyapı görüntüde açık ve gri renkteki lekeli bölgelerden elektron difraksiyon taraması (EDS) analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.2. Miroyapı incelemelerinde kullanılan Leica DM ILM model optik ışık mikroskobu.

4.4.2. Mekanik Özellik Karakterizasyonu

Mekanik özellik karakterizasyonu, sertlik deneyleriyle yapılmıştır. Sertlik ölçümleri metalografik olarak hazırlanmış tüm incelenen numuneler üzerinde Vickers batıcı ucu ile Schimadzu marka HVM Model mikrosertlik cihazında 500 g yük altında Vickers sertlik değeri (HV) cinsinden sertlik değerlerinin belirlenmesi ile gerçekleştirilmiştir.

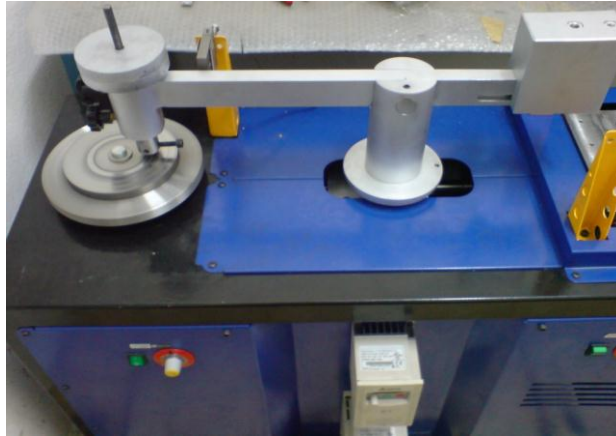
Sertlik değerleri, en az 10 ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Şekil 4.3'de sertlik deney cihazı görülmektedir.



Şekil 4.3. Schimadzu marka HMV Model mikrosertlik cihazı.

4.5. AŞINMA DENEYLERİ

Adhezif aşınma testi, ASTM G99'a uygun olarak tasarlanan Disk üzeri pim (Pin on Disc) cihazında gerçekleştirilmiştir. Bu test tekniğinde, sabit duran ve yüklemenin üzerinden yapıldığı bir pim ve bunun karşısında dönerik kayan karşı malzeme olarak tanımlanan bir disk vardır. Test sisteminin şematik gösterimi, Şekil 4.4'de verilmiştir. Bu metod, bir çok hareketli makine elemanı ve yatak uygulamaları ile büyük ölçüde benzeştiğinden tercih edilmiştir.



Şekil 4.4. Aşınma testlerinde kullanılan Pin on Disk test sistemi.

Yüklemeler pim üzerinden ve mekanik olarak yapılmaktadır. Pimin bağlandığı ve yüklemenin üzerinden yapıldığı kol, ölü ağırlıkları dengelemek için ortadan hareketli olarak yataklanmıştır. Pim ile disk yüzeyinin paralel olmasını sağlayabilmek için, pim koluna küçük bir su terazisi yerleştirilmiştir.

Aşınma deneyleri, 30 mm yüksekliğinde ve 9 mm çapındaki deney numuneleri kullanılarak, normal atmosferik koşullarda, DIN 1.2379 (62 HRC) kalite soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş diskler üzerinde yapılmıştır. Aşınma deney numunelerine 10-40 N arasında üç farklı yük uygulanmıştır. Deneyler 0.2 m/s kayma hızı, 1000m, 2000m ve 4000m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir.

Her deneyde yeni disk ve pim kullanılmıştır. Testler başlamadan, disk ve pimler alkolle iyice temizlenmiş, kurutulmuş ve sürtünme yüzeylerine el değmeden, yüzeyler birbirlerine paralel olacak şekilde sisteme bağlanmıştır.

Aşınma miktarı, ağırlık kaybı esaslarına göre tesbit edilmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda oluşan ağırlık kayıpları, 0.1 mg hassasiyete sahip ve 220 g tartma kapasiteli, Precisa marka XB 220A model elektronik tartı ile tespit edilmiştir. Testlerin başlangıcında ve sonunda aşınma pimlerinin ağırlıkları ölçülmüştür. Böylece aşınma esnasında, malzeme kaybından dolayı pimin ağırlığında meydana gelen değişimler belirlenmiştir.

Aşınma deneyleri sonrası aşınma mekanizmasının belirlenmesi için aşınmış yüzeylerin görünümü optik ışık mikroskobu ve EDS donanımlı SEM cihazı ile incelenmiştir.

4.6. KOROZYON DENEYLERİ

Korozyon deneyleri, yüzeyleri 1200 mesh SiC zımpara ile temizlenip parlatılan numuneler, oda sıcaklığında, konsantrasyonu % 10 olan iki farklı çözeltiye (NaCl ve HCl) daldırılarak yapılmıştır. Çözelti hacmi, içindeki numunelerin 1cm²si için 5 ml olacak şekilde ayarlanmıştır. Korozyon deneyleri sırasında belirli zaman aralıklarında çözülden çıkarılan numuneler, sırasıyla saf su ve alkol içinde

ultrasonik olarak temizlendikten sonra 0.1 mg hassasiyete sahip elektronik terazide tartılmıştır. Deneysel sonuçları, numunelerin birim yüzey alanı başına düşen ağırlık kaybına göre gr/mm^2 biriminde değerlendirilmiştir.

4.7. KORUZİF AŞINMA DENEYLERİ

Korozif aşınma deneyleri, levha üzerinde bilye temas geometrisine sahip korozif aşınma deney cihazında (Şekil 4.5) gerçekleştirilmiştir. Korozif aşınma deneyleri, numune yüzeyine 6 mm çapında 100Cr 6 bilyenin sürtünmesi ile yapılmış olup, hareket uzunluğu ve toplam kayma mesafesi sırasıyla 15 mm ve 340 m'dir. Aşınma deneyi sonrasında numune yüzeyleri üzerinde gelişen aşınma izleri stereo mikroskop (TRONJIC – ZTX-E) ile incelenmiştir.

Aşınma deneyleri bir kap içine konan %10 konsantrasyonlardaki farklı korozif ortamlarda gerçekleştirilmiştir. Korozif ortam olarak % 10 NaCl ve % 10 HCl çözeltiler kullanılmıştır. Korozif aşınma deneyleri 30 mm/sn kayma hızında 5N, 10N, 20N ve 40N da 4 farklı yük altında gerçekleştirilmiştir.



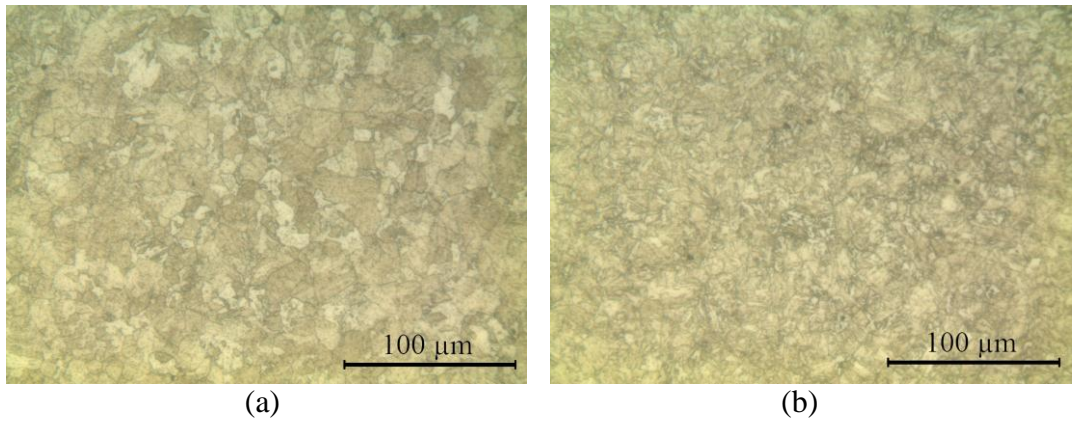
Şekil 4.5. Korozif aşınma deneylerinde kullanılan deney cihazı.

BÖLÜM 5

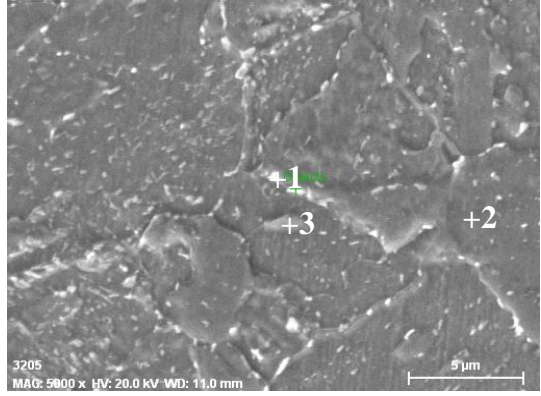
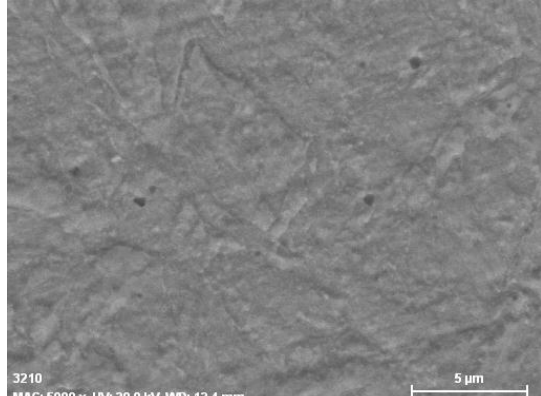
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU VE SERTLİK DENEYLERİ

2,25Cr-1Mo içeren çeliğin, orijinal ve ısıtılma tabi tutulmuş numenlerin optik mikroskop (LOM) ve EDS donanımlı taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi gerek orijinal gerekse ısıtılma işlem görmüş çeliklerin mikroyapısında gri renkli matrisin yanında genellikle tane sınırlarına çökelmiş daha açık renkli karbürler görülmektedir. Özellikle orijinal çeliklerin SEM görüntüleri incelendiğinde tane içlerinde de açık gri renkli, yuvarlağa yakın çökeltilerin de olduğu saptanmıştır. Çeliklere ısıtılma işlem uygulandıktan sonra tanelerin küçüldüğü, tane sınırlarındaki ve tane içlerindeki çökeltilerin yapıya homojen bir şekilde dağıldıkları gözlenmiştir. Dolayısıyla ısıtılma işlem görmüş çeliklerin mikroyapısını gerek LOM ve gerekse SEM görüntüleri ile karakterize etmek son derece güçleşmiştir.

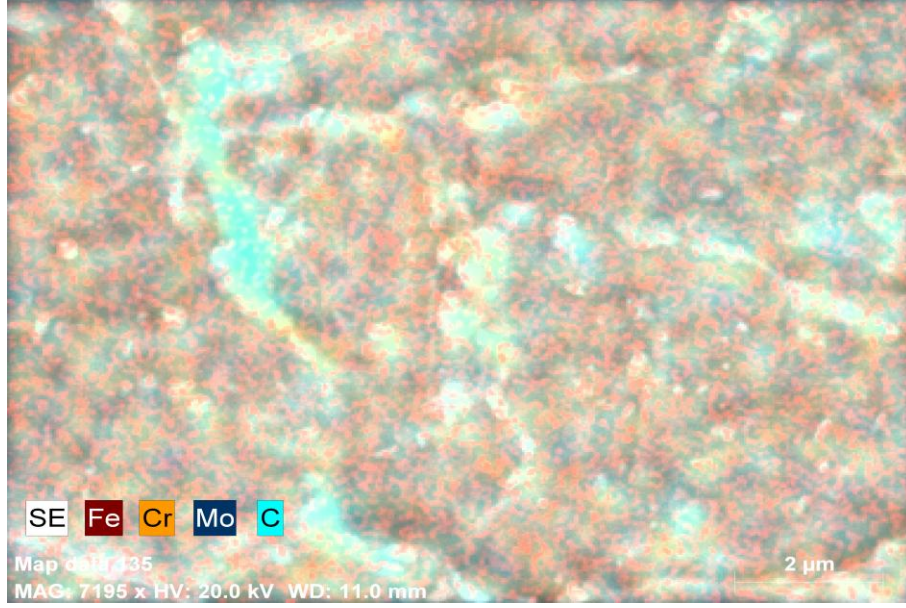


Şekil 5.1. İncelenen çeliklerin LOM görüntüleri a) Orijinal, b) Isıtılma işlem görmüş.

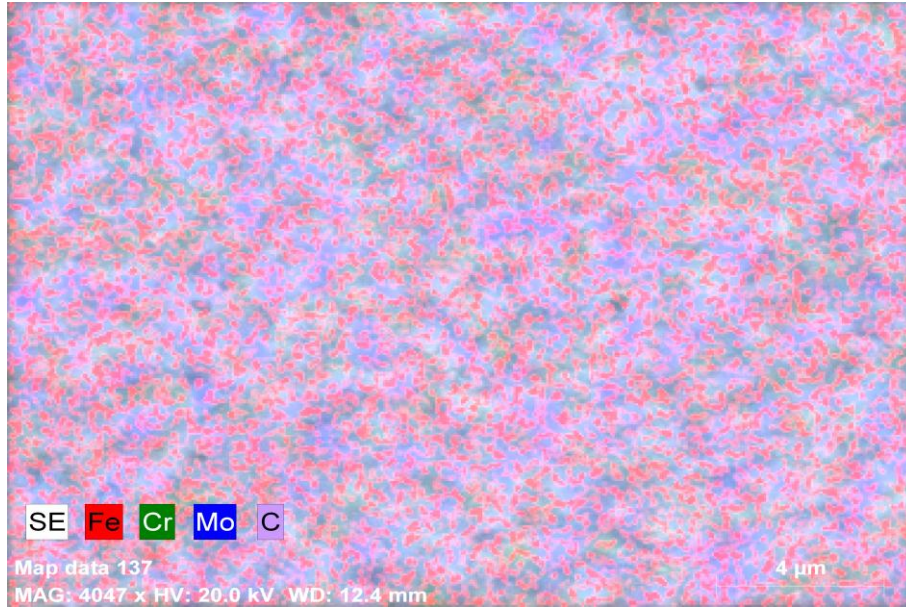
Isıl İşlem Durumu	SEM	EDS																											
Orijinal		<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">Bileşim %</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>0.90</td> <td>0.65</td> <td>0.90</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>0.11</td> <td>0.16</td> <td>0.24</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>2.92</td> <td>2.55</td> <td>5.56</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>Kalan</td> <td>Kalan</td> <td>Kalan</td> </tr> <tr> <td>Mo</td> <td>1.21</td> <td>1.14</td> <td>2.34</td> </tr> </tbody> </table>		Bileşim %			1	2	3	C	0.90	0.65	0.90	V	0.11	0.16	0.24	Cr	2.92	2.55	5.56	Fe	Kalan	Kalan	Kalan	Mo	1.21	1.14	2.34
	Bileşim %																												
	1	2	3																										
C	0.90	0.65	0.90																										
V	0.11	0.16	0.24																										
Cr	2.92	2.55	5.56																										
Fe	Kalan	Kalan	Kalan																										
Mo	1.21	1.14	2.34																										
Isıl İşlem		<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">Bileşim %</th> </tr> <tr> <th colspan="3"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td colspan="3">1.01</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td colspan="3">0</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td colspan="3">2.37</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td colspan="3">Kalan</td> </tr> <tr> <td>Mo</td> <td colspan="3">1.25</td> </tr> </tbody> </table>		Bileşim %						C	1.01			V	0			Cr	2.37			Fe	Kalan			Mo	1.25		
	Bileşim %																												
C	1.01																												
V	0																												
Cr	2.37																												
Fe	Kalan																												
Mo	1.25																												

Şekil 5.2. İncelenen çeliklerin SEM görüntüleri ve EDS sonuçları.

Gerek yaptığımız literatür çalışmaları, gerekse mikroyapı karakterizasyonu (LOM ve SEM) sonuçlarına göre, orijinal çeliklerin matrisi ferritik matrise sahip iken, ısıtım işlem sonrası temperlenmiş martenzitik bir matrisin elde edildiği öngörülmektedir [32]. Orijinal çeliklerin tane sınırlarında görülen açık renkli karbürlerin Cr_7C_3 ve/veya $Cr_{23}C_6$ tipi karbürler olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.2’de 3 nolu bölgeden alınan EDS sonucuna göre Mo miktarı diğerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Isıtım işlem sonrası çeliklerin tane boyutlarının küçüldüğü ve karbürlerin yapı içerisine homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra tane içlerinde görülen karbürlerin ise Mo_2C tipi karbürler olabileceği literatürde belirtilmiştir [56]. İncelenen çelikler üzerinde gerçekleştirilen elementel harita (mapping) sonuçları Şekil 5.3’te gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.3. İncelenen çeliklerin elementel harita (mapping) görüntüleri a) Orijinal ve b) Isıl işlem uygulanmış.

Orijinal ve ısıl işlemi görmüş çeliğin yüzeyinden alınan kütsel sertlik değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Isıl işlemi görmüş çeliğin sertlik değeri orijinal çeliğe göre ortalama % 30 daha yüksek çıkmıştır.

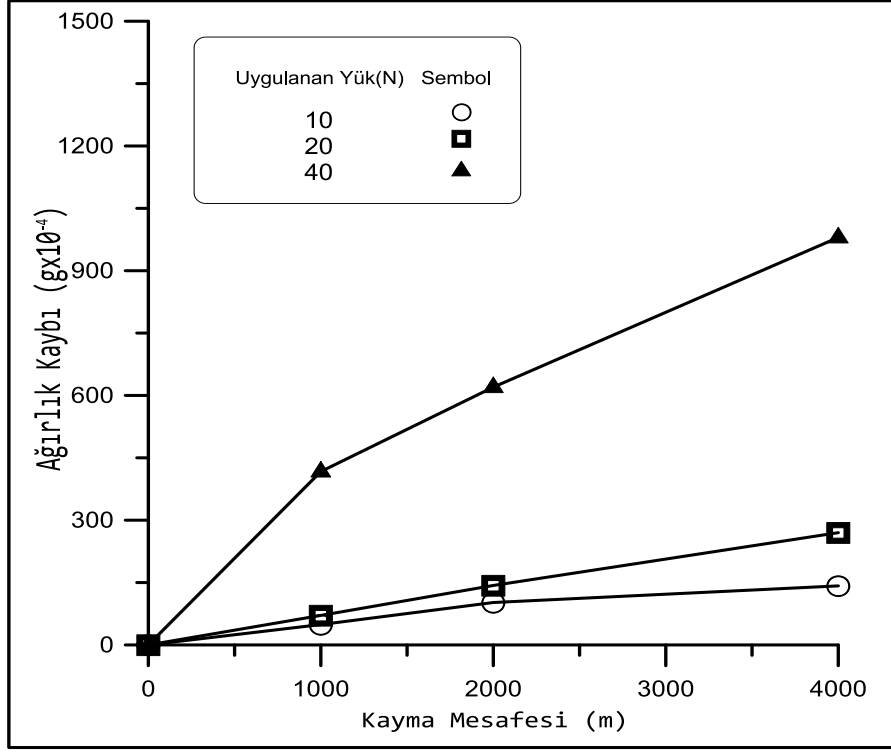
Çizelge 5.1. İncelenen çeliklerin oda sıcaklığındaki sertlik sonuçları.

Orijinal	Isıl işlem uygulanmış
204 ± 3 HV	264 ± 4 HV

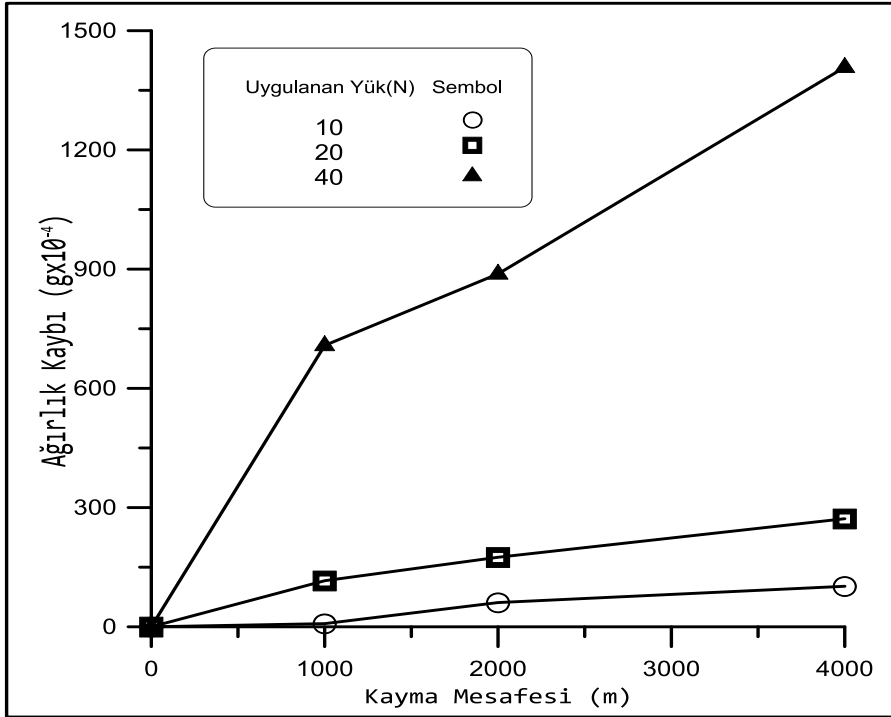
5.2. AŞINMA DENEYLERİ SONUÇLARI

Bu çalışmada incelenen çeliklerin 10 N, 20 N ve 40 N yük altındaki ağırlık kaybı değerlerinin kayma mesafesine bağlı olarak değişimi Şekil 5.4’de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi, gerek uygulanan yükün, gerekse kayma mesafesinin artması ile incelenen tüm çeliklerde ağırlık kaybı artmaktadır. Orijinal ve ısıl işlem uygulanmış çeliklerin ağırlık kaybı değişimi, uygulanan yükle farklılık göstermiştir. Toplam kayma mesafesi sonunda 20 N yük değerine kadar ısıl işlem uygulanmış çelikler bir miktar daha az ağırlık kaybı sergilerken, 20 N yük seviyesinin üzerine (40N) çıkıldığında orijinal çelikler belirgin bir şekilde daha az ağırlık kaybı sergilemiştir. Aşınmanın genel bir kuralı olarak, malzemenin sertliğinin artması aşınma direncini arttırır. Ancak bu sertlik artışı sonunda eğer malzeme gevrekleşiyorsa yüksek yüklerde aşınma direnci olumsuz yönde etkilenebilir [57]. Bu nedenle incelenen çeliklerde ısıl işlem uygulanmış çeliklerin orijinal çeliklere göre bir miktar gevrekleşmiş olması, aşınma direncinin düşmesinin sebebi olabileceği düşünülmektedir. Şekil 5.4’deki grafiklerin eğimi g/m cinsinden aşınma hızını vermektedir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.5’te gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi 20 N yük seviyesine kadar incelenen tüm çeliklerin aşınma hızı değerleri birbirine yakın seyrederken, 40 N yük seviyesinde orijinal ve ısıl işlem uygulanmış çelikler arasında belirgin bir fark ortaya çıkmıştır. 40 N yük seviyesinde ısıl işlem uygulanmış çelikler daha yüksek aşınma hızı sergilemiştir.

Metal-metal aşınma deneyleri sonrasında numunelerin aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.6’da, SEM görüntüleri ile aşınmış yüzeylerden alınan EDS analizi sonuçları ise Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de verilmiştir.

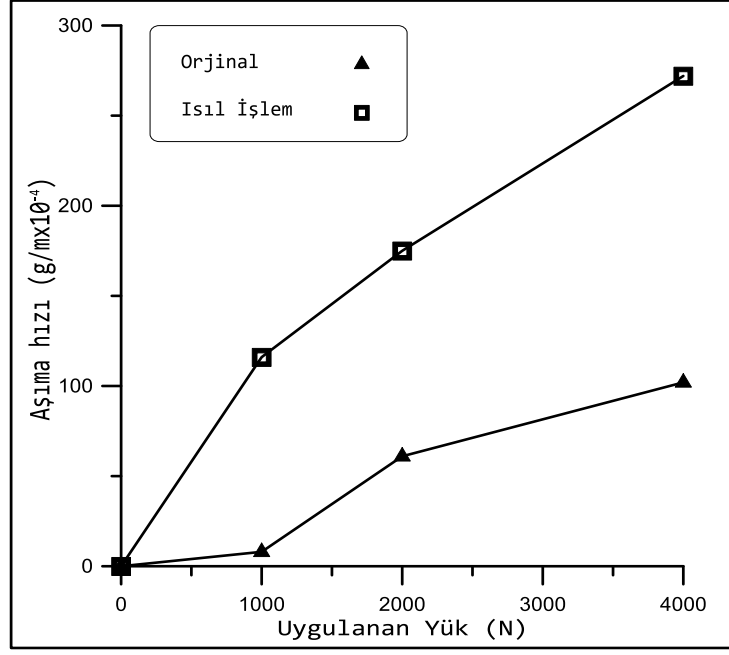


(a)

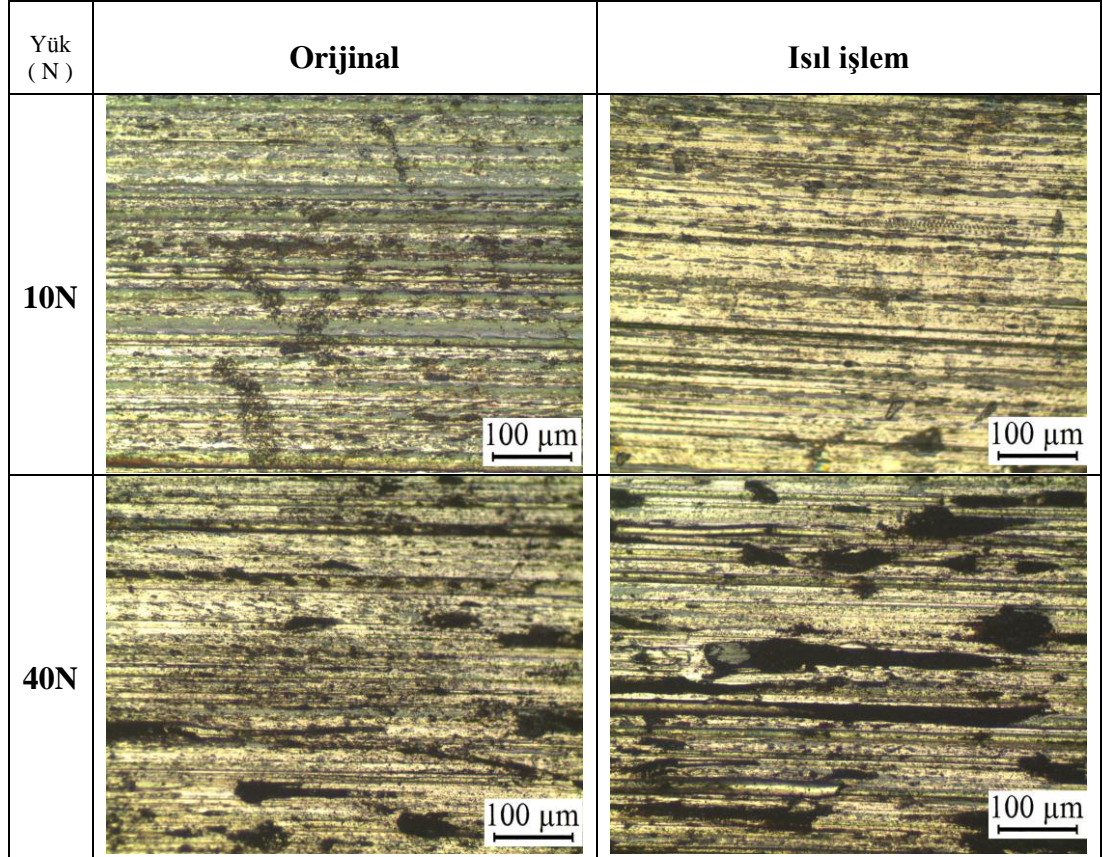


(b)

Şekil 5.4. Farklı yüklerde metal-metal aşınma deneyine tabi tutulan a) orijinal ve b) ısıtılmış çeliklerin ağırlık kaybı değerlerinin kayma mesafesi ile değişimi.

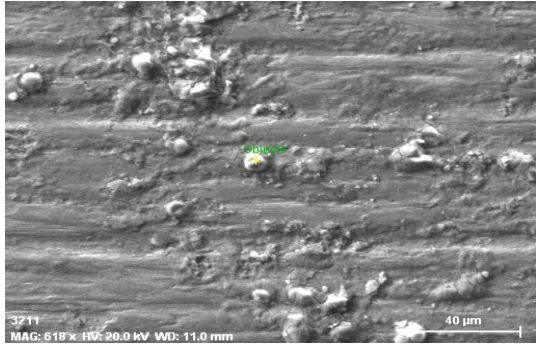
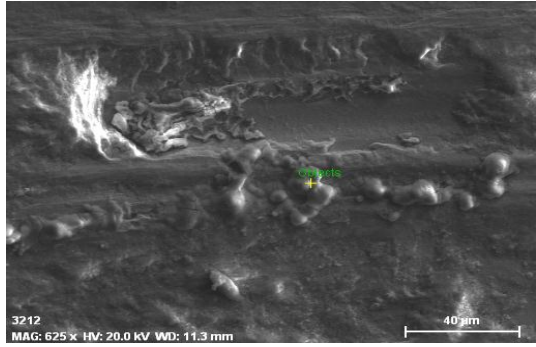


Şekil 5.5. Metal-metal aşınma deneyleri sonrası incelenen çeliklerin uygulanan yüke bağlı olarak aşınma hızının değişimi.

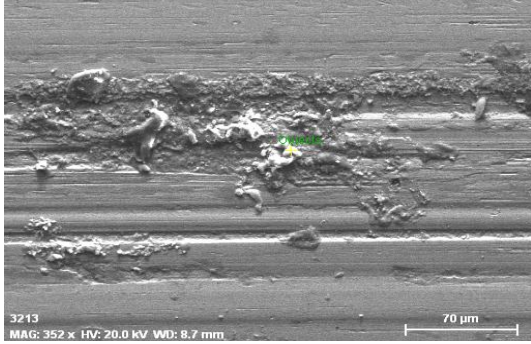
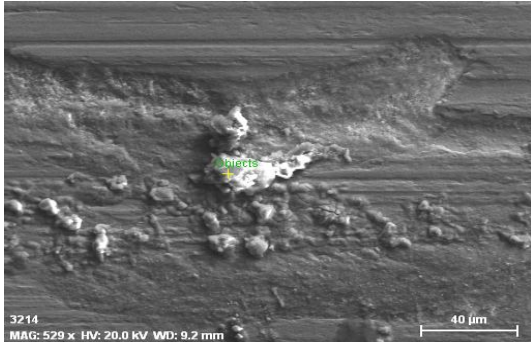


Şekil 5.6. Orjinal ve ısıl işlem uygulanmış çeliklerin metal-metal aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri.

Aşınmış yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.6 incelendiğinde aşınmanın, adhesiv aşınma karakteristiğinde olduğunu ifade eden yiv oluşumu ve parça sıvanması şeklinde olduğu görülmektedir. 10 N’da aşınmış yüzeyler gerek orijinal gerekse ısıtılmış işlem uygulanmış çeliklerde birbirine yakın görünüm sergilerken, 40 N’da ısıtılmış işlem uygulanmış çeliklerin daha fazla aşındığı net bir şekilde görülmektedir. Çünkü ısıtılmış işlem uygulanmış çeliklerin aşınmış yüzeyinde daha derin yivler ve parça kopmalarının olduğu Şekil 5.6’da görülmektedir.

Yük (N)	SEM	EDS														
10N		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Bileşim %</th> </tr> <tr> <th>Fe</th> <th>Kalan</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>O</td> <td>31.56</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>0.09</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.94</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>1.85</td> </tr> <tr> <td></td> <td>100.000</td> </tr> </tbody> </table>	Bileşim %		Fe	Kalan	O	31.56	V	0.09	Cr	0.94	C	1.85		100.000
		Bileşim %														
Fe	Kalan															
O	31.56															
V	0.09															
Cr	0.94															
C	1.85															
	100.000															
40N		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Bileşim %</th> </tr> <tr> <th>Fe</th> <th>Kalan</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>O</td> <td>24.60</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>0.12</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.53</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>1.57</td> </tr> <tr> <td></td> <td>100.000</td> </tr> </tbody> </table>	Bileşim %		Fe	Kalan	O	24.60	V	0.12	Cr	0.53	C	1.57		100.000
		Bileşim %														
Fe	Kalan															
O	24.60															
V	0.12															
Cr	0.53															
C	1.57															
	100.000															

Şekil 5.7. Orijinal çeliklerin metal-metal aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri.

Yük (N)	SEM	EDS														
10N		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Bileşim %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fe</td> <td>Kalan</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>29.09</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>0.12</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.92</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>2.34</td> </tr> <tr> <td></td> <td>100.000</td> </tr> </tbody> </table>	Bileşim %		Fe	Kalan	O	29.09	V	0.12	Cr	0.92	C	2.34		100.000
Bileşim %																
Fe	Kalan															
O	29.09															
V	0.12															
Cr	0.92															
C	2.34															
	100.000															
40N		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Bileşim %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fe</td> <td>Kalan</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>17.61</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>0.06</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.48</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>45.63</td> </tr> <tr> <td></td> <td>100.000</td> </tr> </tbody> </table>	Bileşim %		Fe	Kalan	O	17.61	V	0.06	Cr	0.48	C	45.63		100.000
Bileşim %																
Fe	Kalan															
O	17.61															
V	0.06															
Cr	0.48															
C	45.63															
	100.000															

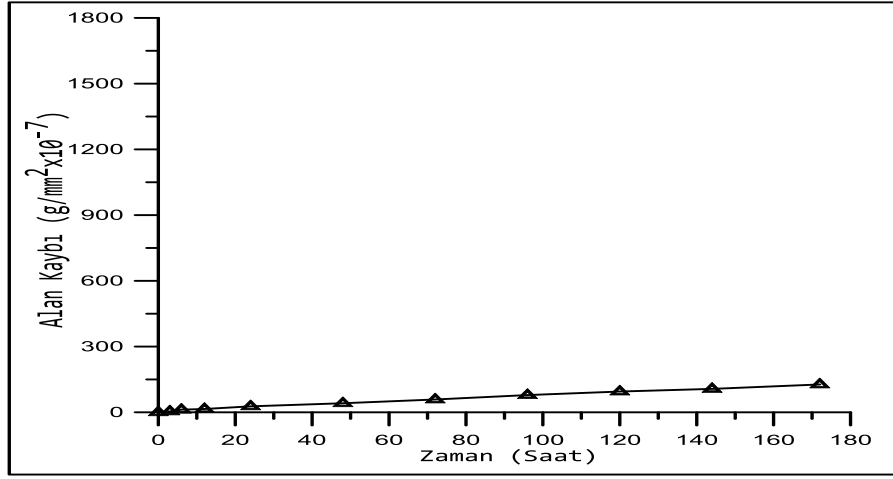
Şekil 5.8. Isıl işlem uygulanmış çeliklerin metal-metal aşınma deneyi sonrası aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri.

Aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 5.7, Şekil 5.8 incelendiğinde optik mikroskop görüntülerini desteklediği söylenebilir. Tüm çeliklerin EDS sonuçları yüzeyde oksijenin bulunduğunu göstermiştir. Bu da yüzeyde oksit tabakasının olabileceğini ifade etmektedir. 40 N yük altında aşındırılan çeliklerin aşınmış yüzeylerinden elde edilen oksijen miktarının karşılaştırılması sonucu, ısıl işlem uygulanmış çeliklerin aşınmış yüzeyinden elde edilen oksijen miktarının, orijinal çeliklere göre düşük olması ısıl işlem uygulanmış çeliklerin daha fazla aşındığının bir göstergesidir.

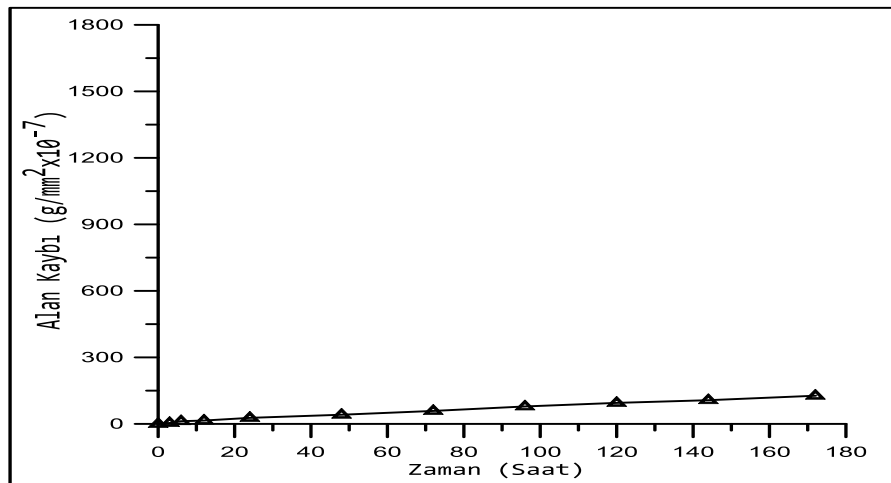
5.3. KOROZYON DENEYLERİ SONUÇLARI

% 10 NaCl ve % 10 HCl çözeltileri içerisinde 172 saat tutulan çeliklerin ağırlık kayıpları düzenli aralıklarla ölçülmüştür. Deney sonuçları Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da verilmiştir. % 10 HCl çözeltisi, % 10 NaCl çözeltisine nazaran daha saldırgandır. Her

iki çözelti içerisinde yapılan korozyon deney sonuçları orijinal ve ısıtılmış uygulanmış çelikler arasında çok az bir farkın olduğunu ortaya çıkarmıştır. NaCl çözeltisi içerisinde yapılan korozyon deney sonuçları ortamın çok saldırgan olmamasından dolayı birbirine yakın sonuçlar sergilemiştir. HCl çözeltisinde yapılan korozyon deneyleri orijinal çeliğin ısıtılmış uygulanmış çeliğe göre bir miktar daha fazla korozyona uğradığını göstermiştir. Cr içeren çeliklerde tane sınırlarına çökelen krom karbürler çeliğin korozyon direncini olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir [58-63]. İncelenen çeliklere ısıtılmış uygulanması ile krom karbürler yapıya homojen bir şekilde dağılmaktadır. Bu yüzden ısıtılmış uygulanmış çeliklerin korozyon dirençlerinin bir miktar yüksek çıktığı düşünülmektedir.

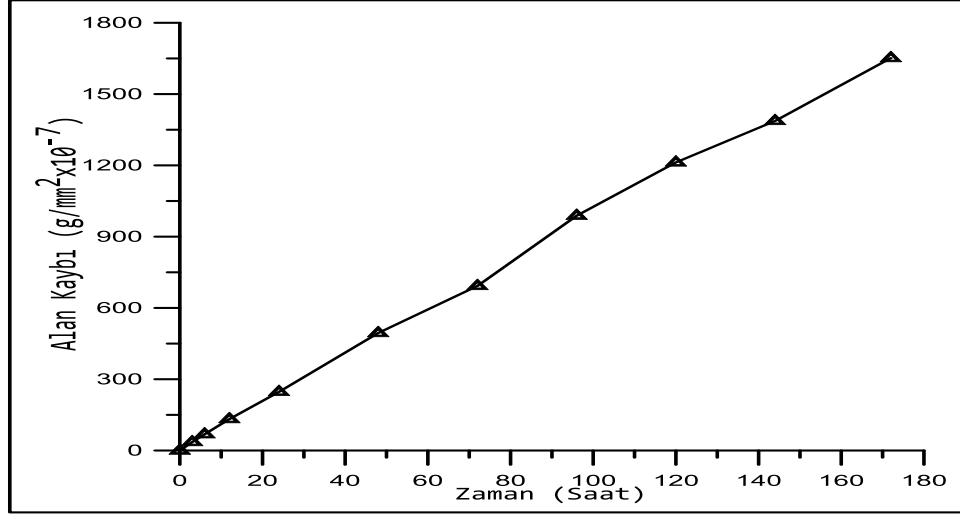


(a)

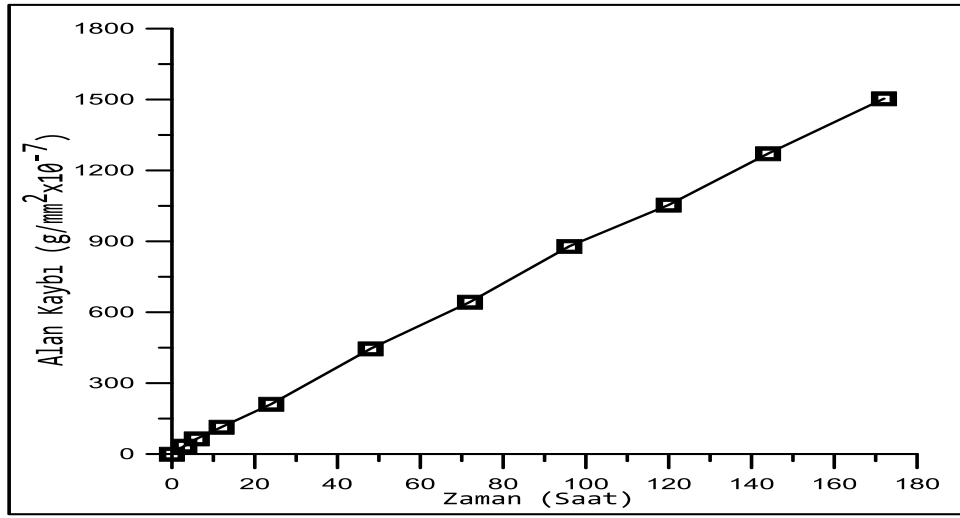


(b)

Şekil 5.9. % 10 NaCl çözeltisinde yapılan a) orijinal ve b) ısıtılmış uygulanmış çeliklerin korozyon grafiği.



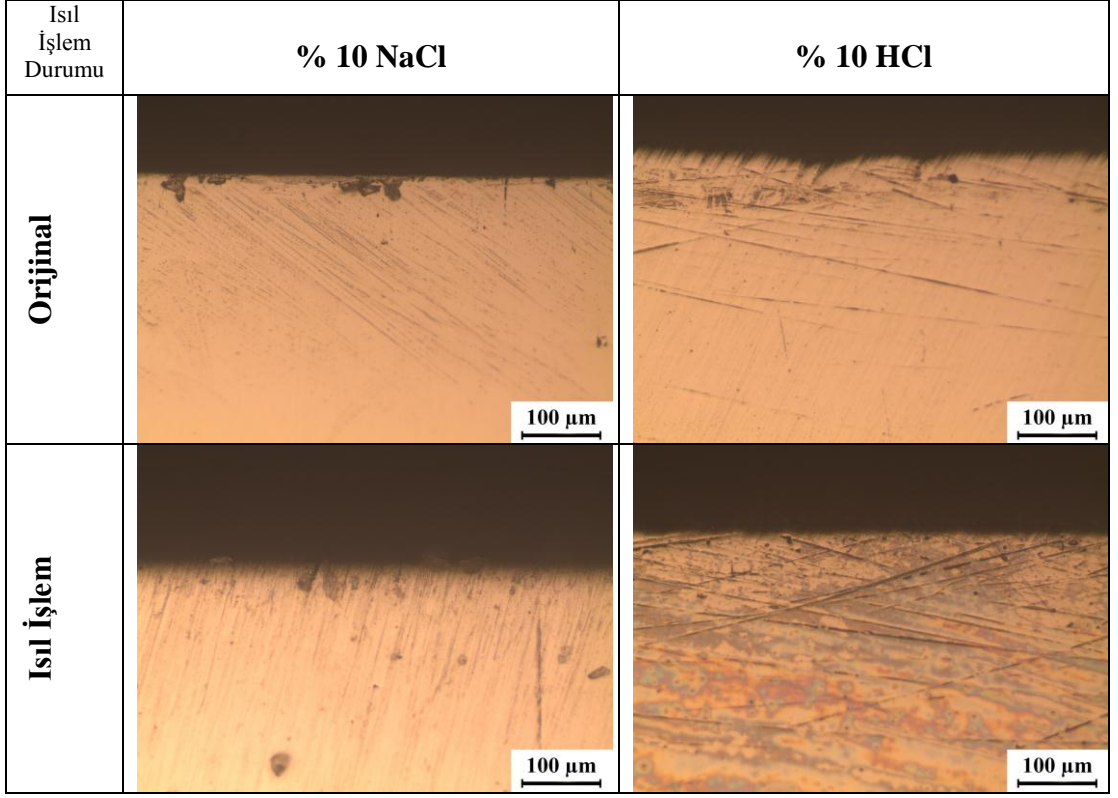
(a)



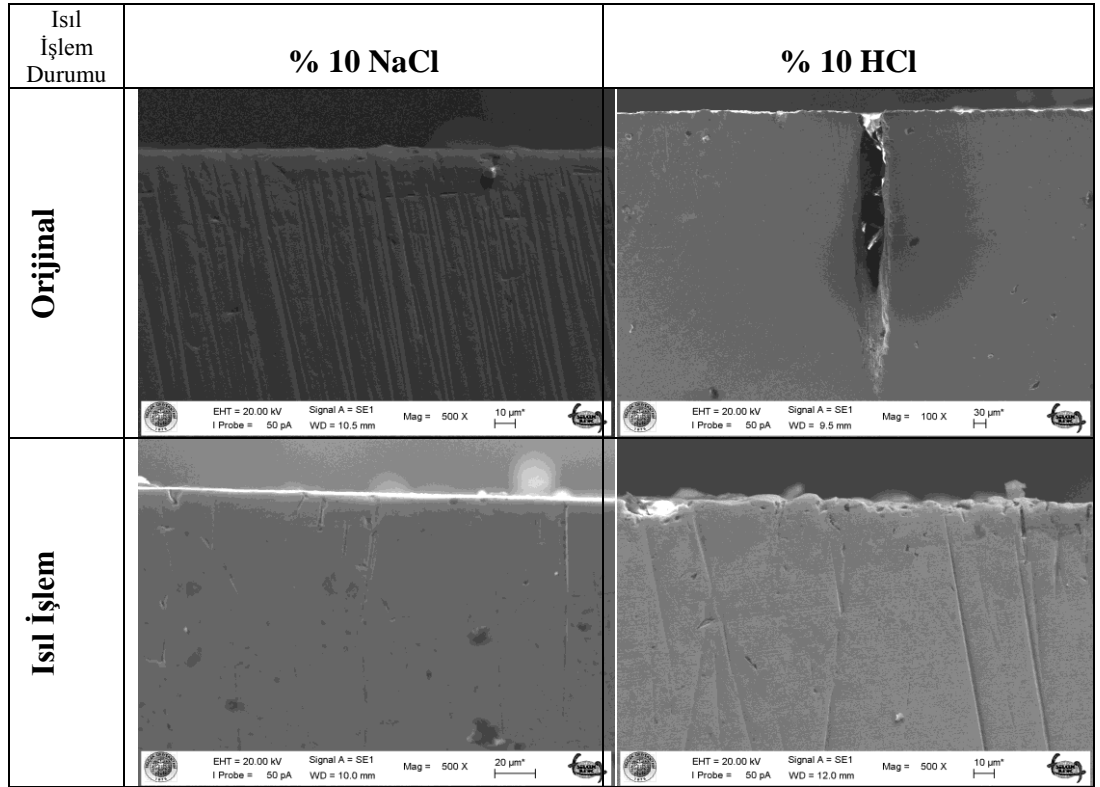
(b)

Şekil 5.10. % 10 HCl çözeltisinde yapılan a) orijinal ve b) ısıt işlem uygulanmış çeliklerin korozyon grafiği.

İncelenen çeliklerin % 10 NaCl ve % 10 HCl çözeltileri içersinde korozyon deneyleri sonrası korozyona uğramış yüzeylerin kesitlerinin optik mikroskop görünümüleri Şekil 5.11'de ve SEM görüntüleri Şekil 5.12'de gösterilmektedir. Korozyona uğramış yüzey kesitlerinin optik mikroskop görüntülerinde çok belirgin farklar görülmemekle birlikte SEM görüntülerinde orijinal çeliklerin yüzey kesitinde çatlak oluştuğu gözlenmiştir.



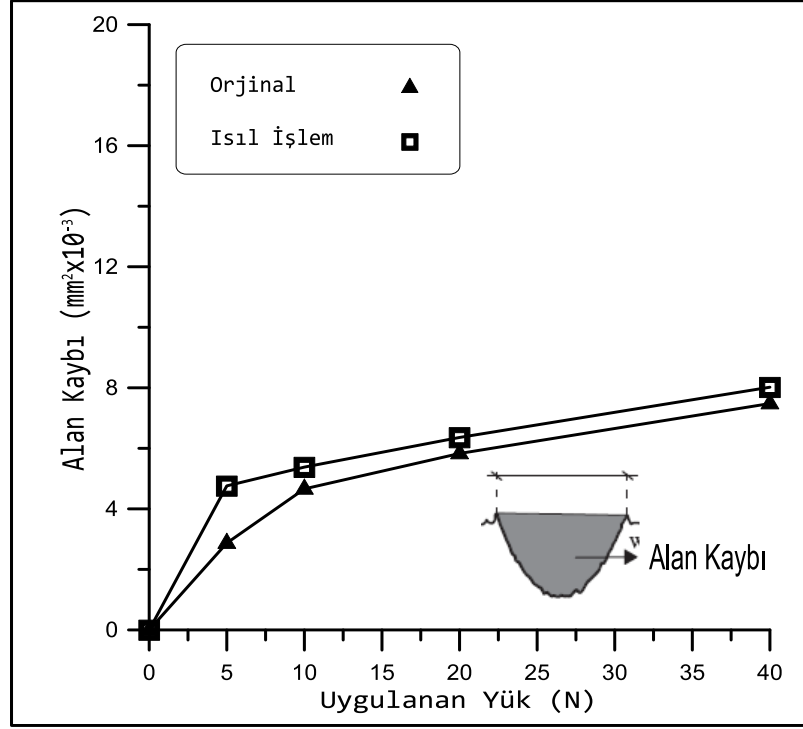
Şekil 5.11. Korozyon deneyleri sonrası yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri.



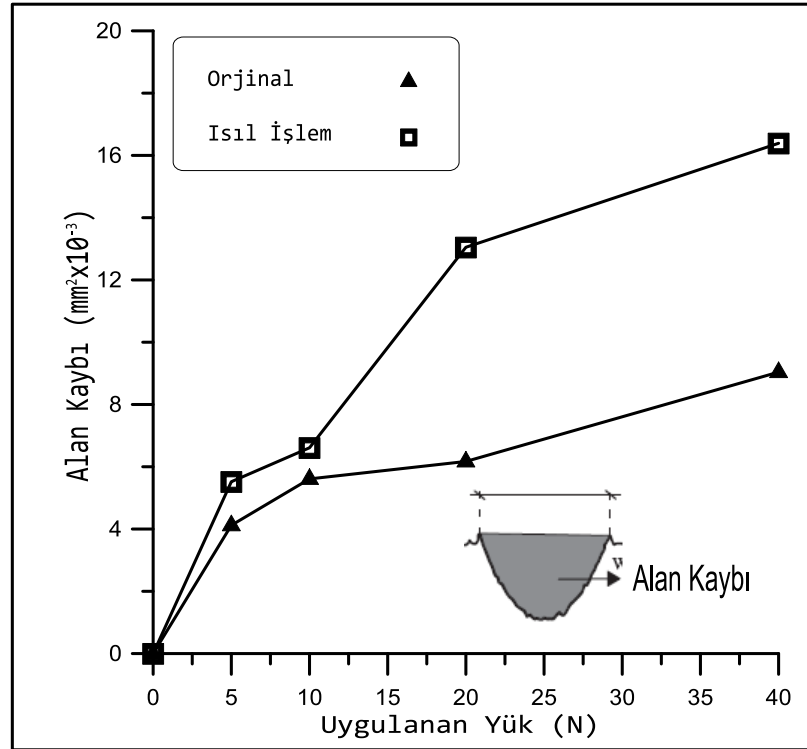
Şekil 5.12. Korozyon deneyleri sonrası yüzeylerin SEM mikroskop görüntüleri.

5.4. KOROZİF AŞINMA DENEYLERİ SONUÇLARI

İncelenen çeliklerin % 10 NaCl ve % 10 HCl çözeltileri içinde yapılan koroziif aşınma deneyleri sonrasında çeliklerin yüzeyinde oluşan aşınma izleri stereo mikroskopla incelenmiştir. Çeliğin yüzeyinde oluşan izin 2 boyutlu görünümünden hesaplanan aşınma iz alan kayıpları Şekil 5.13’de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi her iki çözeltilerde yapılan koroziif aşınma deneyleri sonrası yükün artması ile birlikte aşınma iz alanı değerleri de artmıştır. Her iki çözelti içinde yapılan koroziif aşınma deneylerinde orijinal alaşımlar daha düşük aşınma iz alanı değerleri sergilemiştir. İncelenen çözeltiler içinde HCl çözeltisi NaCl çözeltisine göre daha saldırgan bir ortam oluşturmuştur. % 10 NaCl çözeltisinde yapılan koroziif aşınma deneyleri sonrası orijinal ve ısıtılmış çelikler her yük seviyesinde birbirine yakın sonuçlar sergilemiştir. Ancak % 10 HCl çözeltisi içerisinde yapılan deneylerde ise özellikle 20 N ve üzerinde orijinal ve ısıtılmış çeliklerde belirgin bir farkın olduğu tespit edilmiştir. Isıtılmış çeliklerin sertliği orijinal çeliklerden daha yüksek olmasına rağmen aşınma iz alanı değerlerinin de daha yüksek olması bir miktar gevrekliğinin artmış olabileceğine dayandırılmaktadır. Elde ettiğimiz bu sonuç metal-metal aşınma deneylerinin yüksek yüklerde (20-40 N) elde ettiğimiz sonuçları ile uyumludur. Alaşımların içerisinde bulunan Cr yüzeyde krom oksit tabakası oluşturarak alaşımları korozyona karşı korumaktadır. Ancak koroziif aşınmada çelik bilye ileri-geri hareket ederken bu oksit tabakasını sürekli olarak kaldırmaktadır [59-63]. Böylece çeliklerin sertlik ve gevreklikleri aşınmayı doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden metal-metal aşınma deney sonuçları ile koroziif aşınma deney sonuçlarının birbirini doğrular şekilde ortaya çıktığı düşünülmektedir.

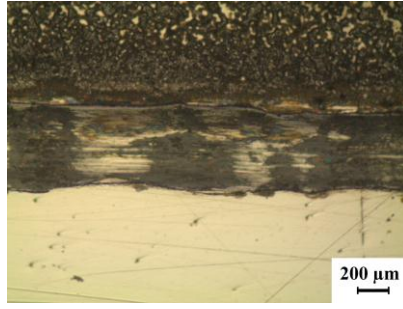
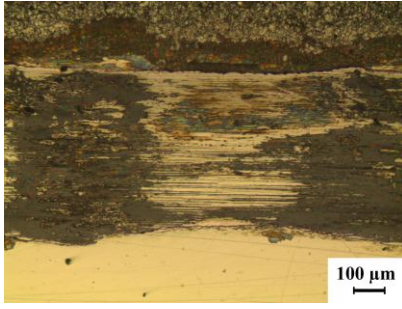
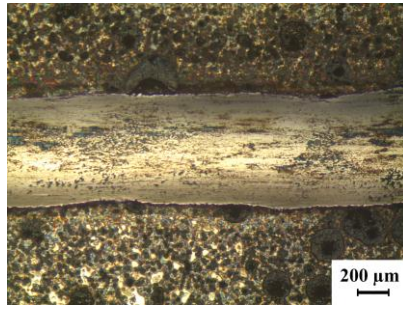
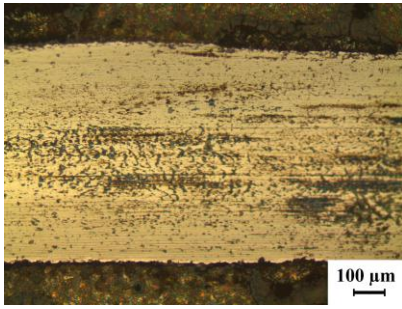
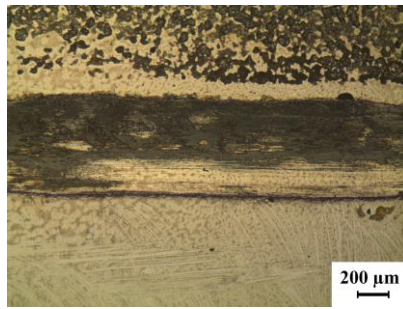
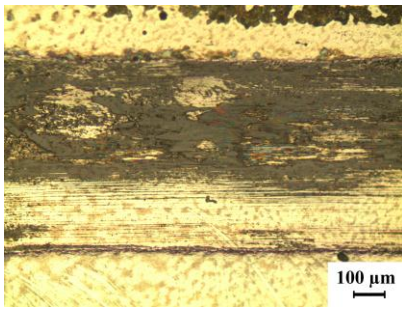
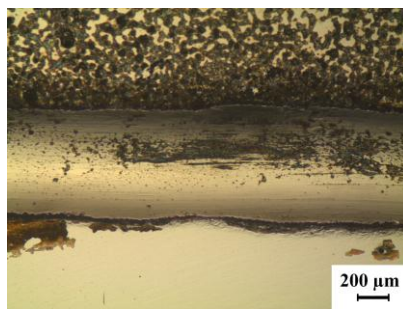
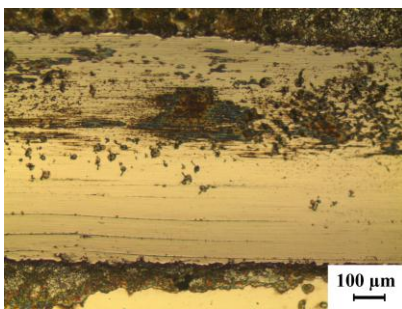


(a)


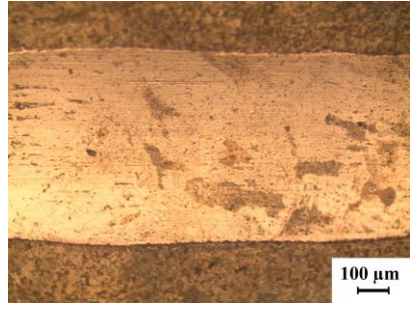
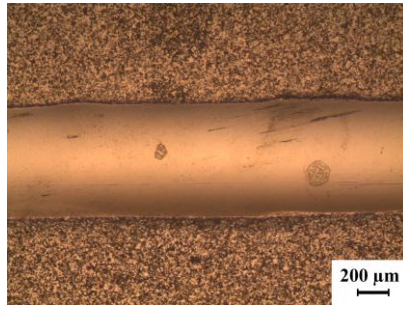
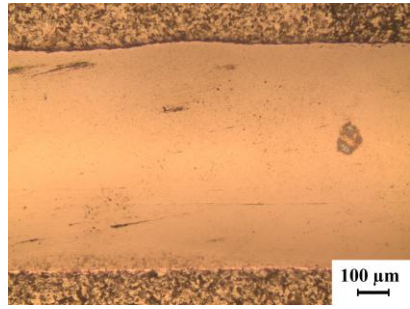
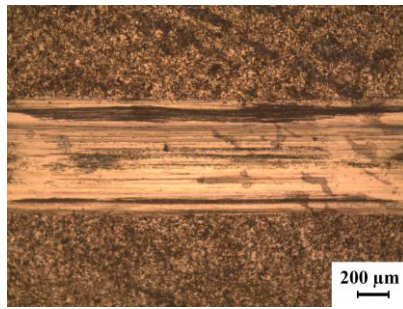
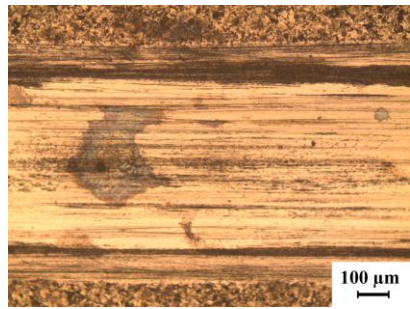
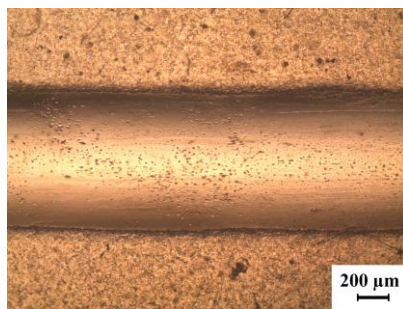
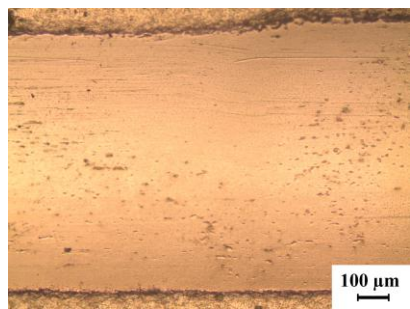


(b)

Şekil 5.13. 5, 10, 20 ve 40 N'da a) % 10 NaCl ve b) % 10 HCl'de hesaplanan aşınma iz alan kayıpları grafiği.

	Yük (N)	5 X	10 X
Orjinal	5N		
	40N		
Isıl İşlem	5N		
	40N		

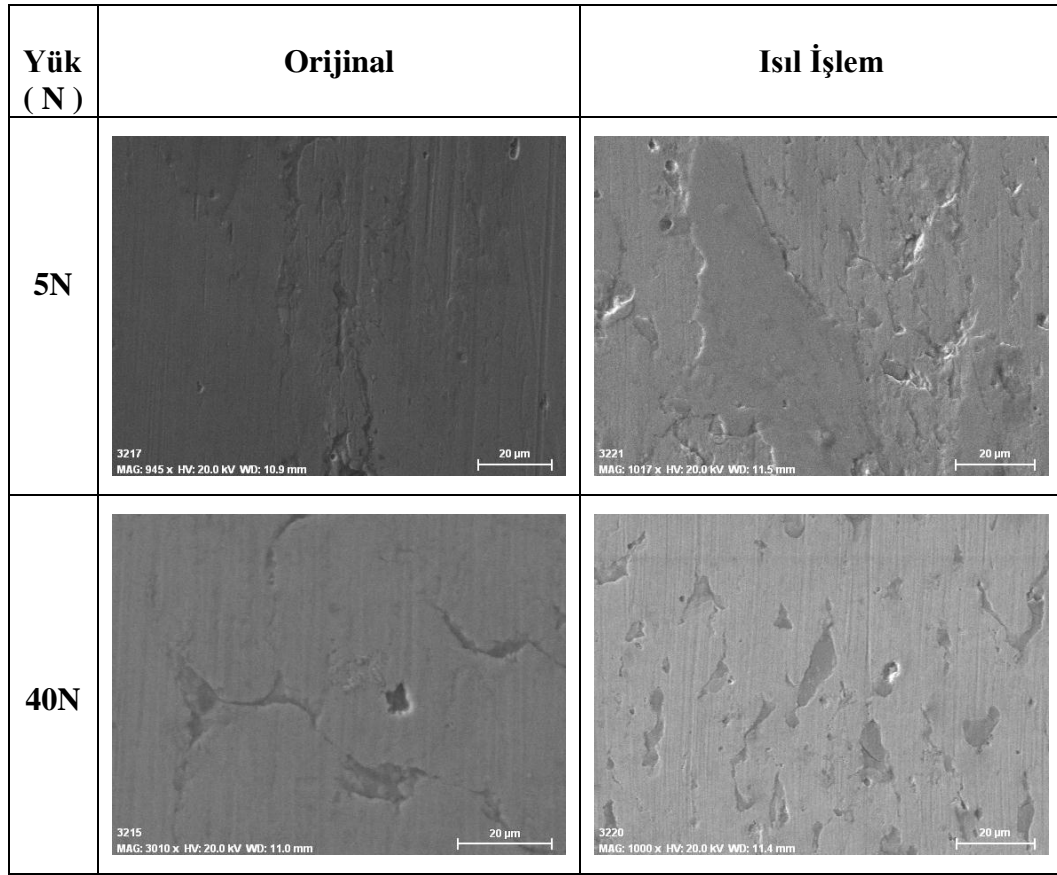
Şekil 5.14. % 10 NaCl'de yapılan aşınma deneyleri sırasında numune yüzeylerinde oluşan izlerin optik mikroskop görüntüleri.

	Yük (N)	5 X	10 X
Orjinal	5N		
	40N		
Isıl İşlem	5N		
	40N		

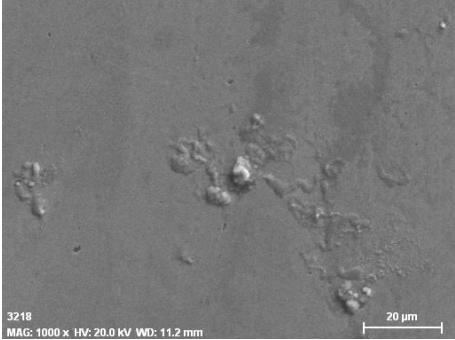
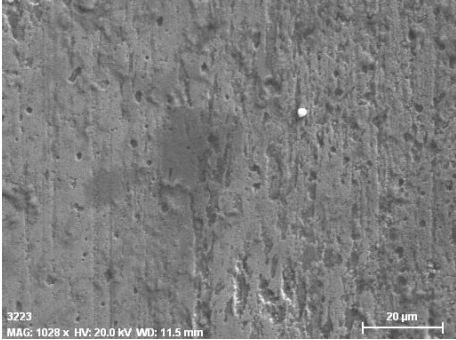

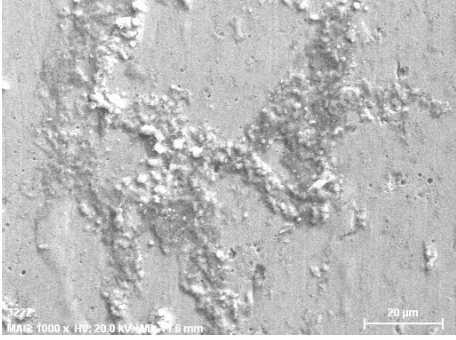
Şekil 5.15. % 10 HCl'de yapılan aşınma deneyleri sırasında numune yüzeylerinde oluşan izlerin optik mikroskop görüntüleri.

Farklı çözeltiler (NaCl ve HCl) içinde yapılan korozif aşınma deneyleri sırasında numune yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'de, SEM görüntüleri ise Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de verilmiştir.

Aşınmış yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde aşınma izlerinin içerisinde yivlere, sıvanmalara ve korozif ürünlere rastlamak mümkündür. Daha saldırgan olan HCl çözeltisi içerisinde yapılan korozif aşınma deneyleri sonrası aşınma izlerinin daha düzgün ve pürüzsüz olduğu görülmektedir. Düşük yüklerde aşınma izlerinde yer yer yivlere rastlanmaktadır. Ancak yüksek yüklerde yükün etkisiyle bu yivler sıvanarak çok fazla gözlenmemiştir. Bu yüzden daha düzgün yüzeylerin elde edildiği düşünülmektedir.



Şekil 5.16. % 10 NaCl'de yapılan aşınma deneyleri sırasında numune yüzeylerinde oluşan izlerin SEM görüntüleri.

Yük (N)	Orijinal	Isıl İşlem
5N	 <p>3218 MAG: 1000 x HV: 20.0 kV WD: 11.2 mm 20 µm</p>	 <p>3223 MAG: 1028 x HV: 20.0 kV WD: 11.5 mm 20 µm</p>
40N	 <p>3219 MAG: 1000 x HV: 20.0 kV WD: 11.4 mm 20 µm</p>	 <p>3224 MAG: 1000 x HV: 20.0 kV WD: 11.6 mm 20 µm</p>

Şekil 5.17. % 10 HCl’de yapılan aşınma deneyleri sırasında numune yüzeylerinde oluşan izlerin SEM görüntüleri.

BÖLÜM 6

GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada 2,25Cr-1Mo içeren çeliklerin orijinal halinde ve ısıl işlem uygulanmış (940 °C'de 1 saat tutup su verdikten sonra 650 °C'de 8 saat bekletme) durumda mikroyapı karakterizasyonu yapılmış ve aşınma, korozif aşınma, korozyon özellikleri incelenmiştir. Deneylerden elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- i. Çeliklere ısıl işlem uygulandıktan sonra tanelerin küçüldüğü, tane sınırlarındaki ve tane içlerindeki çökeltilerin yapıya homojen bir şekilde dağıldıkları gözlenmiştir. Sertlik sonuçlarına göre, orijinal numuneye ısıl işlem uygulanmasıyla, çeliğin sertliği yaklaşık % 30 artış sergilemiştir.
- ii. Orijinal ve ısıl işlem uygulanmış çeliklerin ağırlık kaybı değişimi, uygulanan yüklerle farklılık göstermiştir. Toplam kayma mesafesi sonunda 20 N yük seviyesine kadar incelenen tüm çeliklerin aşınma hızı değerleri birbirine yakın seyrederken, 40 N yük seviyesinde orijinal ve ısıl işlem uygulanmış çelikler arasında belirgin bir fark ortaya çıkmıştır. 40 N yük seviyesinde ısıl işlem uygulanmış çelikler daha yüksek aşınma hızı sergilemiştir.
- iii. Korozyon deney sonuçlarına göre, her iki ortamda orijinal ve ısıl işlem uygulanmış çelikler arasında çok az bir ağırlık kaybı farkının olduğu ortaya çıkmıştır. NaCl çözeltisi içerisinde yapılan korozyon deney sonuçları ortamın çok saldırgan olmamasından dolayı birbirine yakın sonuçlar sergilemiştir. HCl çözeltisinde yapılan korozyon deneyleri orijinal çeliğin ısıl işlem uygulanmış çeliğe göre bir miktar daha fazla korozyona uğradığını göstermiştir.
- iv. % 10 NaCl ve % 10 HCl çözeltileri içinde yapılan korozif aşınma deneylerinde, HCl çözeltisi NaCl çözeltisine nazaran daha saldırgan bir korozif ortam meydana getirmiş ve daha fazla aşınmaya sebep olmuştur. Isıl işlem

uygulanmış çelikler bu çözeltiler içerisinde orijinal çeliklere göre daha düşük aşınma direnci sergilemiştir.

KAYNAKLAR

1. Akgül, İ., “Petro-kimya endüstrisinde kullanılan CrMo çeliğinin korozyon davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 1-24 (2011).
2. Gündoğdu, S., “CrMo çeliklerinin kaynaklı bağlantılarının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 1-15 (2012).
3. Metals Handbook, “Properties and Selection of Metals, 8th Edition”, **American Society for Metals**, United States, 1: 617–652 (1961).
4. Toda, Y., Seki, K., Kimura, K. and Abe, F., “Effects of W and Co on long-term creep strength of precipitation strengthened 15Cr ferritic heat resistant steels”, **ISIJ International**, 43 (1): 112–118 (2003).
5. Azevedo, C. R. F., Beneduce Neto, F., Brandi, S. D. and Tschiptschin A.P., “Cracking of 2.25Cr–1.0Mo steel tube/stationary tube-sheet weldment of a heat-exchanger”, **Engineering Failure Analysis**, 15 (6): 695–710 (2008).
6. ATB Riva Calzoni SpA, **Presentation Profile Pressure Vessel**, Rev.3, 1-9 (2006).
7. Lima, C. R., Pinto, A. L. Furtado, H. C. , de Almeida, L. H., de Souza, M. F. P., I. and May, Le., “Quantitative observations of precipitation in 2.25Cr–1Mo steel exposed to different creep conditions in a power station”, **Engineering Failure Analysis**, 16 (5): 1493–1500 (2009).
8. Internet: International Molybdenum Association, http://www.imoa.info/moly_uses/moly_grade_alloy_steels_irons/heat_treatable_engineering_steel.html (2010).
9. Dobrzanski, J., “Internal damage processes in low alloy chromium–molybdenum steels during high-temperature creep service”, **Journal of Materials Processing Technology**, 157–158: 297–303 (2004).
10. Cheruvu, N. S., “Degradation of mechanical properties of Cr-Mo-V and 2.25Cr-1Mo steel components after long-term service at elevated temperatures”, **Metallurgical Transactions A**, 20 (1): 563-645 (1989).
11. Ghiya , S. P., Bhatt, D. V. and Rao, R. V., “Stress relief cracking in advanced steel “**Proceedings of the World Congress on Engineering** , London, 1-3 (2009).

12. Thomson, R. C., “Characterization of carbides in steels using atom probe field-ion microscopy”, *Materials Characterization*, 44 (1-2): 219–233 (2000).
13. Harman, F. M., “Çeliğin ısıtıl işleminin teorik ve pratik esasları”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 155-170 (2003).
14. Nawrocki, J. G., Dupont J. N., and Robino, C. V., A. R., Marder, “Stress relief cracking in advanced steel material- overview”, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, 1-3 (2009).
15. İnternet: “Alaşım Elementlerinin Çeliğe Etkisi” <http://www.scribd.com/doc/45271649/Alasim-Elementlerinin-Çelige-Etkisi> (2010).
16. Gözütok, E., “Paslanmaz çeliklerin TIG kaynağında argon-hidrojen gaz karışımının birleştirmelerin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 15-23 (2009).
17. Bhadeshia, H. K. D. H. and Liu, W., “Creep-resistant steel, case study”, *Graduate Institute of Ferrous Technology*, (8): 1-19 (1999).
18. Varin, R. A. and Haftek, J., “Structural changes in a ferritic heat-resistant steel after long-term service”, *Material Science and Engineering: A*, 62 (1): 129–136 (1984).
19. Saito, K., Sakuma, A. and Fukuda, M., “Recent life assessment technology for existing steam turbines”, *JSME Int J Ser B*, 49 (2):192-197 (2006).
20. Fu, R. D., Wang, T. S., Zhou, W. H. , Zhang, W. H. and Zhang, F. C., “Characterization of precipitates in a 2.25Cr–1Mo–0.25V steel for large-scale cast-forged products”, *Materials Characterization*, 58 (10): 968–973 (2007).
21. Kfim, C. S., Park, I. K. And YoungChang, K., “Nonlinear ultrasonic characterization of thermal degradation in ferritic 2.25Cr–1Mo steel”, *NDT&E International*, 42 (3): 204–209 (2009).
22. Miller, MK., Russell, K. F. and Keilova, E., “Atom probe tomography of 15Kh2MFA Cr–Mo–V steel surveillance specimens”, *Micron*, 32 (8): 749–755 (2001).
23. Dobrzański, J., Zieliński, A. and Krztoń, H., “Mechanical properties and structure of the Cr-Mo-V low-alloyed steel after long-term service in creep condition”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 23 (1): 39-42 (2007).
24. Smith, D. J., Walker, N. S. and Kimmins, S. T., “Type IV creep cavity accumulation and failure in steel welds”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 80 (9): 617–627 (2003).

25. Qu, Z. and Kuo, K. H., “Embrittlement of 2^{1/4} CrMoV steel bolts after long exposure at 540 °C”, *Metallurgical and Material Transactions A*, 12 (7): 1333 (1981).
26. Baltušnikas., A., Levinskas, R. and Lukošiuė, I., “Kinetics of carbide formation during ageing of pearlitic 12CrMov steel”, *Lithuanian Energy Institute*, 54-109 (2007).
27. Bała, P., Pacyna, J. and Krawczyk, J., “The kinetics of phase transformations during tempering of Cr-Mo-V medium carbon steel”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 20 (1-2): 79-82 (2007).
28. Zieliński, A., Dobrzański, J. and Krztoń, H., “Structural changes in low alloy cast steel Cr-Mo-V after long time creep service”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 25 (1): 341-364 (2007).
29. Liaw, P. K., Saxena, A., Swaminathan, V. P. and Shih, T. T., “Effects of load ratio and temperature on the near-threshold fatigue crack propagation behavior in a CrMoV steel”, *Metallurgical and Metal Transactions A*, 14 (7): 1631-1639 (1983).
30. Kobayashi, H., Todoroki, A., Oomura, T., Sano, T. and Takehana, T., “Ultra-high-cycle fatigue properties and fracture mechanism of modified 2.25Cr-1Mo steel at elevated temperatures”, *International Journal of Fatigue*, 28 (11): 1633–1639 (2006).
31. Shastry, C. G., Parameswaran, P., Mathew, M. D., Bhanu S. R., K. and Mannan, S. L., “The effect of strain rate and temperature on the elevated temperature tensile flow behavior of service-exposed 2.25Cr-1Mo steel”, *Materials Science and Engineering: A*, 465 (1-2): 109–115 (2007).
32. Fu, R. D., Wang, T. S., Zhou, W. H. , Zhang, W. H. and Zhang, F. C., “Effect of reheating processes on grain boundary inheritance for 2.25Cr-1Mo-0.25V steel”, *Materials Science and Engineering: A*, 438–440 (25): 1135–1138 (2006).
33. Biss, V. A. and Wada, T. “Microstructural changes in 1Cr-0.5Mo, steel after 20 years of service”, *Metallurgical Transactions A*, 16 (1): 109-114 (1985).
34. Esen, E. “Çelik Yüzeylerinin Kaplanması”, *Erdemir*, K.Ereğli, 9-11, (2006).
35. Çelikyürek, İ., “Demir alüminantların borlanması ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 107-108 (2006).
36. Soydaş, S., “Universal aşınma test cihazı tasarımı ve imalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 21-22 (2006).

37. Jareel, D. J. and Bejbl, F., "Understanding wear and friction in medical-grade stainless steels", *Medical Device & Diagnostic Industry Magazine*, 2-3 (1999).
38. Bhushan, B., "Introduction to tribology", *Wear*, 12 (2): 332-333 (2002).
39. Simmons, J. W., Covino, B. S., Hawh, J. A. and Dunning, J. S., "Effect of nitride(Cr₂N) precipitation on the mechanical, corrosion and wear properties of austenitic stainless steel", *ISIJ Institute*, 36 (24): 846-854 (1996).
40. Ünlü, B. S., Köksal, N. S. ve Atik, E., "Bakır esaslı bronz ve pirinç yatakların tribolojik özelliklerinin karşılaştırılması", *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 5 (2): 103-108 (2003).
41. Akbulut, H., "Malzemelerin sürtünme ve aşınma ders notları", *Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği*, 36-52 (2006).
42. Sarıkaya, Ö., "Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri", *Korozyon Derneği Yayını*, Ankara, 1-60 (2007).
43. Kaşkan, A., "Grafit katkılı nylon6(poliamid6)nın aşınma davranışlarının incelenmesi", *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 21-22 (2005).
44. Yıldızlı, K., Odabaş, D. ve Nair, F., "Borlanmış AISI 1020 çeliğinin eroziv aşınma davranışlarının incelenmesi", *BAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (3): 131-139 (2003).
45. İpek, R. ve Karamış, M. B., "Aşınma test yöntemleri ve gelişmeler", *Mühendis ve Makine Dergisi*, 469 (21): 24-29 (1999).
46. Eş, M., "Dişli çark malzemelerinin aşınma karakteristiklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 15-16 (2004).
47. Öz Saraç, U., "Endüstriyel yatak alaşımlarının aşınma davranışlarının karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 23-30 (1999).
48. Hutching, I. M., "Tribology: friction and wear of engineering materials", *Materials Science and Metallurgy University of Cambridge*, Cambridge, 54 (12): 76-82 (1992).
49. Klaasen, H. ve Kübarsepp, J., "Abrasive wear performance of carbide composites", *Wear*, 261 (5): 520-526 (2006).
50. Taşgın, Y. ve Kaplan, M., "Dubleks tekniğiyle üretilen FeCrC katkılı malzemenin abrasiv aşınma davranışlarının araştırılması", *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Elazığ, 16 (1): 217-224 (2007).

51. Sarı, Y. N. ve Yılmaz, M., “Ni esaslı kaplamaların abrazif-erozif aşınma direncinde ısıl püskürtme yönteminin ve WC ilavesinin etkisi” *Mühendis ve Makine Dergisi*, 541 (36): 16 (2006).
52. Odabaş, D. ve Karamış, M. B., “Kuru sürtünme şartlarında pim-ring kayma sistemi için plastik deformasyon ısının teorik ve deneysel analizi”, *Tübitak*, Ankara, 65-76 (1998).
53. Marui, E. and Endo, H., “Effect of reciprocating and unidirectional sliding motion on the friction and wear of copper on steel”, *Wear*, 249 (7): 582-591; (2001).
54. Soydan, Y. ve Ulakan, L., “*Triboloji, Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi Teknolojik Yayınlar Serisi*”, 5 (14): 35-40 (2003).
55. Blau, P. J. and Budinski, K. G., “Development and use of ASTM standards for wear testing”, *Wear*, 227 (2): 1159-1170 (1999).
56. Bojan, A., Marinkovic, Roberto, R., de Avillez, Simone Kesler Borros, Fernando, C., Rizzo Assuncao., “Thermodynamic evaluation of carbide precipitates in 2.25Cr-1Mo steel determination of service degradation”, *Materials Research*, 5 (4): 491-495 (2002).
57. Sun, Y., “Yüksek krom ve nikelli çeliklerin aşınma davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 37-95 (2004).
58. Liu, Y. C., Schissler, J. M. and Mathia, T. G., “The influence of surface oxidation on the wear resistance of cast iron”, *Tribology Int.*, 28: 433-438 (1995).
59. Metwally, W. A., and Song, M. K., “Evolution of abrasive wear and erosion-corrosion resistance of high chromium cast steel”, *Steel Research*, 65: 455-461 (1994).
60. Yılmaz, O., Aksoy, M. and Yıldırım, S., “Wear behavior of Fe/M7C3 metal matrix composites with various microstructures during dry sliding”, *Materials Science and Technology*, 19: 661-668 (2003).
61. Shizuo, L., Xiaoxia, J., Hongyun, B. and Shu, L., “Effect of environmental embrittlement on wear resistance of alloys in corrosive wear”, *Wear*, 1025-1030 (2003).
62. Lu, X. C., Shizhuo, L. and Xiaoxia, J., “Effect of sigma phase in stainless steels on corrosive wear behaviour in sulfuric acid”, *Wear*, 251: 1234-1238 (2001).
63. Jiang, X. X., Li, S. Z., Tao, D. D. and Yang J. X., “Accelerative effect of wear on corrosion of high alloy stainless steel”, *Corrosion Science*, 836-842 (1993).

ÖZGEÇMİŞ

Samet AYVAZ 1988 yılında Bulgaristan'ın Kırcalı şehrinde doğdu; ilk ve orta öğrenimini Bursa'da tamamladı. Bursa Erkek Lisesi'nden mezun oldu. 2007 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Metal Öğretmenliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2011 yılında iyi derece ile mezun oldu. Bu dört yıllık eğitimi boyunca çeşitli seminerlere ve kurslara katılarak kendini geliştirdi. 2011 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını tamamladı.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Kazım Karabekir Mh. Köroğlu Sk. No: 90
Yıldırım / BURSA

Tel: (505) 611 1536 – (534) 211 5560

E-posta: sametaryvaz@hotmail.com.tr