

**YÜKSEK KARBON VE KROMLU ÇELİĞİN
MEKANİK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

**2011
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

Görkem YARGÜL

**YÜKSEK KARBON VE KROMLU ÇELİĞİN MEKANİK VE YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Görkem YARGÜL

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Haziran 2011

Görkem YARGÜL tarafından hazırlanan “YÜKSEK KARBON VE KROMLU ÇELİĞİN MEKANİK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Hayrettin AHLATÇI

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. 24/06/2011

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Yakup SEKMEN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Hayrettin AHLATÇI (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)

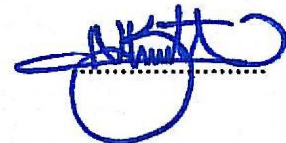


...../...../2011

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

Doç. 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.”

Görkem YARGÜL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK KARBON VE KROMLU ÇELİĞİN MEKANİK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Görkem YARGÜL

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Hayrettin AHLATÇI

Haziran 2011, 147 sayfa

Bu çalışmada, döküm halinde temin edilen DIN 1.4777 (G-X130CrSi29) kalite çelik homojenizasyon (1150 °C'de 3,5 saat) ve borlama (900°C sıcaklıkta, 8 saat) ısıtma işlemlerine tabi tutulmuştur.

Hem homojenleştirilmiş hem de borlama ısıtma işlemi uygulanmış çeliklerin mikroyapısında oluşan intermetaliklerin görünümü, elementel analizi ve kimyasal formülünü belirlemek için sırasıyla optik ışık mikroskobu, EDS donanımlı SEM cihazı ve XRD cihazı kullanılmıştır. Homojenizasyon ve borlama ısıtma işlemi gören numuneler 2000 g yük altında shmadzu marka sertlik cihazında HV cinsinden sertlik testlerine tabi tutulmuştur. Korozyon deneyleri, konsantrasyonu %10 olan NaCl ve H₂SO₄ çözeltileri içerisinde numuneler daldırılarak yapılmıştır. Metal-metal aşınma deneyleri, 30 mm yüksekliğinde ve 4 mm çapındaki deney numuneleri kullanılarak, normal atmosferik koşullarda, AISI 4140 (DIN 1.7225) (198 HB) kalite ısıtma çeliği ve DIN 1.2379 (62 HRC) kalite soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş diskler

üzerinde yapılmıştır. Aşınma deney numunelerine 10-60 N (1.75-3.5-7-10.5 N/mm²) arasında dört farklı yük uygulanmıştır. Deneyler 0.2 m/s kayma hızı, 2000m ve 4000m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir.

Borlama ısıtıl işlemi görmüş numunenin yüzeyinden yapılan XRD çalışmasında matrisin ferrit ve mikroyapıda oluşan intermetalik Cr₂₃C₆ karbürü olduğu bulunmuştur. Bu malzemeye uygulanan borlama ısıtıl işlemi sonrası numune yüzeyinde CrB ve Fe₂B fazı içeren tabakanın da meydana geldiği bulunmuştur.

Yapılan sertlik sonucunda homojenizasyon ısıtıl işlemi görmüş çelik numunelerin sertliği 275 HV, borlama ısıtıl işlemi görmüş çelik numunelerin sertliği ise, 2160 HV olarak tespit edilmiştir.

Korozyon deney çalışmaları sonucunda, borlama ısıtıl işlemi yapılmış çelik numunelerin, homojenizasyon ısıtıl işlemi görmüş çelik numunelere göre, H₂SO₄ çözeltisinde korozyona dirençli fakat NaCl çözeltisinde korozyona direnci düşük olduğu tespit edilmiştir.

Aşınma deney sonucunda, borlama ısıtıl işlemi yapılmış çelik numunelerin, homojenizasyon ısıtıl işlemi görmüş çelik numunelere göre daha gevrek ve aşınma direnci düşük olduğu tespit edilmiş olup, borlanan çelik numune de oluşan gevrek ve kırılğan Fe₂B tabakasının neden olduğu görülmüştür. Son olarak malzeme içerisindeki karbon oranının artması ile tabaka kalınlığının azaldığı görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Yüksek karbonlu ve kromlu çelik, borlama ısıtıl işlemi, homojenizasyon ısıtıl işlemi, ısıtıl işlem, korozyon ve aşınma.

Bilim Kodu : 915.1.196

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND SURFACE PROPERTIES OF THE STEEL WITH HIGH CARBON AND CHROMIUM

Görkem YARGÜL

Karabük University

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Hayrettin AHLATÇI

June 2011, 147 pages

In this study, in qualifications of DIN 1.4777 (G-X130CrSi29) type steel were treated under process of homogenization (at 1150 °C and for 3,5 hours) and boronizing (900°C temperature of 8 hours)

Optical light microscope and SEM equipped EDS device and XRD device were used in determinations of elemental analyzing and chemical formulazing of intermetalics in the homogenized and boronized steel microstures.

The microhardness of the homogenized and boronized stels tested by schimadzu Hardness device. Under weight of 2000 g

Corrosions experiments were applied in concentration of NaCl and H₂SO₄ solutions. Metal wear tests were applied under atmospheric conditions with samples 30 mm in

height and 4 mm in diameter on disc of AISI 4140 (198 HB) quality steel and DIN 1.2379 (62 HRC) cold work tool steel.

Wear test were carried out under four different loads between 10-60 N (1.75-3.5-7-10.5 N/mm²). Experiments were applied with 0,2 m/s sliding speed and at 4000 m sliding distance .

It is found by XRD experiments on surface of the boronized steel that the microstructure we consisted of ostenitic matrix structure and Cr₂₃C₆ carbide intermetalics..

The layer containing CrB and Fe₂B phase mixtures was occurred on the surface of the steels after boronizing heat treatment.

Homogenization heat treated steel hardness was 275 HV in hardness and while boronized heat treaded steel hardness was 2160 HV.

Corrosion resistance of the boronized steels was lower according to that of the homogenization heat treated steels in NaCl solution and opposite results were observed in H₂SO₄ solutions.

Wear resistance of the boroning heat treated steels were found to be lower in according to that of the homogenizing heat treated steels for brittle and fragile of the Fe₂B layer. In addition, more carbon content in the boronized layer was found.

With more carbon rate in samples the layer was found to be less thick.

Key Words : Steel with high carbon and chromium, boronizing heat treatment, homogenizations heat treatment, corrosion and wear.

Science Code : 915.1.196

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Hayrettin AHLATÇI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi öğretim üyesi, çok kıymetli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Yavuz SUN ve Araştırma Görevlisi Engin ÇEVİK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarım için temin ettiğim yüksek kromlu çelik için As Çelik Döküm İşleme San. Tic. Şti.'ne ve Ekabor2 için Vezneli A.Ş.'ne teşekkürü borç bilirim.

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

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| KABUL | ii |
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | vi |
| TEŞEKKÜR | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | xv |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xix |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | xvi |
| | |
| BÖLÜM 1 | 1 |
| GİRİŞ | 1 |
| | |
| BÖLÜM 2 | 4 |
| PASLANMAZ ÇELİKLER | 4 |
| 2.1. PASLANMAZ ÇELİK TÜRLERİ | 5 |
| 2.1.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler | 8 |
| 2.1.2. Martenzitik Paslanmaz Çelikler | 9 |
| 2.1.3. Östenitik-Ferritik (Çift Fazlı) Paslanmaz Çelikler | 11 |
| 2.1.4. Çökeltme Sertleşmesi Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler | 12 |
| 2.1.5. Östenitik Paslanmaz Çelikler | 12 |
| | |
| BÖLÜM 3 | 13 |
| BOR MADENİ VE BORLAMA | 13 |
| 3.1. BOR ELEMENTİ | 13 |
| 3.2. BOR ÜRÜNLERİ VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ | 14 |
| 3.3. DÜNYA BOR REZERVLERİ | 17 |
| 3.4. DÜNYA'DA BOR ÜRETİMLERİ | 18 |
| 3.5. BOR'UN METALURJİ ALANLARINDA KULLANILMASI | 21 |
| 3.5.1. Çelik | 21 |

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| 3.5.2. Borlama..... | 22 |
| 3.5.3. Demir Dökümler..... | 23 |
| 3.5.4. Süper Alaşım lar..... | 23 |
| 3.5.5. Alüminyum Alaşım ları..... | 23 |
| 3.5.6. Diğer Metal Alaşım lar..... | 23 |
| 3.5.7. Amorf Metal Alaşım lar..... | 24 |
| 3.5.8. Flakslama Uygulamaları..... | 24 |
| 3.5.9. Elektro Kaplama..... | 25 |
| 3.5.10. Nükleer Uygulamalar..... | 25 |
| 3.5.11. Bor Fiberleri..... | 25 |
| 3.5.12. Uzay ve Havacılık..... | 25 |
| 3.6. BORLAMA..... | 26 |
| 3.6.1. Borlama Yöntemleri..... | 27 |
| 3.6.1.1. Katı Borlama..... | 27 |
| 3.6.1.2. Sıvı Borlama..... | 28 |
| 3.6.1.3. Gaz Borlama..... | 30 |
| 3.6.1.4. Plazma Borlama..... | 31 |
| 3.6.1.5. Macunlama (Pasta) İle Borlama..... | 32 |
| 3.6.2. Borlamada Meydana Gelen Borür Tabakası ve Geçiş Bölgesi Oluşum Mekanizması..... | 33 |
| 3.6.2.1. Borür Tabakasının Oluşumu, Büyümesi ve Geçiş Bölgesi..... | 33 |
| 3.6.2.2. Borür Tabakası Çeşitleri ve Borür Tabakası Kalınlığı..... | 37 |
| 3.6.2.3. Borür Tabakasının Aşınma Dayanımı..... | 40 |
| 3.6.2.4. Borür Tabakasının Korozyon Dayanımı..... | 41 |
| BÖLÜM 4 | 42 |
| KOROZYON | 42 |
| 4.1. KOROZYONUN TANIMI VE MEKANİZMASI..... | 42 |
| 4.2. DEMİRİN KOROZYONU..... | 45 |
| 4.3. KOROZYON TÜRLERİ..... | 47 |
| 4.3.1. Genel Korozyon..... | 47 |
| 4.3.2. Galvanik Korozyon..... | 47 |

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| 4.3.3. Aralık Korozyonu | 49 |
| 4.3.4. Çukur Korozyonu | 50 |
| 4.3.5. Taneler Arası Korozyon..... | 52 |
| 4.3.6. Kabuk Altı Korozyonu..... | 53 |
| 4.3.7. Örtü Altı Korozyonu..... | 53 |
| 4.3.8. Seçimli Korozyon..... | 54 |
| 4.3.9. Erozyonlu Korozyon..... | 54 |
| 4.3.10. Gerilmeli (Stres) Korozyon | 55 |
| 4.3.11. Yorulmalı Korozyon | 56 |
| 4.3.12. Kavitasyon (Oyuk Hasarları) | 56 |
| 4.3.13. Hidrojen Kırılmalılığı..... | 56 |
| 4.3.14. Kaçak Akım Korozyonu..... | 57 |
| 4.3.15. Mikrobiyolojik Korozyon..... | 57 |
| 4.4. PASİFLİK..... | 58 |
| 4.5. KOROZYONUN ÖNEMİ | 60 |
| 4.6. KOROZYONU ÖNLEME TEKNİKLERİ..... | 61 |
| 4.6.1. Ortamın Değiştirilmesi..... | 61 |
| 4.6.2. Malzeme Seçimi..... | 62 |
| 4.6.3. Tasarım..... | 62 |
| 4.6.4. İnhibitör Kullanımı..... | 63 |
| 4.6.5. Kaplamalar..... | 63 |
| 4.6.5.1. Metalik Kaplamalar | 63 |
| 4.6.5.2. İnorganik Kaplamalar | 63 |
| 4.6.5.3. Kimyasal Dönüşüm İle Kaplama..... | 64 |
| 4.6.5.4. Organik Kaplamalar..... | 64 |
| 4.6.6. Anodik Koruma | 64 |
| 4.6.7. Katodik Koruma..... | 64 |
| 4.7. KOROZYON TESTLERİ..... | 65 |
| 4.7.1. Elektrokimyasal Teknikler | 66 |
| 4.7.2. Üç Elektrod Sistemi ve Önemi | 67 |
| 4.8. KOROZYON HIZI ÖLÇÜMÜ | 68 |

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| BÖLÜM 5 | 70 |
| AŞINMA | 70 |
| 5.1. AŞINMA ZAMAN İLİŞKİSİ | 70 |
| 5.2. AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER..... | 72 |
| 5.2.1. Malzeme Seçimi..... | 72 |
| 5.2.2. Sürtünme..... | 72 |
| 5.2.3. Yüzeğe Uygulanan Yük | 73 |
| 5.2.4. Sürtünme Mesafesi..... | 73 |
| 5.2.5. Yüzeğe Sertliği | 73 |
| 5.2.6. Yüzeğe Pürüzlülüğü..... | 73 |
| 5.2.7. Yağlama..... | 73 |
| 5.3. AŞINMA ÇEŞİTLERİ..... | 73 |
| 5.3.1. Adhesiv Aşınma..... | 73 |
| 5.3.2. Abrasif Aşınma | 76 |
| 5.3.3. Yüzeğe Yorulması | 77 |
| 5.3.4. Erozyon Aşınması..... | 78 |
| 5.3.4.1. Katı Partikül Erozyonu..... | 78 |
| 5.3.4.2. Sıvı Su Damlası Erozyonu | 78 |
| 5.3.4.3. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam Erozyonu | 78 |
| 5.3.4.4. Kavitasyon Erozyon..... | 78 |
| 5.3.4.5. Elektro Erozyon..... | 79 |
| 5.3.5. Korozyon Aşınması..... | 79 |
| 5.4. AŞINMANIN AZALTILMASI İÇİN GEREKLİ ÖNLEMLER..... | 80 |
| 5.5. AŞINMANIN KULLANIM ALANLARI..... | 81 |
| 5.6. AŞINMA ÖLÇÜM METODLARI | 83 |
| 5.6.1. Ağırlık Farkı Metodu | 83 |
| 5.6.2. Kalınlık Farkı Metodu..... | 83 |
| 5.6.3. İz Değişimi Yöntemi | 84 |
| 5.6.4. Radyoizotoplar İle Ölçme..... | 84 |
| 5.6.5. Bilgisayar Destekli Aşınma Ölçüm Metodu..... | 84 |
| 5.7. TRİBOSİSTEMLER | 84 |
| 5.7.1. Tribotestlerin Sınıflandırılması..... | 85 |

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| 5.8. AŞINMA DENEY YÖNTEMLERİ..... | 86 |
| 5.9. AŞINMA DENEYLERİNDE KULLANILAN BAZI AŞINMA DENEY CİHAZLARI..... | 89 |
| 5.9.1. Düzlem Üzeri Çubuk (Pin On Flat) Deney Cihazı..... | 91 |
| 5.9.2. Dört Top Deney Aparatı | 91 |
| 5.9.3. Ball On Flat Aşınma Deney Cihazı | 92 |
| 5.9.4. Ball On Disk Deney Cihazı..... | 93 |
| 5.9.5. Levha – Kayış Deney Cihazı..... | 93 |
| 5.9.6. Silindir Üstü Çubuk Deney Cihazı..... | 94 |
| 5.9.7. Çapraz Silindir Deney Cihazı..... | 95 |
| 5.9.8. Plint TE 97 Sürtünme ve Aşınma Deney Cihazı..... | 96 |
| | |
| BÖLÜM 6 | 99 |
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR | 99 |
| 6.1. DENEYSEL MALZEMELER | 99 |
| 6.2. HOMOJENİZASYON ISIL İŞLEMİ | 99 |
| 6.3. BORLAMA ISIL İŞLEMİ | 100 |
| 6.4. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI | 101 |
| 6.4.1. Mikroyapı Karakterizasyonu..... | 101 |
| 6.4.2. Mekanik Özellik Karakterizasyonu..... | 102 |
| 6.5. KOROZYON DENEYLERİ | 102 |
| 6.6. AŞINMA DENEYLERİ..... | 105 |
| | |
| BÖLÜM 7 | 107 |
| DENEYSEL SONUÇLAR | 107 |
| 7.1. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU VE SERTLİK DENEYLERİ..... | 107 |
| 7.2. KOROZYON DENEYLERİ..... | 111 |
| 7.3. AŞINMA DENEYLERİ..... | 115 |
| | |
| BÖLÜM 8 | 131 |
| DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ..... | 131 |
| 8.1. MİKROYAPI SONUÇLARININ İRDELENMESİ..... | 131 |
| 8.2. KOROZYON SONUÇLARININ İRDELENMESİ | 133 |

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| 8.3. AŞINMA SONUÇLARININ İRDELENMESİ..... | 134 |
| BÖLÜM 9 | 138 |
| GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 138 |
| KAYNAKLAR..... | 140 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 146 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1. Fe-Cr-Ni üçlü faz diyagramı. | 6 |
| Şekil 2.2. Modifiye edilmiş Schaeffler diyagramı. | 7 |
| Şekil 2.3. WRC 1992 diyagramı. A bölgesi ostenit, AF bölgesi ostenit ve bir miktar ferrit (özellikle yüksek Nieş), FA bölgesi ferrit ve bir miktar ostenit (özellikle yüksek Creş) ve F bölgesi de ferriti göstermektediri | 7 |
| Şekil 3.1. 2002 Yılı B ₂ O ₃ bazında dünya bor minerali üretimi (%)..... | 19 |
| Şekil 3.2. 2004 Yılı B ₂ O ₃ bazında tahmini dünya bor minerali üretimi (%) | 19 |
| Şekil 3.3. Matriste ve borür tabakasındaki bor v e diğer elementlerin, yüzde ağırlık olarak değişimleri. | 34 |
| Şekil 3.4. FeB ve Fe ₂ B tabakalarında, Demir-Bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterimi. | 36 |
| Şekil 3.5. Fe ₂ B ve geçiş bölgesi kalınlığının borlama süresi ile değişimi..... | 37 |
| Şekil 3.6. Borür tabakası çeşitleri [39]. | 38 |
| Şekil 3.7. Borür tabakası kalınlığının tanımlanması d: Tabaka kalınlığı, n: Bor dişi sayısı. | 40 |
| Şekil 3.8. Aşınma dayanımı (yük 100N). | 41 |
| Şekil 4.1. Su ve havayla temas eden demir levhanın korozyonu. | 46 |
| Şekil 4.2. Çukur korozyonu mekanizması. | 52 |
| Şekil 4.3. Yük transfer reaksiyonları ve yük transfer işleminin oluşumundan sorumlu pasifleşmenin metal yüzeyinde oluşumu..... | 59 |
| Şekil 5.1. Aşınma zaman ilişkisi. | 72 |
| Şekil 5.2. Adhesiv aşınma | 75 |
| Şekil 5.3. Bakır esaslı bronz ve pirinç yataklarda kuru ve yağlı ortamlarda sürtünme katsayısı- zaman diyagramı. | 76 |
| Şekil 5.4. Pürüzlü sert bir yüzey veya abrasif parçacıkların bir yüzeye yapışık olması. | 77 |
| Şekil 5.5. Yüzeylerden en az birinden daha sert abrasif parçacıkların iki yüzey arasında sıkışması. | 77 |
| Şekil 5.6. Yorulma aşınması oluşum mekanizması..... | 78 |
| Şekil 5.7. Elektro erozyon ve Tel erozyon tezgahı çalışma prensibi. | 83 |
| Şekil 5.8. Aşındırıcı su jetinin basit şematik görünümü..... | 83 |
| Şekil 5.9. Tribosistemlerin şematik gösterimi. | 87 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 5.10. Kayma aşınması için kullanılan geometrik düzenekler..... | 88 |
| Şekil 5.11. Deney cihazlarında temas biçimleri. | 89 |
| Şekil 5.12. Lastik tekerli abrasiv aşınma deney cihazı şematik görünümü. | 90 |
| Şekil 5.13. Abarasiv aşınma deney cihazı şematik görünümü..... | 91 |
| Şekil 5.14 Aşındırıcı partiküllü aşınma deney cihazı. | 91 |
| Şekil 5.15. Pin on Flat deney cihazı şematik görünümü..... | 92 |
| Şekil 5.16. Dört top aşınma deney aparatı. | 93 |
| Şekil 5.17. Ball on Flat deney cihazı. | 93 |
| Şekil 5.18. Ball on Disk deney cihazı. | 94 |
| Şekil 5.19. Levha-kayış aşınma deney cihazı..... | 95 |
| Şekil 5.20. Silindir üstü çubuk deney cihazı şematik görünümü. | 96 |
| Şekil 5.21. Saç metal kesimi. | 96 |
| Şekil 5.22 Çapraz silindir deney düzeneği. | 97 |
| Şekil 5.23. Plint firmasının ürettiği ilk TE -97 aşınma deney cihazı..... | 97 |
| Şekil 5.24. TE 97 deney cihazı ile yapılabilen aşınma deneylerinin şematik görünümü..... | 98 |
| Şekil 5.25. Aşınma deney cihazlar a) TE-97 Pin on Disk ve b) Block on disk..... | 99 |
| Şekil 6.1. Alser marka protherm model PID kontrollü elektrikli direnç fırını. | 101 |
| Şekil 6.2. Leica marka DMILM model optik ışık mikroskobu..... | 102 |
| Şekil 6.3. Schimadzu marka HVM Model mikrosertlik cihazı..... | 103 |
| Şekil 6.4. Potansiyodinamik /Polarizasyon deneylerinde kullanılan potansiyostatik yöntemle çalışan statik korozyon deney düzeneği. .. | 104 |
| Şekil 6.5 Korozyon deneylerinde kullanılan çalışma elektrotu. | 104 |
| Şekil 6.6. Statik korozyon deney hücresi..... | 105 |
| Şekil 6.7. Aşınma testlerinde kullanılan Pin on Disk test sistemi..... | 106 |
| Şekil 7.1. 1150 ⁰ C’de 3,5 saat homojenleştirme ısıl işlemi görmüş numunenin a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü. | 108 |
| Şekil 7.2. 900 ⁰ C’ de 8 saat borlama ısıl işlemi uygulanmış numunenin a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü..... | 109 |
| Şekil 7.3. Homojenleştirme ısıl işlemi görmüş çeliğin SEM görüntüsü üzerindeki (a) 1 nolu ve (b) 2 nolu bölgenin EDS analiz sonuçları..... | 110 |
| Şekil 7.4. Borlama ısıl işlemi görmüş çeliğin yüzeyinde oluşan kaplamanın kesitinden alınan EDS analiz sonucu. | 111 |
| Şekil 7.5. Borlama ısıl işlemi görmüş numunenin XRD paternleri. | 111 |
| Şekil 7.6. a) H ₂ SO ₄ ve b) NaCl çözeltisi içerisinde homojenleştirilmiş çelik ve borlanmış çelik numunelerinin polarizasyon eğrisi..... | 113 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 7.7. Homojenleştirme ısııl işleme görmüş numunelerin %10 H ₂ SO ₄ çözeltisi içinde potansiyodinamik korozyon davranışının a) Optik ışık mikroskopta ve b) SEM görüntüsü..... | 114 |
| Şekil 7.8. Homojenleştirme ısııl işleme görmüş numunelerin %10 NaCl çözeltisi içinde potansiyodinamik korozyon davranışının a) Optik ışık mikroskopta ve b) SEM görüntüsü..... | 115 |
| Şekil 7.9. Borlama ısııl işleme görmüş numunelerin %10 H ₂ SO ₄ çözeltisi içinde potansiyodinamik korozyon davranışının a) Optik ışık mikroskopta ve b) SEM görüntüsü..... | 115 |
| Şekil 7.10. Borlama ısııl işleme görmüş numunelerin %10 NaCl çözeltisi içinde potansiyodinamik korozyon davranışının a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü..... | 116 |
| Şekil 7.11. Homojenleştirilmiş durumdaki çeliğin a) AISI 4140 kalite ve b) DIN 1,2379 kalite çelik üzerinde aşınma deneyi sonrası elde edilen ağırlık kaybı değerlerinin kayma mesafesi ile değişimi..... | 117 |
| Şekil 7.12. Yüzeyi borlanmış durumdaki çeliğin DIN 1,2379 kalite çelik üzerinde aşınma deneyi sonrası elde edilen ağırlık kaybı değerlerinin kayma mesafesi ile değişimi..... | 118 |
| Şekil 7.13. DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde, homojenleştirme işlemi yapılmış numunelerin a) 10 N ve b) 60 N yük altında EDS analizi..... | 119 |
| Şekil 7.14. AISI 4140 kalite çelik üzerinde, homojenleştirme işlemi yapılmış numunelerin a) 10 N ve b) 60 N yük altında EDS analizi..... | 120 |
| Şekil 7.15. DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde, borlama ısııl işleme yapılmış numunelerin a) 10 N ve b) 60 N yük altında EDS analizi..... | 121 |
| Şekil 7.16. Homojenleştirme ısııl işleme görmüş numunelerin DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde 10 N altındaki aşınmasının a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü..... | 123 |
| Şekil 7.17. Homojenleştirme ısııl işleme görmüş numunelerin DIN 1. 2379 kalite çelik üzerinde 60 N altındaki aşınmasının a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü..... | 123 |
| Şekil 7.18. Homojenleştirme ısııl işleme görmüş numunelerin AISI 4140 kalite çelik üzerinde 10 N altındaki aşınmasının a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü..... | 124 |
| Şekil 7.19. Homojenleştirme ısııl işleme görmüş numunelerin AISI 4140 kalite çelik üzerinde 60 N altındaki aşınmasının a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü..... | 124 |
| Şekil 7.20. Borlama ısııl işleme görmüş numunelerin DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde 10 N altındaki aşınmasının a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü..... | 125 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 7.21. Borlama ısı l işlemi görmüş numunelerin DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde 60 N altındaki aşınmasının a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü..... | 125 |
| Şekil 7.22. Homojenizasyon ısı l işlemi görmüş çeliğin DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde a) 10 N b) 20 N c) 40 N d) 60 N yük altında 2000 m kayma mesafesi sırasında sürtünme katsayısının zamanla değişimi..... | 126 |
| Şekil 7.23. Homojenizasyon ısı l işlemi görmüş çeliğin DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde a) 10 N b) 20 N c) 40 N d) 60 N yük altında 4000 m kayma mesafesi sırasında sürtünme katsayısının zamanla değişimi..... | 127 |
| Şekil 7.24. Homojenizasyon ısı l işlemi görmüş çeliğin AISI 4140 kalite çelik üzerinde a) 10 N b) 20 N c) 40 N d) 60 N yük altında 2000 m kayma mesafesi sırasında sürtünme katsayısının zamanla değişimi..... | 128 |
| Şekil 7.25. Homojenizasyon ısı l işlemi görmüş çeliğin AISI 4140 kalite çelik üzerinde a) 10 N b) 20 N c) 40 N d) 60 N yük altında 4000 m kayma mesafesi sırasında sürtünme katsayısının zamanla değişimi..... | 129 |
| Şekil 7.26. Borlama ısı l işlemi görmüş çeliğin DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde a) 10 N b) 20 N c) 40 N d) 60 N yük altında 2000 m kayma mesafesi sırasında sürtünme katsayısının zamanla değişimi..... | 130 |
| Şekil 7.27. Borlama ısı l işlemi görmüş çeliğin DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde a) 10 N b) 20 N c) 40 N d) 60 N yük altında 4000 m kayma mesafesi sırasında sürtünme katsayısının zamanla değişimi..... | 131 |
| Şekil 8.1. İncelenen numunelerin aşınma hızlarının uygulanan yük ile değişimi..... | 136 |
| Şekil 8.2. Malzemeye bağlı olarak normalize edilmiş aşınma hızının değişimi..... | 136 |
| Şekil 8.3. Homojenizasyon ısı l işlemi görmüş numunenin AISI 4140 diskte 0-2000 m ve 0-4000 m' de uygulanan yükle sürtünme katsayısının değişimi..... | 137 |
| Şekil 8.4. Homojenizasyon ısı l işlemi görmüş numunenin DIN 1.2379 diskte 0-2000 m ve 0-4000 m' de uygulanan yükle sürtünme katsayısının değişimi..... | 137 |
| Şekil 8.5. Borlama ısı l işlemi görmüş numunenin DIN 1.2379 diskte 0-2000 m ve 0-4000 m' de uygulanan yükle sürtünme katsayısının değişimi..... | 138 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| Çizelge 2.1. Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler..... | 9 |
| Çizelge 3.1. Bor elementinin fiziksel özellikleri | 14 |
| Çizelge 3.2. Dünya bor rezervleri ve kaynakları..... | 17 |
| Çizelge 3.3. Ülkeler bazında dünya B ₂ O ₃ üretimi | 20 |
| Çizelge 4.1. Ortama göre malzemenin kullanımı | 62 |
| Çizelge 5.1. Malzeme özelliklerinin adhesiv aşınmaya etkisi..... | 75 |
| Çizelge 6.1. Alaşımlı çeliğin kimyasal bileşimi..... | 99 |
| Çizelge 7.1. İncelenen çeliklerin oda sıcaklığındaki sertlik sonuçları..... | 111 |
| Çizelge 7.2. İncelenen alaşımların % 10 NaCl ve % 10 H ₂ SO ₄ çözeltisi içerisinde yapılan polarizasyon deney sonuçları..... | 111 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

| | |
|--------------------------------|-----------------------|
| Cr _{eş} | : Krom Eşdeğerliliği |
| Ni _{eş} | : Nikel Eşdeğerliliği |
| Fe | : Demir |
| N | : Azot |
| W | : Wolfram |
| Na | : Sodyum |
| B | : Bor |
| H ₂ | : Hidrojen |
| Mo | : Molibden |
| Ni | : Nikel |
| Co | : Kobalt |
| C | : Karbon |
| Ag | : Gümüş |
| Pb | : Kurşun |
| Ti | : Titanyum |
| Sb | : Kalay |
| HCl | : Hidroklorik Asit |
| H ₂ SO ₄ | : Sülfürik Asit |
| H ₃ PO ₄ | : Fosforik Asit |
| S | : Kükürt |
| Na | : Sodyum |
| B | : Bor |
| H ₂ | : Hidrojen |
| Mo | : Molibden |
| Ni | : Nikel |
| Co | : Kobalt |

| | |
|----------------|---|
| ppm | : Milyonda Bir |
| μm | : Mikron |
| d | : Tabaka Kalınlığı |
| n | : Bor Dişli Sayısı |
| ΔG | : Entalpi Değişimi |
| R | : Gaz Sabiti |
| T | : Mutlak Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) |
| B | : 0,5'e Yakın Seçilen Simetri Katsayısı |
| H | : E – E _e İle Açıklanan Aşırı Potansiyel |
| E _e | : Denge Potansiyeli |
| F | : Faraday Sabiti |
| W _a | : 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

AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)

ASTM : American Society for Testing and Materials

AWS : American Welding Society

DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)

EN : Avrupa Normu

TS : Türk Standardı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan malzemelerin korozyon, sürtünme ve aşınma gibi tribolojik etkiler neticesinde azalan kullanım ömürlerinin arttırılması yüzey bölgesinin iyileştirilmesi ile mümkündür. Aşınma ve korozyondan dolayı dünya da her yıl önemli malzeme kayıplar olmaktadır. Ülkelerin korozyon nedeniyle kayıpları gayri safi milli hasılatlarının %3.5-5'i arasında değişmektedir. Yalnız Türkiye'deki 1991 yılı kaybı 4.5 milyar dolar olarak tahmin edilmektedir.

Borlama işlemi uzun bir geçmişe sahiptir. Çeliklerde bor yayınımla yüzey sertleştirme, ilk kez 1895 yılında Moissan tarafından yapılmıştır. 1970'li yıllardan itibaren borlama konusunda çalışmalar hızlanmıştır. Günümüzde borlama, teknolojik olarak gelişmiş ve endüstride, özellikle alternatif bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Almanya'da katı ortamda borlama, Rusya'da ise sıvı ortamda borlama bir çok endüstriyel alanda başarıyla kullanılmaktadır.

Nitrürasyon, karbürizasyon v.b. konvansiyonal yüzey sertleştirme işlemlerinde (600-1100) HV'lik bir yüzey sertliği elde edilirken, borla yüzey sertleştirmede (borlama) 1500-2000 HV'lik sertliğin yanında çok düşük sürtünme katsayıları elde edilmektedir. Borlama, yüksek sıcaklıkta çelik malzeme yüzeyinde bor difüzyonuyla Fe₂B ve/veya FeB gibi bileşiklerin elde edilmesidir. Endüstriyel uygulamalarda, hem daha az gevrek olması ve hem de borlama sonrası ısıl işlemlere izin vermesi bakımından Fe₂B'den oluşan tek fazlı borür tabakaları tercih edilir.

Tek başına dünya Bor rezervlerinin yaklaşık % 70'ini elinde bulunduran ülkemiz, bu cevherlerin değerlendirilmesinde yetersiz durumdadır. Bir çok bilim adamının "21. yüzyılın petrolü" olarak tanımladığı ve uzay teknolojisinden, bilişim sektörüne, metalurjiden nükleer teknolojiye kadar daha sayamadığımız pek çok sanayi dalında

kullanılan Bor mineralleri ülkemizin elinde bulunan en stratejik varlık konumundadır.

Ülkemizde bor minerallerinden rafine ürün olarak boraks pentahidrat, boraks dekahidrat, susuz boraks, borik asit ve sodyum perborat üretilmektedir. Bu ürünler dışında genellikle ileri teknoloji gerektiren yöntemler ile dünyada ticari olarak üretilen ve değişik kullanım alanları olan 250'den fazla özel bor ürünü mevcuttur. En yaygın kullanım alanı olan özel bor ürünleri susuz borik asit, elementer bor, çinko borat, ferrobora, bor kabür, bor nitrür olarak sayabiliriz.

Bu çalışmanın amacı, DIN 1.4777 kalite takım çeliğın homojenizasyon ısıl işleminin ve borlama ısıl işleminin yapılarak, mikroyapı, korozyon ve aşınma özelliklerinin araştırılması ve incelenmesidir.

Hazırlanan bu çalışma, genel itibarıyla literatür taraması ve deneysel çalışmalar olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Ancak, literatür taraması ve deneysel çalışmalar kendi içinde üç konu başlığı altında oluşturulmaya çalışılmıştır. Bunlardan birinci bölüm "Giriş" olup burada çalışmanın kısa özeti verilmiştir. İkinci bölümde, bu çalışmada kullanılan ferritik paslanmaz çelikleri de içine alan paslanmaz çelikler geniş bir literatür taramasıyla anlatılmıştır. Üçüncü bölümde bor madenleri ve borlama yöntemleri detaylı bir biçimde anlatılmıştır. Dördüncü bölümde korozyon tanımı ve mekanizmaları, korozyonun önemi, türleri ve korozyon deneyleri detaylı bir biçimde anlatılmıştır. Son literatür taramasının yapıldığı beşinci bölümde aşınma ve aşınma deney cihazları detaylı bir biçimde anlatılmıştır.

Altıncı bölümde, çalışmanın amacı belirlenmesinin yanında, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, uygulanan ısıl işlemleri ve uygulanan mekanik testler ve testlerin uygulanış parametreleri tanıtılmıştır.

Çalışmanın yedinci bölümünde, homojenizasyon ve borlama ısıl işleminin görmüş numunelere uygulanan mekanik testlerden elde edilen veriler, kolay değerlendirilebilmesi için grafik olarak çizilmiş ve elde edilen grafikler değerlendirilmiştir. Ayrıca, optik mikroskop ve SEM görüntüleri ve EDS analizleri

alışmaları sonucu elde edilen veriler yorumlanmıştır. Deneysel alışmalar sonucu elde edilen bulgular, daha önceden yapılmış benzer çalışmalarla sebep-sonuç ilişkisi ile kıyaslanmıştır.

Deneysel çalışmaların nihai sonuçlarının açıklandığı sekizinci ve son bölümde, deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular, deneysel çalışmanın amacına uygun bir biçimde yorumlanarak sonuçlandırılmıştır.

BÖLÜM 2

PASLANMAZ ÇELİKLER

Günümüz endüstrisinin vazgeçilmez malzemeleri arasına giren paslanmaz çelikler esas itibari ile demir, karbon ve çoğu zamanda nikel içeren alaşımlar olup başlıca özelliklerini kroma borçludurlar. Demir alaşımlarının korozyon dayanımlarını arttırmak için geliştirilmiş bir türü olan paslanmaz çeliklerin, uygulama alanlarının her geçen gün artarak devam etmesinin temel nedeni korozif ortamlarda, mekanik özelliklerini yitirmeden gösterdikleri yüksek korozyon dirençleridir. Paslanmaz çeliğin paslanmazlık özelliğine sahip olabilmesi için en az % 12 Cr içermesi gerekir [1].

Doğada yalnızca altın ve platin gibi metaller saf halde bulunur, normal metallerse diğer elementlerle bileşmiştir. Paslanma, bu yüzden doğal bir olaydır. Doğada demir cevheri şeklinde bulunan demir, bu yüzden dengesizdir ve paslanmak ister. Paslanmak saf demirin suyun mevcudiyetinde oksijenle birleşmesidir. Herhangi bir koruyucu kaplamaya sahip olmayan karbon çeliği üzerinde bir pas katmanı oluşur ve çeliğin kalan kısmını korur. Yüzeydeki pas katmanının alınması durumunda yeni bir pas katmanı oluşur. Bu durum paslanma olarak adlandırılır. Boyama, çinko kaplama (galvanizleme), epoksi reçinelerle yapılan çeşitli kaplamalar paslanma sürecini geciktirir veya durdurur [2].

Paslanmaz çelikteki kromun oksijene büyük bir yakınlığı vardır. Krom oksijenle karşılaştığında çeliğin yüzeyinde moleküler düzeyde bir krom oksit filmi oluşur. Bu filmin kalınlığı 130 Angstrom'dur. Bu durum, büyük bir binayı, mektup kağıdı kalınlığındaki çatı sacıyla yağmurdan korumak gibi bir şeydir [2].

Demir bazlı alaşımlarda ve diğer teknolojik olarak önemli alaşımlarda ortak özellik hem çözücü hem de çözen atomların oksitlenmesidir. Wagner, alaşımların

oksitlenmesini iki kategoride incelemiştir: (1) soylu (değişiklik göstermeyen elementler, Pt, Ag ve Au gibi) ana element ile alaşım elementi (Pt-Ni gibi) ve (2) soylu olmayan ana element ile soylu olmayan alaşım elementleri. Fe bazlı alaşımlar, Fe-Cr, Fe-Si, Fe-Cr-Al, Fe-Ni-Cr ve Fe-Cu alaşımları, bu ikinci katogoriye girmektedirler [3].

Koruyucu tabaka oluşturmanın amacı alaşımı, özellikle yüksek sıcaklıklarda, oksidasyona karşı korumaktır. Koruyucu tabakadan istenilen özellikler istenilen sıcaklık ve oksijen kısmi basınçlarında kararlı olması, çok yavaş büyümesi, yani düşük parabolik hızlara sahip olmalarıdır, bunu sağlayan oksitler, SiO₂, Cr₂O₃ ve Al₂O₃ dır [3].

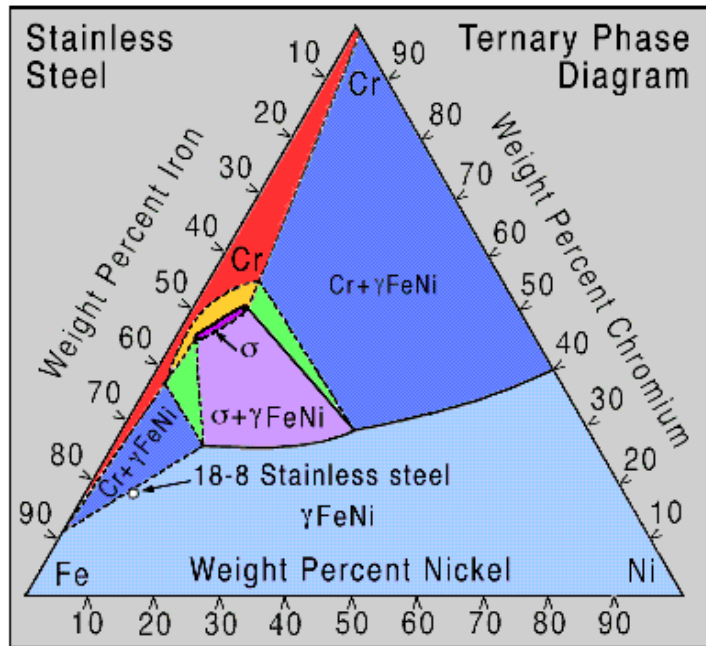
Paslanmaz çelikler son yılların keşfi değildir. Faraday 1822 yılında, demir içine krom katıldığında atmosferik oksidasyona karşı oldukça dayanıklı bir alaşım oluştuğunu göstermiştir. 1838 yılında Mallet kromlu çeliklerin bazı ortamlarda korozyona dayanıklı özellik gösterdiğini keşfetmiştir. 19'uncu asrın sonuna kadar kromlu çelikler yalnızca sıcak sülfirik asit kapları için kullanılmıştır. 1904 yılında Monnartz krom ilave edilmiş çeliklerin oksitleyici ortamlarda pasifleşme özelliğinin daha belirgin hale geldiğini ortaya koymuştur. Bu metallerin korozyon dayanıklılığının metal yüzeyinde oluşan pasif tabakadan ileri geldiğini ispatlamıştır. Fakat pasif filmin oluşması alaşımların her ortamda korozyona karşı dirençli olabilmeleri için yeterli değildir. Paslanmaz çelikleri ortama daha dirençli kılmanın yollarından birisi krom, nikel gibi ana alaşım elementlerinin oranını arttırmak, karbon içeriğini azaltmaktır [4].

2.1. PASLANMAZ ÇELİK TÜRLERİ

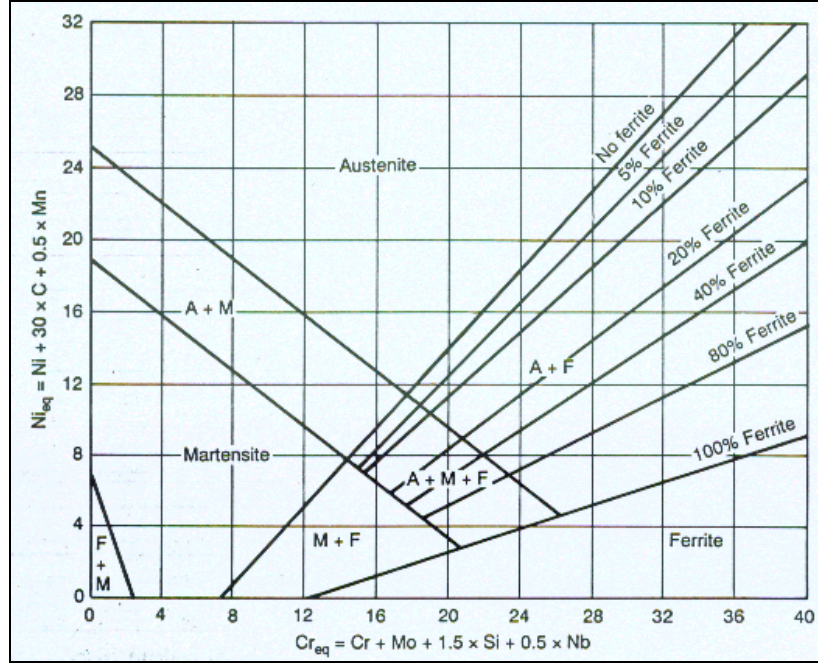
Paslanmaz çeliklerde kimyasal bileşim değiştirilerek farklı özelliklerde alaşımlar elde edilebilir. Krom miktarı yükseltilerek veya nikel ve molibden gibi alaşım elementleri katılarak korozyon dayanımı artırılabilir. Bunun dışında bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum ve selenyum gibi bazı elementlerle alaşımlama ile ilave olumlu etkiler sağlanabilir.

Paslanmaz çeliklerde içyapıyı belirleyen en önemli laşım elementleri, önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır. Bunlardan öncelikle krom ve nikel içyapının ferritik veya östenitik olmasını belirler .

Fe-Cr-Ni dökme çelikleri, en az üç temel alaşım elementi içerdiğinden, bu çeliklerin mikroyapısında bulunan fazlar, üçlü faz diyagramlarından çıkartılabilir (Şekil 2.1.). ancak faz diyagramları, sadece denge koşullarını temsil etmekte olup, mikroyapı hakkında sınırlı bilgiler vermektedir. Bu nedenle Fe-Cr-Ni çeliklerinin oda sıcaklığındaki mikroyapı bileşenlerini belirlemede Schaeffler diyagramından (Şekil 2.2.) faydalanılır. Orijinal Schaeffler diyagramının eksenlerinde sadece Ni ve Cr bulunmasına rağmen, modifiye edilmiş Schaeffler diyagramın eksenlerinde, diğer elementleri kapsayan nikel ve krom eşdeğerleri (sırasıyla $Ni_{eş}$ ve $Cr_{eş}$ bulunur) [6,7]. Günümüzde, özellikle paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesindeki mikroyapıyı belirlemede Schaeffler diyagramı yerine WRC 1992 diyagramı olarak bilinen ve eksenlerinde $Ni_{eş}$ ve $Cr_{eş}$ değerleri bulunan Şekil 2.3.'deki diyagram kullanılmaya başlanmıştır. Paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesindeki mikroyapıyı belirlemede WRC 1992 diyagramı, Schaeffler diyagramına göre daha hassas ve hata oranı düşüktür [6].



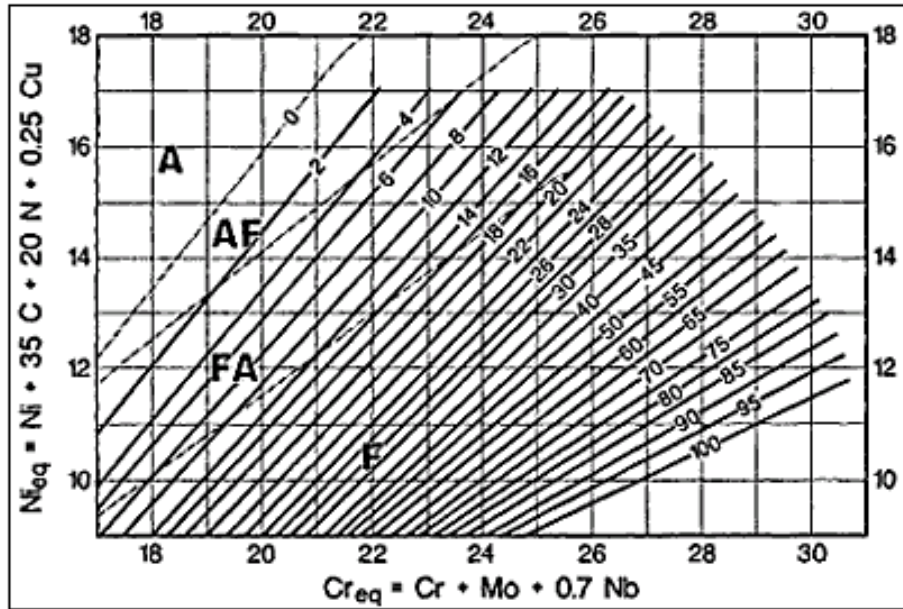
Şekil 2.1. Fe-Cr-Ni üçlü faz diyagramı [7].



Şekil 2.2. Modifiye edilmiş Schaeffler diyagramı [7].

$$Ni_{eş} = \% Ni + 30.\% C + 0,5. \% Mn + 11,5. \% N$$

$$Cr_{eş} = \% Cr + \% Mo + 1,5. \% Si + 2. \% Nb + 3. \% Ti$$



Şekil 2.3. WRC 1992 diyagramı. A bölgesi ostenit, AF bölgesi ostenit ve bir miktar ferrit (özellikle yüksek $Ni_{eş}$), FA bölgesi ferrit ve bir miktar ostenit (özellikle yüksek $Cr_{eş}$) ve F bölgesi de ferriti göstermektedir [7].

Matrisin ostenitik ve/veya ferritik olduğu çeliğın $Cr_{eş}$ değerinin $Ni_{eş}$ değerine bölünmesiyle elde edilen değerden tahmin edilebilir;

$Cr_{eş} / Ni_{eş} = 1.0 - 1.3$ ise, matrisin tümüyle ostenitik

$Cr_{eş} / Ni_{eş} = 1.3 - 1.6$ ise, matris ostenitik ve az bir miktar ferritik

$Cr_{eş} / Ni_{eş} = > 1.8$ ise, matris hemen hemen ferritik ve az miktar dönüşmemiş ostenitiktir.

Paslanmaz çelikler beş ana grupta toplanırlar:

- a) Ferritik paslanmaz çelikler
- b) Martenzitik paslanmaz çelikler
- c) Östenitik-Ferritik (Çift Fazlı) paslanmaz çelikler
- d) Çökeltme sertleşmesi uygulanabilen paslanmaz çelikler
- e) Östenitik paslanmaz çelikler [5].

2.1.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler, içeriğindeki alaşım elementlerinin özellikle karbonun miktarına bağlı olarak % 16-30 Cr içerirler, manyetikler, soğuk veya sıcak olarak haddelenebilirler [1].

Ferritik paslanmaz çelikler oda sıcaklığında ferrit yapıdadır. Bu alaşımlar oda sıcaklığında manyetik ve bu özelliklerini Curie sıcaklığına (768 °C) kadar korurlar. Bu gruptaki paslanmaz çelikler % 12-30 Cr içerir. Nikel ihtiva etmezler. Ayrıca karbon oranı % 0,02 ile 0,12 gibi çok düşük değerdedir. % 12 Cr'lu ferritik paslanmaz çelikler; düşük maliyette üretim ve iyi korozyon direnci sağlar. Bu çeliklerde ferriti tamamen kararlı hale getirebilmek için yeterli miktarda krom ve diğer alaşım elementlerine ihtiyaç vardır. γ (Gama) bölgesini genişlettiği düşünölen karbonun çok düşük oranlarda tutulması gerekir. Bu sayede yüksek tokluk ve çekilebilirlik korunurken, östenit dönüşümü de engellenmiş olur. Isıl işlem görmüş paslanmaz çelikler çok taneli ve tek fazlı bir mikroyapıya sahiptir. Çekilebilirliğe ve tokluğa etki eden zararlı fazların oluşumunu engellemek için alaşımlandırılmış

ferritik tanelerin yüksek sıcaklıkta (1100 °C’de) homojenleştirme ısıl işlemi gördükten sonra hızlı soğutulmaları gerekir [6].

Krom oranı % 20’den daha fazla olan ferritik paslanmaz çelikler 550 °C ve 850 °C arasındaki sıcaklıklarda uzun süre tavlandıklarında sigma (σ) fazı oluşur. Yüksek sıcaklıktaki uygulama sırasında ortaya çıkan bu durum, çeliğin sertliğini artırdığı için bazen yararlı olabilir, ancak gevrekleşmeye neden olduğu ve korozyon direncini azalttığı için genellikle istenmez [1].

Çizelge 2.1.Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler [7].

| Fiziksel Özellikler | Östenitik paslanmaz çelikler | Ferritik paslanmaz çelikler | Martenzitik paslanmaz çelikler | Çökeltilebilir sertleşebilir paslanmaz çelikler ile |
|---|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Elastisite Modülü (GPa) | 195 | 200 | 200 | 200 |
| Yoğunluk (g/cm³) | 8,0 | 7,8 | 7,8 | 7,8 |
| Isıl Genleşme Katsayısı (µm/m°C) | 16,6 | 10,4 | 10,3 | 10,8 |
| Isıl iletkenlik (W/mk) | 15,7 | 25,1 | 24,2 | 22,3 |
| Özgül Isı (J/k °K) | 500 | 460 | 460 | 460 |

2.1.2. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik çelikler, yüksek sıcaklıklarda sahip oldukları yüzey merkezli kübik kafese sahip ostenitin hızlı soğutma sonucu hacim merkezli tetragonal kafese sahip martenzit yapıya dönüşümü ile elde edilir. Bu çeliklerin içyapısında tavlınmış halde yumuşak ferritik faz da bulunur. Bu gruptaki çelikler %16 ile % 18 krom içeren 440A, 440B ve 440C kaliteleri dışında, en çok %14 krom içerirler. Bunun yanında, % 0,60 ile % 1,20 oranında yüksek karbon içeren 440 serisi dışında karbon miktarları düşük veya orta derecedir. Krom ve karbon miktarları martenzit oluşumunu sağlayacak şekilde dengelenir. Temperleme özelliklerini ayarlamak üzere niyobyum, silikon, volfram ve vanadyum ilave edilebilir. Tokluğu ve bazı ortamlarda korozyon

dayanımını iyileştirmek için ise az miktarda nikel eklenir. İstenen içyapı ve özellikleri elde etmek için martenzitik çeliklerin alaşım çeliklerine benzer biçimde ısıtılma işlemi (ostenitleme, su verme ve temperleme) tabii tutulmaları gerekir. Ostenitleme sıcaklığı çeliğin türüne göre 950-1050°C arasındadır. Bu sıcaklıktan çeliğe su verilirse martenzitik bir içyapı elde edilir [7].

Su verme ve temperleme sonrası mekanik özellikler temelde karbon miktarına bağlıdır. Elde edilen sertlik ve mukavemet, karbon yüzdesi ile birlikte artar. Bileşimindeki krom miktarı %16 ve karbon miktarı % 0,6-%1,1 olan çelikler 60 HRC sertlik ve 1900 MPa akma dayanımı gösterebilirler. Bu çeliklerin sertliğinin yüksek oluşu, aşınma dayanımı da iyileştirebilir. %1,1 karbon içeren 440C kalitesi mükemmel aşınma dayanımı gösterirken, %0,1 karbon içeren 410 kalitenin aşınma dayanımı düşüktür.

Korozyon dayanımını ve tokluğunu artırmak için alaşıma molibden ve nikel eklenir. Nikel içeren martenzitik çeliklerde karbonun görevini nikel üstlenir. Bu şekilde karbonun bazı olumsuz etkileri (karbür çökeltileri, aşırı sertlik gibi) ortadan kaldırılabılır. Nikel aynı zamanda yüksek miktarda kromun etkisini dengeleyerek içyapıyı serbest ferritlerden korur. Ayrıca sertleşme kabiliyeti ve su verme derinliği arttığından, iri parçalara da ıslah işlemleri uygulanabilir. Molibden ve nikel ilavesi, su verme sonrasında martenzite dönüşmemiş artık ostenitlerin oluşmasını önlemek için sınırlı tutulmak zorundadır. Bu nedenle korozyon dayanımı ancak orta düzeyde kalır [7].

Martenzitik çelikler yüksek çekme, sürünme ve yorulma dayanımı gerektiren, orta derecede korozyon ve en çok 650°C'a kadar sıcaklıktaki uygulamalarda tercih edilirler. Örnek olarak düşük ve orta miktarda karbon içeren 410 kalite çelik ve türevleri, buhar ve gaz türbinlerinde ve jet motorlarında kullanılır. 420 ve benzeri alaşımlar bıçak ve diğer kesici aletlerde, vana parçalarında, dişli, rulman ve millerde tercih edilir. Martenzitik çelikler petrol ve petrokimya makine teçhizatında da kullanılır. 420 kaliteye ek olarak, 440 ve benzeri alaşımlar cerrahi ve dişçilik aletlerinin, makas, yay, kam ve rulman bilyalarının en çok tercih edilen malzemeleridir.

Ürün tipine bağlı olarak martenzitik çelikler tavllanmış veya ıslah edilmiş durumda pazara sunulur. Tavllanmış olarak alınan ürünler şekil verildikten sonra ıslah işlemine (su verme+temperleme) tabii tutulur. Temperleme sıcaklığı değiştirilerek değişik özellik kombinasyonları elde edilir.

En iyi korozyon dayanımını elde etmek için tavsiye edilen ısıl işlem sıcaklıklarına tam olarak uyulması çok önemlidir.

2.1.3. Östenitik-Ferritik (Çift Fazlı) Paslanmaz Çelikler

Dubleks çelikler olarak da adlandırılan bu çeliklerin içyapısında her iki faz bir arada bulunur ve bu sayede ostenitik ve ferritik çeliklerin her birinin de ötesinde iyileştirilmiş özellikler gösterirler. Böylece ostenitik çeliklere kıyasla daha iyi gerilme korozyonu dayanımına; ferritik çeliklerle kıyaslandığında ise daha iyi tokluk ve süneklığe sahip olurlar. Ayrıca, iki fazın bir arada bulunması halinde tavllanmış durumda bile 550 ile 690 MPa akma dayanımı gösterirler ki, bu değer, fazların tek başına bulunduğu türdeki çeliklerin akma dayanımının yaklaşık iki katıdır. Mevcut ticari kaliteler % 22-% 26 krom, %4-%7 nikel, azami %4,5 molibden, yaklaşık %0,7 bakır ve volfram ile %0,08- % 0,35 azot içerirler [4,5].

Başlıca dört ana kalitesi vardır:

- a) Fe-23Cr-4Ni-0,1N,
- b) Fe-22Cr-5,5Ni-3Mo-0,15N,
- c) Fe-25Cr-5Ni-2,5Mo-0,17N-Cu
- d) Fe-25Cr-7Ni-3,5Mo-0,25N-W-Cu.

Bunlardan dördüncüsü süper-dubleks diye de adlandırılır. Bu türdeki çelikler üzerinde araştırma ve deneyler devam etmekte ve mekanik özellikler ile korozyon dayanımında sürekli iyileşmeler sağlanmaktadır. Ostenitik-ferritik çelikler ferrit yapıcı elementlerin oranına bağlı olarak %10'a kadar delta-ferrit içerirler. İlk önce katılaştan bu faz, içyapının ince taneli olmasını sağlar.

2.1.4. Çökeltme Sertleşmesi Uygulanabilen Paslanmaz Çelikler

Bu çeliklere çökeltme sertleşmesi uygulanabilir. Bunların esas içyapıları ostenitik, yarı-ostenitik veya martenzitik olabilir. Bu çelikler çok düşük miktarda karbon ihtiva ettiklerinden martenzitik türlerinde bile temel sertleşme ancak çökeltmeye bağlı olarak gerçekleşir. Çökelti oluşumunu sağlamak için alüminyum, titanyum, niyobyum ve bakır elementleri ile alaşımlama yapılır. Çökeltme sertleşmesi uygulanabilen çelikler iyi süneklik ve tokluk yanında, orta ila iyi derece arasında korozyon dayanımı gösterirler. Bu çeliklerde, martenzitik çeliklerle kıyaslandığında, mukavemet ve korozyon dayanımlarının iyi bir kombinasyonu elde edilir. Bu durum yüksek miktardaki alaşım elementleri ve en çok %0,04 karbon bulunmasından dolayıdır, ancak bunun sonucu aşınma dayanımında düşüş gözlenir. Çökeltme sertleşmesi uygulanabilir paslanmaz çelikler 1700 MPa değerine kadar çıkan akma dayanımlarına sahiptirler. Soğuk şekillendirme ve onu izleyen yaşlandırma ile bu değer daha da yükseltilebilir. En yaygın olarak kullanılan türü 630 kalite olan bu grubun kullanım alanı uçak uzay ve diğer yüksek teknoloji alanlarıdır[4,12].

2.1.5. Östenitik Paslanmaz Çelikler

% 16-25 Cr ve % 20'ye kadar Ni içeren yüzey merkezli kübik (ymk) kristal yapısına sahip çelikler östenitik paslanmaz çeliklerdir. 18 Cr / 8 Ni'li östenitik çeliklerin ve bunların türevlerinin erime sıcaklıkları içerdikleri karbon miktarına göre 1400 ile 1430 °C arasında değişir. Bazı elementler eklenmesiyle bu sıcaklık düşürülebilir. Östenitik içyapı dönüşüm göstermediği için normalleştirme ve sertleştirme ısı işlemi uygulanamaz. Kromun ferrit yapıcı etkisi östenit yapıcı alaşım elementleri katılarak giderilir. Östenit yapıcı temel element nikelidir. Sertlik, sadece soğuk şekillendirme ile artırılabilir. Manyetik olmayan bu tür paslanmaz çelikler AISI 3XX serisi içinde gruplandırılmalarının yanı sıra DIN 17440, EU 88, EU 95 ve TS 2535'e göre yüksek alaşımlı çelikler halinde olduğu gibi simgelenirler [1,12,13].

BÖLÜM 3

BOR MADENİ VE BORLAMA

3.1. BOR ELEMENTİ

Periyodik sistemin üçüncü grubunun başında bulunan ve atom numarası 5 olan bor elementi, kütle numaraları 10 ve 11 olan iki kararlı izotopundan oluşur.

Bor, yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. Toprağın bor içeriği genelde ortalama 10-20 ppm olmakla birlikte ABD'nin batı bölgeleri ve Akdeniz'den Kazakistan'a kadar uzanan yörede yüksek oranlarda bulunur. Deniz suyunda 0.5-9.6 ppm, tatlı sularda ise 0.01 - 1.5 ppm aralığındadır. Yüksek konsantrasyonda ve ekonomik boyutlardaki bor yatakları, borun oksijen ile bağlanmış bileşikleri olarak daha çok Türkiye ve ABD'nin kurak, volkanik ve hidrotermal aktivitesinin yüksek olduğu olan bölgelerde bulunmaktadır [17].

Tarihte ilk olarak 4000 yıl önce Babiller Uzak Doğu'dan boraks ithal etmiş ve bunu altın işletmeciliğinde de kullanmışlardır. Mısırlıların da boru, mumyalamada, tıpta ve metalurji uygulamalarında kullandıkları bilinmektedir. İlk boraks kaynağının Tibet Göllerinden elde edilmiştir. Boraks; koyunlara bağlanan torbalarda Himalayalar'dan Hindistan'a getirilmiştir. Eski Yunanlılar ve Romalılar boratları temizlik maddesi olarak kullanmıştır. İlaç olarak ilk kez Arap doktorlar tarafından M.S. 875 yılında kullanılmıştır.

Elementel bor 1808 yılında Fransız Kimyacı Gay-Lussac ile Baron Louis Thenard ve bağımsız olarak İngiliz kimyacı Sir Humpry Davy tarafından bulunmuştur. Bor, biri amorf ve altısı kristalin polimorf olmak üzere, çeşitli allotropik formlarda bulunur.

Alfa ve beta rombohedral formlar en çok çalışılmış olan kristalin polimorflardır. Alfa rombohedral strüktür 1200 °C'nin üzerinde bozulur ve 1500 °C'de beta rombohedral form oluşur. Amorf form yaklaşık 1000 °C'nin üzerinde beta rombohedrale dönüşür [18].

Bor elementinin kimyasal özellikleri morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron ebadındaki amorf bor kolaylıkla ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken kristalin bor kolay reaksiyona girmez. Bor yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve diğer ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş veya patlama şeklinde olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur. Bor elementinin fiziksel özellikleri Çizelge 3.1. de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bor elementinin fiziksel özellikleri. [17]

| Özellik | Değeri | |
|---|---|------|
| Atom Numarası | 5 | |
| Atom ağırlığı | 10,811±0,005 veya 0,007 | |
| Yoğunluk (kg/m ³) | 2,46 | |
| Molar Hacim (cm ³) | 4,39 | |
| Ergime noktası | 2190+20 °C | |
| Kaynama noktası | 3660 °C | |
| Isıl genişleme katsayısı (25-1050 °C arası, 1 °C için) | 5x10 ⁻⁶ - 7x10 ⁻⁶ | |
| Knoop sertliği | 2100-2580 HK | |
| Mohs sertliği (elmas-15) | 11 | |
| Vickers sertliği | 5000 HV | |
| Entalpi (kJ/mol) | Füzyon | 50,2 |
| | Buharlaştırma | 507 |

3.2. BOR ÜRÜNLERİ VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Boraks Dekahidrat : Teknolojik olarak alkali metal boratlarının en önemlilerinden biri, disodyum tetraborat dekahidrat (Na₂B₄O₇.10H₂O) olarak da adlandırılan boraks dekahidrattır ve tabiatta tinkal minerali olarak bulunur. Molekül ağırlığı 381,4 gr./mol, özgül ağırlığı 1,71 (20°C), özgül ısı 0,385 kcal/gr/°C (25-50°C), oluşum ısı -1497,2 kcal/mol' dür. Renksiz monoklinik kristal yapısında bir tuzdur. Sulu çözeltileri yaklaşık, konsantrasyondan bağımsız olarak hafif alkali reaksiyon gösterir.

Boraks Pentahidrat : Disodyum tetraborat pentahidratın ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) molekül ağırlığı 291,35 gr/mol, özgül ağırlığı 1.88, özgül ısısı 0,316 kcal /gr/°C ve oluşum ısısı , -1143,5 kcal/mol' dür. Mineral adı tinkalkonit olan pentahidrat boraksın dehidrasyonundan oluşan birikintiler halinde bulunur. Doymuş boraks çözüntüsünün 60°C' nin üzerinde kristallenmesi ile oluşur.

Susuz Boraks : Disodyum tetraborat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) molekül ağırlığı 201,27 gr/mol, özgül ağırlığı 2,3 gr/cm³, oluşum ısısı, -783,2 kcal/mol olan renksiz ve çok sert bir kristaldir. Kolay öğütülebilir kristalin bir kütle olarak bulunur. Ergime derecesi 741°C' dir. Hiğroskopiktir. Boraks hidratların 600-700°C' de dehidrasyonu ile stabil yapıda susuz boraks üretimi sağlanabilmektedir.

Borik Asit : Borik asit (H_3BO_3) molekül ağırlığı 61,83 gr/mol, B_2O_3 içeriği %56.3,ergime noktası 169°C, özgül ağırlığı 1.44, oluşum ısısı , -1089 kJ/mol, çözünme ısısı 22,2 kJ/mol olan kristal yapılı bir maddedir. Oda sıcaklığında sudaki çözünürlüğü az olmasına rağmen, sıcaklık yükseldikçe çözünürlüğü de önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle sanayide borik asidi kristallendirmek için genellikle doymun çözeltiliyi 80°C' den 40°C' ye soğutmak yeterli olmaktadır. Bor minerallerinden geniş ölçüde üretilen borik asit başlıca; cam, seramik ve cam yünü sanayiinde kullanılmakta olup, kullanım alanları çok çeşitlidir. Borik asit, bor minerallerinin genel olarak sülfürik asit ile asitlendirilmesinden elde edilmektedir. Türkiye'de borik asit üretimi başlıca; Bandırma'daki Eti Bor A.Ş. Boraks ve Asit Fabrika İşletmeleri tarafından yapılmaktadır [14].

Bor Oksit (susuz borik asit) : Ticari bor oksit, B_2O_3 'tür ve genellikle %1 su içerir. Genellikle borik asitten uygun sıcaklıkta su kaybettirilerek elde edilir. Renksiz cam görünüştüdür. Oda sıcaklığında higroskopiktir. Bor oksit ve susuz boraks cam sanayiinde çok kullanılır. Yüksek sıcaklıkta borik asitten su buharlaşırken B_2O_3 kaybı artmaktadır. Cam üretim prosesinde, borik asit yerine, bor oksit kullanılması enerji ve hammadde avantajı sağlamaktadır. Bor oksit porselen sırlarının hazırlanmasında, çeşitli camlarda, ergitme işlemlerinde, seramik kaplamalarda kullanılır. Ayrıca pek çok organik reaksiyonun katalizörüdür. Pek çok bor bileşiginde başlangıç maddesidir.

Sodyum Perborat : Sodyum perborat ($\text{NaBO}_2\text{H}_2\text{O}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) genellikle tetrahidrat yapısındadır. Perborat üretiminde %33 B_2O_3 içeren boraks minerali kullanılmaktadır. Sodyum perborat, Bandırma' daki Eti Bor A.Ş. Boraks ve Asit Fabrikaları İşletmeleri tarafından üretilmektedir . Sodyum perborat, ağartıcı etkisi dolayısıyla yaygın olarak sabun ve deterjan sanayiinde kullanılmaktadır. Ayrıca kozmetik maddelerin yapımında, tekstil endüstrisinde, mum, reçine, tutkal ve sünger sanayisinde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır [15].

Diğer Bor Bileşikleri : Yukarıda açıklanan bor ürünleri dışında sanayide yaygın olarak kullanılan diğer bor bileşikleri aşağıda özet olarak verilmiştir

Boridler : Metalik karaktere sahip bor bileşikleridir. Metallerle veya metaloksitler ile borun reaksiyonu sonucu elde edilirler. Ticari olarak metal karışımların ve borun; alüminyum, magnezyum veya karbon ile indirgenmesi ile elde edilirler. Boridler yüksek ergime noktasına, yüksek sertliğe ve iyi bir kimyasal stabiliteye sahiptirler. Oksidasyona karşı dirençlidirler. Bu nedenle, metal yüzeylerinin kaplanmasında, ısıya dayanıklı kazan ve buhar kazanları yapımında, korozyona dayanıklı malzeme üretiminde ve elektronik sanayinde kullanılırlar.

Bor Karbür : Bor-karbon sistemindeki tek bileşik olan bor karbür, genellikle granül katı olarak elde edilir. Masif ürün olarak elde edilmek istendiğinde, $1800-2000^\circ\text{C}$ ' de garafit kalıplarda preslenir. Saf bor karbür kristalleri hafif parlak görünümündedir. Yoğunluğu $2,52 \text{ gr/cm}^3$, ergime sıcaklığı 2450°C ' dir. Sıcak preslenmiş bor karbür, aşındırıcı parçalarda, contalarda, seramik zırlı yüzeylerin yapılmasında kullanılır. 2000°C 'nin üzerindeki sıcaklıkların ölçülmesinde termoçift olarak kullanılır. Sertliği nedeniyle abrasiv malzeme yapımında kullanılır, ayrıca nükleer reaktörlerde nötron yakalama kapasitesi, kimyasal inertliği ve radyasyon stabilitesi gibi özelliklerinden yararlanır.

Bor Nitrit : Bor nitrit genellikle hegzagonal yapıda oluşur. Hegzagonal sistemde iken beyaz, talka benzeyen, $2,27 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğunda bir tozudur. Kübik sistemde ise oldukça serttir. Teorik yoğunluğu $3,45 \text{ gr/cm}^3$ 'tür ve iyi bir elektrik izolatörüdür. Ergitilerek masifleştirilmiş bor nitrit büyük bir kimyasal dirence sahiptir. Kübik

yapıdaki bor nitrit çok iyi bir abrasiv malzemedir. Bu özelliğinden dolayı, kesici aletlerin yapımında ve sert alaşımların işlenmesinde kullanılır.

Bor Halojenürler : Borun flor, klor, brom, iyot gibi halojenlerle yaptığı bileşiklerdir. Bor oksitin derişik sülfirik asit ve florit, klorit, bromit, iyodit gibi halojenlerle ısıtılmasıyla elde edilir. Bor klorür, düşük viskoziteli, renksiz, ışığı kıran bir sıvıdır ve %95' i bor-fiber üretiminde kullanılır.

Bor florür renksiz, boğucu kokulu, yanıcı olmayan bir gazdır. Bor iyodür katıdır ve kuvvetli nem çekicidir, oksijen akımında yanar.

3.3. DÜNYA BOR REZERVLERİ

Dünyadaki önemli bor yataklarının Türkiye, Rusya ve ABD'de olduğu bilinmektedir. Dünya toplam bor rezervi (görünür+muhtemel+mümkün) 1,2 milyar ton olup; bu rezervin %72,2'si Türkiye'de (851 milyon ton B₂O₃), %8,5'i Rusya'da ve %6,8'i ABD'de bulunmaktadır [17].

Çizelge 3.2. Dünya bor rezervleri ve kaynakları [17].

| Ülke | Görünür Rezerv (milyon ton B ₂ O ₃) | Muhtemel +Mümkün Rezerv (milyon ton B ₂ O ₃) | TOPLAM (milyon ton B ₂ O ₃) | Toplam Rezerv İçindeki Payı (%) |
|---------------|---|--|---|--|
| Türkiye * | 227 | 624 | 851 | 72,2 |
| A.B.D | 40 | 40 | 80 | 6,8 |
| Rusya | 40 | 60 | 100 | 8,5 |
| Çin | 27 | 9 | 36 | 3,1 |
| Arjantin | 2 | 7 | 9 | 0,8 |
| Bolivya | 4 | 15 | 19 | 1,6 |
| Şili | 8 | 33 | 41 | 3,5 |
| Peru | 4 | 18 | 22 | 1,9 |
| Kazakistan | 14 | 1 | 15 | 1,3 |
| Sırbistan** | 3 | 0 | 3 | 0,3 |
| TOPLAM | 369 | 807 | 1176 | 100 |

Dünya bor rezervleri ve kaynakları Çizelge 3.2. de verilmiştir. Ülkemizden sonra; dünyanın bilinen en önemli bor yatakları ABD'nin Kaliforniya eyaletindeki Mojave Çölü'ndedir. Yine aynı bölgede Searles Gölünde önemli borat yatakları mevcuttur. US Geological Survey'e göre Amerika'nın bor rezervinin, B₂O₃ bazında 40 milyon tonu görünür olmak üzere toplam 80 milyon ton'dur. ABD'nin önemli bor mineralleri tinkal, kernit ve bor içeren tuzlu sularlardır. Başlıca bor kaynakları; Kramer bor yatağı , Death Valley'de bulunan üleksit-proberit bor yatağı, Fort Cady kolemanit yatağı ve Searles gölünün borlu sularıdır.

Rusya'nın toplam bor rezervinin B₂O₃ bazında yaklaşık 100 milyon ton olduğu belirtilmektedir. Rusya'nın bor minerallerinin tamamına yakını Japon Denizi yakınında, Primorsk'taki Dalnegorsk bor yataklarından üretilmekte ve hemen madenin yanında bulunan zenginleştirme tesisinde işlenmektedir.

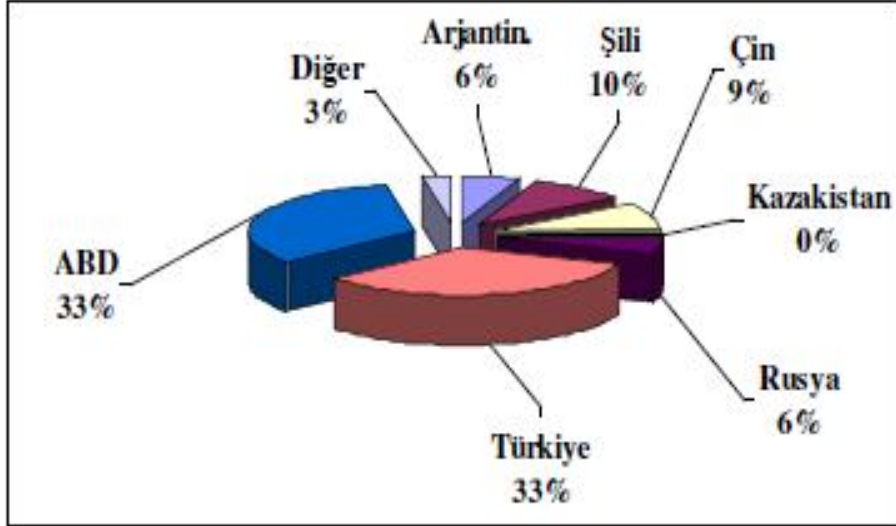
Kazakistan'da, Kuzey Hazar Denizindeki Inder Bölgesinde, 50 m derinlikte; %20 B₂O₃ içerikli 7 milyon ton bor rezervi mevcuttur. En önemli mineraller; szaybelit ve borasit'tir. Ayrıca, yazları kuru olan Inder gölünde de ülkesit, inyoit, hidroborasit, kolemanit, pandermit, askarit ve inderit gibi bor rezervleri bulunmaktadır.

Çin'de bor üretimi yapılan yerler; Liaoning, Jilin, Qinghe ve Xizang'tadır. Çin'in bor rezervi 36 milyon ton olarak tahmin edilmektedir. Rezervin % 59'unu ortalama % 8,4 B₂O₃ tenörlü bor ve magnezyumlu yataklar oluşturmakta ve bu yataklar Yingkou ve Liaon bölgelerinde bulunmaktadır. Rezervlerin % 29'u ise Da Qaidam ve Qinghai bölgesindeki tuz gölünde olup % 2-6 B₂O₃ içeriklidir [16].

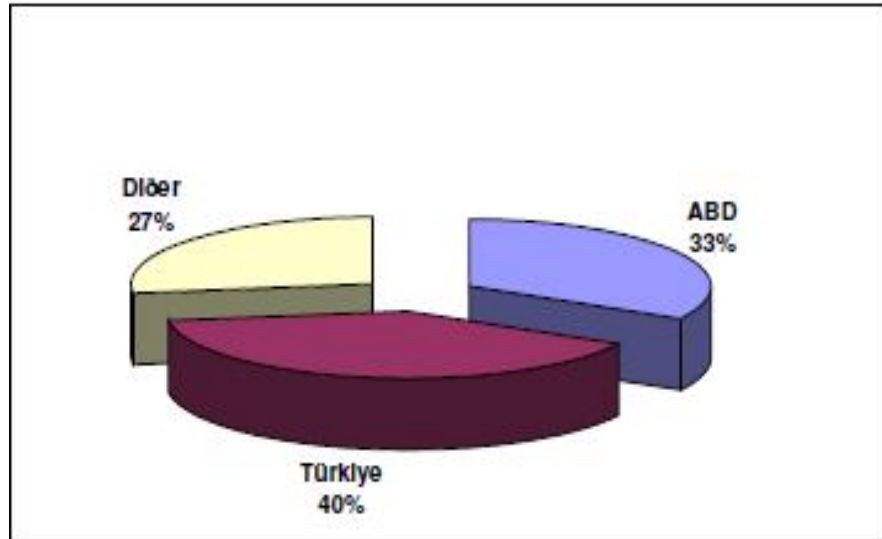
3.4. DÜNYA'DA BOR ÜRETİMLERİ

Dünyada bor üretimi yapan en önemli ülkeler Türkiye, ABD, Arjantin, Rusya, Çin ve Sili'dir. Çizelge 3.3'de ülkeler bazında Dünya B₂O₃ üretimi verilmektedir. Dünya bor madeni üretimi 1970'de 768.000 ton B₂O₃ iken 2004 yılında ise 1.696.000 ton B₂O₃ olmuştur. Ülkemizdeki bor üretimi ise 1970'de 122.000 ton B₂O₃ iken 2004 yılında ise 670.988 ton B₂O₃ 'e ulaşmıştır. ABD'nin bor üretimi ise 510.000 ile 627.000 ton B₂O₃ arasında değişim göstermiştir.

Dünyadaki bor üretim artışının en önemli etkisi, Türkiye bor üretimlerinin artısından kaynaklanmıştır. 2002 yılında B_2O_3 bazında dünya bor üretiminin %33'ü Türkiye'ye, %33'ü ABD'ye aitken; 2004 yılında Türkiye'nin Dünya bor üretimindeki payı %40'a yükselmiştir. Bu yükselme Çizelge 3.3. 'de belirtilmiştir [17].



Şekil 3.1. 2002 Yılı B_2O_3 bazında dünya bor minerali üretimi (%) [17].



Şekil 3.2. 2004 Yılı B_2O_3 bazında tahmini dünya bor minerali üretimi (%) [17].

Çizelge 3.3. Ülkeler bazında dünya B₂O₃ üretimi (Bin Ton) [17].

| Yıllar | Arjantin. | Şili | Çin | Kazakistan | Rusya | Türkiye | ABD | Diğer | Toplam |
|--------|-----------|------|-----|------------|-------|--------------------|-----|-------|--------|
| 1970 | 11 | | 31 | | 94 | 122 | 510 | | 768 |
| 1971 | 12 | | 32 | | 96 | 229 | 515 | | 884 |
| 1972 | 19 | | 32 | | 120 | 248 | 551 | | 970 |
| 1973 | 22 | | 32 | | 120 | 255 | 602 | | 1.031 |
| 1974 | 26 | | 33 | | 140 | 291 | 562 | | 1.052 |
| 1975 | 27 | | 33 | | 140 | 242 | 547 | | 989 |
| 1976 | 28 | | 22 | | 120 | 220 | 572 | | 962 |
| 1977 | 29 | | 27 | | 120 | 301 | 667 | | 1.144 |
| 1978 | 44 | 9 | 27 | | 130 | 346 | 706 | 2 | 1.264 |
| 1979 | 47 | 1 | 27 | | 130 | 281 | 725 | 4 | 1.215 |
| 1980 | 55 | 1 | 27 | | 130 | 320 | 710 | 7 | 1.250 |
| 1981 | 44 | 1 | 27 | | 130 | 333 | 671 | 6 | 1.212 |
| 1982 | 43 | | 27 | | 130 | 306 | 551 | 5 | 1.062 |
| 1983 | 40 | | 27 | | 130 | 260 | 578 | 4 | 1.039 |
| 1984 | 50 | 1 | 27 | | 130 | 331 | 605 | 4 | 1.148 |
| 1985 | 55 | 2 | 27 | | 130 | 259 | 577 | 4 | 1.054 |
| 1986 | 67 | 2 | 27 | | 130 | 349 | 571 | 8 | 1.154 |
| 1987 | 65 | 5 | 95 | | 130 | 374 | 625 | 5 | 1.299 |
| 1988 | 95 | 11 | 95 | | 130 | 473 | 578 | 5 | 1.387 |
| 1989 | 91 | 46 | 74 | | 130 | 447 | 562 | 14 | 1.364 |
| 1990 | 50 | 46 | 75 | | 120 | 476 | 608 | 10 | 1.385 |
| 1991 | 41 | 34 | 93 | | 107 | 460 | 626 | 15 | 1.376 |
| 1992 | 44 | 71 | 127 | 11 | 95 | 402 | 554 | 16 | 1.320 |
| 1993 | 51 | 32 | 155 | 8 | 71 | 410 | 574 | 18 | 1.319 |
| 1994 | 75 | 30 | 188 | 7 | 75 | 433 | 550 | 16 | 1.374 |
| 1995 | 86 | 74 | 140 | 5 | 101 | 435 | 728 | 17 | 1.586 |
| 1996 | 120 | 52 | 157 | 4 | 102 | 494 | 581 | 16 | 1.526 |
| 1997 | 123 | 60 | 140 | 4 | 86 | 475 | 604 | 17 | 1.509 |
| 1998 | 47 | 60 | 140 | 5 | 73 | ⁽¹⁾ 434 | 587 | 16 | 1.438 |
| 1999 | 52 | 70 | 110 | 5 | 100 | ⁽¹⁾ 421 | 618 | 15 | 1.457 |
| 2000 | 87 | 119 | 145 | 5 | 86 | ⁽²⁾ 491 | 546 | 20 | 1.536 |
| 2001 | 107 | 115 | 150 | 5 | 86 | *505 | 536 | 16 | 1.520 |
| 2002 | 86 | 152 | 145 | 5 | 86 | *522 | 518 | 18 | 1.558 |
| 2003 | 92 | 141 | 130 | 5 | 86 | *578 | 560 | 44 | 1.636 |
| 2004 | 95 | 141 | 135 | 5 | 43 | *671 | 562 | 44 | 1.696 |

3.5. BOR'UN METALURJİ ALANLARINDA KULLANILMASI

Boratlar yüksek sıcaklıklarda düzgün, yapışkan, koruyucu ve temiz, çapaksız bir sıvı oluşturma özelliği nedeniyle demir dışı metal sanayisinde koruyucu bir cüruf oluşturu ve ergitmeyi hızlandırıcı madde olarak kullanılmaktadır.

Bor bileşikleri, elektrolit kaplama sanayisinde, elektrolit elde edilmesinde de kullanılmaktadırlar. Borik asit nikel kaplamada, fluoboratlar ve fluoborik asitler ise kalay kursun, bakır, nikel gibi demir dışı metaller için elektrolit olarak kullanılmaktadır [17].

Alaşımarda, özellikle çeliğin sertliğini artırıcı olarak kullanılmaktadır. Bu konuda ferrobora oldukça önem kazanmıştır. Çelik üretiminde 50 ppm bor ilavesi çeliğin sertleştirilebilme niteliğini geliştirmektedir.

3.5.1. Çelik

Çeliğe borun ilave edilmesi temelde alaşımın sertliğini artırmaktadır. Diğer ilave edilen ürünlere göre göreceli olarak daha ucuzdur. Çeliğe ilave edilen bor miktarı ise, istenen sertliğe ulaşılabilme hacmine göre değişmekte olup bor ilavesi sıklıkla %40'ı asmamaktadır.

Bor, çeliğin sertliğini iyileştirmekle birlikte, düşük-çelik alaşımlarının mukavemetini artırarak, büzülme direncini de artırmaktadır. Çelik üreticileri, genellikle bor ürünlerini ferro bor olarak kullanmaktadırlar. Temelde ticari iki ferro-bor bileşiği mevcut olup bunlar %10 ve %17 B₂O₃ içermektedirler.

Karbon-manganez-Bor (C-Mn-B) çelikleri, diğer alaşım çeliklerine nazaran daha ucuz ve benzer sertliğe sahip bir alternatif olarak kullanılabilir. Bor, paslanmaz çeliklere de ilave edilmekte olup, nükleer absorpsiyon için kullanılan çelikler %4'e kadar (genellikle %0,5-1) bor içerebilmektedirler [17].

Diğer karbürlerden farklı olarak, borlar çeliği üretim sırasında sertleştirmedeği için, onu işlemek daha kolay olmakta ve dolayısıyla fabrikasyon zaman ve maliyetini düşürmektedir. Örneğin, otomotiv sektörü için daha kolay şekil alabilmesi amacıyla da ilave edilmektedir. Diğer bir avantaj ise, bor çelikleri ilave ısı iyileştirme operasyonları gerektirmez ve böylece daha fazla enerji tasarrufu ve fabrikasyon zamanının daha fazla azalmasını sağlamaktadır.

Dünya ferro bor tüketiminin yaklaşık %10'u Neodmiyum-Demir-Bor sürekli manyetlerinde yapılır. Dünyada bu endüstri dalında yaklaşık 1.000 ton ferro bor kullanılmaktadır.

Ulaşım sektöründe ise ileri teknolojiye sahip maglev trenlerinin süper iletken ve yüksek yoğunluklu mıknatıslarında kullanılmaktadır.

3.5.2. Borlama

Borlama işleminin, çelik endüstrisindeki uygulamaları azdır. Fe_2B ve FeB çeliğin yüzeyine yayılarak, karbürleşmiş veya nitrürlenmiş çelikten daha sert bir çelik elde edilebilmektedir. Borlanmış çelikler, yüksek derecede korozyona ve aşınma direncine sahiptirler.

Özellikle, hidrolik aletlerin ve bazı petrol-kuyusu delme matkaplarının yüzeylerinin cilalanması gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca, borlama işleminden geçirilmiş malzemeler, otomotiv endüstrisinde sürtünme katsayısını azaltmak ve hareketli aksamaları korumak için kullanılmaktadır. Borlama işlemi, çok farklı ajanlar kullanılarak yapılabilmektedir.

Farklı borlama işlemleri mevcut olup, borlama için bor florid veya bor klorit, ferro bor, bor karbür veya sıvı haldeki metaborat ve borik asit gibi bor ürünleri kullanılabilir. Bor klor gibi bor halidleri, nitrojen veya oksijen gazları ile birleştirilmekte olup, gazlı borlama ajanları kullanılmaktadır [17].

3.5.3. Demir Dökümler

Demir döküm alaşımlarında, bor çok yararlı etkilere neden olmaktadır. %0,03 bor ilavesi aşınma direncini artırmaktadır. %1 bor ilavesi ise sinterlenmiş demirin, sinterleme sıcaklığını önemli oranda düşürmektedir.

Demir döküme, %0,02 -%0,1 oranında bor ilavesi grafitleşmeyi engellemekte ve yüzey sertliğini ve soğuma derinliğini artırmaktadır. Dövme demir dökümlerine %0,001'lik bor ilavesi demir dökümlerde tavlanmayı hızlandırmaktadır.

3.5.4. Süper Alaşımlar

Bor, Ni-Fe-Co süper alaşımlarda temelli alaşımlarda çok düşük oranda kullanılmakla birlikte gerekli bir malzemedir. Bu tür alaşımlar hava-motor araçlarının türbin disk ve tekerlek gibi bileşenlerinde kullanılmaktadır. Bu alaşımlarda bor kullanım oranı %4'e kadar ulaşabilmektedir.

3.5.5. Alüminyum Alaşımları

Alüminyum döküm alaşımlarına, %5 oranına kadar bor ve titanyum ilave edilerek, ince ve üniform bir tane yapısı oluşturulmaya çalışılmaktadır. İnce tane yapısı, gözenekleri azaltır, homojenliği artırır ve mekanik özellikler ile yüzeyi iyileştirir. Çok az miktardaki bor bileşikleri, alüminyum alaşımlarının elektriksel iletkenliğini iyileştirirler.

3.5.6. Diğer Metal Alaşımlar

Bor, diğer bazı metal alaşımlarında yaygın bir sertleşme sağlamakta ve elektriksel kontaklarda kullanılmaktadır.

Bor, bakır alaşımlarında rafinasyon etkisine sahiptir. Elektronik parçalar için, bakır alaşımlara %3 oranına kadar bor ilave edilmektedir.

Bor, lehimleme alaşımı olan nikel-bakır alaşımlarının ergime noktasını azaltır. Bu tip kaynak-lehim alaşımları %6 oranına kadar bor içerirler.

3.5.7. Amorf Metal Alaşımlar

Amorf metaller (camsı metal veya metalik cam olarak da anılmaktadırlar), kristal yapıya sahip değildirler. Kristalleşmeyi önleyen teknoloji ile üretilmektedirler.

Amorf bor-gümüş alaşımları, tüm temel metal sistemleri ile uyumlu olup, nikel, kobalt, bakır, demir alaşımlarında, toz metal işlemlerinde, metal-grafit kompozitleri ve yapıştırılmış plaketli karbidli takımlarda kullanılmaktadırlar. Bor, ferro-bor olarak ilave edilmektedir. Bu malzemeler, elektrik transformelerinde standart levhalar olarak kullanılmaya başlanabilir. Bu durumda, borların kullanımı önemli oranda artabilecektir.

3.5.8. Flakslama Uygulamaları

Borik asit ve alkali metal boratlar, çok geniş bir yelpazedeki metalleri çözüdürürüler; bu nedenle metalurjik uygulamalarda boratların flaks olarak kullanımında büyük bir artış olmuştur.

Çelik yapımında, kolemanit ve az oranda üleksit, florite alternatif bir flaks olarak ABD, Kanada, Almanya ve Japonya'da kullanılmaktadır. Kolemanit kireç stabilizasyonunu sağlamakta ve böylece erime zamanı azaltılmaktadır.

Kolemanit flor ile karşılaştırıldığında, kolemanitin düşük asiditesi nedeniyle refraktörün kullanım ömrünü uzatması çok önemli bir avantajdır. Kolemanit flaks olarak, yüksek karbonlu çeliklerden sülfür ve fosforun elimine edilmesi sırasında çok yararlı bir malzemedir [16].

Boratlar, bakır alaşımlarının ergitilmesinde kaplama flaks olarak kullanılmakta ve boraks ise altın analizlerinde ve rafinasyonunda kullanılmaktadır. Potasyum pentaborat paslanmaz çeliğin lehim kaynağı yapılması sırasında flaks olarak, trimetil

borat ise gaz lehimleme flaksı olarak kullanılmaktadır. Gümüş-pirinç flaksları, borik asit, potasyum borat içeren kompleks potasyum flouorborat ve florür içermektedir.

3.5.9 Elektro Kaplama

Birçok elektro kaplama uygulamasında, bor kimyasalları temizleyici ve buffer (tampon) olarak kullanılmaktadır. Borik asit ve flouorboratlar, yatakların gözeneğini ve çukurunu azaltmak için çok az miktarda kullanılmaktadırlar. Kalay-kaplama tellerinde pickling işleminde %10 flouorborik asit kullanılmaktadır. Galvanizlemede, flouorboratların kullanımı son yıllarda metan sulfonik asit (daha çok çevre dostu olduğu düşünülmektedir) ile rekabet etmektedir.

3.5.10. Nükleer Uygulamalar

Atom reaktörlerinde borlu çelikler, bor karbürler ve titanbor alaşımları kullanılır. Paslanmaz borlu çelik, nötron absorbanı olarak tercih edilmektedir. Yaklaşık her bir bor atomu bir nötron absorbe etmektedir. Bu nedenle, atom reaktörlerinin kontrol sistemleri ile soğutma havuzlarında ve reaktörün alarm ile kapatılmasında bor (B_{10}) kullanılmaktadır. Nükleer atıkların depolanması için de kolemanit kullanılmaktadır.

3.5.11. Bor Fiberleri

Bor fiber kompozitleri, bor fiberleri ile güçlendirilmiş polimer reçinelerden oluşmaktadır. Bor fiber kompozitleri, hava ve uzay araçlarının üretiminde kullanılan ilk ileri kompozit malzemedir. Bor fiberlerinin yüksek maliyetleri kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Bor fiberleri, spor aletlerinden (balıkçılık, golf, kayak, bisikletler) uzay ve hava araçlarına kadar birçok alanda kullanılmaktadırlar.

3.5.12. Uzay ve Havacılık

Borlar, uzay ve havacılık sanayisinin gelişmesine katkı yapmış olan en önemli minerallerdendir. Radarlar, uçaklar, uydular, iletişim sistemleri, sürtünme ve ısıya dayanıklı kompozit malzemeleri basta olmak üzere hemen hemen tüm uzay ve hava

araçlarında, borların birçok kullanım alanı mevcuttur. Askeri hava araçları, füzeler, helikopterler ve uçakların en önemli hammaddelerinden biridir.

Uçak ve havacılık endüstrisinde bor kullanımını giderek artan bir seyir izlemektedir. Aerodinamikteki gelişmeler, yüksek hız kanat uygulamaları, yüksek ısıya dayanımlı gövde, düşük ağırlık yüksek kapasite ve benzeri uygulamalar üzerinde yürütülen tasarım ve geliştirme çalışmaları havacılık ve uzay sanayinde kompozit malzeme kullanımını oldukça yaygınlaştırmıştır.

3.6. BORLAMA

Borlama; termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Borlama, bor elementinin yüksek sıcaklıkta metal yüzeyine yayılması ile yüzeyde borür tabakası elde etme işlemidir. Demir borürler termal ve elektrik iletkenliği gibi özelliklerinden başka yüksek sertlik gibi tipik seramik özellikleri de gösteren bileşiklerdir. Tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu yerler borür tabakası oluşumunun başlangıç noktalarıdır. Bu noktalarda Fe_2B çekirdekleri oluşur ve gelişir. Borlamanın birinci aşamasında borlayıcı ortam ve nesnenin yüzeyindeki reaksiyon partnerleri arasında reaksiyon oluşur. Taneler yüzeyde çekirdek oluşturmaktadır. Borlama süresi ile çekirdek oluşumu artar ve ince bir bor tabakası elde edilir. Bor, Fe_2B ve FeB yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Borlama işlemi sırasında, ilk borür çekirdeği numunenin yüzeyinde oluşmaktadır [17].

Oluşan ilk borür çekirdeği numune içinde büyür. Bor atomları kafes yapının 001 doğrultusunda daha hızlı yayıldığı için FeB ve Fe_2B 001 boyunca yönlenir. Bu yüzden borür taneleri 001 yönünde yüzeye dik daha hızlı büyür. Borür tanelerinin diğer yönlerde büyümesi daha yavaştır. Bu nedenle kolonsal yapı oluşur. Önce Fe_2B fazı oluşur, ortamda yeterince bor konsantrasyonu varsa FeB fazı da oluşur. İlk önce oluşan Fe_2B fazı uzun bir sürede büyümektedir. Borür tabakaları çeliğin yüzeyinden ileriye doğru FeB_x , FeB , Fe_2B yapısında oluşur. Borlamanın son aşamasında sadece FeB fazı oluşur. FeB fazı Fe_2B fazından daha kısa sürede büyür. Bu yüzden FeB fazının dokusu Fe_2B fazı kadar güçlü değildir [18, 19].

Borlama sonucu oluşan borür tabakasının özelliklerini şöyle sıralayabiliriz:

- a) Çok yüksek sertlik
- b) Yüksek ısınma direnci
- c) Alt yüzeye iyi tutunma özelliği
- d) Yüksek sıcaklık dayanımı
- e) Yüksek ısılarda sertliğini koruma özelliği
- f) Demir malzemelerinkine uygun genleşme kat sayısı

3.6.1. Borlama Yöntemleri

3.6.1.1. Katı Borlama

Yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içinde 800-1000°C sıcaklıklarda 4-10 saat bekletilerek borlama işlemi yapılır. Borlama tozu ısıya dayanıklı çelik saç kutu içine konur ve borlanacak parça bu tozun içine gömülür. Bu toz, parçanın tüm yüzeylerinde en az 10 mm kalınlığında olmalıdır. Kutuların ağzı bir kapak ile kapatılarak önceden belirli bir sıcaklığa ısıtılmış fırına konur ve fırın kapağı kapatılarak fırın içi sıcaklığı borlama sıcaklığına yükseltilir. Bir süre bekletildikten sonra kutu fırından alınarak soğutulur ve parça içinden çıkarılır. Bu sırada çelik kutunun kapağı kutunun üzerinde kendi ağırlığı ile durmalıdır. Sementasyonda olduğu gibi sıkıca kapatılmasına gerek yoktur. Eğer işlem normal atmosfer de yapılacaksa kapak sıkıca kapatılır. Bu yöntem koruyucu gaz atmosferi içinde de yapılabilir. Yöntem ucuzdur ve özel bir teknik gerektirmez. Borlama ortamının ana bileşimi borkarbür, ferrobör ve amorf bördür. Bor karbür diğerlerine göre ucuzdur. Amorf borun saf halinin çok pahalı oluşu ve saf ferrobörün eldesinin endüstriyel olarak çok zor olması bu metotların bırakılmasına neden olmuştur. Diğer bor verici toz ortam bor karbür ise amorf bor ve ferrobörden ucuz olup, bileşimi zamana göre sabittir. Elverişli tane boyutunun ve etkin aktivatörün seçimi ile iyi sonuçlar alınmıştır. Bütün bunlara rağmen amorf bor tuzuna aktivatör olarak amonyum klorür eklenerek yapılabilir. Ferrobör ortamında yapılan borlama sonucu elde edilen tabaka teknik açıdan kullanılamaz. Aktivatör dolgu maddeleri ile kullanılabilir [17,18,19].

Katı ortam borlamasında kullanılan bazı borlama bileşiklerine ait örnekler % ağırlık olarak aşağıda verilmiştir [20].

- a) % 60 B₄C + %5 B₂O₃ + %5 NaF + %30 Demir oksit
- b) % 50 Amorf bor + %1 NH₄F.HF + %49Al₂O₃
- c) %100 B₄C
- d) %(7,5-40) B₄C + % (2,5-10) KBF₄ + %(50-90) SiC
- e) %84 B₄C + %16 Na₂B₄O₇
- f) %95 Amorf bor+%5 KBF₄
- g) %20 B₄C + %5 KBF₄ + %75 Grafit
- h) %(40-80) B₄C + %(20-60) Fe₂O₃
- i) %80 B₄C + %20 Na₂CO₃

3.6.1.2. Sıvı Borlama

Bor bileşikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan erimiş tuza, is parçasının daldırılması yöntemidir. Daldırma süresi borlama süresidir. Borlama işlemi 900-1100 °C sıcaklıkta ve 2 - 9 saat süre ile yapılır. Bu yöntemin dezavantajı sıcaklıktır. Sıcaklığın 850°C nin altına düşmesi durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalacağından borlama imkansız hale gelecektir.

Sıvı ortamda borlama tuz eriği içinde elektrolitli veya elektrolitsiz (daldırma) ve derişik çözeltide olmak üzere yapılabilir [21].

Daldırma Yöntemi

Elektrolizsiz ergitilmiş tuz eriyiği veya normal sıvı ortam borlaması olarak da adlandırılır. Bu yöntem genelde B₄C'in katı fazı ile sıvı sodyum klorit (NaCl) den ibarettir. Bu da boraksın viskozite azaltma yöntemleriyle elektrolit olarak erimesi esasına dayanır. Ortamın esas bileşemi boraks olup, aktivatör olarak B₄C, SiC, Zr, B, vs. kullanılır. Klorürlerin karışımı veya klorürler ile floritlerin karışımına bor karbür ilavesi ile yada erimiş boraks banyolarına bor karbür ilave edilerek yapılır.

Daldırma yöntemi ucuz ve fazla ihtisas istemez. Fakat termal şok, borlamadan sonra parçanın temizlenmesi, büyük boyutlu ve kompleks parçalara uygulanmaması, metodun kötü yönleridir. Çalışma sıcaklığı 800-1000°C ve borlama süresi 2-6 saattir.

Elektroliz Yöntemi

Yüksek sıcaklıkta tuz banyosu, elektrolit iş parçası katot ve grafit çubuk anot olarak işlem gerçekleştirilir. Tuz banyosu ise ergitilmiş boraktır. Bu yöntem laboratuvar çalışmalarında gayet iyi sonuçlar vermiştir. Ancak ergimiş boraksın viskozitesinin çok yüksek olması, endüstriyel uygulamalarda sıcaklığın homojenliğini engeller yani boraks eriğinin yüksek viskozitesi 850°C' nin altında borlamayı pratik olarak imkansız kılar. 850°C' nin üzerinde ise banyodaki düzgün sıcaklık dağılımı oldukça güçleşir [21].

Farklı akım şiddetleri, özellikle karmaşık şekilli parçalarda borür tabakasının kalınlığının düzgün olmasına neden olur. Bu yöntemde iş parçası bir tuz tabakasıyla kaplanır ki bunu temizlemek oldukça masraflıdır. Elektrolizle borlama da anodun bir tarafında ince borür tabakası oluşur. Bu da gölge etkisi yaparak değişik ve düzensiz kalınlıklara sebep olur. Sodyum klorür ve borasit anhidritin karışımı ile yapılan çalışma sonucu banyodaki sıcaklık dağılımının eşit olduğu, parçaların daha kolay yıkandığı ve viskozitenin azaldığı görülmektedir. Ayrıca NaCl, B₄C ve NaBF bileşiminden oluşan tuz eriğinde diğer problemler çıkmaktadır. Bu yöntemin tesisatı pahalıdır. Karışık şekilli parçalarda homojen kalınlıklı tabaka oluşumu oldukça zordur. İşlem 800-1000°C arasında 0,5-5 saat süre ile yapılır. Banyo bileşimlerinde 0.2 A/cm² akım yoğunluğu, 600-700°C sıcaklık ve 2-6 süre şartlarını kullanarak sade karbonlu çelikte 15-70 µm kalınlıkta borlu tabaka elde edilmiştir. Elektrolizin ana bileşimi boraks ve borik asittir. Ana bileşene ilaveten NaF, NaCl gibi aktivatörler kullanılır [21].

Derişik Çözeltide Borlama

Boraks ve Borasitli anhidriti içeren derişik ortamlarda yüksek frekanslı ısıtma ile deneyler yapılmıştır. Belli bir bor difüzyonu sağlandığı halde birleşik tabakalar elde

edilememiştir. Boraks ve borasidi anhidriti içeren değişik miktarlı çözeltilerde yapılan deneyler kapalı borür tabakası vermemiş ve 1000°C 'de 10 dakika süre ile 0,1 A/cm² ve 450 kHz frekans ile doymuş boraks çözeltisinde tabakalar elde edilmiştir. Bu yöntem esnasında açığa çıkan bor halojenleri ilgili (uygun) asit oluşumları altında su ile kuvvetli reaksiyona girerler. Bu sebeple derişik çözeltide borlama başarılı olmamıştır [21].

3.6.1.3. Gaz Borlama

Gaz ortamın bileşimi, basıncı ve gazın tanktan akış hızı borlamaya etki eden faktörlerdir. Gaz ortamda borlama yapmak için bor verici ortam olarak bor halojenleri, diboran B₂H₆ ve organik bor bileşikleri kullanılır. Bu bor vericilerden BF₃ , BCl₃ , BBr₃ saf veya su ile; B₂H₆ su ile ve (CH₃)₃ B/(C₂H₅)₃B olarak kullanılırlar. Bunlardan diboran (B₂H₆) ile beraber bor halojenleri kullanılırsa çok olumlu sonuçlar elde edilir. Fakat diboran zehirli ve patlayıcıdır. Ayrıca diboranın hidrojen ile inceltmesi çok pahalı olup 150°C 'ye yakın sıcaklıklarda ayrışır. Bu nedenle sıcak bir parça üzerine uygulamak için soğutmak gerekir. Bu da işlemi karışık hale getirir. Bütün bunlara rağmen birçok araştırmacı diboran ve su ile gaz ortamda borlamayı yapmışlardır [22].

Organik bileşiklerden bortrimetil ve bortrietil yüksek oranda karbon ihtiva ettikleri için, borlama sonucu oluşan borür tabakası yanı sıra yüksek karbonlu bir tabakada oluşur. Böylece borlama ile yayılan karbon oluşan tabaka kalıntısını bozar. Bor halojenleri ise uygun halojen bileşimlerinin teşekkülü ile korozyona neden olurlar. Amerika'da geliştirilen bir yöntem ise bor ve borkarbürden ayrışan bir gaz fazıyla yapılan borlamadır. Bunun esasını ise , bortriklorit ile hidrojen karıştırılarak 1300-1500°C de sıcak grafit çubuk üzerine gönderilir ve bor karbür oluşumu sağlanır. Bu yöntem ilk etapta yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelere uygulanmaktadır. Bu yöntemle Fe esaslı malzemeler yanı sıra silika, mullite, Ti, Ni, Co ve W başarıyla borlanmıştır.

Bor triklorit ile yapılan borlama esnasında ayrışarak serbest kalan klor, ortamdaki mevcut hidrojen ile birleşerek HCl oluşturur. Oluşan klor ve HCl, atmosfer ve

sıcaklık oranlarına göre borlanan demir ile reaksiyona girer. Bu durum ise gaz ile borlamada asıl problemi teşkil eder. Çünkü borlama çelikte yapıldığında demir klorit oluşur. Bu ise demir borürün oluşumunu engeller ve böylece korozyona neden olur.

Eğer işlem gazı %150 oranında Azot ve geri kalanı Hidrojenden olursa az miktardaki bortriklorit aktif bor taşıyıcı olarak etkide bulunur. Bunun sonucu olarak da borür tabakasının yapısı pratik olarak atmosferde en az miktarda bulunan BCl_3 'ten dolayı BCl_3 'ün miktarından bağımsızdır. Bu yöntemde ise sürelerin kısa olması gerekir. Gaz ortamda borlama esnasında bor verici olarak Hidrojen ve Azottan oluşan taşıyıcı gaz içindeki bortriklorit olursa ve BCl_3 ile Hidrojen oranları ayarlanırsa işlem hacmi HCl ve H_2 'den oluşan gaz ile dolarsa parça yüzeyi korozyona uğramaz. Aşağıdaki gaz bileşenleri kullanılarak borlama yapılabilir:

- a) $BCl_3 / H_2 = 1/15$
- b) B_2H_6
- c) $B_2H_6 / H_2 = 1/50$
- d) $BCl_3 + H_2$
- e) $(C_2H_5)_3 B$
- f) $(CH_3)_3 B$

3.6.1.4. Plazma Borlama

Gaz ortamda 300-700 Pa basınçla borlama yapmak mümkündür. İşlem sıcaklığı diğer borlama yöntemlerine kıyasla düşmekle ve borlama süresi kısalmaktadır. Reaktif gazın daha iyi kullanımı ile işlem atmosferinde BCl_3 buharının miktarı azaltılır. Bu yöntemde işlenen parça yüzeyinin aktiflenmesi katodik püskürtmeden dolayı (özellikle işlemin başlangıç aşamasında , yani ısınma esnasında) akkor ışık ile başarılıdır [23].

Yüzey diffüzyonu ve kimyasal emilme gibi yüzey işlemlerinin büyük ölçüde yükseltilmiş yüzey enerjisinden dolayı yüzeydeki kimyasal reaksiyonlar katalitik etki ile hızlanırlar. Bunun sonucu oluşan iyon ve elektronlar elektrik alanına etkide bulunurlar. Sistemi besleyen enerji, bu iyon ve elektronlar tarafından iletilir.

Elektriksel alanın etkisi altında iyon ve elektronlar gaz moleküllerin bu sıcaklığa ait ortalama enerjisinden daha yüksek bir enerji kazanırlar. Elektronlar ile moleküllerin çarpışmasında sonuç olarak moleküllerin bir kısım enerjisi iletilir. Bu durum, bu şartlar altında, sistem içindeki partiküller (iyonlar, atomlar, moleküller)'in uygun sayıları yüksek enerji ile mevcut olduklarından ve atmosferdeki bu sıcaklıkta dengeli enerji dağılımını anormal akkor ışık saçılımı olmadan karşılanabildiği için başarılıdır.

Gaz ortamda termik aktiflenme sonucu meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aktiflenmiş malzeme yüzeyinin katalitik etkisi ile hızlanırlar. Bu yöntem genelde BCl_3 - buharı ile hidrojenin oluşturduğu gaz karışımında yapılmaktadır. Bu ortamda BCl_3 - buharı ve hidrojenden oluşan atmosfer içinde plazma (iyon) borlama esnasında kloritin hidrojen ile indirgenmesi borür tabakasının oluşumuna ait ayrıntılı rolü oynar. İlgili reaksiyon, indirgenme reaksiyonunun tahrik edildiği katodik bölge içindeki atomik hidrojenin varlığına bağlı olarak akkor ışık saçılımı ile oluşur.

Reaksiyon sonucu açığa çıkan bor katodik püskürtme ile aktiflenen malzeme yüzeyine emdirilir. Reaksiyon gidişinin yükseltilmiş hızı gaz karışımındaki fazla hidrojene bağlıdır.

BCl_3 buharı ve hidrojen karışımının kullanılmasında hacmin %10'unu teşkil eden BCl_3 miktarı ile gaz fazındaki kimyasal reaksiyonlar ile kimyasal emilmiş bor miktarı ve hatta iş parçasının kenar tabakasına borun yayılması arasındaki dinamiksel denge elde edilir. Karışımında BCl_3 - buhar kısmının artması gevrek ve gözenekli tabakaların oluşmasına neden olur [23].

3.6.1.5. Macunlama (Pasta) İle Borlama

Borlama için kullanılacak tozlar macun haline getirilir ve borlanacak parçanın üzerine 2 mm kalınlıkta sürülür.

Parça yüzeyine sürülen macun derhal sıcak hava akımında, ön ısıtma odasında veya kurutma fırınında maksimum $150^{\circ}C$ ' de kurutulması gerekir. Gerektiği takdirde macun üzerine tekrar birkaç kez daha sürülebilir. Kurutma işleminden sonra macun

ile kaplanmış parçalar önceden ısıtılmış fırına konur ve fırın ağzı kapatılarak borlama sıcaklığına ısıtılır. Belirli süre bu sıcaklıkta tutulan parçalar dışarı alınır ve soğumaya terk edilir. Parçalar soğuduktan sonra yüzeyinde yapışmış olan artıklar temizlenir ve böylece borlama yapılmış olur.

Bu yöntemle borlama mutlaka koruyucu gaz ortamında yapılması gerekir. Aksi takdirde kötü bir borür tabakası oluşur. Bu yöntemle kısmi borlama yapılabilir. Bor korbür (B_4C), kriyolit (Na_3AlF_6) ve bağlayıcı olarak da hidrolize edilmiş etilsilikat karışımından macun yaparak borlama yapılmıştır. Bu yöntemde kullanılan koruyucu gazlar; Argon, Formier Gazı, NH_3 ve saf azottur [23].

3.6.2. Borlamada Meydana Gelen Borür Tabakası ve Geçiş Bölgesinin Oluşum Mekanizması

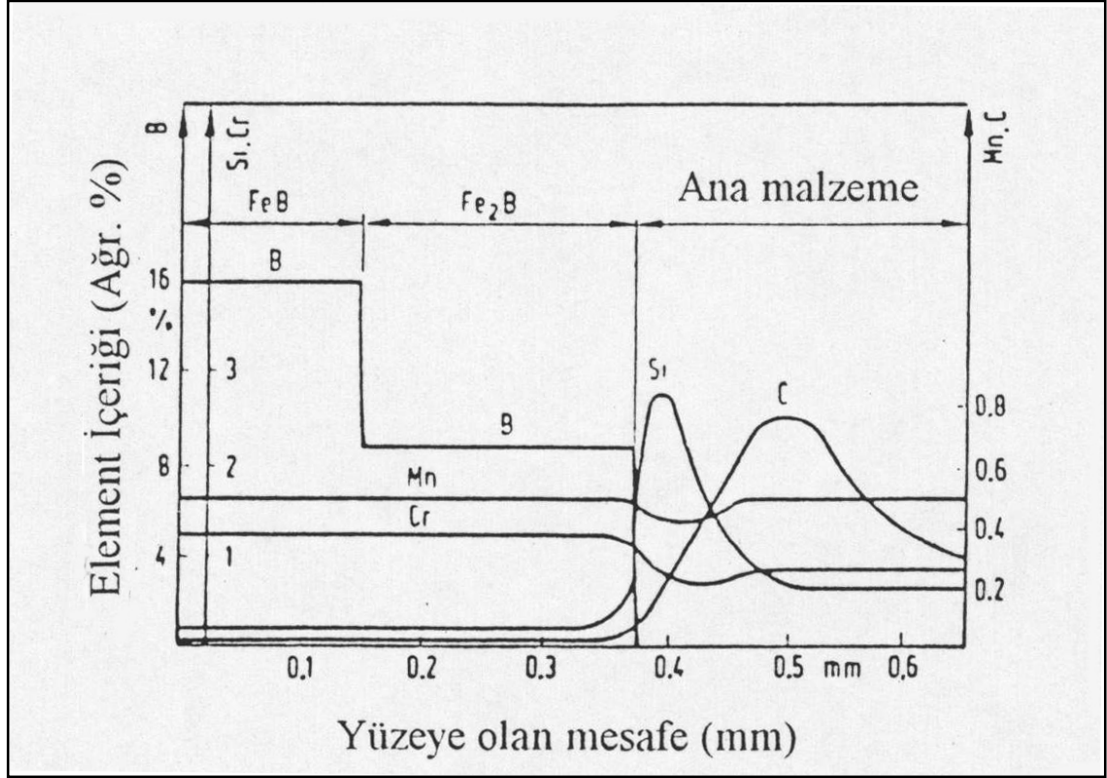
3.6.2.1. Borür Tabakasının Oluşumu, Büyümesi ve Geçiş Bölgesi

Borlama işleminin başlangıç safhasında tane sınırları, dislokasyonlar ve atom boşlukları gibi mikro hataların bulunduğu bölgelerde olduğu kadar, yüzeylerdeki pürüzler ve çizikler gibi makro hataların olduğu metal yüzeyindeki daha reaktif noktalarda da Fe_2B çekirdeği oluşur ve büyür. Bu oluşumu borca daha zengin bileşiklerin çekirdeklenmesi takip eder.

Yüksek saflıktaki demirde olduğu gibi, demir-bor reaktifliğinin çok düşük olduğu şartlarda, bu noktalardan sadece bir kaçı reaksiyona girer ve rast gele dağılmış reaksiyon ürünü adacıklar meydana gelir. Ortamın bor potansiyelinin daha yüksek olduğu durumlarda, metal yüzeyindeki daha az reaktif olan noktalarda devreye girerek sürekli bir tabaka oluşur. Bu durum, daha düşük bor potansiyelli ortam ile daha reaktif metal şartlarında da sağlanabilmektedir .

Borlama esnasında bor kristallerinin tercih yönü yayınma mekanizmasına bağlıdır. Bor'un yayınma mesafesi, borür tabakasından uzundur. Fakat borür tabakasında bor yoğunluğu çok daha yüksektir.

Borür tabakasında ve alt bölgelerde bor ve diğer elementlerin dağılımı Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Matriste ve borür tabakasındaki bor ve diğer elementlerin, yüzde ağırlık olarak değişimleri [21,22].

Demir esaslı malzemelerin borlanması esnasında, kolonsal kümeler oluşturan borür kristalleri FeB/Fe₂B ve/veya Fe₂B/FeB ara yüzeylerinde dişe benzer morfolojiler oluşturarak büyümektedirler.

Borürlerin kolonsal olarak büyümesi, hacim merkezli tetragonal Fe₂B kristallerinin, [001] yönünde bor atomlarının yayılımı ile açıklanmaktadır.

Malzeme ve işlem şartlarına bağlı olarak tek fazlı veya çok fazlı tabakalar elde edilmesine ve esas malzeme ile tabaka yüzeylerinde farklı morfolojilerin olabilmesine rağmen, pratikte, tek fazlı (Fe₂B) ve parmaklı türde (girintili-çukuntulu) borür tabakası, daha sonraki ısıl işlemlere uygunluğu ve FeB'a göre daha az gevrek olması sebebiyle tercih edilmektedir.

Fe₂B tabakasının büyümesi konusunda iki mekanizma ileri sürülmektedir;

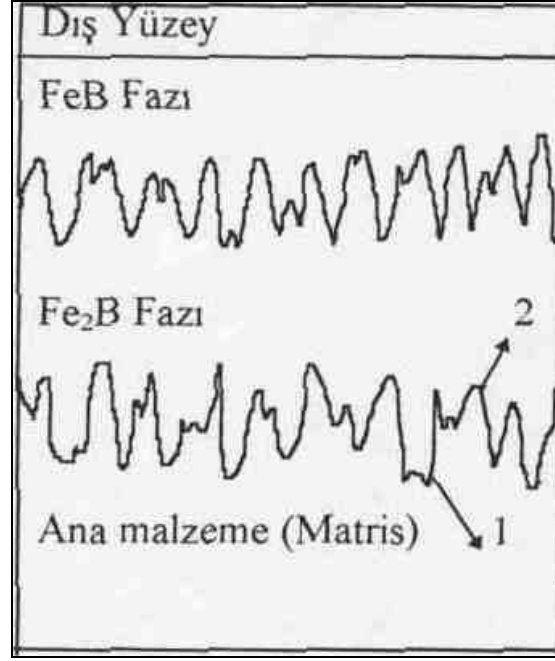
Difüzyon kanalı büyüme mekanizmasına göre; ortagonal prizma, bor atomlarının yayınmasını kolaylaştıracak en büyük ara kesite sahiptir ve Fe₂B kristalinde, [001] doğrultusunda, bor atomları için bir yayınma kanalı oluşturur.

Bor tabakasından borür ve esas metal ara yüzeyine sürekli olarak yayılan bor atomları, borlama tabakası yüzeyine dik doğrultuda Fe₂B kristalleri oluşturur ve bu kristaller kolonsal bir şekilde içeriye doğru büyür [22].

Difüzyon kanalı büyüme mekanizması, Fe₂B'un kuvvetli bir tercihli yönlenmeye sahip olmasına rağmen, Fe₂B/Fe ara yüzeyinde düşük veya ihmal edilebilir bir kolonlaşma göstererek büyümesini veya kristalografik bir tekstürün olmadığı durumda ara yüzeydeki kolonlaşmayı açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Bu konuda, uçtan büyüme mekanizmasının daha geçerli olduğu ileri sürülmektedir.

Uçtan büyüme mekanizmasına göre; ana malzemenin bileşimine ve işlem şartlarına bağlı olarak başlangıçta oluşan Fe₂B çekirdeği iğnesel bir şekilde büyür ve bor gradyanı boyunca yönlenir. Bu durumda Fe₂B çekirdeğinin ucu civarında oluşan bölgesel yüksek gerilme alanları ve kafes distorsiyonları tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlar. Uçtan büyüme mekanizmasında, Şekil 3.4'te görüldüğü gibi demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan tabaka ile ana malzeme ara yüzeyindeki kolonsallık 1 noktasında 2 noktaya göre daha yüksektir.

Çok fazlı borür tabakaları oluşumunda, FeB'nin büyüme mekanizması, ana malzeme üzerindeki Fe₂B'nin büyüme mekanizmasına (uçtan büyüme) benzeyebilir. Aynı tabaka için FeB/Fe₂B ara yüzeyindeki kolonsallığın Fe₂B/matris ara yüzeyindekinden daha az olması oldukça dikkat çekicidir. Bu durum, mevcut fazların mekanik özelliklerindeki farklılıklarla ilişkili olabilir. Fe₂B, nisbeten sünek olan ana malzemede büyüyen bir faz iken FeB, Fe₂B üzerinde yani daha sert bir yapıda büyüyen bir fazdır. Buradan FeB'nin, Fe₂B'den daha sert olabileceği sonucu çıkarılabilir. Bu farklılıklar, bölgesel gerilim oluşumlarına ve/veya ara yüzeylerde kafes distorsiyonlarına sebep olabilir [23].



Şekil 3.4. FeB ve Fe₂B tabakalarında, Demir-Bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterimi [21,22].

Borür büyümesinin bir dahili süreç olduğu göz önüne alındığında, yani tepkimelerin tek fazlı tabakalarda Fe₂B/matris ve çok fazlı tabakalarda FeB/Fe₂B ara yüzeylerinde gerçekleştiği düşünüldüğünde, oluşan bileşiklerin dış yüzeylerinin kristal yapılarının düzensiz ve mekanik olarak zayıf olması muhtemeldir. Bu durum mekanik aşınma deneyleri ile doğrulanmaktadır.

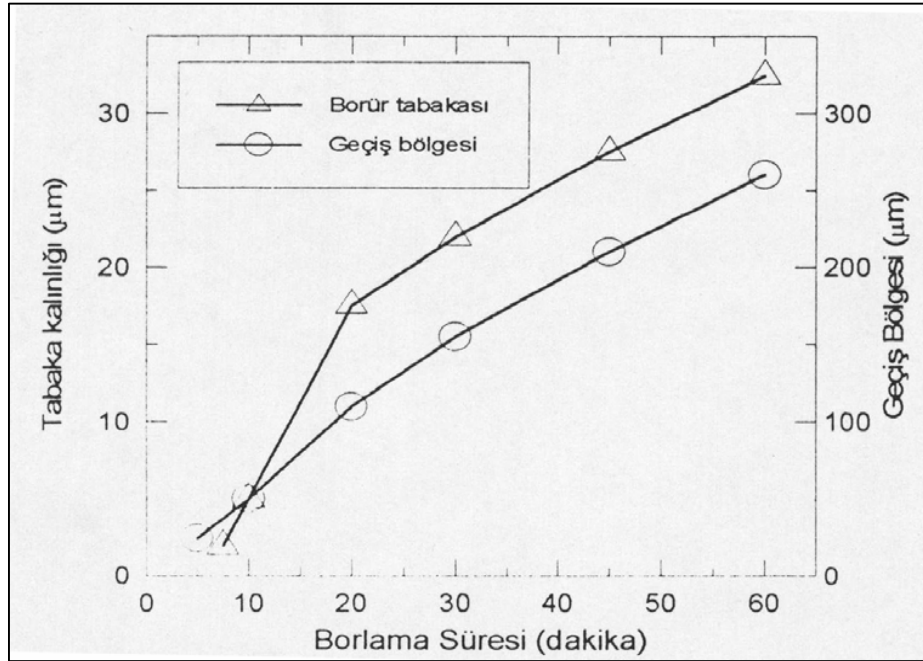
Borlama işlemi esnasında çelik bileşiminde bulunan elementlerin yeniden dağıldıkları ve bu arada FeB ve Fe₂B tabakalarının, karbon ve silisyumu çözündürme yeteneği olmamasından dolayı, bor yayını esnasında C ve Si'un borür tabakasından içeriye doğru itildikleri ve bunun sonucu olarak borür tabakası ile borlanan metal matris arasında "geçiş bölgesi" olarak isimlendirilen bir yapının meydana geldiği bilinmektedir.

Geçiş bölgesi, mikroyapı itibarı ile esas malzeme yapısından farklı bir görünüme sahiptir ve borür tabakasına göre daha kalındır. Borür tabakası tarafından karbonun içeriye doğru itilmesi sonucunda geçiş bölgesinde, esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunacağı, çeşitli araştırmacılar tarafından ileri sürülmektedir.

Bölgedeki bor dağılımını otoradyografi yöntemi ile inceleyen, geçiş bölgesi kalınlığının, normal metalografik yöntemle belirlenene göre daha büyük olduğunu belirlemişlerdir. Aynı yöntemi kullanan , geçiş bölgesinin, borür tabakasından 10-15 kat kadar fazla bir kalınlığa sahip olduğunu tesbit etmiştir.

Genel olarak, geçiş bölgesindeki tane boyutu, ana malzeme boyutuna göre daha büyük olduğu halde, sinterlenmiş Fe-C alaşımlarında bu bölgede tane büyümesine rastlanmadığı ileri sürülmektedir.

Ck 15 çeliğinde borlama süresine bağlı olarak borür tabakası ve geçiş bölgesi kalınlıklarının farklı tarzlarda arttığını belirtmektedir (Şekil 3.5).



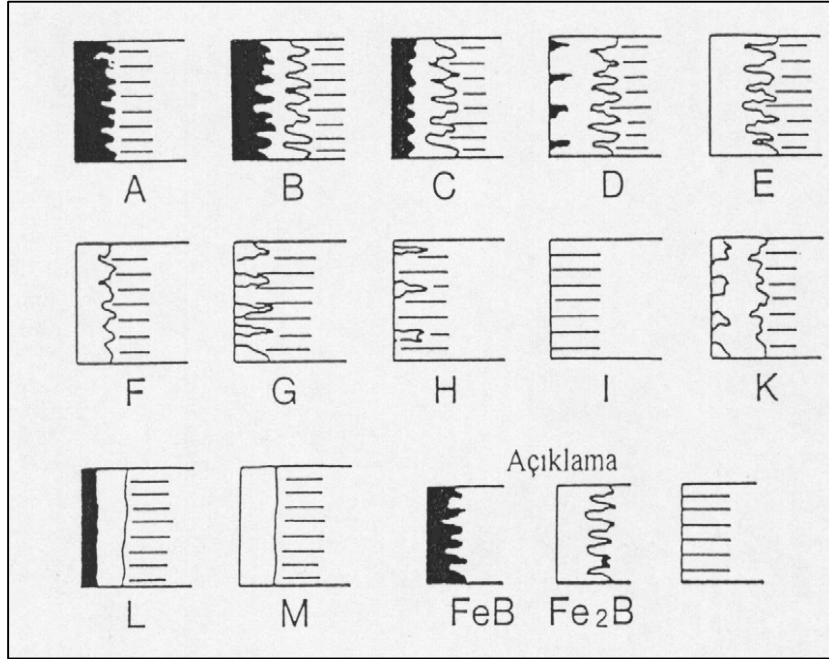
Şekil 3.5. Fe₂B ve geçiş bölgesi kalınlığının borlama süresi ile değişimi [39].

3.6.2.2. Borür Tabakası Çeşitleri ve Borür Tabakası Kalınlığı

Çeşitli borlama yöntemleri ile 14 farklı yapıda borür tabakası elde edilebilmektedir. Kunst ve Schaaber tarafından geliştirilerek düzenlenen sistematik sınıflandırma Şekil 3.6' da gösterilmiştir.

Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine, borlanan malzemenin bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olarak; ya düz bir formda veya parmaklı

formda olabilir. Tabaka tiplerinden hareketle bazı tabaka özelliklerinin belirlenebileceğini söylemek mümkündür. Bu özel tabaka tipleri aşağıdaki gibi karakterize edilebilir:



Şekil 3.6. Borür tabakası çeşitleri [39].

- A: Tek fazlı tabaka, sadece FeB
- B: İki fazlı tabaka, Fe₂B ve FeB
- C: İki fazlı tabaka, B'dekinden daha ince bir FeB tabaka.
- D: İki fazlı tabaka, yalnız FeB dişleri izole edilmiş
- E: Tek fazlı tabaka, sadece Fe₂B, kuvvetli dişler
- F: Tek fazlı tabaka, sadece Fe₂B, daha az kuvvetli dişler
- G: Fe₂B dişli özel tabaka
- H: Fe₂B dişleri çok izole edilmiş tabaka
- I: Geçiş bölgesi
- K: Bozulmuş tabaka
- L: İki fazlı tabaka, düz yani parmaksı değil
- M: Tek fazlı tabaka, FeB ve Fe₂B, düz

Endüstride E ve F tipi yani tek fazlı borür tabakası (Fe_2B) tercih edilmektedir. Bu tabakalar, düşük kırılma değeri sahiptir ve ana malzemeye, borlu tabakanın özelliklerini olumsuz yönde etkilemeden; borlama sonrası ısı işlemler uygulanabilir.

Borür tabakasının kalınlığı, borlanan parçanın kullanım şartlarına göre; borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi, işlem süresi ve borlama sıcaklığına bağlı olarak belirli sınırlar dahilinde istenilen kalınlıkta ayarlanabilir.

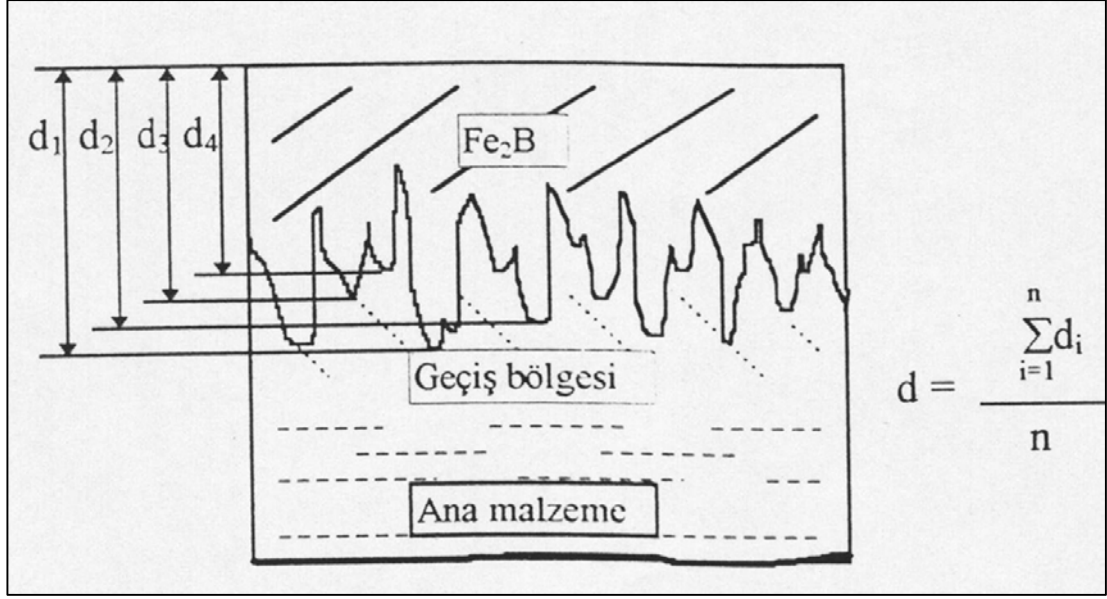
Genellikle erozif aşınmaya maruz tabakaların, "kalın" (örnek olarak, seramik endüstrisinde kullanılan pres takımları vb.), adhezif aşınmaya maruz tabakaların, "ince" (zımba takımları vb.) olması istenir.

Teorik olarak, adhezif aşınmayı önlemek için 5 μm 'lik tabaka kalınlığı yeterlidir. Ancak, alaşımsız ve az alaşımlı çeliklerde olduğu gibi tabaka geometrisinin parmaklı olduğu durumlarda, bu kalınlıkta bir tabaka elde etmek mümkün değildir. Yüksek alaşımlı çeliklerde 15-20 μm kalınlık uygundur.

Takım çeliklerinde, tabaka kalınlığının 75-100 μm ' yi geçmemesi önerilir. Tabaka kalınlığı arttıkça tabakanın gevrekliği de artacağı için, özellikle çift fazlı (Fe_2B+FeB) tabakalarda, tabakanın çok kalın olmamasına dikkat edilmelidir.

Alaşım elementlerinin oranı arttıkça çelik içerisine bor yayılımı güçleşmektedir. Ayrıca, yüksek alaşımlı çeliklerde oluşan borür dişleri daha yoğun, daha üniform ve kapalıdır [39].

Borür tabakaları iğnesel ve değişken bir formda olduklarından, tabaka kalınlığının tanımlanmasında güçlükler çıkmakta ve farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Literatürde tabaka kalınlığı, genellikle tabakanın dış yapışı, düz bir düzlemlerle karşılaştırılarak ve bor dişlerinin bu düzleme göre ortalama değeri alınarak (Şekil 3.7.) belirtilmektedir.



Şekil 3.7. Borür tabakası kalınlığının tanımlanması d: Tabaka kalınlığı, n: Bor dişi sayısı [26].

3.6.2.3. Borür Tabakasının Aşınma Dayanımı

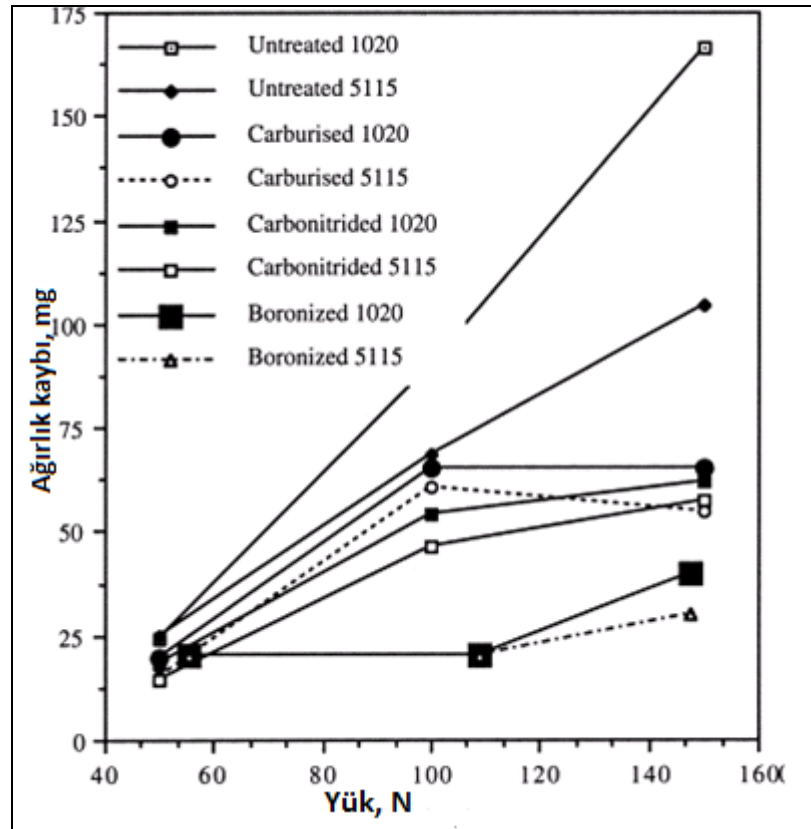
Makine parçalarının ve mekanizmaların ömrü ve güvenilirliği yüzey özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Korozyon, aşınma ve yorulma kırılmasının oluşumu yüzeyden başlar [24]. Aşınma dayanımı ve sürtünme katsayısı bir sistem özelliği olmakla beraber malzeme sertliği ile doğrudan ilgilidir. Borlanmış tabakanın aşınma dayanımı, tabakanın tek veya çift fazlı olusuna ve oluşum biçimine bağlıdır. En az aşınma Fe_2B fazında, en fazla aşınma ise daha sert olan FeB fazında olmaktadır. Çünkü daha sert olan FeB fazı, Fe_2B fazından daha gevreklerdir.

Bor elementinin oksijene afinitesi yüksektir. Bu nedenle bor, yüzeyde koruyucu bir oksit tabakası oluşturmakta, bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi görüp sürtünme katsayısını düşürerek yüzeylerin biri birine kaynamasını da önlemektedir [25].

Borür tabakasına aşınma testi uygulanmış, borür yüzeylerindeki aşınma miktarının (10^{-6} - 10^{-5} mm³/m) metal alt tabakanın aşınma miktarından (10^{-2} - 10^{-1} mm³ /m) çok düşük olduğu gözlenmiştir. Bu aşınma test sonuçlarının farklılığı borürler ile malzemenin farklı sertlik ve aşınma özelliklere sahip olmasındandır [26].

3.6.2.4. Borür Tabakasının Korozyon Dayanımı

Borür tabakasının suya ve atmosfere karşı korozyon direncinin düşük olmasına karşılık, bazı asitlere ve sıvı metallere karşı direnci yüksektir. Özellikle HCl, H₂SO₄ ve H₃PO₄ gibi asitlere ve alüminyum, kurşun ve çinko gibi metallerin sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon direnci çok yüksektir [26].



Şekil 3.8. Aşınma dayanımı (yük 100N) [27].

BÖLÜM 4

KOROZYON

4.1. KOROZYONUN TANIMI VE MEKANİZMASI

Korozyon en geniş tanımıyla, metal ve alaşımlarının çevreleri ile girdiği reaksiyonlar sonucunda metalik özelliklerinin bozulmasıdır. Diğer bir ifade ile korozyon, metal yapı alaşımlarının, elektrokimyasal özellikleri ve buldukları ortamın etkisi ile süreye bağlı olarak tahrip olmaları şeklinde tanımlanabilir.

Bakır ve altın gibi metaller doğada saf olarak bulunmazlar. Metaller doğada kimyasallarla karışık ve dengeli bir halde oksit, sülfat ve karbonat türevleri olarak bulunurlar. Metal, bu karışımlardan ayrıştırılarak endüstride saf olarak kullanılır hale getirilir. Bu şekilde saf olarak kullanılan metal atmosfer şartları, ısı, rutubet, basınç, diğer metal veya malzemelerle temas, metalin kendi kompozisyonu gibi etkenler altında, kullanılmakta oldukları saf hallerinden tekrar doğada bulunmuş oldukları hallerine, başka bir deyişle doğal hallerine dönme eğilimi gösterirler. Bu sebepten dolayı metaller buldukları ortamda reaksiyona girerek, hiçbir enerji vermeye gerek olmadan, önce iyonik hale sonra da ortamdaki başka elementlerle birleşerek düşük enerjili yapıları olan bileşiklere haline dönmeye çalışırlar. Metal veya alaşımın fiziksel, kimyasal, mekanik ve elektriksel özelliği değişikliklere uğrar ve bu değişiklikler bazı zararlara yol açar .

Korozyon, elektriksel ara yüzey olarak adlandırılan elektrot/elektrolit ara yüzeyinde metalin çözünmesi şeklinde olur. Elektriksel ara yüzey terimi bir elektrolitin sınırında fazlar arasındaki bölgeyi oluşturan iyonlar, yönlendirilmiş dipoller ve elektronların sıralanışını anlatmak için kullanılır. Elektrot/elektrolit ara yüzeylerinde yürüyen tepkimeler başlıca beş kademeyle gerçekleşir [28]:

- a) Difüzenme: Elektrolit içerisindeki iyon ve moleküller elektrot yüzeyine doğru difüzenir.
- b) Adsorpsiyon: Yüzeye ulaşan iyon ve moleküller yüzeyde adsorbe olurlar.
- c) Reaksiyon Kademesi: Yüzeyde adsorbe durumdaki maddeler elektrokimyasal tepkimeye uğrarlar.
- d) Desorpsiyon: Yüzeyde oluşan ürünler metal yüzeyinden ayrılırlar.
- e) Geriye Difüzenme: Desorbe olan maddeler yüzeyden çözelti derinliklerine doğru difüzenirler.

Son basamakta elektrot yüzeyinin serbest hale geçmesiyle yukarıda sıralanan basamaklar yeni bir iyon (molekül) için tekrarlanır.

Elektrot/elektrolit ara yüzeylerinde meydana gelen tepkimelerde en önemli basamak adsorpsiyon kademesidir. Fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki tür adsorpsiyon vardır. Fiziksel adsorplanmada iyon veya moleküller, yüzeyde Van der Waals kuvvetleri ile tutunurlar. Bu tür adsorpsiyonlarda adsorplanma ısıları düşüktür. Kimyasal adsorplanmada adsorbe olan iyonlar veya moleküller yüzeyde Valans kuvvetleri tarafından tutulmaktadır. Bu kuvvetler, fiziksel adsorpsiyon kuvvetlerinden daha güçlü olup, kimyasal adsorpsiyon ısıları da fiziksel adsorpsiyon ısılarına kıyasla çok fazladır [28]. Bir korozyon hücresinde ise anot ve katot olmak üzere iki elektrot yer alır. Anot ve katotlar farklı metaller üzerinde yer alabileceği gibi, heterojen yapıları bir metal yüzeyinde bölgesel olarak da oluşabilir ve bu elektrotlar, elektrolit deneni iletken bir sıvı içinde bulunur. Elektrokimyasal olarak gerçekleşen tepkimelerde daima bir elektron alışverişi söz konusudur. Dolayısıyla bu tepkimeleri elektron üreten (anodik), elektron tüketen (katodik) tepkimeler olarak ikiye ayırmak mümkündür. Anodik reaksiyon ile elektron kaybeden metalin iyonları çözeltiye geçer, yani anot olan metal ya da metal yüzeyindeki anodik bölge çözünür, korozyona uğrar. Metalde elektron hareketini akım gösterir. Elektron hareketi ile akım ters işaretlidir. Akım birim zamanda hareket eden elektronların bir ölçüsü olduğundan anotta meydana gelen kimyasal değişikliğin miktarını gösterir.

Korozyon akımı (I_{corr}) korozyon hücresinden ölçülen akıma denir. Korozyon hücresinde anot reaksiyonunun korozyon hızı katot reaksiyonunun korozyon hızına eşittir.

Metalin aktifliği, elektronunu verme eğilimi, yani reaksiyona girme eğilimi onun korozyon direncini belirler. Korozyon direnci düşük olan metaller en büyük negatif potansiyele sahiptir. 1 atm basınçta ve 25°C'de, 1 mol / lt iyon sulu hidrojen gazı çözeltisi ile temastaki platin elektrodu, referans standart elektrot kabul edilerek, her bir metalin 25°C'deki çözeltisinde metal ile çözelti arasında ölçülen potansiyel değerleri standart elektrot potansiyelleri olarak adlandırılır [28].

Anot ve katot arasındaki potansiyel fark korozyon olayının temel nedenidir. Söz konusu potansiyel fark, negatif potansiyele sahip, iyonlaşma eğilimi fazla, yani aktif olan metalden (ya da metalin daha negatif potansiyele sahip bölgesinden), pozitif potansiyele sahip, iyonlaşma eğilimi az yani asal olana (ya da metalin daha pozitif potansiyele sahip bölgesine) doğru elektron akışına neden olur ve korozyon başlar [28].

Korozyon reaksiyonunun yürütücü kuvveti, reaksiyon sırasında açığa çıkan enerji yani serbest entalpi azalışıdır. Termodinamik olarak, bir reaksiyonun kendiliğinden yürümesi için, reaksiyonun serbest entalpi değişiminin mutlaka negatif olması gerekir ($\Delta G < 0$).

Buna göre herhangi bir metalin belli bir ortamda korozyona uğrayıp uğramayacağı, serbest entalpi değişiminin işaretine bakılarak kolayca anlaşılabilir. Eğer serbest entalpi değişiminin işareti pozitif ise, metalin söz konusu ortamda korozyona uğramayacağı kesin olarak söylenebilir. Bunun tersi, yani serbest entalpi değişiminin negatif olması, korozyon olayının olabileceğini gösterir. Ancak bazı hallerde metalin termodinamik açıdan korozyona uğraması beklendiği halde, pratikte reaksiyonun yürümediği veya önemsiz derecede yavaş yürür. Bu durum kabuk oluşumu ve pasifleşme gibi sebeplerle reaksiyon hızının azalmasından kaynaklanır.

4.2. DEMİRİN KOROZYONU

Demir elektrokimyasal gerilim dizisinde hidrojenin üzerinde yer alan aktif bir metaldir. Standart elektrot potansiyeli 25 °C 'de, -0,440 voltur [29].

Normal sıcaklıkta ve kuru havada demir yüzeyinde ince bir oksit filmi oluşur. Bu film, paslanmaz çelik yüzeyinde oluşan oksit tabakası kadar kararlı değildir ve sulu ortamlarda kolayca kırılarak dağılır. Demirin korozyonunda aşağıdaki elektrokimyasal tepkimeler meydana gelir,

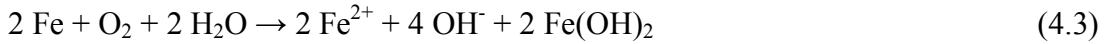
Demir veya çelik elektrot üzerinde,



anodik tepkimesi yürürken, ortam havaya açık olduğundan,



indirgenmesi olur. Toplam elektrokimyasal reaksiyonu ile;



veya su ile hidroliz olarak



oluşan demir(II) hidroksidi oksijenli ortamda kararsızdır; daha fazla yükseltgenerek demir(III) oksit veya hidroksitlerine dönüşür ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, Fe_2O_3).



Ortamda bulunan klorür gibi agresif iyonlar ise yüzeyde yer yer yoğunlaşarak demirin çeşitli klorür tuzlarını ($\text{Fe}(\text{OH})_2$, Cl , $\text{Fe}(\text{OH})\text{Cl}_2$, FeCl_3) ve bunların katyonlarını oluştururlar.

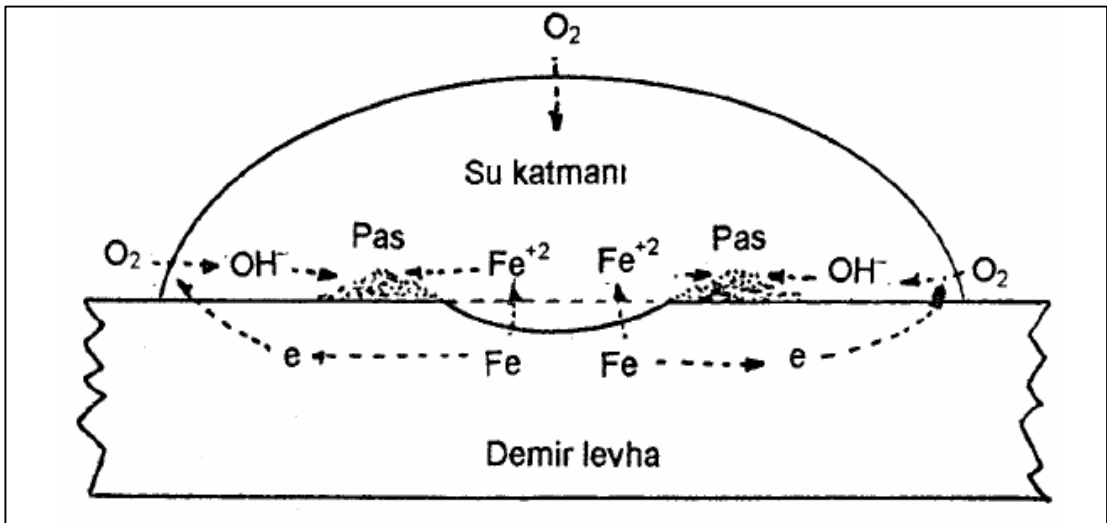
Diğer taraftan;



Oluşan Fe^{3+} iyonları, demiri tekrar yükseltgeyerek, korozyonun oto katalitik mekanizma ile devam etmesinde büyük katkıda bulunur.



Yüzeyde yukarıda verilen reaksiyonlardan bir veya daha fazlası beraberce ve farklı hızlarda oluşur. Farklı sayıda oksijen, klorür ve hidroksit içeren yüzey bileşiklerinden oluşan karma oksit tabakası, elektronik ve iyonik iletkenlikleri farklı olan mikro lokal piller oluşturarak korozyonu daha da hızlandırır. Oluşan heterojen film lokalize korozyonu hızlandıran pastır. Şekil 4.1' de görüldüğü gibi pas korozyon sonucunda, demir esaslı malzemenin yüzeyinde oluşan bir korozyon ürünüdür. Bu bileşik, demir metaline çok zayıf bir bağ ile bağlıdır ve yüzeyden kolaylıkla koparak yeni pas tabakaları oluşturur ve demir metalini sürekli olarak tahribata uğratar [30].



Şekil 4.1. Su ve havayla temas eden demir levhanın korozyonu [30].

4.3. KOROZYON TÜRLERİ

Korozyon kontrolünü yapabilmek için öncelikle korozyon türlerini ve mekanizmalarını iyi bilmek gerekir. Sadece bir korozyon türünün ilerlediği korozyon olayı nadirdir. Bir metal veya alaşım bulunduğu ortamın şartlarına bağlı olarak birden fazla korozyon türüne maruz kalabilir. Ortamın bozulma olayına etkisi ise kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlardan biri ya da her ikisi ile birlikte olmakta, dolayısıyla bu reaksiyonlar sonucunda meydana gelen bozulma olayları da kimyasal ve elektrokimyasal korozyon olarak tanımlanmaktadır. Metal ve alaşımlarının oksitlenmesi kimyasal korozyon (kuru korozyon) iken, sulu ortamlar içinde bozulmaları ise elektrokimyasal korozyon (ıslak korozyon) olarak tanımlanmaktadır. Pratik olarak birbirinden ayırt edilebilen 15 ayrı korozyon çeşidi vardır. Bu korozyon çeşitlerinin oluş nedenleri ve karakteristik özellikleri şu şekilde açıklanabilir.

4.3.1. Genel Korozyon

Geniş bir yüzey ya da bütün yüzeyin her yanında kimyasal ya da elektrokimyasal tepkimenin aynı biçimde yürümesi ile metal yüzeyinde her tarafta eşdeğer ölçüde oluşan korozyon çeşididir. Atmosfer ortamında ve herhangi bir dış etkenden etkilenmeyen tamamı aynı cins malzemedan üretilmiş olan metaller homojen korozyona uğrar. Korozyon sonucu metal kalınlığı her noktada aynı miktarda azalır. Mekanik açıdan en az zararlı olan korozyon çeşididir. Çünkü metal delinmeden ve kırılmadan uzun süre işletmede kalabilir. Metal yüzeyinde eşdeğer şiddette oluşan korozyon türüdür. Korozyon sonucu metal kalınlığı her noktada aynı miktarda azalır.

4.3.2. Galvanik Korozyon

Farklı potansiyellerdeki farklı iki malzemenin bir arada kullanılmasından ya da zemin yapısının farklılığından kaynaklanan korozyon cinsidir. Farklı malzeme kullanımından kaynaklanan korozyon; farklı potansiyelde iki metal birbiriyle temas halinde iken aralarında bir galvanik pil oluştururlar ve aktif olan metal anot, soy metal ise katot görevi görerek aktif metalde korozyona sebep olur.

Korozyon hızı, anot ve katot bölgeleri arasındaki potansiyel farkına ve devrenin toplam direncine bağlıdır. Örneğin bakır ile çeliğin temas etmesi durumunda bakırdan dolayı çelik korozyona uğrayacaktır. Galvanik korozyonun pratikte etkili olması aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

Çevrenin Korozyon Derecesi: Metallerin içinde bulunduğu çevre ne derece korozyon özelliğinde ise galvanik etki daha şiddetle kendini gösterir. Bu durum atmosferik korozyonda daha belirgindir. Deniz atmosferinde galvanik etki daha hızlı bir korozyona neden olur. Eğer kuru bir atmosfer söz konusu ise galvanik korozyon olmaz.

Metaller Arası Mesafe: Galvanik korozyon, iki metalin birbirine bağlandığı noktada en şiddetli olarak kendini gösterir. Mesafenin etkisi çözeltinin iletkenliğine bağlıdır. Elektrolit direnci fazla ise korozyon olayı hemen bağlantı yakınında oyuk şeklinde kendini gösterir. Eğer çözelti iletkenliği yüksek ise korozyon olayı daha geniş bir alana dağılacaktır.

Katot / Anot Yüzey Oranı: Büyük bir katot ile küçük bir anottan oluşan bir galvanik hücrede anot kısa sürede yıpranır, katot /anot oranının büyük oluşu anot akım yoğunluğunun büyümesine ve küçük bir bölgeden fazla miktarda madde kaybına neden olmaktadır. Örneğin bakır plakaları çelik perçin ile tutturulmasında, çelik perçinler kısa sürede parçalanır. Kaplama yapılmış bir malzemede, kaplamanın ufak bir hasar görmesi durumunda büyük katot küçük anot etkisi görülür ve kaplamanın hasar gördüğü yerde malzeme delinmeye kadar gidebilir. Galvanik korozyonu engellemek için birtakım uygulamalar yapılabilir;

- a) Galvanik dizide birbirine yakın metaller seçilir.
- b) Küçük anot – büyük katot etkisinden kaçınılmalıdır.
- c) Ortamın korozyonunu azaltmak için ortama inhibitör eklenebilir.
- d) Her iki metale karşı anodik davranan üçüncü bir metal kullanılabilir (koruma)
- e) Anodik parçalar kolay değiştirilebilecek biçimde tasarlanır. Bu uygulamalardan bazen bir tanesi yeterli olurken bazen birkaç tanesini uygulamak gerekebilir [31].

4.3.3. Aralık Korozyonu

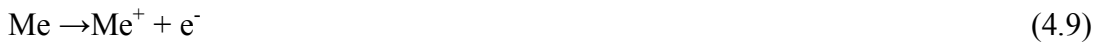
Korozif ortamda metal yüzeyindeki yarıklar, aralıklar içinde ya da metal yüzeyindeki örtülmüş yerlerde şiddetli yerel korozyon olur. Özellikle korozyona karşı dayanıcı oksit katmanı ya da pasif katmana bağlı olan metaller ya da alaşımlar aralık korozyonuna daha fazla duyarlıdır. Aralık korozyonuna neden olan birikintiler kum, kir, korozyon ürünleri ve diğer birikintiler olabilir. Birikinti yüzeyi kapatıcı olarak etkir ve altında durgun ortam oluşturur. Metal ve metalik olmayan yüzeylerin değme yerlerinde aralık korozyonu olabilir. Conta, ağaç, plastik, cam, beton, asbest, vaks, tekstil gibi maddeler aralık korozyonuna sebebiyet verebilir.

Bir aralığın korozyona neden olabilmesi için sıvının içine girebileceği kadar geniş, ama durgun bir bölge sağlayabilecek kadar da dar olmalıdır. Bu nedenle aralık korozyonu, genellikle santimetrenin binde biri genişliğindeki aralık ya da daha küçük delikçiklerde olur.

Yakın zamana kadar aralık korozyonunun, aralık içinde ve onun ortamı arasında metal iyonu ya da oksijen derişiminin farkından kaynaklandığı sanılıyordu. Ancak yapılan çalışmalar bunun asıl neden olmadığını göstermiştir. Aralık korozyonunun mekanizmasını aydınlatmak için, hava içeren deniz suyu içine daldırılmış perçinlenmiş iki levha düşünöldüğünde, çözeltilin temas ettiği yüzeylerde çözelti içinde bulunan oksijen derişimine bağlı olarak, belirli bir hızda oksijen indirgenmesi gerçekleşir.



İki plakanın birbirine bağlı olduğu bölgede de başlangıçta çözelti içinde bulunan oksijen kullanılarak oksijen indirgenmesi olur. Buna karşılık metal, elektronlarını vererek iyonlaşır (yükseltgenir).



Bu olay aralık içindeki oksijen bitinceye kadar devam eder. Bu dar bölge içine dışardan oksijen difüzyonu oldukça güçtür. Çatlağın hemen dışında oksijen indirgenmesi devam ederken çatlakta yalnızca metal yükseltgenmesi olur. Bu reaksiyonlar sonucu çatlak içinde metal iyonları derişimi gittikçe artar. Bu pozitif yüklü iyonlar çatlak içine dışardan klorür iyonlarının difüzlenmesine neden olur. Çatlak içinde oluşan metal klorür bileşigi de hidroliz olarak pas oluşturur. Böylece çatlak içinde klorür derişimi artarken aynı zamanda pH değerinde düşme görülür. Bu durum çatlak içindeki korozyon hızının daha da oto katalitik etki ile artmasına neden olur. Çatlak dışındaki çözeltinin oksijen derişimi ne kadar fazla ise, çatlak içindeki korozyon hızı o derece yüksek olur.

Metal yüzeyinde bulunan çatlak, aralık veya cep gibi çözeltinin durgun halde kaldığı bölgelere oksijen transferi güçleşir. Bunun sonucu olarak bu bölgeler anot, çatlağın çevresindeki bölgeler ise katot olur. Korozyonun en etkili olduğu bölge, çatlağın katot bölgesine yakın olan ağız kısmıdır. Milimetrenin binde biri kadar küçük bir çatlak bile korozyonun başlaması için yeterlidir.

4.3.4. Çukur Korozyonu

Metal yüzeyinde çok küçük bir noktada çukur oluşturarak meydana gelen korozyon olayıdır. Çoğu zaman oluşan çukurlar gözle görülemeyecek kadar küçüktür. Metallerin yüksek elektrik iletkenliğine sahip olması nedeniyle, sulu çözelti içinde katodik ve anodik prosesler aynı metal yüzeyinde farklı bölgelerde oluşur. Anot ve katot yer değıştğinde genel korozyon oluşur. Fakat anot sadece tek bir bölgede görülürse çukurlaşma oluşur [34].

Demir, paslanmaz çelik, nikel, alüminyum, magnezyum, zirkonyum, bakır, kalay, çinko ve bunların çeşitli alaşımlarında gözlenir. Çukur korozyonu küçük bir bölgede olması, küçük anot ve büyük katottan oluşması, çoğu kez bir anda ortaya çıkması, bozucu etkisi, yaygınlığı ve kontrolündeki güçlükler nedeniyle en tehlikeli korozyon türüdür. Çukurların oluşması için genellikle uzun bir başlama süresi gereklidir. Ancak bir kez başlayınca metal içinde hızla ilerler ve metalin yüzeyinde derin oyuklar oluşur.

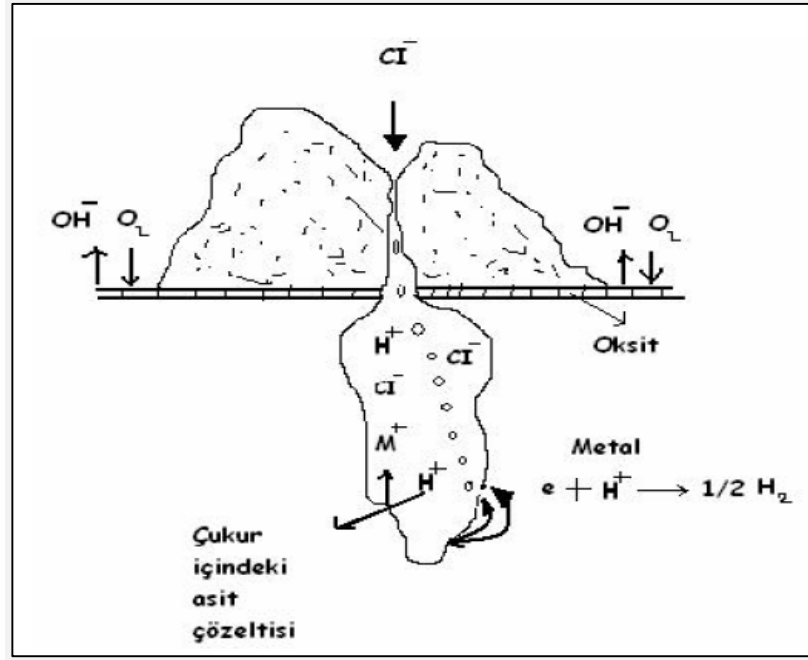
Çukur oluşma potansiyeli, kullanılan malzemeye, alaşım elementlerine, ortamdaki aktif iyonların türüne ve konsantrasyonuna, yüzey koşullarına ve sıcaklığa bağlıdır. Çukur korozyonunda metal cinsi önemli bir rol oynar. Pasifleşme özelliği olan metal ve alaşımlar çukur korozyonuna daha duyarlıdır. Özellikle paslanmaz çeliklerde çukur korozyonuna sık rastlanır. Paslanmaz çeliklerdeki krom, nikel ve molibden miktarı arttıkça, çukur korozyonuna olan direnç de artmaktadır.

Birçok metalde ve alaşımda özellikle Cl^- , Br^- gibi halojen iyonu içeren çözeltilerde çukur korozyonuna rastlanmaktadır. Örneğin, NaCl ve O_2 bakımından zengin olan deniz suyu çukur korozyonu için uygun bir ortamdır.

Çukur oluşmasına etkiyen birçok etken vardır. Bunlar;

- a) Aktif anyonlar,
- b) İnhibitör,
- c) Çözeltinin sıcaklığı, pH'ı,
- d) Potansiyel tarama hızı,
- e) Metalürjik yapı,
- f) Katı maddelerin etkisidir.

Bu etkenlerin her bir metal ve alaşıma etkisi değişik biçimdedir. Bazı malzemelere etkiyen etken diğerlerine etkimeyebilir veya ters etki yapabilir. Bu nedenle her bir metal ve alaşımlar için bu etkenlerin etki mekanizmaları ayrı ayrı araştırılmalıdır [31].



Şekil 4.2. Çukur korozyonu mekanizması [29].

4.3.5. Taneler Arası Korozyon

Bir metalin kristal yapısında tanelerin sınır çizgisi boyunca meydana gelen korozyona taneler arası korozyon denir. Eritilmiş bir metalin katılaşması veya katı halde bulunan herhangi bir ısıtma işlemi sırasında metal atomu kristallerinin sınır bölgelerinde korozyon açısından zayıf bazı bozukluklar meydana gelebilir. Metal korozif bir ortama girdiğinde taneler arası korozyon olayı meydana gelir. Bunun en tipik örneği paslanmaz çeliktir. Bu çelikler yüksek sıcaklıkta ısıtma işlemi tabii tutulursa veya kaynak yapılırsa, çelik içindeki karbon ile krom reaksiyona girerek krom karbür bileşimini oluşturur. Bu bileşik taneler arasındaki sınırlarda birikerek bu bölgeleri korozyon açısından dayanıksız hale getirir.

Taneler arası korozyon, taneler arasında bulunan herhangi bir safsızlıktan, örneğin bir alaşım elementinin daha fazla bulunması nedeniyle de oluşabilir. Örneğin alüminyum içinde bulunan az miktarda demir, taneler arası korozyona neden olabilir. Çünkü alüminyum içinde demir çok az çözünür, bu nedenle taneler arasında birikir.

Paslanmaz çeliklerde taneler arası sınır bölgelerinde krom miktarı çok azdır. Bu bölgeler krom azlığından taneler arası korozyona dayanıksızdır [31].

Taneler arası korozyon olayına daha çok kaynak yapılan bölgenin sınır çizgilerinde rastlanır. Bu olaya kaynak çürümesi denir. Kaynak yapılan bölgede sıcaklık yükselir ve taneler arasında krom karbür çökeltisi oluşur. Sıcaklığın etkili olduğu bölgeler korozyon bakımından duyarlı hale gelir. Kaynak sırasında yalnız sıcaklığın yüksekliği değil, sıcaklığın etkime süresi de önemlidir. Bu süre kaynak yapılan malzemenin kalınlığına da bağlıdır. Örneğin ince levhalar kısa sürede kaynak edilip kısa sürede sıcaklığını kaybeder. Bu süre krom karbür bileşiğinin oluşması ve taneler arasında birikmesi için yeterli olmaz. Dolayısıyla bu durumda kaynak çürümesi olayı da meydana gelmez. Bu açıdan paslanmaz çeliklerin elektrikle kaynak edilmeleri daha uygun olur.

4.3.6. Kabuk Altı Korozyonu

Metal yüzeyinde korozyon ürünlerinin oluşturduğu veya başka bir nedenle oluşan bir kabuk altında meydana gelen korozyona kabuk altı korozyonu denir. Bu korozyon kabuk altının rutubetli olmasından ve yeteri kadar oksijen alamamasından kaynaklanır. Çünkü kabuk altında sıvı hareketi yoktur. Bu durum çatlak korozyonuna benzer bir ortam yaratır. Kabuğun altı anot, kabuk çevresi ise katot olur. Örneğin, boru yüzeylerini izole etmek amacı ile sarılan cam pamuğu yağış nedeniyle ıslanırsa, bu bölgelerde şiddetli bir kabuk altı korozyonu başlar [28].

4.3.7. Örtü Altı Korozyon

Metal yüzeyinde bulunan boya veya kaplama tabakası altında yürüyen bir korozyon olayıdır. Örtü altı korozyonu, çatlak korozyonunun bir türü olarak kabul edilebilir. Bu korozyon türüne kabuk altı korozyonu da denilmektedir. Korozyon olayı kabuk altında bir solucan hareketine benzer şekilde hareket eder. Bir örtü altı diğer bir örtü altını kesmez. Kesişme halinde yansıma yaparak yoluna devam eder. Örtü altı korozyonu mekanizması çatlak korozyonun oluşum mekanizması gibidir. Korozyon kaplamanın zayıf bir noktasından başlar. Bu noktada kabuk altına atmosferden oksijen ve su girişi olur. Korozyonun başladığı noktada oksijen konsantrasyonu

maksimumdur ve korozyonun yürüdüğü yönde gittikçe azalır. Korozyon sonucu metal hidroksiti ve hidrojen iyonları oluşur. Böylece uç kısımda korozyonun devamı için uygun bir ortam (düşük oksijen konsantrasyonu ve düşük pH) sağlanmış olur. Bu nedenle örtü altı korozyonunda aşınma yatay yönde ve uç noktadan devam eder [28-31].

4.3.8. Seçimli Korozyon

Bir alaşım içinde bulunan elementlerden birinin korozyona uğrayarak uzaklaşması sonucu oluşan korozyon olayıdır. Bu tür korozyona en iyi örnek pirinç alaşımıdır. Çinko bakırdan önce yükseltgenerek korozyona uğrar ve uzaklaşır. Bu seçimli korozyona özel olarak dezinfikasyon denir. Benzer olay diğer alaşımlarda da gözlenir. Alaşımlardan seçimli olarak alüminyum, demir, kobalt, krom ya da diğer elementler uzaklaşır. Pirinç, yaklaşık %70 bakır ve %30 çinkodan oluşan bir alaşımdır. Başlangıçta sarı renkli olan bu alaşım, çinkonun korozyonundan sonra gittikçe bakır kırmızısı rengini alır. Alaşım poröz bir yapı kazanarak mukavemetini kaybeder. Alaşım içinde çinko oranı arttıkça alaşımın seçimli korozyona dayanıklılığı azalır. Çözeltinin durgun olduğu bölgeler dezinfikasyona daha elverişlidir [28].

4.3.9. Erozyonlu Korozyon

Bir metal ile korozif ortam arasındaki bağıl hareket nedeniyle metalin aşınması olayına erozyon korozyonu denir. Korozif çözeltilerin metal yüzeyinden hızla akması halinde, korozyon olayı yanında erozyon da meydana gelir. Bu durum korozyon hızının da artmasına neden olur. Bunun nedeni oluşan korozyon ürünlerinin akışkan tarafından sürüklenerek götürülmesidir. Özellikle boru sistemlerinde ve limanlarda çok rastlanan bu tür korozyonda metal ile korozif ortam arasındaki bağıl hareket nedeniyle metalin aşınma hızı artar. Metal yüzeyinde delikler, oluklar ve hendekler oluşur. Su içinde hareket halindeki birçok yapıda kendini gösterir. Ortamda katı parçacıkların varlığı korozyon hızını daha da artırır.

Erozyonlu korozyon bir çok metalde görünmekle birlikte, bu korozyona en duyarlı metal bakır ve bakır alaşımlarıdır. Pasifleşme özelliği olan metaller erozyonlu korozyon olayına çok duyarlıdır. Örneğin alüminyum, kurşun ve paslanmaz çelik böyledir. Bu metallerin yüzeyinde erozyon etkisinde kalan bölgelerde pasifleşme tabakası oluşmaz ve metal korumasız kalan bölgelerde şiddetli korozyona uğrar [28,31].

Erozyon korozyonunu önlemek için aşağıdaki işlemler uygulanır:

- a) Erozyon korozyonuna daha dayanıklı malzemeler kullanmak,
- b) Tasarımı iyi yapmak,
- c) Korozif ortamın değiştirilmesi,
- d) Malzemeyi kaplamak,
- e) Katodik koruma uygulamak.

4.3.10. Gerilmeli (Stres) Korozyon

Alaşımlar çalışacakları ortamlardaki korozyona karşı gösterecekleri dirence göre seçilirler. Tecrübeler göstermektedir ki komponentler süreç sırasında her zaman korozyon ile hasara uğramamaktadır. Parçaların yüzeyinde mevcut olan statik, dinamik gerilmeler ve ortam etkileri ile korozyon hasarı oluşmakta ve ilerlemektedir. Çatlak ilerleme mekanizması; öncelikle korozif çevrenin etkisi, sonra korozyona karşı önlem alınmamış yüzeyde güçlü gerilim oluşumu ve sonuçta da gerilmeli korozyon çatlağı olarak bilinen hasar oluşumu şeklinde gelişir.

Gerilmeli korozyon özellikle en sinsi korozyon türü olarak nitelendirilebilir. Bu korozyon türünde hiçbir görsel bulgu yoktur. Örneğin parça üzerinde ne bir renk değişimi ne de diğer korozyon türlerinde gözlenen korozyon ürünleri yoktur. Parça yüzeyinde gerilmelerin lokal olarak birikmesi aynı zamanda galvanik etkilerinde düşünülmesini gerektirir. Gerilme birikimi olan bölgeler daha anodiktir. Aynı zamanda lokal olmayan sıcaklık etkisi ile ısıl gerilmeler meydana gelir ve bu da gerilmeli korozyon oluşmasını sağlar.

Gerilmeli korozyonu önlemek için malzeme seçimi ve tasarımı önemlidir. Ayrıca yüzey koruma işlemleri yapılmalıdır. Lokal kalıntı iç gerilmeleri ortadan kaldırmak için de ısıl işlemler uygulanmalıdır.

4.3.11. Yorulma Korozyonu

Bir tür gerilmeli korozyon olan yorulma korozyonu, malzemeler üzerinde çevrimsel dinamik yükler olduğunda ve korozif bir ortamda meydana gelir. Gerilme korozyonuna benzer bir korozyondur. Gerilme kuvvetleri genellikle çok düşüktür. Öyle ki, bu kuvvetler malzemenin dizayn edilirken hesaplanmış olan dayanabileceği yüklerden çok daha azdır. Yorulma ve korozyonun her birinin malzemenin hasarsız çalışma ömrünü olumsuz etkilediği bilinmektedir. Yorulma sadece kendisi zamanla yüzey çatlakları oluşturan bir durumdur. Bu çatlakların oluşumu korozyonun ilerlemesini hızlandırır.

4.3.12. Kavitasyon (Oyuk hasarları)

Oyuk hasarları (kavitasyon), erozyonlu korozyonun özel bir şeklidir. Akışkan içinde bir gaz veya buhar kabarcığının bulunması halinde, bu basınçlı gaz metal yüzeyi üzerinde bulunan herhangi bir engel nedeniyle patlayarak o bölgede yıpranmaya neden olabilir. Bu olay genelde hidrolik türbinlerde, gemi pervanelerinde ve pompa paletlerinde ortaya çıkar.

Oyuk hasarları (kavitasyon) olayının mekanizması su şekilde açıklanabilir: Normal hızdaki akışlardan çok yüksek olan akış hızlarında bazı bölgelerde vakum oluşabilir. Bunun sonucu olarak sıvı buharlaşabilir veya sıvı içinde bulunan çözünmüş gazlar ayrışır. Böylece sıvı içinde düşük basınçlı gaz kabarcıkları meydana gelir. Bu kabarcıklar akış hızının azaldığı bölgelerde genellikle metal yüzeyine yakın bir yerde sönerler. Bu olay metal yüzeyinde kuvvetli bir emiş yaparak metalin oyulmasına neden olurlar. Genel olarak oyuk hasarlarından (kavitasyon), erozyonlu korozyonu önlemek için uygulanan işlemleri uygulayarak korunabilir [31].

4.3.13. Hidrojen kırılmalığı

Bir korozyon reaksiyonu sonucu veya katodik koruma uygulamasında metal yüzeyinde hidrojen atomları oluşur. Bunlar metal yüzeyinde adsorbe edilir. Yüzeyde toplanan atomların bir kısmı $H+H\rightarrow H_2$ şeklinde birleşerek hidrojen molekölü oluşturarak ortamdan uzaklaşır. Hidrojen atomların bir kısmı da metal bünyesine girerek metal içindeki boşluklara yerleşir. Daha sonra da bu hidrojen atomları hidrojen molekölü oluşturarak büyük bir hacim artışına neden olur. Hidrojen molekölünün metal içinden difüzlenme imkânı olmadığından metal boşluklarında büyük bir basınç yaparak metalin çatlamasına neden olur. Hidrojen atomu yalnız aşırı katodik koruma uygulamasında değil çeşitli olaylarla da meydana gelebilir. Örneğın, elektroliz veya ıslak elektrotlarla yapılan kaynaklarda oluşabilir [30].

4.3.14. Kaçak Akım Korozyonu

Bu tür korozyon olayına yeraltı ve su altı yapılarında sıkça rastlanır. Herhangi bir doğru akım kaynağından yeraltına kaçan akımlar çevrede bulunan metalik yapılara girerek korozyona neden olurlar. Örneğın bir yeraltı treni veya bir kaynak makinesi çevrede bulunan metalik yapılar üzerinde korozyona neden olabilir. Boru hattı zeminden daha iletken olduğu için kaçak akımlar boru hattına girmeyi tercih ederler.

Akımın boru hattına girdiğı bölgeler katot, akımın borudan çıktığı bölgeler anot olur ve korozyona uğrar. Kaçak akım korozyonunu önlemek için, öncelikle kaçak akımların yapıya girmesinin önlenmesi gerekir. Kaçak akım etkisi altında kalan bölgelere direnç konularak, kaçak akımların bu metal yoluyla taşınması sağlanır.

Özellikle raylı taşıt araçlarından çevreye kaçan akımların çevredeki boru hatları üzerindeki korozyonunu önlemek için, boru hattı ile ray arasına ayarlanabilen bir direnç konularak kaçak akımların kontrollü bir şekilde bu metalik bağ üzerinden geçmesi sağlanabilir [32].

4.3.15. Mikrobiyolojik Korozyon

Mikrobiyolojik korozyon, bazı mikroorganizmaların korozyon hızını arttırması ile olur. Mikroorganizmanın gelişmesi sürecinde asitler ve sülfürler oluşur. Bu bileşenler korozyon hızını artırır. Bazı hallerde mikroorganizmanın kendisi elektro kimyasal reaksiyona katılır. Sülfür bileşikleri bakteriler tarafından elementel kükürt veya sülfata kadar oksitlenebilir. Bazıları da bunun tersi reaksiyonu gerçekleştirir. Thiobacillus thio oxidans gibi bazı aerobik bakteriler, her çeşit sülfür bileşimini ve elementsel kükürdü sülfata oksitler. Reaksiyon sonucu sülfürik asit oluşur.



Anaerobik bakterilerden olan desulfovibrio bakterisi sülfatı indirger. Bu tür bakteriler hidrojeni kullanarak sülfat iyonlarını sülfür haline indirger.



Oluşan sülfür iyonları H₂S haline dönüşerek korozyon hızını artırıcı etki yapar. Bu nedenle mikrobiyolojik korozyon ürünlerinde daima sülfür bileşiklerine rastlanır. Normal de korozyon olayının rastlanmadığı yerlerde mikrobiyolojik korozyona çok ender rastlanır.

Mikrobiyolojik korozyonu önlemek için, pH derecesinin değiştirilmesi, aralıklı olarak dezenfeksiyon yapılması veya organo metalik metal bileşikleri kullanarak mikro canlıların öldürülmesi yoluna gidilir. Ancak bir çok mikroorganizma bu zehirleyicilere çok kısa zamanda adapte olabilir [31].

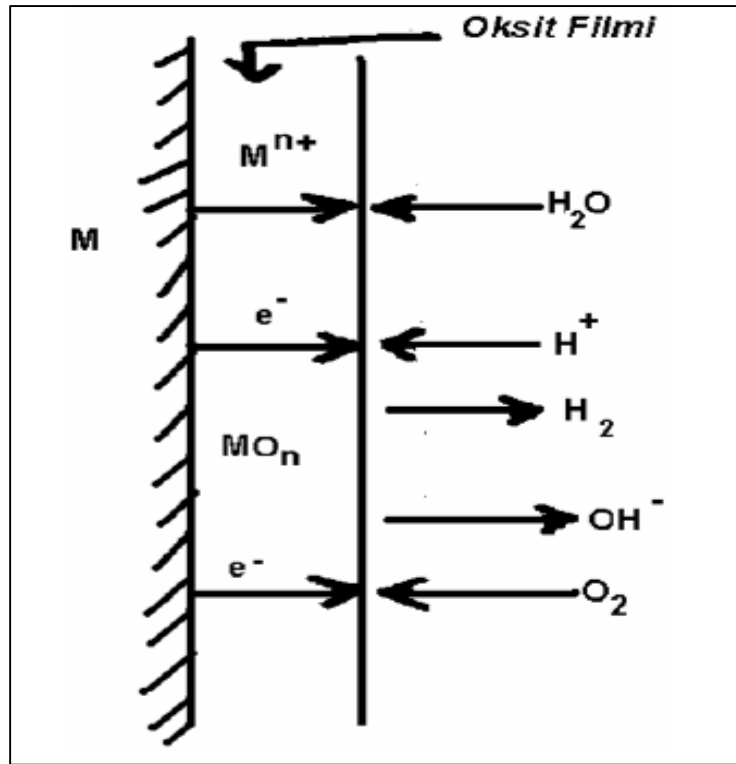
4.4. PASİFLİK

Bir metal veya alaşımın termodinamik açıdan elektron vermesi gereken bir ortamda korozyona karşı direnç göstermesine pasiflik denir. Diğer bir ifade ile pasiflik; iyon haline gelen metalin, yüzeyinden uzaklaşıp çözelti içine karışmak yerine oksijenle

birleşerek yüzeyde çöküp, metal ile ortam arasındaki bağlantıyı keserek korozyonun daha fazla sürmesinin önlenmesi şeklinde tanımlanabilir [32].

Bir metalin bulunduğu ortamda potansiyeli kritik bir büyüklüğün üzerine çıktığı zaman (anodik bir potansiyel uygulayarak ya da ortama yükseltgeyici ekleyerek) korozyon hızı önemli miktarda azalıyor metal “pasifleşiyor” denir. İndirgeme için gerekli elektronlar oksit/çözelti ara yüzüne difüzyon veya tünelleme yoluyla oksit boyunca ilerleyerek ulaşırlar. Oksitlenme reaksiyon hızı metal iyonunun oksit tabakası kalınlığı boyunca yavaş hareketi ile sınırlanmıştır.

Oksit tabakası boyunca oluşan elektriksel alanın büyüklüğü metal iyonunu göçe zorlayan faktördür. Elektriksel alan ne kadar büyükse M/MO ara fazında oluşan M^{n+} iyonu o kadar hızlı olarak MO/çözelti ara fazına gider. Oksit tabakası oksitle suyun doğrudan teması sonucunda hidroksit tabakası olarak büyümeye devam eder veya çözelti içinde oluşup oksit filmi üzerinde birikir.



Şekil 4.3. Yük transfer reaksiyonları ve yük transfer işleminin oluşumundan sorumlu pasifleşmenin metal yüzeyinde oluşumu.

Metal veya alaşımın korozyon direnci, oksit filminin elektronik ve iyonik iletkenliğine bağlıdır. Örneğin demir oksit gibi bazı oksitler göreceli olarak iyi elektronik iletken ve zayıf iyonik iletkenlerdir. Buna rağmen alüminyum oksidin hem iyonik hem de elektronik bakımından iletkenliği düşüktür.

Pasif örtünün kararlılığı metal yüzeyine iyi tutunması, ince olması ve düşük çözünme hızına sahip olması gibi bazı koşullara bağlıdır. Yapısı ne olursa olsun bu örtü, metali korozyona neden olan ortamdaki koruyucu niteliktedir ve bu sayede krom-nikel çelikleri, krom çelikleri, bakır-nikel ve titan alaşımları gibi pasifleşme eğilimi yüksek olan malzemeler, korozyon etkisi fazla olan oksitleyici ortamlarda güvenilir şekilde uzun süre kullanılabilirler [28].

4.5. KOROZYONUN ÖNEMİ

Korozyon, metalik malzeme kullanılan her alanda beklenen doğal bir olaydır. Sebep olduğu maddi kayıplar yanında çevreyi kirleten, insan hayatını tehlikeye sokan bir değişimdir. Korozyon olayı endüstrinin her dalında kendini gösterir. Atmosfer koşullarına açık tanklar, depolar, direkler, korkuluklar, taşıtlar, yeraltı boru hatları, betonarme demirleri, iskele ayakları, gemiler, fabrikalarda kimyasal madde doldurulan kaplar, borular, depolar ve birçok makine parçası korozyon olayı ile karşı karşıyadır. Bütün bu yapılar korozyon sebebiyle beklenenden daha kısa sürede işletme dışı kalmakta ve büyük ekonomik kayıplar meydana gelmektedir [32].

Günümüzde korozyon kontrolü çok önemli bir konu olduğu halde pratikte yeteri kadar üzerinde durulmamaktadır. Bununla birlikte korozyon endüstriyel yatırım ve üretim maliyetlerini etkileyen en önemli faktördür. Korozyon nedeni ile ülkeler malzeme, enerji, emek ve bilgi kaybına uğramaktadırlar. Korozyonun doğrudan sebep olduğu malzeme ve işçilik kaybına, korozyon sebebiyle ortaya çıkan diğer kayıpların da dahil edilmesi gerekir. Korozyonun sebep olduğu dolaylı kayıplar beş maddede toplanabilir [32].

Tesisin servis dışı kalması: Korozyon sonucu meydana gelen arızanın tamiri için geçen süre içinde tesis devre dışı kalarak üretim durabilir. Örneğin bir doğal gaz

borusunun veya ana su borusunun korozyon sebebiyle bir kaç gün devre dışı kalması ile meydana gelen kayıplar hesap edilemeyecek kadar büyüktür. Ayrıca söz konusu tesiste işletmedeki duraklamadan kaynaklanan prestij kaybı da korozyonun sebep olduğu kayıp olarak hesaba katılmalıdır.

Ürün kaybı: Bir deponun, tankın veya boru hattının korozyon sonucu delinmesi halinde, olayın farkına varılıncaya kadar geçen süre içinde ürün kaybı söz konusu olur. Bu kayıplara korozyon kaybı olarak bakmak gerekir. Ürün kaybının yanında çevre kirlenmesi ve eğer ürün yanıcı bir madde ise yangın tehlikesi de vardır. Örneğin benzin istasyonlarındaki yakıt tanklarının delinmesi sonucu yeraltına pek çok yakıt kaçağı olmaktadır.

Ürün kirlenmesi: Çözünen korozyon ürünleri, elde edilen kimyasal madde içine karışarak kirlenmesine sebep olur. Özellikle gıda, ilaç ve sabun gibi ürünlere pas bulaşması ile kalitesi bozulur. Örneğin kurşun borular, içme suyu içine zehirli kurşun bileşiklerinin karışmasına sebep olur.

Boya ve kaplamalar: Metalleri korozyondan korumak üzere kullanılan boyalar, kalay ve çinko ile yapılan kaplamalar da korozyon kaybı olarak kabul edilmelidir. Üretilmekte olan boyaların büyük bir kısmı korozyonu önlemek amacı ile kullanılmaktadır.

Korozyon için alınan aşırı önlemler: Çoğu zaman korozyon hızının ne büyüklükte olacağı başlangıçta tam olarak bilinemediği için, tasarım sırasında gerektiğinden daha kalın malzemeler veya çok pahalı malzemelerin kullanılması yoluna gidilmektedir.

4.6. KOROZYONU ÖNLEME TEKNİKLERİ

Korozyon kayıplarını mümkün olduğunca azaltmak amacıyla aşağıda verilen çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [32].

4.6.1. Ortamın Değiştirilmesi

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

4.6.2. Malzeme Seçimi

Korozyonu önlemenin en genel yolu kullanıldığı yere uygun metal ve alaşımların seçilmesidir. Çizelge 4.1’de hangi korozif ortamlarda hangi malzemenin kullanılabileceği özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Ortama göre malzemenin kullanımı [32].

| Metal | Korozif Ortam |
|---------------------------|---------------------------------------|
| Paslanmaz Çelik | Nitrik Asit |
| Nikel ve Nikel Alaşımları | Kostik |
| Monel | Tuz Asidi |
| Hastelloylar | Sıcak Tuz Asidi |
| Kurşun | Sulu Sülfirik Asit |
| Alüminyum | Hava |
| Kalay | Damıtık Su |
| Titan | Sıcak Kuvvetli Oksitleyici Çözeltiler |
| Tantal | En Dayanımlı |
| Çelik | Derişik Sülfirik Asit |

Korozyona sebep olan etkenlerden biri de birbiriyle potansiyel farkı bulunan metallerin bir arada kullanılmasıdır. Bu durum korozyonu başlatıcı ve hızlandırıcı bir etkendir. Mesela çok yapılan bir hata olarak, çelik saçtan yapılan panoların üzerine konulan paslanmaz çelik cıvata ve contalar buldukları bölgede galvanik korozyona sebep olmaktadır. Bu tip durumlarda ana yüzeyde cıvatalar ya da contalar plastik cıvatalar ile izole edilmelidir.

4.6.3. Tasarım

Bir yapının dizaynı çoğu kez yapım için seçilen gereç ölçüsünde önemli olmaktadır. Tasarımda mekanik dayanım gereksinimi yanında, korozyona karşı dayanım da düşünülmelidir. Bütün durumlarda bir bileşenin dizaynı malzemenin yapısına dayanmalıdır. Korozif malzemelerin depolandığı sistemlerde korozif ortamın (su vb) birikmesini engellemeye yönelik tasarımlar uygulanmalıdır. Ayrıca arasında sıvı birikintisine sebep olabilecek çok ince aralıklardan kaçınılmalıdır.

4.6.4. İnhibitör Kullanımı

Metal cinsinin değiştirilmesinin ekonomik olmadığı hallerde, çevrenin korozif özelliğini azaltmak amacıyla inhibitör kullanılması yoluna gidilmektedir. Özellikle soğutma sularında olduğu gibi kapalı sistemlerde, inhibitör kullanımı korozyonla mücadelede en ekonomik yöntemi oluşturmaktadır.

4.6.5. Kaplamalar

4.6.5.1. Metalik Kaplamalar

- a) Elektrolizle kaplama
- b) Kaplanacak metalden daha soy bir metal ile kaplama (nikel, krom ve akımsız krom kaplama gibi)
- c) Katodik koruma sağlayan koruyucu kaplama (çinko kaplama, çinko bakımından zengin boyalar, alüminyum kaplama)
- d) Bazı metal kaplama yöntemleri (püskürtme, giydirme, buhar çöktürülmesi ve difüzyon)

4.6.5.2. İnorganik Kaplamalar

Asit, baz gibi kimyasal maddelerin taşınmasında inorganik enamel kaplamalar uygundur. Genellikle feldspat, kaolin, boraks, soda ve litarj karışımı kullanılır.

Enamel kaplamalar mükemmel kaplama özelliği vermelerine karşın, mekanik çarpmalarına ve sıcaklık değişmelerine karşı dayanıksızdır ve çabuk kırılabilir.

4.6.5.3. Kimyasal Dönüşüm İle Kaplama

- a) Anodik işlem
- b) Fosfatlaştırma
- c) Kromatlaştırma

4.6.5.4. Organik Kaplamalar

Bu tip kaplama metal ve çevresi arasında oldukça ince bir koruyucudur. Boya, vernik, lak ve benzer kaplamalar kuşkusuz büyük yapılardaki birçok metali korozyona karşı savaşta diğer yöntemlerden daha iyi korur.

4.6.6. Anodik Koruma

Anodik koruma, pasifleşme özelliği gösteren bir metalin anodik yönde polarize edilerek pasif hale getirilmesi ilkesine dayanır. Demir, nikel, krom, titan ve bunların alaşımları gibi aktif-pasif geçişi gösteren metallerde özenle denetlenen anodik akım uygulanırsa belirli bir potansiyelden sonra metal pasifleşir ve metalin çözünme hızı azalır. Bir metali anodik olarak korumak ancak potansiyostat kullanılarak olanaklıdır.

4.6.7. Katodik Koruma

Katodik korumanın temel ilkeleri elektrokimyasal korozyon teorisine dayanmaktadır. Zemine gömülü ve boyu yüzlerce kilometreyi bulan boru nakil hatlarından evlerde kullanılan sıcak su hazırlama tesislerine kadar hemen hemen her alanda başarılı uygulamaları vardır. Bundan da öteye zemin, su ve deniz suyu gibi değiştirilmesi veya korozyonunu sınırlama işlemine genellikle olanak bulunamayan ortamlarda, geniş yüzeyli çelik yapılar (zemine ve suya terk edilen çelik boru hatları, depolar, deniz taşıma araçları, su veya zemine gömülü köprü ayakları vb.) korozyona karşı korumak için alternatifsiz bir yöntemdir [28].

Katodik koruma korozyona uğrayan metallerin katot olarak polarizasyonunu gerektirir. Katodik koruma, bu korunacak metali daha aktif bir metal ile (galvanik anot veya kurban anot) eşleyerek sağlanacağı gibi dıştan akım uygulayarak da gerçekleştirilebilir. İlk yöntemde koruma için gerekli doğru akım korunan metal ve galvanik anot çiftinin oluşturduğu hücre tarafından üretilir. Galvanik anotlar koruma sırasında belirli hızlarla çözünerek ağırlıklarını kaybederler. Bunları uygun zaman aralıklarıyla yenileyerek koruma işlevine süreklilik kazandırılır. İkinci yöntemde korunan metal ve anot çiftinin akım üretir nitelikte olması gerekmez. Çünkü koruma için gerekli akım uygun bir dış kaynaktan çekilir. Yavaş çözünürlük yanında ekonomik olan malzemeler anot malzemesi olarak kullanılır.

Galvanik anotlu, katodik koruma sistemlerinde kullanılan anot malzemeleri genellikle çinko, alüminyum ve magnezyumdur. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde Fe-Si, Pb-Sb-Ag, Ti bazlı anotlar kullanılır.

Katodik korumanın ilk uygulamaları boru hatları üzerinde olmuştur. Günümüzde iskele ayakları, gemiler, su ve petrol depolama tankları, kimyasal maddeleri taşıyan kaplar, ısı değiştiriciler, betonarme demirleri vb. birçok metalik yapı katodik olarak korunmaktadır. Özellikle yüksek basınçlı petrol ve doğal gaz boru hatlarının emniyetle işletilebilmesi ancak katodik koruma yapılarak mümkün olabilmektedir [28].

4.7. KOROZYON TESTLERİ

Korozyon birçok şekilde ölçülebilir: Alaşım yüzeyi görsel olarak incelenerek, birçok çeşit elektrokimyasal test uygulanarak salınan elementlerin indirekt olarak elektron akımlarının ölçümüyle veya salınan parçaların direkt olarak spektroskopik yöntemlerle ölçülmesi ile. Esas olarak korozyon testleri şu şekilde sınıflanır :

Arazi testleri: Metalin uzun süreli olarak (yıllar içinde) korozyon davranışını bize birebir olarak gösterir, ancak pratik değildir.

Kupon testleri: Sisteme (örneğin su boruları içine) küçük kuponlar koyarak uzun süreli deneme.

Laboratuvar deneyleri:

- a) Hızlandırılmış deneyler (karşılaştırmalı deney)
- b) Elektrokimyasal deneyler, olarak ikiye ayrılır.

Elektrokimyasal deneyler çok kısa sürelidir ve termodinamik ve kinetik olarak malzeme davranışını ve korozyon hızını verir. Bu deney sonuçları bize tahminlerde ve yorumlarda bulunma imkanını tanır, ancak korozyon olayı oldukça karmaşık olduğu ve birçok fiziksel ve kimyasal faktörden etkilendiği için, kesin sonuçlar vermez. Elektrokimyasal deney sonuçları önce kupon, ardından da arazi testine tabi tutulmalıdır.

Burada çalışma konusuyla ilgisi olan elektrokimyasal deneyler ayrıntılı olarak açıklanırken, diğer yöntemlerden daha fazla bahsedilmeyecektir.

4.7.1. Elektrokimyasal Teknikler

İn vitro elektrokimyasal tekniklerin, çok düşük korozyon hızlarını bile ölçebilecek kadar hassas oldukları bilinmektedir [33]. Klinik olarak bize tam doğru ve uygun bilgiler verip vermediği tartışma konusu olmasına rağmen, günümüzde bu teknikler korozyon ölçümü yapılan çalışmaların temelini oluşturmaktadır, çünkü kolay ve hızlıdır. Bu yöntemlerden biri potansiyodinamik polarizasyon tekniğidir. Bu teknik bize anodik yük, açık devre, oyuklanma ve pasivasyon potansiyelleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler verebilmektedir. Bunların dışında bize pasif bölgeyi ve oyuklanma korozyonuna karşı hassasiyeti de göstermektedir.

Açık devre potansiyeli, yani alaşımın belirli bir çevrede oluşan kendi potansiyeli, alaşımın galvanik bir eşleşmede anot mu yoksa katot mu olacağını belirlemek için yararlıdır. Potansiyodinamik polarizasyon tekniğinin bazı zaafı vardır. Kısa süreli bir test olduğu için, bir alaşımın uzun bir zaman dilimindeki korozyon davranışı

hakkında bilgi edinmek için tek bir deney yeterli değildir. Bu nedenle, metal ve metal alaşımların düzenli düzenli deneysel yöntemi olarak yetersiz görünse de, bu sorunun üstesinden deneylerin birçok kez yapılarak, tekrarlanabilirliğinin kesinleştirilmesi ile gelinbilir ve böylece uzun zaman aralığındaki korozyon davranışı hakkında da sağlıklı öngörülerde bulunulabilir [34].

Elektrokimyasal korozyon ölçümlerinin en büyük avantajlarından biri, her bir etken faktörün ayrı ayrı incelenebilmesidir. Özellikle pasif tabakaların oluşumu ve davranışları daha iyi anlaşılabilir. Pasifliğin bozulması birden fazla korozyon çeşidiyle bağlantılıdır:

- a) Daha aktif fazların selektif çözünmesi,
- b) Oyuklanma korozyonu (pitting corrosion),
- c) Aralık korozyonu (crevice corrosion),
- d) Tanelerarası korozyon.

Korozyon davranışı başka faktörlerin yanında asidik bileşimine, pH'sına, temas süresine ve alaşımın durumuna bağlıdır [35].

Diğer önemli bir konu deney sırasında seçilecek tarama hızıdır. Esasen çok yavaş tarama hızları tercih edilir, çünkü yüksek tarama hızlarında bazı yavaş gelişen elektrokimyasal olaylar atlanarak gözden kaçırılabilir. Buna karşılık yüksek tarama hızları, deney için gereken süreyi kısalttıkları için, deney örneğinin yüzeyinde, deneyi tekrarlamayı imkansız hale getirecek büyüklükte değişiklikler olmamasını sağlar. Bu nedenle optimum bir tarama hızı tespit edilmelidir [36].

4.7.2. Üç Elektrod Sistemi ve Önemi

Bir sistem durağan haldeyse ve önemli bir akım söz konusu değilse, test elektrot potansiyelini ölçmek için sadece bir referans elektrotunun kullanılması yeterlidir. Eğer galvanik veya elektrolitik hücre içinde ani akımlar oluyorsa, her iki elektrottaki reaksiyonlar dengede olmazlar ve her birinde sonuç olarak denge değerinden farklı bir potansiyel olur. Anot veya katodun elektrokimyasal reaksiyon sırasında

potansiyelinin ölçülebilmesi ise ancak “referans” elektrot kullanılarak yapılır. “Referans elektrot/elektrot” sisteminin potansiyeli uygun cihazla, potansiyostat ile değiştirilerek anot ve katodun zamana bağlı “akım-potansiyel” eğrisi elde edilir.

4.8. KOROZYON HIZI ÖLÇÜMÜ

Yaygın olarak kullanılan bir korozyon ölçüm yöntemi, hassas bir şekilde ağırlığı ölçülmüş bir parça maddenin, korozyona uğrayacağı ortama bırakılarak, belirli bir süre sonra çıkarılması ve yeniden tartım ile kaybedilmiş metal kütesinin hesaplanmasıdır. Bu yöntem küçük boyutlarda kullanılmak için pek uygun değildir. Korozyon yapı olarak genellikle elektrokimyasal bir olay olduğu için, elektrokimyasal yöntemlerle ölçülmesi de mümkündür.

Korozyon hızının elektrokimyasal olarak ölçülmesi sırasında karşılaşılan en büyük sorunlardan biri, korozyon potansiyelindeki akımın ölçülmesidir, çünkü bu potansiyelde dışarıdan bir ölçüm cihazı tarafından kaydedilebilecek herhangi bir akım olmaz.

Sonuç olarak, korozyon akımını (i_{kor}) ölçmek için yapılan herhangi bir elektrokimyasal yöntem, (Eş. 4.12) korozyon potansiyeli dışındaki potansiyellerdeki akımları ölçerek gerçekleştirilir (Eş. 4.13 ve Eş. 4.14’e göre) .

Böylece, korozyon potansiyelindeki akım yaklaşık olarak tahmin edilir, daha doğrusu yaklaşık olarak hesaplanabilir. Bu hesaplamalar için çeşitli formüller geliştirilmiştir.

Metal çözünmesi akım yoğunluğunu veren eşitlik:

$$i_{anot} = i_0 \exp(\beta\eta nF/RT) \quad (4.12)$$

Bu eşitlik tekrar düzenlendiğinde:

$$\eta_{anot} = \beta_{anot} \log(i_{anot} / i_0) \quad (4.13)$$

Eşitliği ortaya çıkar. Burada β_{anot} Tafel katsayısıdır:

$$\beta_{\text{anot}} = 2,303 RT / \beta n F \quad \text{Anot için} \quad (4.14)$$

Katot söz konusu olduğunda:

$$\beta_{\text{anot}} > \beta_{\text{katot}} \quad ; \quad i_{\text{anot}} > i_{\text{katot}} \quad \text{olacaktır.}$$

Katodik ve anodik reaksiyonlar bir korozyon işlemi olarak birleştirildiğinde, metal çözünümünden kaynaklı anodik akım, redüksiyon nedeniyle oluşan eşit katodik akım ile dengelenmelidir:

$$[i_{\text{anot}}] = [i_{\text{katot}}] = i_{\text{kor}}$$

Bu durumda i_{kor} korozyon akımıdır ve sadece tek bir potansiyelde gerçekleşebilir, o da E_{kor} , yani korozyon potansiyelidir. E_{kor} 'un değeri temel bir termodinamik anlama sahip değildir [37].

R= gaz sabiti

T= mutlak sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)

$\beta = 0,5$ 'e yakın seçilen simetri katsayısı

$\eta = E - E_e$ ile açıklanan aşırı potansiyel

$E_e =$ denge potansiyeli (denge potansiyelinde ölçülebilen bir akım olmaz)

F= faraday sabiti

Korozyon potansiyeli genellikle anodik ve katodik reaksiyonların Tafel analizine uygun şartlarda devam ettiği Tafel bölgesindedir. Dolayısıyla, hem katodik, hem de anodik reaksiyonların polarizasyon eğrileri korozyon potansiyelinden uzakta potansiyellerde belirlenir.

Dış devrede ölçülen akım her zaman $i_{\text{anot}} + i_{\text{katot}}$ toplamıdır ve korozyon potansiyelinde (E_{kor}) sifıra denk gelir (Eş. 4.15). Bu fikirden yola çıkarak, korozyon potansiyeli ölçümü (Eş. 4.16) ile korozyon akımı aşağı yukarı belirlenebilir.

Bunun için i_0 değişim akım yoğunluğu (exchange current), Tafel katsayıları (β_{anot} , β_{katot}), denge potansiyeli (E_e) gibi metal çözünme reaksiyonuna dair veriler, deneyler sonucu bulunmalıdır [38].

$$E_{\text{kor}} = (E_e)_{\text{anot}} + b_{\text{anot}} \log (i_{\text{kor}} / i_0) \quad (4.15)$$

$$i_{\text{kor}} = i_0 \exp [2,303 (E_{\text{kor}} - (E_e)_{\text{anot}}) / b_{\text{anot}}] \quad (4.16)$$

Malzemenin yoğunluğu bilindiği takdirde, bir penetrasyon miktarı değeri (uzaklık/süre) elde edilebilir. Genellikle (mm/yıl) olarak sonuç verir.

BÖLÜM 5

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 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 [39].

5.1. AŞINMA ZAMAN İLİŞKİSİ

Aşınma pratikte ikiye ayrılır.

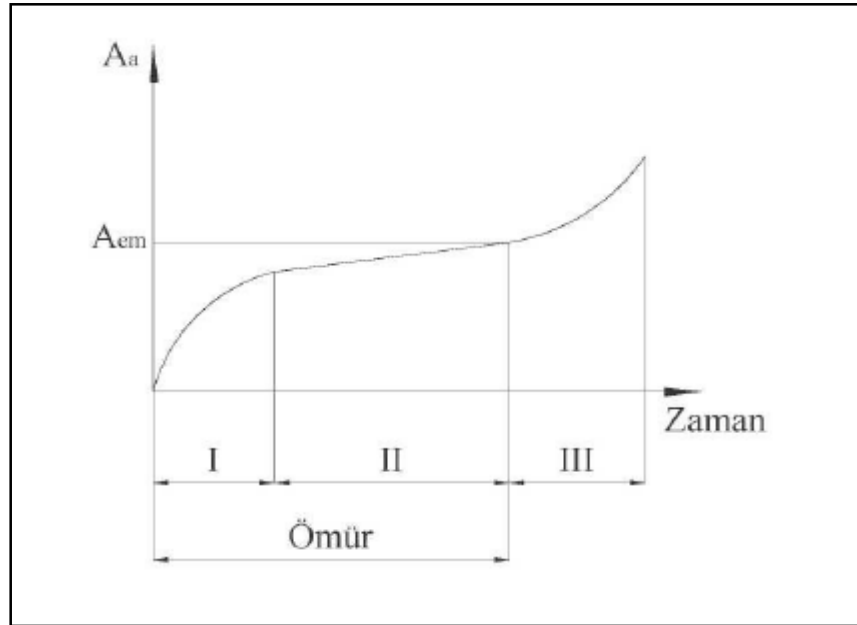
- a) Zaman ile gelişen aşınma,
- b) Aniden meydana gelen aşınma,

Zamanla gelişen aşınmayı üç safhada incelemek mümkündür (Şekil 5.1).

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 ağırlıklarla 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 5.1. Aşınma zaman ilişkisi [45].

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 edilmelidir. Aniden meydana gele 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 sekli, 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 [40].

5.2. AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Aşınmayı etkileyen bir çok 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) Yüzeğe uygulanan yük
- d) Kayma mesafesi
- e) Yüzey sertliği
- f) Yüzey kalitesi
- g) Yağlama

vb. faktörler etki etmektedir. Bu faktörleri inceleyecek olursak;

5.2.1. 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.

5.2.2. 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.

5.2.3. Yüzeğe Uygulanan Yük

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

5.2.4. Sürtünme Mesafesi

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

5.2.5. Yüzeğ Sertliğı

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

5.2.6. Yüzeğ Pürüzlülüğü

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

5.2.7. Yağlama

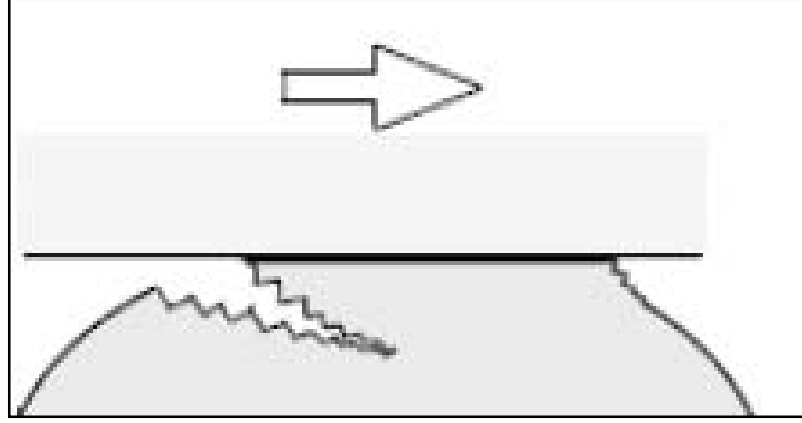
Aşınmaya karşı önleyici önlemlerden bir tanesi de yağlamadır. Sürtünen yüzeğler arsındaki yağlama ile metal metal teması ve soğuk kaynaklanma önlenabilir [41].

5.3. AŞINMA ÇEŞİTLERİ

5.3.1. Adhesiv Aşınma

Adhesif 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 [42].



Şekil 5.2. Adhesiv aşınma

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.

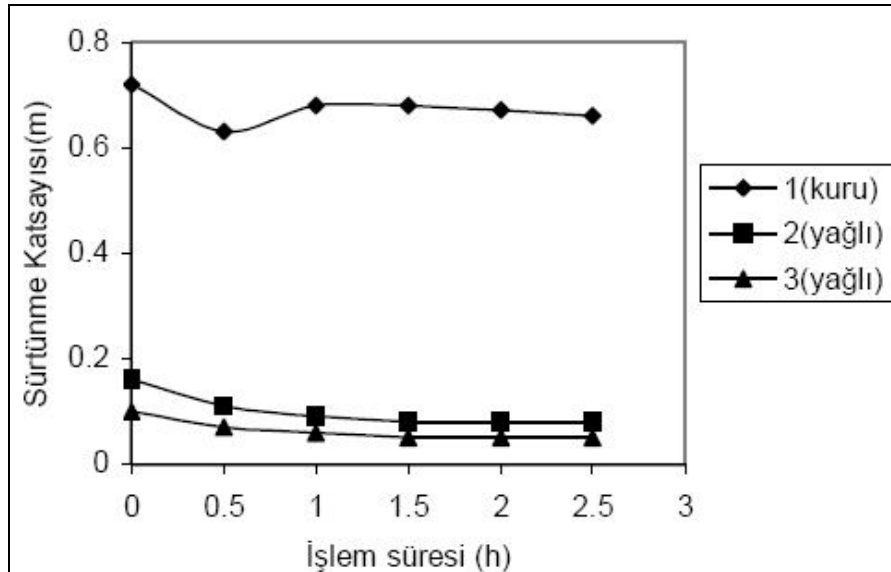
Yüzey ne kadar hassas işlense de gerçek temas alanı görünür temas alanından daima küçüktür. Birbiri üzerine temas eden malzemelere yük uygulandığında temas noktalarında aşırı gerilmeler meydana gelir. Akma sınırı aşıldığında ise küçük kaynak bağları oluşur.

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 5.1. Malzeme özelliklerinin adhesiv aşınmaya etkisi [43].

| 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.



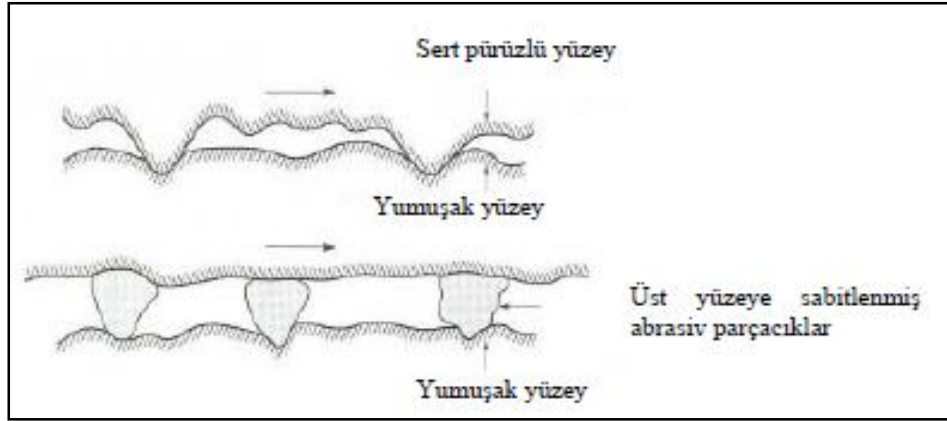
Şekil 5.3. Bakır esaslı bronz ve pirinç yataklarda kuru ve yağlı ortamlarda sürtünme katsayısı- zaman diyagramı [44].

Adhezyon aşınması için aşağıdaki sonuçlar çıkartılabilir.

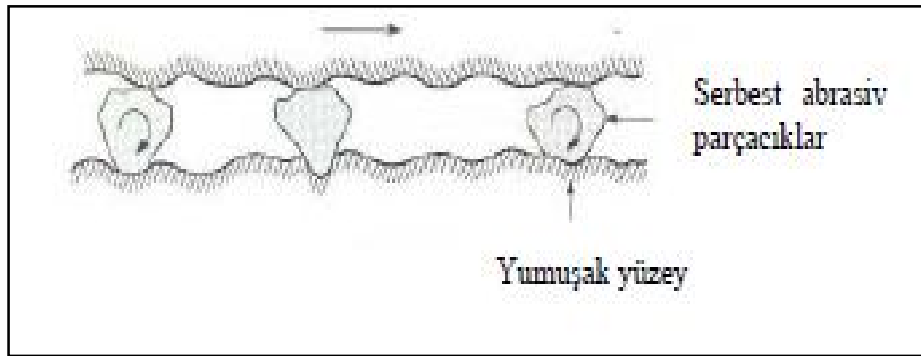
- Adhezyon aşınması uygulanan yük ile
- Kayma mesafesi ile
- Aşınan malzemenin yüzey sertliği ile doğru orantılıdır.

5.3.2. 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 [45].



Şekil 5.4. Pürüzlü sert bir yüzey veya abrasif parçacıkların bir yüzeye yapışık olması [45].



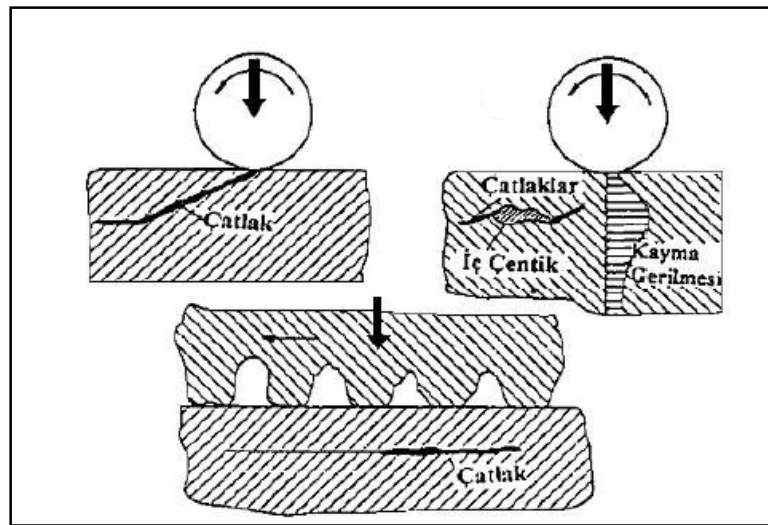
Şekil 5.5. Yüzeylerden en az birinden daha sert abrasif parçacıkların iki yüzey arasında sıkışması [45].

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 arttırabilir [46].

5.3.3. 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 [47]. 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 5.6' da yorulma aşınması oluşum mekanizması görülmektedir [48].



Şekil 5.6. Yorulma aşınması oluşum mekanizması [49].

5.3.4. 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 [50]. Erozyon aşınması farklı durum ve ortamlarda meydana gelebilmektedir.

5.3.4.1. 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.

5.3.4.2. 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.

5.3.4.3. 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.

5.3.4.4. Kavite 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.

5.3.4.5. Elektro Erozyon

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

5.3.5. 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 [48].

- a) Oksitlenme
- b) Karbürleme ve metal tozlaşması
- c) Nitrürlenme
- 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 genişleme 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 [47].

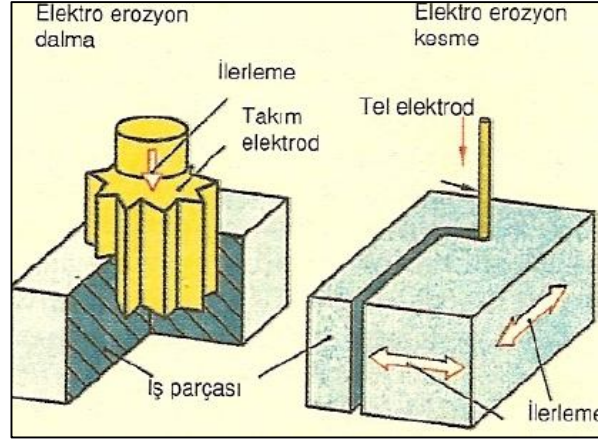
5.4. AŞINMANIN AZALTILMASI İÇİN GEREKLİ ÖNLEMLER

- a) Aşınmaya dayanıklı malzeme seçimi; parçanın çalıştığı ortamdaki mevcut aşınma türü ve şiddeti belirtilerek yapılmalıdır [47].
- b) Parçanın geometrik tasarımı, aşınmayı en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır.
- c) Sadece aşındırıcı ortamlarla 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 malzemeden 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 katkılı) kullanılarak yağ filminin çabuk bozulması önlenir. Bununla beraber, katkılı yağların oksidasyon aşınmasını artırıcı 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.
- j) Yağlayıcının kontrolleri düzenli olarak yapılmalı ve en düşük kullanım limiti belirlenerek belli aralıklarla yenilenmelidir.
- k) Sürtünme elemanları malzeme açısından bir birine uygun seçilmelidir.

5.5. AŞINMANIN KULLANIM ALANLARI

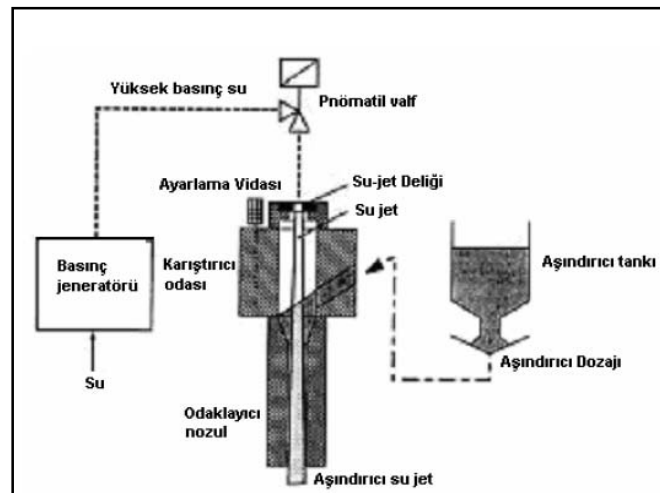
Aşınma her ne kadar birçok makine ve makine elemanlarını olumsuz etkilese de tahılların öğütülmesinde (abrasif aşınma) ve teknolojinin bir çok değişik alanında gelişmelere yol açmıştır. En önemli gelişmelerden bir tanesi de talaşlı imalatta hassas ve işlenmesi zor iş parçalarının işenmesinde kullanılan tezgahların üretilmesi ile yaşanmıştır. Örneğin adından da anlaşılacağı gibi elektro erozyon ve tel erozyon tezgahları elektro erozyon aşınması mantığı ile çalışan tezgahlardır. Burada iş parçası anot (+), elektrot katot (-) yüklü iki parçadır. Elektrot ile iş parçası arasında çok küçük ark boşluğunda kıvılcım atlaması meydana gelir. Tel erozyon tekniğinde de elektrot yerine özel teller kullanılır. Aşınma mantığı yine aynıdır.



Şekil 5.7. Elektro erozyon ve Tel erozyon tezgahı çalışma prensibi [43].

Araştırmacılar hareket halindeki suyun yaptığı aşındırma olaylarını yağın yağmurda, yüksek yerden düşen su damırlarında, şelalelerden akan suların aşındırma olayından yola çıkarak yine çok önemli bir tezgah olan su jeti tezgahı üretilmiştir.

Tezgahın çalışma prensibi katı partiküllü erozyon mantığı ile aynıdır. Öncelikle düşük basınçlı suyun basıncı yükseltilir. Gerektiğinde aşındırıcı partiküllerde karıştırılarak delik çapı 0.08-0.4 mm lüleden geçirilerek yüksek hızlarda kesilecek malzeme üzerine teması ile kontrollü olarak erozyon yöntemi ile kesme işlemi yapılır.



Şekil 5.8. Aşındırıcı su jetinin basit şematik görünümü [44].

5.6. AŞINMA ÖLÇÜM METODLARI

5.6.1. 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 gr 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 (gr/cm²) gibi bir birim ile ifade olunabilir [50].

Ağırlık farkı ölçme yönteminde en çok kullanılan bağıntılar aşağıdaki gibidir.

$$W_a = G/d.M.S \quad (5.1)$$

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.

5.6.2. Kalınlık Farkı Metodu

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

5.6.3. İz Değişimi Yöntemi

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

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

5.6.4. 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 değiştirmeden ölçü alınabilmesi avantajlarıdır. Fakat ekonomik olmaması nedeniyle özel problemlerin çözümü dışında yaygın bir yöntem değildir.

5.6.5. Bilgisayar Destekli Aşınma Ölçüm Metodu

Bu yöntemlerde aşınma ve aşınma değişkenlerine 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 [50].

5.7. TRİBOSİSTEMLER

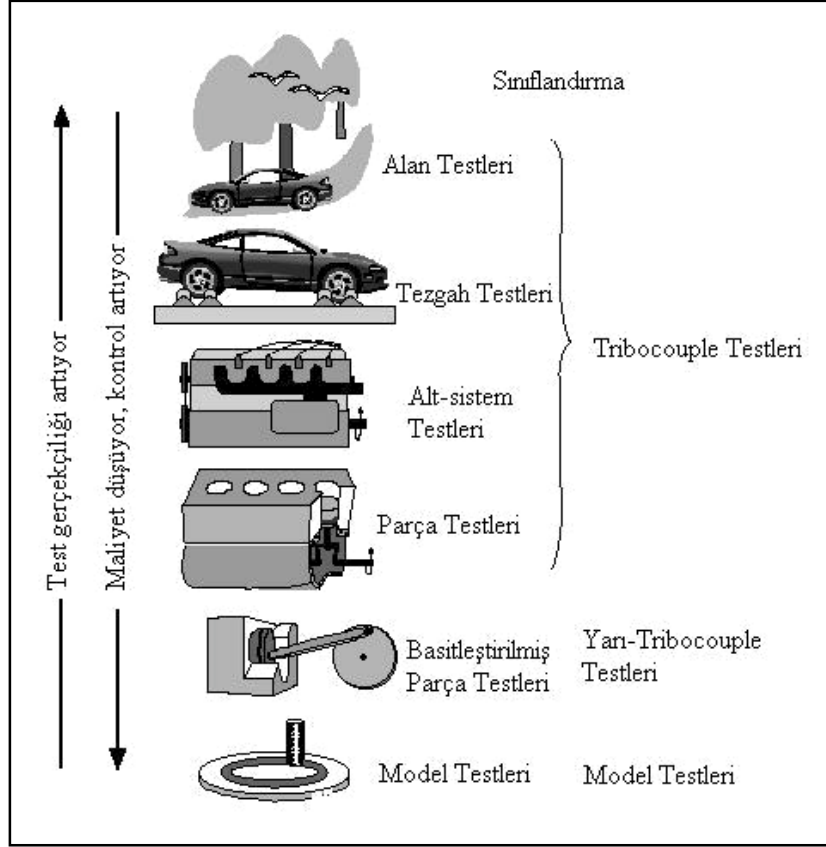
Tribolojinin sözlük anlamı birbiri ile temas eden yüzeyler arasındaki etkileşimi inceleyen bilim ve teknoloji olarak tanımlanmaktadır. Tribolojik araştırmaların amacı yüzey sürtünmelerinin ve aşınmadan kaynaklanan kayıpları azaltmak ve gidermektir. Aşınma tiplerinin çok çeşitli olması ve birçok farklı 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 [51].

5.7.1. Tribotestlerin Sınıflandırılması

Tribotestler birçok şekilde gerçekleştirilebilir. Tribolojik test metodlarının 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 [51].



Şekil 5.9. Tribosistemlerin şematik gösterimi [51].

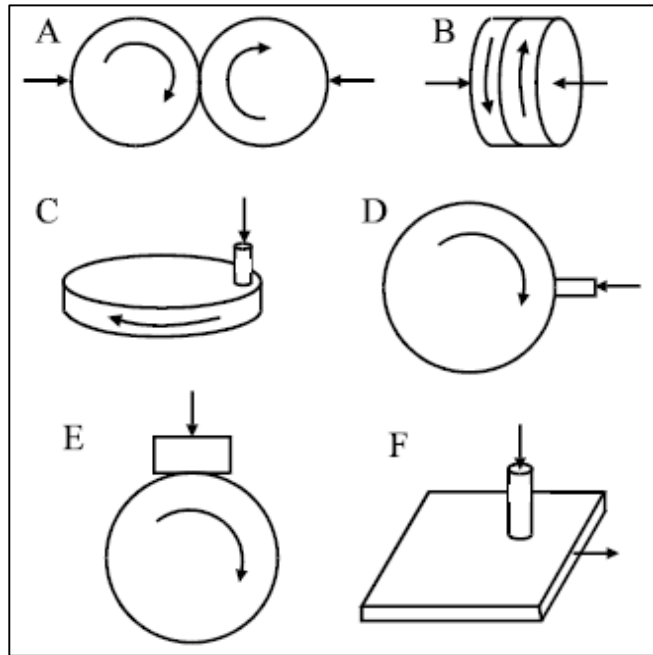
5.8. AŞINMA DENEY YÖNTEMLERİ

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 5.10'da 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 [52].

Şekil 5.10’da görülen metotlar iki tipe ayrılabilirler. Bunlardan birincisi aşınma oranının her iki kayma yüzeyinde de aynı malzemeden olsa bile aşınma oranlarının farklı olduğu asimetrik düzendedir.

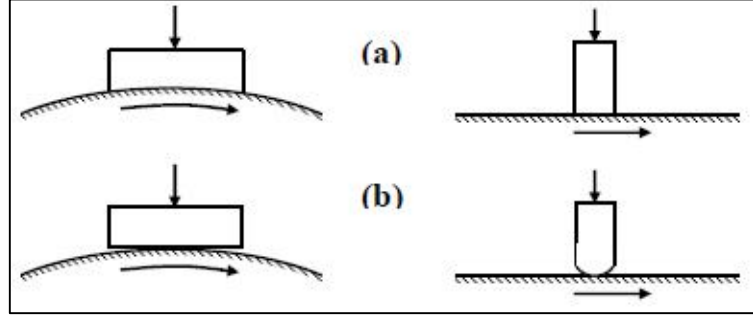
Simetrik düzen, aşınma çalışmasında pek sık kullanılmaz. Bu düzene Şekil 5.10’daki A ve B düzenleri örnek olarak gösterilebilir. Bu düzen tipinde ya çevreleri boyunca temas halinde olan (A) ya da yüzeyleri boyunca temas eden (B) her ikisi de dönen bilezik veya iki disk bulunur.



Şekil 5.10. Kayma aşınması için kullanılan geometrik düzenekler [53].

Çok yaygın olarak asimetrik cihazlarda bir diske karşı bastırılan pim kullanılır. 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 [52].



Şekil 5.11. Deney cihazlarında temas biçimleri [52].

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) [53].

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 [52].

5.9. AŞINMA DENEYLERİNDE KULLANILAN BAZI AŞINMA DENEY CİHAZLARI

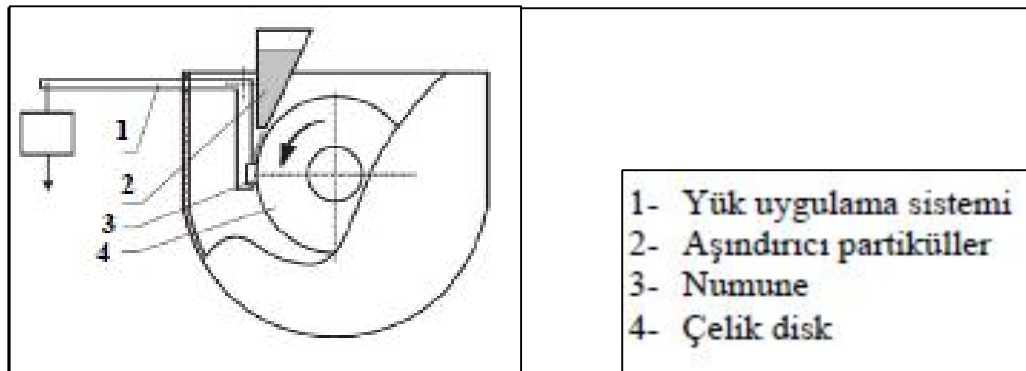
H,Klaasen ve J, Kübarsepp, bazı karpit bileşiklerinin aşınma performansı hakkında deneysel çalışmalar yapmışlardır. Aşınma deneyi için şekil 5.12’ de şematik olarak gösterilen lastik(kauçuk) tekerli abrasyon (ASTM G65-94) deney cihazını kullanmışlardır. Bu deney cihazı üç partiküllü abrasif aşınma deneyleri için ideal bir tasarım olmakla birlikte disk üstü blok deneyi içinde rahatlıkla kullanılabilir [54].

Ayrıca abrasif aşınma deneyleri ASTM standartlarına göre;

G65 Lastik tekerli abrasyon testi(aşındırıcı kuru kum)

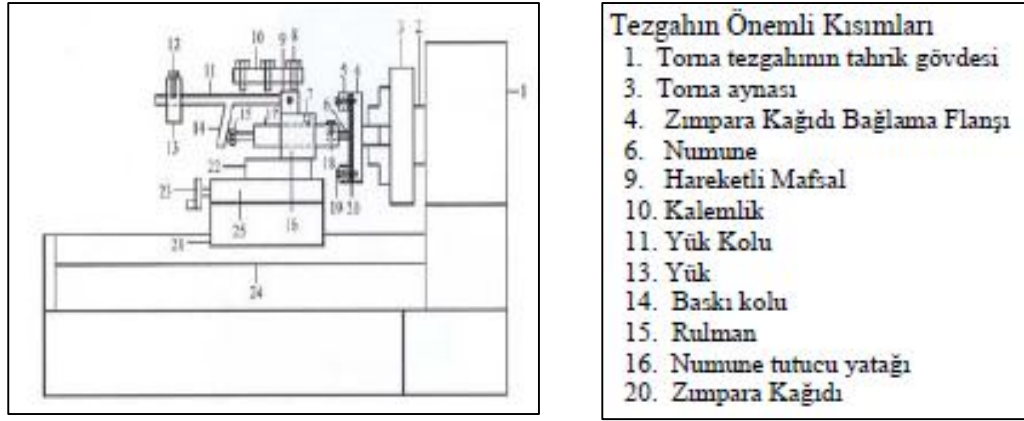
G 105 Lastik tekerli abrasyon testi(aşındırıcı ıslak kum)

B 611 Yüksek gerilimin olduğu yerlerde çelik teker kullanılır.



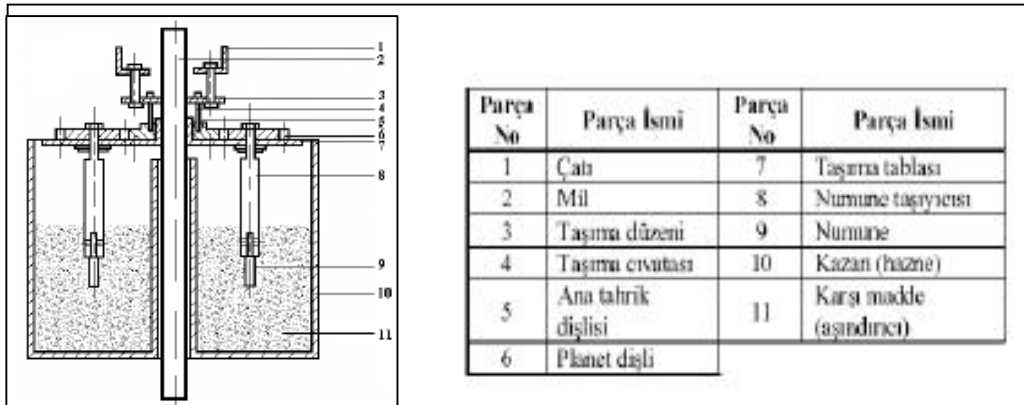
Şekil 5.12. Lastik tekerli abrasif aşınma deney cihazı şematik görünümü [54].

Y, Taşgın ve M, Kaplan, yaptıkları çalışmada dubleks döküm tekniğiyle üretilen FeCrC katkılı malzemenin abrasiv aşınma davranışını incelemişlerdir. Bu deneysel çalışmada şekil 5.13’de şematik olarak görünen aşınma deney cihazını kullanmışlardır. Deney cihazı esasen bir torna tezgahı üzerine gerekli aparat ve ölçüm sisteminin monte edilmesi ile oluşturulmuştur [55].



Şekil 5.13. Abarasiv aşınma deney cihazı şematik görünümü [55].

N, Y, Sarı ve M, Yılmaz, yaptıkları abrasif aşınma deneyinde şekil 5.14’ te 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 dönerek numuneler zaman ile aşınacaklardır [56].

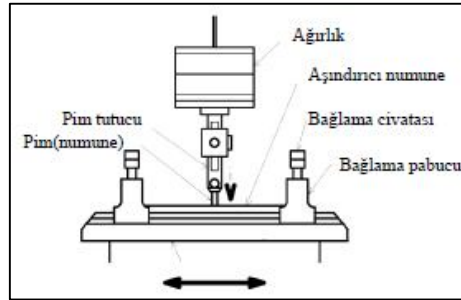


Şekil 5.14 Aşındırıcı partiküllü aşınma deney cihazı [56].

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 5.20’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 [57].

5.9.1. 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 [45].

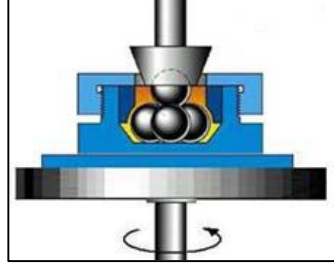


Şekil 5.15. Pin on Flat deney cihazı şematik görünümü [58].

5.9.2. Dört Top Deney Aparatı

Şekil 5.16’ da 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.

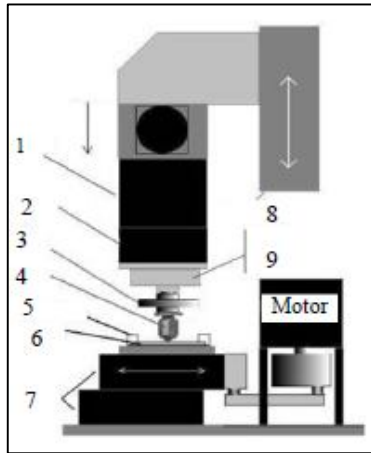
Bilyeler, standart rulmanlı yatak çeliğinden yapılabilir. Bu test, malzeme davranış çalışmalarından çok yağlama performansının değerlendirilmesinde kullanılan bir metottur.



Şekil 5.16. Dört top aşınma deney aparatı [52].

5.9.3. 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 5.17' 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.

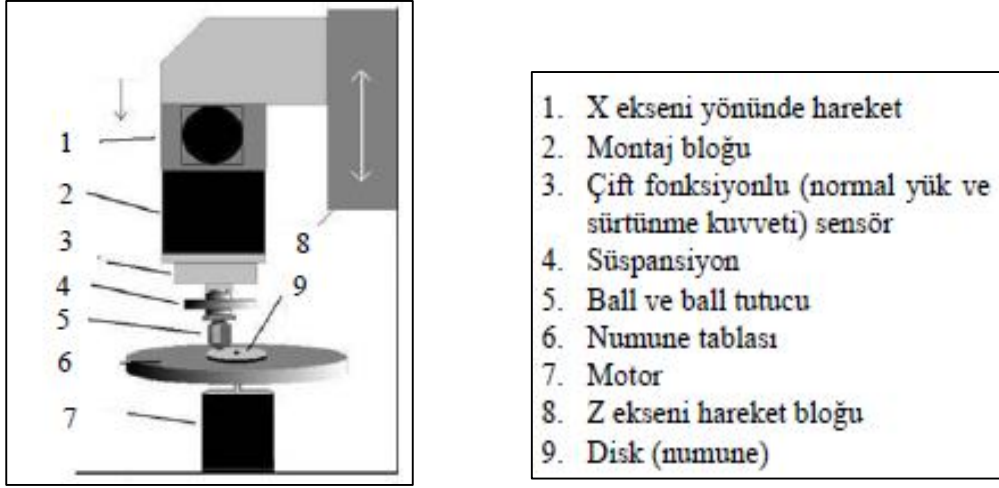


1. Gövde
2. Montaj bloğu
3. Süspansiyon
4. Ball ve ball tutucu
5. Numune mengersesi
6. Numune
7. Kayıt ve kızak
8. Z ekseni hareket bloğu
9. Çift fonksiyonlu (normal yük ve sürtünme kuvveti) sensör

Şekil 5.17. Ball on Flat deney cihazı [52].

5.9.4. 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 5.18'deki modelde yük düşey olarak küre üzerine uygulanmaktadır.

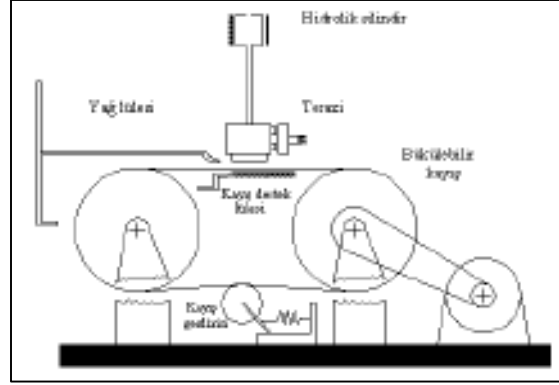


Şekil 5.18. Ball on Disk deney cihazı [59].

5.9.5. 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 gerdirmeye 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.

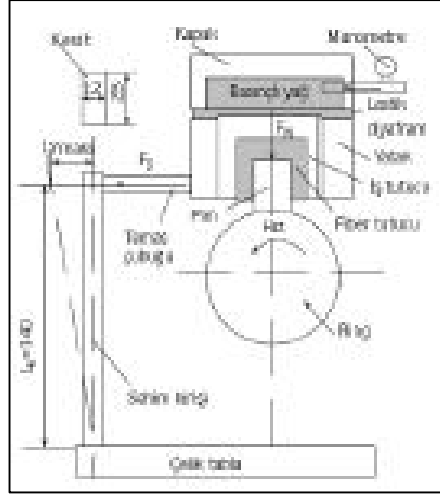


Şekil 5.19. Levha-kayış aşınma deney cihazı [59].

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 [59].

5.9.6. Silindir Üstü Çubuk Deney Cihazı

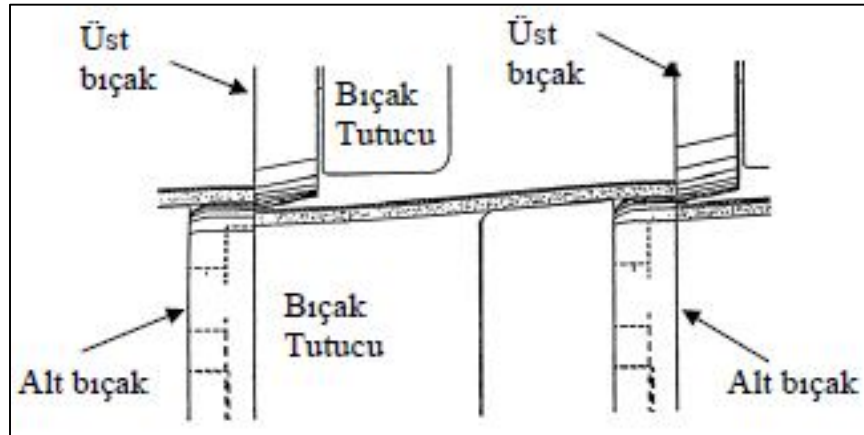
Silindir üzerinde çubuk aparatı pin on disk aparatına benzer. Farkı numunenin yüklemesi dönen silindir üzerine diktir. Numune düzlem veya yarım küresel uç olabilir.



Şekil 5.20. Silindir üstü çubuk deney cihazı şematik görünümü [57].

5.9.7. Çapraz Silindir Deney Cihazı

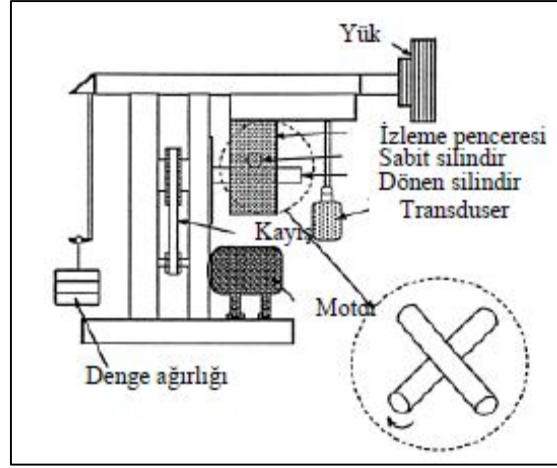
Kağıt kesiminde, kumaş kesiminde, sac metal kesiminde vb. malzemelerin kesiminde aşağıdaki gibi makas sistemi kullanılır. Bu tür kesimlerde bıçakla metal arasında çok küçük temas alanı ve yırtılmalar meydana gelir. Özellikle sac metal kalıplarındaki kesme işlemi buna çok iyi bir örnektir. Bu gibi bıçaklarda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



Şekil 5.21. Saç metal kesimi [60].

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.

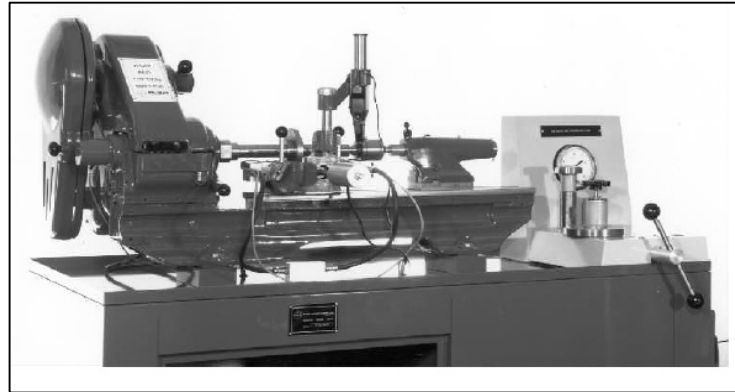
Cihazın çalışma prensibi kendi ekseninde dönen bir silindir ve bu silindire çizgisel temas eden çarpı şeklinde konulmuş sabit bir silindirden meydana gelmektedir. Bu deneyde meydana gelen aşınma önce dönen parçanın dış çapında meydana gelen yivin hacmi ölçülür. Sabit parça üzerinde meydana gelen aşınma lekeleri ölçülür ve bununla birlikte sistemdeki toplam aşınma bulunmuş olur [60].



Şekil 5.22 Çapraz silindir deney düzeneği [60].

5.9.8. Plint TE 97 Sürtünme ve Aşınma Deney Cihazı

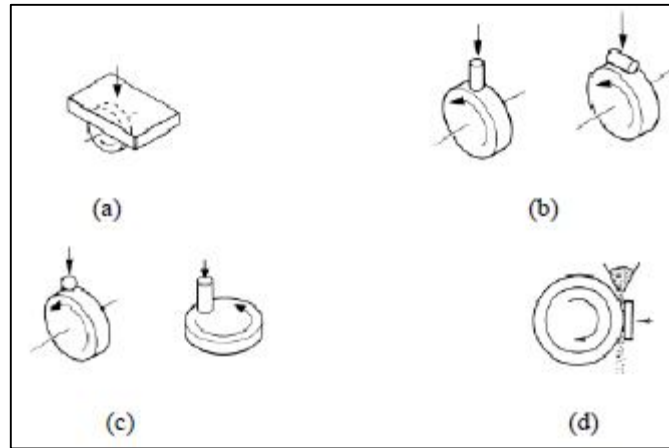
Plint firmasının ürettiği ilk tribolojik test cihazı TE 97 model test cihazıdır. Bu cihazın tasarımı Dr. Michael Plint ve Prof. Duncan Dowson tarafından yapılmıştır [60].



Şekil 5.23. Plint firmasının ürettiği ilk TE -97 aşınma deney cihazı [60].

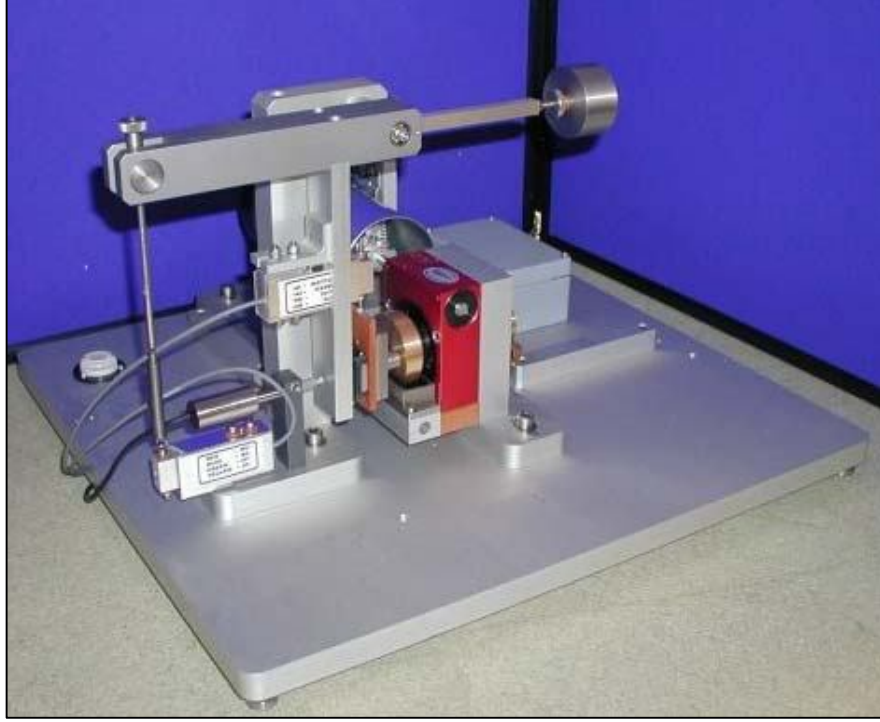
Sürtünme ve aşınma üzerine eski tarihlerden beri birçok çalışma yapılmış ve insanlar asırlar önce tahılları öğütmek için aşınmayı, sürtünmeyi azaltarak büyük kütleli parçaları daha az kuvvetle itebilmek için yağları kullandıkları bilinmektedir. Özellikle yakın tarihimizde sanayi devrimlerinin başlaması 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 tırolojik 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.

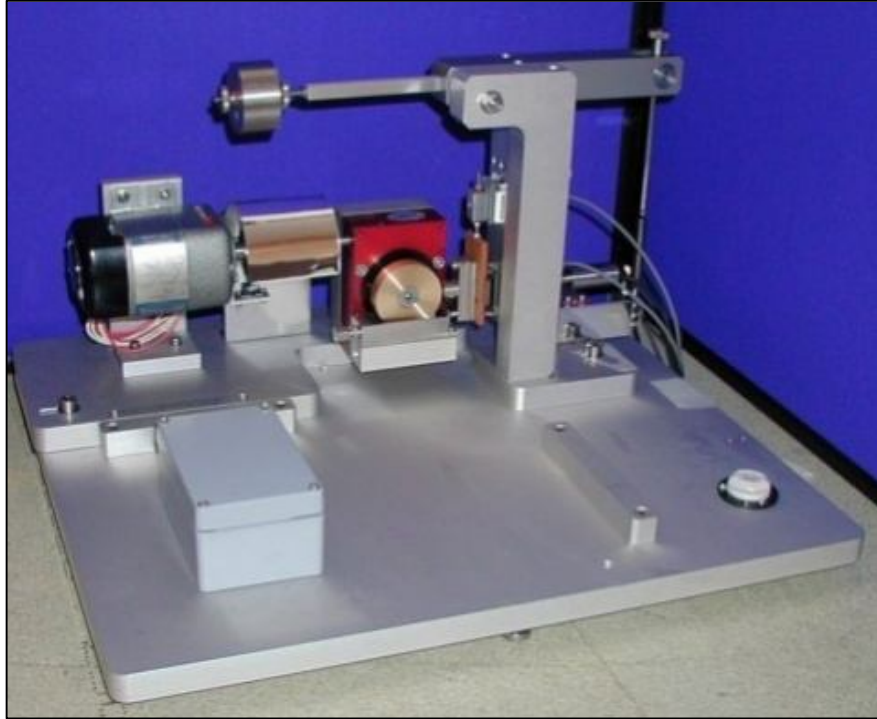


Şekil 5.24. TE 97 deney cihazı ile yapılabilen aşınma deneylerinin şematik görünümü [60].

Şekil 5.25' 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 [60].



(a)



(b)

Şekil 5.25. Aşınma deney cihazlar a) TE-97 Pin on Disk ve b) Block on disk.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. DENEYSEL MALZEMELER

Bu çalışmada döküm halinde temin edilen DIN 1.4777 kalite yüksek karbonlu ve kromlu çeliklerin homojenleştirme ısı işlemi ve borlama ısı işlemi sonrası mikroyapısında, sertliğinde, aşınma ve korozyon davranışlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan DIN 1.4777 kalite çeliğin kimyasal bileşimi Çizelge 6.1’de verilmiştir. Kimyasal bileşiminden yola çıkarak hesaplanan $Cr_{eş}$, $Ni_{eş}$ ve bunların oranları hesaplanmıştır. $Cr_{eş}$ ve $Ni_{eş}$ değerleri sırasıyla 32.2 ve 52.5 iken $Cr_{eş} / Ni_{eş}$ değeri de 0.612 olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.1. Alaşımli çeliğin kimyasal bileşimi, $Cr_{eş}$, $Ni_{eş}$ ve $Cr_{eş} / Ni_{eş}$ değerleri.

| ALAŞIM | C % | Ni % | Cr % | Si % | Mn % | Mo % | V % | Cu % | W % | Nb % | Ti % | Sn % | P % | S % | Co % | Al % |
|---------------|------|------|--------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| DIN 1.4777 | 1,74 | 0,52 | 30,401 | 1,1 | 0,5 | 0,055 | 0,082 | 0,041 | 0,01 | 0,031 | 0,005 | 0,005 | 0,03 | 0,029 | 0,029 | 0,025 |

$$Cr_{eş} = \% Cr + \% Mo + \% 1,5.\% Si + 2.\% Nb + 3.\% Ti = 32,183 [7]$$

$$Ni_{eş} = \% Ni + 30.\% C + 0,5.\% Mn + 11,5.\% N = 52,5 [7]$$

$$Cr_{eş} / Ni_{eş} = 0,612$$

6.2. HOMOJENİZASYON ISIL İŞLEMİ

Bu çalışmada incelenen alaşımli çelik döküm halinde temin edilmiş olup, alaşımların homojen olarak yapı içerisinde bulunması için, 1150⁰C’de 3,5 saat homojenizasyon ısı işlemine tabi tutulmuştur. Bu homojenizasyon ısı işlemi Alser marka protherm model PID kontrollü elektrikli direnç fırınında yapılmıştır (Şekil 6.1.).



Şekil 6.1. Alser marka protherm model PID kontrollü elektrikli direnç fırını.

6.3. BORLAMA ISIL İŞLEMİ

Borlama ısıl işlemi katı-toz ortamda gerçekleştirilmiştir. Bor kaynağı olarak EKabor 2 kullanılmış olup bu malzeme Salihli/Manisa'da VEZNELİ A.Ş.'den temin edilmiştir.

Borlama işlemi 900⁰C sıcaklıkta, 8 saat sürede atmosferik şartlarda yapılmıştır. Borlama işleminde AISI 304 kalite 3mm kalınlığında paslanmaz çelik saçdan yapılmış; 120 mm çapında, 50 mm yüksekliğinde silindirik ağzı kapaklı kap kullanılmıştır. Borlama tozu ile doldurulmuş olan kap içerisine, yüzeyleri 650 nolu zımparaya kadar parlatılarak hazırlanmış çelik numuneler, gömülmüş ve kapak sıkıca kapatılmıştır. Kap içerisinde, numune aralarında ve numune ile kap kenarı arasında en az 12mm aralıkta borlama tozu olacak şekilde yerleştirme yapılmış ve işlem sıcaklığına çıkarılmış olan Alser marka protherm model PID kontrollü elektrikli direnç fırınına yerleştirilmiştir (Şekil 6.1.) . Borlama sonrasında numuneler oda sıcaklığına kadar pota içerisinde havada soğutulmuştur. Numune suda yıkanarak temizlenmiştir.

6.4. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

Hem homojenleştirme hem de borlama ısıl işlemine tabi tutulmuş alaşımlı çelik, aşağıda açıklandığı gibi mikroyapı ve mekanik özellik karakterizasyon çalışmalarına tabi tutulmuştur.

6.4.1. Mikroyapı Karakterizasyonu

Mikroyapı karakterizasyonu, metalografik inceleme, optik ışık mikroskobu, EDS bağlantılı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışınları difraksiyon (XRD) çalışmaları ile gerçekleştirilmiştir. Bakalite alınan numuneler standart yöntemlerle zımparalandıktan sonra sırası ile 1 μm Al_2O_3 solusyonu ve 0.5 μm elmas pasta ile parlatılmıştır. Parlatılan numuneler dağlama çözeltisinde (oxalik asit) 1.5 volt altında 15 saniye süreyle elektrolitik olarak dağlanmıştır. Mikroyapısal incelemeler, bilgisayar donanımlı Leica marka DMILM model optik ışık mikroskobu kullanılarak yapılmıştır (Şekil 6.2.). Hem homojenleştirilmiş hem de borlama ısıl işlemi uygulanmış çeliklerin mikroyapısında oluşan intermetaliklerin bileşimini ve kimyasal formülünü belirlemek için sırasıyla EDS donanımlı, ZEISS LS10 model SEM cihazı ve XRD cihazı kullanılmıştır. XRD çalışmaları, Cu-K α radyasyonu kullanan Philips PW1710 model XRD cihazı ile 40mA akımda 40 kV jeneratör gerilimi altında 10^0 - 90^0 açı aralığında ve 0.02 0 /s değerinde bir tarama hızı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.2. Leica marka DMILM model optik ışık mikroskobu.

6.4.2. Mekanik Özellik Karakterizasyonu

Mekanik özellik karakterizasyonu, sertlik deneyleriyle yapılmıştır. Sertlik ölçümleri metalografik olarak hazırlanmış tüm incelenen numuneler üzerinde Vickers batıcı ucu ile Schimadzu marka HMV Model mikrosertlik cihazında 2000 gr yük altında Vickers sertlik değeri (HV) cinsinden sertlik değerlerinin belirlenmesi ile gerçekleştirilmiştir.

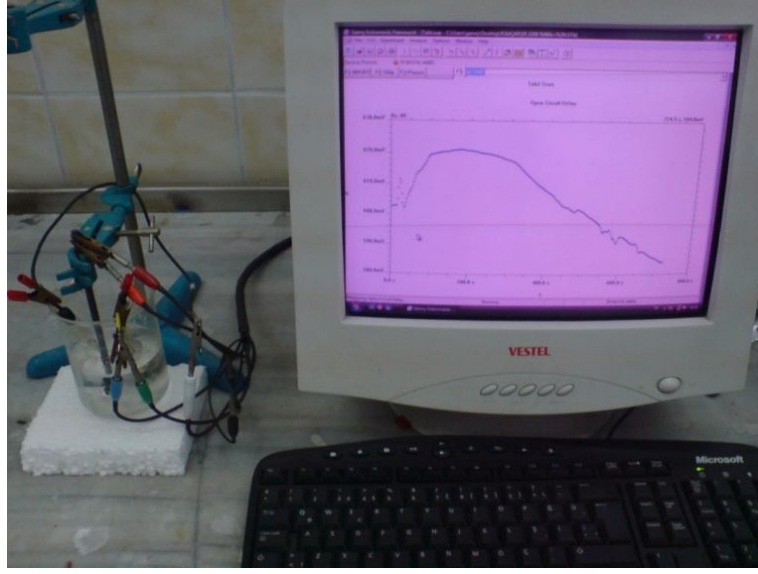
Sertlik değerleri, en az 10 ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Şekil 6.3.'de sertlik deney cihazı görülmektedir.



Şekil 6.3. Schimadzu marka HMV Model mikrosertlik cihazı.

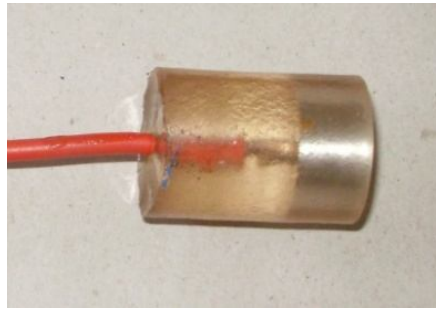
6.5. KOROZYON DENEYLERİ

Potansiyodinamik korozyon deneyleri, DC105 Korozyon Analiz yazılımına sahip bilgisayar kontrollü Gamry model PC4/300mA potansiyostat/galvonostat cihazı (Şekil 6.4) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.4. Potansiyodinamik /Polarizasyon deneylerinde kullanılan potansiyostatik yöntemle çalışan statik korozyon deney düzeneği.

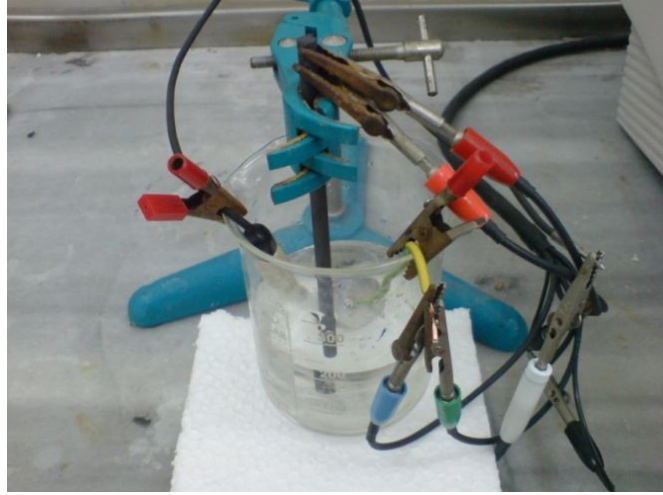
Korozyon deney numuneleri Şekil 6.5.'de görüldüğü gibi iletkenliği sağlayabilmek amacıyla arka yüzeyine 1,5 mm çapında 150 mm uzunluğunda bakır tel lehimlenmiş ve yalnızca elektrolit ile temasta olması istenen yüzeyleri açıkta kalacak şekilde reçine ile kaplanmıştır. Numunelerin yüzeyleri standart metalografik yöntemle 1000 mesh zımparaya kadar zımparalanmıştır. Korozyon deneyine başlamadan önce numuneler, saf su ortamında 5 dakika süre ile temizlenmiş ve ardından alkol ile durularak kurutulmuştur.



Şekil 6.5 Korozyon deneylerinde kullanılan çalışma elektrotu.

Deney hücresi olarak 400 ml beher kap kullanılmıştır. Kap içerisinde korozyon çözeltisi olarak %10 H_2SO_4 ve %10 NaCl çözeltileri kullanılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında yapılmış olup deney hücresi içerisine çalışma elektrotu olarak $0,785 \text{ cm}^2$

sabit yüzey alanına sahip incelenen alaşımlar, karşı elektrot görevini yapan 6mm çapında karbon elektrot ve referans elektrot olarak da doygun kalomel elektrot (SCE) yerleştirilmiştir. Çalışma elektrotu ile karbon elektrot yüzeyleri karşılıklı gelecek şekilde belirli uzaklıkta, referans elektrot ise çalışma elektroduna olabildiğince yakın yerleştirilmiştir (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. Statik korozyon deney hücresi.

Korozyon deneyleri sırasında elektrolit içine çalışma elektrotunun ve referans elektrotunun daldırılmasından itibaren ikisi arasındaki korozyon potansiyellerinin mV olarak değişimi ilk 45 dakika süreyle, zamana karşı ölçülmüştür. Denge potansiyeline (E_{corr}) ulaşıldıktan sonra potansiyodinamik polarizasyon eğrileri -1.00'dan 1.00 V'a kadar 1 mV/s tarama aralığında katodikten anodik yöne doğru potansiyeli tarayarak çizilmiştir.

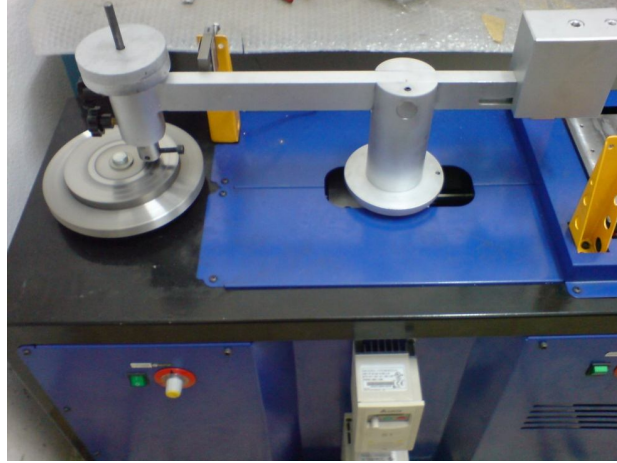
DC korozyon yazılımı yardımıyla tafel eğrilerinden korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) hesaplanmıştır. Tüm deneyler, her bir alaşım grubu için en az üçer defa olmak üzere polarizasyon eğrileri birbirlerini doğrulayınca kadar tekrar edilerek sonuçların daha güvenilir olmasına çalışılmıştır.

Potansiyodinamik polarizasyon deneyleri sonrasında numuneler, çözelti içerisinde çıkarılarak saf su ortamında 5 dakika süre ile temizlenmiş ve ardından alkol ile

durularak kurutulmuştur. Korozyon mekanizmasının belirlenmesi için korozyon yüzeyleri optik mikroskop ve EDS donanımlı SEM cihazı ile incelenmiştir.

6.6. AŞINMA DENEYLERİ

Adhezif aşınma testi ile sürtünme katsayı ölçümleri, ASTM G99'a uygun olarak tasarlanan Pim-Disk (Pin on Disc) cihazında gerçekleştirilmiştir. Bu test tekniğinde, sabit duran ve yüklemenin üzerinden yapıldığı bir pim ve bunun karşısında dönerek kayan karşı malzeme olarak tanımlanan bir disk vardır. Test sisteminin şematik gösterimi, Şekil 6.7.'de verilmiştir. Bu metod, bir çok hareketli makine elemanı ve yatak uygulamaları ile büyük ölçüde benzeştiğinden tercih edilmiştir.



Şekil 6.7. 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 4 mm çapındaki deney numuneleri kullanılarak, normal atmosferik koşullarda, AISI 4140 (DIN 1.7225) (198 HB) kalite ıslah çeliği ve DIN 1.2379 (62 HRC) kalite soğuk iş takım çeliğinden imal edilmiş diskler üzerinde yapılmıştır. Aşınma deney numunelerine 10-60 N (1.75-3.5-7-10.5

N/mm^2) arasında dört farklı yük uygulanmıştır. Deneyle 0.2 m/s kayma hızı, 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 150 gr tartma kapasiteli, Precisa marka XS 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 sırasında numune tutucu kola yatay yönde temas ettirilmiş olan load cell ile sürtünme sırasında kola etki eden yatay kuvvetler ölçülmüş ve deney sonrası elde edilen bu veriler uygulanan yük ile oranlanarak sürtünme katsayısı belirlenmiştir.

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

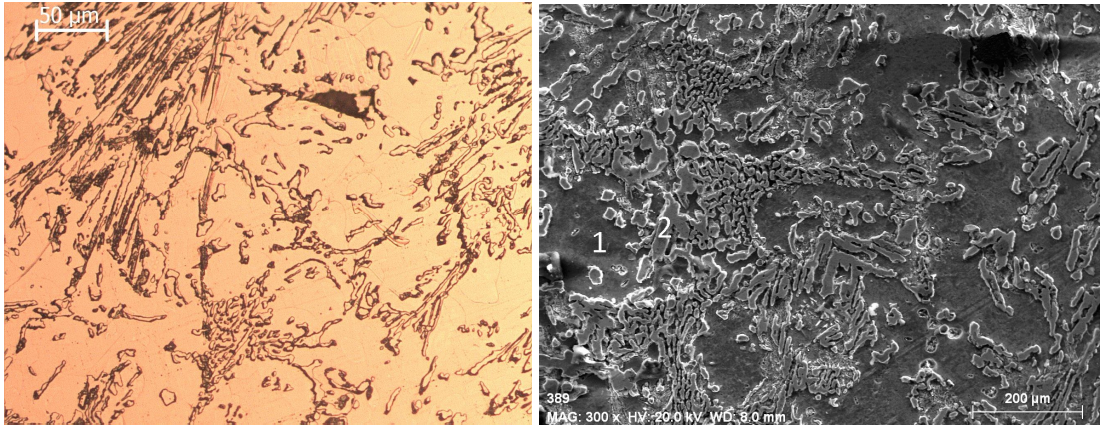
BÖLÜM 7

DENEYSEL SONUÇLAR

7.1. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU VE SERTLİK DENEYLERİ

Döküm halinde temin edilen kimyasal bileşimi Çizelge 6.1.'de verilen DIN 1.4777 kalite çeliğin homojenleştirme ve borlama ısıl işlemi sonrası optik ışık mikroskop ve SEM görüntüleri Şekil 7.1.'de ve Şekil 7.2.'de verilmiştir.

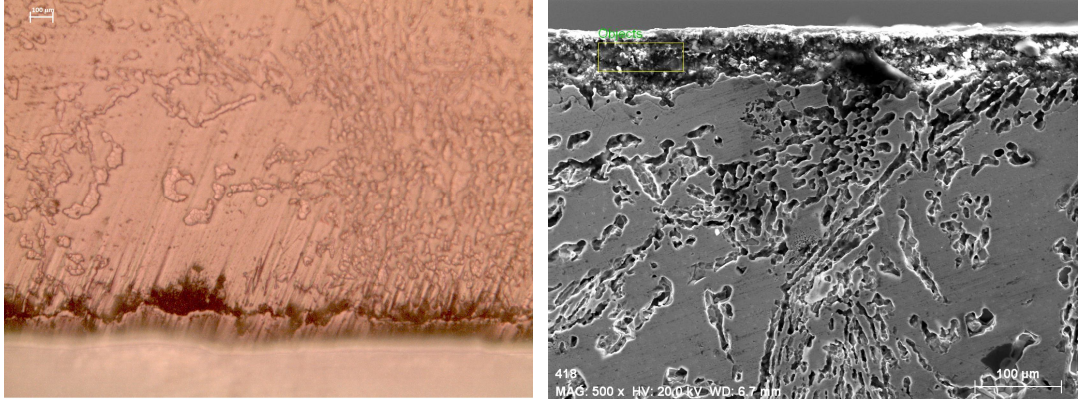
Homojenleştirme ısıl işlemi görmüş çeliğin mikroyapısında beyaz renkli matris ve yarı iğnesel yarı küresel adacıklar halinde intermetalikler bulunmaktadır. Borlama ısıl işlemi görmüş çeliğin kesit mikroyapısı çelik yüzeyinde koyu renkli bir tabakanın oluştuğunu göstermektedir. Bu tabakanın kalınlığı yaklaşık olarak 100 μm 'dir.



(a)

(b)

Şekil 7.1. 1150⁰C'de 3,5 saat homojenleştirme ısıl işlemi görmüş numunenin a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü.



(a)

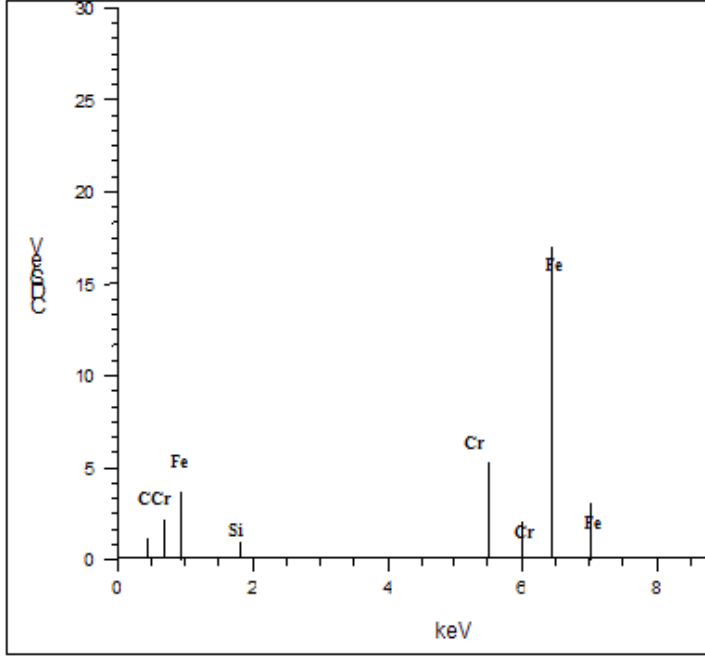
(b)

Şekil 7.2. 900⁰C’ de 8 saat borlama ısıt işlemlerini uygulanmış numunenin a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü.

Homojenleştirilmiş çeliğin kimyasal bileşiminden yararlanarak hesaplanan Cr_{es} , Ni_{es} ve Cr_{es} / Ni_{es} değerleri, Schaeffler ve WRC 1992 diyagramları üzerine yerleştirildiğinde matrisin ostenit olduğu ortaya çıkmaktadır.

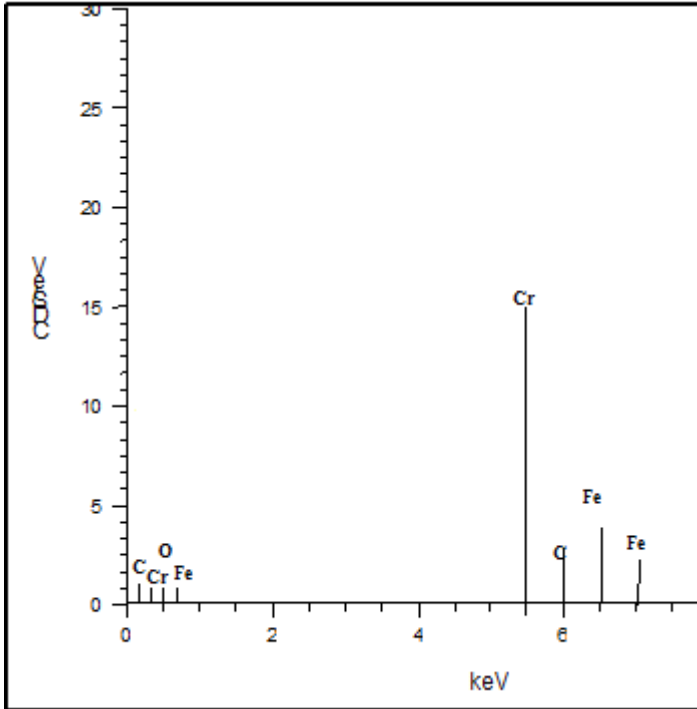
Homojenleştirilmiş çeliğin matris (Şekil 7.1b’de 1 nolu bölge) ve intermetalik (Şekil 7.1b’de 2 nolu bölge) üzerinden alınan EDS analizleri Şekil 7.3.’de verilmiştir.

Şekil 7.3.’de görüldüğü gibi 1 nolu bölgenin Fe’ce 2 nolu bölgenin ise Cr’ca zengin olduğu bulunmuştur. Ayrıca 2 nolu bölgenin C miktarı 1 nolu bölgeden daha fazladır. Borlama ısıt işlemlerini görmüş çeliğin borlama bölgesinden alınan EDS analizleri (Şekil 7.4.) borlama bölgesinin öncelikle C’ca ve ardından sırasıyla Fe, Cr ve B’ca zengin olduğunu ortaya göstermiştir..



| 1 Nolu Bölge | % Ağırlık İçeriği | % Atom İçeriği |
|--------------|-------------------|----------------|
| C | 2,48 | 9,91 |
| Fe | 79,05 | 67,24 |
| Cr | 17,12 | 16,18 |
| Si | 1,38 | 2,42 |

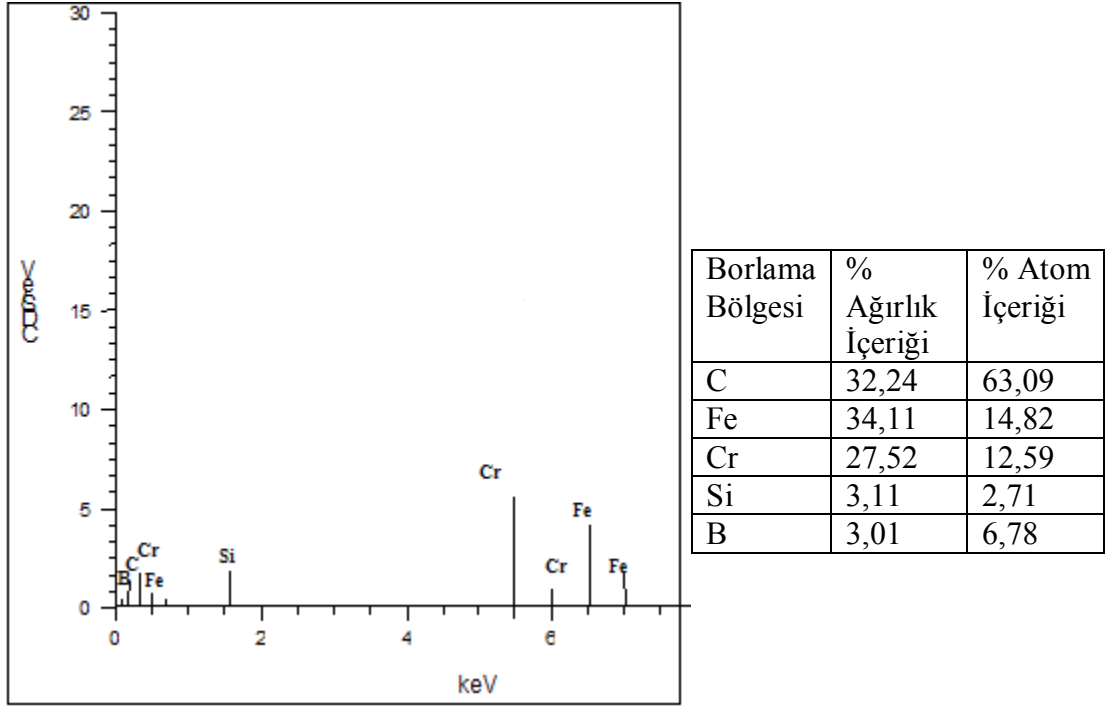
(a)



| 2 Nolu Bölge | % Ağırlık İçeriği | % Atom İçeriği |
|--------------|-------------------|----------------|
| C | 4,85 | 18,07 |
| Fe | 32,26 | 25,84 |
| Cr | 61,84 | 53,19 |
| Si | 1,05 | 2,9 |

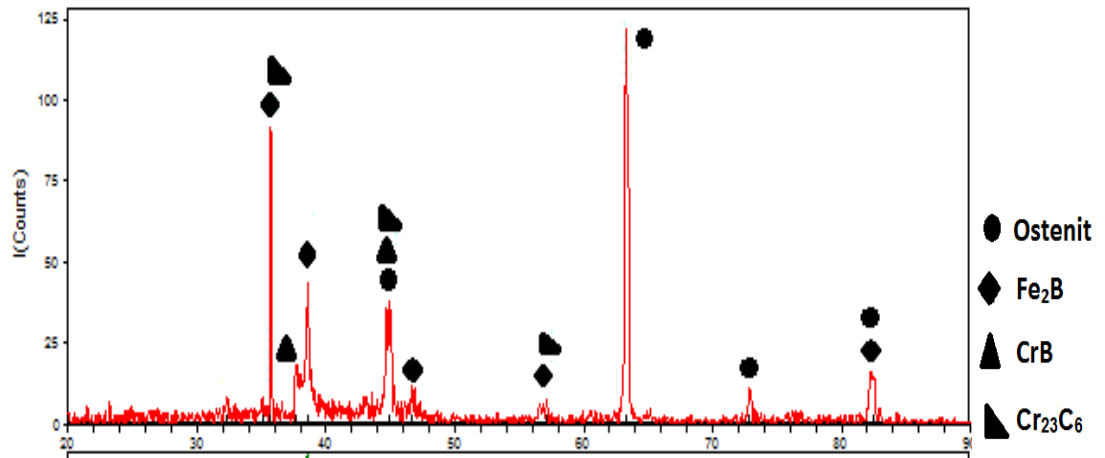
(b)

Şekil 7.3. Homojenleştirme ısı işlemi görmüş çeliğin SEM görüntüsü üzerindeki a) 1 nolu ve b) 2 nolu bölgenin EDS analiz sonuçları.



Şekil 7.4. Borlama ısıtılmış işlemi görmüş çeliğin yüzeyinde oluşan kaplamanın kesitinden alınan EDS analiz sonucu.

Borlama ısıtılmış işlemi görmüş numunenin yüzeyinden yapılan XRD çalışmasında (Şekil 7.5.) matrisin ostenit ve yapıda oluşan intermetalik Cr_{23}C_6 karbürü olduğu bulunmuştur. Bu malzemeye uygulanan borlama ısıtılmış işlemi sonrası numune yüzeyinde CrB ve Fe_2B faz karışımı içeren tabakanın da meydana geldiği bulunmuştur.



Şekil 7.5. Borlama ısıtılmış işlemi görmüş numunenin XRD paternleri.

Homojenleştirme ve borlama ısıl işlemi görmüş çeliğin yüzeyinden alınan kütlelesel sertlik değerleri Çizelge 7.1.'de verilmiştir. Borlama ısıl işlemi görmüş çeliğin yüzey sertlik değeri homojenleştirilmiş çeliğe göre ortalama 8 kat daha yüksek çıkmıştır.

Çizelge 7.1. İncelenen çeliklerin oda sıcaklığındaki sertlik sonuçları.

| Homojenleştirilmiş Çelik | Borlanmış Çelik |
|-----------------------------|--------------------|
| 275 ± 12 HV | 2160 ± 20 HV |

7.2. KOROZYON DENEYLERİ

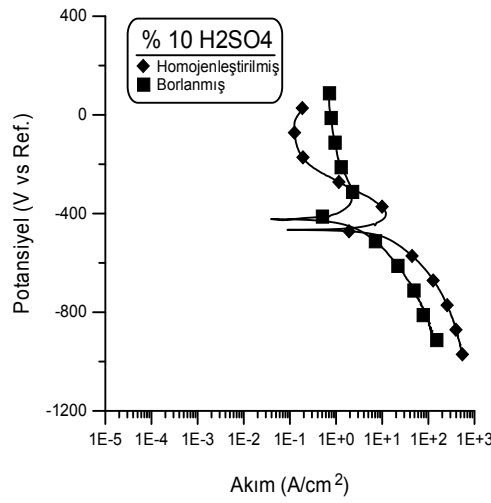
İncelenen çeliklerin % 10 H₂SO₄ ve % 10 NaCl çözeltileri içerisinde potansiyostat kullanılarak yapılan korozyon deneylerinden elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 7.6.'da verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen korozyon akım yoğunluğu (I kor) ve korozyon potansiyeli değerleri Çizelge 7.2.'de listelenmiştir..

Çizelge 7.2. İncelenen alaşımların % 10 NaCl ve % 10 H₂SO₄ çözeltisi içerisinde yapılan polarizasyon deney sonuçları.

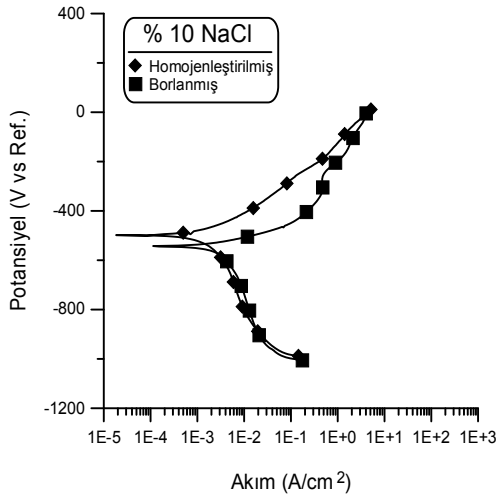
| | Homojenleş. Çelik | | Borlanmış Çelik | |
|------------------------------------|-------------------|-------|-----------------|-------|
| | İ kor (mA) | E(mV) | İ kor (mA) | E(mV) |
| %10 NaCl | 0,00143 | -498 | 0,00279 | -543 |
| %10 H ₂ SO ₄ | 20,5 | -466 | 1,986 | -423 |

Gerek homojenleştirilmiş gerekse borlanmış çelik numuneler % 10 H₂SO₄ çözeltisi içerisinde pasifleşme eğilimi gösterirken (Şekil 7.6.), % 10 NaCl çözeltisi içerisinde pasifleşme meydana gelmemiştir. Ayrıca, her iki koşulda % 10 H₂SO₄ çözeltisi içerisindeki korozyon hızı % 10 NaCl içerisindeki korozyon hızından daha fazladır.

Homojenleştirilmiş çeliğe kıyasla borlama ısıl işlemi görmüş çeliğin korozyon direnci % 10 H₂SO₄ çözeltisi içerisinde artarken %10 NaCl çözeltisi içerisinde düşmektedir. Borlanmış çeliğin, homojenleştirilmiş çeliğe kıyasıya % 10 H₂SO₄ çözelti içerisindeki korozyon akım yoğunluğu yaklaşık olarak 10 kat azalmış, korozyon potansiyeli de çok az miktarda artmıştır. % 10 NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen korozyon deneylerinde borlama ısıl işlemi ile korozyon akımı yoğunluğu yaklaşık olarak 2 kat artmış, korozyon potansiyeli de bir miktar azalmıştır.



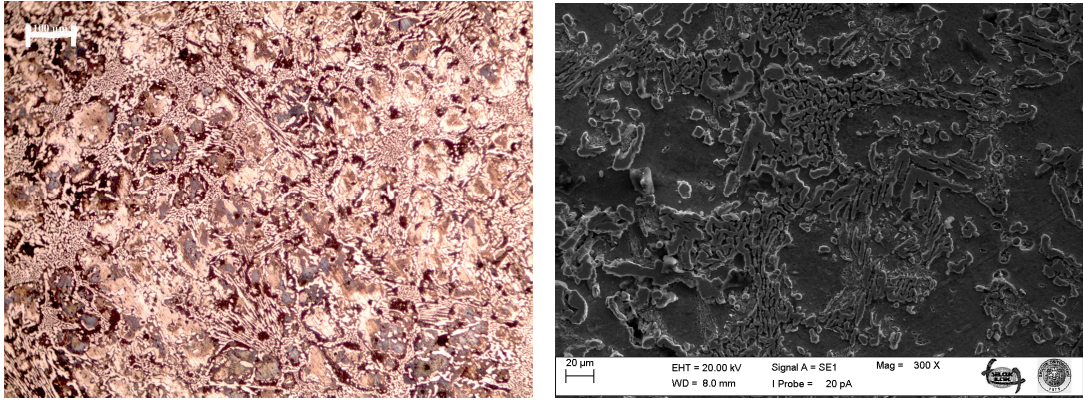
(a)



(b)

Şekil 7.6. a) H₂SO₄ ve b) NaCl çözeltisi içerisinde homojenleştirilmiş çelik ve borlanmış çelik numunelerinin polarizasyon eğrisi.

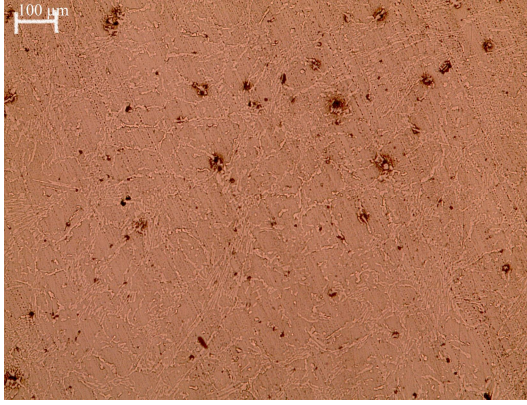
İncelenen çeliklerin % 10 H₂SO₄ ve % 10 NaCl çözeltileri içerisinde korozyon deneyleri sonrası yüzeylerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri Şekil 7.7.-7.10'da gösterilmektedir. Homojenleştirilmiş numunelerin % 10 H₂SO₄ çözeltisi içerisinde meydana gelen korozyon hasarı (Şekil 7.7), numunenin matrisinin dağlanması ve karbürlerin çıkıntı olarak yüzeyde kalması şeklinde gerçekleşen eş değer şiddette korozyon gelişmiştir. Bununla birlikte % 10 NaCl çözeltisi içerisinde (Şekil 7.8.) karbür-matris ara yüzeyinde oyuklanma şeklinde bölgesel korozyon oluşmuştur. Yüzeyde oluşan oyuklar mikro boyuttadır. Borlanmış çeliğin % 10 H₂SO₄ çözeltisi içerisinde yapılan korozyon deneyleri sırasında (Şekil 7.9.) yüzeyde homojen tipte eş değer şiddette korozyon meydana gelmiş ve korozyona uğramış numune yüzeyi pürüzlenmiştir. % 10 NaCl çözeltisi içerisinde yapılan korozyon deneylerinde yüzeyden bor tabakasının kalktığı (Şekil 7.10.) görülmüştür. Borlanmış çelik numunenin %10 NaCl çözeltisi içerisindeki korozyonun yüzeyden bor tabakasının kalkması ile gelişmesi, hem korozyon akım yoğunluğunun artmasına hem de korozyon potansiyelinin azalmasına sebep olmuştur. % 10 NaCl çözelti içerisinde bor tabakasının kalkması ile korozyon hasarının oluşması, oyuklanma mekanizmasına dayandırılabilir. Yüzeyde oluşan oyukların kaplama arayüzüne inmesi sonucu arayüzeyde galvanik çift oluşmakta ve korozyon, kaplanın kalkması ile gelişmektedir.



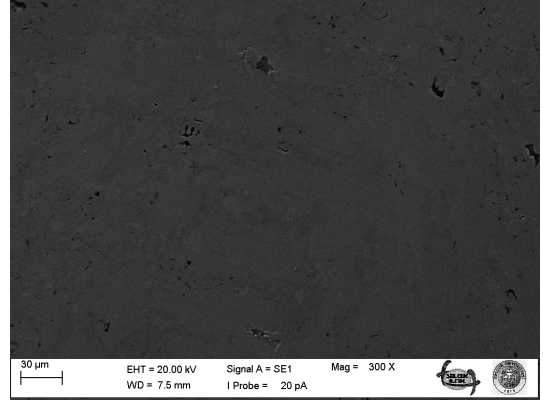
(a)

(b)

Şekil 7.7. Homojenleştirme ısı işlemi görmüş numunelerin %10 H₂SO₄ çözeltisi içinde potansiyodinamik korozyon davranışının a) Optik ışık mikroskopta ve b) SEM görüntüsü.

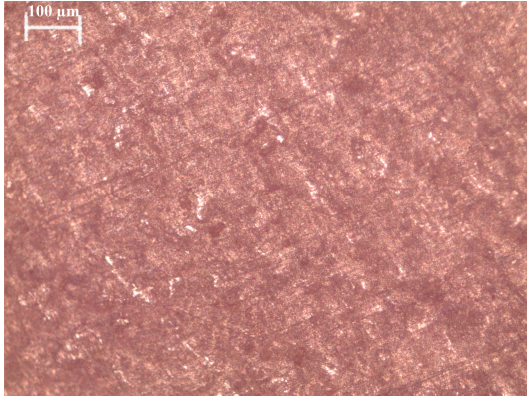


(a)



(b)

Şekil 7.8. Homojenleştirme ısı işleme görmüş numunelerin %10 NaCl çözeltisi içinde potansiyodinamik korozyon davranışının a) Optik ışık mikroskopta ve b) SEM görüntüsü.

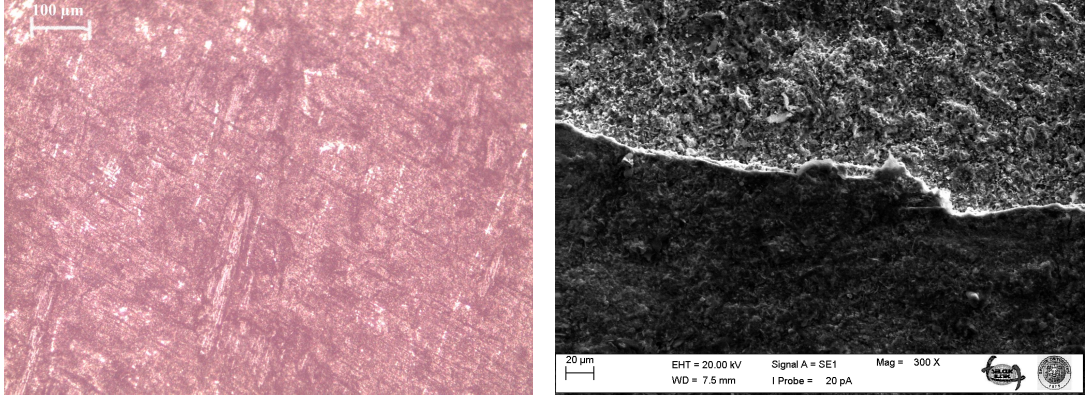


(a)



(b)

Şekil 7.9. Borlama ısı işleme görmüş numunelerin %10 H₂SO₄ çözeltisi içinde potansiyodinamik korozyon davranışının a) Optik ışık mikroskopta ve b) SEM görüntüsü.



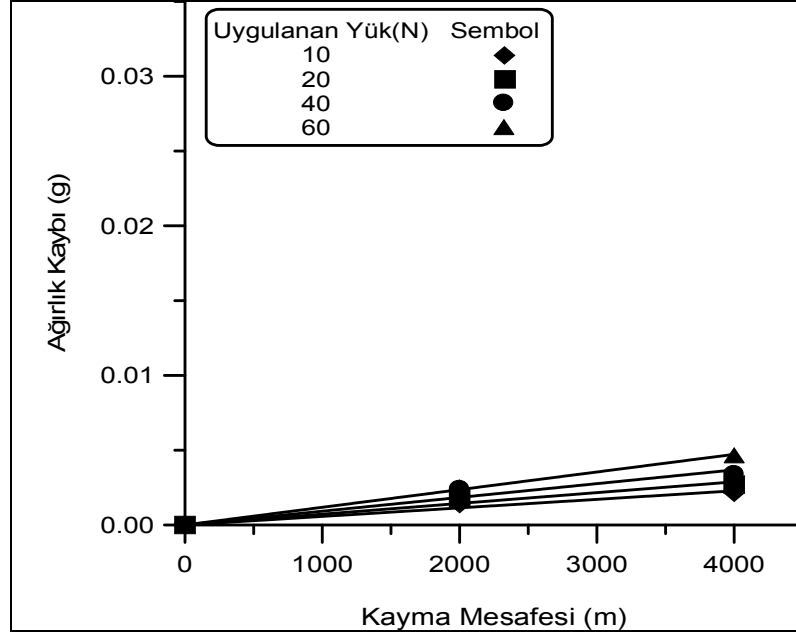
(a)

(b)

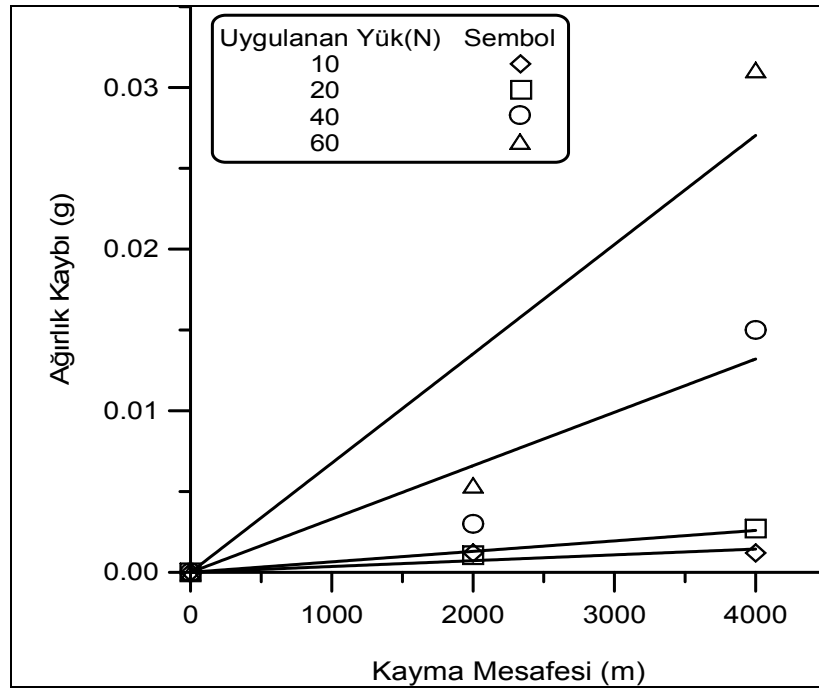
Şekil 7.10. Borlama ısıt işlemleri görmüş numunelerin %10 NaCl çözeltisi içinde potansiyodinamik korozyon davranışının a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü.

7.3. AŞINMA DENEYLERİ

Bu çalışmada incelenen çeliklerin 10N-60N aralığında uygulanan yük altındaki kayma mesafesine karşılık ağırlık kaybı değişimi sırasıyla homojenleştirme ve borlama ısıt işlemleri uygulanmış çelikler için Şekil 7.11. ve Şekil 7.12.'de verilmiştir. Ağırlık kaybı-kayma mesafesi grafikleri, belirli bir yük altında kayma mesafesi boyunca ağırlık kaybının lineer olarak arttığı göstermektedir. Homojenleştirilmiş ve borlanmış çeliklerin ağırlık kaybı değişimi, karşı malzemenin sertliğine bağlı olarak uygulanan yüklerle farklılık göstermiştir. Belirli bir kayma mesafesi için düşük yüklerde ağırlık kaybı az iken, yüksek yüklerde karşı malzemenin sertliğinin artması ile ağırlık kaybı artmıştır. Borlanmış çeliklerin, homojenleştirilmiş çeliklere kıyasla, yüksek yüklerde daha fazla ağırlık kaybı sergilediği görülmüştür. Şekil 7.11. ve Şekil 7.12.'deki grafiklerin eğimi g/m cinsinden aşınma hızını vermektedir.

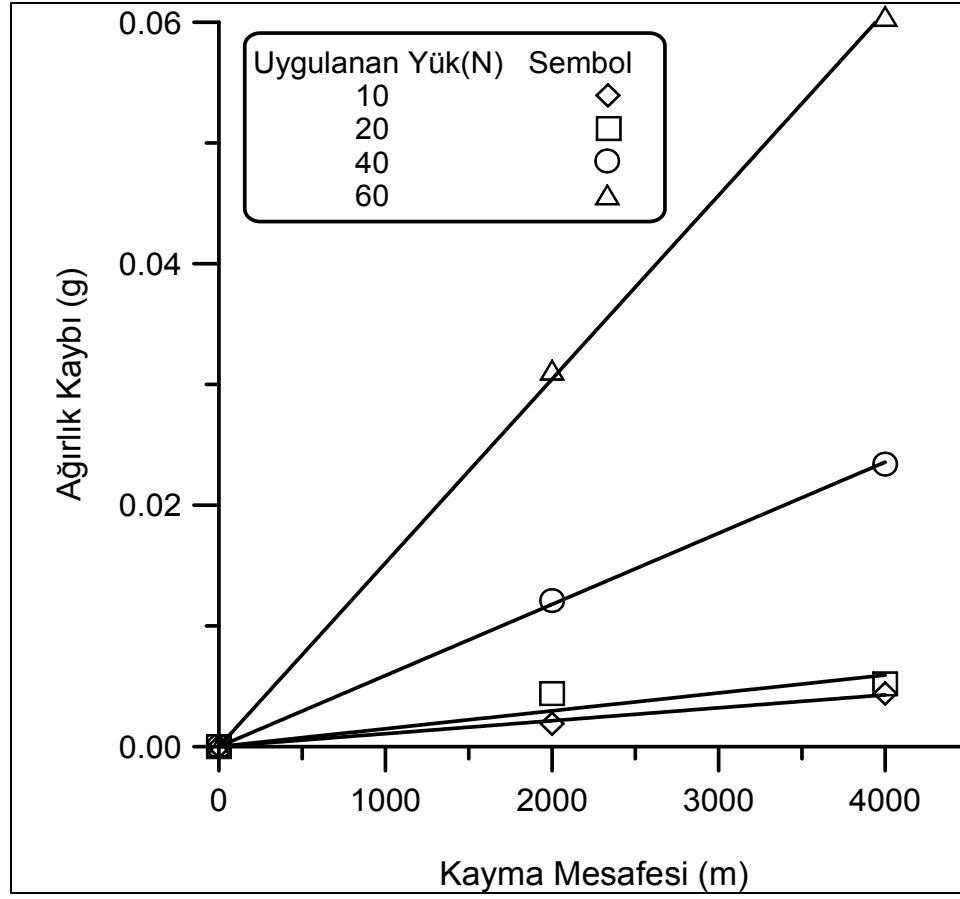


(a)



(b)

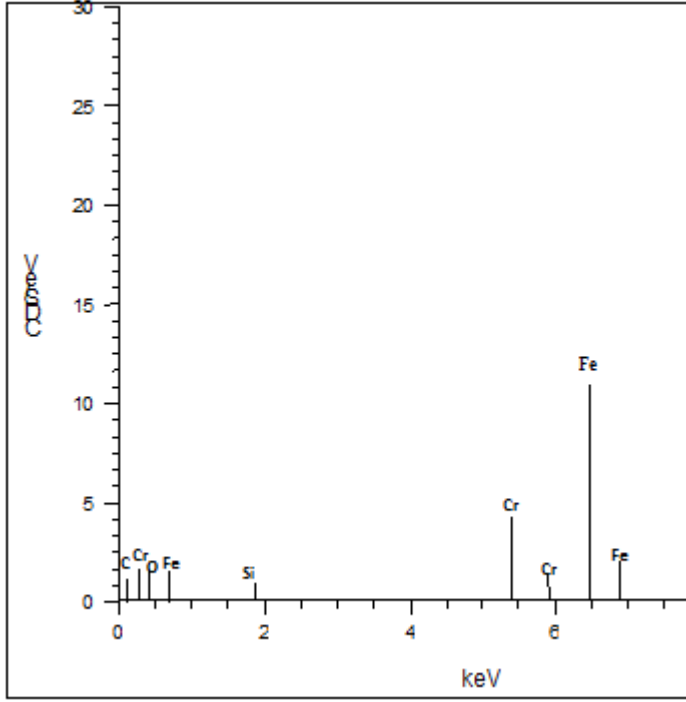
Şekil 7.11. Homojenleştirilmiş durumdaki çeliğin a) AISI 4140 kalite ve b) DIN 1,2379 kalite çelik üzerinde aşınma deneyi sonrası elde edilen ağırlık kaybı değerlerinin kayma mesafesi ile değişimi.



Şekil 7.12. Yüzeyi borlanmış durumdaki çeliğin DIN 1,2379 kalite çelik üzerinde aşınma deneyi sonrası elde edilen ağırlık kaybı değerlerinin kayma mesafesi ile değişimi.

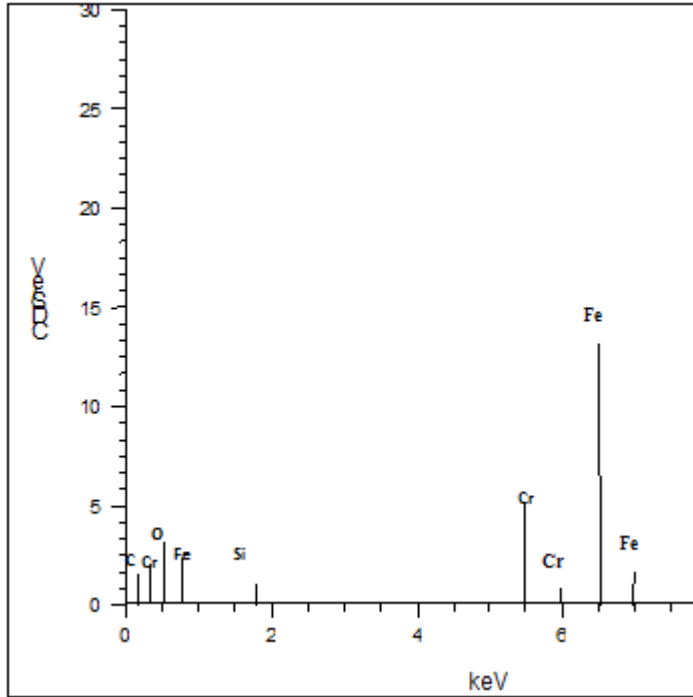
Farklı yük altında ve farklı disk üzerinde aşınma deneylerine tabi tutulmuş numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan EDS analizleri Şekil 7.13.- 7.15.'de gösterilmiştir.

DIN 1.2379 kalite takım çeliğin karşı malzeme olarak kullanıldığı aşınma deneyi sonrasında homojenleştirilmiş çeliğin yüzeylerinden alınan EDS analiz sonuçları (Şekil 7.13.) , hem 10 N hem de 60 N yük altında Fe ve O elementlerin % atom içeriği yüksek ve aynı şiddette iken düşük yüklerde yüksek yüklerle kıyasla Cr ve C elementlerin % atom içeriği yüksek olduğu bulunmuştur.



| 2379 Kalite 10 N | % Ağırlık İçeriği | % Atom İçeriği |
|------------------|-------------------|----------------|
| Fe | 56,23 | 31,57 |
| Cr | 16,08 | 9,70 |
| Si | 0,72 | 0,81 |
| C | 7,78 | 20,31 |
| O | 19,19 | 37,62 |

(a)

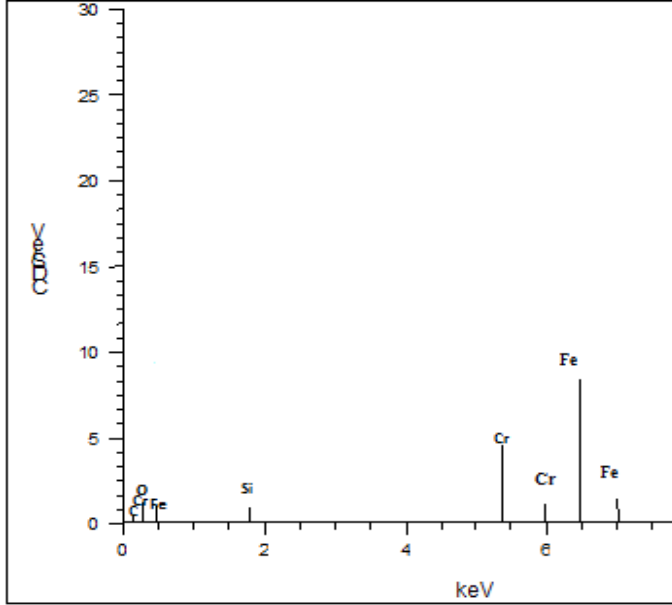


| 2379 Kalite 60 N | % Ağırlık İçeriği | % Atom İçeriği |
|------------------|-------------------|----------------|
| Fe | 64,22 | 36,72 |
| Cr | 7,84 | 4,82 |
| Si | 0,56 | 0,63 |
| C | 4,81 | 12,79 |
| O | 22,57 | 36,72 |

(b)

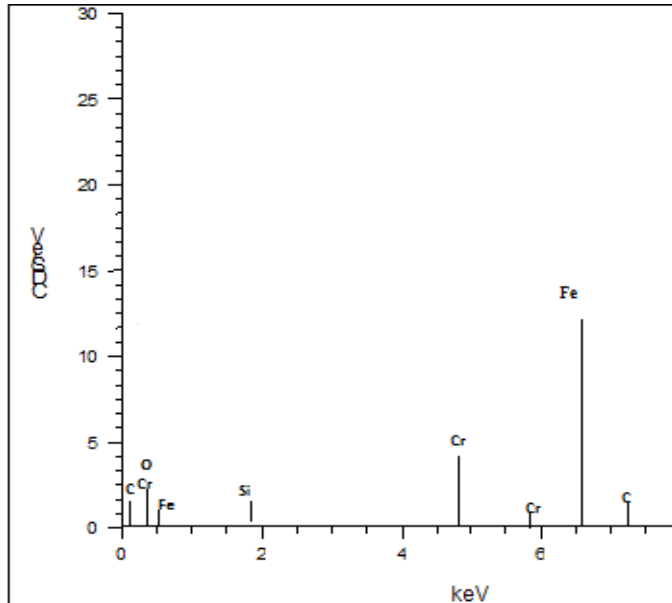
Şekil 7.13. DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde, homojenleştirme işlemi yapılmış numunelerin a) 10 N ve b) 60 N yük altında EDS analizi.

DIN 1.2379 kalite takım çeliği kıyasla AISI 4140 kalite ıslah çeliği üzerinde aşındırılan homojenleştirilmiş çeliklerin yüzeyinde oksijen miktarı biraz daha fazladır (Şekil 7.14.). Bu durum homojenleştirilmiş çeliğin AISI 4140 kalite ıslah çeliği üzerinde aşınma mekanizmasının hafif aşınma olduğu göstermektedir.



| 4140 Kalite 10 N | % Ağırlık İçeriği | % Atom İçeriği |
|------------------|-------------------|----------------|
| Fe | 57,96 | 32,37 |
| Cr | 12,67 | 7,60 |
| Si | 12,67 | 7,6 |
| C | 5,02 | 13,03 |
| O | 23,76 | 46,34 |

(a)

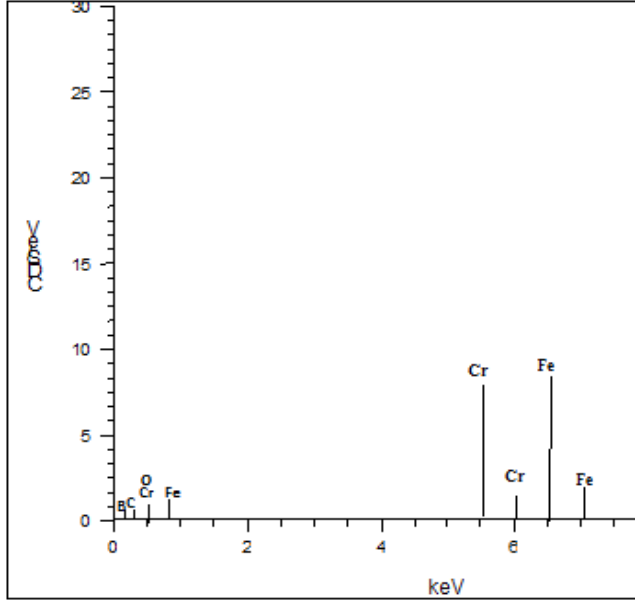


| 4140 Kalite 60 N | % Ağırlık İçeriği | % Atom İçeriği |
|------------------|-------------------|----------------|
| Fe | 64,22 | 36,72 |
| Cr | 7,84 | 4,82 |
| Si | 0,56 | 0,63 |
| C | 6,81 | 12,79 |
| O | 22,57 | 45,04 |

(b)

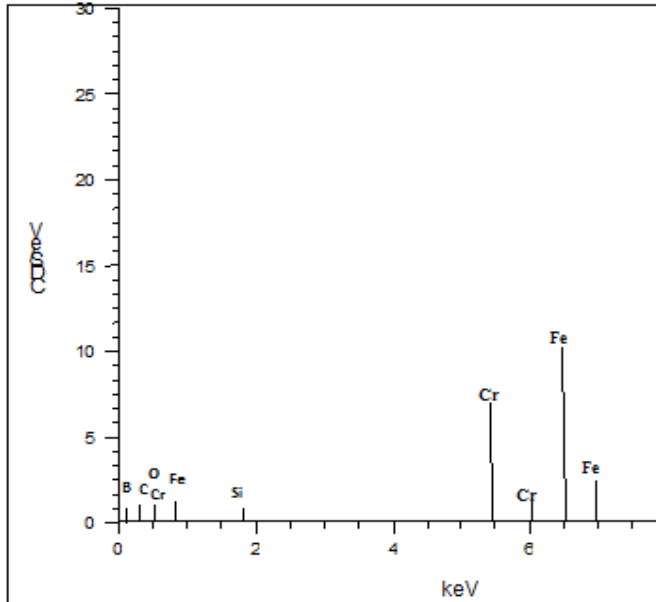
Şekil 7.14. AISI 4140 kalite çelik üzerinde, homojenleştirme işlemi yapılmış numunelerin a) 10 N ve b) 60 N yük altında EDS analizi.

Borlama ısıl işlemi uygulanmış çeliğin DIN 1.2379 kalite takım çelik üzerinde aşındırılması sonucu yüzeyinden alınan EDS analizi (Şekil 7.15.) , uygulanan yükün artması ile B miktarının azaldığını göstermiştir. Bu durum, Bor içeren tabakanın yüzeyden ayrıldığını delil olarak sunmaktadır.



| 2379 Kalite 10 N BOR | % Ağırlık İçeriği | % Atom İçeriği |
|----------------------|-------------------|----------------|
| Fe | 57,42 | 35,77 |
| Cr | 24,81 | 16,60 |
| Si | 0,77 | 0,91 |
| C | 4,05 | 11,73 |
| O | 7,91 | 17,21 |
| B | 5,81 | 18,7 |

(a)



| 2379 Kalite 60 N BOR | % Ağırlık İçeriği | % Atom İçeriği |
|----------------------|-------------------|----------------|
| Fe | 56,92 | 33,60 |
| Cr | 19,32 | 12,34 |
| Si | 0,77 | 0,91 |
| C | 3,15 | 8,70 |
| O | 17,82 | 36,98 |
| B | 2,43 | 7,47 |

(b)

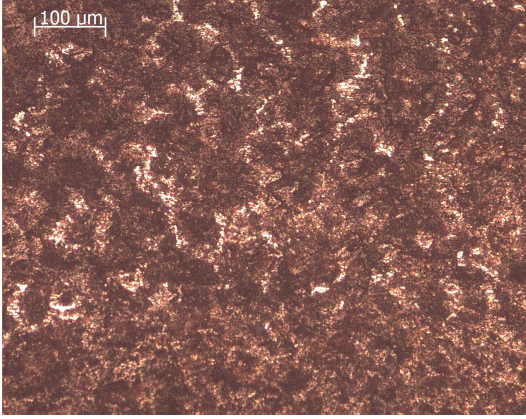
Şekil 7.15. DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde, borlama ısıl işlemi yapılmış numunelerin a) 10 N ve b) 60 N yük altında EDS analizi.

Farklı yüklerde aşınma deneyine tabi tutulmuş numunelerin aşınma yüzeylerinin optik ışık mikroskop ve SEM görüntüleri Şekil 7.16-7.21’de verilmiştir.

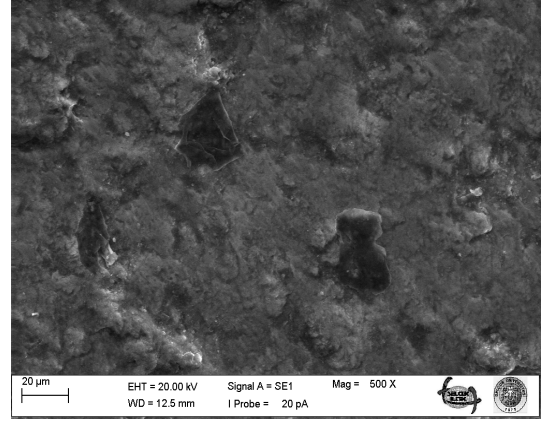
Homojenleştirilmiş çeliğin düşük yüklerde (Şekil 7.16 ve Şekil 7.18), hafif aşınma mekanizması olan mat ve düz yüzey sergileyen aşınma oluşmuştur. Karşı malzeme olarak DIN 1.2379 kalite takım çeliğin kullanıldığı aşınma deneylerine kıyasla AISI 4140 kalite ıslah çeliğin üzerinde aşındırılan homojenleştirilmiş çeliğin aşınma yüzeyi biraz daha koyudur. Bu durum, AISI 4140 kalite ıslah çeliğin üzerinde aşındırılan homojenleştirilmiş çeliğin aşınma sırasında daha fazla oksitlenmesinden (Şekil 7.14.) kaynaklanmaktadır.

Yüksek yüklerde gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonrası gelişen aşınma mekanizmasının karşı malzeme tipine göre farklılık göstermiştir. Karşı malzemenin DIN1.2379 kalite takım çeliği olması durumunda aşırı plastik deformasyon ve yüzeyde pul pul kopmalar gözlenmiştir. AISI 4140 kalite ıslah çeliği üzerinde aşındırılan homojenleştirilmiş çelik yüzeyinde oluşmuş olan oksit tabakası yüksek uygulanan yüklerin etkisinde çatlamaya başlamıştır.

Borlama ısıl işlemi görmüş DIN 1.4777 kalite çeliğin daha sert olan DIN 1.2379 kalite takım çeliği üzerindeki aşınma mekanizması bor tabakasının kalkması şeklindedir. Uygulanan yükün artması ile bor tabakasının kalkması şiddetlenmektedir. Yüksek yüklerde bor tabakasının kalktığı çıplak bölgelerde yükün etkisi ile plastik deformasyon oluşmuştur.

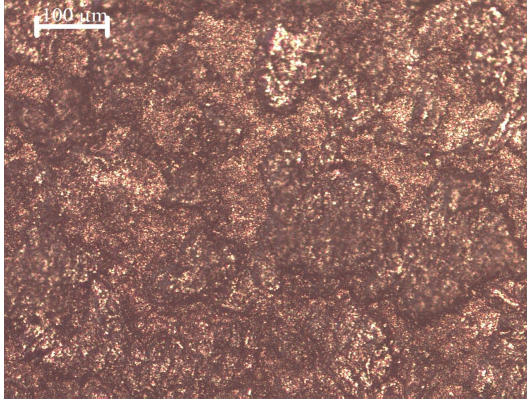


(a)

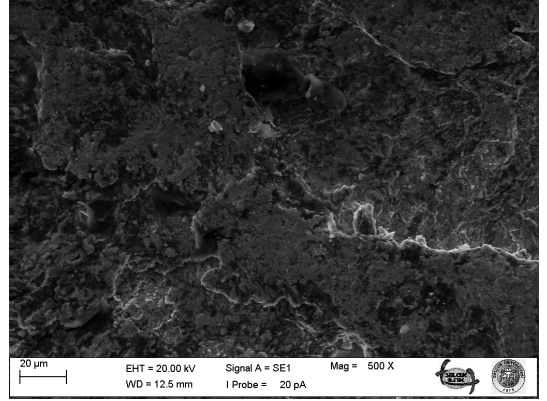


(b)

Şekil 7.16. Homojenleştirme ısıl işlemi görmüş numunelerin DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde 10 N altındaki aşınmasının a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü.

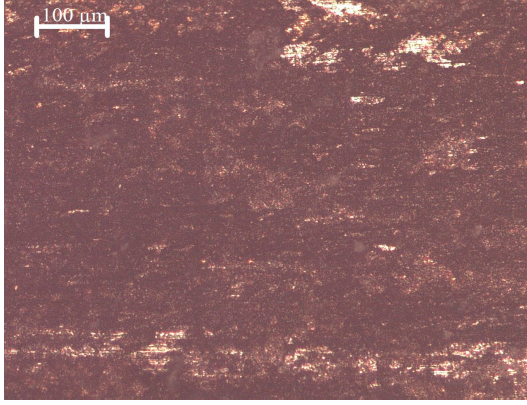


(a)

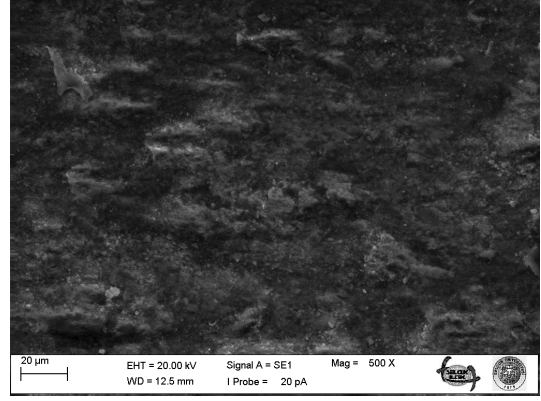


(b)

Şekil 7.17. Homojenleştirme ısıl işlemi görmüş numunelerin DIN 1. 2379 kalite çelik üzerinde 60 N altındaki aşınmasının a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü.

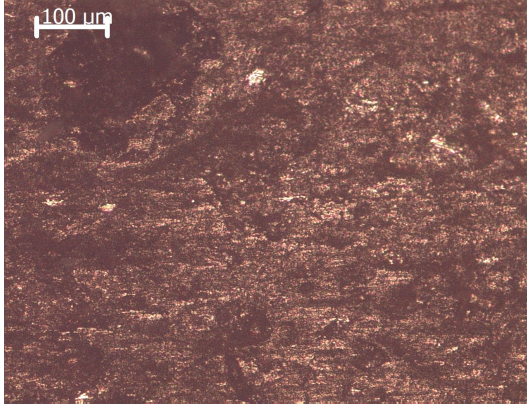


(a)

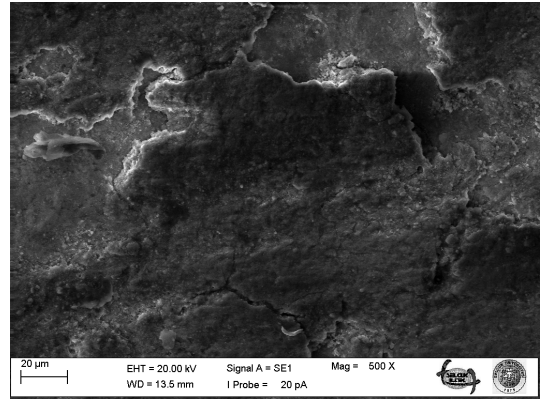


(b)

Şekil 7.18. Homojenleştirme ısıl işlemleri görmüş numunelerin AISI 4140 kalite çelik üzerinde 10 N altındaki aşınmasının a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü.

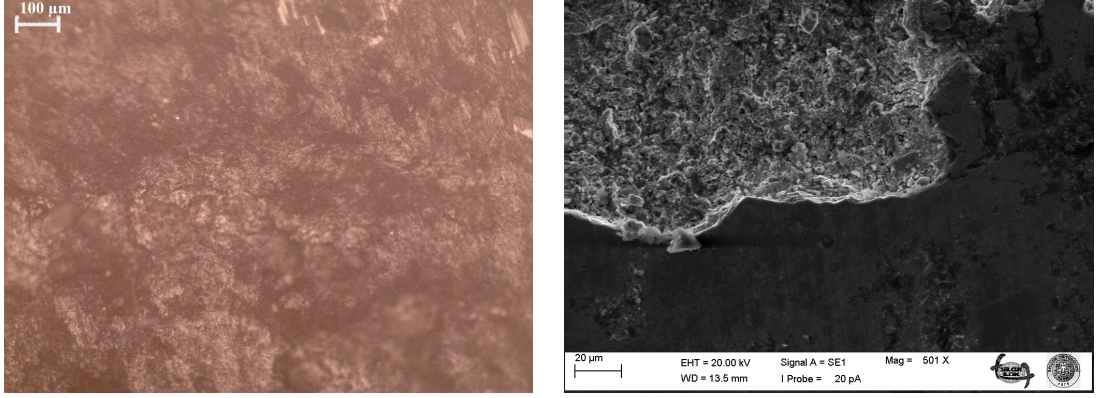


(a)



(b)

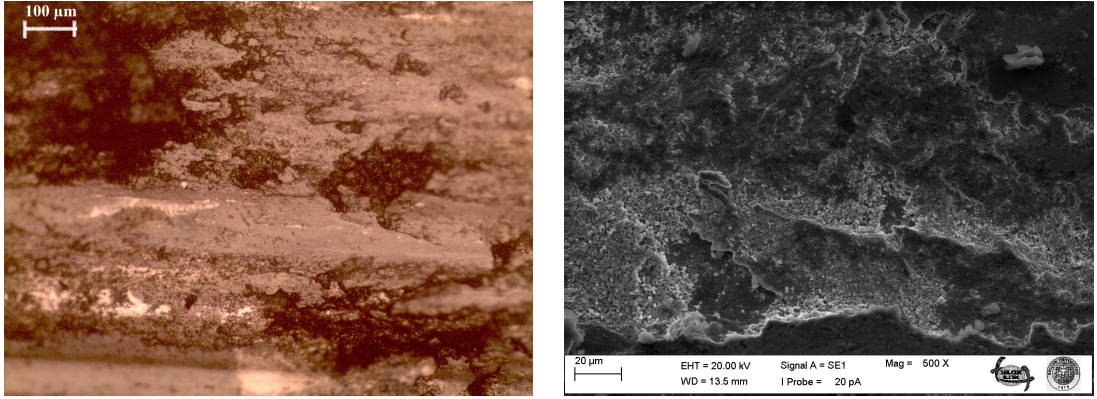
Şekil 7.19. Homojenleştirme ısıl işlemleri görmüş numunelerin AISI 4140 kalite çelik üzerinde 60 N altındaki aşınmasının a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü.



(a)

(b)

Şekil 7.20. Borlama ısı l işlemi görmüş numunelerin DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde 10 N altındaki aşınmasının a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü.

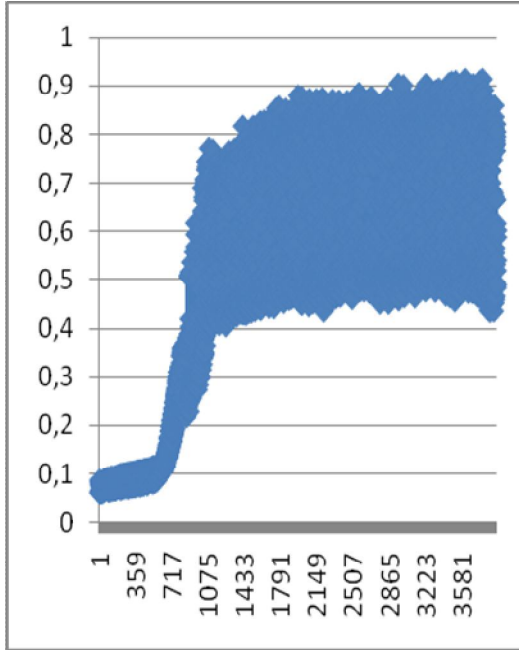


(a)

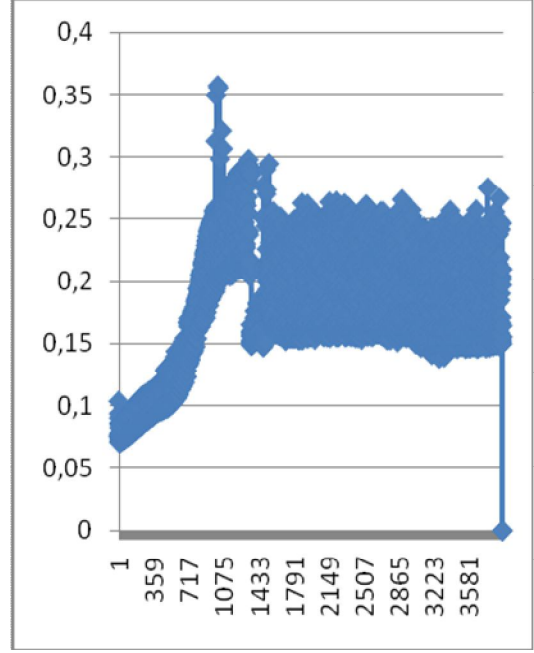
(b)

Şekil 7.21. Borlama ısı l işlemi görmüş numunelerin DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde 60 N altındaki aşınmasının a) Optik ışık mikroskop ve b) SEM görüntüsü.

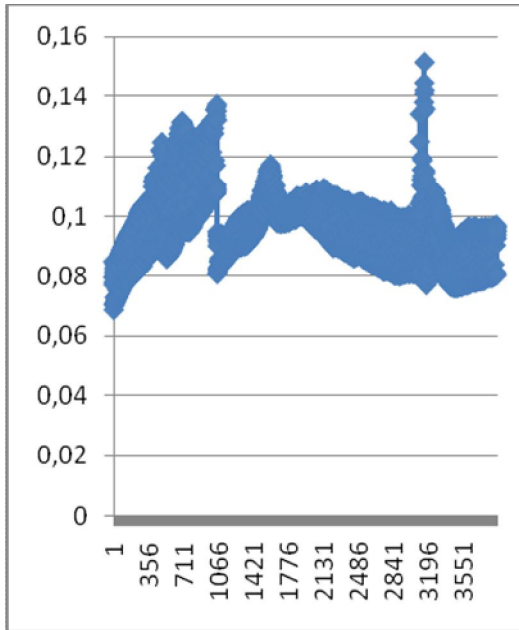
Homojenleştirilmiş ve borlanmış numunelerin zamana bağlı olarak sürtünme katsayısı değerleri Şekil 7.22-Şekil 7.27 arasında verilmiştir. Homojenleştirilmiş çelik numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinin saçılımı DIN 1.23479 kalite takım çeliklerde daha geniş iken AISI 4140 kalite ıslah çeliklerde sürtünme katsayısı değerlerinin saçılımı daha dardır. Borlama ısı l işlemi uygulanmış çeliklerin DIN 1.2379 kalite takım çeliği üzerindeki sürtünme katsayısı değerleri zamana bağlı olarak inişli-çıkışlı bir görüntü sergilemiştir.



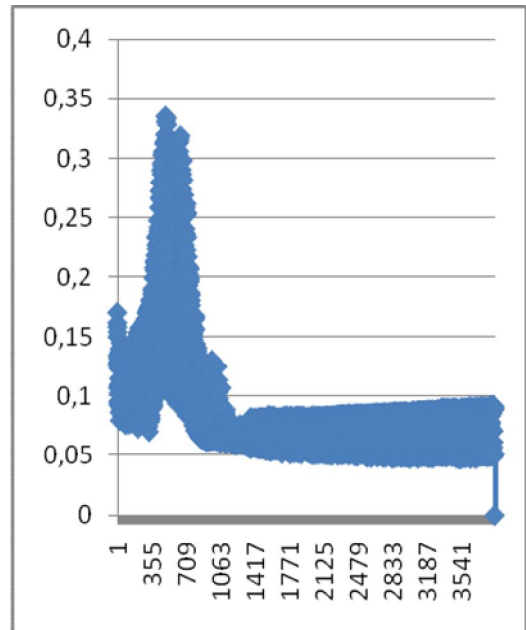
(a)



(b)

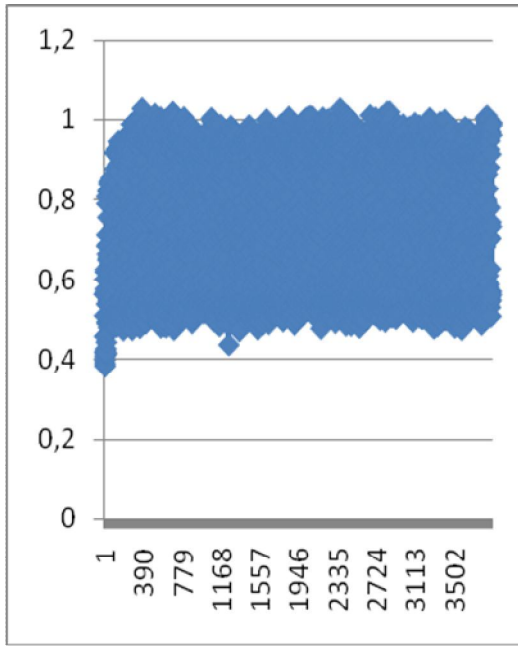


(c)

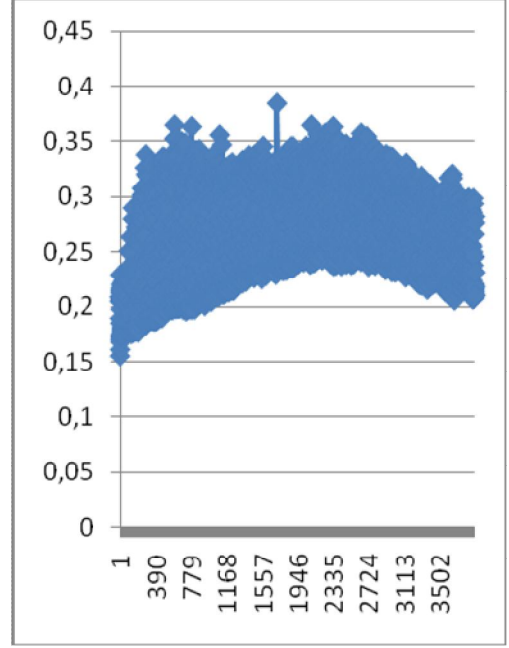


(d)

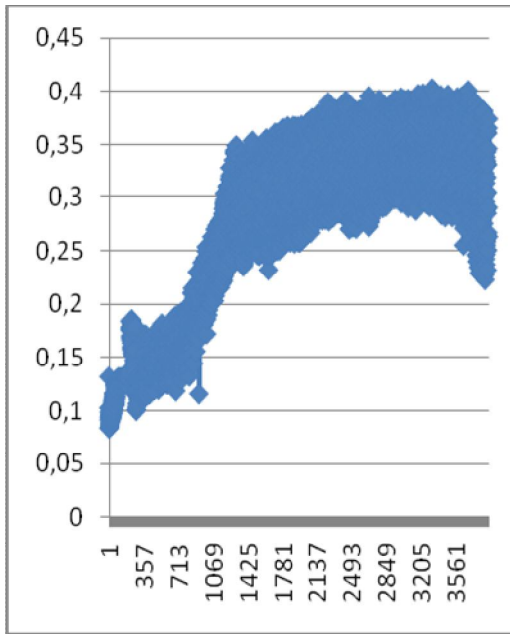
Şekil 7.22. Homojenizasyon ısıtıl işlemi görmüş çeliğin DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde a) 10 N b) 20 N c) 40 N d) 60 N yük altında 2000 m kayma mesafesi sırasında sürtünme katsayısının zamanla değişimi.



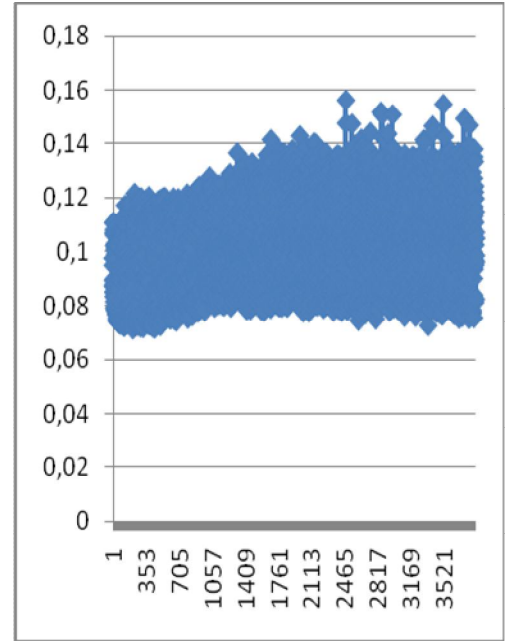
(a)



(b)

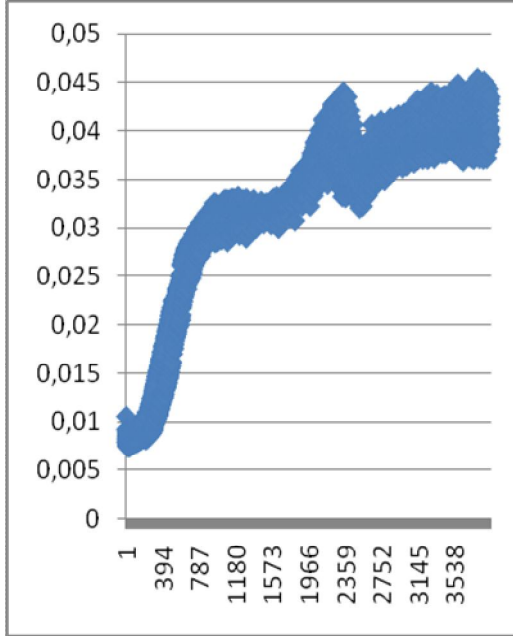


(c)

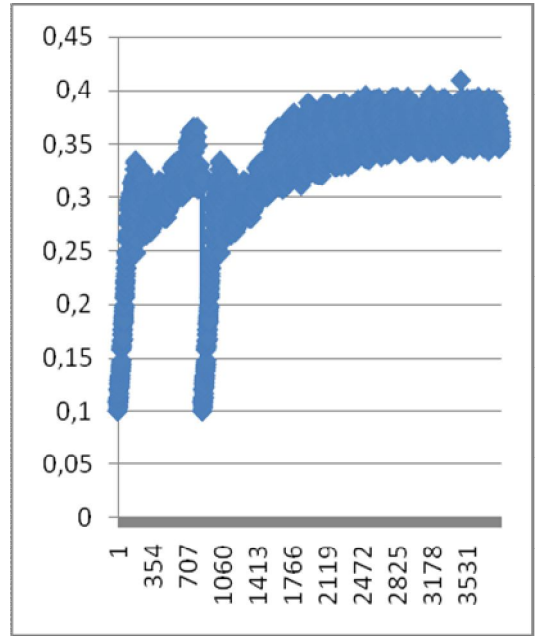


(d)

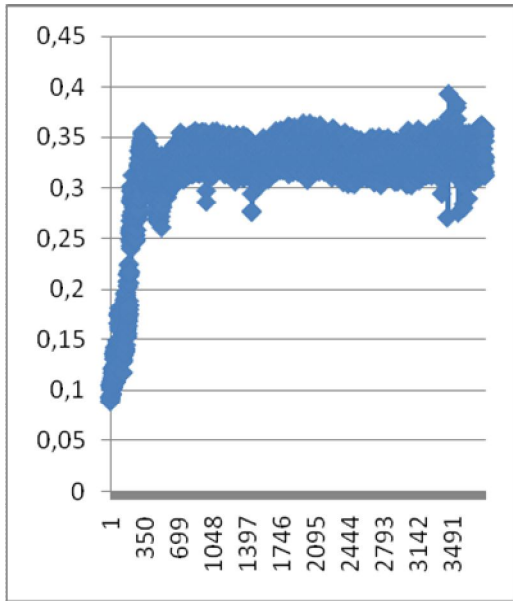
Şekil 7.23. Homojenizasyon ısıl işlemi görmüş çeliğin DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde a) 10 N b) 20 N c) 40 N d) 60 N yük altında 4000 m kayma mesafesi sırasında sürtünme katsayısının zamanla değişimi.



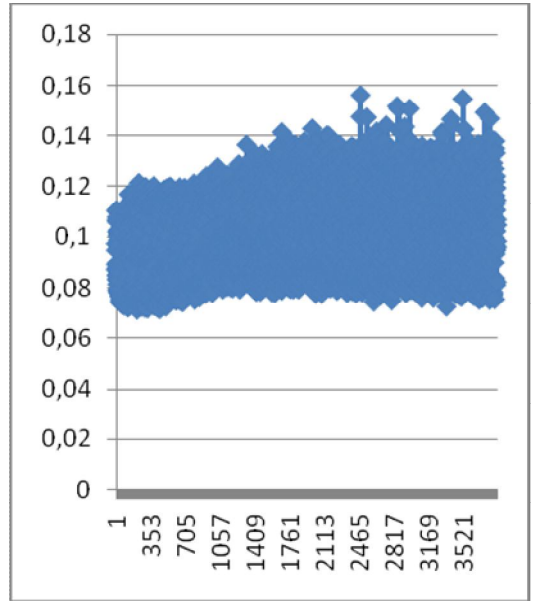
(a)



(b)

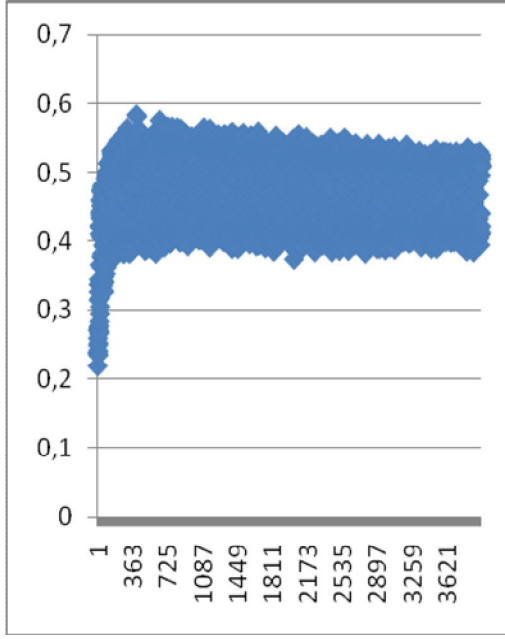


(c)

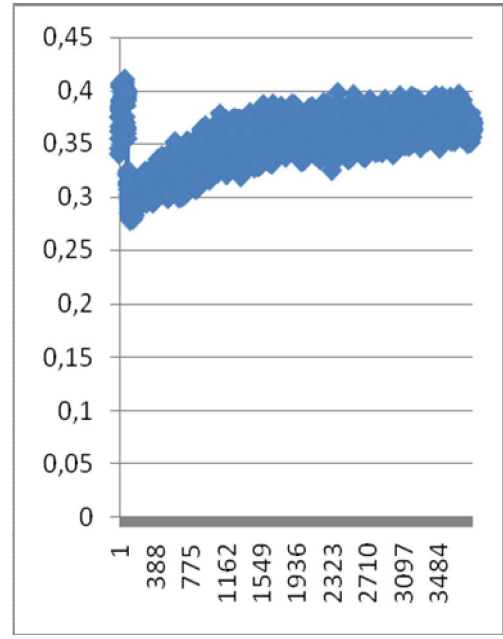


(d)

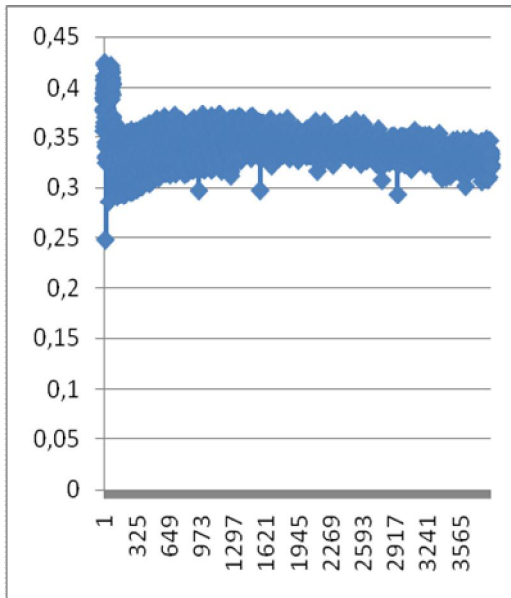
Şekil 7.24. Homojenizasyon ısııl işlemleri görmüş çeliğin AISI 4140 kalite çelik üzerinde a) 10 N b) 20 N c) 40 N d) 60 N yük altında 2000 m kayma mesafesi sırasında sürtünme katsayısının zamanla değişimi.



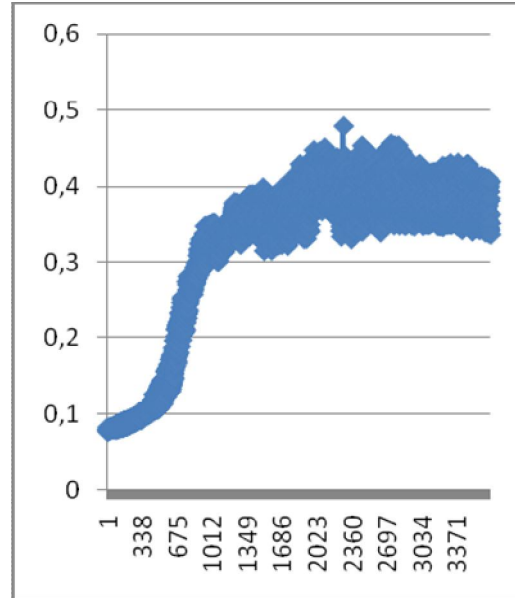
(a)



(b)

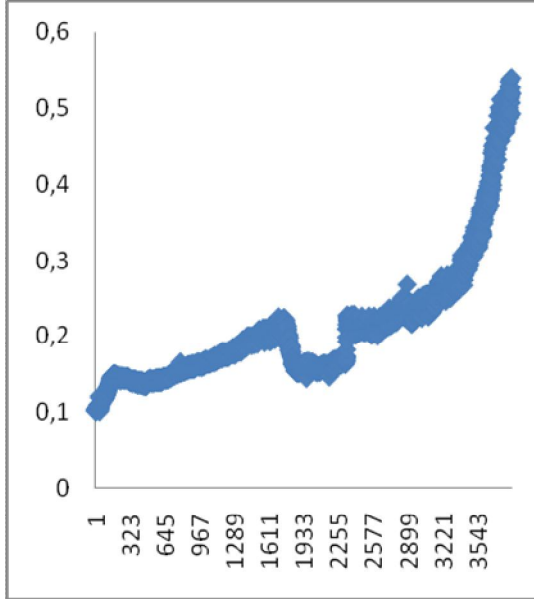


(c)

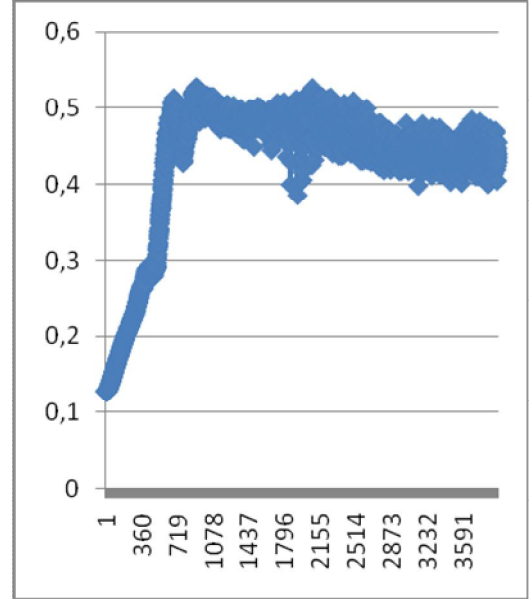


(d)

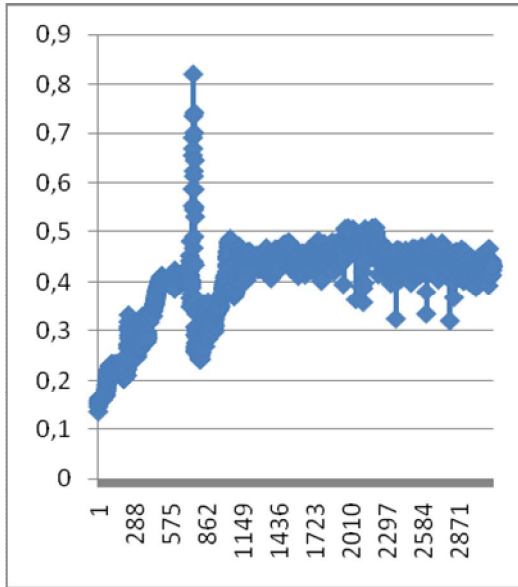
Şekil 7.25. Homojenizasyon ısııl işleme görmüş çeliğin AISI 4140 kalite çelik üzerinde a) 10 N b) 20 N c) 40 N d) 60 N yük altında 4000 m kayma mesafesi sırasında sürtünme katsayısının zamanla değişimi.



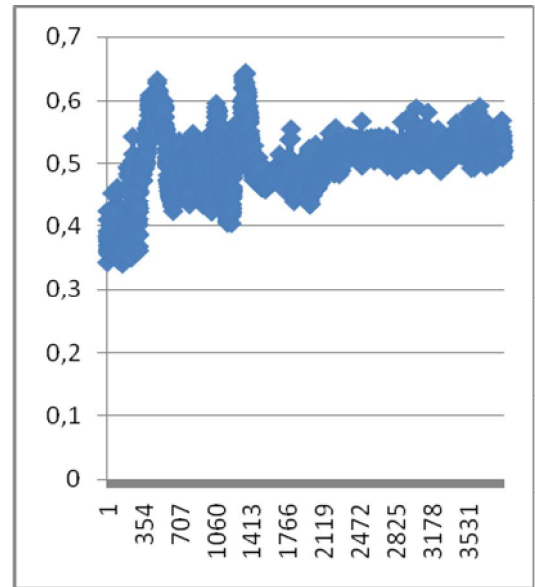
(a)



(b)

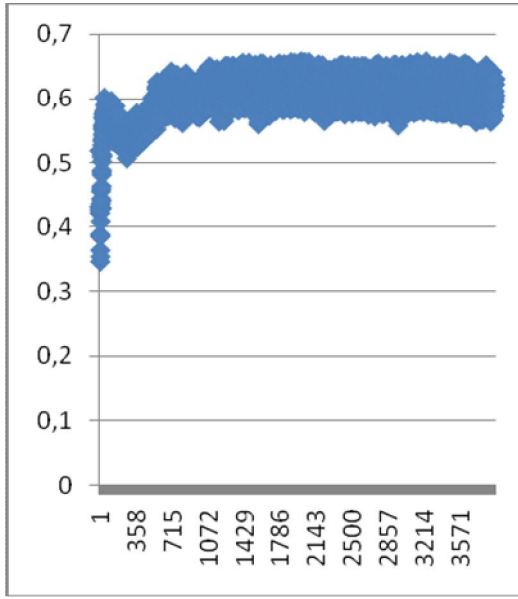


(c)

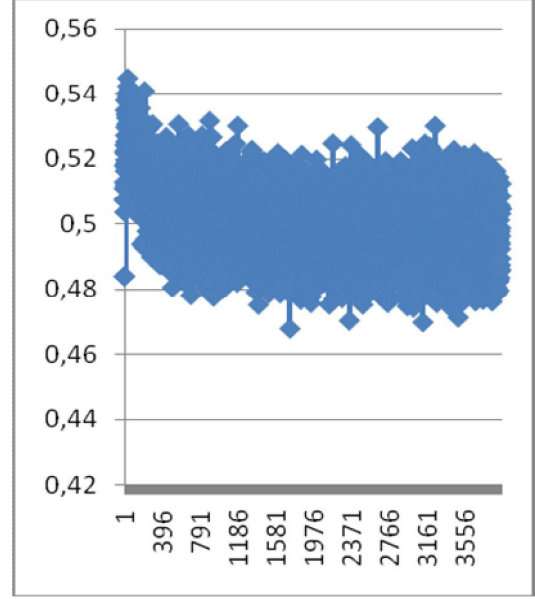


(d)

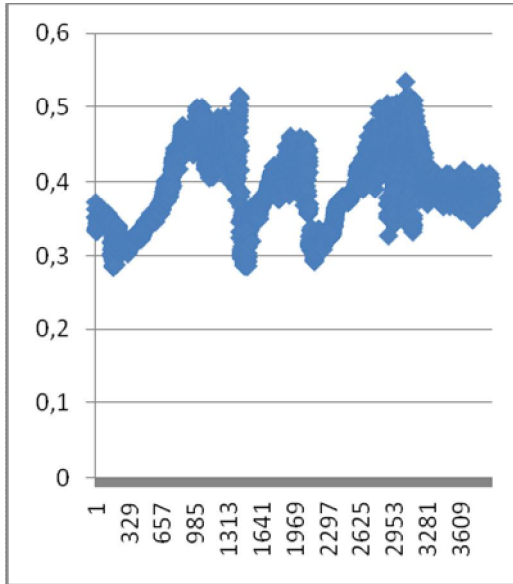
Şekil 7.26. Borlama ısıl işlemi görmüş çeliğin DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde a) 10 N b) 20 N c) 40 N d) 60 N yük altında 2000 m kayma mesafesi sırasında sürtünme katsayısının zamanla değişimi.



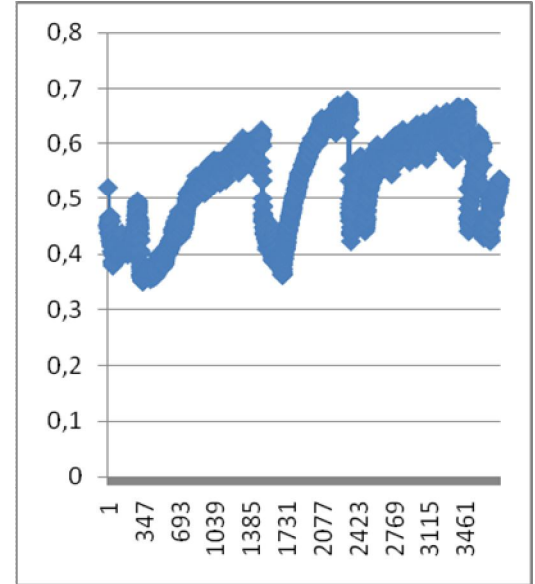
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 7.27. Borlama ısıl işlemi görmüş çeliğin DIN 1.2379 kalite çelik üzerinde a) 10 N b) 20 N c) 40 N d) 60 N yük altında 4000 m kayma mesafesi sırasında sürtünme katsayısının zamanla değişimi.

BÖLÜM 8

DENEYSEL SONUÇLARIN İRDELENMESİ

8.1. MİKROYAPI SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Yüksek karbonlu ve kromlu dökme çeliklerin yapısı bileşimine bağlı olarak ostenit, ferrit ve/veya ferrit + ostenit olabilmektedir. Ana alaşım elementi olan Cr, Fe-Cr ikili faz diyagramından da incelenebileceği gibi ferrit sahasını genişletir. Bunun yanı sıra karbon oranının yüksek olması matrisin ostenitik olmasını teşvik etmektedir. Fe-Cr dökme çeliklerde oluşabilecek karbürler MC, $M_{23}C_6$, M_6C ve M_7C_3 tipi karbürlerdir. Yüksek oranda krom içeren çeliklerde $Cr_{23}C_6$ tipi karbürler yaygın olarak bulunmaktadır. Bu çalışmada incelenen karbon ve krom içeriği yüksek olan DIN1.4777 kalite çelikte matris ostenitik ve karbürler $Cr_{23}C_6$ tipi olduğu krom eşdeğeri ve nikel eşdeğerinin yanı sıra, EDS ve XRD analiz sonuçlarıyla tespit edilmiştir. Fadilha [69], % 55 Fe, % 29 Cr, % 11 Mo ve % 5 Ni ve Sun [70], 27,5 Cr, 1,2 Si, 0,33 C ve 4,65 Ni tipik bileşimine sahip olan alaşımların matrisinin ferritik ve içeren karbürlerin de Cr'ca zengin $M_{23}C_6$ tipi karbürlerin olduğunu rapor etmişlerdir. EN10295 standardına göre yaklaşık % 2 Si içeren bu çelikler ferritik matrise sahip ısı dirençli dökme çelikler olarak isimlendirilmektedir [71]. Bununla birlikte krom oran yüksek olmasına rağmen karbonun yüksek olmasından dolayı matrisin ostenitik olduğunu literatür araştırmalarıyla da desteklenmiştir[77]. Dolayısı ile Şekil 7.1.'de görüldüğü gibi homojenleştirilmiş DIN 1.4777 kalite çeliğin mikro yapısında ostenitik ana matris üzerinde $Cr_{23}C_6$ karbürlerin çökeldiği düşünülmektedir. Bu sonuç literatür araştırmalarıyla desteklenmiştir[69-71-75].

İncelenen çelik, yüksek karbonlu ve kromlu çelik olduğundan, borlama sonucunda kaplama/matris arayüzeyinde beklenen iğnesel yapının oluşmadığı görülmüştür. Krom oranın fazlalığı difüzyonu yavaşlatmış tabaka kalınlığının daha az olmasına sebep olmuştur[71]. Karbon oranın da yüksek olması, borür tabakasının daha düşük olmasına sebebiyet verdiği görülmüştür. Bu durum karbon atomlarının bor

atomlarının difüzyonunu zorlaştırmasından kaynaklanmaktadır[75]. Borlama ısıtma işlemi sonrasında yüzeyde Fe_2B ve CrB esaslı bileşikler oluşmuş olup literatür çalışmalarıyla da desteklenmiştir [76].

Borlama ısıtma işlemi görmüş (Şekil 7.2.) alaşımın da mikroyapıları incelendiğinde borür tabakasının düz ve bölgelerde tabaka/matris arayüzeyin ayrılmış olduğu görülmüştür.

Literatür araştırmalarına göre[62-63], borlama işlemi esnasında borür tabakasının oluşumuna ana metaldeki alaşım elementlerinin etkisi büyüktür. Genel olarak bütün alaşım elementleri için tabaka kalınlığında bir azalma tespit edilmiştir [62]. Alaşım elementleri bor difüzyonunu azaltmakta, ana malzeme ve borür tabakasının özelliklerini değiştirmektedir [65].

Krom bileşiminin yükselen miktarı, borür tabakasının kolonsal yapısını azaltıp, yüksek poroziteyi ve kötü mekanik özellikleri beraberinde getirmektedir [72].

Bor tabakasına karbon elementinin de etkisi vardır. Az karbonlu çeliklerde daha kalın bor tabakası elde edilmektedir. Ayrıca, borlama işlemi sonucu oluşan Fe_2B ve $(Fe,Cr)B$ fazları arasındaki ısıtma genleşme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlaklar meydana gelir. Bu durum bazı endüstriyel uygulamalar için borlamayı kabul edilemez kılar [67].

Az karbonlu çeliklerde arayüzeyde meydana gelen girintili çıkıntılı yapı borür tabakasının ana metale bağlantısını kuvvetlendirirken, ara yüzeyde meydana gelen iç gerilmelerin daha geniş bir alana yayılmasını sağlar. Ana metaldeki alaşım elementleri, özellikle karbon, krom ve nikel tabaka geometrisini değiştirerek ana metal-borür tabakası ara yüzeyini düzleştirmiştir [63].

Ana malzeme içerisindeki karbon oranının artması tabaka kalınlığını azaltmaktadır. Karbon, $(Fe,Cr)B$ ve Fe_2B gibi fazlarda çözünmediğinden, karbon fazlılığının sonucu borür tabakası altında difüzyon bölgesi meydana gelmektedir [62].

Bu bölgedeki karbon, Fe_3C , Cr_3C , Fe_6C_3 gibi karbürler oluşturarak borlama mekanizmasını etkilediği ve borür tabakasını daha sıkı ve sert yaptığına inanılmaktadır [68]. Manganez ve nikel borür tabaka kalınlığını fazla etkilememektedir [62].

Artan krom miktarı tabaka kalınlığında ve ara yüzeyde oluşan girintili çıkıntılı yapıda azalmaya sebep olur. Silisyum, borür tabakası sertliğini etkilemez, ancak geçiş bölgesinin sertliği Si artışı ile artar [73]. Silisyum, borür tabakasının gevrekliğini artırdığı için % 1'in üzerinde silisyum içeren çelikler borlamaya uygun değildir [74]. Bu çalışmada temel olarak 28Cr-2Si-1,3C içeren DIN 1.4777 kalite çeliğe uygulanan borlama ısıl işlemi sonrası oluşan bor tabakasının literatüre uygun olarak [68] karbonca zengin olduğu bulunurken (Şekil 7.4.), XRD piklerinde mikro yapıda oluşan $CR_{23}C_6$ karbürü haricinde literatürde belirtilen [68] Fe_3C , Cr_3C , Fe_6C_3 gibi kütleli karbürler gözlenmiştir. Bu çalışmada incelen çelik yüksek Si'li olduğundan oluşan bor tabakası, gevrek olmuştur ve çatlak içermektedir (Şekil 7.2.).

8.2. KOROZYON SONUÇLARININ İRDELENMESİ

% 10 H_2SO_4 ve % 10 NaCl çözeltileri içerisinde potansiyostat kullanılarak yapılan potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden (Şekil 7.6.) elde edilen korozyon akım yoğunluğu (I kor) ve korozyon potansiyel değerleri Çizelge 7.2.'de verilmiştir. Çizelge 7.2.'deki verilerden homojenizasyon ısıl işlemi görmüş çelik numunenin % 10'luk H_2SO_4 çözeltisinde yapılan korozyona karşı, aynı çözeltide borlama ısıl işlemi görmüş çelik numuneye göre korozyona daha dirençsiz olduğu tespit edilmiştir. % 10'luk NaCl çözeltisinde homojenizasyon ısıl işlemi gören numunenin, borlama ısıl işlemi gören numuneye göre korozyon direncinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

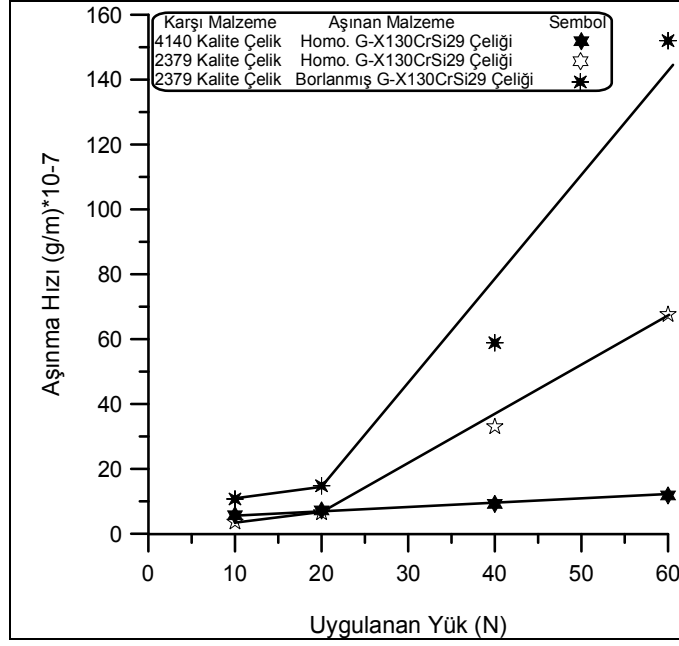
Literatür araştırmalarına göre, borür tabakasının suya ve atmosfere karşı korozyon direncinin düşük olmasına karşılık, bazı asitlere ve sıvı metallere karşı iyi bir direnç gösterir. Özellikle HCl, H_2SO_4 , ve H_3PO_4 gibi asitlerle alüminyum, kurşun ve çinko gibi metallerin sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon direnci yüksektir [62]. Borlanmış yüksek kromlu çeliklerde korozyona karşı direncin beklenen seviyede olmaması literatür araştırmalarına göre, yüksek kromlu çeliklerde borlama

ile koruyucu krom oksit yerine daha az koruyucu olan krom borür meydana gelir. Bu bakımdan yüksek alaşımlı malzemelerin borlanmasıyla daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilmeyebilir açıklamalarıyla desteklenmiştir [64]. XRD analiz sonuçları, bu çalışmada incelenen yüksek karbonlu ve kromlu DIN 1.4777 kalite çeliğin yüzeyinde borlama ısıl işlemi sonucunda krom oksit yerine krom borür oluştuğunu göstermiştir.

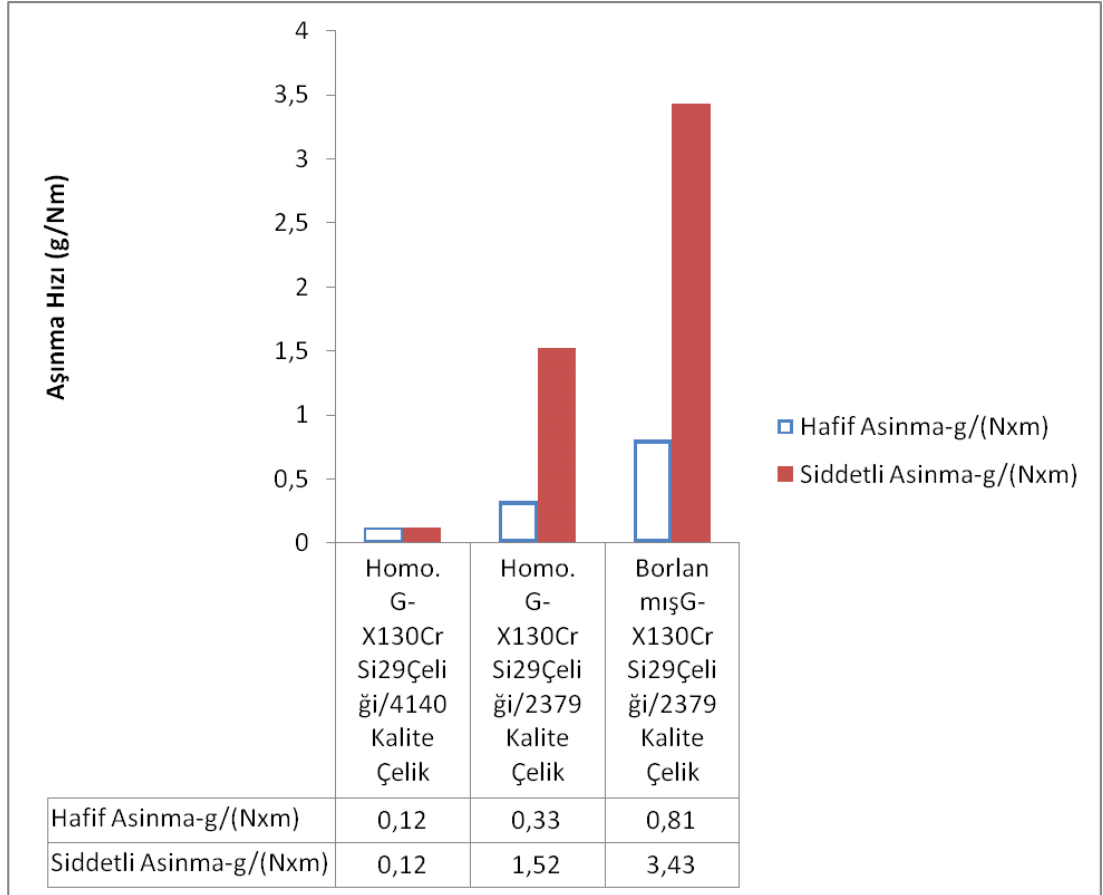
8.3. AŞINMA SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Homojenleştirilmiş haldeki alaşımının aşınma hızı(Şekil 8.1. ve Şekil 8.2.) AISI 4140 kalite ıslah çelik üzerinde uygulanan tüm deney yükünde lineer ve hafif bir şekilde artarken DIN 1.2379 kalite takım çeliğin üzerinde aşınma hızı 20 N'un altında ve üstünde değişim göstermiştir. DIN 1.2379 kalite takım çelik üzerinde aşındırılan çeliğin aşınma hızı, 20 N deney yüküne kadar hafif bir şekilde artarken, 20 N'un üzerindeki yüklerde şiddetli bir şekilde aşınma hızı meydana gelmektedir.

60 N yük altında AISI 4140 ıslah kalite çeliğe kıyasla daha sert olan DIN1.2379 kalite takım çelik üzerinde aşınma hızında 7 kat artış meydana gelmiştir. Borlama ısıl işlemi görmüş çelik numunenin aşınma hızı DIN1.2379 kalite takım çelik üzerinde uygulanan tüm deney yüklerinde lineer ve daha yüksek bir şekilde artmıştır. Borlanmış çeliğin daha yüksek aşınma hızı, uygulanan yük altında bor tabakasının kalkmasından kaynaklanmıştır.

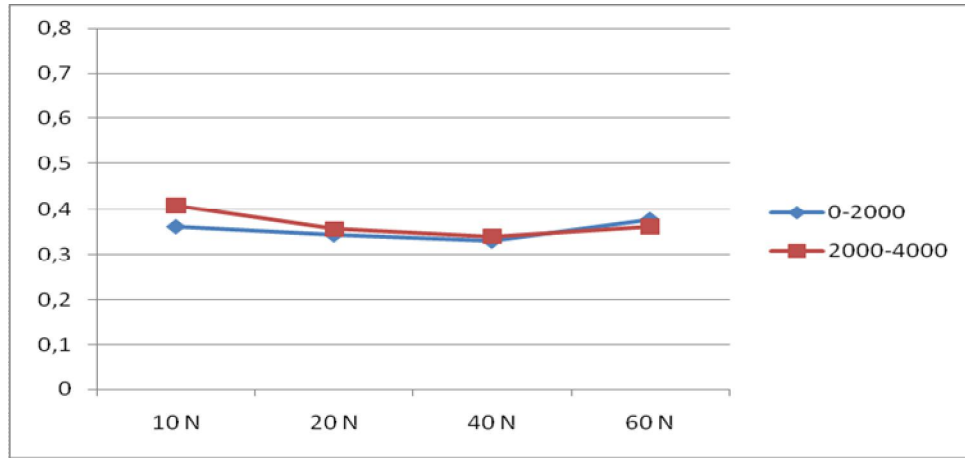


Şekil 8.1. İncelenen numunelerin aşınma hızlarının uygulanan yük ile değişimi.

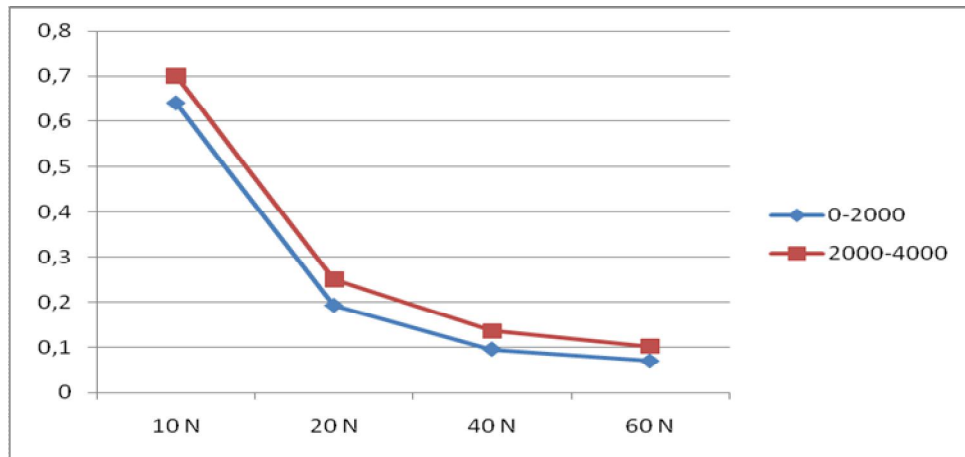


Şekil 8.2. Malzemeye bağlı olarak normalize edilmiş aşınma hızının değişimi.

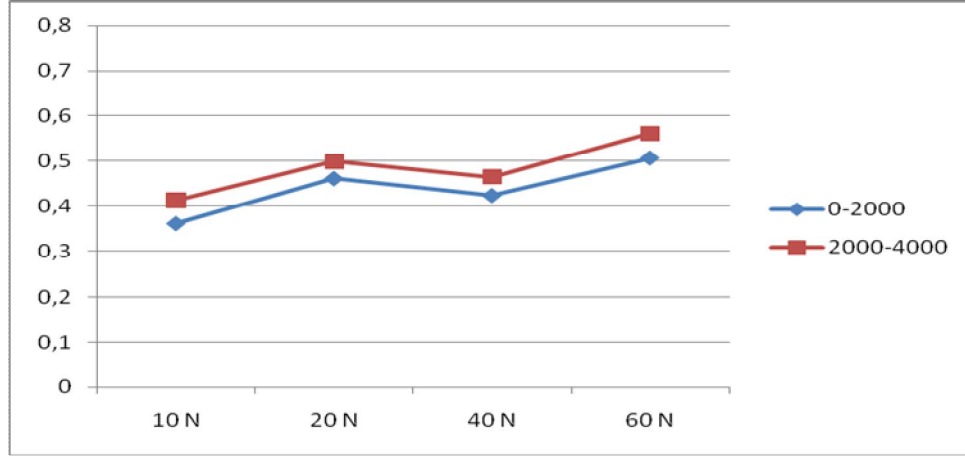
Borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu, ince bir oksit filmi oluşturmakta, bu oksijen filmi yüzeyde yağlıcı vazifesi görerek sürtünme katsayısını düşürüp yüzeylerin birbirine kaynamasını önleyerek aşınmaya dirençli olur. Ancak, XRD analiz sonuçlarına göre (Şekil 7.5.) borlama ısıl işlemi görmüş çelikte de, bor oksijenle birleşmediği için yüzeyde koruyucu bir tabaka oluşmamıştır. Bu durum sürtünme katsayısını yükseltip malzemenin aşınmaya dirençsiz olmasına neden olmuştur.



Şekil 8.3. Homojenizasyon ısıl işlemi görmüş numunenin AISI 4140 diskte 0-2000 m ve 0-4000 m’de uygulanan yüklerle sürtünme katsayısının değişimi.



Şekil 8.4. Homojenizasyon ısıl işlemi görmüş numunenin DIN 1.2379 diskte 0-2000 m ve 0-4000 m’de uygulanan yüklerle sürtünme katsayısının değişimi.



Şekil 8.5. Borlama ısııl işleme görmüş numunenin DIN 1.2379 diskte 0-2000 m ve 0-4000 m' de uygulanan yüklerle sürtünme katsayısının değışimi.

Borlama ısııl işleme görmüş numunede yük artıkça sürtünme katsayısının bir miktar artmasının nedeni, karşı malzeme sert olduğu için aşındırılan malzemenin uygulanan yük artıkça yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır. Dolayısıyla sürtünme katsayısı artmaktadır. Yani, borlama ısııl işleme görmüş numuneler uygulanan yükün artmasıyla yüzey pürüzlülüğünde artma görölmüştür. Bundan dolayı sürtünme katsayısı artmaktadır.

BÖLÜM 9

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek kromlu çeliğin korozyon ve aşınma davranışına borlama ısıl işlemi etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- a) Krom eşdeğeri ve Nikel eşdeğeri sırasıyla 32,2 ve 52,5 olan, Homojenleştirme ısıl işlemi görmüş çeliğin mikroyapısında XRD ve EDS analizleri sonucuna göre ostenitik matris ve $Cr_{23}C_6$ karburleri bulunmaktadır. Borlama ısıl işlemi görmüş çeliğin yüzeyinde yaklaşık 100 μm kalınlığında kaplama tabakanın oluştuğu ve bu tabakanın CrB ve Fe₂B fazları karışımından oluştuğu XRD sonuçlarına göre bulunmasına rağmen EDS analizleri bu fazların elementlerine ilaveten C elementinin de yüzeyde bulunduğunu ortaya koymaktadır. Homojenleştirilmiş çelik numuneye borlama ısıl işlemi yapılmasıyla, çeliğin sertliği 275 HV'den 2160 HV'ye yükselmiştir.
- b) Gerek homojenleştirilmiş gerekse borlanmış çelik numunelerin % 10 H₂SO₄ çözeltisi içerisindeki korozyon hızı, % 10 NaCl içerisindeki korozyon hızından daha fazladır. Borlanmış çeliğin, homojenleştirilmiş çeliğe kıyasıyla H₂SO₄ çözelti içerisindeki korozyon akım yoğunluğu aynı çözelti içerisindeki homojenleştirilmiş çeliğin korozyon akım yoğunluğunda yaklaşık olarak 10 kat az ve korozyon potansiyeli de bir miktar yüksektir. NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen korozyon deneylerinde borlama ısıl işlemi ile korozyon akım yoğunluğu, aynı çözelti içerisindeki homojenleştirilmiş çeliğin korozyon akım yoğunluğunda yaklaşık olarak 2 kat yüksek ve korozyon potansiyeli de bir miktar az olduğu tespit edilmiştir.

- c) Homojenleştirilmiş çelik numuneler % 10 H₂SO₄ çözeltisi içerisinde dağlanırken % 10 NaCl çözeltisi içerisinde mikro oyuklanma şeklinde korozyon gelişmiştir. Borlanmış çeliğin % 10 H₂SO₄ çözeltisi içerisinde yapılan korozyon deneyleri sırasında yüzeyde homojen tipte korozyon meydana gelmiş ve korozyona uğramış numune yüzeyi pürüzlenmiştir. % 10 NaCl çözeltisi içersinde yapılan korozyon deneylerinde yüzeyden bor tabakasının kalktığı tespit edilmiştir.
- d) Homojenleştirilmiş ve borlanmış çeliklerin aşınma deneyleri sonrası ağırlık kaybı değişimi uygulanan yüke ve karşı malzemeye bağlı olarak değişim göstermiştir. Belirli bir kayma mesafesi için düşük yüklerde ağırlık kaybı az iken, yüksek yüklerde ağırlık kaybı artmıştır. Karşı malzemenin sertliğinin artması ile ağırlık kaybı daha belirgin bir şekilde artmıştır. Borlanmış çeliklerin, homojenleştirilmiş çeliklere göre, uygulanan tüm yüklerde daha fazla ağırlık kaybı sergilediği görülmüştür.
- e) Homojenleştirme ısıl işlemi görmüş çeliklerde düşük yüklerde hafif aşınma mekanizması olan, mat ve oldukça az pürüzlü yüzey meydana gelmiştir. Yüksek yüklerde aşınma, aşırı plastik deformasyon ve yüzeyden pul pul dökülme gerçekleşmiştir. Borlama ısıl işlemi görmüş çeliklerin 10 N yük altındaki aşınma, bor tabakasında çatlama ve yüzeyin az bölgesinde kalkan bor tabakası sergilemiştir. Yüksek yüklerde ise şiddetli aşınma mekanizması olan yüzey çatlaklarının oluşumu ve ilerlemesi sonucu gerçekleşen bor tabakasında kopma ve matris malzemesinde aşırı plastik deformasyon izleri meydana gelmiştir.

Bu çalışmada yüksek karbonlu ve kromlu DIN 1.4777 kalite takım çeliği 900⁰C'de 8 saat süre ile katı-toz ortamda borlama ısıl işlemi yapılmıştır. İleride yapılacak çalışmalar da borlama ısıl işlemi sıcaklığı ve süresi değiştirilerek farklı oranlı alaşımlı çelikler kullanılarak deneyler tekrar edilebilir.

KAYNAKLAR

1. Develi, K., “Östenitik paslanmaz çeliklerin MIG kaynağında argon hidrojen karışımının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 6-26 (2003).
2. Anil, K. S., “Dynamic strain ageing of various of steels”, **Metallurgical Transactions A**, 13 (A): 1793-1798 (1982).
3. Sarıoğlu, C., “Demir-çelik ve alaşımlarının yüksek sıcaklıkta oksidasyonu ve oksidasyondan korunma yolları”, **1.Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu Ve Sergisi Bildiriler Kitabı**, Ankara, 731-741 (2001).
4. Kahraman, N., Gülenç, B., ve Akça, H., “Ark kaynak yöntemi ile birleştirile ostenitik paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çeliğin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 17 (2): 75-85 (2002).
5. Aran, A., ve Temel, M. A., “Paslanmaz çeliklerin kaynağı”, Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller Üretimi Kullanımı Standartları, **Sarıtaş Teknik Yayını, Acar Matbbacılık A.Ş.**, İstanbul, 58-65 (2004).
6. Korkut, M. H., “Ferritik paslanmaz çeliklerin mikroyapısı ve aşınması üzerine karbür yapıcı elementlerin etkilerinin araştırılması”, Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 5-10 (1997).
7. Odabas C. “Paslanmaz çeliklerin temel özellikleri, kullanım alanları ve kaynak yöntemleri”, **Kaynak Tekniği Sanayi Ve Ticaret A.Ş.**, İstanbul, 15 (3): 59(2007).
8. Kaluç, E., “Ferritik-östenitik paslanmaz çelik çiftinin nokta kaynağında kaynak parametrelerinin çekme-makaslama mukavemetine ve tanelerarası korozyona etkisi”, Doktora Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 20-25 (1988).
9. Çalık, A., “AISI 422 Martenzitik paslanmaz çeliğin kaynaklanabilirliğinin ve dolgu kaynağının araştırılması”, **1.Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu Ve Sergisi Bildiriler Kitabı**, Ankara, 743-748 (2001).
10. Yorulmazel, S. C., “Paslanmaz çelik konstrüksiyonlarda oluşan distorsiyonların etüdü”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 14-15 (2007).
11. Tülbentçi, K., Kaluç, E. ve Yılmaz, M., “Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çeliklerin kaynağı”, **Kaynak Dünyası**, 8 (47): 18-24 (1993).

12. Alptekin, A., “Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin paslanmaz çeliklere uygulanabilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Denizli, 5-7 (2006).
13. Odabaş, C., “Östenitik çeliklerin genel özellikleri”, **Metal & Kaynak**, 4(87): 60-65 (1998).
14. Uzun, H., “Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları” , Yüksek Lisans Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 5-6 (2002).
15. Toor, I. U. H., Hyun, P. J. and Kwon, H. S., “Development of high Mn–N duplex stainless steel for automobile structural components ”, **Corrosion Science**, 50: 401–414 (2008)
16. Sahin, Y.. “Yeni basit yapılı monokarboran ve karboran türevleri”, **EMİ** Ankara 15 (2005).
17. Sapmaz, A.. “2007 - 2013 Bor çalışma grubu raporu”, **EMİ**, Ankara, 37-39 (2006).
18. Sahin, S, “Katı borlama yöntemi ile ferrobor üretimi ve özelliklerinin belirlenmesi”, Doktora Tezi, **Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Manisa, 15-35 (1999).
19. Özsoy,A., “Çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş zonu ve anamatriksin özelliklerinin iyileştirilmesi”, Doktora Tezi, **Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, 43-57 (1991).
20. Uzun, H., “Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 16-21 (2002).
21. Fargas, G., Anglada, M., and Mateo A. , “Effect of the annealing temperature on the mechanical properties, formability and corrosion resistance of hot-rolled duplex stainless steel ”, **Journal of Materials Processing Technology**, 102 (12): 13 (2008).
22. Uzun, H., “Borlama ile Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 48 (2002).
23. Jiang, X. X., Li, S.Z., Tao, D. D. and Yang, J. X., “Accelerative effect of wear on corrosion of hing alloy stainless steel ”, **Corrosion Science**, 49 (2): 836–842 (1993).

24. Sizov, I. G., Smirnyagina, N. N. and Semenov A. P., “Structure and properties of boride layers deposited by electron beam and chemicothermal treatment”, *Metal Science and Heat Treatment*, 43 (11): 460 – 461 (2001).
25. Biddulph, R. H., “Boronizing for erosion resistance”, *Thin Solid Film*, 45 (2): 341 – 347 (1977).
26. Bourithis, L, Papaefthymiou, S. and Papadimitriou, G. D., “Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties”, *Applied Surface Science*, 200 (5): 203-218 (2002).
27. Selçuk, B., İpek, R. Karamış, M. B., “A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, 141 (2): 189-196 (2003).
28. Doruk, M., “Korozyon ve önlenmesi” , *ODTÜ Mühendislik Fakültesi Yayını*, Ankara, 58-77 (1982).
29. Yalçın, H. ve Koç, T., “Demir çelik yapıların korozyonu ve katodik korunması”, *İller Bankası Yayını*, Ankara, 50 (1991).
30. Üneri, S., “Korozyon ve önlenmesi”. *Korozyon Derneği Yayını*, Ankara, 36 (1998).
31. Çakır, A.F. “Metalurji Dersi, 2002 yılı ders notları” *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 14-38 (2002).
32. Jiang, X. X., Li, S.Z., Tao, D. D. and Yang, J. X., “Accelerative effect of wear on corrosion of hing alloy stainless steel ”, *Corrosion Science*, 34 (6): 846–862 (1993).
33. Geis-Gerstorfer, J., “In vitro corrosion measurements of dental alloys”, *J Dent*, 22 (4): 247– 51 (1994).
34. Bilhan, H., “Çeşitli organik tükürük komponentlerinin diş hekimliğinde kullanılan farklı döküm alaşımları ve amalgamın korozyon davranışları üzerine etkileri”, Doktora Tezi, *İ.Ü. Sağlık Bilimleri Enstitüsü*, 45-58 (2003).
35. Mülders, C., Darwish, M. and Holze, R. , “The influence of alloy composition and casting procedure up on the corrosion behaviour of dental alloys: an in vitro study”. *J Oral Rehabil*, 23 (12): 825–831 (1996).
36. AL-Mobarak, N. A., AL-Mayouf, A.M. and Al-Swayih, A.A., “The effect ofhydrogen peroxide on the electrochemical behavior of Ti and some of its alloys for dental application”, *Materials Chemistry and Physics* , 99 (15): 333-340 (2006).

37. Simmons, J.W., Covino, B.S., Hawh, J.A. and Dunning, J.S. , “Effect of nitride(Cr_2N) precipitation on the mechanical, corosion and wear properties of austenitic stainless steel”, *ISIJ Institute*, 36 (24): 846–854 (1996).
38. McCabe, J. F. and Walls, A.W.G. , “Applied dental materials ”, *Blackwell Science, Oxford*, 8 (13): 10 (1998).
39. Esen, E. “Çelik yüzeylerinin kaplanması”, *Erdemir*, K.Ereğli, 9-11, (2006).
40. Soydaş, S., “Universal aşınma test cihazı tasarımı ve imalatı”,Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 21-22 (2006).
41. Jareel, D,J. and Bejbl, F., “Understanding wear and friction in medical-grade stainless steels”, *Medical Device & Diagnostic Industry Magazine*, 2-3 (1999).
42. Bhushan, B., “Introductionto tribology”, *Wear* , 12 (2): 332-333 (2002).
43. Öz Saraç, U., “Endüstriyel yatak alaşımlarının aşınma davranışlarının karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 16-17 (1999).
44. 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).
45. Çelikyürek, İ., “Demir aluminantların borlanması ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 107-108 (2006).
46. Akbulut,H., “Malzemelerin sürtünme ve aşınma ders notları”,*Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği*, 36-52 (2006).
47. Sarıkaya, Ö., “Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri”, *KorozyonDerneği Yayını*, Ankara, 1-60 (2007).
48. Kaşkan, A., “Grafit katkılı nylon6(poliamid6)nın aşınma davranışlarının incelenmesi”, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 21-22 (2005).
49. Yıldızlı, K., Odabaş, D. ve Nair, F., “ Borlanmış AISI 1020 çeliğinin eroziv aşınma davranışlarının incelenmesi”, *BAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (3): 131-139 (2003).
50. İpek, R. ve Karamış, M, B., “ Aşınma test yöntemleri ve gelişmeler”,*Mühendis ve Makine Dergisi*, 469 (21): 24-29 (1999).

51. Eş, M., “Dişli çark malzemelerinin aşınma karakteristiklerinin incelemesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 15-16 (2004).
52. Öz Saraç, U., Endüstriyel Yatak Alaşımalarının Aşınma Davranışlarının Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 23-30 (1999).
53. Hutching, I, M., “Tribology: friction and wear of engineering materials”, *Materials Science and Metallurgy University of Cambridge*, Cambridge, 54 (12): 76-82 (1992).
54. Klaasen, H. ve Kübarsapp, J., “Abrasive wear performance of carbide composites”, *Wear*, 261 (5): 520-526 (2006).
55. Taşgın, Y. ve Kaplan, M., “Dubleks tekniğiyle üretilen FeCrC katkılı malzemenin abrasiv aşınma davranışlarının araştırılması”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 16 (1): 217-224 (2007).
56. Sarı, Y, N. ve Yılmaz, M., “Ni-esaslı kaplamaların abrazif – erozif aşınma direncinde ısı püskürtme yönteminin ve WC ilavesinin etkisi”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 541 (36): 16 (2006).
57. 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).
58. 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).
59. Soydan, Y. ve Ulakan, L., “*Triboloji, teknoloji araştırma ve geliştirme merkezi teknolojik yayınlar serisi*” 5 (14): 35-40 (2003).
60. Blau, P, J. and Budinski, K, G., “Development and use of ASTM standards for wear testing”, *Wear*, 227 (2): 1159-1170 (1999).
61. Ünlü, S. ve Yılmaz S., “Bor ve borlamanın kullanım alanları” *Mühendis ve Makine Dergisi*, 552 (38): 48-54 (2006).
62. Matuschka, A.G., “Boronizing” *Carl Hanser Verlag*, München Wien, 28-64 (1980).
63. Bozkurt, N., Üçışık, A.H. ve Safoğlu, R. A., “Çeliklerde bor ile yüzey sertleştirme”, *3. Ulusal Metalurji Kongresi*, O.D.T.Ü., 1-3 (1979).
64. Bozkurt, N., “Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme” Doktora Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 36-90 (1984).

65. Carbuciccho, M. and Palombarini, G., “Effect of alloying elements on the growth of iron boride coating”, *J.Mater.Sci. Let.*, 6 (2): 1147-1149 (1987).
66. H.Berns and W.Theisen, “Ferrous materials: steel and cast iron” *Springer*, Berlin, 14-75 (2008).
67. Göy, Z., “Borlama” Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 45-82 (1984).
68. Badini, C., Gianoglio, C. and Paradelli, G., “The effects of carbon, chromium and nickel on the hardness of borided layers”, *Surfaces and Coatings Tech.*, 30 (2): 157-170 (1987).
69. A.F.Fadilha and P.R.Rios, “Decomposition of austenite in austenitic stainless steels”, *ISIJ Int.*, 87 (42): 325-337, (2002).
70. Y. Sun, “Yüksek krom ve nikelli çeliklerin aşınma davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 34-95 (2004).
71. H.Berns and W.Theisen, “Ferrous materials: steel and cast iron” *Springer*, Berlin, (2008).
72. Goeuriot, P.Y., Fillit, P., Thevenot, F., Driver, S.H. and Bruyas, H., “ The influence of alloying element addition on the boriding of steels”, *Mat. Sci. And Eng.* 12 (4): 9-19 (1982).
73. Permyakov, V.G., Yakovchuk, Y.E., Cherepin. V.T., Amirkhanova, T.V. and Maifet, Y.P., “Effect of silicon on formation of boride coatings”, *Met.Sci.Heat Treat.*, 15 (3): 251-253 (1973).
74. Fichtl, W., “Boronizing and its practical application”, *Materials in Engineering*, 2 (4): 276-286 (1981).
75. Yoon - Seok Choi., Jung-Gu KimYong, Soo ParkJee. and Yong Park., “Austenitizing treatment influence on the electrochemical corrosion behavior of 0.3C–14Cr– 3Mo martensitic stainless steel”, *Elsevier Materials Letter.*, 61 (1): 244–247 (2007).
76. Chunmin Li, Baoluo Shen, Guijiang Li and Chao Yang “Effect of Boronizing temperature and time on microstructure and abrasion wear resistance of Cr12Mn2V2 high chromium cast iron” *Elsevier Surface & Coatings Technology.*, 202 (24): 5882–5886 (2008).
77. Zulmelzu E., Goyos I., Cabezas C., O. and Parada A., “Wear and corrosion behaviour of high chromium (14-30Cr) cast iron alloys” , *Journal of Metarials Processing Technology*, 128 (7): 250-255 (2002).

ÖZGEÇMİŞ

Görkem YARGÜL 1986 yılında İskenderun'da doğdu; ilk öğrenimi Ankara, orta öğrenimini Samsun'da tamamladı. Ondokuz Mayıs Lisesi'nden mezun oldu. 2005 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Döküm Öğretmenliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2009 yılında iyi derece ile mezun oldu. Bu dört yıllık eğitimi boyunca çeşitli seminerlere ve kurslara katılarak kendini geliştirdi. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını tamamladı.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Karadeniz Mh. Muradiye Sk.
Erdem Apt. 72/1 55060
İlkadım / SAMSUN

Tel: (544) 793 5289 – (530) 468 1486

E-posta: g.yargul@gmail.com
xander_werter@hotmail.com