

**BORLANMIŞ YÜKSEK KROM VE NİKELLİ
DÖKME ÇELİĞİN KOROZİF AŞINMA
DAVRANIŞI**

**2014
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

EMRE KALKAN

**BORLANMIŞ YÜKSEK KROM VE NİKELLİ DÖKME ÇELİĞİN KOROZİF
AŞINMA DAVRANIŞI**

Emre KALKAN

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

**KARABÜK
Haziran 2014**

Emre KALKAN tarafından hazırlanan “BORLANMIŞ YÜKSEK KROM VE NİKELLİ DÖKME ÇELİĞİN KOROZİF AŞINMA DAVRANIŞI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Hayrettin AHLATCI

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 25/ 06/ 2014

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Doç. Dr. Bilge DEMİR (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Hayrettin AHLATCI (KBÜ)

İmzası



...../...../2014

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

Prof. Dr. Mustafa BOZ

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.”

Emre KALKAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BORLANMIŞ YÜKSEK KROM ve NİKELLİ DÖKME ÇELİĞİN KORUZİF AŞINMA DAVRANIŞI

Emre KALKAN

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Hayrettin AHLATCI

Haziran 2014, 109 sayfa

Bu çalışmada, döküm (orjinal) haldeki DIN 1.4849(G-X40NiCrSiNb 38-18) kalite çelik, çeşitli koşullarda borlama ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Borlama ısıl işlemine tabi tutulmuş numunelerin koruzif aşınma davranışları incelenmiştir. Borlama ısıl işlemi ile oluşan borür tabakaları mikroyapı, sertlik gibi çeşitli yönlerden karakterize edilmiş ve özellikleri ortaya konmuştur. Borlama işlemi, katı ortamda ticari Ekabor2 toz karışımı kullanılarak yapılmıştır. Borlama ısıl işlemi, farklı süre (9 ve 15 saat) ve sıcaklıklarda (950 ve 1050°C) uygulanmıştır. Borlanan numunelerin mikroyapıları optik mikroskopta metalografik olarak incelenmiştir.

Koruzif aşınma deneyleri, konsantrasyonu %10 olan HCl çözeltisi içerisinde yapılmıştır. Deney numunelerinin boyutları 25x15x9 mm'dir. Deneylerde karşı aşındırıcı madde olarak A316 bilye kullanılmıştır. Kullanılan bilyenin çapı 6 mm'dir. Deneyler 5 saat süre ile 30 mm/sn hız ile 500 m yol kat edecek şekilde yapılmıştır.

Borlama süre ve sıcaklığının artışı korozif aşınma oranını arttırmıştır. Bu durum korozyon akımının artmasına, korozyon potansiyelinin ise düşmesine neden olmuştur.

Anahtar Sözcükler : Yüksek krom ve nikelli çelik, borlama ısıl işlemi, korozif aşınma, mikroyapı ve mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 915.1.092

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

CORROSIVE WEAR BEHAVIOUR OF HIGH CHROME AND NICKEL CASTING STEEL

Emre KALKAN

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI

June 2014, 109 pages

In this study, corrosive wear behavior of casting DINü1.4849(G-X40NiCrSiNb 38-18) quality steel boriding in various conditions were investigated. The boride layers formed by boriding heat treatment were characterized by microstructure and hardness survey. Boriding process was made by commercial Ekabor2 powder mixture in solid medium. Boriding heat treatment periods and temperatures were 9-15 hours and 950-1050°C, respectively.

Corrosive wear tests were made in a solution of 10% concentration of HCl on the reciprocating wear tester. Dimensions of the test samples were 25x15x9 mm. A316 ball was used as counter surface parts in corrosive wear experiments. The diameter of the ball used is 6 mm. Sliding velocity and total sliding distance were 30 mm / sec to 500 m respectively. Corrosive wear rate increased with increasing boriding periods.

This is attributed to increasing of corrosion current and decreasing of the corrosion potential.

Key Word : Steel with high Cr and Ni, boroding heat treatment, corrosive wear, fatigue and mechanical properties.

Science Code : 915.1.092

TEŞEKKÜR

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

Deneysel alıőmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakóltesi Arő. Gör. Engin ÇEVİK'e teőekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalıőmasının düzenlenme aşamasında desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım İbrahim TURAN, Sayit TOPAL ve Star Copy kırtasiye çalıőanlarına sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

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

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	3
YÜKSEK KROM VE NİKELLİ DÖKME ÇELİKLER	3
2.1. YÜKSEK KROM VE NİKELLİ DÖKME ÇELİKLERDE MİKRO YAPININ GELİŞİMİ.....	5
2.1.1. Matris.....	5
2.1.2. Karbürler.....	6
2.1.3. İntermetalikler.....	7
2.2. YÜKSEK KROM VE NİKELLİ DÖKME ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI.....	8
2.2.1. Demir-Krom Alaşımları.....	9
2.2.2. Demir-Krom-Nikel Alaşımları	10
2.2.3. Demir-Nikel-Krom Alaşımları	13
BÖLÜM 3.	15
BORLAMA İŞLEMİ VE PROSESLERİ	15
3.1. BORLAMA İŞLEMİ.....	16
3.1.2. Borlama İşleminin Avantajları	16
3.1.3. Borlama İşleminin Dezavantajları	17

	<u>Sayfa</u>
3.2. BORLAMA YÖNTEMLERİ	18
3.2.1. Katı Ortamda Borlama.....	18
3.2.1.1. Toz Ortamda Borlama.....	20
3.2.1.2. Macun İle Borlama	21
3.2.2. Sıvı Borlama	22
3.2.2.1. Daldırma Yöntemi	22
3.2.2.2. Elektroliz yöntemi.....	22
3.2.2.3. Derişik Çözeltide Borlama.....	23
3.2.3. Gaz borlama.....	23
3.2.4. Plazma Borlama.....	24
3.3. BORÜRLERİN ÖZELLİKLERİ.....	25
3.3.1. Demir-Bor Denge Diyagramı	26
3.3.2. Fe ₂ B ve FeB fazlarının özellikleri	28
3.4. BORLAMA İŞLEMİNİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMA ALANLARI	29
3.5. BORÜR TABAKASI	31
3.5.1. Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği.....	31
3.5.2. Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması	34
3.5.3. Borür Tabakası Çeşitleri	37
3.5.4. Geçiş Bölgesi	39
3.5.5. Tabaka Kalınlığı	40
3.5.6. Alaşım Elementlerinin Borlamaya Etkisi	41
3.5.7. Borlama Sonrası Uygulanabilecek Isıl İşlemler Ve Termal ÇevrimliBorlama	46
3.6. BORÜR TABAKASININ MEKANİK VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ... 48	48
3.6.1. Sertlik.....	48
3.6.2. Kırılma Tokluğu	49
3.6.3. Borür Tabakasının Korozyon Dayanımı.....	52
 BÖLÜM 4.	54
AŞINMA.....	54
4.1. AŞINMA ZAMAN İLİŞKİSİ	54
4.2. AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER	56
4.2.1. Malzeme Seçimi	56

	<u>Sayfa</u>
4.2.2. Sürtünme.....	56
4.2.3. Yüzeye Uygulanan Yük.....	57
4.2.4. Sürtünme Mesafesi	57
4.2.5. Yüzey Sertliği	57
4.2.6. Yüzey Pürüzlülüğü	57
4.2.7. Yağlama.....	57
4.3. AŞINMA ÇEŞİTLERİ	57
4.3.1. Adhesiv Aşınma.....	57
4.3.2. Abrasif Aşınma	60
4.3.3. Yüzey Yorulması	61
4.3.4. Erozyon Aşınması.....	62
4.3.4.1. Katı Partikül Erozyonu	62
4.3.4.2. Sıvı Su Damlası Erozyonu	63
4.3.4.3. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam Erozyonu	63
4.3.4.4. Kavitasyon Erozyonu.....	63
4.3.4.5. Elektro Erozyon	63
4.3.5. Korozyon Aşınması	63
4.4. AŞINMANIN AZALTILMASI İÇİN GEREKLİ ÖNLEMLER	65
4.5. AŞINMANIN KULLANIM ALANLARI	66
4.6. AŞINMA ÖLÇÜM METODLARI	67
4.6.1. Ağırlık Farkı Metodu.....	67
4.6.2. Kalınlık Farkı Metodu	68
4.6.3. İz Değişimi Yöntemi	68
4.6.4. Rasyozotoplar İle Ölçme	68
4.6.5. Bilgisayar Destekli Aşınma Ölçüm Metodu.....	68
4.7. TRİBOSİSTEMLER	69
4.7.1. Tiribotestlerin Sınıflandırılması.....	69
4.8. AŞINMA DENEY YÖNTEMLERİ.....	70
4.9. AŞINMA DENEYLERİNDE KULLANILAN BAZI AŞINMA DENEY CİHAZLARI	73
4.9.1. Düzlem Üzeri Çubuk (Pin On Flat) Deney Cihazı	75
4.9.2. Dört Top Deney Aparatı	76
4.9.3. Ball On Flat Aşınma Deney Cihazı	76

	<u>Sayfa</u>
4.9.4. Ball On Disk Deney Cihazı	77
4.9.5. Levha – Kayış Deney Cihazı	78
4.9.6. Silindir Üstü Çubuk Deney Cihazı	79
4.9.7. Çapraz Silindir Deney Cihazı	80
4.9.8. Plint TE 97 Sürtünme ve Aşınma Deney Cihazı	81
BÖLÜM 5.	84
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	84
5.2. KOROZİF AŞINMA DENEYLERİ	89
5.2.1. Korozif Aşınma Deneyleri İçin Numune Hazırlama	89
5.2.2. Korozif Aşınma Deney Parametreleri	90
BÖLÜM 6.	94
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	94
6.1. KOROZYON DENEY SONUÇLARI	94
6.2. KOROZİF AŞINMA DENEYLERİ SONUÇLARI.....	95
BÖLÜM 7.	100
SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	100
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	109

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Fe-Cr-Ni üçlü faz diyagramı	4
Şekil 2.2. Modifiye edilmiş Schaeffler diyagramı.....	4
Şekil 3.1. Katı borlama şematik resmi.....	19
Şekil 3.2. Gaz ortamda borlama tertibatının şematik gösterimi	24
Şekil 3.3. Plazma borlama tesisat şeması	25
Şekil 3.4. Fe-B denge diyagramı Massalski	27
Şekil 3.5. Bor konsantrasyonunun yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak değişimi	32
Şekil 3.6. FeB ve Fe ₂ B içerisinde bor atomu etrafındaki demir atomu konfigürasyonu.....	33
Şekil 3.7. Konvansiyonel borlama sırasında borür tabakasının Oluşum mekanizması Çekirdeklenme ve <001> oryantasyonunda büyüme	35
Şekil 3.8. FeB ve Fe ₂ B tabakalarında, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterimi.....	36
Şekil 3.9. Borür tabakasının sınıflandırılması	38
Şekil 3.10. Fe ₂ B ve geçiş bölgesi kalınlığının borlama süresi ile değişimi	40
Şekil 3.11. Borür tabakası kalınlığının tanımlanması	41
Şekil 3.12. Nikel miktarının artışına bağlı olarak, borür tabakasının sertliğindeki değişim	44
Şekil 3.13. Çeliklerde borür tabakası boyunca elementlerin şematik dağılımı	45
Şekil 3.14. Çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi	45
Şekil 3.15. Borlanmış AISI 304 çeliğinde sertlik değerinin, borlanan yüzeyden mesafe ile ilişkisi.....	49
Şekil 3.16. Borlama süresine bağlı olarak borür tabakasının kırılma tokluğunun değişimi	51
Şekil 3.17. Borür tabakalı paslanmaz çeliklerin düşük asitliğe sahip su içerisindeki korozyon davranışları.....	53
Şekil 4.1. Aşınma zaman ilişkisi	55
Şekil 4.2. Adhesiv aşınma	58

Şekil 4.3. Bakır esaslı bronz ve pirinç yataklarda kuru ve yağlı ortamlarda sürtünme katsayısı- zaman diyagramı.....	59
Şekil 4.4. Pürüzlü sert bir yüzey veya abrasif parçacıkların bir yüzeye yapışık olması.....	60
Şekil 4.5. Yüzeylerden en az birinden daha sert abrasif parçacıkların iki yüzey arasında sıkışması.....	61
Şekil 4.6. Yorulma aşınması oluşum mekanizması	62
Şekil 4.7. Elektro erozyon ve Tel erozyon tezgahı çalışma prensibi	66
Şekil 4.8. Aşındırıcı su jetinin basit şematik görünümü	67
Şekil 4.9. Tribosistemlerin şematik gösterimi.....	70
Şekil 4.10. Kayma aşınması için kullanılan geometrik düzenekler	71
Şekil 4.11. Deney cihazlarında temas biçimleri.....	72
Şekil 4.12. Lastik tekerli abrasiv aşınma deney cihazı şematik görünümü	74
Şekil 4.13. Abrasiv aşınma deney cihazı şematik görünümü.....	74
Şekil 4.14. Aşındırıcı partiküllü aşınma deney cihazı.....	75
Şekil 4.15. Pin on Flat deney cihazı şematik görünümü	76
Şekil 4.16. Dört top aşınma deney aparatı	76
Şekil 4.17. Ball on Flat deney cihazı	77
Şekil 4.18. Ball on Disk deney cihazı	78
Şekil 4.19. Levha-kayış aşınma deney cihazı	79
Şekil 4.20. Silindir üstü çubuk deney cihazı şematik görünümü	80
Şekil 4.21. Saç metal kesimi	80
Şekil 4.22. Çapraz silindir deney düzeneği	81
Şekil 4.23. Plint firmasının ürettiği ilk TE 97 aşınma deney cihazı	82
Şekil 4.24. TE 97 deney cihazı ile yapılabilen aşınma deneylerinin şematik görünümü	83
Şekil 5.1. DIN 1.4849 kalite çeliğin orjinal mikroyapı görüntüsü.....	85
Şekil 5.2. 9 ve 15 saatte borlanmış olan orjinal numunelerin 950°C 1050°C’de numunelerin sertlik dağılımları	85
Şekil 5.3. Orjinal numunelerin 950 ve 1050°C’de 9 ve 15 saat borlanmasıyla elde edilen bor tabakasının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin mikroyapı görüntüleri.....	86
Şekil 5.4. 950 ve 1050°C sıcaklıkta 9 ve 15 saat süre ile borlanan orjinal numunelerin borür tabaka kalınlıkları	87

Şekil 5.5. Potansiyodinamik Polarizasyon deneylerinde kullanılan potansiyostatik yöntemle çalışan statik korozyon deney düzeneği.	87
Şekil 5.6. Korozyon deneylerinde kullanılan çalışma elektrotu.	88
Şekil 5.7. Statik korozyon deney hücresi.	88
Şekil 5.8. Magma Therm marka sıcaklık kontrollü elektrikli direnç fırını.	90
Şekil 5.9. Korozif aşınma deneylerinde kullanılan deney cihazı.	91
Şekil 5.10. Numune temizleme işlemlerinde kullanılan BEB marka ultrasonik temizleme cihazı.	91
Şekil 5.11. Ağırlık kayıplarının belirlenmesinde kullanılan Precisa marka XS 220A model hassas terazi.	92
Şekil 5.12. TRONIC-ZTX-E marka stereo mikroskop.	92
Şekil 5.13. Mikroyapı incelemelerinde kullanılan Leica DM ILM model optik ışık mikroskobu.	92
Şekil 6.1. 950°C ve 1050°C’de 9 ve 15 saatte borlanmış olan orjinal numunelerin %10 HCl çözeltisi içinde Ecorr ve Icoor değerlerindeki değişim.	94
Şekil 6.2. %10 HCl çözeltisi içerisinde 40 N’da 1’er saat arayla alınan aşınma ağırlık kayıpları grafiği.	95
Şekil 6.3. Aşınma deneyi sonrası oluşan aşınma iz genişliği ve derinliğinin ölçümü.	96
Şekil 6.4. %10 HCl çözeltisi içerisinde 40 N’da hesaplanan aşınma iz alan kayıpları grafiği.	96
Şekil 6.5. Borlama parametrelerine göre aşınma hızının değişimi.	97
Şekil 6.6. %10 HCl’de farklı süre ve sıcaklıklarda borlanan numunelerin aşınma deneyleri sonrasında yüzeydenaşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri.	98
Şekil 6.7. %10 HCl’de farklı süre ve sıcaklıklarda borlanan 950°C/9saat ve 1050°C/15saat koşullarında borlanmış numunelerin aşınma deneyleri sonrasında kesitten aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri.	98
Şekil 6.8. %10 HCl’de farklı süre ve sıcaklıklarda borlanan numunelerin korozif aşınma deneyleri öncesi ve sonrasında yüzeyden aşınma izlerinin SEM görüntüleri.	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Fe-Cr, Fe-Cr-Ni ve Fe-Ni-Cr alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve oda sıcaklığındaki tipik mekanik özellikleri.....	9
Çizelge 3.1. Koruyucu gaz atmosferinin özellikleri	21
Çizelge 3.2. Çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri	26
Çizelge 3.3. Fe ₂ B ve FeB fazlarının tipik özellikleri.....	28
Çizelge 3.4. Borlama işlemine tabi tutulmuş çeşitli demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları.....	29
Çizelge 3.5. FeB ve Fe ₂ B fazları içerisinde borun difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjileri	34
Çizelge 3.6. %0,45 C'lu çelikte, borlama sonrası uygulanan ısıl işlemlerle matris malzeme özgül hacminin değişimi	47
Çizelge 3.7. AISI W4 çeliğinde borlama süresine bağlı olarak kırılma tokluğundaki değişim	51
Çizelge 4.1. Malzeme özelliklerinin adhesiv aşınmaya etkisi	59
Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan DIN 1.4849 çelik malzemenin kimyasal bileşimi.....	84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

H_2SO_4	: Sulfirik Asit
$Cr_{eş}$	: Krom Eşdeğerliliği
$Ni_{eş}$	: Nikel Eşdeğerliliği
Cr	: Krom
Ni	: Nikel
B	: Bor
Si	: Silisyum
μm	: mikrometre
D	: tabaka kalınlığı
R	: Gaz Sabiti
H	: E – Ee ile açıklanan aşırı potansiyel
Ee	: Denge Potansiyeli erf(z)
D	: Difüzyon Katsayı
D_0	: Frekans Faktörü
Q	: Aktivasyon Enerjisi
$^{\circ}C$	: Santigrat derece
NaCl	: Sodyum Klorür
HCl	: Hidroklorik Asit
SiC	: Silisyumkarbür
mV	: Milivolt
nA	: Nanoamper
H_3PO_4	: Fosforik Asit
Ti	: Titanyum
Sn	: Kalay
P	: Fosfor

- Wa : Aşınma oranı ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)
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 (Amerika Test ve Malzeme Topluluğu)
DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
EDS : Electron Diffraction Scanning (Elektron Difraksiyon Taraması)
SEM : Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
XRD : X-Ray Diffraction (X-ışınları difraksiyon)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Endüstride makine üretimi için kullanılan malzemelerin seçimi kadar bu malzemelere uygulanan yüzey işlemleri de büyük önem taşımaktadır. Türkiye'nin sahip olduğu en önemli yer altı kaynaklarından birisi bor rezervleridir. Bor ve türevlerinin endüstride kullanım alanları oldukça geniş bir tutmaktadır. Bor ve bor bileşiklerin kullanım alanlarına uygun en iyi örnekler borlama gibi termokimyasal difüzyon işlemleridir. Termokimyasal difüzyon prosesi ile yapılan bir yüzey işlemi olan "Borlama" (Boronizing), malzeme yüzeyinde istenen yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısıyla yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci ve iyi oksidasyon direnci sağlayan en elverişli yüzey sertleştirme işlemlerinden biridir [1]. Borür tabakası sahip olduğu yüksek sertlik değerini, 900-1000°C'ye ulaşan sıcaklıklarda dahi koruyabilmektedir [2].

Günümüzde geleneksel borlama tekniklerinin yanında ark plazma sinterleme, iyon implantasyon, kimyasal buhar biriktirme, fiziksel buhar biriktirme gibi ileri teknoloji gerektiren yüzey işlemleri ile de borlama yapılmaktadır [1].

Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucu borlama şartlarına bağlı olarak malzeme yüzeyinde ferrobör fazlarından Fe_2B veya (Fe_2B+FeB) meydana gelmektedir. Borlama sonucu karbonlu çeliklerde 1800-2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2500-2800 HV ve yüksek hız çeliklerinde 2800-3300 HV yüzey sertliği elde edilmektedir [3]. Borür tabakasının sertliği oluşan fazlara göre değişir. FeB fazı, Fe_2B fazından daha sert ve gevrekli.

Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucu elde edilen ferrobör bileşiklerinin atmosfer şartlarında korozyon direnci az olmasına karşılık bazı asit ve sıvı metallere karşı yüksek korozyon direnci göstermektedir. Özellikle HCl, H_2SO_4 , H_3PO_4 gibi

asitler ve Al, Pb, Zn gibi metal eriyiklerine karşı çok iyi korozyon direnci göstermektedir [4].

Borlama ile elde edilen kabuk kararlıdır ve yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır, fakat bor tabakasının çift fazlı oluşması, FeB ve Fe₂B fazları arasında termal genleşme katsayılarının farklılığından dolayı bor tabakası kırılmandır. Kırılma önleminin en temel yöntemi, tek fazlı veya çok bileşenli (bor karbürleme gibi) bor tabakası elde etmektir. Ayrıca yeni geliştirilen bir yöntem olarak lazer ısı işlemi ile de bor tabakasının kırılma azaltılabilmektedir [5].

Türkiye'nin çok zengin "Bor" rezervine sahip olduğu ve bor bileşiklerinin üstün özellikleri göz önüne alındığı takdirde bazı malzemelerin bor ve bor bileşikleriyle kaplanmasının matrisin, muhtemel vazgeçilemeyecek özellikleri yanında bor bileşiklerinin aşınma, korozyon mukavemeti ile kaplama tabakasındaki bileşiğin cinsine göre üstün mekanik özelliklerinden aynı anda faydalanmak mümkün olacaktır [6].

Çelik endüstrisinde büyük yer tuttuğu bilinen "Bor" elementi ilaç sanayiine kadar uzanan kullanım alanı yanında, Ti, Zr, Cr ve Fe ile yaptığı bileşiklerin yüksek ergime sıcaklığı, yüksek sertlik, üstün korozyon ve aşınma direncine sahip olduğu bilinmektedir. Ayrıca bor elementinin oksitlenmesinin sürtünme katsayısını düşürerek yağlama tesiri yaptığı bulunmuştur. Bor bileşiklerinin sertlikleri yanında korozyon ve aşınma mukavemetlerinin yüksek oluşu "Borlama" yoluyla katı malzemelerin yüzeylerini kaplayarak bu bileşiklerin üstün özelliklerinden faydalanma imkanına yol açmaktadır. Uygun şartlar sağlandığında metalik ve bazı metalik olmayan malzemelerde borlama uygulaması mümkün olabilir.

Bu çalışmanın amacı, döküm halinde temin edilmiş DIN 1.4849 kalite çelikten hazırlanan orijinal numunelere farklı süre ve sıcaklıklarda uygulanan borlama ısı işlemi sonrasında, mikroyapı, sertlik ve borlama ısı işlemi sonrası korozif aşınma davranışlarının incelenmesidir.

BÖLÜM 2

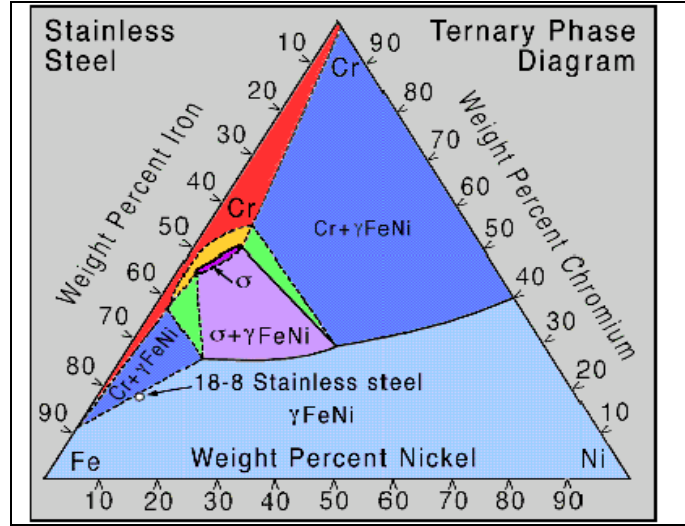
YÜKSEK KROM VE NİKELLİ DÖKME ÇELİKLER

Yüksek Cr ve Ni'li dökme çelikler; yüksek sıcaklık korozyon ve aşınma direnci, eğilme, kırılma ve termal yorulma direnci ve sürünme mukavemeti gerektiren mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımların ticari kullanım alanları; ısıtım işlem fırınları, gaz türbinleri, uçak motorları, askeri ekipmanlar, petrol rafineri fırınları, petrokimyasal ekipmanlar, kimyasal proses ekipmanları, cam ve sentetik plastik üretim ekipmanları şeklinde verilebilir.

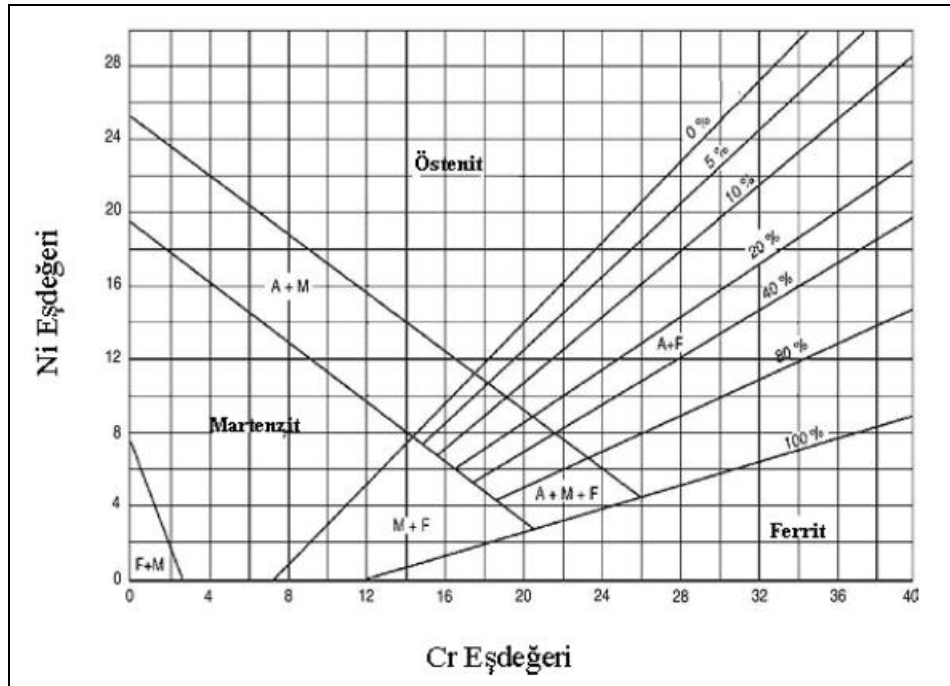
Yüksek Cr ve Ni'li çeliklerde korozyon ve oksidasyon direncini arttıran en önemli element Cr'dur. Bileşimde bulunan Cr, oksijenle birlikte yüzeyde oldukça yoğun ve kararlı bir krom-oksit tabakası oluşturur. Belirli bir sıcaklıkta yeterli oksidasyon ve korozyon direncini sağlamak için bileşimde yeterli miktarda Cr'un bulunması gerekmektedir. Çeliğin yüzeyinde koruyucu oksit tabakası oluşmaması durumunda çelikte yüksek sıcaklıkta çevresel etkilerle oksidasyon başlar. Bileşimde bulunan Ni ise, östenitin kararlılığını arttırmakta ve matriste daha fazla karbon çözünmesine neden olmaktadır. Buda mikroyapıda karbür çökmesini azaltmaktadır [7-10].

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 genellikle Schaeffler diyagramından (Şekil 2.2) faydalanılır. Orjinal Schaeffler diyagramının eksenlerin de sadece Ni ve Cr bulunmasına rağmen, modifiye edilmiş Schaeffler diyagramının eksenlerinde, diğer elementlerin etkisini de kapsayan nikel ve krom eşdeğerleri (sırasıyla Ni_{es} ve Cr_{es}) bulunur [11,12]. Bu çeliklerin mikroyapısı,

matris, karbür ve intermetalikler den ibarettir. Çeliğin bileşime bağlı olarak matris, östenitik ve/veya ferritik olabilir. Bileşimde bulunan Ni östenitin, Cr ise ferritin kararlılığını arttıran elementlerdir. Mikroyapıda bulunan karbürler, Cr'ca zengin olup, genellikle $M_{23}C_6$ tipindedir. İntermetalik olarak ise genellikle sigma(σ) fazı mikroyapıda bulunur [12,13].



Şekil 2.1. Fe-Cr-Ni üçlü faz diyagramı [11].



Şekil 2.2. Modifiye edilmiş Schaeffler diyagramı [12].

$$Ni_{eş} = \%Ni + 30.\%C + 0.5.\%Mn + 11.5.\%N \quad [12] \quad (2.1)$$

$$Cr_{eş} = \%Cr + \%Mo + 1.5.\%Si + 2.\%Nb + 3.\%Ti \quad [12] \quad (2.2)$$

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

$Cr_{eş}/Ni_{eş} = 1.0 - 1.3$ ise, matris tümüyle östenitik

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

$Cr_{eş}/Ni_{eş} = 1.8$ ise, matris hemen hemen ferritik ve az miktar dönüşmemiş östenitiktir [13].

2.1. YÜKSEK KROM VE NİKELLİ DÖKME ÇELİKLERDE MİKROYAPININ GELİŞİMİ

Fe-Cr-Ni dökme çeliklerin mikroyapısında bulunan mikroyapı bileşenleri aşağıda tanıtılmıştır;

2.1.1. Matris

Cr, Ti, Sn, P, V, Nb, W, Mo, Al ve Si gibi alaşım elementleri ferritik matrisi, Ni, C, N, Mn, Cu ve Zn gibi alaşım elementleri ise östenitik matrisi kararlı hale getirmektedir. Östenitik matrisli çelikler soğuk ve sıcak şekillendirme işlemlerine uygun olup, yüksek sıcaklık dayanımları ferritik matrisli çeliklerden daha fazladır. Bu çelikler aynı zamanda daha yüksek ısıl genleşme katsayısına, daha düşük ısıl iletkenliğe ve de daha yüksek oksidasyon ve korozyon direncine sahiptirler. Kükürt bileşiklerine karşı oldukça hassas olmalarına rağmen C ve N difüzyonuna karşı iyi bir dirence sahiptirler ve artan Ni içeriği ile birlikte bu özellik gelişir. Geniş sıcaklık aralıklarında mikroyapının yüksek kararlılığı ve mekanik yüklemeler altında yüksek dayanım göstermeleri %30'dan fazla Ni içeren çeliklerin genel karakteristiğidir. Bu çeliklerde maksimum Si içeriği %1'dir. Si içeriği %5 civarında olduğunda çeliğin nitrik asit içindeki korozyon direnci gelişir.

Ferritik matrisli çelikler düşük soğuk şekillendirme kabiliyetine sahip olup, yüksek sıcaklık mukavemeti düşüktür ve kırılabilirliğe karşı hassastır. Nispeten yüksek servis sıcaklıklarında tokluk daha yüksektir. Bu çelikler nötr ve oksitleyici ortamlarda kükürte karşı iyi direnç gösterirken, redükleyici ve karbürleyici ortamlarda hasara uğramaktadır [11-20].

2.1.2. Karbürler

Fe-Cr-Ni dökme çeliklerinde oluşabilecek karbürler; MC, $M_{23}C_6$, M_6C ve M_7C_3 tipi karbürlerdir. Çökme yerine bağlı olarak, bu karbürlerin etkileri farklıdır; (a) tane sınırlarında çökelen karbürler, tane sınırı mukavemetini artırıp tane sınırlarının kaymasını geciktirir, (b) matris içine çökelen karbürler matris mukavemetini geliştirir. Yüksek Cr ve Ni'li çeliklerde $M_{23}C_6$ tipi karbür çökeltileri yaygın olarak görülmektedir. Ti, Nb ve V gibi alaşım elementleri MC tipi, Mo ise M_6C tipi karbürlerin çökmesini teşvik etmektedir. $M_{23}C_6$ tipi karbürler tüm paslanmaz çeliklerde görülmektedir.

Östenitik matris içinde karbürlerin homojen olarak dağılması çeliğin yüksek sıcaklık mukavemetini arttırmaktadır. Bu nedenle demir esaslı ısıya dayanıklı alaşımların C içeriği yüksektir. Bazı karbürler, C içeriği %0.20'nin üzerinde olan çeliklerin mikro yapılarında oluşmaktadır. Soğuk işlem ile şekillenen östenitik çeliklerde genellikle %0.25 civarında C bulunurken döküm yöntemiyle şekillenen östenitik çeliklerde C miktarı %0.75 değerine kadar çıkmaktadır.

Yüksek Cr ve Ni'li çeliklerin döküm yapısında önemli segregasyonlar gelişir. Hem döküm şartlarında hem de ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklardan yapılan hızlı soğutmada karbonun çoğu aşırı doymuş katı eriyik içinde kalır. Ardından yapılan yeniden ısıtma işlemi (yaşlandırma) ile karbürler çökeler. Yeniden ısıtma sıcaklığı düşük ise, reaksiyon yavaş ve çökelen karbürler daha incedir. Bu karbürler sürünme mukavemetini artırır ve sünekliği azaltır. Yüksek Cr ve Ni'li dökme çeliklerin mikroyapıları belirli sıcaklıklara kadar yapılan yeniden ısıtma işlemi ile değiştirilebilmektedir. Çökelmiş karbür içeren çeliklere 980°C ila 1200°C arasında

uygulanan yeniden ısıtma işlemi, matriste bulunan karbürleri büyütür ki bu durum sürünme mukavemetini azaltır ve sünekliliği artırır [7,21-23].

2.1.3. İntermetalikler

Fe-Cr-Ni çeliklerinde yaygın olarak oluşan intermetalik fazlar şunlardır; (a) Sigma fazı (σ), (b) Chi fazı (χ), ve (c) Laves fazı (η). Bunlar dışında G fazı, R fazı ve mu (μ) fazı gibi diğer intermetalik fazlar da literatürde belirtilmiştir.

Sigma (σ) fazı; Fe-Cr, Fe-Mo, Fe-V, Fe-Mn gibi ikili, Fe-Cr-Ni, ve Fe-Cr-Mo gibi üçlü ve hatta Fe-Cr-Ni-Mo gibi dörtlü sistemlerde görülmüştür. Östenitik çeliklerde sigma fazı çökelteleri 550-900°C sıcaklıklar arasında oluşmaktadır. Tipik bir sigma fazının kompozisyonu %55 Fe, %29 Cr, %11 Mo ve %5 Ni'dir ve yaklaşık olarak $(Fe, Ni)_3 (Cr, Mo)_2$ şeklinde gösterilebilir. Çok gevrek bir fazdır. Genellikle sigma çökelteleri tane sınırlarında özellikle üç bölümlü tane sınırı kavşaklarında ve uyumsuz ikiz sınırlarında görülür [21-26].

Sigma fazının çökmesi, çok yavaş bir kinetiğe sahiptir ve çökeltelerin oluşması çok uzun zaman almaktadır. Bunun üç nedeni vardır;

- a) Karbon ve azot, sigma fazında çözünmez (dolayısıyla sigma fazı normalde karbür ve nitrid çökelteleri oluşuktan sonra görülebilir).
- b) Östenitten çok farklı ve kompleks kristal yapısı sebebiyle sigma fazının çekirdeklenmesi zordur.
- c) Sigma fazı yer alan elementlerce çok zengindir ve böylece çok uzun difüzyon süresine ihtiyaç vardır.

Chi (χ) fazı ile alakalı yapılan çalışmalarda Hughes ve Llevelyn chi fazının Fe -Cr-Ni-Ti sisteminde de bulunduğunu tespit etmişlerdir. Okafor ve Carlson, chi fazının $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ ile $Fe_{36}Cr_{12}Mo_3Ti_7$ arasında gelişen geniş bir bileşime sahip olduğunu ve latis parametresinin düzenli bir şekilde arttığını göstermişlerdir. Chi fazının çökme alanı sigma fazına göre oldukça sınırlıdır (600-900°C) ve Mo bileşimine bağlıdır.

Laves (η) fazı; C_{14} ($MgZn_2$), C_{15} (Cu_2Mg) ve C_{36} ($MgNi_2$) olmak üzere üçe ayrılır. Östenitik çeliklerde genellikle sıkı paket hegzagonal yapıya sahip $MgZn_2$ tipi laves fazı oluşur. Fe ile aynı yüzey merkezli kübik yapıya sahip Zn da laves fazı oluşturmaktadır. Nb içeren östenitik çeliklerin yaşlanması sırasında Fe_2Nb çökeltileri, ardı sıra önce tane sınırlarında, sonra uyumlu ve uyumsuz ikiz sınırlarında ve son olarak da tane içerisinde oluşmaktadır. Tane sınırı çökeltileri kaba, pürüzlü ve yuvarlak şekiller alabilir. Bunun aksine uyumlu ikiz sınırlarında hemen hemen sürekli çökelti filmleri kabalaşmaya karşı direnç gösterir. Östenitik çeliklerde σ , χ ve η fazlarına göre daha az karşılaşılan G, R ve (μ) intermetalik fazlarında bulunmaktadır [11].

2.2. YÜKSEK KROM VE NİKELLİ DÖKME ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Dökme çelikler kullanım alanlarına göre, alaşımsız dökme çelikler, paslanmaz ve aside dayanıklı dökme çelikler, yüksek sıcaklığa dayanıklı dökme çelikler, aşınmaya dirençli dökme çelikler ve soğuğa dayanıklı dökme çelikler olarak sınıflandırılabilir.

Yüksek Cr ve Ni'li dökme çelikler içerdikleri Cr ve Ni miktarına ve metalürjik yapısına göre, Fe-Cr, Fe-Cr-Ni ve Fe-Ni-Cr alaşımları diye 3'e ayrılır;

- a) Demir-Krom Alaşımları: HA, HC, HD.
- b) Demir-Krom-Nikel Alaşımları: HE, HF, HH, HI, HK, IN-519, HL
- c) Demir-Nikel-Krom Alaşımları: HN, HP, HT, HU, HW,

Bu alaşımların kimyasal bileşimleri ve oda sıcaklığındaki tipik mekanik özellikleri Çizelge 2.1'de görülmektedir.

Çizelge 2.1. Fe-Cr, Fe-Cr-Ni ve Fe-Ni-Cr alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve oda sıcaklığındaki tipik mekanik özellikleri.

ACI Std.	Nomial Bileşim %C %Cr %Ni %Si				Çekme Muk.(MPa)		Akma Muk.(MPa)		Sertlik (HB)	
					Döküm	Yaşlandırılmış	Döküm	Yaşlandırılmış	Döküm	Yaşlandırılmış
Fe-Cr Çelikleri										
HA	0,2	8-10	----	1,0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
HC	0,5	26-30	4	2,0	760	790	515	550	223	-----
HD	0,5	26-30	4-7	2,0	585	-----	330	-----	190	-----
Fe-Cr-Ni Çelikleri										
HE	0,2-0,5	26-30	8-11	2,0	620	655	310	380	200	270
HF	0,2-0,4	19-23	9-12	2,0	635	690	310	345	165	190
HH	0,2-0,5	24-28	11-14	2,0	550	635	275	310	180	200
HI	0,2-0,5	26-30	14-18	2,0	550	620	310	450	180	200
HK	0,2-0,5	24-28	18-22	2,0	515	585	345	345	170	190
HL	0,2-0,6	28-32	18-22	2,0	565	-----	360	-----	192	-----
Fe-Ni-Cr Çelikleri										
HN	0,2-0,6	19-23	23-27	2,0	470	-----	260	-----	160	-----
HP	0,3-0,7	24-28	33-37	2,0	490	-----	275	-----	170	-----
HT	0,3-0,7	13-17	33-37	2,5	485	515	275	310	180	200
HU	0,3-0,7	17-21	37-41	2,5	485	-----	275	-----	170	-----
HW	0,3-0,7	10-14	58-62	2,5	470	-----	245	-----	185	-----
HX	0,3-0,7	15-19	64-68	2,5	505	-----	245	-----	176	-----

2.2.1. Demir-Krom Alaşımları

Bu grubu oluşturan alaşımlarda, Cr elementi alaşımı oluşturan Fe dışındaki diğer elementlere oranla daha fazladır. Demir-krom alaşımları %8-30 arası Cr içerirler ve bileşimlerinde %7'den az Ni vardır veya hiç yoktur. Bu alaşımlar, ferritik yapıya sahiptirler. Fakat HD alaşımlarında ise matris ferrit ve östenit olmak üzere iki fazdan

oluşabilir. Bu alaşımlar nispeten düşük sıcaklıklarda daha fazla dayanım göstermektedir. Fe-Cr alaşımlarının bazı grupları aşağıda tanıtılmıştır.

HA Alaşımları (9Cr): Cr-Mo-Fe alaşımıdır. Bileşiminde bulunan Cr, 650°C'de iyi oksidasyon direnci sağlar. Bileşimde bulunan Mo ise alaşımın mukavemetini artırır. Cr içeriği artırıldığında (%12-14 Cr) bu alaşım cam endüstrisinde de kullanılabilir. HA alaşımları, karbürlerin de yer aldığı ferritik matrisli mikroyapıya sahiptir. Bu alaşımların sertleşmesi 815°C'den havada soğutma ile gerçekleşebilir. HA alaşımlarının genel uygulama alanları; pervane kanatları, fırın merdanesi, petrol rafineri endüstrisinde rafineri teçhizatları ve silindir yatağı şeklinde sıralanabilir.

HC Alaşımları (28Cr-4Ni max.): Bu alaşımın kullanıldığı mühendislik uygulamalarında mukavemet çok önemli değildir. Sünekliği ve tokluk oda sıcaklığında düşüktür. Bileşimindeki Ni miktarının düşük olması nedeniyle yüksek sıcaklıklardaki sürünme mukavemeti de çok düşüktür. %2 den fazla Ni içeren HC alaşımlarında süneklik, darbe ve sürünme direnci daha yüksektir. HC alaşımlarının uygulama alanları; tuğla fırın parçaları, boru birleştirme halkaları, fırın ızgara çubukları, gaz çıkış taşıyıcıları, karıştırıcı bıçaklar ve tuz potaları şeklinde sıralanabilir [19].

HD Alaşımları (28Cr-6Ni): Genel özellikler bakımından HC alaşımlarına çok benzerdir. Ancak bileşiminde Ni'in bulunması nedeniyle yüksek sıcaklıklarda daha yüksek mukavemete sahiptir. Bu alaşımlar ısıtma işlemleriyle sertleştirilemez. Ancak 700-900°C sıcaklıklarda uzun süre tutulursa sigma fazının oluşumundan dolayı oda sıcaklığında yüksek sertlik gösterebilirler. HD alaşımlarının uygulama alanları; pirinç kaplama fırın parçaları, kırma ekipmanları, fırın üfleyicileri, gaz brülör parçaları, pota tutucular, döküm ağızları şeklinde sıralanabilir.

2.2.2. Demir-Krom-Nikel Alaşımları

Bu alaşımlar bileşimlerinde %8-22 arası Ni ve %18-32 arası Cr içerirler. Yüksek sıcaklık dayanıklılıkları iyidir. Genellikle östenitik matrise sahip olan bu alaşımlar, ferritik matrise sahip Fe-Cr alaşımlarına benzer şekilde oksitleyici ve redükleyici

ortamlarda kullanılabilirler. Bu alaşımlar yüksek kükürt içeriğine sahip oksitleyici ve redükleyici gazların bulunduğu ortamlarda da kullanılır. Fe-Cr-Ni alaşımlarının bazı grupları aşağıda tanıtılmıştır.

HE Alaşımları (28Cr-9Ni): Bu alaşımlar yüksek Cr içeriğinden dolayı yüksek sıcaklıklarda çok iyi korozyon direncine sahiptir. Bu alaşımlar, HF alaşımlarına göre daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirler ve 1100°C sıcaklıkta kullanım için uygundur. Fe-Cr alaşımlarına göre oda sıcaklığında daha yüksek mukavemet ve süneklige sahiptir. HE alaşımlarının mikroyapısı “östenit+ferritik”tir. Bunun yanı sıra mikroyapıda karbürler de bulunur. Bu alaşımlar ısıtılma ile sertleştirilemezler. Ancak yüksek sıcaklıkta uzun süre bekletilirse sigma fazının oluşmasından dolayı sertlik ve gevreklikte artış olabilir. HE alaşımlarının uygulama alanları; fırın kapı iskeletleri, fırın jeneratör parçaları, tüp destekleyiciler, tavlama tepsileri, karıştırıcı kol ve bıçakları, fırın ağızları şeklinde sıralanabilir [19].

HF Alaşımları (19Cr-9Ni): 18-8 paslanmaz çeliğın döküm versiyonu olup, korozyon direncinin önemli olduğu uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. HF alaşımları 870°C'nin üzerindeki sıcaklıklar için uygundur. Bu alaşım yüksek sıcaklıkta oksidasyon direncinin gerekli olduğu koşullarda kullanıldığında, C içeriği çok önemli değildir. HF bileşimine ilave edilen Mo, W, Nb ve Ti gibi elementler yüksek sıcaklık mukavemetini artırır. Döküm halindeki HF alaşımı, ötektik karbür ve kısmen lamelli karbür veya karbonitrür içeren östenitik matrise sahiptir. HF alaşımları; 650-870°C arasında yüksek mukavemet ve korozyon direnci gerektiren koşullar için uygundur. Petrol rafinerileri ve ısıtılma fırınlarında yaygın bir kullanımı vardır. Ayrıca; ark ocağı elektrot kolları, tavlama kutuları ve tablaları, taşıyıcı bant ve zincirleri, fırın rayları, aşınma plakaları ve ısıtılma kutuları diğer uygulama alanlarıdır.

HH Alaşımları (25Cr-12Ni): HH alaşımları, yüksek sıcaklık dirençli demir esaslı döküm alaşımlarının toplam üretiminin üçte birini kapsamaktadır. Bu alaşımlar, 1100°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda iyi oksidasyon direnci ve nispeten yüksek mukavemet kombinasyonu sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. HH alaşımları için bileşim çok önemlidir. HH alaşımlarının Ni ve Cr içeriği, 900°C deki Fe-Cr-Ni

üçlü faz diyagramının “ferrit + östenit”, “östenit” ve “östenit + sigma” faz bölgelerini içine alan kısımları belirlemektedir. HH alaşımlarının kullanım alanları olarak; tavlama tepsileri, brulör nozülleri, karbürizasyon kutuları, gaz yoğunlaştırıcı tüp destekleyiciler, tamponlar, egzoz boruları, baca gazı boruları, uçak motorları, askeri ekipmanlar, normalleştirme diskleri, ocak karıştırma kolları ve bıçakları, ışın yayan tüpler ve destekleyicileri, refrakter destekleyiciler, merdane ocakları, tüp çengelleri v.b. gibi uygulamalar gösterilebilir.

HI Alaşımları (28Cr-15Ni): Yüksek sıcaklık mukavemeti ve korozyon direnci bu alaşımlara 1175°C sıcaklıklarda yaygın bir kullanım alanı sağlamaktadır. HI alaşımları özellikle karbür içeren östenitik matrise sahiptirler. Mikroyapıda bir miktar ferritin bulunması önemli ölçüde bileşime bağlıdır. Cr içeriğinin fazla olması HH alaşımına göre daha yüksek oksidasyon direnci sağlarken Ni içeriği, yüksek sıcaklıkta iyi mukavemet kazandırmaktadır. HI alaşımının 1177°C’deki sıcaklıklarda iç vakumlu damıtma işlemlerinde geniş bir kullanım alanı vardır. Ayrıca, taşıyıcı bantlar, fırın rayları, fırın saçları, tüp çengelleri ve kurşun potalar diğer kullanım alanlarıdır.

HK Alaşımları (26Cr-20Ni): HK alaşımları genel özellikler bakımından tümüyle östenitik matrise sahip HH alaşımlarına benzerdir. Oksitleyici ortamlara direnci HC, HE ve HI alaşımlarına göre daha düşüktür. HK alaşımlarının, daha yüksek Cr içeriği nedeniyle sıcak gazların sebep olduğu korozyon direnci yüksektir. Bu alaşımların yüksek Ni içeriği, 1040°C’nin üzerindeki sıcaklıklara dayanımını sağlar. Bu nedenle HK döküm alaşımları yüksek sıcaklıklarda mukavemet gerektiren parçalarda kullanılabilir. Bu alaşımların genel uygulama alanları; taşıyıcı silindirler, fırın kapı kemerleri, ısıl işlem tepsileri, baca taşıyıcıları şeklinde sıralanabilir.

HL Alaşımları (30Cr-20Ni): Bu alaşımlar özellikler bakımından HK alaşımlarına benzer olup, yüksek Cr içeriğinden dolayı önemli miktarda S içeren sıcak gazların sebep olduğu korozyon direnci yüksektir. Bu alaşımların mikroyapısı HK alaşımları ile benzerdir ve aynı yerlerde kullanılabilir.

2.2.3. Demir-Nikel-Krom Alaşımları

Bu alaşımlar, %25-70 arası Ni ve %10-26 arası Cr içerirler. Tamamıyla östenit yapıya sahiptir. Kaynaklanabilirlik özellikleri, termal yorulma ve sıcaklık dayanımları iyidir. Belirli sınırlar içinde S içeren oksitleyici atmosferlerde kullanılabilirler.

HN Alaşımları (25Ni-20Cr): Yüksek sıcaklıklarda istenen düzeyde korozyon direnci sağlayacak seviyede Cr içeriğine sahiptir. Bu alaşımların mekanik özellikleri HT alaşımlarına benzer. Ancak HT alaşımlarına göre daha yüksek süneklığe sahiptir. Bu alaşımlar 950-1100°C sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilirler. HN alaşımlarının genel kullanım alanları; fırın parçaları, zincirler, ışık yayan tüpler ve tüp destekleyiciler, alev makinesi ağız ve tablalar şeklinde sıralanabilir.

HP Alaşımları (35Ni-26Cr): HP alaşımları HN ve HT alaşımlarına benzer fakat onlardan daha fazla alaşım elementi içerir. Bu alaşımların Cr ve Ni içeriğinin yüksek olması yüksek sıcaklıkta oksitleyici ve karbürleyici atmosferlere olan direncini arttırmıştır. HP alaşımları tüm sıcaklıklarda östenitik matrise sahiptir ve sigma fazının oluşumuna duyarlı değildir. Östenitik matriste, iri birincil karbürlerin yanı sıra yüksek sıcaklıklarda uzun süre tutulursa ince ikincil karbürlerde oluşabilir. Genel kullanım alanlar; ısıl işlem fırınlarında ışın yayan tüpler ve rafineri tüpleri şeklinde sıralanabilir.

HT Alaşımları (35Ni-17Cr): HT alaşımları yüksek Ni içeriği nedeniyle hızlı soğutma ve ısıtmada meydana gelen termal şoklara karşı dayanıklıdır. Ayrıca yüksek sıcaklıkta oksidasyon ve karbürizasyona karşı yüksek direnç gösterir. Bunlara ilave olarak yüksek sıcaklıkta iyi mukavemete sahiptir. Bu nedenle ısı dirençli uygulamalarda geniş bir kullanım alanı vardır. HT alaşımları iri karbürler içeren östenitik matrise sahiptir. Bileşimde C miktarının artması alaşımın yüksek sıcaklık süneklliğini azaltır. Si içeriği %1.6'nın üzerine çıktığında karbürleşmeye karşı direnci artarken, yüksek sıcaklık mukavemeti azalır. Bu alaşım, dendrit sınırlarında oluşan ötektik karbürlerin bulunduğu östenitik matrise sahiptir. HT alaşımlarının genel kullanım alanları; hava kanalları, tavlama tepsileri, siyanür kapları, pervane kanatları,

yakıt üfleme ağızları, tuz kapları ve tüm yüksek sıcaklık uygulamaları şeklinde sıralanabilir.

HU Alaşimleri (39Ni-18Cr): HU alaşimleri 1100°C'ye kadar son derece yüksek sürünme mukavemetine sahiptir. Yüksek sıcaklık dayanımının istendiği yerlerde kullanılırlar. Bu alaşimler yüksek gerilim ve hızlı termal döngü içeren ağır hizmet koşulları için uygundur. Belirli sınırlar içinde S içeren sıcak gazların bulunduğu oksitleyici atmosferlerde kullanılırlar. Genel kullanım alanları; tuz kapları, tavlama tepleri, gaz ayrıştırma ekipmanları ve tüm yüksek sıcaklık uygulamaları şeklinde sıralanabilir.

HW Alaşimleri (60Ni-12Cr): Bu alaşimler 1120°C'ye kadar güçlü oksitleyici dayanım gösterirler. Yüksek sıcaklık mukavemeti, termal şok dayanımı ve karbürizasyon direncine sahiptirler. Bu alaşimlerin genel uygulama alanları; elektrik rezistansları, siyanür potaları ve sementasyon işlemleri şeklinde sıralanabilir.

HX Alaşimleri (66Ni-17Cr): HW alaşimleri içeren sıcak gazların bulunduğu oksitleyici atmosferlerde yüksek korozyon direncine sahiptirler. 1140°C'ye kadar korozyon dayanımları iyidir. Bu alaşimlerin genel uygulama alanları; siyanür ve sementasyon ekipmanları, ısıl işlem kutularında kazanlar ve brülör parçaları şeklinde sıralanabilir.

BÖLÜM 3

BORLAMA İŞLEMİ VE PROSESLERİ

Endüstriyel uygulamaların yanında akademik çalışmalarda da yüzey işlemleri konusunda çok büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Çelik malzemelerin yüzeylerine uygulanabilen kaplama yöntemleri arasında; PVD, CVD, termokimyasal uygulamalar, plazma sprey, iyon implantasyon yer alır. Bu proseslerin yanında borlama termokimyasal prosesi; geniş yelpazede endüstriyel uygulama alanı bulması ve teknik olarak gelişmiş bir proses olması sebebiyle en önemli yüzey sertleştirme uygulamalarından biridir.

Bor, ilk defa 1808 yılında Gay-Lussc ve Jacques Thenard ile Sir. Humphry Davy tarafından bor oksitin potasyum ile ısıtılmasıyla elde edilmiştir. Periyodik çizelgede B simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 gram, ergime noktası 2076-2300°C, buharlaşma sıcaklığı 2550°C, sertliği 49000 HV, yoğunluğu 2,3 gr/cm³ (amorf) ve 2,31 gr/cm³ (tetragonal), 2,35 gr/cm³ (a-rombohedral), 2,46 gr/cm³ (a-rombohedral), 2,99 gr/cm³ (sıvı fazda), 2,13 gr/cm³ (katı fazda), elektron yapısı ise 1s²s²p¹ olup, bir geçiş elementidir. Kimyasal olarak ametal bir element olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava ve hidroklorik/hidroflorik asitler ile soy davranış göstermekte olup, sadece yüksek konsantrasyonlu nitrik asit ile sıcak ortamda Borik Asit'e dönüşebilmektedir. Öte yandan yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile reaksiyona girerek Bor Oksit (B₂O₃), aynı koşullarda nitrojen ile Bor Nitrit (BN) oluştururlar. Bor elementi tabiatta serbest halde bulunmaz. Doğada yaklaşık 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir. Çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği farklı özellikler, endüstride birçok bor bileşiğinin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bor, bileşiklerin elektrik iletkenliği azdır, ancak, farklı olarak saf bor, karbon iletkenidir. Kristalize bor görünüm ve optik özellikleri açısından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir [27,28].

Bor amorf ve kristal olmak üzere iki şekilde bulunmaktadır; kristal bor ortorombik (FeB) ve hacim merkezli tetragonal (Fe₂B) sistemlerde kristalleşir [6].

3.1. BORLAMA İŞLEMİ

Borlama, Alman Endüstri Standardı DIN 17014'e göre "termokimyasal işlem yoluyla iş parçasının yüzeyinin bor atomlarıyla zenginleştirilmesi" olarak tarif edilen termodifüzyonel yüzey işlemidir. Yani borlama, termal enerji yoluyla bor atomlarının iş parçasının yüzeyindeki metal latisin içerisine yayılması ve orada ana malzemenin atomları ile borürlerin oluşturulmasıdır [6,29].

Borlama işlemi, genellikle 700-1050°C sıcaklık aralığında 1-12 saat sürelerde çeşitli borlama ortamlarında gerçekleştirilmektedir. Bor ortamı katı, sıvı veya gaz olup bor kaynağı (B₄C, NA₂B₄O₇, H₂B₆), aktivatör (KBF₄), dolgu malzemesi ve deoksidanlardan meydana gelmektedir [6,30].

Borlama işlemiyle, metal ve alaşımların yüzeylerinde sertlik, aşınma direnci ve korozyon direncini arttırırken, aynı zamanda bu özellikleri yüksek sıcaklıklarda korumak ve erozyon direncini de arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Borlama işlemi, endüstriyel olarak daha çok demir esaslı alaşımlara uygulanmaktadır [6,28,31].

3.1.2. Borlama İşleminin Avantajları

Borlama işleminin en önemli özelliği, elde edilen borür tabakasının çok yüksek sertlik (1450-5000 HV) ve yüksek ergime sıcaklık değerlerine sahip olmasıdır. Sade karbonlu çelikler üzerinde oluşturulan borür tabakalarının sertliği, diğer geleneksel sertleştirme yöntemleri olan sementasyon ve nitrürasyonla elde edilen sertlik değerlerine göre çok daha yüksektir.

- a) Borür tabakalarının yüksek yüzey sertliğine ve düşük sürtünme katsayısına sahip olmaları; adhesiv, kimyasal tribo-oksidasyon, yüzey yorulması ve abrasiv aşınma gibi temel aşınma mekanizmalarının oluşumunu önlemede çok önemli

yararlar sağlar. Bu sayede kalıp üreticilerinin, pahalı ve zor işlenebilen takım çelikleri yerine, üstelik orijinal malzemeninkinden daha üstün özelliklere ve aşınma direncine sahip olan kolay işlenebilen çelikleri kullanabilmeleri mümkün olmuştur. Bu da takım ve kalıp ömrünü artırdığı gibi yağlayıcı kullanımını da azaltır.

- b) Borür tabakası, yüksek sıcaklıklarda bile sertliğini korumaktadır.
- c) Katı ortam borlamasında yüzey oldukça temiz çıkmakta, ayrıca temizleme işlemine gerek kalmamaktadır.
- d) Kutu borlamasının kolay uygulanması, toz bileşiminin değiştirilebilmesi, çok az ilk yatırım maliyetinin olması nedenleriyle oldukça ekonomiktir.
- e) Isıl işlem uygulanabilen malzemeler, performanslarının geliştirilmesi amacı ile borlama sonrası tamamen sertleştirilebilirler.
- f) Borlama; bir iş parçasının sertleştirilmesi istenen seçilmiş bölgelerin ve düzensiz karmaşık şekilli parçalara düzgün ve dengeli olacak şekilde uygulanabilir.
- g) Soğuk yapışma kaynağına olan eğilim azalır.
- h) Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksitleyici olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon direncini arttırdığından; bu özellikleri nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Borlama işlemiyle, düşük alaşımlı çeliklerin H_2SO_4 , H_3PO_4 ve HCl gibi etkili asitlere karşı direncini artırmak mümkündür.
- i) Borlanmış yüzeyler, $850^{\circ}C$ dolaylarındaki yüksek sayılabilecek sıcaklıklarda orta seviyede oksidasyon direncine ve oldukça yüksek sayılabilecek düzeyde ergimiş metal korozyon direncine sahiptir.
- j) Borlama, oksitleyici ve korozif ortamlarda parçanın yorulma ömrünü artırır.
- k) Borlama yüzeyini çok hassas bir şekilde parlatmak mümkündür [32-36].

3.1.3. Borlama İşleminin Dezavantajları

Borlama işlemi, birçok avantajının yanında bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Bunlar sıralanacak olursa;

- a) Borlama tekniği, esnek değildir ve gaz ortamında sementasyon ve plazma nitrasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine göre maliyeti yüksektir. Gaz karbürizasyonu ve plazma nitrasyonu daha esnek tekniklerdir. Bu teknikler, daha az işçilik ve daha düşük maliyet gerektirir. Ayrıca, bu işlemlerin kısa sürede ve daha kolay gerçekleşmesi borlamaya göre avantajlar sağlamaktadır. Bu sebeple, yüksek sertlik, dış ortamlara karşı yüksek aşınmadirenci ve yüksek direncinin arzu edildiği durumlarda borlama işlemini tercih edilmektedir [6,30].
- b) Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5-20'si oranında boyutsal olarak artış gözlenmektedir. Örneğin, 25µm'lik bir tabaka kalınlığı, 1,25-6,25µm'lik bir büyümeye neden olmaktadır [6,29,37]. Bu kalınlık artışı borlanan malzemenin cinsine ve borlama şartlarına bağlıdır.
- c) Çok hassas toleranslarla çalışmak gerektiği zaman, elmas takımlarla kaplama işlenmesi mümkündür, fakat yüzeyin geleneksel tekniklerle işlenmesi kaplama tabakasında kırılmalara neden olmaktadır. Bu da kaplama kalitesinde bozulmalara ve çatlamalara yol açmaktadır.
- d) Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde (2000N) sementasyon ve nitrasyonla kıyaslandığı zaman çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur [6,29].
- e) Takımlar borlandıktan sonra çoğu zaman bir sertleştirmeye ve temperlemeye tabi tutulmaktadır. Bu işlemlerde, bor tabakasının özelliklerinin korunması için inertatmosfer veya vakum gerekmektedir.

3.2. BORLAMA YÖNTEMLERİ

3.2.1. Katı Ortamda Borlama

Yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içinde genellikle 850-1000°C sıcaklıklarda 2-10 saat bekletilmesi ile yapılan işlemdir. Kutu sementasyona benzeyen bu yöntem soygaz atmosferinde yapılabildiği gibi sıkı kapatılmış kutularda olmak şartı ile normal, atmosferde de yapılabilir. Sistem ucuzdur. Özel teçhizat ve

teknik gerektirmez [38]. Ticari alanda katı ortam borlama maddeleri kullanım alanlarına göre sınıflandırılarak satılmaktadır [39].

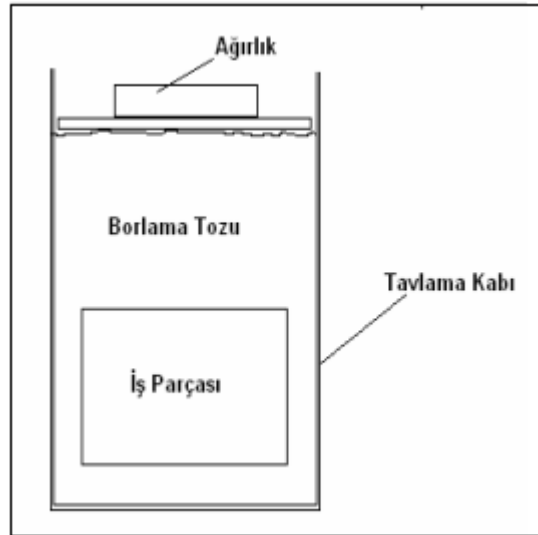
Ekabor 1: Tozdur. Optimum tabaka kalınlığının elde edilmesinde kullanılır. Yüzey pürüzlülüğü açısından yüksek kaliteye erişilir ve genel maksatlı demir ve çelik malzemelerde kullanılır.

Ekabor 2: Granüllüdür. Yüzey pürüzlülüğü açısından çok yüksek kaliteye sahiptir. Düşük alaşımlı çelikler için kullanılır.

Ekabor 3: Granüllüdür. Ekabor 2'den daha iri taneli olup yüzey kalitesi daha iyidir. Yüksek alaşımlı çelikler için kullanılır.

Ekabor HM: Sert metallerin borlanması için özel olarak üretilmiştir.

Ekabor Pasta: Macun şeklinde olup metalik malzemelerin borlanması istenen bölgelerine sürülerek uygulanır. Katı borlama şematik resmi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Katı borlama şematik resmi.

3.2.1.1. Toz Ortamda 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 ortamında yapılacaksa kapak sıkıca kapatılır. Bu yöntem koruyucu gaz atmosferi içinde de yapılabilir. Yöntem ucuzdur ve özel bir teknik gerektirmez [40].

Borlama ortamının ana bileşeni borkarbür, ferrobor ve amorf bordur. Borkarbür diğerlerine göre ucuzdur. Amorf borun saf halinin çok pahalı oluşu ve saf ferroborun eldesinin endüstriyel olarak çok zor olması bu metotların bırakılmasına neden olmuştur. Diğer bor verici toz ortam bor karbür ise amorf bor ve ferrobordan 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. Ferrobor ortamında yapılan borlama sonucu elde edilen tabaka teknik açıdan kullanılamaz. Aktivatör dolgu maddeleri ile kullanılabilir [41].

Katı ortam borlamasında kullanılan bazı borlama bileşiklerine ait örnekler % ağırlık olarak aşağıda verilmiştir [42].

- 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
- j) %98 [%75 Al₂O₃ + %25 (%30 Al + %70 B₂O₃)] + %2 NaF
- k) %100 B₄C
- l) %48 Amorf bor + %4 Cr + %1 NH₄.HF + %47 Al₂O₃

3.2.1.2. Macun 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°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 [40].

Bu yöntemle borlama mutlaka koruyucu gaz ortamında yapılması gerekir. Aksi takdirde kötü bir borür tabakası oluşur. Bu yöntemle kısmi borlama yapılabilir. Bor korbür (B₄C), kriyolit (Na₃AlF₆) ve bağlayıcı olarak da hidrolize edilmiş etilsilikat karışımından macun yaparak borlama yapılmıştır. Bu yöntemde kullanılan koruyucu gazlar; Argon, Formier Gazı, NH₃ ve saf azottur. Bu yöntemde kullanılan koruyucu gazlar ise Çizelge 3.1'de verilmiştir [43].

Çizelge 3.1.Koruyucu gaz atmosferinin özellikleri [43].

Koruyucu Gaz Adı	% Bileşimi
Argon	99.996 Ar
Kalıp gazı (Fonnier Gazı)	5 - 30 H ₂ , geri kalanı N ₂
NH ₃ - Spalt gazı (Amonyak)	75 H ₂ , 25 N ₂
Saf Azot	99 N ₂ , 1 H ₂

3.2.2. 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) veverişik çözeltide olmak üzere yapılabilir [44].

3.2.2.1. 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) denibarettir. 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 saat arasında değişmektedir.

3.2.2.2. 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 [44].

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 tesisi 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 [44].

3.2.2.3. Derişik Çözeltide Borlama

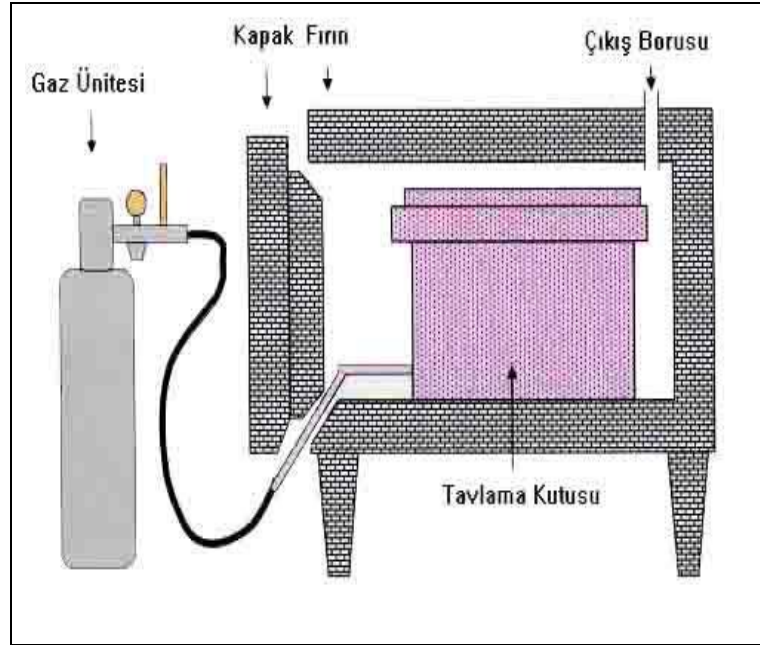
Boraks ve borasitli anhidriti içeren derişik ortamlarda yüksek frekanslı ısıtma ile deneyler yapılmıştır. Belli bir bor difüzyonu sağlandığı halde birleşik tabakalar elde edilememiştir. Boraks ve borasidi anhidriti içeren değişik miktarlı çözeltilerde yapılan deneyler kapalı borür tabakası vermemiş ve 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 [44].

3.2.3. Gaz borlama

BCl₃, H₂ ve N₂ gaz karışımı atmosferinde yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen borlama prosesidir. Borür tabakasının morfolojisi demir esaslı malzemeler için;

- a) Dış tabakalarda ortorombik FeB fazı
- b) İç tabakalarda hacim merkezli tetragonal Fe₂B fazı teşekkül eder.

Alaşımli çeliklerde alaşım elementleri borür oluşumunu inhibe eder ve alaşım miktarıyla birlikte oluşan FeB oranı artar. Paslanmaz çelik malzemeler borlama işlemleri için nispeten daha az elverişlidir [45,46].



Şekil 3.2. Gaz ortamda borlama tertibatının şematik gösterimi [47].

3.2.4. Plazma Borlama

$B_2H_6-H_2$ ve BCl_3-H_2Ar 'un karışımları plazma borlama işleminde başarılı bir şekilde kullanılır. Bahsedilen $B_2H_6-H_2$ gaz karışımı bir paket veya sıvı ortam borlama prosesi ile mümkün olmayan $600^\circ C$ gibi düşük sıcaklıklarda çeşitli çelikler üzerinde borlu tabaka üretmek için kullanılmaktadır [48].

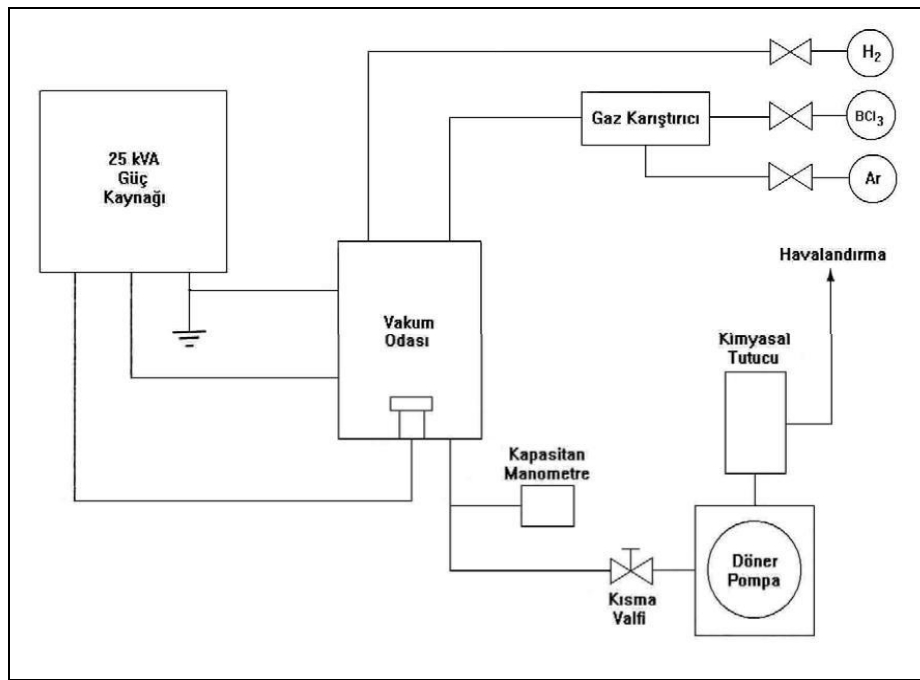
BCl_3-H_2Ar gazlarının karışımı içinde plazma borlamanın BCl_3 konsantrasyonunun daha iyi kontrol edilmesi, kalıntı gerilmenin azalması ve borlu film tabakalarının daha yüksek mikro sertliği gibi olumlu özellikler gösterdiği iddia edilmektedir. Şekil 2.3'te bir plazma borlama imalathanesinin şematik bir planı gösterilmektedir [48].

Plazma borlamanın avantajları şunlardır [48].

- Borlanan tabakanın bileşim ve derinlik kontrolü yapılabilmektedir.

- b) Klasik paket borlamaya kıyasla daha yüksek bir bor potansiyeli vardır.
- c) Daha ince borlu tabakalar elde edilebilmektedir.
- d) İşlemden kullanılan sıcaklık ve uygulanan işlem süresinde azalma vardır.
- e) Yüksek sıcaklık fırınlarına ve gerekli aksesuarlara ihtiyaç yoktur.
- f) Enerji ve gaz sarfiyatında tasarruf sağlanmaktadır.

Plazma borlama işleminin en önemli dezavantajı, kullanılan atmosferin aşırı zehirli olmasıdır. Sonuçta bu işlem ticari yönüyle kabul görmemiştir [48].



Şekil 3.3. Plazma borlama tesisat şeması [48].

3.3. BORÜRLERİN ÖZELLİKLERİ

Bor, periyodik tabloda birçok elementle bileşik oluşturmaktadır. Borür bileşiklerinin çoğu kuvvetli kovalent bağ yapısına sahip olduklarından ergime sıcaklık dereceleri, elastisite modülleri ve sertlikleri oldukça yüksektir. Borürlerin oluşumu büyük ölçüde bileşik yaptığı atomla arasındaki atomik boyut faktörüne ve elektrokimyasal etkiye bağlıdır. Diğer seramik bileşiklere göre borürlerin termal genişleme katsayıları orta seviyede, ısı iletkenlik katsayıları ve termal şok dirençleri ise oldukça yüksek seviyelerdedir. Borürlerin çoğunun elektriksel dirençleri, diğer seramik bileşiklere

göre daha iyi elektriksel iletkenliğe sahiptir. Kristal yapıları ve latis parametreleri benzer olan borürler katı eriyik oluşturabilmektedir. Çizelge 3.2’de bazı metal borürlerin özellikleri verilmektedir [49].

Çizelge 3.2. Çeşitli metal borürlerin bazı özellikleri [30,37].

Borür	Kristal Yapı	Ergime Sıcaklığı (°C)	Termal Genleme	Termal İletkenlik	Sertlik(GPa)	Elastisite Modülü
Cr ₂ B	Ortog.	1870	14,2 (27-1027 ⁰ C)	10,9 (20 ⁰ C)	13,2	....
CrB	Tetra.	....	12,3 (27-1027 ⁰ C)	20,1 (20 ⁰ C)	11,8	....
Fe ₂ B	Tetra.	1410	....	17,4	13,1-17,7	284
FeB	Ortor.	1650	12 (400-1000 ⁰ C)	12 (20 ⁰ C)	16,2-18,6	343
Mn ₂ B	Tetra.	1580	....	6,6	17,7	....
MnB	Ortog.	1890	....	7,7	20,1	....
Mo ₂ B	Tetra.	2280	5 (25-500 ⁰ C)	....	24,5	....
MoB ₂	Hegza.	2375	7,7 (300-900 ⁰ C)	....	11,8	....
Mo ₂ B ₅	Ortog.	2140	8,6 (20-1027 ⁰ C)	50 (20 ⁰ C)	23	672
NiB	Ortog.	1590	....	21,9	15,2	....
Ni ₂ B	Tetra.	1225	....	54,8	14	....
TiB	Ortog.	2190	....	....	22,7	....
TiB ₂	Hegza.	3225	....	64,4 (27 ⁰ C)	33-25,5	551

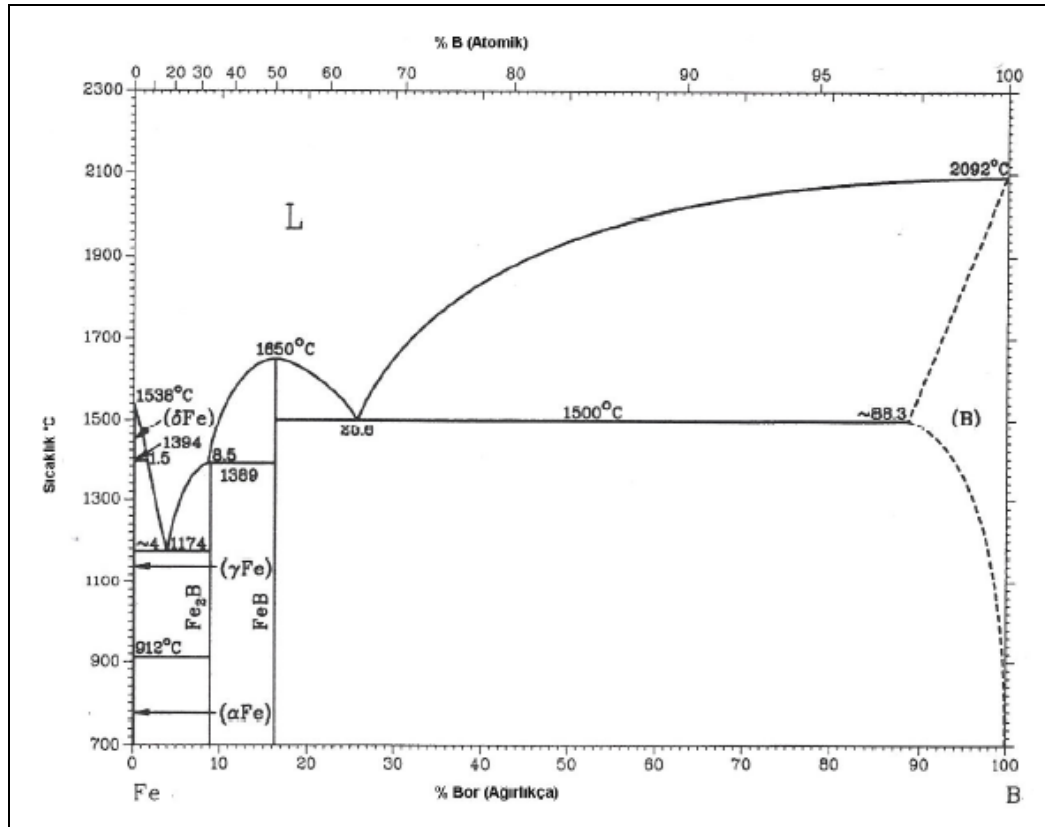
Alternatif olarak borürler, kristalo-kimyasal olarak iki grupta sınıflandırılmaktadır; (1) düşük bor konstrasyonuna sahip borürler (M₄B, M₃B, M₂B, M₃B₂, MB ve M₃B₄ gibi. M= metal), (2) yüksek bor konstrasyonuna sahip borürler (MB₂, MB₄, MB₆, MB₁₂, MB₄₉, MB₆₀₋₁₀₀ gibi). Düşük bor konstrasyonuna sahip borürlerin yapıları latis parametreleriyle belirlenirken, yüksek bor konstrasyonuna sahip borürlerin yapıları ihtiva ettikleri B-B bağ yapısındaki bor elementine bağlıdır [37].

3.3.1. Demir-Bor Denge Diyagramı

Fe-B ikili denge diyagramına göre Fe-B ikili sisteminde ağırlık olarak;

%8.83 bor oranında Fe_2B ve %16.23 bor oranında FeB , olmak üzere iki tür borür ve ergime noktası $1174^{\circ}C$ olan %3.8 bor oranında bir ötektik oluşmaktadır [29]. Massalski, 1986 yılında demir-bor denge diyagramını Şekil 2.4'te görüldüğü gibi yeniden düzenlemiştir [50]. Hallemans ve diğerleri, deneysel termodinamik ve faz diyagramı datalarını esas alıp, en küçük kareler metodunu uygulayarak, Fe-B faz diyagramını optimize etmek için termodinamik bir model kurmuşlardır. Yapılan model sonucunda hesaplanan faz diyagramı ve termodinamik özelliklerin, deneysel sonuçlarla oldukça iyi bir uyum gösterdiği belirtilmektedir [51].

Ayrıca, diyagramda (Şekil 3.4) görülmeyen dengesiz Fe_3B ve FeB_2 gibi intermetalik bileşiklerin de oluşabildiğine bir çok makalede rastlanmaktadır. İncelenen birçok makalede, Fe_2B fazının ergime sıcaklığının $1389-1410^{\circ}C$ arasında ve FeB fazının ergime sıcaklığının ise $1540-1657^{\circ}C$ arasında yer aldığı görülmektedir [37].



Şekil 3.4. Fe-B denge diyagramı Massalski [50].

3.3.2. Fe₂B ve FeB fazlarının özellikleri

Difüzyon yönüne bağlı olarak, kolonsal yapı sergileyen tek fazlı Fe₂B fazı, çift fazlı Fe₂B+FeB fazlarına göre daha çok tercih edilmektedir. Gerçekte FeB ve Fe₂B fazları birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler sebebiyle, iki faz arasında çatlaklar oluşabilmektedir [6]. Bu etki mekanik zorlamalar altında borür tabakasının tabakaların kalkmasına neden olmaktadır. Ayrıca termal şok veya mekanik etkiler altında da ayrılmalar ve tabaka halinde kalkmalar meydana gelmektedir. Bu sebeple, minimum FeB içeriğine sahip kaplama tabakaları elde edilmeye çalışılmaktadır [6]. Genellikle, borür tabakalarının tribolojik özelliklerinin belirlenmesinde mikroyapıya bağlı olarak açıklamalar yapılmaktadır. Çift fazlı FeB+Fe₂B tabakası, tek fazlı Fe₂B tabakasına göre iyi özelliklere sahip değildir. Çift fazlı tabakalarda yüzeyin hemen altında porozite oluşumu mümkün olmaktadır. Bor kaplamalarda, borür tabakasının ince olması durumunda, porozite oluşumu ve tabakanın kalkma riskinin az olduğu düşünülmektedir [6]. Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucunda, Fe₂B fazının hakim olduğu dış yapısına benzer kolonsal bir yapının oluşması da tercih edilmektedir. Çift fazlı Fe₂B +FeB tabakası, vakum veya tuz banyosunda 800°C sıcaklık civarında uzun süre ısıl işleme tabi tutulduğu takdirde, tek fazlı Fe₂B fazı elde edilebilmektedir. Fe₂B ve FeB fazlarının tipik özellikleri Çizelge 3.3'te verilmektedir [29,37,38].

Çizelge 3.3. Fe₂B ve FeB fazlarının tipik özellikleri [29,37,38].

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Kristal Yapı	Hacim Merkezli Tetragonal	Ortorombik
Latis Parametresi (Å)	A=5,078, c=4,28	A=4,053, b=5,495, c=2,946
Mikrosertlik	18-20	19-21
Elastisite Modülü (GPa)	280-295	590
Bor İçeriği (% Ağırlıkça)	8,83	16,23
Yoğunluk (g/cm ³)	7,43	6,75
Termal Genleşme Katsayısı (ppm/°C)	7,65 (200-600 °C) 4,25 (100-800 °C)	23 (200-600 °C)
Ergime Sıcaklığı (°C)	1389-1410	1540-1657
Termal İletkenlik (W/m.°K)	30,1 (20 °C)	12,0 (20 °C)

3.4. BORLAMA İŞLEMİNİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMA ALANLARI

Borlanmış malzemeler, göstermiş oldukları üstün özellikler sebebiyle çok geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir [6]. Borlama işlemine tabi tutulmuş çeşitli demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları Çizelge 3.4’te özetlenmektedir.

Çizelge 3.4. Borlama işlemine tabi tutulmuş çeşitli demir esaslı malzemelerin başlıca uygulama alanları [52].

Borlanan Malzeme			Uygulama Alanları
AISI	BSI	EN TS	
--	--	S235	Kovanlar, sürgüler, nozüller, taşıma tüpleri, taban plakaları bıçaklar ve yardımcı elemanlar
1020	--	C15, C15E	Dişli sürücüler, pompa şaftları
1043	--	C45	Pinler, yardımcı kavrayıcılar, aşındırıcı diskler
	--	E295	Döküm akıticılar, nozüller
1138	--	45S20	Şaft koruma parçaları, mandreller
1042	--	C45E	Girdaplı akış elemanları, merdaneler, sürgüler ve kovanlar
--	--	CmW3	Giriş plakaları
W1	--	C60W1	Kavrama aynası, yardımcı baralar
D3	--	X210Cr12	Kovanlar, basma aletleri, plakalar, mandreller, çekiçler, kalıplar
C2	--	115CrV3	Çekme kalıpları, enjektörler, yataklar, giriş pinleri
--	--	40CrMnMo7	Giriş plakaları, bükme kalıpları
H11	BH11	X38CrMoV51	Vanalar, enjeksiyon silindirleri, çıkıcılar
H13	--	X40CrMoV51	Ağızlar, ingot kalıpları, sıcak dövme için alt ve üst kalıplar, matrisler ve diskler
H10	--	X32CrMoV33	Enjeksiyon kalıplama kalıpları, besleyiciler, sıcak şekillendirme için alt ve üst kalıplar
D2	--	X155CrVMo121	Çekme kalıpları, soğuk haddeleme için merdaneler
--	--	105WCr6	Kalibreli merdaneler
D6	--	X219CrW112	Sıkıştırma merdaneleri
S1	-BS1	60WCrV7	Basma ve çekme matrisleri, mandrelleri, doğrultucuları, kalıpları ve kavrama ringleri

Çizelge 3.4. (devam ediyor).

Borlanan Malzeme			Uygulama Alanları
AISI	BSI	EN TS	
D2	--	X165CrVMo121	Çekme kalıpları, soğuk hadde için merdaneler
L6	BS224	56NiCrMo4	Ekstrüzyon kalıpları, kovanları, döküm ileticiler, dövme kalıpları
--	--	X45NiCrMo4	Kalibreli kalıplar, basınç pedleri
O2	-BO2	90MnCrV8	Kalıplar, bükme kalıpları, basınç takımları, kovanlar, çekme kalıpları
E52100	--	100Cr6	Toplar, yardımcı baralar, merdaneler ve yardımcı elemanlar
	--	Ni36	Demir dışı metal döküm parçaları
--	--	X50CrMnNiV229	Magnetize edilmeyen takımların parçaları
4140	708A42 (EN19C)	42CrMo4	Basma takım kalıpları, geri dönüşsüz valfler
4150	708A42 (CDS-15)	50CrMo4	Taban plakalarının nozülleri
4317	--	17CrNiMo4	Konik dişliler, vida ve silindir dişliler
5115	--	16MnCr5	Helisel yatak tekerlekleri, yardımcı baralar
302	302S25 (EN58A)	X12CrNi188	Vida yuvaları ve kovanlar
6152	--	50CrV4	Güvenlik plakaları, valf yayları, yay yuvaları
316	316S16 (EN538)	X5CrNiMo1810	Plastik ve kauçuk endüstrisinde kullanılan delinmiş ve fatura açılmış yuvalar
--	--	G-10CrNiMo188	Valf açıcıları, tekstil ve kimya endüstrisi için parçalar
410	410S21 (EN56A)	X10Cr13	Valf bileşenleri ve besleyiciler
420	420S45 (EN56D)	X40Cr13	Valf besleyicileri, dalıcı rotlar ve besleyiciler
--	--	X35CrMo17	Şaftlar, valfler, ringler
KGDD	--	--	Tekstil makineleri için parçalar, mandreller, kalıplar, kollar

3.5. BORÜR TABAKASI

3.5.1. Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği

Metallere uygulanan yüzey işlemlerinin birçoğu, alaşım elementinin malzemenin yüzeyine yayınma esasına dayanmaktadır. Genel olarak difüzyon işleminin gerçekleşebilmesi için iki temel kavram önem kazanmaktadır. Bunlar; difüzyonlanabilme ve difüzyon için gerekli olan itici güçtür. Borür tabakasında ki bu özellik, sadece ana metalin yapısına bağlı değildir ve aynı zamanda borür tabakasının yapısına da bağlı olmaktadır. Bu temel karakteristikler difüzyonla metal tabaka oluşturma işlemlerinde, kaplama kinetiğinin temelini teşkil etmektedir. Dislokasyonlar, tane sınırları, yüzeyler ve arayüzeyler malzemelerin başlıca yapı hatalarıdır. Potansiyel gradyant ve bu yapı hatalarının kombinasyonları çeşitlilik arzeder ve difüzyon olayını karmaşıklaştırır. Matris malzeme, tane sınırları ve dislokasyonlar boyunca kütle taşınımının hızlı olduğu literatürde geniş bir şekilde yer almaktadır [1,37,53].

Difüzyon yoluyla çeliğin yüzeyine sert tabakanın oluşturulması işleminde, difüzyon hacimsel yayınma ile kontrol edilmektedir. Çeliğin iki klasik yüzey sertleştirme işlemi olan sementasyon ve nitrasyon, matris malzeme içerisinde C ve N'un yayınma esasına dayanmaktadır [29,38].

Benzer şekilde bor difüzyonu da kütleli taşınım gerçekleşmektedir. Bunun yanında matris metalin içerdiği alaşım elementlerinin bordifüzyonuna tek tek ya da birlikte etkileri de mevcuttur. Demir ve demir esaslı malzemeler borlama işlemine tabi tutuldukları zaman, malzeme yüzeyi üzerinde borür fazı başlangıçta çekirdek halinde büyümeye başlar. Borür tabakada, en dış yüzeyde (Fe, M)B ve daha iç kısımda yani matrisin hemen üzerinde (Fe, M)₂B fazlarını içeren iki farklı borür tabakasından meydana gelmektedir. Borür tabakasının büyümesi yüzeydeki hakim fazlar olan Fe₂B ve FeB fazlarının içerisinde difüzyon kontrollü olarak gerçekleşir [54].

Brakman ve arkadaşları, borlama işlemi sırasında bor konsantrasyonlarının yüzey ile arayüzey boyunca değişiklik göstermediklerini kabul ederek aşağıdaki bağıntıları geliştirmişlerdir [54].

$C_0 = 0$ $C_b - C_c = 0$ kabul edilirse

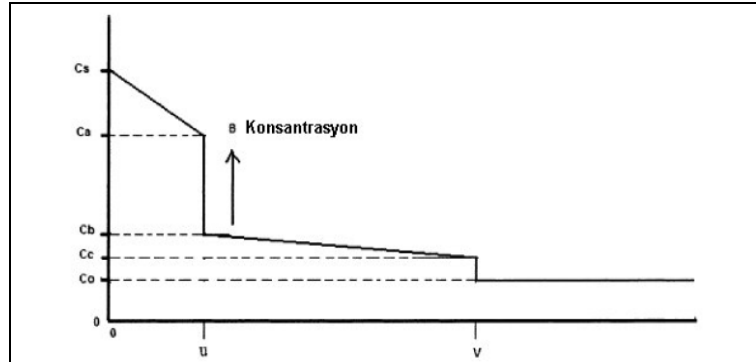
$$C_{FeB} = D_{FeB} (C_s - C_a) \quad (3.1)$$

$$C_{Fe_2B} = D_{Fe_2B} (C_b - C_c) \quad (3.2)$$

Konsantrasyonun yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak değişimi Şekil 3.5'te verilmektedir.

$C_s - C_a$ ve $C_b - C_c$ sıcaklığa önemli ölçüde bağlı değildir. C_{FeB} ve C_{Fe_2B} 'nin sıcaklığa bağımlılığı D_{FeB} ve D_{Fe_2B} difüzyon katsayılarından kaynaklanmaktadır.

Bundan dolayı,



Şekil 3.5. Bor konsantrasyonunun yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak değişimi [55].

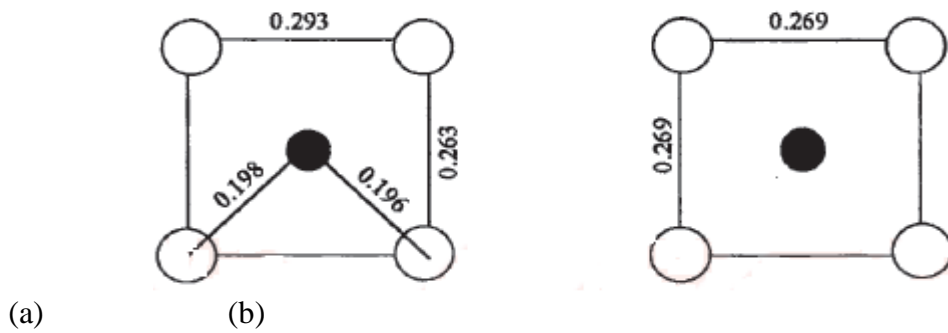
$$C_{FeB} = K_{FeB} \exp(-Q_{FeB}/RT) \quad (3.3)$$

$$C_{Fe_2B} = K_{Fe_2B} \exp(-Q_{Fe_2B}/RT) \quad (3.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, K_{FeB} ve K_{Fe_2B} sabit değerlerdir.

Sonuç olarak, FeB ve Fe₂B fazlarında bor difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi Q ve ön eksponansiyel K faktörü değerleri, sıcaklığın tersi (1/T) ile $\ln C_{FeB}$ ve $\ln C_{Fe_2B}$ ile arasında çizilen eğriler yardımıyla ordinatı kesim noktasından ve eğiminden bulunabilmektedir. Her iki tabaka birbirine bağlı olarak büyümektedir. Bu yüzden, Fe₂B ve FeB fazlarının büyümesi ile ilgili kinetik parametrelerin belirlenmesinde her iki tabaka için verilerin bulunması gerekir. Bu, yukarıda verilen aktivasyon enerjisinin belirlenmesinde kullanılan ifadeler örneklenmiştir [54].

Brakman ve arkadaşları tarafından FeB ve Fe₂B fazı içerisinde bor difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisinin aynı değere sahip olacağı ileri sürülmektedir [54]. FeB ve Fe₂B fazı içerisinde bor difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjileri arasında çok az bir fark vardır (Çizelge 3.5). Bu fark, B ile Fe atomları arasındaki bağlanma farklılığından kaynaklanmaktadır. Fe-B arasındaki en kısa mesafe Fe₂B fazına nazaran FeB fazında daha küçük olduğundan (0,215 nm'ye karşılık 0,218 nm), Fe-B bağının kovalent karakteri ve dolayısıyla mukavemeti FeB fazı için daha büyük olabilir. Ayrıca FeB fazı içerisinde en kısa B-B mesafesi B atomunun kovalent yarıçapının yaklaşık 2 katıdır. Buna karşılık aynı değer Fe₂B fazı içerisinde belirgin olarak daha büyüktür (0,180 nm'ye karşılık 0,212 nm). Ayrıca, bor atomlarının en yakın komşu bor atomları ile arasındaki bağı kırmanın FeB fazı içerisinde Fe₂B fazına nazaran daha zor olduğu söylenmektedir (Şekil 3.6) [54].



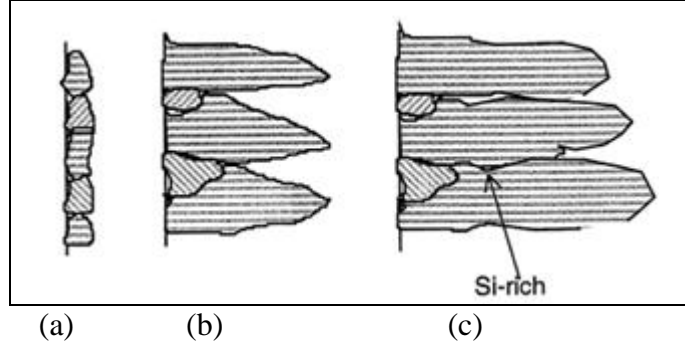
Şekil 3.6. a) FeB ve b) Fe₂B içerisinde bor atomu etrafındaki demir atomu konfigürasyonu (O: Fe atomları, ●: B atomları) [54].

Çizelge 3.5. FeB ve Fe₂B fazları içerisinde borun difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjileri [54].

	QFeB kJ/mol	QFe ₂ B kJ/mol	QFeB/ QFe ₂ B
Fe	175	157	1,11
Fe-0,8 C	176	154	1,14
Fe-0,5 Cr	177	155	1,14
Fe-4 Cr	289	210	1,38
Fe-4 Ni	311	178	1,75
Fe-10 Ni	286	157	1,82

3.5.2. Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması

Demir borürler, seramiklerin yüksek sertlik ve metallerin termal ve elektriksel iletkenlik gibi genel özelliklerini bir arada bulunduran bileşiklerdir [56]. Genellikle sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin termokimyasal yöntemlerle borlanması sırasında oluşan borürlerin, kolonsal kümecikler halinde büyüdüğü görülmektedir. Oluşan borür tabakasında en dış yüzeyde FeB fazı, matrise doğru Fe₂B fazı ve iç kısımda geçiş bölgesi yer almaktadır. FeB fazı ile Fe₂B ve Fe₂B ile matris arayüzeyindeki yapının kolonsal olduğu bilinmektedir. Ancak, yüksek alaşımlı çeliklerde arayüzey yapısının kolonsal yerine düz bir çizgi halinde olduğu belirtilmektedir [57]. Borlama işlemi sonucunda oluşan borür fazları, borlama ortamının aktif borkonsantrasyonuna bağlı olarak, yüzey çizikleri ve pürüzlülükleri gibi makro hataların, tane sınırları ve dislokasyonlar gibi mikro hataların bulunduğu bölgelerde başlamaktadır [57]. Özellikle düşük aktif bor konsantrasyonunun bulunduğu ortamlarda, bu bölgeler borür fazının oluşabildiği yegâne yerlerdir. Şekil 3.7'de konvansiyonel borlama sırasında borür tabakasının oluşum mekanizması verilmiştir.



Şekil 3.7. Konvansiyonel borlama sırasında borür tabakasının a) Oluşum mekanizması, b) Çekirdeklenme ve c) $\langle 001 \rangle$ oryantasyonunda büyüme [58].

Yapılan araştırmalarda ilk oluşan borür fazının Fe_2B olduğu, fakat Mösbauer elektron spektroskopu yapılan ölçümlerde ilk oluşan borür fazının Fe_2B fazı üzerinde FeB fazının bulunduğu ve en dış yüzeyde ise FeB_{1+x} fazının yer aldığı görülmektedir [59].

Yapılan çalışmalarında, en dış yüzeyde bulunan fazın FeB_x olduğu, ancak daha sonra yapılan çalışmalarda, bu fazın FeB_{1+x} şeklinde ve buradaki x katsayısının 1'den büyük olduğu (muhtemelen $x=2$) belirtmektedir [60,61].

Bu durumda, bor difüzyonunun Fe_2B ile matris ve FeB ile Fe_2B arasında gerçekleştiği görülmektedir. Borür tabaka yüzeyinden iç kısımlara doğru gidildikçe Fe_2B fazının ağırlık kazandığı düşünülmektedir. Bu konuyla ilgili olarak yapılan çalışmada, yüzeyden belirli oranlarda tabakalar kaldırılarak yapılan X-ışınları analizinde bu durum kanıtlanmaktadır [59].

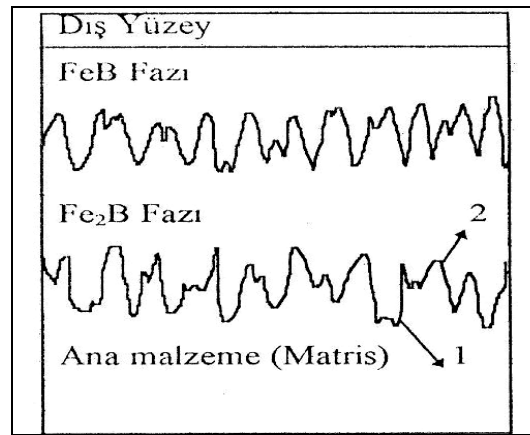
Yapılan araştırmalarda, borür tabakasının oluşumu konusunda genel olarak savunulan nokta, işlemin difüzyon kontrollü olmasıdır. Bu sebeple, bazen termokimyasal terimi yerine termodifüzyon kelimesi de kullanılabilir. Fakat borlama ile ilgili farklı büyüme mekanizmaları da öne sürülmektedir [6,54,62].

Difüzyon kanalı büyüme mekanizmasına göre; ortogonal prizma, bor atomlarının yayınmasını kolaylaştıracak en büyük ara kesite sahiptir ve Fe_2B kristalinde, $\langle 001 \rangle$ doğrultusunda, bor atomları bir yayınma kanalı oluşturur. Bor tabakasından borür ve

esas metal arayüzeyine sürekli olarak yayılan bor atomları, borlama tabakası yüzeyine dik doğrultuda Fe_2B kristalleri oluşturur ve bu kristaller kolonsal şekilde içeriye doğru büyür [53]. Difüzyon kanallı büyüme mekanizmasında, Fe_2B 'un kuvvetli bir tercihli yönlenmeye sahip olmasına rağmen, $\text{Fe}_2\text{B}/\text{Fe}$ arayüzeyinde düşük ve ihmal edilebilir bir kolonlaşma göstererek büyümesini veya kristallografik bir tekstürün olmadığı durumda arayüzeydeki kolonlaşmayı açıklamada yetersiz kalmaktadır. Bu konuda, uçtan büyüme mekanizmasının daha geçerli olduğu ileri sürülmektedir [53,56].

Uçtan büyüme mekanizmasına göre; ana malzemenin bileşimine ve işlem şartlarına bağlı olarak başlangıçta oluşan Fe_2B çekirdeği iğnesel bir şekilde büyür ve bor gradyanı boyunca yönelir [53].

Bu durumda Fe_2B çekirdeğinin ucu civarında oluşan bölgesel yüksek gerilim alanları ve kafes distorsiyonları tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlar. Uçtan büyüme mekanizmasında, Şekil 3.8'de görüldüğü gibi demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan tabaka ile malzeme ara yüzeyindeki kolonsallık 1 noktasında 2 noktasına göre daha yüksektir.



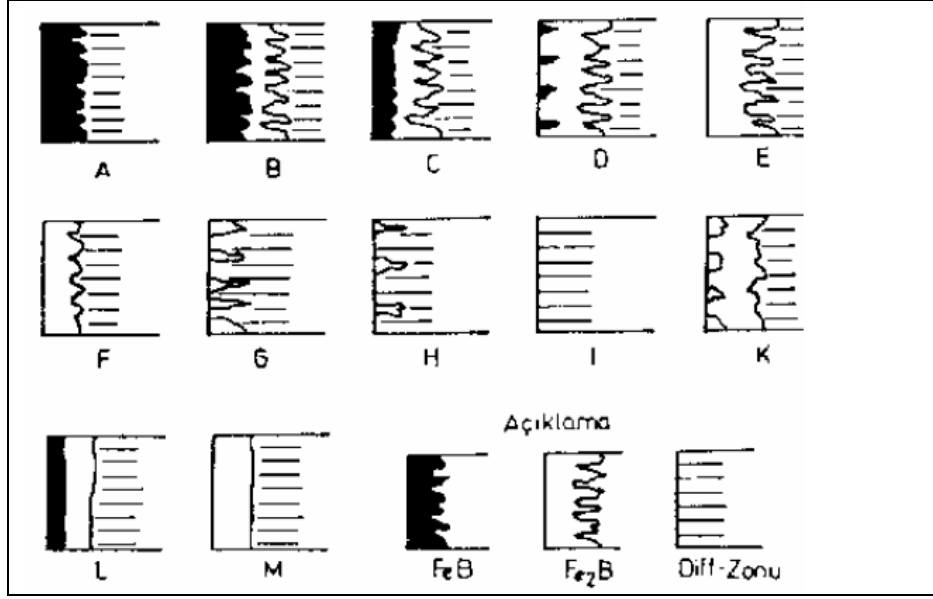
Şekil 3.8. FeB ve Fe_2B tabakalarında, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterimi [37].

Çok fazlı borür tabakaları oluşumunda, FeB 'nin büyüme mekanizması, ana malzeme üzerindeki Fe_2B 'nin büyüme mekanizmasına (uçtan büyüme) benzeyebilir. Aynı tabaka için $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$ ara yüzeyindeki kolonsallığın $\text{Fe}_2\text{B}/\text{matris}$ ara yüzeyindekinden

daha az olması oldukça dikkat çekicidir. Bu durum, mevcut fazların mekanik özelliklerindeki farklılıklarla ilişkili olabilir. Fe_2B , nisbeten sünek olan anamalzemedeki büyüyen bir faz iken FeB , Fe_2B üzerinde yani daha sert bir yapıda büyüyen bir fazdır [37,38]. Buradan FeB 'nin, Fe_2B 'den daha sert olabileceği sonucu çıkarılabilir. Bu farklılıklar, bölgesel gerilim oluşumlarına ve/veya ara yüzeylerde kafes distorsiyonlarına sebep olabilir [37,38]. Borür büyümesinin bir dahili sonuç olduğu göz önüne alındığında, yani tepkimelerin tek fazlı tabakalarda Fe_2B /matris ve çok fazlı tabakalarda FeB/Fe_2B ara yüzeylerinde gerçekleştiği düşünüldüğünde, oluşan bileşiklerin dış yüzeylerinin kristal yapısının düzensiz ve mekanik açıdan zayıf olması muhtemeldir [37,53].

3.5.3. Borür Tabakası Çeşitleri

Borlama esnasında uygulanan yöntem, kullanılan borlama maddesi, borlanan malzemenin cinsi ve borlama esnasındaki işlem parametreleri oluşan borür tabakasının şekline ve özelliklerine etki eden faktörlerdir. Metalografik incelemeler sonucu oluşan borür tabakasının kalınlığını, şekli, demir borürler için Fe_2B yada FeB 'nin oluştuğunu görmek mümkündür. Demir esaslı malzemeler için borlama sonucu yüzeyde FeB , Fe_2B ve geçiş bölgesi oluşabilmektedir. Bu tabakalar tek basına ya da değişik kombinasyonlarda bir arada bulunabilirler. Kunst ve Schaaber Şekil 3.9'da gösterilen bir değerlendirme sistemi geliştirilmiştir [63]. Kompozisyona göre değişik gruplardaki olası borür tabakaları düzenlenmiş ve her guruba bir harf verilmiştir [29].



Şekil 3.9. Borür tabakasının sınıflandırılması [29,59].

Şekil 3.9’da belirtilen tabaka çeşitleri aşağıdaki gibi karakterize edilmiştir:

- a) Tek fazlı tabaka, sadece FeB
- b) İki fazlı tabaka, Fe₂B ve FeB. (Tam tabaka)
- c) İki fazlı tabaka, FeB tabakası B’dekinden daha ince.
- d) İki fazlı tabaka, fakat FeB dişleri izole edilmiş.
- e) Tek fazlı tabaka, sadece Fe₂B, güçlü dişler.
- f) Tek fazlı tabaka, sadece Fe₂B, daha az kuvvetli dişler.
- g) Bağımsız Fe₂B dişli tabaka.
- h) İzole edilmiş Fe₂B tabakası.
- i) Geçiş bölgesi
- j) Dejenere olmuş tabaka.
- k) İki fazlı FeB ve Fe₂B tabakası, düzgün gelişmiş, dişsiz
- l) Tek fazlı FeB ve Fe₂B tabakası, düzgün gelişmiş, dişsiz

Borür tabakasının özelliklerini bu sınıflama ile belirlemek mümkün değildir. Bu değerlendirme sistemi borür tabakasının görünümünü ve borlama işleminin uygunluğuna karar vermeyi sağlar [29].

Endüstride E ve F tipi borür tabakaları amaçlanmakta ve kullanılmakta olan birçok borlama malzemesi ile elde edilebilmektedir. Tek fazlı borür tabakasının (Fe_2B) birçok avantajları vardır; örneğin düşük gevreklik, borlamadan sonradan uygulanan ısıtma işlemleri için ana metale bağlanma mukavemeti ve borür tabakasının özelliklerini bozmadan yapmak mümkün olmaktadır [29].

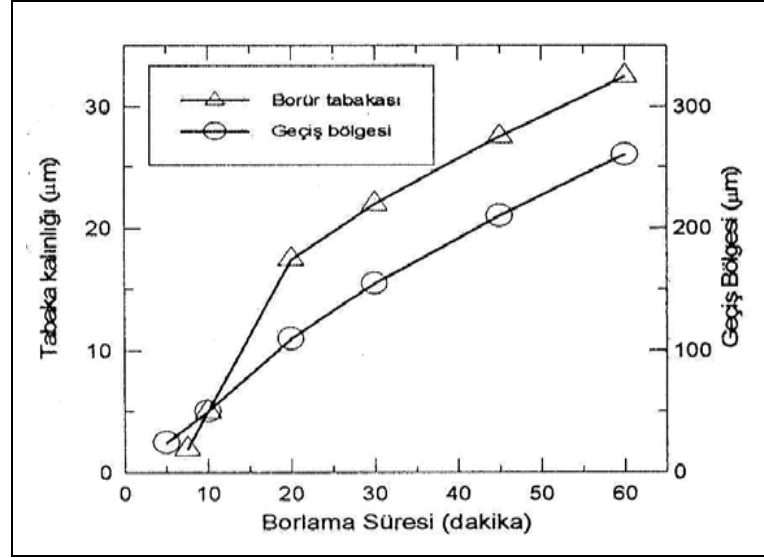
3.5.4. Geçiş Bölgesi

Geçiş bölgesi, borlanmış metalde borür tabakası ile ana metal arasındaki ara bölgeyi tanımlar. Geçiş bölgesi ile alakalı farklı görüşler olmakla birlikte yaygın olan görüş borlama sonucu oluşan borür tabakasında karbon çözünemediği için metalin yapısında bulunan karbon, bor difüzyonu sırasında yüzeyden iç kısımlara itilir. Bunun sonucu olarak karbonca zengin geçiş bölgesi oluşur [29].

Geçiş bölgesinin kalınlığı konusunda da farklı değerlendirmeler mevcuttur; Lovshenko ve arkadaşları, geçiş bölgesi kalınlığını borür tabakasının 3-4 katı olarak belirtmişlerdir [64]. Bozkurt ise, bu oranın 10-15 kat olduğunu tespit etmiştir [38]. Borür tabakası tarafından karbonun içeri doğru itilmesi sonucu bu bölgede esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunduğu ileri sürülmektedir [65]. Bozkurt ise doktora tezinde geçiş bölgesindeki karbon miktarının ana malzemedeki seviyesini koruduğunu, buna karşılık borun yüzeyden içe doğru tedrici olarak azaldığını tespit etmiştir [38].

Geçiş bölgesi hakkında başka bir görüş; bu bölgedeki borun çeliklerde alaşım elementi olarak gösterdiği etkiyi göstermesinden kaynaklanan farklı özelliklere sahip olmasıdır. Bu bölgenin ısıtma işlemi hassasiyeti, borun östenit dönüşümünü yavaşlatmasındandır. Ayrıca bu bölgede gözlenen östenit tane irileşmesi de, borun alaşım elementi olarak çeliklerde gösterdiği tipik özelliklerdendir [38]. Geçiş bölgesinin tane büyüklüğü ise ana malzemeye göre oldukça fazladır. 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. Bu bölgedeki bor

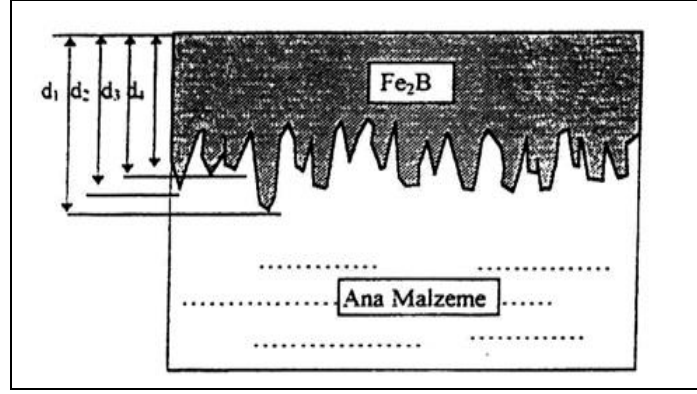
dağılımını otoradyografi yöntemi ile inceleyen Berzina ve arkadaşları, geçiş bölgesi kalınlığının, normal metalografik yöntemle belirlenenen göre daha büyük olduğunu belirlemişlerdir [65]. Lu, Ck 15 çeliğinde, borlama süresine bağlı olarak borür tabakası ve geçiş bölgesi kalınlıklarının farklı tarzlarda arttığını belirtmektedir (Şekil 3.10) [66].



Şekil 3.10. Fe₂B ve geçiş bölgesi kalınlığının borlama süresi ile değişimi [66].

3.5.5. Tabaka Kalınlığı

Borür tabakaları iğnesel ve değişken bir formda olduklarından, tabaka kalınlığının tanımlanmasında güçlükler çıkmakta ve farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Literatürde tabaka kalınlığı, genellikle tabakanın dış yapısı, düz bir düzlemlerle karşılaştırılarak ve bor dişlerinin bu düzleme göre ortalama değeri alınarak (Şekil 3.11) belirtilmektedir [6].



Şekil 3.11. Borür tabakası kalınlığının tanımlanması [53].

3.5.6. Alaşım Elementlerinin Borlamaya Etkisi

Alaşımli çeliklerin borlanması sırasında alaşım elementlerinden Co, Ni ve Mn'in oluşan Fe_2B tabakasının derinliğini artırdıkları saptanmıştır. Dikkati çeken bir nokta da, borür tabakasının karbon içermemesi ve silisyum çözünürlüğünün de çok düşük olmasıdır.

Borlama esnasında Si ve C, borür tabakası tarafından içeri doğru itilerek geçiş zonunda C ve Si zenginleşmesine yol açtığı ileri sürülmüştür. %1'in üzerinde Si içeren çeliklerde borür tabakası altında silisyumca zengin bir tabaka görülmekte ve bu ferrit çukuru olarak adlandırılmaktadır. Özellikle darbe ve lokal basınçlara maruz kalan borlanmış parçalarda Si içeriği %0.7'nin altında olması istenir [47].

Karbon: Karbon elementinin, kaplama tabaka yapısı ve kaplama/matris arayüzey morfolojisi üzerine etkisi bir çok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Karbon çeliklerinde, bilinen borlama yöntemleri ile hemen her zaman tek fazlı Fe_2B borür yapısı elde edilebilmektedir. Araştırmalar sonucunda düşük ve orta karbonlu çeliklerde kolonsal yapıda borür tabakaları elde edilirken, yüksek karbonlu çeliklerde kaplama/matris ara yüzeyinin düzgün ve $\langle 002 \rangle$ düzleminde büyüme oryantasyonuna sahip olduğu görülmektedir [67].

Düşük ve orta karbonlu çelikler üzerinde yapılan çalışmalarda, 10 μm civarında siyah renkte kaplamalar sağlanarak, bu tabakalarda ince rastgele yönlenmiş iki tabakalı

yapılar görülmektedir. %1 ve %2 C içeren çeliklerde kaplama tabakası nispeten düzdür ve %2 C içeren çeliklerde <002> Fe₂B oryantasyonuna sahip olan borür fazı oluşmaktadır [67]. Bu noktadan hareketle çeliklerde karbon miktarının artışına bağlı olarak, borür tabakasındaki Fe₂B fazının kararlılığının arttığı sonucuna varılmaktadır [67,68].

Ayrıca kaplama tabakasının hemen altında, tamamen perlitik bir faz oluşmaktadır. Karbon elementinin kaplama tabakası içerisinde çözünmeyip, matrise doğru difüze olduğu ve kaplama tabakasının hemen altında Fe₃C, Cr₂₃C₆, Fe₆C₃ gibi karbürlerin biriktiği belirtilmektedir [67]. Bu durum, borür tabaka yapısına önemli ölçüde etki etmektedir.

Ayrıca, karbon miktarındaki artışın, Fe₂B fazının kararlılığını FeB fazına göre arttırdığı da belirtilmektedir. Karbon miktarının artışına bağlı olarak, tabaka kalınlığında bir azalmanın olduğu ve bu azalmaya FeB fazının kararlılığının azalmasının neden olduğu belirtilmektedir [67,68].

Silisyum ve Alüminyum: Silisyum ve alüminyum da karbon gibi davranarak, bor tabakası içerisinde çözünmezler. Bor atomları tarafından yüzeyden içeriye doğru itilirler. Yüksek miktarda Si ve Al içeren çelikler borlamaya uygun değildirler. Çünkü bor tabakasının altında yumuşak bir ferrit zonu oluştururlar. Bu da pullanma dayanımını azaltır [6].

Krom: Krom çeliklerde borür tabakasının hem morfolojisine hem de derinliğine etki etmektedir. %4 Cr içeren çeliklerde kolonsal (asiküler) karakterde ve derinliği 65–95 µm kalınlıklı borür tabakaları elde edilirken, %12 krom içeren çeliklerde ise 65 µm kalınlığında ve düz karakterde borür tabakası elde edilmektedir. %26 Cr içeren çeliklerde ise borür tabakasının kalınlığı birkaç tanesi hariç 5 µm’yi aşmamaktadır. Krom atom numarası demirden düşük bir element olduğundan borca en zengin olan (Fe,Cr)B’ye öncelikle ve sistematik olarak matristen faza girerek yüzeye doğru yayılmaktadır. Kromlu alaşımların borür tabakalarının karakterleri kromsuz alaşımlar ile mukayese edildiğinde, kromlu alaşımların karbon yüzdelere bağlı olarak borür tabakalarının çok daha ince oldukları ve oldukça düzgün bir borür tabakası/matris

arayüzeyine sahip oldukları görülmüştür. Çeliklerin borlanmış tabakalarında mevcut (Fe,Cr)B ve (Fe,Cr)₂B fazlarının sertliği krom miktarının artmasıyla sistematik olarak artar. Bu fazların sertliklerini ölçmek çok zordur. Ara yüzey bölgelerinde elde edilen sertlik ölçümleri kaplama tabakası sertliğinden daha düşük değerler vermektedir [1,6].

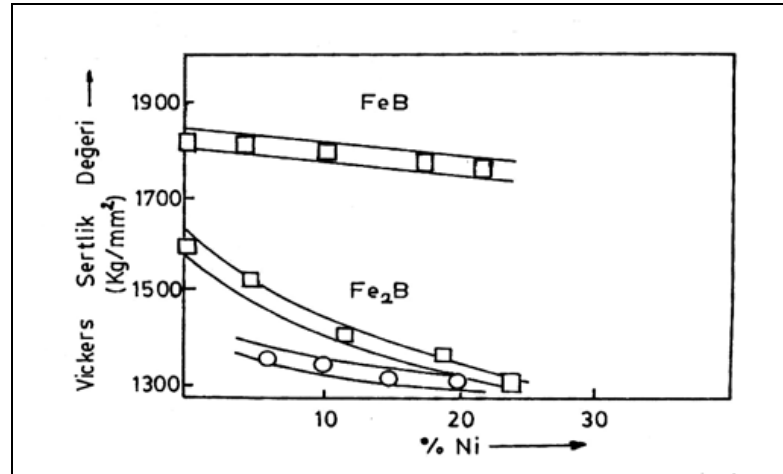
Borlanan numunelerde, borlu tabaka/matris ara yüzeyleri artan nikel miktarı ile daha da düzenli olmaktadır. Yüksek nikel oranı borür tabakasının kolonsal yapısını azaltmakta, yüksek poroziteyi ve kötü mekanik özellikleri beraberinde getirmektedir [1,6].

Krom ve manganın atom numaraları demirden daha düşük olduğundan borlanan malzemenin içinden yüzeyine doğru yayılmaktadır. Oysa nikel ve karbon, krom ve manganın tersi yönünde yayılmaktadır [1,6]. Ayrıca manganın kırılma tokluğuna olumlu, kromun ise olumsuz etki ettiği düşünülmektedir [69].

Manganez: Manganez, kroma benzer şekilde tercihli olarak borür tabakasına girerek, yüzeye doğru yayılmaktadır. Tsipas ve Rus çözümlenmenin genellikle iç kısımdaki Fe₂B fazında olduğunu iddia etmektedirler [70]. Manganez, borür tabakasının kalınlığını düşürmektedir. Özsoy artan mangan oranı ile kaplama/matris arayüzeyinin düzleştiğini belirtmişlerdir [42]. Carbucicchio ve arkadaşları ise, kolonsallığın daha da arttığını ileri sürmektedirler [71].

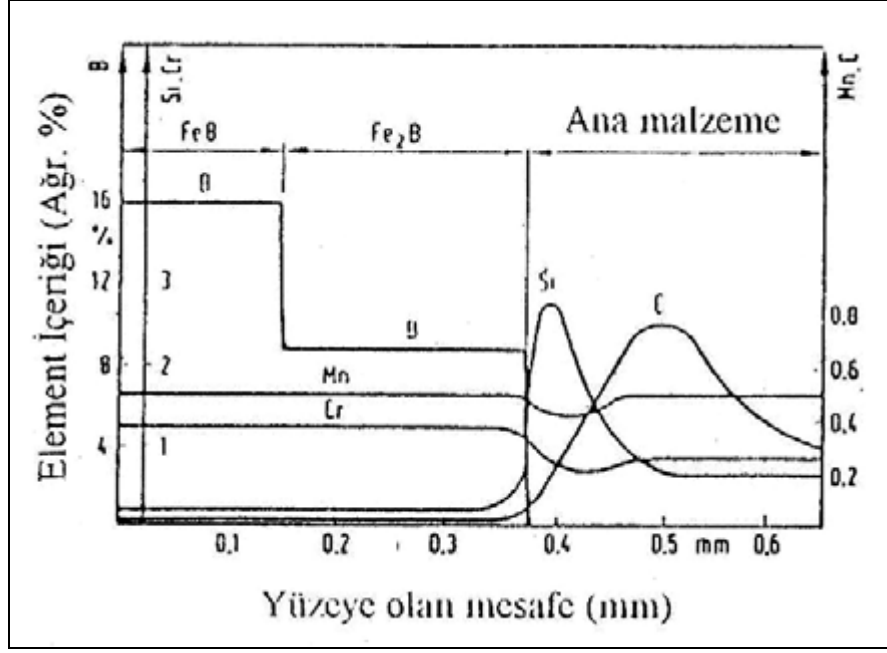
Nikel: Nikel elementinin borür tabakasına etkisi yüksek konsantrasyon değerlerinde ortaya çıkmaktadır. %4 Ni içeren çeliklerde 90 µm borür tabaka kalınlığı elde edilirken, %14 Ni içeren çeliklerde bu değer 60 µm olmaktadır [37]. Çok yüksek Ni konsantrasyonlarında borür tabakasının kolonsal yapıda oluşma ihtimali düşmekte ve meydana gelen borür fazının yüksek derecede porozite içerdiği görülmektedir. Fe-Ni alaşımlarında borür tabakaları FeB ve Fe₂B fazlarında görülmektedir [37]. Nikel, Fe₂B tabakasına karşılık gelen alt tabakadan yüzeye doğru segregasyon olmaktadır ve yüksek nikel konsantrasyonlarında bu etki, Fe₂B fazında nikel konsantrasyonunun düşmesi ile açık bir şekilde görülmektedir. Östenitik paslanmaz çeliklerin yüzeyinde oluşturulan borür tabakasında yüzeyde FeB ile birlikte muhtemelen çözünmesi zor

olan Ni_3B fazı bulunmaktadır. Yüzeyin altındaki tabakada ise büyüme yönüne paralel olacak şekilde $\langle 002 \rangle$ tekstürüne sahip Fe_2B fazı gözlenmektedir. Sonuçta krom ve nikel birbirlerine göre zıt bir davranış gösterirken, nikel, borür tabakasının yüzeyinde, krom ise iç kısımlarında yoğunlaşmaktadır. Araştırmalar borlama ortamında bor aktiviteyi ile oynanarak tek fazlı Fe_2B fazı elde edilebildiğini ve borür tabakası boyunca krom ve nikelin homojen olarak dağıldığını göstermektedir. Nikel ve krom, kaplama/matris ara yüzeyinde düzleşmeye neden olmaktadır ancak, kromun etkisi nikelin göre çok daha fazladır. Krom, demirden daha düşük atom numarasına sahip bir element olması sebebiyle, borca zengin (Fe, M) B en dış tabakasında nisbeten yüksek oranda düşme meydana gelmektedir [37]. Bunun sonucunda, atom numarası demirden yüksek olan nikelin iki fazlı borür tabakasında, borca zengin fazdan fakir faza doğru yayındığı düşüncesi ortaya çıkmaktadır. Borür tabakasında nikel miktarının artması, kolonsal yapının azalmasına ve porozitenin artmasına neden olurken, kaplamanın mekanik özelliklerini de kötüleştirir. Çeliklerde nikel konsantrasyonunun artması, $(FeNi)_2B$ fazının sertliğini azaltırken $(FeNi)B$ fazında herhangi bir azalmaya sebep olmamaktadır [37]. Artan nikel miktarına bağlı olarak borür tabakasının sertliğindeki değişim Şekil 3.12’de görülmektedir.



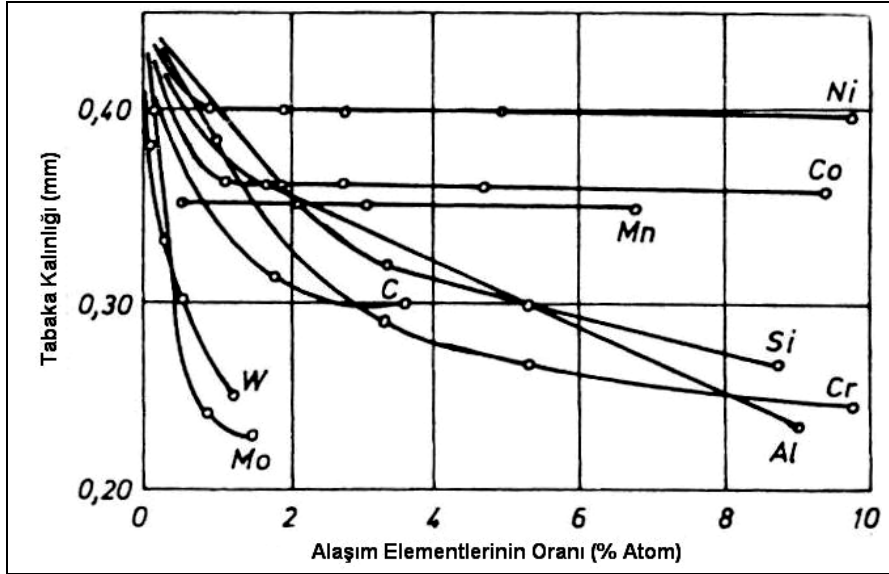
Şekil 3.12. Nikel miktarının artışına bağlı olarak, borür tabakasının sertliğindeki değişim [53].

Şekil 3.13’te çeliklerin borlanması sonucunda, borür tabakası boyunca alaşım elementlerinin dağılımları şematik olarak gösterilmektedir [37].



Şekil 3.13. Çeliklerde borür tabakası boyunca elementlerin şematik olarak dağılımı [37].

Şekil 3.14'te alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisini görmektedir.



Şekil 3.14. Çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabaka kalınlığına etkisi [6].

3.5.7. Borlama Sonrası Uygulanabilecek Isıl İşlemler Ve Termal Çevrimli Borlama

Borlama sonrası özelliklerin geliştirilmesi; borür tabakası, geçiş bölgesi ve matris malzeme özelliklerinin birlikte düşünülmesi ile sağlanabilir. Yüksek yüzey basınçlarına (Hertz basıncı) maruz kalan borlanmış makina elemanları, borlama sonrasında borür tabakasının kalitesini ve aşınma direncini düşürmeden, merkez sertliklerini arttırmak, dolayısıyla tabaka çökmesi ve dökülmesini önlemek için sertleştirilip temperlenirler. Uygun işlem yapıldığında 120-150 µm'ye kadar kalınlıktaki borür tabakalarının temperlenmesi, tabakada çatlak oluşumuna sebep olmaz. Dikey çatlaklar, genellikle ana malzemesinin hacimsel değişiminin uygun olmamasından kaynaklanmaktadır.

Tek fazlı Fe₂B tabakasının ısıl genişleme katsayısı, demir esaslı malzemelerin ortalama ısıl genişleme katsayısına yakın olduğundan, bu özelliklere sahip parçalara hasar vermeden, borlama sonrası iyileştirici ısıl işlemler uygulanabilir. Ötektoid dönüşüm sıcaklığı 1174°C olduğundan, en yüksek sertleştirme sıcaklığı 1050°C olabilir. Östenitleme sıcaklığı 1149°C'nin üzerinde olmamalıdır. Borlanmış parçaların ısıl işlemlerinde aşağıdaki noktalara dikkat edilmelidir [42]. Sertleştirme ve temperleme nötr atmosferde, koruyucu gaz, vakum veya nötr tuz banyolarında yapılmalıdır. 700°C civarındaki sıcaklıklarda, oksijen içeren ortamlarda borlu tabakalar oksitlenmektedir. Sertleştirme ortamı olarak sıcak yağ uygundur. Bunun yanında, malzemelerin sertleşebilme kabiliyetine göre, sıcak tuz banyolarında veya havada sertleştirme, yüzey gerilmelerini en aza indirir. 600°C sıcaklıkta demir bordan önce demir nitrüre dönüşüm olacağından, amonyaklı ortamlardan kaçınılmalıdır. FeB 400°C sıcaklığa, Fe₂B 325°C sıcaklığa kadar amonyak içeren atmosfere karşı dayanıklıdır [29].

Liliental borlamadan sonra, Normalizasyon+Sertleştirme+Temperleme (200°C) işleminin uygulandığı numunelerde, ana malzeme ile Fe₂B tabakası özgül hacimleri arasındaki farkın en düşük seviyede olduğunu (Çizelge 2.6), bunun sonucu olarak; borür tabakasındaki kalıntı gerilmeler ve gevrekliğin en düşük, aşınma direncinin ise en yüksek değerde olduğunu ileri sürmektedir. Borür tabakalarının özelliklerini

iyileştirmek ve yayınmayı hızlandırmak için termal çevrimli borlama işlemleri uygulanmaktadır [72].

Borür tabakasının gevrekliği ve bunun sonucu olarak da servis özellikleri, borür tabakasındaki kalıntı gerilmelerin dağılımı ile doğrudan ilgilidir. Bu dağılım, bitişik fazların ısıl genişleme katsayıları arasındaki farka bağlı olduğu kadar, tabaka ile matris malzemenin özgül hacimleri arasındaki farka da bağlıdır. Dolayısıyla, borür tabakasının özellikleri, borlama sonrası uygun ısıl işlemler uygulanarak tabaka ile matris malzeme özgül hacimleri arasındaki farkın azaltılmasıyla geliştirilebilir [73].

Çizelge 3.6. %0,45 C’lu çelikte, borlama sonrası uygulanan ısıl işlemlerle matris malzeme özgül hacminin değişimi [72].

Borlama Sonrası Uygulanan Isıl İşlemler	Özgül Hacim	
	Matris	Fe ₂ B
Yok	0,1276	0,1367
Normalleştirme, 900°C/sa.	0,1278	
Normalleştirme+Sertleştirme+Temperleme, 200 °C	0,1279	
Normalleştirme+Sertleştirme+Temperleme, 200 °C	0,1286	
Normalleştirme+Sertleştirme+Temperleme, 200 °C	0,1280	

Termal çevrim, malzemeye, sıcaklık farkına, sıcaklığın değişim hızına ve çevrim sayısına bağlı olarak malzemenin mikroyapı ve özelliklerini iyileştirmek için iş parçasının belirli sıcaklıklar arasında ısıtılıp soğutulması işleminin birçok kez tekrarlanmasıdır. Termal çevrim sonunda yayınma hızının arttığı, östenit tane boyutunun küçüldüğü ve üniform bir yapı oluştuğu dolayısıyla fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerin iyileştiği belirtilmektedir [72].

Pratikte termal çevrimle yayınmanın hızlandırılması; ya yayınma işleminden önce bir ön ısıl işlem olarak veya işlem esnasında termal çevrimin uygulanmasıyla sağlanmaktadır. Çelik, genellikle Ac₁ sıcaklığının 30-50°C üzerine ısıtılır ve Ar₁ sıcaklığının 50-199°C altına soğutulur [42]. Çevrim sayısı 100’e kadar çıkabilir. Kristhal ve Kenis, klasik yöntemler göre, 60 dakikalık karbürleme sonucun dayayınma katsayısının 2,5-3 kat arttığı ve tabakanın sertlik, darbe tokluğu ve aşınma direnci gibi özelliklerin iyileştiği iddia etmişlerdir [53]. Yayınma katsayısındaki artış;

tane incilmesi, faz yeniden kristalleşmesi, iç gerilmelerin oluşması ve gevşemesi ile boşluk yoğunluğundaki artışa bağlıdır. Sabit sıcaklıkta borlama işleminde işlem süresi arttıkça tane boyutuda artar ve bazı taneler diğerlerini yok edebilir [53].

Lu, 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 matriks arasında "geçiş bölgesi" olarak isimlendirilen bir yapının meydana geldiğini ve Ck 15 çeliğinde, borlama süresine bağlı olarak borür tabakası ve geçiş bölgesi kalınlıklarının farklı tarzlarda arttığını belirtmektedir [66]. Bu bölgedeki bor dağılımını otoradyografi yöntemi ile inceleyen Berzina ise, geçiş bölgesi kalınlığının, normal metalografik yöntemde belirlenenden çok daha büyük olduğunu belirlemişlerdir [65].

3.6. BORÜR TABAKASININ MEKANİK VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

3.6.1. Sertlik

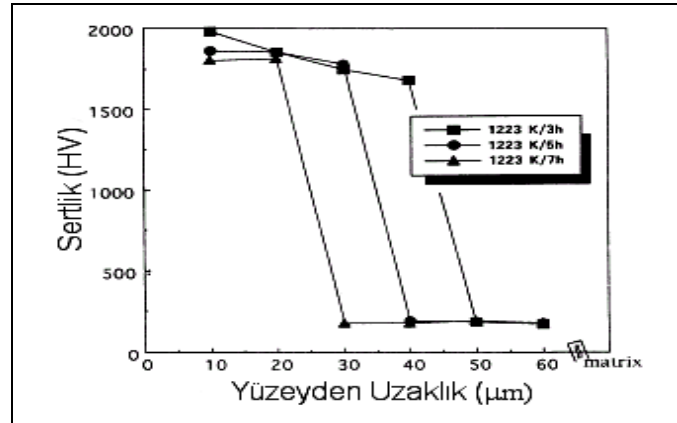
Borlanan yüzeyin en önemli özelliklerinden biri sertliktir. Borlama ile çok yüksek ergime sıcaklıklı faz yapısından oluşan 1450-5000 HV aralığında mikro sertlik içeren borür tabakaları oluşmaktadır. Borlama sonrası oluşan FeB tabakası Fe₂B tabakasından daha sert ancak daha gevrek yapıdadır. Borlanmış malzemelere sertlik testleri Vickers ve Knoop sertlik ölçme yöntemleri ile yapılır. Sertlik ölçümleri, tabaka kalınlığı ve faz yapısına bağlı olarak 25-200 g yüklerle gerçekleştirilmektedir.

Geouriot ve arkadaşları, borür tabakasının sertliğini belirlemek için iki ayrı yöntem önermektedirler. Bunlar sırasıyla, sertlik deneylerinin malzeme yüzeyine dik yada büyüme yönünde artan yükler kullanılarak gerçekleştirilmesi ve sabit yük kullanılarak gerçekleştirilmesi yöntemidir [67].

Borlanmış malzemelerde mikrosertlik ölçümleri tabaka boyunca yapılır. Yüzeyden ana malzemeye doğru sertlikte düşme görülür. Bunun nedeni borun ancak difüzyon sonuna kadar gelebilmesi ve bu bölgelerde sert bileşikler oluşturmasıdır [29,74].

Çeliklerde borür tabakasının sertliğinin 2000 kg/mm^2 Vickers değerine ulaştığı hatta bunun üzerine çıktığı bilinmektedir. Ancak sertlik ölçümlerinin metalografik olarak çok iyi hazırlanmış numuneler üzerinde yapılması gerektiği önem arz etmektedir. Borür tabakasının bir özelliği de, borlama sonrasında ısıl işlem görmesi durumunda sertliğini 900°C sıcaklığa kadar muhafaza edebilmesidir [29].

J. H. Yoon ve Y. K. Lee yaptıkları çalışmalarda, 1223°K sabit sıcaklıkta farklı sürelerde borlanmış malzemenin yüzey sertliğinin yüzeyden matrise doğru azaldığını göstermişlerdir [75]. Bu ilişki Şekil 3.15'te görülmektedir. Buna benzer ilişkiler genellikle borlama ile ilgili tüm çalışmalarda da yer almaktadır.



Şekil 3.15. Borlanmış AISI 304 çeliğinde sertlik değerinin, borlanan yüzeyden mesafe ile ilişkisi [75].

3.6.2. Kırılma Tokluğu

Klasik kırılma tokluğu deneyleri, boyut bakımından uygun malzemelere uygulanabilmektedir. Özellikle, numunenin kalınlığı ve plastik bölgenin boyutu kırılma tokluğu deneylerinde oldukça önemli parametrelerdir. Ayrıca bu işleme tabi tutulan malzemelerin gevrek olmamaları gerekmektedir.

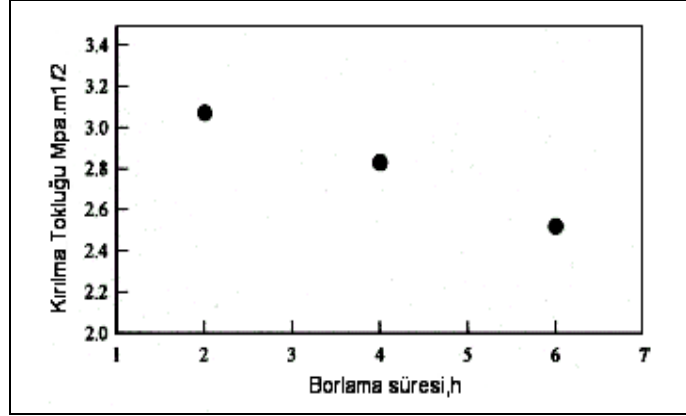
Gevrek ve kütleli olarak küçük malzemelere klasik kırılma tokluğu deneylerinin uygulanması mümkün olmadığından, “indentasyon” esaslı bir metod geliştirilmiştir. Bir malzemenin kırılma tokluğu, uygulanan yüke, çatlak boyuna ve numunenin geometrisine büyük ölçüde bağlıdır [1,76].

Borlanmış malzemelere, cam ve seramik gibi gevrek malzemelere uygulanan “Vickers Indentasyon Kırılma Tokluğu” deneyi yapılır. Kırılma tokluğu değerlerini hesaplamada yapılan literatür araştırmalarında $Kc=A.P/c^{3/2}$ denklemi kullanılmaktadır [1]. Burada; P= Yük, c= Radyal yarı çatlak boyu, A bir sabit olup $0,028(E/H)^{1/2}$ şeklinde ifade edilir. Burada; E=Elastisite Modülünü, H=Borür tabakasının sertliğini (VSD, kg/mm^2) ifade etmektedir.

İndentasyon tekniği ile kırılma tokluğu tayin etmenin temel prensibi, belirli yükler altında oluşturulan izlerle, bu izlerin köşegenleri boyunca meydana getirilen radyal çatlakların boylarının belirlenmesi esasına dayanır. Borür tabakaları yüksek sertliklerinden dolayı kırılma bir yapıya sahiptirler. Özellikle FeB tabakası oldukça gevrek bir fazdır. Bu yüzden ticari uygulamalarda, borür tabakalarının bu özelliği dikkate alınarak; elde edilmesindeki bir çok güçlüğü rağmen, daha az gevrek olan, tek fazlı Fe₂B tabakası tercih edilmektedir. Kırılma tokluğunu etkileyen en önemli faktörlerden birisi, demir borürlerdeki borun, demire göre daha hızlı yayınmasından kaynaklanan, yine iki fazlı yapının tek fazlı yapıya dönüşümü için yapısal işlemler sonucunda ortaya çıkan, porozite oluşumudur. Düşük sıcaklıkta ve uygun borlayıcı ile yapılan borlama sonucunda porozite en aza indirilebilir [29].

Malzemelerin kırılma tokluğu mekanik uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır. Genel olarak borlanmış malzemelerin kırılma tokluğu değerleri malzemenin alaşım elementi içeriği, yani malzemenin bileşimi ile ilgilidir. Çünkü oluşacak borür tipi ve borlama uygulamasının süresi kırılma tokluğunu direkt olarak etkiler. Borlama sonrası oluşan FeB fazının sertliği Fe₂B fazından daha yüksek olduğu için genellikle Fe₂B fazının kırılma tokluğu çok daha yüksek çıkar. Burada önemli olan bir nokta, borür fazlarının elastisite modülü değerleridir (E_{FeB}=284 GPa, E_{Fe₂B}=343 GPa) [37]. Şekil 3.16’ da borlama süresinin kırılma tokluğuna

etkisi gösterilmektedir. Çizelge 3.7’de borlanmış AISI W4 çeliği üzerindeki kırılma tokluğu hesaplamaları ve bulunan değerler yer almaktadır [77].



Şekil 3.16. Borlama süresine bağlı olarak borür tabakasının kırılma tokluğunun değişimi [76].

Borür tabakaları yüksek sertlik ve gevrek karaktere sahiptir. Özellikle FeB tabakasının sertliği Fe₂B’a nazaran daha sert ve daha gevreklerdir. Ayrıca borür tabakasında iki fazlı yapının oluşması durumunda ortaya çıkan basma ve çekme gerilmeleri sonucu oluşan çatlak hassastır. Bu yüzden, genellikle tek fazlı borür tabakası tercih edilmektedir [77].

Ancak, tek fazlı tabaka elde etmek için uygulanan ısı işlem porozite oluşturarak, tabakanın kırılma tokluğu değerlerini etkilemektedir. Bunun yanında kırılma tokluğu, alaşım elementlerine bağlı olarak kaplama tabakası içerisinde (Fe,M)₂B ve (Fe,M)B dağılımları ile değişmektedir.

Çizelge 3.7. AISI W4 çeliğinde borlama süresine bağlı olarak kırılma tokluğundaki değişim [77].

Borlama Süresi (sa.)	Kc (MPa.m ^{1/2})	
	FeB	Fe ₂ B
6	1.50	5.24
8	1.39	6.40

Çeliklere Mn ilavesi kırılma tokluğunda bir miktar artışa neden olurken, Cr ilavesi bir miktar düşüğe neden olmaktadır. Aynı zamanda borlama süresi de kırılma tokluğu üzerinde etkilidir [78]. Bindal, borlama sonucunda elde edilen kaplamaların, bir çok gelişmiş seramikle rekabet edebilecek düzeyde olduğunu belirtmiştir [1]. Carburicchio ve arkadaşları Cr'un, Gianoglio ve Badini, Ni'in, Badini ve arkadaşları ise, C, Cr ve Ni'in, etkilerini araştırmışlardır [71,79,80]. Bindal borlama süresi ve krom miktarına bağlı olarak, krom borürler tespit etmiştir ve kromun çok fazla olmasa bile, kırılma tokluğunu düşürdüğünü belirlemiştir [1].

Uygun termal çevrimli borlama sonucunda daha uniform ve daha az poroziteli borür tabakaların elde edilmesi, tabakanın aşınma gibi servis özelliklerini de iyi yönde etkilemektedir. Kırılma tokluğu açısından alaşımsız orta karbonlu çelikler olumlu sonuç vermektedir. Ayrıca ana malzeme ile borür tabakalarının özgül hacimleri arasındaki fark ile kırılma tokluğu arasında ters orantı mevcuttur [37].

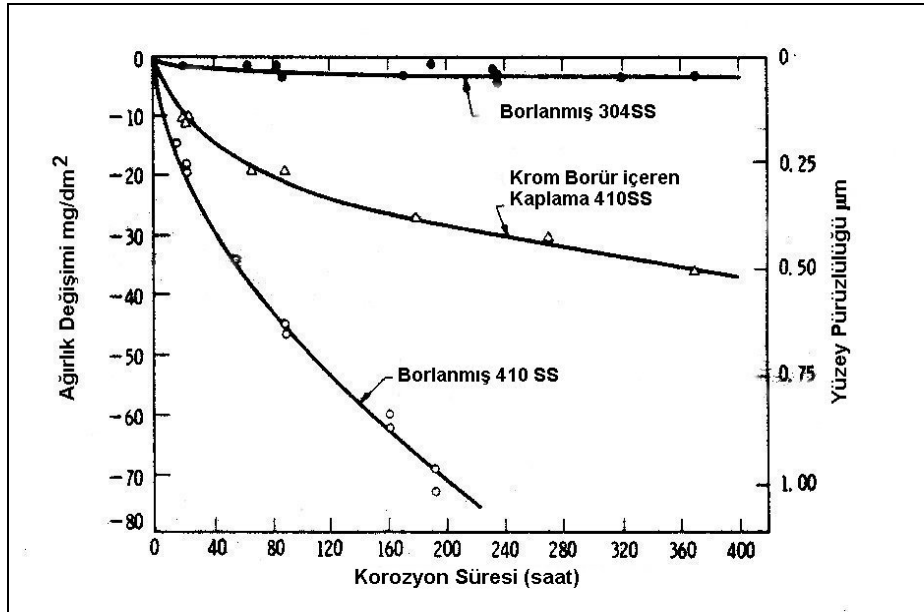
3.6.3. Borür Tabakasının Korozyon Dayanımı

Demir esaslı malzemelerin borlanması bu malzemelere yüksek korozyon dayanımları sağlamaktadır. Borlama işlemi ile metallere özellikle asidik sıvılar, deniz suyu ve yüksek sıcaklık ortamlarına karşı büyük dayanıklılık sağlanır. Özellikle düşük alaşımlı çeliklerin borlanması neticesinde oluşan yapının HCl, H₃PO₄, H₂SO₄ gibi asitlere karşı oldukça yüksek korozyon direnci sağladığı belirtilmektedir [81].

Yüksek kromlu çeliklerde borlama ile koruyucu krom oksit yerine daha az koruyucu olan Cr-borür meydana gelmektedir. Bu bakımdan yüksek alaşımlı malzemelerin borlanmasıyla daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilmeyebilir [1].

S. C. Singhal borlanmış çeliklerin korozyon dirençleri üzerine yaptığı çalışmalarda borlamanın korozyon direncini artırdığı yönünde sonuçlar bulmuştur [62]. 410 ve 203 tipi paslanmaz çelikler üzerinde yaptığı çalışmalarda, malzemelerini 95°C sıcaklıkta, düşük asitliğe sahip suda bekletmiş, deney sırasında sisteme saf argon gazı göndermiştir. Belli aralıklarla, su oda sıcaklığına soğutulmuş ve örnek çıkartılarak ağırlığı tartılmıştır. Korozyon testinden sonra yapılan metalografik incelemeler

göstermiştir ki, kaplama yüzeyinde oluşan porozite ve çatlaklar suyun içeri penetre olmasına neden olmuştur. Bu da ana malzemenin hızlı korozyona uğramasına neden olmuştur. 410 ve 304 tipi paslanmaz çeliklerle yapılan korozyon deneylerinde ise korozyon hızının yavaşladığı ve daha düşük ağırlık kaybının meydana geldiği görülmüştür. 410 çeliğinin 20 saatlik korozyon deneyi sonrası, kaplamada deney sırasında mikro çatlaklar oluşmasından dolayı, ürün olarak kırmızı demir oluşmuştur. Borür tabakasında Cr miktarı arttıkça korozyona karşı dayanımda artmaktadır. 304 çeliğinde ağırlık kaybı oldukça az olmuş ve 2500 saatlik deney sonrası malzemede herhangi bir korozyon ürününe rastlanmamıştır. Bunun nedeni 304 çeliğinin korozyona son derece dirençli %18 Cr içeren bir malzeme olmasına dayandırılmıştır [29,62]. Borlanmış malzemelerde oluşturulan borlu tabakanın esas fonksiyonu oldukça sert yüzeyler ile malzemeyi korozyondan korumaktır. Borür tabakalı paslanmaz çeliklerin düşük asitliğe sahip su içerisindeki korozyon davranışları Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Borür tabakalı paslanmaz çeliklerin düşük asitliğe sahip su içerisindeki korozyon davranışları [62].

BÖLÜM 4

AŞINMA

Aşınma için birçok 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 [82].

4.1. AŞINMA ZAMAN İLİŞKİSİ

Aşınma pratikte ikiye ayrılır.

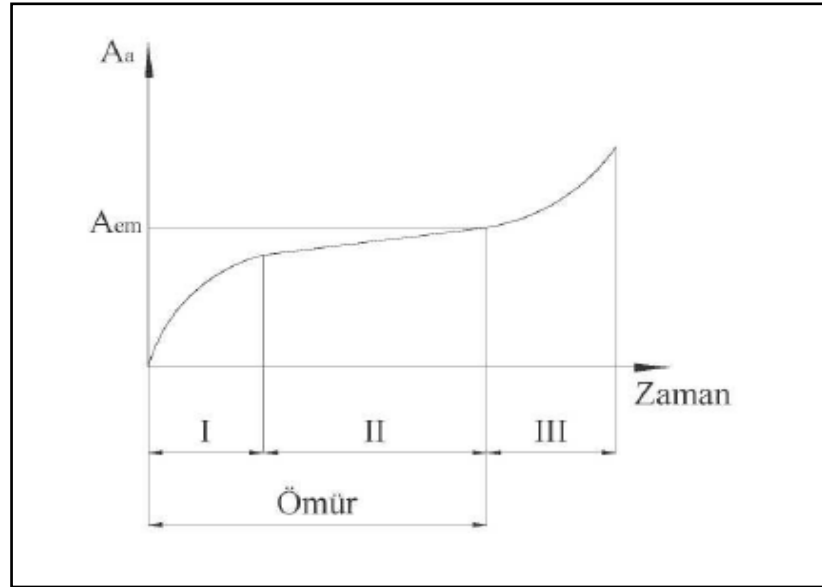
- a) Zaman ile gelişen aşınma,
- b) Aniden meydana gelen aşınma,

Zamanla gelişen aşınmayı üç safhada incelemek mümkündür (Şekil 4.1).

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 4.1. Aşınma zaman ilişkisi [83].

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 şekli, statik zorlamanın etkisi altındaki kopmanın benzeridir.

Genel olarak aşınma, dış etkiler altında, temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişmelerin sonucudur. Dış etkilerin, fiziksel ve kimyasal değişikliklerinin çokluğu nedeniyle pratikte, bir aşınma hali değil birden çok aşınma hali vardır [84].

4.2. AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

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

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

vb. faktörler etki etmektedir. Bu faktörleri inceleyecek olursak;

4.2.1. 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.

4.2.2. 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.

4.2.3. Yüzeğe Uygulanan Yük

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

4.2.4. Sürtünme Mesafesi

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

4.2.5. Yüzeğ Sertliğı

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

4.2.6. Yüzeğ Pürüzlülüğü

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

4.2.7. Yağlama

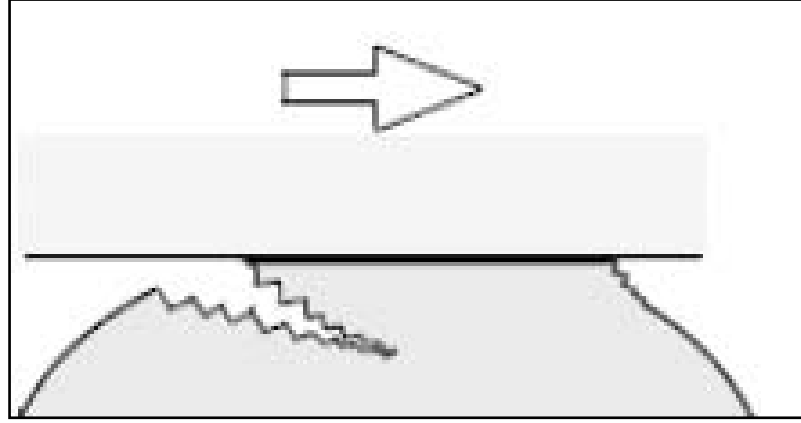
Aşınmaya karşı önleyici önlemlerden bir tanesi de yağlamadır. Sürtünen yüzeğler arasındaki yağlama ile metal metal teması ve soğuk kaynaklanma önenebilir [85].

4.3. AŞINMA ÇEŞİTLERİ

4.3.1. Adhesiv Aşınma

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

Adhezyon ara yüzeydeki pürüzlerin teması ile meydana gelir ve bu temas noktaları kayma ile kesilir. Bununla birlikte bir yüzeyden kopan parçalar diğer yüzeye yapışabilirler. Kayma devam ettiğinde diğer yüzeye yapışmış olan parçalar tekrar orijinal yüzeye yapışabilir veya her iki yüzeyden bağımsız aşınma partikülü olabilirler [86].



Şekil 4.2. Adhesiv aşınma.

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

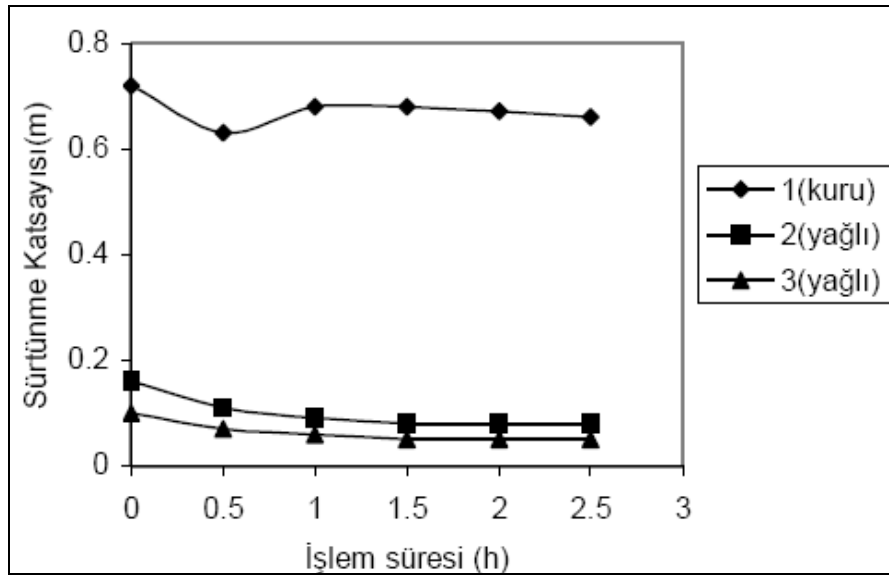
Yüzey ne kadar hassas işlense de gerçek temas alanı görünür temas alanından daima küçüktür. Birbiri üzerine temas eden malzemelere yük uygulandığında temas noktalarında aşırı gerilmeler meydana gelir. Akma sınırı aşıldığında ise küçük kaynak bağları oluşur.

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 4.1. Malzeme özelliklerinin adhesiv aşınmaya etkisi [87].

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

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.



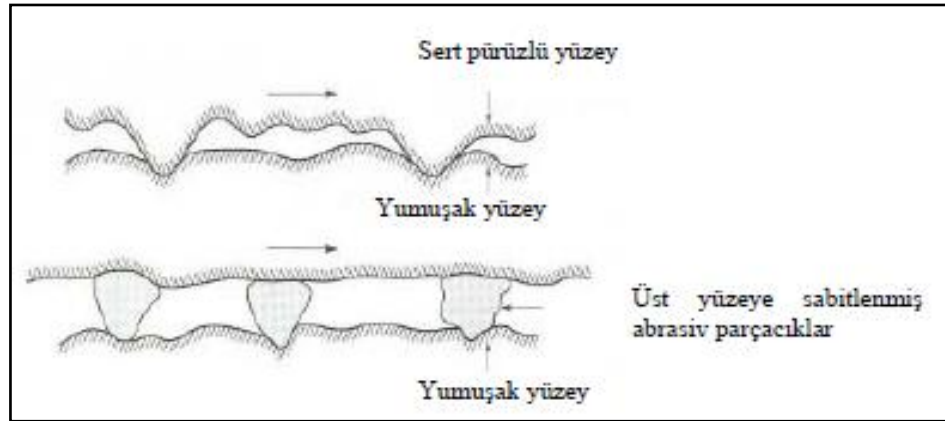
Şekil 4.3. Bakır esaslı bronz ve pirinç yataklarda kuru ve yağlı ortamlarda sürtünme katsayısı-zaman diyagramı [88].

Adhezyon aşınması için aşağıdaki sonuçlar çıkartılabilir.

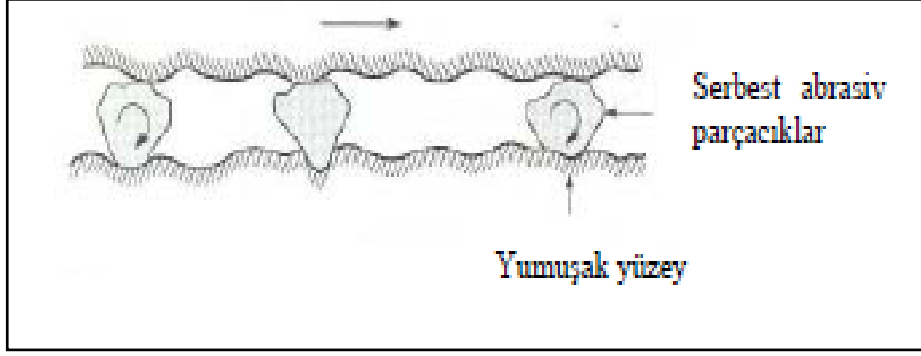
- a) Adhezyon aşınması uygulanan yük ile
- b) Kayma mesafesi ile
- c) Aşınan malzemenin yüzey sertliği ile doğru orantılıdır.

4.3.2. 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 [83].



Şekil 4.4. Pürüzlü sert bir yüzey veya abrasif parçacıkların bir yüzeye yapışık olması [83].



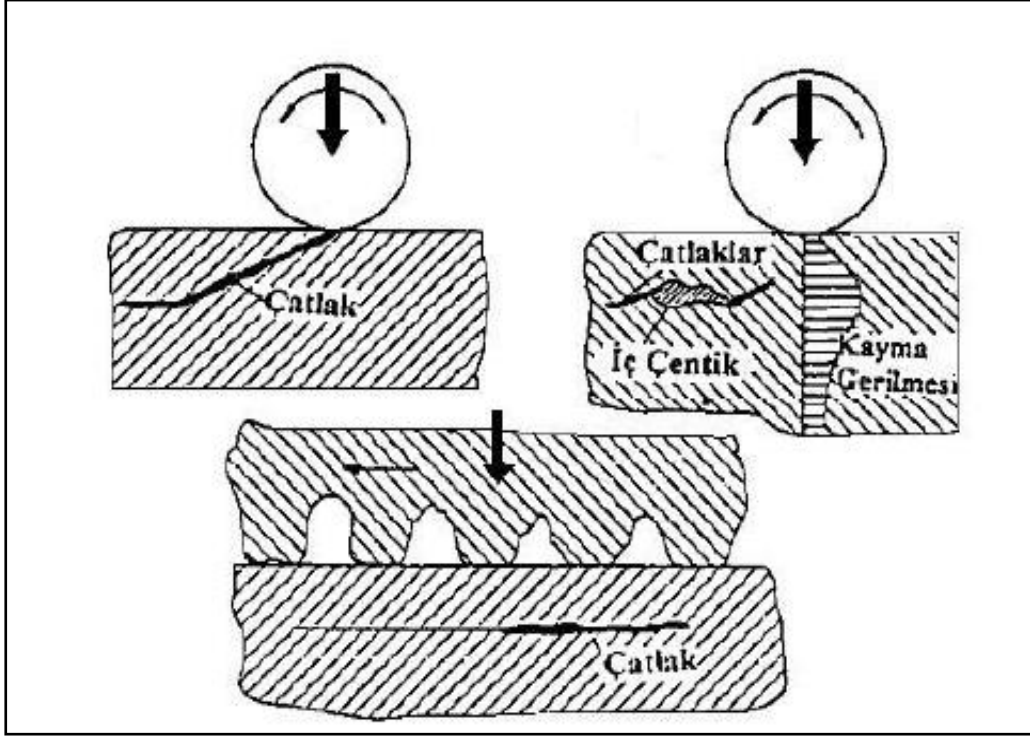
Şekil 4.5. Yüzeylerden en az birinden daha sert abrasif parçacıkların iki yüzey arasında sıkışması [83].

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 partikülleraşınma direncini artırabilir [89].

4.3.3. 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 [90]. Yorulma aşınmasına pitting de 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 4.6'da yorulma aşınması oluşum mekanizması görülmektedir [91].



Şekil 4.6. Yorulma aşınması oluşum mekanizması [92].

4.3.4. 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 [93]. Erozyon aşınması farklı durum ve ortamlarda meydana gelebilmektedir.

4.3.4.1. 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.

4.3.4.2. 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.

4.3.4.3. 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.

4.3.4.4. Kavitasyon 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.

4.3.4.5. Elektro Erozyon

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

4.3.5. 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 tükemesinden 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 karşılaşılr.

Metalik malzemeler birçok uygulamada yüksek sıcaklıklarda korozif ortamlara maruz kalırlar ve malzemenin korozyon direnci bu ortamlardan etkilenir. Sıcaklık ve ortama bağlı olarak aşınma sekiz farklı şekilde meydana gelebilir [91].

- 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 (O_2) içeren oksijen aktivitesinin moleküler oksijen konsantrasyonu ile kontrol edildiği ortamlardır. Redükleyici atmosfer ise, oksijen girişinin olmadığı yanmanın oksijensiz şartlarda gerçekleştiği ortamlardır.

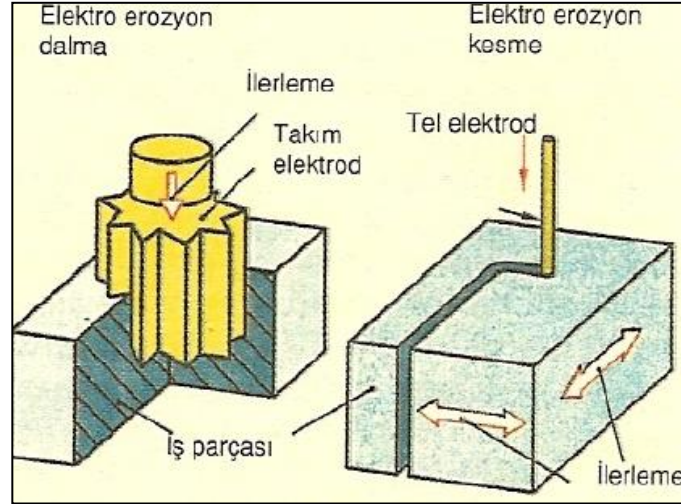
En önemli yüksek korozyon aşınma türü oksitlenmedir. Metal ve alaşımlar yüksek sıcaklıklarda hava veya oksitleyici ortama maruz kaldıklarında yüzeylerdeki oksit tabakası doğal olarak büyür. Metalik malzeme ve üzerindeki oksit tabakası farklı ısıl genişleme katsayılarına sahiptirler. Oksit tabakası, çalışma 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 [90].

4.4. AŞINMANIN AZALTILMASI İÇİN GEREKLİ ÖNLEMLER

- a) Aşınmaya dayanıklı malzeme seçimi; parçanın çalıştığı ortamdaki mevcut aşınma türü ve şiddeti belirtilerek yapılmalıdır [90].
- 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 önlenebilir. Bununla beraber, katkılı yağların oksidasyon aşınmasını arttırıcı bir rol oynadığı da düşünüldüğünde malzeme seçiminde daha dikkatli olunmalıdır.
- h) Soğutucu seçimi, parçanın çalışma ortamına uygun biçimde olmalıdır.
- i) Yağlayıcı ve soğutucunun uygun bir filtreleme işleminden geçirilerek içindeki aşındırıcı partiküllerin 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.

4.5. AŞINMANIN KULLANIM ALANLARI

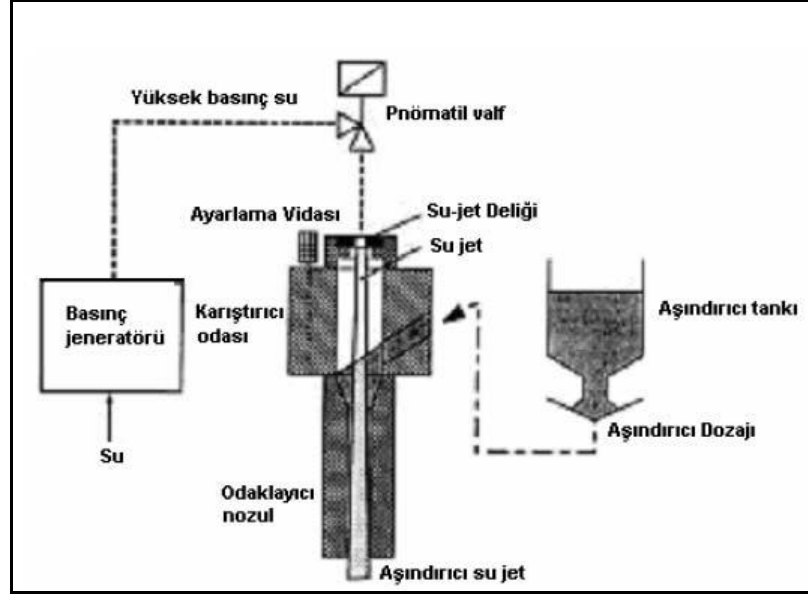
Aşınma her ne kadar birçok makine ve makine elemanlarını olumsuz etkilese de tahılların öğütülmesinde (abrasif aşınma) ve teknolojinin birçok değişik alanında gelişmelere yol açmıştır. En önemli gelişmelerden bir tanesi de talaşlı imalatta hassas ve işlenmesi zor iş parçalarının işlenmesinde kullanılan 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 4.7. Elektro erozyon ve Tel erozyon tezgahı çalışma prensibi [87].

Araştırmacılar hareket halindeki suyun yaptığı aşındırma olaylarını yağan yağmurda, yüksek yerden düşen su damlarında, 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. Gerekliğinde 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 4.8. Aşındırıcı su jetinin basit şematik görünümü [88].

4.6. AŞINMA ÖLÇÜM METODLARI

4.6.1. 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 [93].

Ağırlık farkı ölçme yönteminde en çok kullanılan bağıntılar aşağıdaki gibidir.

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

4.6.2. Kalınlık Farkı Metodu

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

4.6.3. İz Değişimi Yöntemi

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

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

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

4.6.5. Bilgisayar Destekli Aşınma Ölçüm Metodu

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

Aşınma kayıpları ve sürtünme katsayısı verileri bilgisayara A/D-D/A kartlar üzerinden aktararak işlenir. Bu veriler, bir paket programla grafik formlara dönüştürülebilir, istatistiksel analizlere tabi tutulabilir ve diğer hesaplamalarda kullanılabilir. Sistemin duyarlılığı, kullanılan sensörlerin ve kontrol kartının voltaj değerindeki lineer sapmaya bağlıdır [93].

4.7. TRİBOSİSTEMLER

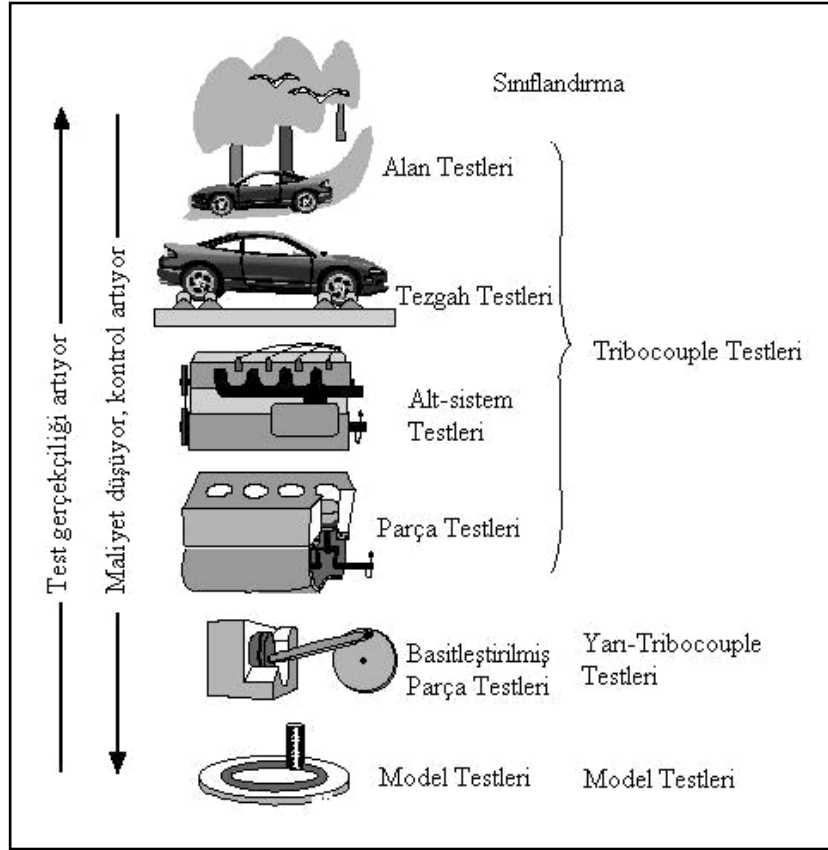
Tribolojinin sözlük anlamı birbiri ile temas eden yüzeyler arasındaki etkileşimi inceleyen bilim ve teknoloji olarak tanımlanmaktadır. Tribolojik araştırmaların amacı yüzey sürtünmelerinin ve aşınmadan kaynaklanan kayıpları azaltmak ve gidermektir. Aşınma tiplerinin çok çeşitli olması ve birçok farklı 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 [94].

4.7.1. Tribotestlerin Sınıflandırılması

Tribotestler birçok şekilde gerçekleşebilir. 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 [94].



Şekil 4.9. Tribosistemlerin şematik gösterimi [94].

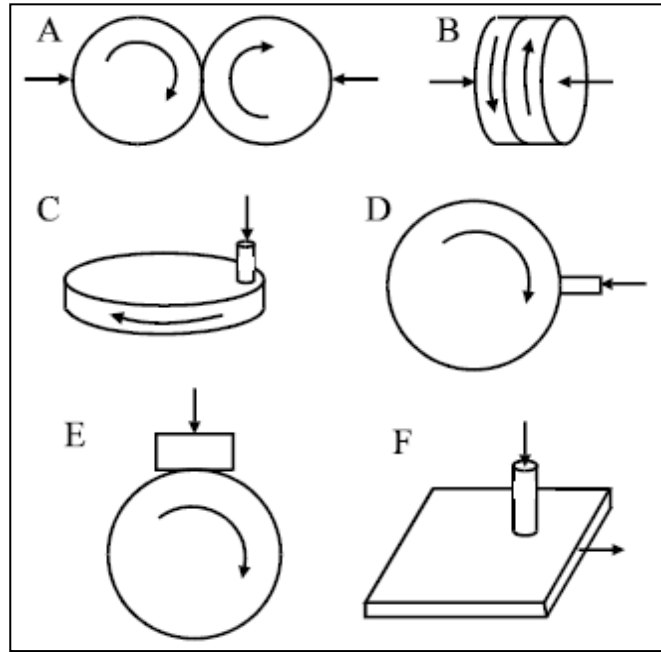
4.8. AŞINMA DENEY YÖNTEMLERİ

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 4.10'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 [95].

Şekil 4.10’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.

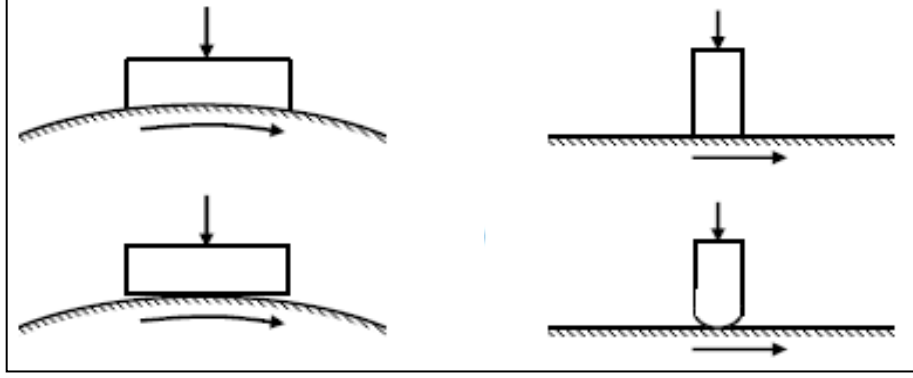
Simetrik düzen, aşınma çalışmasında pek sık kullanılmaz. Bu düzene Şekil 4.10’daki A ve B düzenleri örnek olarak gösterilebilir. Bu düzen tipinde ya çevreleri boyunca temas halinde olan (A) ya da yüzeyleri boyunca temas eden (B) her ikisi de dönen bilezik veya iki disk bulunur.



Şekil 4.10. Kayma aşınması için kullanılan geometrik düzenekler [96].

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 4.11’de detaylı olarak gösterilmektedir [95].



Şekil 4.11. Deney cihazlarında temas biçimleri [95].

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) [96].

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 [95].

4.9. AŞINMA DENEYLERİNDE KULLANILAN BAZI AŞINMA DENEYCIHAZLARI

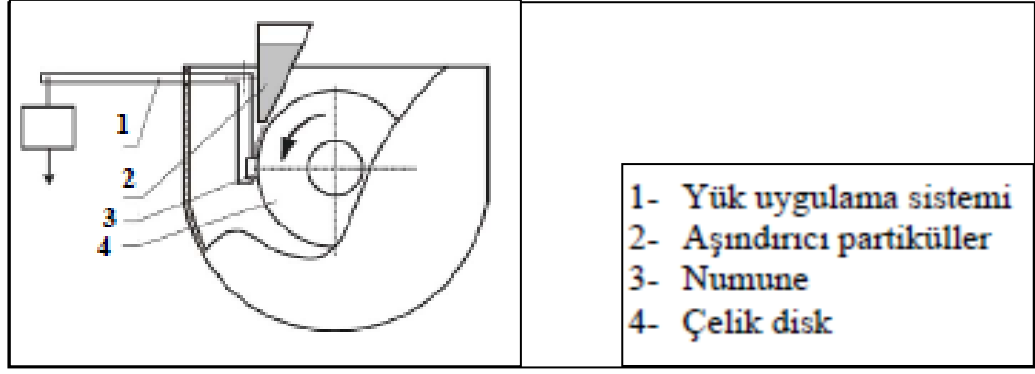
H, Klaasen ve J, Kübarsepp, bazı karpit bileşiklerinin aşınma performansı hakkında deneysel çalışmalar yapmışlardır. Aşınma deneyi için şekil 4.12’de şematik olarak gösterilen lastik(kauçuk) tekerli abrasyon (ASTM G65-94) deney cihazını kullanmışlardır. Bu deney cihazı üç partiküllü abrasif aşınma deneyleri için ideal bir tasarım olmakla birlikte disk üstü blok deneyi içinde rahatlıkla kullanılabilir [97].

Ayrıca abrasif aşınma deneyleri ASTM standartlarına göre;

G65 Lastik tekerli abrasyon testi (aşındırıcı kuru kum)

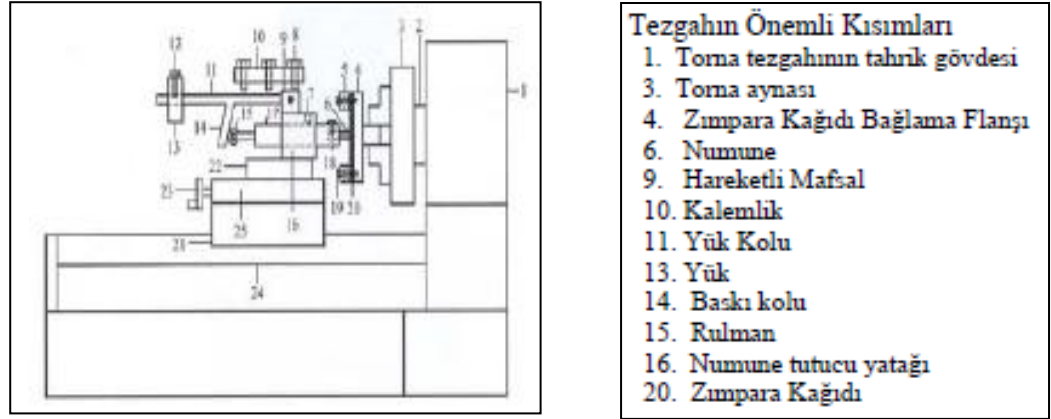
G105 Lastik tekerli abrasyon testi (aşındırıcı ıslak kum)

B611 Yüksek gerilimin olduğu yerlerde çelik teker kullanılır.



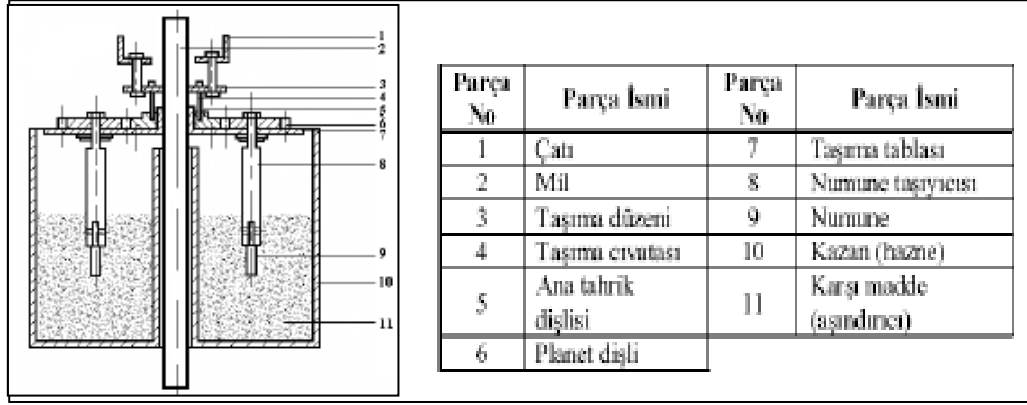
Şekil 4.12. Lastik tekerli abrasiv aşınma deney cihazı şematik görünümü [97].

Y, Taşgın ve M, Kaplan, yaptıkları çalışmada dubleks döküm tekniğiyle üretilen FeCrC katkılı malzemenin abrasiv aşınma davranışını incelemişlerdir. Bu deneysel çalışmada şekil 4.13’de şematik olarak görünen aşınma deney cihazını kullanmışlardır. Deney cihazı esasen bir torna tezgahı üzerine gerekli aparat ve ölçüm sisteminin monte edilmesi ile oluşturulmuştur [98].



Şekil 4.13. Abrasiv aşınma deney cihazı şematik görünümü [98].

N, Y, Sarı ve M, Yılmaz, yaptıkları abrasif aşınma deneyinde şekil 4.14’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 [99].

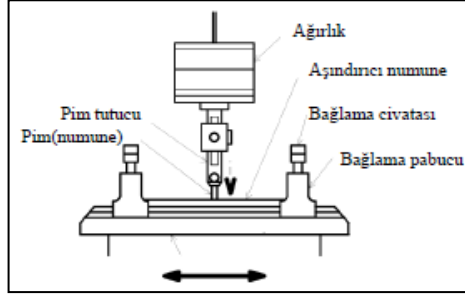


Şekil 4.14. Aşındırıcı partiküllü aşınma deney cihazı [99].

D, Odabaş, ve M, B, Karamış, kaymalı sürtünme yapan malzemelerin aşınma 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 4.20’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 [100].

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

Düzlem üzerinde çubuk aparatında, sabit duran çubuk üzerinde bir düzlem git-gelhareketi 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 [83].

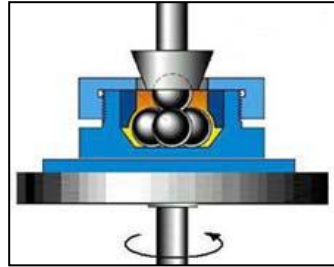


Şekil 4.15. Pin on Flat deney cihazı şematik görünümü [101].

4.9.2. Dört Top Deney Aparatı

Şekil 4.16’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 metottür.

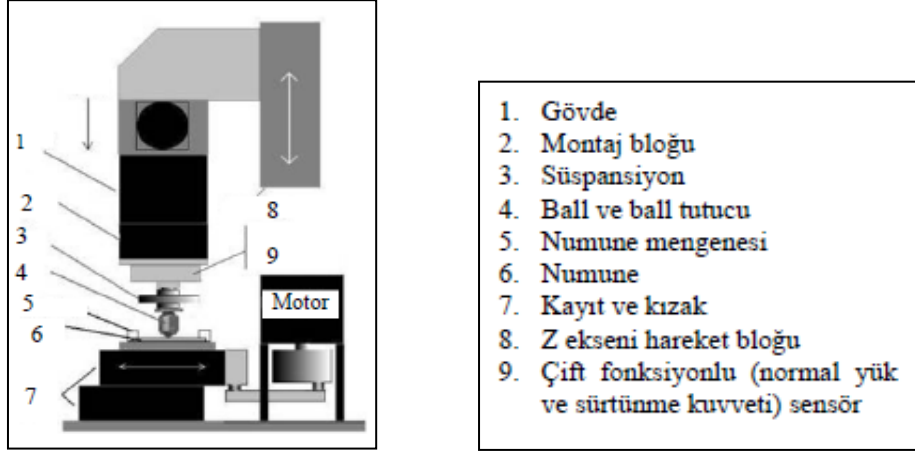


Şekil 4.16. Dört top aşınma deney aparatı [95].

4.9.3. 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 4.17’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

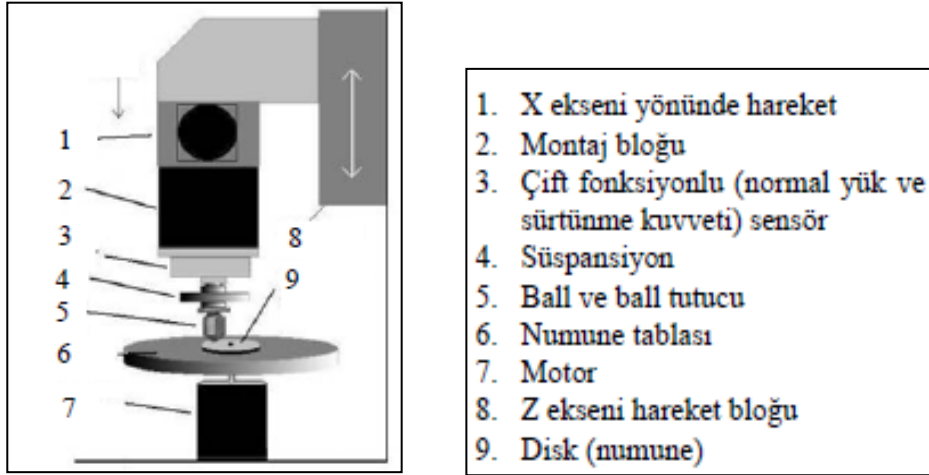
numune yüzeyine belirli ölçülerdeki bir kürenin belirlenen yük ile temasına dayanmaktadır. Bu deneydeki önemli parametreler uygulanan yük, numunenin hareket uzunluğu, hareket sıklığı ve hızı, test sıcaklığı, test süresi.



Şekil 4.17. Ball on Flat deney cihazı [95].

4.9.4. 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 eksenine etrafında dönmesi sağlanır. Küre, bağlama aparatları ile montaj bloğuna bağlanır. Ayrıca kürenin x veya y ekseninde hareket etmesi gereklidir. Şekil 4.18'deki modelde yük düşey olarak küre üzerine uygulanmaktadır.

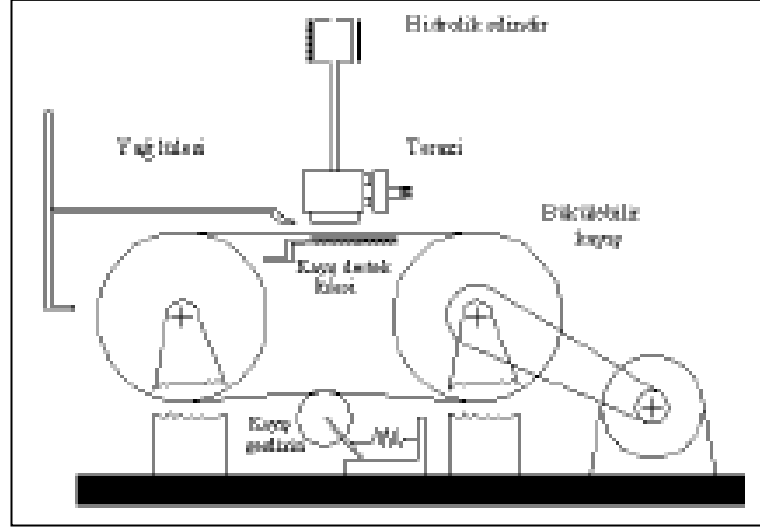


Şekil 4.18. Ball on Disk deney cihazı [102].

4.9.5. 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 gerdirme tekeri ile düzeltilir. Kayış, kumaş, lastik çelik şerit veya takviye edilmiş kompozit malzemelerden olabilir. Deneylerde kullanılacak yüzey tekstürü ise imalatı esnasında kayışın bir yüzüne zımpara kağıdı yapıştırılarak veya aşındırıcı örtülerek sağlanır. İki silindirin arasında kalan kayışın düz kısmı bir hava veya su yastığıyla desteklenmiştir. Kayışın hızında yaklaşık olarak eşit bir hızdaki 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.

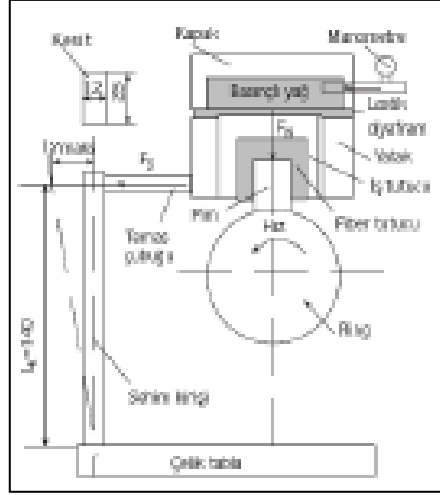


Şekil 4.19. Levha-kayış aşınma deney cihazı [102].

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 [102].

4.9.6. Silindir Üstü Çubuk Deney Cihazı

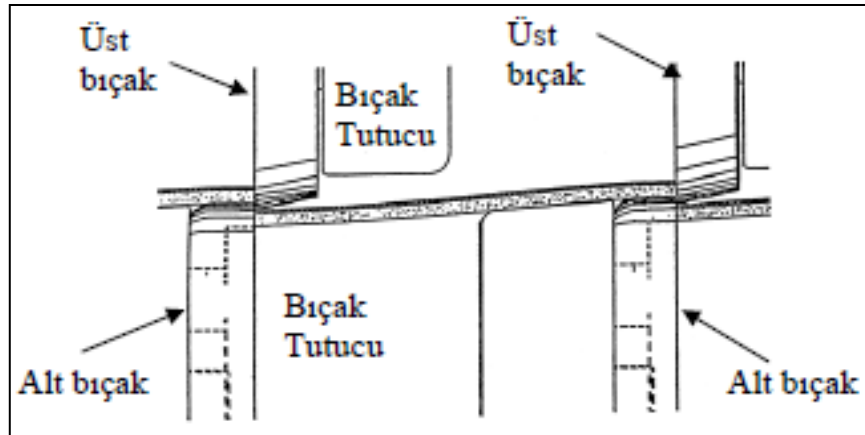
Silindir üzerinde çubuk aparatı pin on disk aparatına benzer. Farkı numunenin yüklemesi dönen silindir üzerine diktir. Numune düzlem veya yarım küresel uç olabilir.



Şekil 4.20. Silindir üstü çubuk deney cihazı şematik görünümü [100].

4.9.7. Çapraz Silindir Deney Cihazı

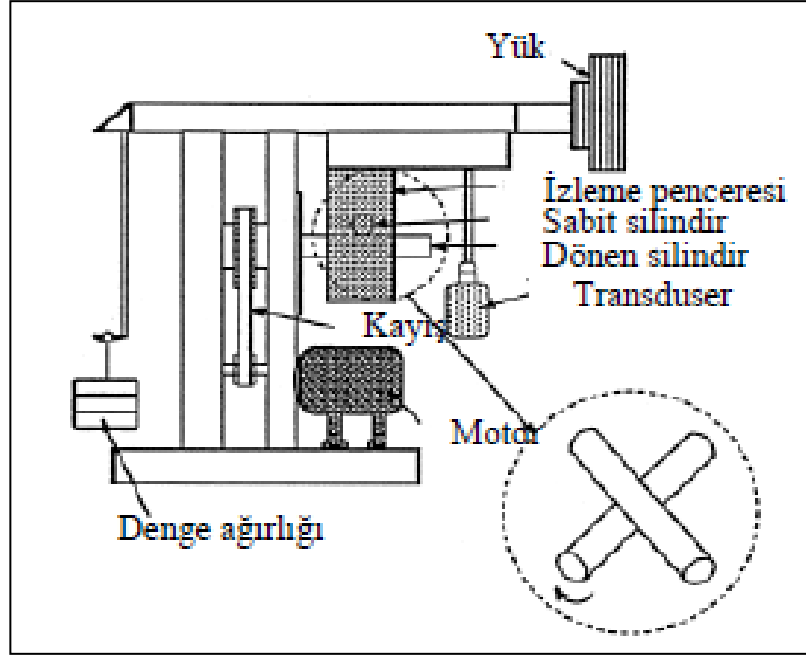
Kağıt kesiminde, kumaş kesiminde, sac metal kesiminde vb. malzemelerin kesiminde aşağıdaki gibi makas sistemi kullanılır. Bu tür kesimlerde bıçakla metal arasında çok küçük temas alanı ve yırtılmalar meydana gelir. Özellikle sac metal kalıplarındaki kesme işlemi buna çok iyi bir örnektir. Bu gibi bıçaklarda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



Şekil 4.21. Sac metal kesimi [103].

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 [103].



Şekil 4.22. Çapraz silindir deney düzeneği [103].

4.9.8. Plint TE 97 Sürtünme ve Aşınma Deney Cihazı

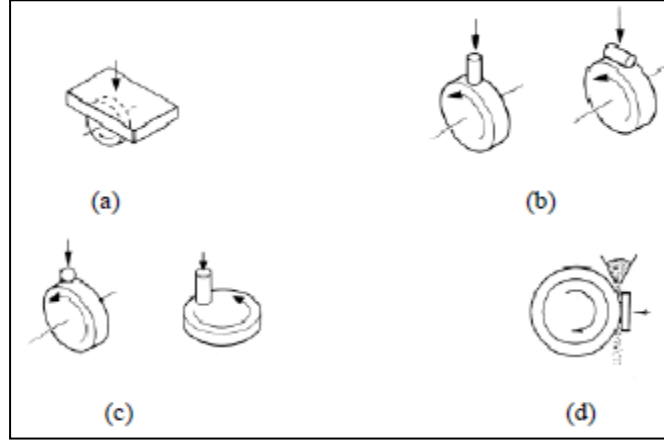
Plint firmasının ürettiği ilk tribolojik test cihazı TE 97 model test cihazıdır. Bu cihazın tasarımı Dr. Michael Plint ve Prof. Duncan Dowson tarafından yapılmıştır [103].



Şekil 4.23. Plint firmasının ürettiği ilk TE 97 aşınma deney cihazı [103].

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

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



Şekil 4.24. TE 97 deney cihazı ile yapılabilen aşınma deneylerinin şematik görünümü [103].

Şekil 4.25’de görüldüğü gibi şekil a) da Pin onDisk deneyi yapılmaktadır. Aynı deney cihazı üzerinde motor grubunun yönü değiştirilerek b) Block on disk veya silindir üstü pim deneyleri yapılabilmektedir [103].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

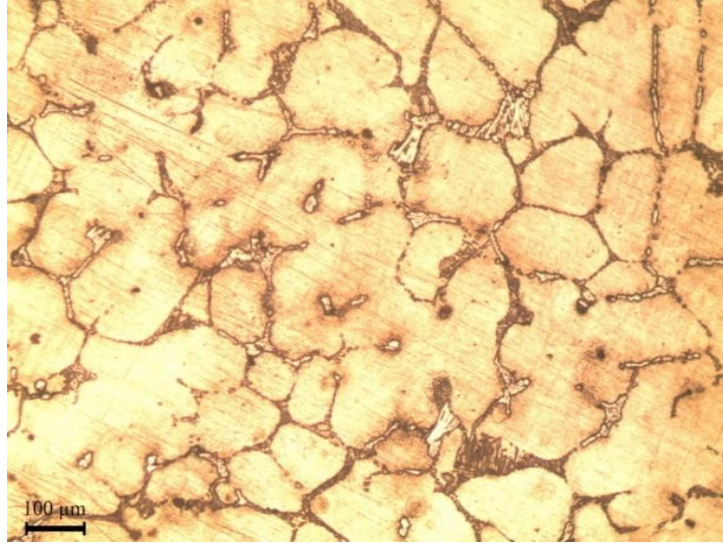
Bu çalışmada, döküm (orjinal) haldeki çeşitli koşullarda borlama ısı işlemine tabi tutulmuş DIN1.4849 (G-X40NiCrSiNb 38-18) kalite çelik numunelerin korozif aşınma davranışları incelenmiştir.

Borlama deneylerinde, döküm halinde temin edilen DIN 1.4849 kalite çeliğin bileşimi Çizelge 5.1’de verilmiştir. Korozif aşınma davranışını incelemeye önce deneylerde kullanacağımız döküm (orjinal) haldeki DIN 1.4849 (G-X40NiCrSiNb 38-18) kalite çeliğe uygulanan mikroyapı ve mekanik özelliklerdeki değişim kısaca aşağıda özetlenmiştir.

Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan DIN 1.4849 çelik malzemenin kimyasal bileşimi.

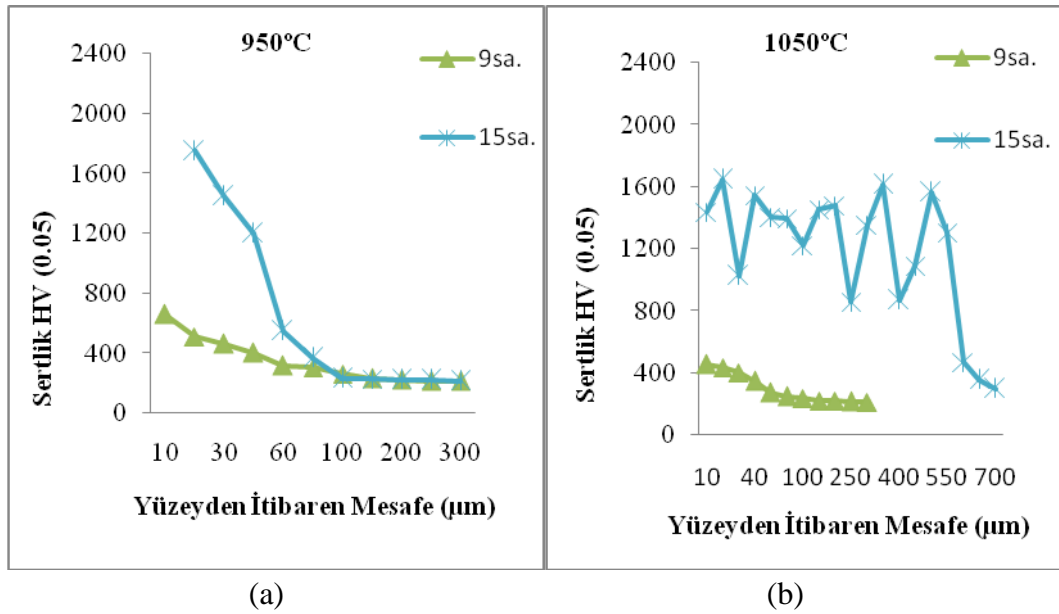
Element	C	Ni	Cr	Si	Nb	Mn	P	Mo	Al	Cu	Co	Fe
%Ağırlık	0,34	39,2	19,3	1,1	0,94	0,39	0,03	0,04	0,02	0,09	0,03	Kalan

İncelenen çeliğin mikroyapısında (Şekil 5.1) beyaz renkli matris ve dendirit tane sınırlarında çökelmiş karbürler bulunmaktadır [104].



Şekil 5.1. DIN 1.4849 kalite çeliğin orjinal mikroyapı görüntüsü [104].

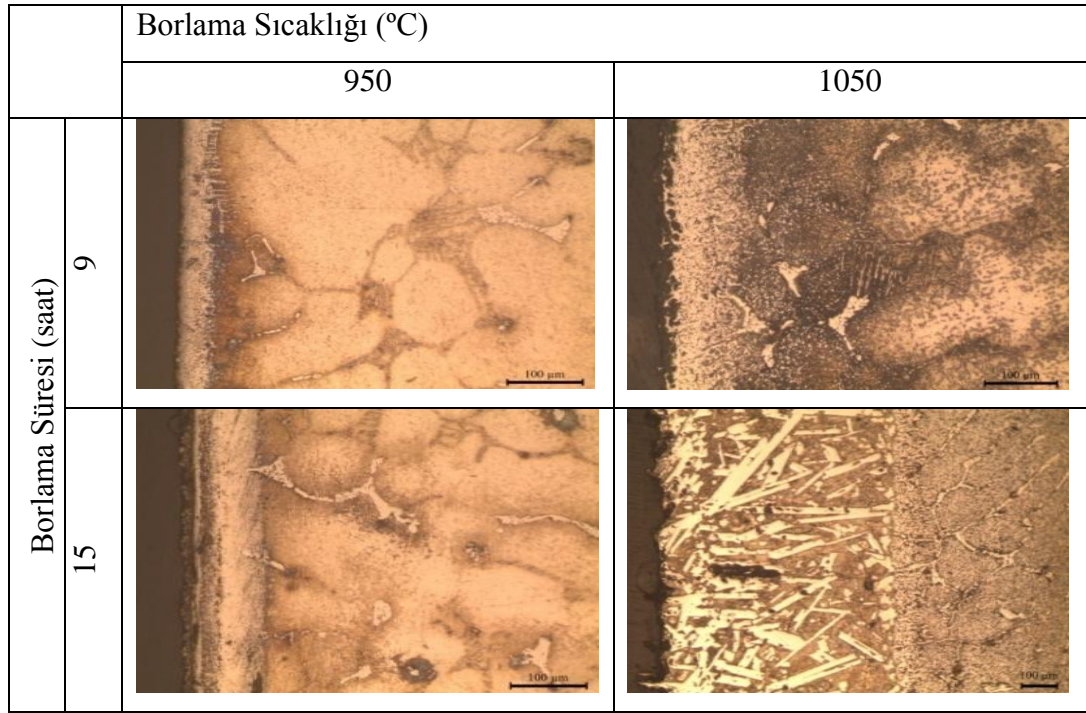
950 ve 1050°C de 9 ve 15 saat süreyle borlama işlemi uygulanmış numunelerde sertlik ölçme işlemleri yüzeyden itibaren matrise kadar, belirli mesafelerde yapılmıştır. Şekil 5.2’de 950 ve 1050°C’de 9 ve 15 saatte borlanmış olan orjinal numunelerin sertlik dağılımları verilmektedir [104].



Şekil 5.2. 9 ve 15 saatte borlanmış olan orjinal numunelerin a) 950°C, b) 1050°C’de numunelerin sertlik dağılımları [104].

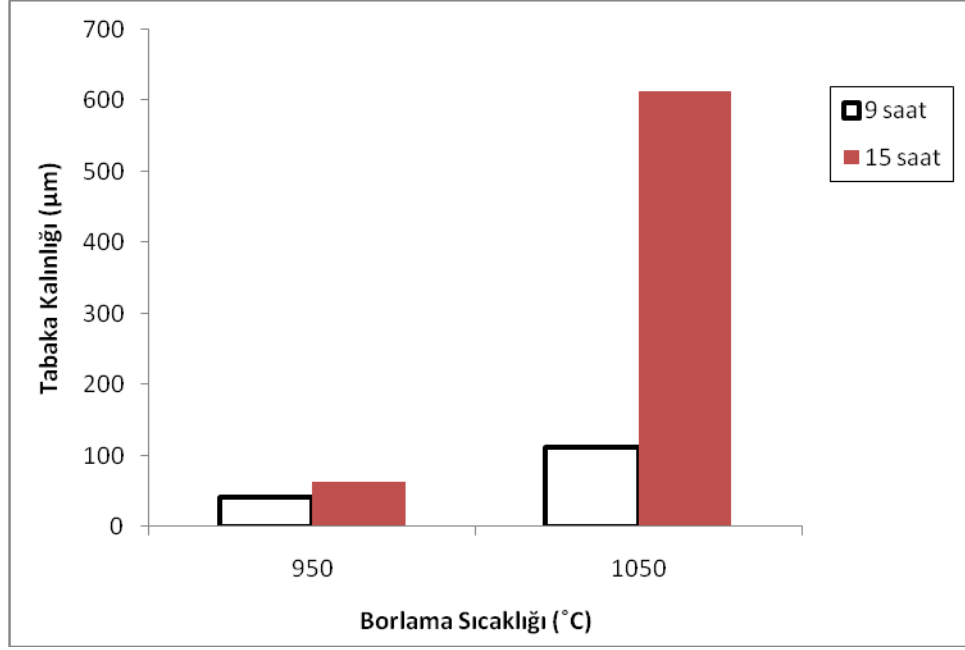
Şekil 5.2’den de görüleceği gibi yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak sertlik değerleri giderek düşmektedir. En yüksek sertlik değeri yüzeye yakın ve borca en zengin bölge olan yerde elde edilmiştir. Genel olarak süre ve sıcaklığın artmasıyla birlikte sertlik değerleri de artmıştır [104].

Orjinal numunelerin 950 ve 1050°C’de 9 ve 15 saat borlanması ile oluşan borür tabakalarının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin mikroyapı görüntüleri Şekil 5.3’te verilmiştir [104]. İncelenen numunelerden düşük sıcaklıklarda bor tabakası meydana gelirken yüksek sıcaklıklarda ve yüksek sürelerde perlitik görünümlü yapı oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5.3. Orjinal numunelerin 950°C ve 1050°C’de 9 ve 15 saat borlanmasıyla elde edilen bor tabakasının metalografik olarak hazırlanan kesitlerinin mikroyapı görüntüleri [104].

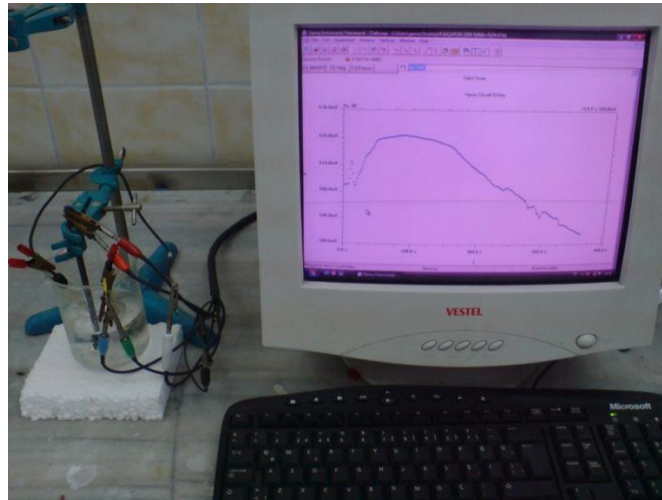
950 ve 1050°C sıcaklıkta 9 ve 15 saat süre ile borlanan orjinal numunelerin borür tabaka kalınlıklarının süreye bağlı olarak değişimleri Şekil 5.4’te verilmiştir [104]. Sıcaklık ve süre artışına bağlı olarak borür tabaka kalınlıkları artmaktadır [104]. İncelenen numunelerde yaklaşık 111,1 µm kalınlığa kadar bor tabakası oluşurken 643 µm kalınlığında perlitik görünümlü yapı görülmektedir.



Şekil 5.4. 950 ve 1050°C sıcaklıkta 9 ve 15 saat süre ile borlanan orjinal numunelerin borür tabaka kalınlıkları [104].

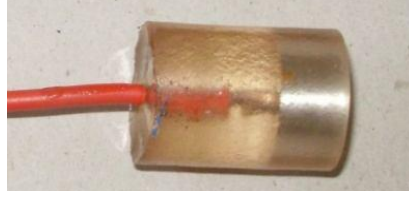
5.1. KOROZYON DENEYLERİ

Potansiyodinamik korozyon deneyleri, DC105 Korozyon Analiz yazılımına sahip bilgisayar kontrollü Gamry model PC4/300mA potansiyostat/galvonostat cihazı (Şekil 5.5) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



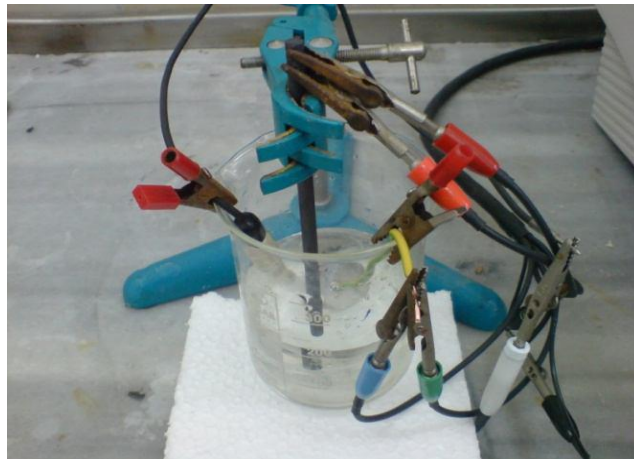
Şekil 5.5. Potansiyodinamik Polarizasyon deneylerinde kullanılan potansiyostatik yöntemle çalışan statik korozyon deney düzeneği.

Korozyon deney numuneleri Şekil 5.6' da 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. Elektrik iletkenliği için bor yüzeylerinin reçine ile kaplanmamasına özen gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Korozyon deneylerinde kullanılan çalışma elektrotu.

Deney hücresi olarak 400 ml beher kap kullanılmış olup kap içerisinde korozyon çözeltisi olarak %10 HCl çözeltisi yer almaktadır. Deneyler oda sıcaklığında yapılmış olup deney hücresi içerisine çalışma elektrotu olarak $0,276 \text{ cm}^2$ sabit yüzey alanına sahip incelenen alaşımlar, karşı elektrot görevini yapan 6 mm 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 5.7).



Şekil 5.7. Statik korozyon deney hücresi.

Korozyon deneyleri sırasında elektrolit içine çalışma elektrodu 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 mV'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.

Potansiyodinamik polarizasyon deneyleri sonrasında numuneler, çözelti içerisinden çıkartılarak saf su ortamında 5 dakika süre ile temizlenmiş ve ardından alkol ile durularak kurutulmuştur.

5.2. KOROZİF AŞINMA DENEYLERİ

5.2.1. Korozif Aşınma Deneyleri İçin Numune Hazırlama

Dökme DIN 1.4849 kalite çelik orijinal çelik malzemeden borlama ve korozif aşınma deneyleri için 25x15x9 mm ebadlarında deney numuneleri kesilerek çıkartılmıştır.

Borlama ısıl işlemi, döküm halinde orijinal numunelere, katı ortamda ticari Ekabor2 toz karışımı kullanılarak atmosferik şartlarda yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan borlama ısıl işlem süresi ve sıcaklığı, sırasıyla 9-15 saat ve 950-1050°C arasındadır.

Borlama işleminde AISI 304 kalite 3mm kalınlığında paslanmaz çelik saçdan yapılmış; 120mm çapında, 80mm yüksekliğinde silindirik ağzı kapaklı kap kullanılmıştır. Borlama tozu ile doldurulmuş olan kap içerisine, yüzeyleri 800 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 Magma Therm marka sıcaklık kontrollü elektrikli direnç fırınına yerleştirilmiştir (Şekil 5.8). Borlama sonrasında numuneler oda sıcaklığına kadar pota içerisinde havada soğutulmuştur. Numune suda yıkanarak temizlenmiştir.

Orjinal numuneler, borlama ısıl işlemi sonrasında karakterizasyon işlemlerine tabi tutulmuştur.



Şekil 5.8. Magma Therm marka sıcaklık kontrollü elektrikli direnç fırını.

5.2.2. Korozif Aşınma Deney Parametreleri

Korozif aşınma deneyleri, levha üzerinde bilye temas geometrisine sahip korozif aşınma deney cihazında (Şekil 5.9) gerçekleştirilmiştir. Korozif aşınma deneyleri, numune yüzeyine 6 mm çapında A316 bilyenin sürtünmesi ile yapılmış olup, hareket uzunluğu ve toplam kayma mesafesi sırasıyla 15 mm ve 500 m'dir. Numunelerin ağırlık kayıpları, 1 saat aralıklarla toplam 5 saat süre içerisinde önce ultrasonik daldırma cihazında (Şekil 5.10) saf su ile temizlenerek kurutuldu ardından 0,1 mg hassasiyete sahip elektronik terazide (Şekil 5.11) ölçüldü. Aşınma deneyi sonrasında numune yüzeyleri üzerinde gelişen aşınma izleri stereo mikroskop (TRONIC-ZTX-E) ile incelenmiştir (Şekil 5.12). Aşınma iz uzunluğunun tam orta noktasında numuneler ikiye kesilerek aşınma izinin kesit görüntüsü hem stereo mikroskop hem de optik ışık mikroskobu (Şekil 5.13) ile incelenmiştir. Borlanmış numune yüzeyleri yüzeye dik bir şekilde disketon ile kesildikten sonra kesitten bakalıte alınan numuneler standart yöntemlerle zımparalandıktan sonra sırası ile 1 μm Al_2O_3 solüsyonu ve 0.5 μm elmas pasta ile parlatılmıştır ve ardından parlatılan numuneler

kral suyu($3 \text{ HCl} + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{NOCl (aq)} + \text{Cl}_2 \text{ (aq)} + 2 \text{ H}_2\text{O(l)}$) ile dağlanmıştır. Mikroyapısal incelemeler, bilgisayar donanımlı Leica marka DMILM model optik ışık mikroskobu kullanılarak yapılmıştır.

Aşınma deneyleri bir kap içine konan, konsantrasyonu %10 HCl olan korozif ortamda gerçekleştirilmiştir. Korozif aşınma deneyleri 30 mm/sn kayma hızında 40N yük altında gerçekleştirilmiştir.



şekil 5.9. Korozif aşınma deneylerinde kullanılan deney cihazı.



şekil 5.10. Numune temizleme işlemlerinde kullanılan BEB marka ultrasonik temizleme cihazı.



Şekil 5.11. Ağırlık kayıplarının belirlenmesinde kullanılan Precisa marka XS 220A model hassas terazi.



Şekil 5.12. TRONIC-ZTX-E marka stereo mikroskop



Şekil 5.13. Mikroyapı incelemelerinde kullanılan Leica DM ILM model optik ışık mikroskobu.

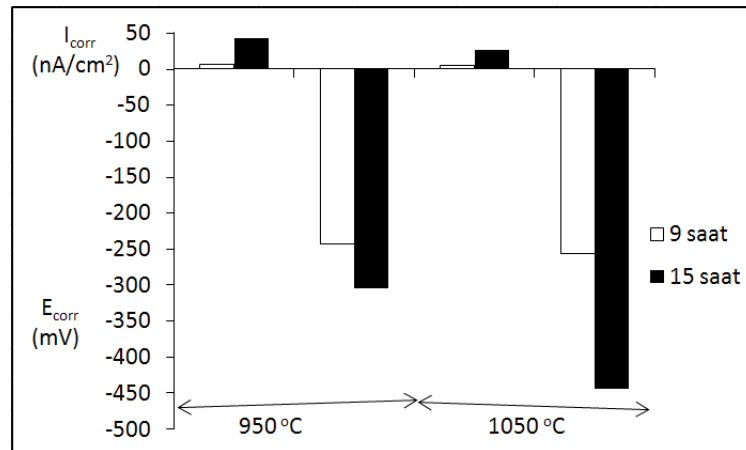
Son olarak aşınma mekanizmalarının belirlenmesi için stereo mikroskopun yanı sıra EDS bağlantılı taramalı elektron mikroskobu Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM cihazından da yararlanılmıştır.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. KOROZYON DENEY SONUÇLARI

%10 HCl çözeltisinde gerçekleştirilen protansiyodinamik polarizasyon testlerinden elde edilen I_{corr} ve E_{corr} sonuçlarının borlama sıcaklığı ve süresi ile ilişkili olarak değişimi Şekil 6.1’de verilmiştir. İncelenen numunelerde en düşük akım değeri 1050°C de 9 saat borlanan numunede $5,40 \text{ nA/cm}^2$ değerinde elde edilirken en yüksek akım değeri ise 950°C de 15 saat borlama koşullarında $43,20 \text{ nA/cm}^2$ değerinde bulunmuştur. En düşük ve en yüksek korozyon potansiyelleri ise sırasıyla $1050^{\circ}\text{C}/15\text{saatte}$ -443 mV ve $950^{\circ}\text{C}/9\text{saatte}$ -243 mV olarak ölçülmüştür. Belirli bir borlama sıcaklığında borlama süresinin artması ile korozyon potansiyeli düşerken korozyon akım değerleri farklılık göstermiştir. İncelenen borlama sıcaklıklarında borlama süresinin artması ile korozyon akımı artış göstermiştir. Kabadayı [104], %10 H_2SO_4 çözeltisi içerisinde belirli bir sıcaklıkta borlama süresi ile korozyon akımının arttığını, bu çalışma ile uyumlu olarak bulunmuştur.

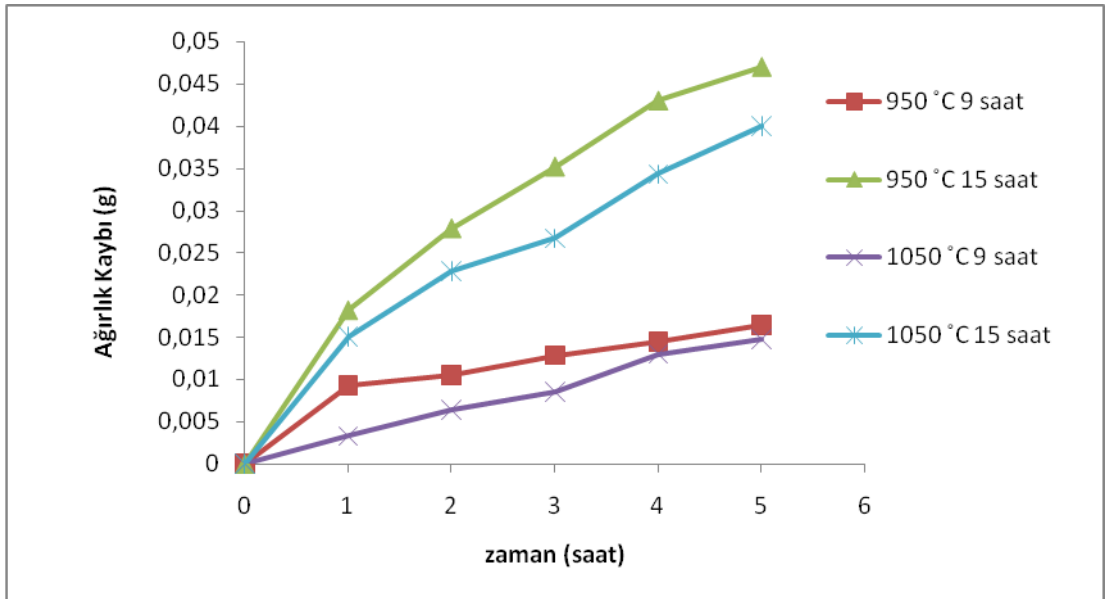


Şekil 6.1. 950°C ve 1050°C 'de 9 ve 15 saatte borlanmış olan orjinal numunelerin %10 HCl çözeltisi içinde E_{corr} ve I_{corr} değerlerindeki değişim.

Bu çalışmada 1050°C/15saat borlama koşullarında korozyon direncinin düşük olması borlama işlemi ile yüzeyde oluşan perlitik görünümlü yapıya dayandırılabilir. Kabadayı [104], 950°C/15saat borlama koşulunda korozyon direncinin düşük olmasını XRD analiz sonuçları ile açıklamıştır. Yüzeyde Ni ve Si elementlerince zengin bir bor tabakasının oluşması korozyon hızını artırmıştır [104,105].

6.2. KORUZİF AŞINMA DENEYLERİ SONUÇLARI

İncelenen farklı süre ve sıcaklıklardaki numunelerin %10 HCl çözeltisi içerisinde yapılan koruzif aşınma deneyleri sonucu, birim zamanla gerçekleşen ağırlık kayıplarının değişimi Şekil 6.2’de verilmiştir. Şekil 6.2’den görüldüğü gibi belirli bir süre için en yüksek ağırlık kaybı 950°C/15saat borlama parametresinde gözlenirken en düşük ağırlık kaybı 1050°C/9saat borlama koşulunda elde edilmiştir.



Şekil 6.2. %10 HCl çözeltisi içerisinde 40 N’da 1’er saat aryla alınan aşınma ağırlık kayıpları grafiği.

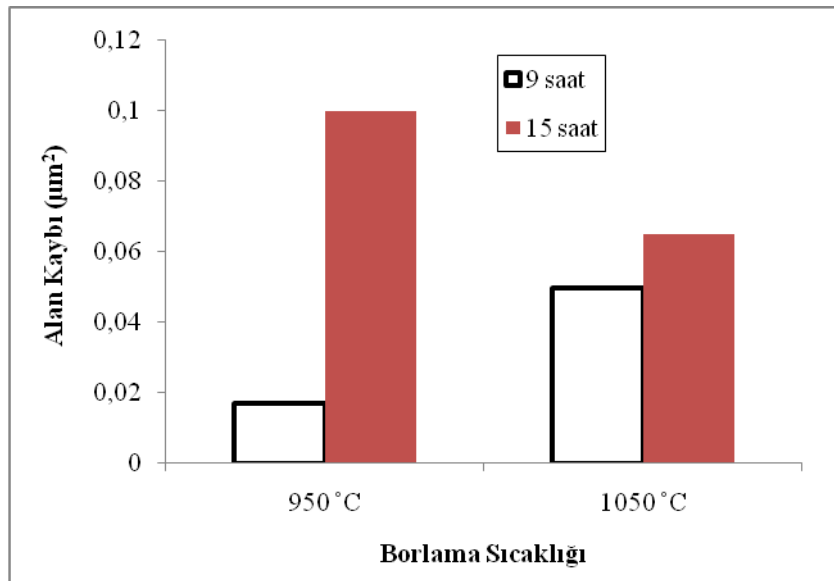
950°C ve 1050°C sıcaklıklarda ve 15’er saat borlama prosesi ile borlanmış numunelerin yüzey sertliğinin yüksek olmasına karşın koruzif aşınma deneyi sırasında ağırlık kaybının yüksek olması numunenin korozyon davranışı ile açıklanabilir. Şekil 6.1’de görüldüğü gibi uzun borlama sürelerine tabi tutulan bu numunelerin I_{corr} (nA/cm^2) değerleri yüksek ve E_{corr} değerleri ise düşüktür.

Bradın, korozif aşınma direncinin düşük olması korozyon hızının yüksek olmasına dayandırılabilir.

Aşınma deneyi sonrası yüzeyde oluşan aşınma izleri stereo mikroskopla incelenmiştir (Şekil 6.3). Numune yüzeyinde oluşan izin 2 boyutlu görünümünden hesaplanan aşınma iz alan kayıpları borlama koşulu ile birlikte Şekil 6.4’de verilmiştir. Ağırlık kaybı sonuçları ile uyumlu olarak korozyon direnci düşük olan numunelerin alan kaybı, diğerlerine kıyasla yüksektir.

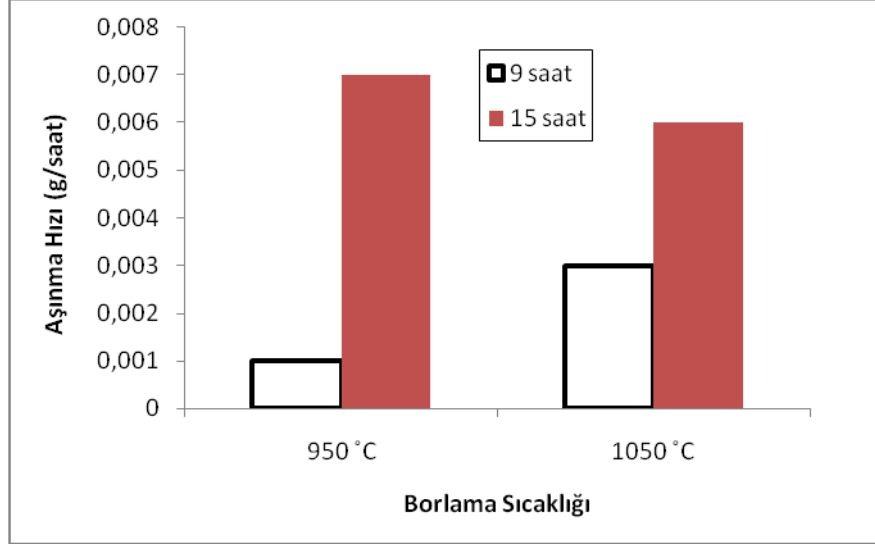


Şekil 6.3. Aşınma deneyi sonrası oluşan aşınma a) iz genişliği ve b) derinliğinin ölçümü.



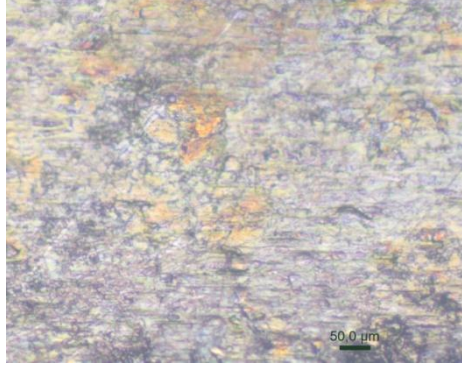
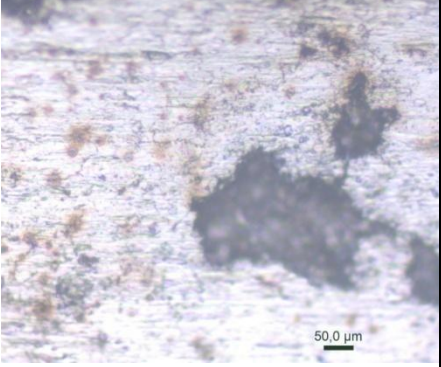
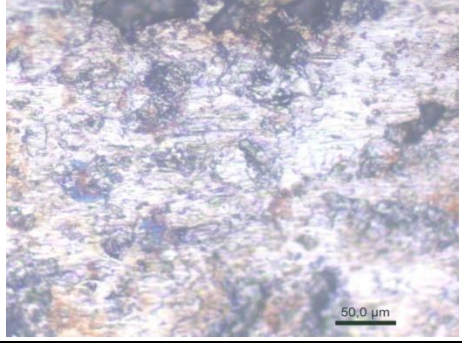
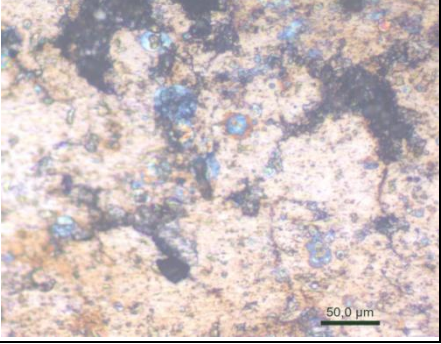
Şekil 6.4. %10 HCl çözeltisi içerisinde 40 N’da hesaplanan aşınma iz alan kayıpları grafiği.

Şekil 6.2’de verilen “Ağırlık kaybı (g) - zaman (saat)” grafiğinin kararlı durum bölgesinin eğimi g/saat cinsinden aşınma hızını verir. Belirlenen aşınma hızlarının borlama koşuluna göre değişimi Şekil 6.5 de verilmiştir. Aşınma hızı sonuçları, alan kaybı sonuçları ile uyumludur.



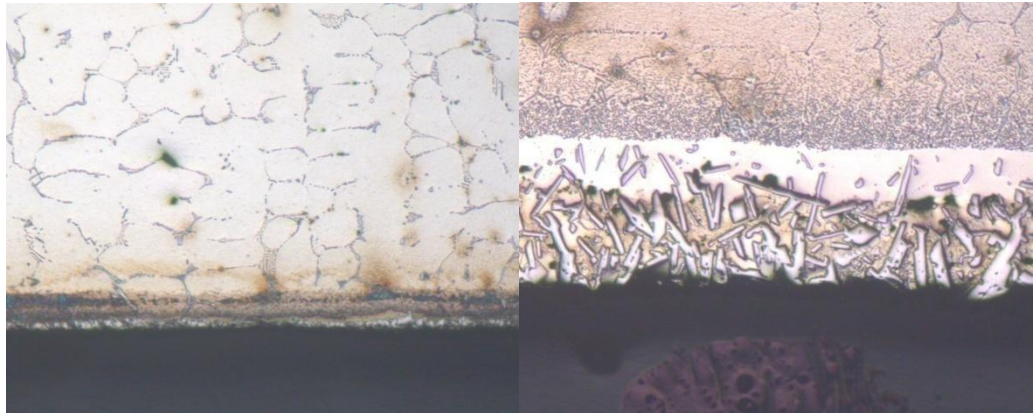
Şekil 6.5. Borlama parametrelerine göre aşınma hızının değişimi.

%10 HCl çözeltisi içerisinde yapılan aşınma deneyleri sırasında numune yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.6’da verilmiştir. Aşınma, yüzeyde bilye hareketi ile birlikte adhesif (yapışma) izlerinin oluşumu ve korozyon ortamından dolayı oyuk oluşumu ile birlikte gerçekleşmiştir. İncelenen numunelerin korozyona dirençlerinin azalması ile oyuk oluşumu artmıştır. Korozyona karşı direnci az olan 15’er saat borlama işlemine tabi tutulmuş numunelerdir. Bu numunelerin aşınma direnci düşüktür. Şekil 6.6’dan yapışan tabakanın yer yer kalktığı gözlenmektedir.

Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi (saat)	
	9	15
950		
1050		

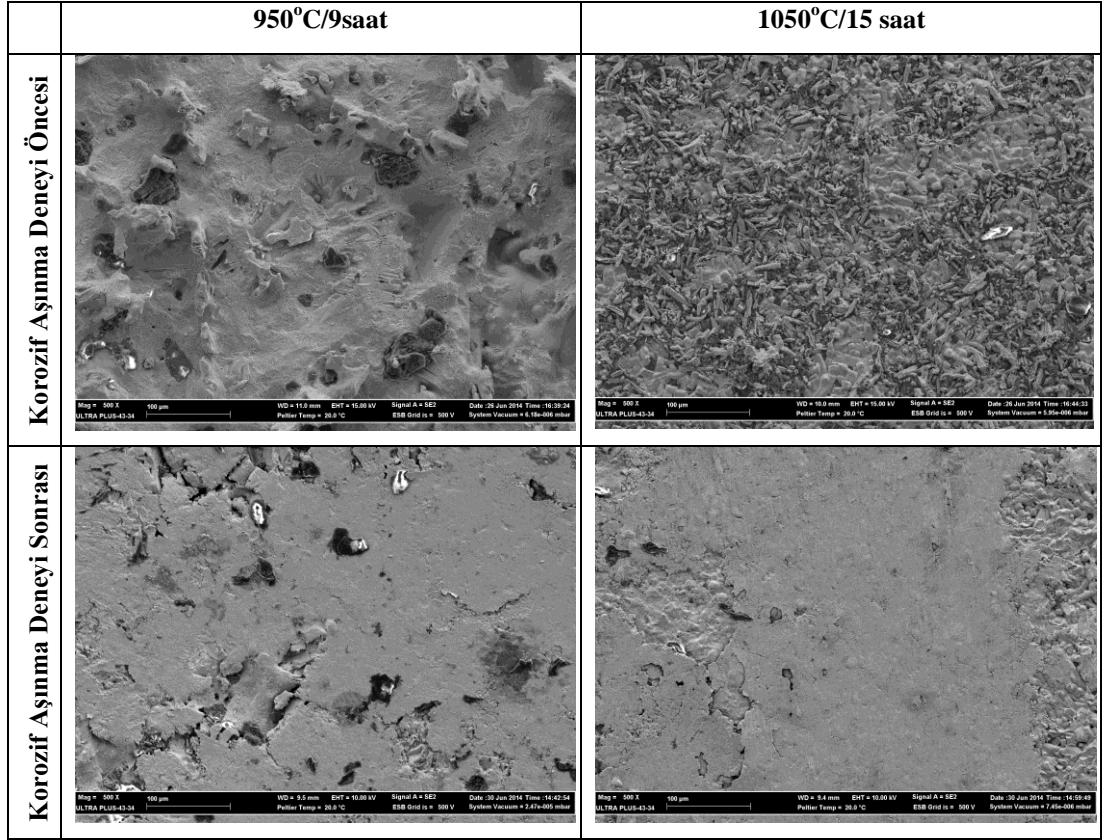
Şekil 6.6. %10 HCl'de farklı süre ve sıcaklıklarda borlanan numunelerin aşınma deneyleri sonrasında yüzeyden aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 6.7'de aşınma deneyi sırasında oluşan izin uzunlamasına kesitinden alınan optik ışık mikroskobu görüntüleri verilmektedir. Buradan 5 saat aşınma deneyi sonunda oluşan izin ancak bor tabakası içinde kaldığı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.7. %10 HCl'de farklı süre ve sıcaklıklarda borlanan a) 950°C/9saat ve b) 1050°C/15saat koşullarında borlanmış numunelerin aşınma deneyleri sonrasında kesitten aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 6.8’de 950°C/9saat ve 1050°C/15saat koşullarında borlama uygulanmış numunelerin korozif aşınma deneyi öncesi ve sonrası yüzey SEM görüntülerini vermektedir. SEM görüntüleri, aşınmanın yüzey pürüzlülüklerinin yapışarak adhesif aşınma mekanizması ile gerçekleştiğini göstermektedir. Yüzeğe yapışan tabakadan alınan EDS analizlerinde, Cr, Fe, N, ve Mo pikleri gözlenmiştir. Bu sonuç, yapışan tabakanın çoğunlukla karşı malzemeye (A316 bilye) ait olduğunu göstermektedir. 1050°C/15saat koşullarında borlandırılmış numunenin aşınmış yüzey görünümüne kıyasla 950°C/9saat borlandırılmış numunenin yüzeyinde aşınma deneyinden sonra kalın sıvanmış tabakanın bulunması aşınmaya karşı direncini artırdığı düşünülmektedir.



Şekil 6.8. %10 HCl’de farklı süre ve sıcaklıklarda borlanan numunelerin korozif aşınma deneyleri öncesi ve sonrasında yüzeyden aşınma izlerinin SEM görüntüleri.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Orjinal ve çözeltiliye alınmış halde, iki farklı sıcaklıkta (950°C ve 1050°C) ve sürede (9 ve 15 saat) borlama işlemine tabi tutulmuş DIN 1.4849 kalite çeliğin korozif aşınma davranışına bor tabakasının etkisinin incelendiği bu çalışmadan aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir.

- a) Sabit borlama sıcaklığında borlama süresinin artması ile aşınma hızı artmıştır.
- b) Korozif aşınma davranışı mekanik özelliklerinden çok korozyon davranışına bağlıdır. Yüzey sertliği yüksek fakat korozyon direnci düşük olan numunelerde aşınma hızı yüksektir.
- c) Genel olarak perlitik görümlü bir yapının oluşması sertliği artırmasına rağmen korozif aşınma direncini düşürmektedir.
- d) Korozif aşınma, adhesif aşınma mekanizması ile meydana gelmiştir. Yüzeyde oluşan yapışmış tabakanın kalınlığı arttıkça aşınma hızı düşmüştür.

Bu çalışmada yüksek krom ve nikelli DIN 1.4849 kalite çeliğe 950 ve 1050°C'de 9 ve 15 saat süre ile katı-toz ortamda borlama ısıl işlemi ile korozif aşınma davranışının değişimi incelenmiştir. İleride yapılacak çalışmalar da borlama işleminin süresi ve sıcaklığı değiştirilerek farklı borlama ortamlarında, farklı çözeltilerde ve farklı yüklerde korozif aşınma deneyleri gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Bindal, C., “Az alaşımlı çelikler ve ticari karbon çeliklerinde borlama ile yzeye kaplanan borur tipi seramik kompozitlerin bazı ozelliklerinin tespiti”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1991).
2. Babushkin, B. V., and Polyakov, B. Z., “Residual stresses in steel after boriding from melts”, *Met. Sci. Heat Treat.*, 15: 577-580 (1973).
3. Badini, C., Gianoglio, C., and Paradelli, G., “The effects of carbon, chromium and nickel on the hardness of borided layers”, *Surfaces and Coatings Technology* 30 (2): 157-170 (1987).
4. Badini, C., Gianoglio, C., and Pradelli, G., “Borurazione di acciai: contribute allo studio del meccanismo di diffusione del boro”, *La Metallurgia*, Italiana, 10: 747-756 (1987).
5. Aves, W. L. Jr., “Pack composition for carburizing ferrous substrates”, *U.S. Patent Documents*, U.S.A, Patent Numarası: 4,539,053, (1985).
6. Sinha, A. K., “Boriding (Boronizing)”, J. Heat Treating, Vol. 4, *ASM Int.*, Ohio, U.S.A, 437-447 (1991).
7. ASM., “Heat resistance casistance casting”, Properties and Selection of Metals, Vol. 1, *ASM Institute*, Ohio, U.S.A., 269 (1990).
8. Miller, A. E., “Wear in steels”, *Journal of Metals*, 35: 56-62 (1983).
9. Hutchings, I. M., “Wear-resistance materials: into the next century”, *Materials. Science and Technology A*, 184: 185-195 (1994).
10. Lefevre, J., “Stainless Steels selection criteria for different applications”, Stainless Steels, *Les Editions de Physique*, France, 917-937 (1993).
11. Fadhila, A. F., and Rios, P. R., “Decomposition of austenite in austenitic stainless steels”, *ISIJ Int.*, 87 (42): 325-337 (2002).
12. Odabaş, C. “Paslanmaz eliklerin temel ozellikleri, kullanım alanları ve kaynak yöntemleri”, *Kaynak Tekniği Sanayi ve Ticaret A.ř.*, İstanbul, 15 (3): 59 (2007)
13. İnternet: Paslanmaz elikler, “Yüksek Krom ve Nikel Alaşımlı elikler”, <http://www.subarcflux.com/highalloy2.html> (2013).
14. Kotechi, D. J., “A martensite boundary on the WRC-1992 diagram”. *Weiding Research Supplement*, Ohio, U.S.A, 32: 180-191 (1999).

15. ASM, "Phase Diagrams, Vol. 3", *ASM Int.*, Materials Park Ohio, U.S.A., 1-446 (1992).
16. Davis, J. R., "Stainless Steels in ASM Speciality Handbook", *ASM Int.*, Ohio, U.S.A., 3-321 (1994).
17. Honeycombe, R. W. K., "Steels; Microstructure and Properties", *Edward Arnold LTD.*, London, 24-102 (1981).
18. Asensio, J., Pero-Sanz, J. A., Plaza D., and Verdeja I. J., "Microstructural selection criteria for cast irons with more than 10% Cr for wear applications", *Materials Characterization*, 49 (2): 83-93 (2002).
19. Kundrat, D. M., Chochal, M., and Elliot, J. F., "Phase relationships in the Fe-C-Cr system at solidification temperatures", *Metall Trans.*, 15 (4): 663-676 (1984).
20. Anderson, J. O., "A thermodynamic evaluation of the Fe-Cr-C system", *Metall Trans.*, 19 (3): 627-636 (1988).
21. Özdoğru, E., "Cr-Co-Ni süper alaşımın yüksek sıcaklık oksidasyon ve karbürüzyon davranışı", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-45(2002).
22. Davis, J. R., "Heat Resistance Materials", *ASM Int.*, Ohio, U.S.A., 211-425 (1997)
23. Elliot, P., "Choose Materials for High Temperatures Environments", *CEP.*, U.S.A, 75-81 (2001).
24. Sun, Y., "Yüksek krom ve nikelli çeliklerin aşınma davranışlarının incelenmesi", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-6 (2004).
25. Cortie, M. B., and Premachandra, K., "Microstructural development and abrasion-resistance of an experimental ferrite-sigma alloys", *Scripta Metallurgica et Materialia*, 47: 1847-1852 (1992).
26. Unterwiser, P. M. Boyer, H. E., and Kubbs, J. J., "Heat treater's guide; standards, practices and procedures for steel", Heat Treating, Vol. 3, *ASM Institute*, Ohio, U.S.A., 418 (1992).
27. İnternet: Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, "Bor Elementi", <http://www.boren.gov.tr/icerik.php?id=24> (2013).
28. TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası., "Bor raporu", *Metalurji Dergisi*, Ankara, 134: 11- 72 (2003).
29. Matuschka, A. G., "Boronizing", *Carl Hanser Verlag*, München Wien, 28-64 (1980).

30. Fitch, W., Trausner, N., and Matuschka, A. G., “Boronizing with Ekabor”, *ESK GmbH*, 12-27 (1988).
31. Hocking, M. G., Vasantasree, V., and Sidky, P. S., “Metallic and Ceramic Coatings”, *John Villey & Sons Inc*, Newyork, 1-3 (1989).
32. Şen U., “Küresel grafitli dökme demirin borlanması ve özellikleri”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1997).
33. Cabeo, E. R., Laudien, G., Biemer, S., Rie, K. T., and Hoppe, S., “Plasma-assisted boriding of industrial components in a pulsed D.C. glow discharge”, *Surface and Coating Technology*, (116–119): 229–233 (1999).
34. Özbek, I., “Borlama yöntemi ile (AISI M50, AISI M2) yüksek hız çeliklerinin ve AISI W1 çeliğinin yüzey performanslarının geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 10 (1999).
35. Küper, A., Qiao, X., Stock, H. R. and Mayr, P., “A novel approach to gas boronizing”, *Surface and Coating Technology*, 130 (1):87-94 (2000).
36. Kaestner, P., Olfe, J., and Rie, K. T., “Plasma-assisted boriding of pure titanium and TiAl6V4”, *Surface and Coating Technology*, 142-144: 248-252 (2001).
37. Yapar, U., “Düşük ve orta karbonlu çeliklerin termokimyasal borlama ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2003).
38. Bozkurt, N., “Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1984).
39. Taşcı, A., “Borlanmış çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 45 (1993).
40. Uzun, H. A., “Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 5-21 (2002).
41. Çetin M., “Borlanmış hadfield çeliklerinin aşınma dayanımını incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 8-26 (2003).
42. Özsoy, A., “Çeliğin borlanmasında borür tabakası, geçiş zonu ve ana matriksin özelliklerinin iyileştirilmesi”, Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 101 (1991).
43. Selçuk, B., İpek, R., and 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).

44. 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*, 209 (4): 1770-1782 (2009).
45. Çelikyürek, I., Baksan, B., ve Gürler, R., "Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması", *II. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Eskişehir, 12-39 (2004).
46. Aydemir, T., ve Şen, U., "Borlanmış soğuk iş takım çeliklerinin aşınma davranışları", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 28-31, (2003).
47. Karaman, Y., "Endüstriyel borlama ve tekstil endüstrisinde bir uygulama", Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 12 (2003).
48. Tezcan, R., "Borlama işlemi ve endüstriyel uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 2-39 (1996).
49. Cutler, R. A., "Engineering properties of borides", Ceramic and Glasses Engineering Materials Handbook, Vol. 4, *ASM Int.*, Ohio, U.S.A., 787-803 (1991)
50. Massalski, Th., B., "Binary Alloy Phase Diagrams, Vol. 3", *ASM Int.*, Ohio, U.S.A., 422-446 (1986).
51. Halleman, B., Wollants, P., and Roos, J. R., "Thermodynamic reassessment and calculation of the Fe-B phase diagram", *Z. Metallkunde*, 85: 676-682 (1994).
52. Yapar, U., Başman, G., Arısoy, C.F., ve Şeşen, M.K., "Çeliklerde borlamayoluyla yüzey sertleştirme", *Metal Dünyası*, 115: 69-74 (2002).
53. Soydan, Y., "Katı ortamda bor yayılımı ile sertleştirilen çelik yüzeylerinin kuru kayma halinde sürtünme ve aşınma davranışları", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 80-94 (1996).
54. Brakman, C. M., Gommers, A. W. J., and Mittemeijer, E. J., "Boriding of iron and Fe-C, Fe-Cr, Fe-Ni alloys: Boride layer kinetics", *J. Materials Research*, 4 (6): 1354-1370 (1989).
55. Campos, I., Oseguera, J., Figueroa, U., Garcia, J. A., Bautista, O., and Kelemenis, G., "Kinetic study of boron diffusion in the paste boriding process", *Materials Science & Engineering A*, 352 (1-2): 261-265 (2003).
56. Carbucicchio, M., Badini, C., and Palombarini, G., "Mossbauer and metallographic analysis of borided surface layers on Armco iron", *J. Materials Science*, 15 (3): 711-719 (1980).

57. Palombarini, G., and Carbucicchio, M., "On the morphology of thermochemically produced Fe₂B/Fe interfaces", *J. Materials Science Letters*, 3: 791-794 (1984).
58. Xu, C. H., Gao, W., and Yang, Y. L., "Superplastic boronizing of a low alloy steel-microstructural aspects", *J. Materials Processing Technology*, 108: 349-355 (2001).
59. Carbucicchio, M., Badini, C., and Samboga, G., "On the early stages of high purity iron boriding with crystalline boron powder", *J. Materials Science*, 15 (6): 1483-1490 (1980).
60. Rus, J., Luis C., and Tsipas, D. N., "Boronising of 304 steel", *J. Materials Science Letter*, 4: 558-560 (1985).
61. Galibois, A., Boutekno, O., and Voyzele, B., "Mechanisma de formation des couches borurees sur les aciers a haut, Carbone-II, Technique des poudres", *Acta Met.*, 28: 1765-1771 (1980).
62. Sighnal, S.C., "A hard diffusion boride coating for ferrous materials", *Thin Solid Films*, 45 (2): 321-329 (1977).
63. Kunst, H., Schaaber, O., "Beobachtungen beim oberflächen borieren von stahl III", 22 Heft, *HTM*, 4: 275-292 (1967).
64. Lovshenko, F. G., Vysotskii, V. T., Voroshnin, L. G., and Lovshenko, Z. M., "Diffusional boronizing of sintered steels", *Sov. Powder Metall. Met. Ceram*, 17: 113-115 (1978).
65. Berzina, I. G., Gusev, E. B., Fedina, G. N., and Fedin, V. M., "Investigation of boron diffusion during boronizing of engineering steel 45", *Phys. Met. Metall*, 57: 81-84 (1984).
66. Lu, M. J., "Die bildungs und wachstums kinetik monophsiger boridschichten", *HTM*, 38: 156-168 (1983).
67. Goerriot, P., Fillit, R., Thevenot, F., Driver, J. H., and Bruyas, H., "The influence of alloying element additions on the boriding of steels", *Materials Science and Engineering*, 55 (1): 9-19 (1982).
68. Blazon, M., Stanojevic, B., and Veljkovic, V., "Effect of alloying elements on the the formation of boride layer on steel", *Scripta Metallurgica*, 9: 1153-1156 (1975).
69. Selçuk, B., Ipek, R., and 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).

70. Rus, J., Luis C., and Tsipas, D. N., "Boronising of 304 steel", *J. Materials Science Letter*,4: 558-560 (1985).
71. Carbucicchio, M., and Palombarini, G., "Effects of alloying elements on the growth of iron boride coatings", *J. Materials Science Letters*,6: 1149-1145 (1987).
72. Liliental, W., and Tacikowski, J., "Effect of heat treatment on the brittleness of boride layers on steel", *Industrial Heating*,47 (4): 34-36 (1980).
73. Özsoy, A., and Yaman, Y. M., "The effect of thermocycling liquid boronizing on the thickness of the boride layer and the transition zone", *Scripta Metallurgica et Materialia*, 29: 231-236, (1993).
74. Melendez, E., Campos, I., Rocha, E., and Baron, M. A., "Structural and strength characterization of steels subjected to boriding thermochemical process", *Materials Science & Engineering A*, (234-236): 900-903 (1997).
75. Yoon, J. H., Jee, Y. K., and Lee, S. Y., "Plasma paste boronizing treatment of the stainless steel AISI 304", *Surface and Coatings Technology*, 112: 71-75 (1999).
76. Özbek, I., and Bindal, C., "Mechanical properties of boronized AISI W4 steel", *Surface and Coatings Technology*, 154: (1) 14-20 (2002).
77. Şen, S., Özbek, I., Sen, U., and Bindal, C., "Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel", *Surface and Coatings Technology*, 135: (2-3) 173-177 (2001).
78. Bindal, C., and Üçışık, A. H., "Characterization of borides formed on impurity-controlled chromium-based low alloy steels", *Surface and Coatings Technology*, 122 (2-3): 208-213 (1999).
79. Gianoglio C. and Badini C., "Distribution equilibria of iron nickel in two phase fields of the Fe-Ni-B system", *J.Mater. Sci.*,21: 4331-4334 (1986).
80. Badini, C., Cianoglio, C. and Paradelli, G., "The effect of carbon, chromium and on the hardness of borided layers", *Surface and Coatings Technology*, 30 (2): 157-170 (1987).
81. Atik, E., "Farklı bir yüzey sertleştirme yöntemi", *Mühendis ve Makine.*, 482: 18-42 (1997).
82. Esen, E. "Çelik yüzeylerinin kaplanması", *Erdemir*, K. Ereğli, 9-11 (2006).
83. Çelikyürek, İ., "Demir alüminantların borlanması ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi", Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 107-108 (2006).

84. Soydaş, S., “Universal aşınma test cihazı tasarımı ve imalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 21-22 (2006).
85. Jareel, D. J., and Bejbl, F., “Understanding wear and friction in medical-grade stainless steels”, *Medical Device & Diagnostic Industry Magazine*, 92: 2-3 (1999).
86. Bhushan, B., “Introduction to tribology”, *Wear*, 12 (2): 332-333 (2002).
87. Simmons, J.W., Covino, B.S., Hawth, J.A., and Dunning, J.S., “Effect of nitride(Cr₂N) precipitation on the mechanical, corrosion and wear properties of austenitic stainless steel”, *ISIJ Institute*, 36 (24): 846-854 (1996).
88. 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).
89. Akbulut, H., “Malzemelerin Sürtünme ve aşınma ders notları”, *Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği*, Sakarya, 36-52(2006).
90. Sarıkaya, Ö., “Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri”, *Korozyon Derneği Yayını*, Ankara, 1-60 (2007).
91. Kaşkan, A., “Grafit katkılı nylon6(poliamid6)nın aşınma davranışlarının incelenmesi”, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 21-22 (2005).
92. Yıldızlı, K., Odabaş, D., ve Nair, F., “ Borlanmış AISI 1020 çeliğinin eroziv aşınma davranışlarının incelenmesi”, *BAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (3): 131-139 (2003).
93. İpek, R., ve Karamış, M, B., “Aşınma test yöntemleri ve gelişmeler”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 469 (21): 24-29 (1999).
94. Eş, M., “Dişli çark malzemelerinin aşınma karakteristiklerinin incelemesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 15-16 (2004).
95. Öz Saraç, U., “Endüstriyel yatak alaşımlarının aşınma davranışlarının karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 23-30 (1999).
96. Hutching, I. M., “Tribology: friction and wear of engineering materials”, *Materials Science and Metallurgy University of Cambridge*, Cambridge, 54 (12): 76-82 (1992).
97. Klaasen, H. And Kübarsepp, j., “Abrasive wear performance of carhide composites”, *Wear*, 261 (5): 520-526 (2006).

98. Taşgın, Y. ve Kaplan, M., “Dubleks tekniğiyle üretilen FeCrC katkı malzemenin abrasiv aşınma davranışlarının araştırılması”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 16 (1): 217-224 (2007).
99. 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).
100. 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).
101. 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).
102. Soydan, Y., ve Ulakan, L., “Triboloji”, *Teknoloji araştırma ve geliştirme merkezi teknolojik yayınlar serisi*, 5 (14): 35-40 (2003).
103. Blau, P. J. and Budinski, K. G., “Development and use of ASTM standards for wear testing”, *Wear*, 227 (2): 1159-1170 (1999).
104. Kabadayı, E., “Yüksek krom ve nikelli dökme çeliklerin mekanik ve korozyon özelliklerine yaşlandırma ve borlama ısı işleminin etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 83-106 (2013).
105. Su-qin, L., Jin-Hang, H., Shim-ring, W., and Qi-ming, D., “Effects of heat treatment on microstructure and hardness of laser clad niwcre alloy layer”, *Transactions of Materials and Heat Treatment Proceedings of the 14. Ifhtse Congress.*, He'nan, China, 25 (5): 1-4 (2004).

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Erzurum'un Pazaryolu ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini kestel musa firat coşkun ilkokulunda tamamladı. Bursa Emir Sultan Lisesi'nden mezun oldu. 2007 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Metal Öğretmenliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2011 yılında iyi derece ile mezun oldu. Bu dört yıllık eğitimi boyunca çeşitli seminerlere ve kurslara katılarak kendini geliştirdi. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programına halen devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Kale Mahallesi Uzun Cadde No:26

Kestel / BURSA

Tel : +90 530 490 8 490

E-posta : emrekalkan25@hotmail.com