



**AISI 1040 ÇELİĞİNİN YÜZEYİNDE
OLUŞTURULAN BORÜR TABAKASINA
DİFÜZYON TAVLAMASININ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Afra AKBOYA

Danışman

Doç. Dr. Yusuf KAYALI

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

Haziran 2023

Bu tez çalışması 21.FEN. BİL. 29 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**AISI 1040 ÇELİĞİNİN YÜZEYİNDE OLUŞTURULAN
BORÜR TABAKASINA DİFÜZYON TAVLAMASININ ETKİSİ**

Afra AKBOYA

Danışman

Doç. Dr. YUSUF KAYALI

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Haziran 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Afra AKBOYA tarafından hazırlanan “AISI 1040 Çeliğinin Yüzeyinde Oluşturulan Borür Tabakasına Difüzyon Tavlamaının Etkisi ” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 20 / 06 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Yusuf KAYALI

Başkan : Prof. Dr. Şükrü TALAŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Yusuf KAYALI
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Fatih ÇOLAK
Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

11 / 07 / 2023

İmza
Afra AKBOYA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AISI 1040 ÇELİĞİNİN YÜZEYİNDE OLUŞTURULAN BORÜR TABAKASINA DİFÜZYON TAVLAMASININ ETKİSİ

Afra AKBOYA

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yusuf KAYALI

AISI 1040 çeliği endüstride yaygın olarak kullanılan bir çelik olmasına rağmen düşük yüzey sertliğine sahip olmasından dolayı bazı sınırlamalara sahiptir. Daha geniş alanlarda kullanmak için çeşitli yüzey işlemleri yapılmaktadır. Biz de bu çalışmada, 900 °C ve 950 °C de Ekabor -2 tozu kullanılarak kutu borlama yöntemiyle 4 saat borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi takiben %95 SiC ve % 5 Bentonit karışımı toz içerisinde 950 °C ve 1000 °C de 4 saat bekletme süresinde Difüzyon Tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. AISI 1040 çeliğinin yüzeyinde Borlama ve Difüzyon Tavlama İşlemi (DI) sonucunda elde edilen borür tabakasının morfolojisi optik ve SEM mikroskobu kullanılarak tayin edilmiştir. Elde edilen borür tabakasının sertliği Mikro sertlik cihazı kullanılarak, borür tabakasında oluşan fazlar, XRD metodu ile tespit edilmiştir. 1000 C de 4 saat yapılan DI işlemi ile tek fazlı Fe₂B fazından oluşan bir borür tabakası elde edildiği XRD analizlerinde görülmüştür. AISI 1040 çeliğinin yüzey sertliği 233 HV_{0.05} iken borlama ve DAP işlemi ile birlikte 1950 HV_{0.05} e kadar yükselmiştir. 0,3 m/s kayma hızında 10 N yük altında kuru ortamda 500 metre kayma mesafesinde aşınma deneyleri Bilye-disk aşınma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi ve Difüzyon tavlama sıcaklığı ile aşınma direnci artmıştır. Yüksek Difüzyon tavlama sıcaklığında en iyi aşınma direnci sağlamıştır. Borlanmış ve DAP uygulanmış AISI 1040 çeliğinin % 3.5 NaCl ortamında yapılan elektrokimyasal korozyon deneyleri yapılmıştır. En yüksek korozyon direncinin 1000 C de Fe₂B fazından oluşan Tek fazlı borür tabakalarda olduğu tespit edilmiştir.

2023, xi + 71 sayfa

Anahtar Kelimeler: AISI 1040 çeliği, Kutu Borlama, Difüzyon Tavlama İşlemi, Aşınma,

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EFFECT OF DIFFUSION ANNEALING ON BORIDE LAYER PRODUCED ON AISI 1040 STEEL

Afra AKBOYA

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Yusuf KAYALI

Although AISI 1040 steel is a widely used steel in industry, it has some limitations due to its low surface hardness. Various surface treatments are made for use in larger areas. In this study, boriding process was carried out for 4 hours by using Ekabor-2 powder at 900 °C and 950 °C, using the box boriding method. Following the boronizing process, Diffusion Annealing was carried out in a mixture of 95% SiC and 5% Bentonite powder at 950 °C and 1000 °C for 4 hours. The morphology of the boride layer obtained as a result of Boronizing and Diffusion Annealing Process (DAP) on the surface of AISI 1040 steel was determined using optical and SEM microscopy. The hardness of the obtained boride layer was determined by using the microhardness device, and the phases formed in the boride layer were determined by the XRD method. It was seen in XRD analyzes that a boride layer consisting of single-phase Fe₂B phase was obtained by DAP treatment at 1000 °C for 4 hours. While the surface hardness of AISI 1040 steel was 233 HV_{0.05}, it increased to 1950 HV_{0.05} with boronizing and DAP treatment. Wear tests were carried out using the ball-disc wear method at a sliding speed of 0.3 m/s and a sliding distance of 500 meters in a dry environment under 10 N load. Wear resistance increased with boronizing process and diffusion annealing temperature. It provided the best wear resistance at high Diffusion annealing temperature. Electrochemical corrosion tests were carried out in 3.5% NaCl environment of boronized and DAP applied AISI 1040 steel. It has been determined that the highest corrosion resistance is in single-phase boride layers consisting of Fe₂B phase at 1000 °C.

2023, xi + 71 pages

Keywords: AISI 1040 Steel, Pack Boriding, Diffusion Annealing Process, Wear.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Yusuf KAYALI ve her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma, arkadaşlarıma ve 21.FEN. BİL. 29 numaralı proje kapsamında sağlamış olduğu maddi destek nedeniyle Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Komisyonuna ve üniversiteme sonsuz teşekkür ederim.

Öğrenim yaşamım boyunca maddi ve manevi her türlü desteği veren değerli aileme teşekkürleri sunarım. Son olarak ilgisiyle, güler yüzüyle ve tez çalışmam süresince büyük sabır gösterip desteğini esirgemeyen sevgili eşim Oğuzhan'a ve sevgili kızım Nil Karen'e sonsuz teşekkür ederim.

Afra AKBOYA
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xi
1.GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Çelikler.....	3
2.1.1 Orta Karbonlu Çelikler.....	4
2.2. Borlama.....	4
2.2.1 Borlama İşleminin Avantaj ve Dezavantajları	7
2.2.2 Borlama İşlemi	7
2.2.2.1 Kutu Borlama	8
2.2.2.2 Pasta Borlama.....	8
2.2.2.3 Sıvı Borlama.....	9
2.2.2.4 Gaz Borlama.....	10
2.2.2.5 Plazma Borlama	11
2.2.3. Borürlerin Tabakası.....	12
2.2.3.1 Borür Tabakasının Gelişimi	12
2.2.3.2 Borür Tabakasının Yapısı.....	12
2.2.3.3 Borür Tabakasının Çeşitleri.....	13
2.2.3.4 Borür Tabakasının Özellikleri	14
2.2.3.5 Borür Tabakası Kalınlığı	15
2.2.3.6 Borür Tabakası Sertliği	17
2.2.3.7 Borür Tabakasının Aşınma Dayanımı	17
2.2.4 Borlamanın Uygulama Alanları	18
2.3 Aşınma	19
2.3.1 Adeziv (Yapışma) Aşınması	20
2.3.2 Abrasiv (Kazıma) Aşınması	21

2.3.3 Yorulma Aşınması	22
2.3.4 Korozi Aşınma	23
2.4 Isıl işlem.....	23
2.4.1 Tavlama.....	24
2.4.1.1 Difüzyon (Homojenleştirme) Tavlama.....	25
2.5 Korozyon	26
2.5.1 Korozyon Tanımı.....	26
2.5.2 Korozyon Çeşitleri	27
2.5.2.1 Uniform (Homojen) Korozyon.....	28
2.5.2.2 Galvanik Korozyon	28
2.5.2.3 Çukurcuk (Pitting) Korozyonu.....	29
2.5.2.4 Aralık Korozyonu.....	29
2.5.2.5 Seçimli Korozyon.....	30
2.5.3 Korozyon Hızı Ölçme Yöntemleri.....	30
2.5.3.1 Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi.....	30
2.5.3.2 Lineer Polarizasyon Yöntemi.....	31
3. MATERYAL ve METOD.....	33
3.1 Malzeme.....	33
3.2 Borlama ve Difüzyon Tavlama İşlemi (DI).....	34
3.2 Metalografik Çalışmalar	35
3.3 Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Yöntem.....	37
3.3.1 Borlama ve Difüzyon Tavlama Fırını	37
3.3.2 Hassas Kesme Cihazı	37
3.3.3 X-Işınları Difraksiyon (XRD) Analiz Cihazı.....	38
3.3.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	38
3.3.5 Mikro-Sertlik Cihazı	39
3.4 Aşınma Deneyleri	40
3.5 Elektrokimyasal Korozyon Deneyleri	41
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ.....	42
4.1 Mikroyapı Özellikleri	42
4.2 XRD Analizleri.....	45
4.3 Tabaka kalınlığı ve Sertlik Özellikleri.....	48
4.4 Aşınma Karakterizasyonu.....	50
4.5 Elektrokimyasal Korozyon Karakterizasyonu	56

5. SONUÇLAR.....	58
6. KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ.....	71



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Fe	Demir
B	Bor
Al ₂ O ₃	Alümina
NaCl	Sodyum klorür
WC	Tungsten karbür
Co	Kobalt
SiC	Silisyum karbür
R _p	Polarizasyon direnci
µm	Mikrometre
%	Yüzde
I _{corr}	Korozyon akımı
E _{corr}	Korozyon potansiyeli
°C	Santigrat derece

Kısaltmalar

AISI	Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü
HV	Vickers sertlik
Max.	Maksimum
Min.	Minimum
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
XRD	X-ışınları difraktometresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması	6
Şekil 2.2 Kutu borlama ünitesi	8
Şekil 2.3 Sıvı borlama ünitesi	10
Şekil 2.4 Gaz borlama ünitesi.....	11
Şekil 2.5 Tek fazlı ve iki fazlı borür tabakalarının şematik görünüş	13
Şekil 2.6 Borür tabakası çeşitleri.....	14
Şekil 2.7 Borür tabakası kalınlığının işlem süresi-sıcaklığı ile değişimi.....	16
Şekil 2.8 Borür tabakası kalınlığının belirlenmesi.....	16
Şekil 2.9 Adeziv aşınma mekanizması sonucu aşınma parçacığının oluşumu.....	21
Şekil 2.10 Abrasiv aşınma mekanizmaları.....	22
Şekil 2.11 Yorulma aşınması	22
Şekil 2.12 Korozyon aşınma	23
Şekil 2.13 Homojenleştirme tavlama ısı işlem diyagramı	25
Şekil 2.14 Korozyon türleri	28
Şekil 2.15 Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri	31
Şekil 2.16 Lineer polarizasyon direnci eğrisi	32
Şekil 3.1 AISI 1040 çeliğin satıldığı durumda optik mikroyapısı.....	33
Şekil 3.2 Deneyler için hazırlanan AISI 1040 çelik numune ve AISI 316L paslanmaz çelik potanın şematik gösterimi	34
Şekil 3.3 Borlama işleminin yapılış yönteminin şematik gösterimi.....	35
Şekil 3.4 Difüzyon Tavlama işleminin yapılış yönteminin şematik gösterimi.....	35
Şekil 4.1 AISI 1040 çeliğinin a) 900B, b) 900B+950DI ve c) 900B+1000DI numunelerin optik resimleri.....	43
Şekil 4.2 AISI 1040 çeliğinin a) 950B, b) 950B+950DI ve c) 950B+1000DI numunelerin optik resimleri.....	44
Şekil 4.3 AISI 1040 çeliğinin a) 900B, b) 900B+950DI ve c) 900B+1000DI numunelerin XRD analizleri.....	46
Şekil 4.4 AISI 1040 çeliğinin a) 950B, b) 950B+950DI ve c) 950B+1000DI numunelerin XRD analizleri.....	47

Şekil 4.5 a) İşlem süresi ve sıcaklığın fonksiyonu olarak AISI 1040 çeliği üzerinde oluşan borür tabakası kalınlığı, b) 900 °C'de 4 saat borlanan AISI 1040 çeliği yüzeyinde oluşan borür tabakalarının sertlik değişimi, c) 950 °C'de 4 saat borlanan AISI 1040 çeliğinin yüzeyinde oluşan borür tabakalarının sertlik değişimi.....	49
Şekil 4.6 Borlanmış ve DI AISI 1040 çeliğin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı.....	51
Şekil 4.7 İşlemsiz 1040 çeliğinin Aşınma İzi.....	51
Şekil 4.8 Borlanmış ve DI'li AISI 1040 çelik borür tabakasının aşınma izleri a) 900B b) 900B+950DI, c) 900B+1000DI.....	54
Şekil 4.9 Borlanmış ve DI'li AISI 1040 çelik borür tabakasının aşınma izleri a) 950B, b) 950B+950DI, c) 950B+1000DI	55
Şekil 4.10 % 3.5 NaCl ortamında 1 saat bekletilmiş numunelerin Tafel eğrileri.....	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 FeB ve Fe ₂ B'nin bazı fiziksel özellikleri	15
Çizelge 2.2 Farklı malzemelerle oluşturulan bor tabakalarının sertlikleri ve erime noktaları.....	17
Çizelge 2.3 Borlama işleminin kullanım alanları.....	18
Çizelge 3.1 AISI 1040 çeliğinin kimyasal bileşimi.....	33
Çizelge 3.2 AISI 1040 çeliğine yapılan işlemler ve verilen kodlar.....	34
Çizelge 4.1 Borlanmış ve Difüzyon Tavlama İşlemleri AISI 1040 çeliğin aşınma değerleri.....	52
Çizelge 4.2 Borlanmış ve borlanmamış numunelerin % 3.5 NaCl ortamında elde edilen korozyon karakteristikleri.....	56

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Numune zımparalama ve parlatma cihazı.....	36
Resim 3.2 Mikroyapı görüntüleri için kullanılan optik mikroskop.....	36
Resim 3.3 Borlama işleminde kullanılan fırının fotoğrafı	37
Resim 3.4 Hassas kesme cihazı	38
Resim 3.5 Yüksek sıcaklık X-Işınları Kırınım cihazı	38
Resim 3.6 Tabaka kalınlığı belirlemek ve Aşınma izi karakterizasyonu için kullanılan taramalı elektron mikroskobu	39
Resim 3.7 AISI 1040 çeliğinin sertlik değerlerinin alındığı mikro-sertlik cihazı.....	39
Resim 3.8 Aşınma cihazının görünüşü	40
Resim 3.9 Elektrokimyasal Korozyon deney düzeneği.....	41

1. GİRİŞ

Mühendislikte kullanılan metalik malzemelerin korozyon, oksidasyon ve aşınma direncine bağlı olarak hizmet ömürlerinin belirlenmesinde yüzey kalitesi kilit rol oynamaktadır (Petrova vd. 2008, Kayalı 2013, Stinville vd. 2014). Çeliklerin yüzey performanslarının iyileştirilmesi ve yüzeylerinin korunması için endüstride birçok kaplama çeşidi vardır. Bunların en başında difüzyon kaplamalar gelir. Bu kaplamalar bir metalin veya ametalin yüksek sıcaklıklarda alt tabaka malzemesine yüzey difüzyonu ile üretilir. Termokimyasal işlemin bir sonucu olarak, yüzey kimyasal bileşimi malzeme değiştirilir ve alt tabaka üzerinde yeni fazlar oluşur (Petrova vd. 2008, Kayalı vd. 2013, Hacısalihoğlu vd. 2018). Karbürleme, Nitrürleme, Kromlama, Alüminyumlama ve Borlama, yüzey modifikasyonu için kullanılan tekniklerden bazılarıdır (Riberio vd. 2008).

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan termokimyasal difüzyon işlemlerinden biri olan borlama işlemi katı, sıvı, gaz ve plazma ortamında 700-1100 C sıcaklık aralığında 1-12 bekletme süresinde gerçekleştirilir (Petrova vd. 2005, Sen vd. 2005). Bor elementi nispeten küçük boyutludur. Bu özelliğinden dolayı, demir alaşımları, nikeller ve kobalt alaşımları, metal bağlı karbürler ve çoğu refrakter alaşımlar olmak üzere çeşitli metallere yayılmaktadır (Sen vd. 2005).

Bor elementi metallerle reaksiyona girerek aşınma direnci için yüzey sertliğini artırır. Borlanmış çelik yüzeylerinde bir bor bileşiği tabakası meydana gelir. Bor tabakasının morfolojisi, büyümesi ve faz bileşimi, ana malzemedeki alaşım elementlerinden etkilenebilir (Sinha 1991). Elde edilen bu bileşik bor tabakası normalde, ağırlıkça %16.23 B içeren ortorombik bir kristal yapıya sahip bir dış borür (FeB) ve bir iç borür (Fe₂B) hacim merkezli tetragonal kristal yapıya sahip ağırlıkça % 8.83 B içeren iki alt katmandan oluşur (Bejar vd. 2006, Sánchez vd. 2022).

Bu çift fazlı tabakalarda, FeB fazı daha kırılgan ve daha sert olduğundan ve Fe₂B fazından daha yüksek bir termal genleşme katsayısına sahip olduğundan (FeB: $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, Fe₂B: $7.85 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), çift fazlı borür tabakasının katmanlar arasındaki interfazda mikro çatlama eğilimi sıklıkla gözlenir (Bejar vd. 2006, Delgado vd. 2019, Kayalı vd. 2021).

Bu nedenle monofazik sistemler tercih edilmektedir. Bunun için de, son zamanlarda, borlama ve ardından yapılan Difüzyon tavlama işlemi (DI) sonrası FeB faz tabakasının çözülmesi ve Fe₂B fazına dönüşmesiyle ile mekanik özelliklerin iyileşmektedir (Campos vd. 2013, Campos vd. 2017, Hernández vd. 2020, Campos vd. 2020).

Bu çalışma da, Difüzyon tavlama işlemine maruz bırakılan borlanmış AISI 1040 çeliğinin kaplama tabakasının özellikleri, Aşınma direnci ve Elektrokimyasal korozyon direnci tesbit edilmiştir. Aşınma hızlarını tahmin etmek için aşınma izleri kullanıldı ve aşınma mekanizmaları belirlenmiştir. Elektrokimyasal korozyon özelliklerini tespit etmek için Tafel ve Lineer Polarizasyon teknikleri kullanılmıştır.



2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Çelikler

Çelik yüzyıllardır insanoğlu tarafından kullanılan bir yapı malzemesidir. Sanayi devrimiyle birlikte neredeyse her alanda ihtiyaç duyulan çelik, demir cevherinin içinde bulunan istenmeyen impurite elementlerin arındırılması sonucu elde ettiğimiz bir demir karbon alaşımıdır. Makine imalat sanayisinin gelişmesi fiziksel ve mekanik özellikleri daha iyi çeliklerin de gelişmesine neden olmuştur. Uzun yıllardır kullanılan çelik, gelişmeye ve iyileştirilmeye hazır bir malzeme olarak ön plana çıkmaktadır. Aynı zamanda çeliğin işlenebilirliği ve mekanik özelliklerinin iyi olması, istenilen özellikler için farklı elementlerin takviyesiyle alaşımlandırılabilmesi ve maliyetinin düşük olmasından dolayı yaygın bir şekilde kullanılmasına neden olmuştur. Çelik, belirli oranlarda karıştırılan Demir (Fe) ve Karbon (C) elementlerinin oluşturduğu değerli ve ticari öneme sahip olan bir alaşımdır (Yıldırım vd. 2001).

Çelik, Fe ile % 0,02 - 2,1 oranlarında C bileşiminden meydana gelmektedir. C seviyesi çeliklerin sınıflandırılmasında etkin bir rol oynamaktır. Karbon çeliği genellikle < %1,3 karbon içerirken, dökme demir % 2 ile % 4 arasında karbon oranı içerir. Düşük karbonlu çelikler yaklaşık % 0,25'e kadar, orta karbonlu çelikler % 0,25 - 0,55, yüksek karbonlu çelikler ise % 0,55'den yüksek karbon içermektedirler. Artan karbon miktarı ile mukavemet ve sertlik artarken, tokluk ile süneklik azalmaktadır. Bununla birlikte, çeliğin, kritik sıcaklığının üzerinde sertleşen, demir, karbon ve diğer birkaç elementten oluşan kristal bir alaşım olduğu söylenebilir. Ancak çeliklerin farklı sınıflandırılmaları da ortak özelliklere bakılarak ta yapılabilir (Yıldırım vd. 2001).

Çeliklerin genel özellikleri:

- Kaynaklanabilir
- Yüksek sıcaklık ve korozyona karşı dayanıklıdır (Paslanmaz çelikler gibi).
- Soğuk şekillendirilebilirler.
- Geri dönüştürülebilirler
- Artan karbon miktarı ile kaynak ve şekillenebilme özellikleri azalır (Arman 2017).

2.1.1 Orta Karbonlu Çelikler

Karbon içeriği %0,25 ile %0,65 arasında değişen orta karbonlu çelikler, çoğunlukla basit uygulamalar için kullanılır. Ancak iyi sac şekillendirilebilirliğin gerekli olduğu yeni uygulamalar geliştirilmiştir. Bu çelik sınıfı, doğası gereği düşük şekillendirilebilirliğe sahiptir (Rajan vd. 1988). Özellikle sac şeklindeki karbon çelikleri, dünya çapında açık ara en çok üretilen metalik malzemelerdir. Buna rağmen üretiminin büyük bir kısmı basit uygulamalara yöneliktir. İşleme teknolojisi ve özellikleri sürekli bir evrim ve büyüme sürecinden geçmektedir. Yassı mamullerin ekonomik açıdan esas olarak otomotiv endüstrisi ile ilgilidir. Bu çelikler, termokimyasal işlemler açısından sınırlı bir kapasiteye sahiptir ve düşük karbon içerikleri nedeniyle daha fazla ısı işlem göremezler. Bu nedenle, mekanik özellikleri nispeten düşüktür ve kullanımlarını sınırlar, orta ve yüksek karbonlu çeliklerin uygulanmasını gerektirir. Bu çeliklerin doğası gereği düşük bir işlenebilirliğe sahip olduğu ve karbon seviyeleri arttıkça şekillendirme koşullarının daha kritik hale geldiği bilinmektedir (Plaut vd. 2009).

2.2. Borlama

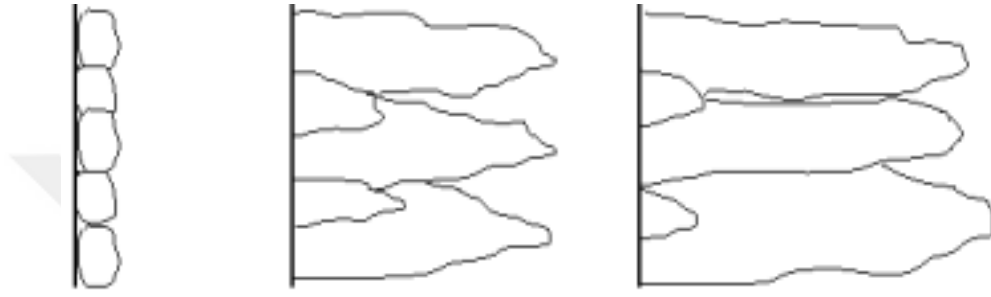
Borlama işlemi, yaygın olarak uygulanan ve iyi bilinen bir termokimyasal işlemdir. 1895 yılında Moissan, borun çeliğe difüzyonu ile sert ve aşınmaya dayanıklı yüzey tabakaları üretmenin mümkün olduğunu saptamıştır. Karbürleme ve nitrürleme ile birlikte borlama, metalik malzemelerin ara elemanlı difüzyon doygunluğunun kullanıldığı en yoğun şekilde çalışılan ve uygulanan işlemlerden biri haline geldi (Kulka 2019). Yüzey işlemleri alanında birçok araştırma çalışması malzemenin sürtünme ve aşınma direncini artırmak için yapılmaktadır. Borlama da teknik olarak iyi geliştirilmiş ve endüstride metalik alt tabaka üzerinde son derece sert ve aşınmaya dayanıklı yüzey tabakası üretmek için yaygın olarak kullanılan bu yüzey işlemlerinden biridir. Borlama termokimyasal işlemi, çelik ve demir alaşımlı yüzeylerde Fe_2B fazlarının oluşumunu sağlar. Aşınmaya karşı korumalı yüzey elde etmek için katı, sıvı ve gazların uygulandığı çeşitli borlama yöntemleri vardır. Öte yandan borlamanın aşınma direncini iyileştirdiği bilinmektedir, çünkü bor birçok metalle birlikte sert intermetalik bileşikler kolayca oluşturur (Pengxun 1992).

α ve γ demirdeki borun çözünürlüğü çok azdır. Bu yüzden alaşım elementleri ile borürler üreterek tabaka özelliklerini iyileştirir. Genel olarak, alaşım elementlerinin varlığı çelikte borun yayılımını azaltır ve sonuç olarak borürleşmiş tabakanın kalınlığını azaltır. Örneğin, karbon, molibden ve tungsten ilavesi borür tabaka kalınlığını önemli ölçüde azaltırken, silisyum, krom ve alüminyum orta düzeyde etkiye sahiptir. Borlama işlemi ile çeliğin sürtünme aşınmasına, yorulmaya, oksidasyona ve korozyona karşı direnç gibi yüzey özelliklerinin iyileştirildiği gözlemlenmiştir. Borlanmış demirli malzemelerin akma dayanımı %10-20 oranında artarken plastik özellikleri ise azalmaktadır. Ayrıca korozyon ortamındaki yorulma ömrünün %200 oranında iyileştirilmesi ile birlikte yorulma dayanımı %25 oranında artmaktadır (Selçuk vd. 2000).

Bir termokimyasal difüzyon işlemi olan borlama, karbon çeliği, düşük alaşımlı çelik, takım çeliği ve paslanmaz çelik dahil olmak üzere çok çeşitli çelik alaşımlarına uygulanabilir. Ayrıca nikel bazlı alaşımlar, kobalt bazlı alaşımlar, molibden ve titanyum gibi malzemelerin yüzeylerinde çok yüksek sertlik ve aşınma direnci elde edilebilmektedir. Hem geleneksel (yani tuz banyosu) hem de gelişmiş (yani plazma bazlı) borlama teknikleri mevcuttur (Özbek vd. 2000). Borlanmış tabaka 1000°C'ye kadar iyi bir dirence sahiptir. Aynı zamanda aşınma dirençleri de 650 °C' den sonra mükemmeldir. Çünkü borürlü yüzeyde oksidasyon 650°C'lik yüzey sıcaklığından sonra ortaya çıkar. Böylece oksidasyon filmi metal-metal temasını korur ve sürtünme katsayısı düşer. Endüstriyel borlama esas olarak düşük karbonlu çelikler, sinterlenmiş demir, nikel ve titanyum alaşımları, sert malzemeler (bağlayıcı olarak Co veya Ni ile WC–TiC üzerinde sinterlenmiş tipler) gibi tüm çelik ve demir alaşımlarına uygulanır (Hunger vd. 1994).

Ticari Ekabor borlama tozu yardımıyla çeliklerin yüzey sertleştirilmesi, yıllardır başarıyla uygulanan bir termokimyasal difüzyon işlemidir. Bununla birlikte, işlem nikel bazlı alaşımlar için kullanıldığında, elde edilen tabaka yetersiz kalitede olabilir. Borlama, bor atomlarının temel malzeme ile sert borürler oluşturmak üzere iş parçasının yüzeyine yayıldığı bir termokimyasal difüzyon yüzey işlemidir. Borlama, sürtünme ve aşınma kontrolünün öncelikli olduğu çok çeşitli tribolojik uygulamalar için öne çıkan bir seçimdir (Özbek vd. 2000).

Genel olarak, B_4C tozu kullanılarak malzemeye bor eklenir, ancak demirde sınırlı bir çözünürlüğe sahiptir. $Fe-Fe_2B/FeB$ oluşumu, öncelikle bor ortamı, konsantrasyonu ve ikincil olarak sinterleme sıcaklığı ve sürelerinden önemli ölçüde etkilenir. Ayrıca safsızlıklar ve alaşım elementleri de oluşan fazların tipini ve oranını etkiler. Sinterleme sıcaklıklarının ve bor içeriğinin artırılması, Fe_2B ve FeB oluşumunda kademeli artışa neden olur (Hamamcı vd. 2022).



Şekil 2.1 Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması.

Şekil 2.1’ de borür tabakasının oluşum aşaması şematik olarak gösterilmiştir. Öncelikle Fe_2B fazı oluşmakta ve bor konsantrasyonunun yeterli olduğu durumlarda ise FeB fazı da oluşmaktadır. Borür çekirdeği ilk olarak numune içinde büyür. FeB ve Fe_2B [001] boyunca yönlendiği için borür tanelerinin büyümesi yüzeye dik ve daha da hızlı gerçekleşmektedir. Bundan dolayı diğer yönlerde borürlerin büyümesi daha yavaş olduğundan dolayı kolonsal bir yapı oluşmaktadır. FeB fazı Fe_2B fazından daha kısa sürede büyüdüğü için FeB fazının dokusu Fe_2B fazı kadar güçlü değildir (Bayça vd. 2004). Endüstriyel uygulamalarda Fe_2B ’nin gevrekliği FeB ’den daha az olduğu için Fe_2B fazı tercih edilmektedir. (Üçkardeşler 2013). Özellikle borlanmış çelik, çeşitli tribolojik aşınma mekanizmalarına karşı mükemmel direnç sergiler. Ek olarak, borlanmış çeliğin oksitleyici olmayan seyreltik asitler, alkaliler ve erimiş metallerin saldırısına karşı direnci de olağanüstüdür. Genel olarak, ticari borlama karışımı, ortamın borlama potansiyelini kontrol eden donör olarak B_4C , aktivatör olarak KBF_4 ve seyreltici olarak SiC içerir. Nb, W gibi bazı saf refrakter malzemeler bu karışım kullanılarak borlanmıştır (Özbek vd. 2000).

2.2.1 Borlama İşleminin Avantaj ve Dezavantajları

Borlamanın termokimyasal ve fiziksel teknikleri avantaj ve dezavantajları dikkate alınarak belirtilebilir. Borlanmış çeliklerin benzersiz avantajı, karbonlama veya nitrüleme gibi diğer termokimyasal işlemlerden sonra elde edilenden önemli ölçüde daha iyi olan aşınmaya karşı yüksek dirençlerinden oluşuyordu. Son yıllarda hibrit tabakalar da sıklıkla borlama kullanılarak üretilmiştir. Bu tür katmanlar, basit borlama yöntemiyle elde edilmesi zor olan yeni avantajlı özellikler sunuyordu. İlk olarak, difüzyon karbonlama işlemini difüzyon borlama izledi. Bu işleme borkarbürleme adı verildi. Çelikler üzerinde üretilen borlanmış tabakaların ek avantajları şunlardır: artık gerilmelerin avantajlı profili, yüksek ısı direnci, alkali ve asit çözeltilerinde yüksek korozyon direnci, sıvı metallerin ve alaşımların etkisine karşı yüksek direnç (Kulka 2019). Ancak kullanılan teknikler esnek değildir ve oldukça emek yoğunudur, bu da süreci gaz karbonlama ve plazma nitrüleme gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinden daha az maliyetli hale getirir. Hem gaz karbürleme hem de plazma nitrüleme, borlamaya göre avantaja sahiptir, çünkü bu iki proses esnek sistemlerdir, daha düşük işletme ve bakım maliyetleri sunar, daha kısa proses süreleri gerektirir ve çalıştırmaları nispeten kolaydır. Bu nedenle, yüksek sertlik ve borür katmanlarında olağanüstü aşınma ve korozyon direnci gerektiren ve/veya daha ucuz işçiliğin mevcut olduğu mühendislik bileşenleri için uygundur (Kulka 2019).

2.2.2 Borlama İşlemi

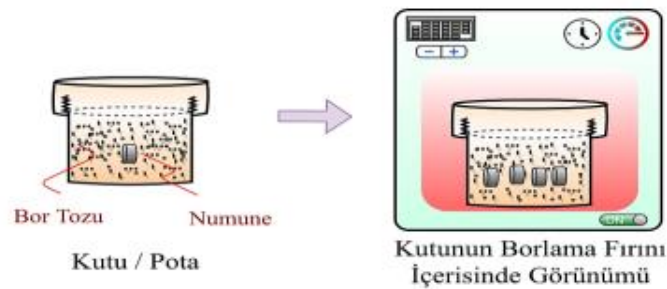
Borlama, bor atomlarının esaslı malzemelerle borürler oluşturmak için bir iş parçasının yüzeyine yayıldığı bir termo-difüzyon yüzey sertleştirme işlemidir. Termo-kimyasal difüzyon işlemleri, çeliklerin kayma koşulları altında sürtünme ve aşınma özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Borlanmış çelik yüzeyler, yapışkan, aşındırıcı ve koroziv aşınmaya karşı mükemmel direnç sağlayabilir. Demir borür oluşturmak için kullanılan bor bileşiklerinin termal difüzyon işlemleri 700-1000°C proses sıcaklıkları gerektirmektedir (Buijnsters vd. 2003).

2.2.2.1 Kutu Borlama

Borlama işleminde, bor atomları bir iş parçasının yüzeyine yayılır ve ana metal ile borürler oluşturur. Borlama katı, sıvı veya gaz ortamlarda gerçekleştirilebilir. Çeşitli borlama işlemleri arasında katı hal kutu borlama en sık kullanılanıdır. Endüstriyel borlama ise ağırlıklı olarak çelik ve demir alaşımlarına uygulanır. Yine de kutu borlama işleminin, etkili bir borür tabakası kalınlığı elde etmek için nispeten yüksek işlem sıcaklığı (800–1000 °C) ve uzun işlem süresi (~3–16 saat) gerektirmesi gibi dezavantajları vardır. Bu nedenle son yıllarda borlama sıcaklığı ile borlama süresinin düşürülmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır (Bartsch vd. 1999, Yu vd. 2005).

Öte yandan, geleneksel toz-paket borlama işlemi, farklı metalik malzemelerin yüzeyindeki borür tabakalarının büyüme kinetiğinin temel olarak işlem sıcaklığına, maruz kalma süresine bağlı olduğu, endüstri tarafından en yaygın kullanılan yöntemdir. Toz karışımının bileşimi ile uzun maruz kalma süreleriyle yüksek sıcaklıklarda (850 – 1000 °C) gerçekleştirilir. Nadir toprak elementleri gibi bazı daha aktif elementler borlama ortamına eklenmesi, borlama sıcaklığını düşürmek ve borlama süresini kısaltmak için başka bir yaklaşımdır (Xie vd. 2012).

Kutu borlama yöntemi şematik gösterimi Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2 Kutu borlama yönteminin şematik gösterimi (Meriç vd. 2002).

2.2.2.2 Pasta Borlama

Pasta borlama, diğer borlama teknikleriyle karşılaştırıldığında daha basit ve daha ekonomiktir. Bu teknikte, bir aktivatör ve bir seyreltici ile birlikte bor karbür (B_4C) gibi bir bor kaynağı bor pastasını oluşturmak için iyice karıştırılır. Bu işlem sırasında reaktif

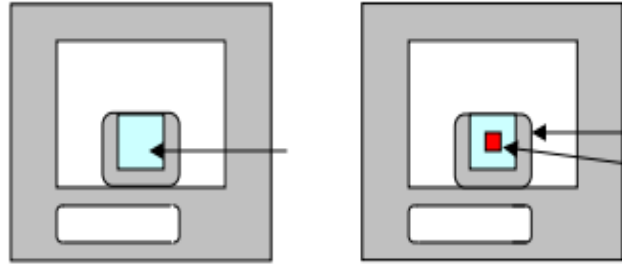
ortamın bor potansiyeli düşürülerek Fe_2B fazının oluşumu sağlanabilir. Pratik uygulamalarda, oluşumu FeB ve Fe_2B 'den oluşan bir çift fazdan daha arzu edilir. Bu son aşama, FeB demir borürden daha az sert ve daha toktur (Keddam 2006). Pasta borlama, toz borlamada gerekli olan manuel çalışmanın azaltılması gerektiğinde alternatif bir numune işleme yöntemidir. Ayrıca avantajı, yüksek iş hacimlerinde görülmektedir. Bor pastası, B_4C (ağırlıkça yaklaşık %76 boron) ve Na_3AlF_6 (akış katkı maddesi) oluşur. Borlama etkisini bozmadan maksimum %10-20 oranında su eklenebilir. Bor difüzyonu nedeniyle malzeme yüzeyinde elde edilen tabakalar, bir $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$ çift tabakası veya bir Fe_2B tabaka olabilir; Bor potansiyeli altlığın kimyasal bileşimine, işlem süresine ve işlem sıcaklığına bağlıdır (Campos vd. 2003).

2.2.2.3 Sıvı Borlama

Demirli malzemelerin akımsız tuz banyosu borlaması, yaklaşık 900 ila 950 °C'de ve boraks bazlı bir eriyikte gerçekleştirilir. Buna ağırlıkça yaklaşık %30 B_4C eklenir. Borlama etkisi, daha etkili bir indirgeyici olduğu için ağırlıkça %20'ye kadar B_4C 'nin ferroalüminyum ile değiştirilmesiyle daha da geliştirilebilir. Ancak %55 boraks, %40-50 ferrobora ve %4-5 ferroalüminyum içeren tuz banyosu karışımı kullanılarak daha üstün sonuçlar elde edilmiştir (Kaouka vd. 2019). Şekil 2.3'de sıvı borlama ünitesi şematik olarak gösterilmiştir. Sıvı ortamda bor içermeyen indirgeyicilerle ergimiş borat banyolarında borlama, elektrokimyasal borlama dışında en popüler işlem haline gelmiştir. Bu termokimyasal işlemin gerçekleştirildiği tuz banyosu fırını, mükemmel bir sıcaklık homojenliğine sahiptir ve işlenmiş numunelere iyi bir ısı transferi sağlar. İndirgeyici olarak SiC kullanılmışsa, banyonun hazırlanması ortam sıcaklığında koruyucu gaz olmadan yapılabilir. Sıvı borlama, metalik alaşımların ajanları içeren erimiş bir tuz banyosuna daldırılmasıyla gerçekleştirilir. Sıvı borlama işleminin en önemli faydaları, borlama işleminden hemen sonra alaşıma su verme imkanı ve katı borlama işlemine kıyasla maddelerden oluşan toz karışım ile kapları ısıtmaya gerek kalmaması nedeniyle enerji tasarrufu sağlamasıdır. Borlama ortamının ajanları ve bileşimi, borür tabakalarının oluşumunda oldukça rekabetçidir (Keddam vd. 2020).

Alternatif olarak, elektrolitik borlama en umut verici borlama yöntemlerinden biridir ve

teorik olarak altlık üzerinde atomik bor oluşumu, akımla yürütülen elektrokimyasal reaksiyonların bir sonucu olarak ortaya çıkar. Bu elektrolitik işlem, çok çeşitli metalik alt tabakalara, yani hemen hemen tüm geçiş metalleri ve bunların alaşımlarına uygulanabilir. Erimiş tuz elektroliti olarak bir alkali metal florür ve bir alkali metal floroborürün ve bir bor çubuğunun anot olarak, iş parçasının ise bir katot olarak kullanıldığı elektrokimyasal bazlı borlama yoluyla borun metallere difüzyonu gerçekleştirilmiştir (Sireli 2016).

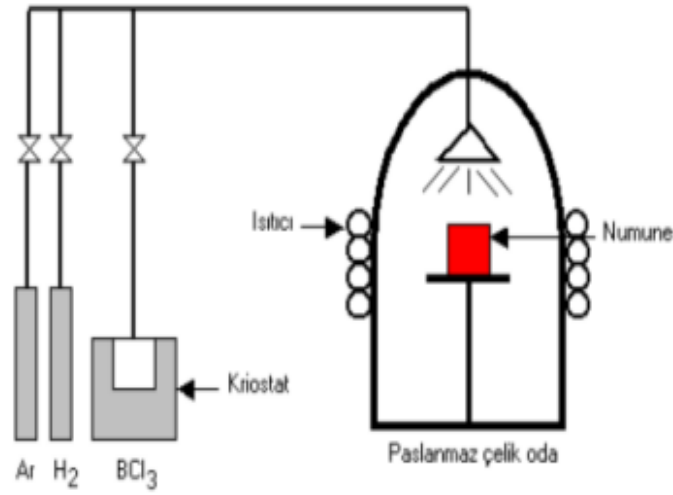


Şekil 2.3 Sıvı borlama ünitesi.

2.2.2.4 Gaz Borlama

Gaz borlama tekniği, geleneksel toz yöntemine kıyasla birçok avantajla karakterize edilir: proses otomasyonu olasılığı, proses boyunca borlama atmosferinin sürekli akışı, gazlı atmosferin sabit kimyasal bileşimi, kararlı bor atomları akışı. Bu faktörler, işlem süresinin kısaltılmasına ve boridning sırasında sıcaklığın düşürülmesine olanak sağlamıştır. Gaz borlama için çeşitli bor kaynakları kullanılır: bor triklorür, boron triflorür, diboran. Ancak bu kaynakların en büyük dezavantajı toksik olmalarıdır. Organik bileşiklerin kullanımı ile plazma borlama tekniğinin geliştirilmesi, bu gaz borlama ajanlarına olan ilginin devam etmesinin nedenidir (Makuch vd. 2021).

Şekil 2.4 de gaz borlama ünitesi görülmektedir. Gazlı borlama, fırın içerisine borlama atmosferinin sürekli akışı nedeniyle bor kaynağının kalıcı olarak desteklenmesini sağlar. Sonuç olarak, gazla borlama sırasında gazlı atmosferin sabit kimyasal bileşimini korumak için olanaklar vardır. Ayrıca, bor atomlarının borlama ortamından boridlenen malzemeye difüzyon akışı kararlıdır (Makuch vd. 2021).



Şekil 2.4. Gaz borlama ünitesi (Özaydın 2015).

2.2.2.5 Plazma Borlama

Plazma borlama özellikle nikel alaşımlarının yüzeyini değiştirmek için kullanılan en umut verici tekniktir. Plazma destekli tekniklerin uygulanmasıyla ilgili başlıca avantajlar şunlardır: prosesin sıcaklığını ve süresini azaltma olasılığı, nispeten düşük gaz tüketimi, borürlerin oluşumu için gereken düşük aktivasyon enerjisi ve azaltılmış toksik reaksiyon ürünleri emisyonu. Diğer borlama yöntemlerine benzer şekilde, üretilen borür tabakaların mikroyapısı, faz bileşimi ve özellikleri, borlama işleminin parametrelerinin yanı sıra işlenen malzemenin kimyasal bileşimine bağlıdır (Dziarski vd. 2022).

BCl_3 'ün hidrojen içeren bir atmosferde kullanılmasına sıklıkla borür tabakasında yüksek derecede gözeneklilik eşlik eder. Bu olgu, endüstriyel ölçekte gazlı öncüler kullanılarak borlama işlemlerinin gerçekleştirilmesini engellemektedir. Düşük basınçta gaz tüketiminin azaltılması ve gaz atmosferinin ve alt tabaka yüzeyinin akkor deşarj koşulları altında aktivasyonu, plazma destekli borlama proseslerini endüstriyel uygulamalar için ilgi çekici hale getirir. Borür tabakasının oluşumunu başlatan mekanizmalar ve gözenekliliği oluşturan koşullar hakkında bilgi eksikliği nedeniyle, parametrelerin gözenek oluşumu üzerindeki etkisinin araştırılması gerekmektedir (Rodríguez vd. 1999).

2.2.3. Borürlerin Tabakası

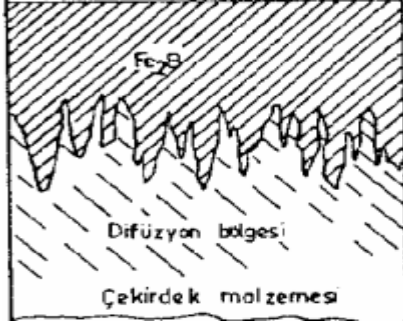
2.2.3.1 Borür Tabakasının Gelişimi

Demir borürler, metal özellikleriyle (termal ve elektrik iletkenliği ve diğerleri) birlikte özel seramik malzemelere özgü özellikler (örneğin çok yüksek sertlik) gösteren çok ilginç bileşiklerdir. Demir alaşımları üzerinde kutu-sementasyon prosedürleri vasıtasıyla aşınmaya dayanıklı kaplamaların üretimine özel ilgi gösterilir. Bununla birlikte, bu kaplamaların büyüme mekanizması henüz tam olarak tanımlanmamıştır ve bu nedenle toz borlama tamamen kontrol edilebilir bir süreç değildir. Aslında, malzemelere ve işlem koşullarına bağlı olarak, tek veya çok fazlı kaplamalar elde edilebilir; bu kaplamalar ayrıca baz alaşımla ara yüzeyde çok farklı morfolojilerin yanı sıra farklı kristalografik doku türleri ve kuvvetleri sergileyebilir (Palombarini vd. 1987).

Borür tabakasında gözenek oluşumu başka bir problemdir. Borlama işleminde borun çelik yüzeye difüzyonu, tek fazlı Fe_2B tabakasını veya iki fazlı Fe_2B ve FeB tabakasını içeren borür tabakasının oluşumuna yol açar. Optik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) altında, FeB fazı koyu görünürken Fe_2B (açık) beyaz görünür. Tek fazlı veya iki fazlı tabakanın oluşumu, borlama ortamında borun (bor potansiyeli) mevcudiyetine, proses sıcaklığına ve süresine bağlıdır. Fe_2B ve FeB fazları, difüzyon eksenini boyunca sütunlu veya testere dişi morfolojiye sahiptir. Ancak, alaşım elementlerinin veya karbonun konsantrasyonu arttıkça testere dişi morfolojisi bastırılır .

2.2.3.2 Borür Tabakasının Yapısı

Fe_2B ve FeB fazları, difüzyon eksenini boyunca sütunlu veya testere dişi morfolojiye sahiptir. Bununla birlikte, alaşım elementlerinin ve karbonun konsantrasyonu arttıkça testere dişi morfolojisi bastırılır. Yüksek alaşımlı çeliklerde demir borürler düzgün morfoloji gösterir. Ağırlıkça %16.23 bor içeren borca zengin FeB fazı ortorombik kristal yapıya sahipken, monofaze Fe_2B ağırlıkça %8.83 bor içeren gövde merkezi tetragonal yapıya sahiptir. FeB , Fe_2B 'ye kıyasla daha kırılgandır ve Fe_2B , FeB 'den daha arzu edilir (Palombarini vd. 1985).



a) Tek fazlı borür tabakası



b) Çift fazlı borür tabakası

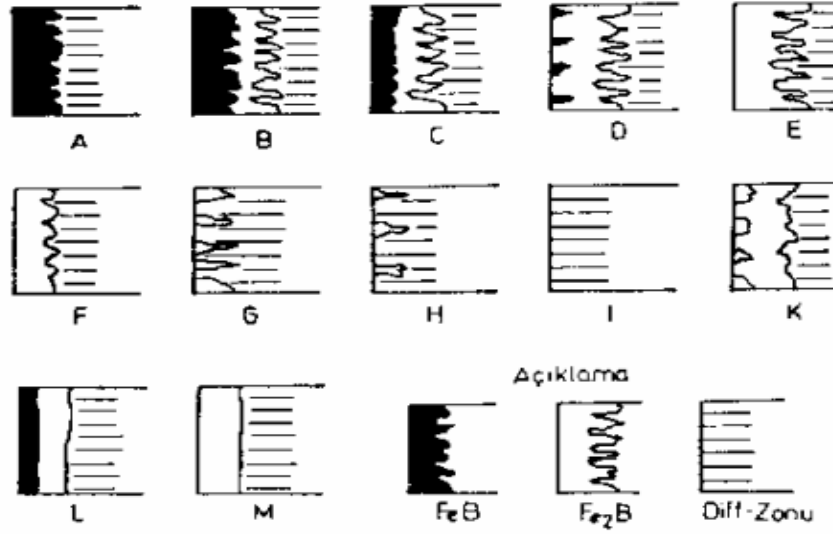
Şekil 2.5 Tek fazlı ve iki fazlı borür tabakalarının şematik görünüşü (Selçuk vd. 1995).

FeB (çekme) ve Fe₂B (basma) fazları birbirlerine uyguladıkları gerilmelerden dolayı ile paralel ve dik çatlaklar meydana getirmektedir. Bunu engellemek için borür tabakasında FeB fazı az miktarda oluşturulmalıdır. Şekil 2.5’de borür tabakalarının şematik görünüşü görülmektedir.

Diş morfolojisine sahip olması borür tabakasının en karakteristik özelliğidir. Borun difüzyonunun yavaşlamasına çeliklerdeki alaşım elementi ile karbon oranının artması sebep olmaktadır. Bundan dolayı da borür tabakasının kalınlığı azalmakta ve diş morfolojisinden daha düz bir yapıya dönüşmektedir (Bozkurt 1984).

2.2.3.3 Borür Tabakasının Çeşitleri

Borür tabakası çeşitleri Şekil 2.6’da görülmektedir. Malzemenin dış yüzeyi altında kalan borür tabakasının bir diğer adı da difüzyon bölgesidir. Borlamada, bor atomlarının difüzyonu ile yüzeyde bor bileşikleri meydana gelirken, oluşan tabaka tek veya çok fazlı oluşabilmektedir. Elde edilen tabakanın özellikleri (sertliği, şekli vd.) oluşan fazların ve malzemenin kompozisyonuna bağlıdır. Sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklere uygulanan borlama işlemlerinde elde edilen borür tabaka genellikle kolonsal olarak elde edilmektedir. Bunun nedeni, Fe₂B kristalleri bor tabakasına dik doğrultuda ve malzeme ara yüzeyinden iç kısma doğru kolonsal olarak ilerlemesidir. Genellikle borlanan demir esaslı malzemelerin FeB fazının mekanizması ile Fe₂B fazı benzerlik göstermektedir (Özaydın 2015).



Şekil 2.6 Borür tabakası çeşitleri (Matuschka 1980).

Şekil 2.6’ da gösterilen sınıflama şekli ile tabakaları sınıflandırmak ve özelliklerini belirlemek mümkün değildir. Bu sınıflandırma sistemi ile elde edilecek tabakanın şekli ve elde edilecek bor tabakasının uyumluluğu belirlenebilir (Matuschka 1980). Sanayide tabaka çeşitlerinden E ve F tiplerinde elde edilecek borür tabakaları kullanılmakta ve uygulanan borlama işlemlerinde kullanılan malzemeler ile elde edilebilmektedir. Örneğin düşük gevreklik, metale bağlanma mukavemeti gibi birçok avantaj Fe_2B fazının bilinen özellikleridir. Aynı zamanda bu istenilen özellikler tabakanın özelliklerini değiştirmeden elde edilebilmektedir (Matuschka 1980).

2.2.3.4 Borür Tabakasının Özellikleri

Fe_2B fazı kolonsal bir yapı gösterdiği için $Fe_2B + FeB$ fazına göre daha çok ön plana çıkmaktadır. FeB (çekme) ve Fe_2B (basma) fazı birbirlerine bu gerilmeleri uygulamakta ve böylelikle fazların birbirleri arasında da çatlaklar oluşmaktadır. Bu yüzden bu problemi ortadan kaldırmak için tabakada az da olsa FeB fazı oluşturulmak istenmektedir. Ancak borlanmış malzemelerin maruz kalacağı dış etkenlerden dolayı elde edilen bu yapıların yüzeyden koptukları görüşmüştür. Aynı zamanda birbirlerinden farklı ısı katsayılarına sahip olmalarından dolayı da $FeB + Fe_2B$ faz tabakasının çatlaklar oluşmaktadır. Tek fazlı yapıya göre elde edilen çift fazlı yapı hem daha düşük aşınma direncine hem de daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. FeB fazı borca daha zengin olduğundan dolayı diğer demir-bor fazlarına göre daha gevrekler. Bundan dolayı

aşınmanın en çok olduğu tabaka, daha sert yapıya sahip olduğu için FeB fazlı tabakada oluşmaktadır. Çizelge 2.1’de tabakaların fiziksel özellikleri görülmektedir.

Çizelge 2.1 FeB ve Fe₂B’nin bazı fiziksel özellikleri (Demirel 2013).

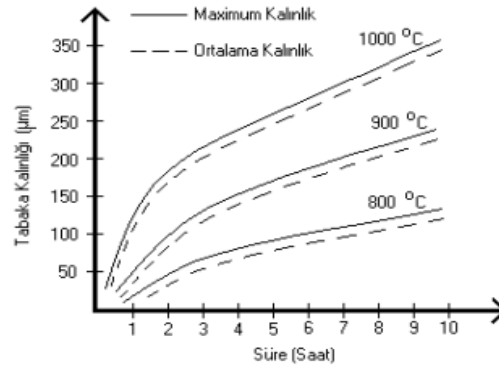
Özellik	Fe ₂ B	FeB
Ergime Noktası, (°C)	1390	1550
Genleşme Katsayısı(1000 °C), (K ⁻¹)	8.6x10 ⁻⁶	10-16x10 ⁻⁶
İletkenlik Katsayısı (1000 °C, W/cm °C)	0.1-0.3	0.1-0.2
Özdirenç (20 °C),μ.ohm. cm	≈38	≈80
Küri Sıcaklığı, °C	742	325
Teorik Yoğunluk, gr/cm ³	7,43	6,75
Kristal Sistemi	Tetragonal Hacim Merkezli	Ortorombik
Kafes Parametreleri, Å	a= 5.075 b= 4.249	a= 4.053 b= 5.495 c= 2.946

2.2.3.5 Borür Tabakası Kalınlığı

İstenilen bor tabaka özelliklerine bakıldığında aşınma, sertlik ve korozyon özellikleri gibi özellikler daha ön plana çıkmaktadır. Borlamada da malzeme yüzeyinin sertliğinin özellikleri FeB fazının Fe₂B fazına nazaran sert ve gevrek olmasından dolayı oluşacak olan FeB ve Fe₂B fazlarına bağlıdır. Aynı zamanda elde edilecek tabaka kalınlığı da borlama işlemi yapılan malzemenin kompozisyonuna, borlama ortamına, borlama işlem özelliklerine (sıcaklık, süre gibi) bağlıdır. Teorikte sınırsız olan tabaka kalınlığının değişikliği uygulanacak borlama işlem özelliklerinin (sıcaklık ve süre) artmasıyla değiştirilebilir. Ancak uygulanacak borlama işlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramındaki belirtilen ötektik sıcaklığının (yaklaşık 1150 °C) altında olması gerekmektedir. Belirtilen ötektik sıcaklığının üzerinde yapılacak borlama işleminde malzeme yüzeylerinde erimelerden kaynaklı bozulmalar meydana gelmesi mümkündür (Bozkurt 1984). Borlama sıcaklığının artmasıyla tabakada porozite artacak ve porozite artışı da tabakanın gevrekleşmesine neden olacaktır. Ayrıca borlayıcı ortamın bileşimi ve konsantrasyonu gibi özellikler tabaka kalınlığını arttırmaktadır (Uluköy vd. 2006, Buytoz vd. 2005).

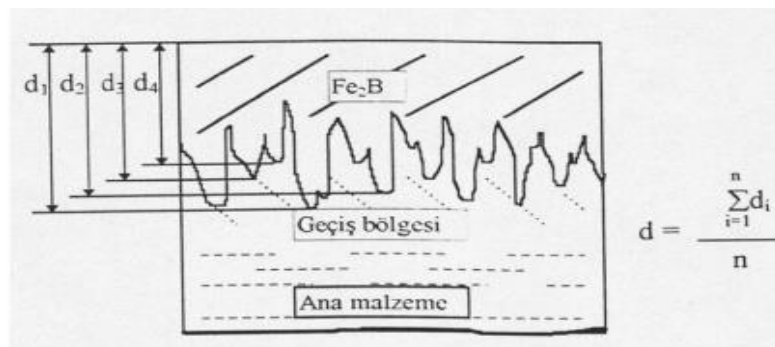
Borür tabakası kalınlığı ile işlem süresi ve sıcaklık ilişkisine ait grafik Şekil 2.7’de verilmiştir.

Oluşan tabaka özelliklerinin değişkenliği ile tabakanın kolonsal bir yapıya sahip olması, oluşacak tabaka kalınlığının belirlenmesini zorlaştırdığı için literatürde farklı çalışmalar yapılmaktadır. Genellikle tabaka kalınlığı, dış yüzeyin kolonsal yapı ile karşılaştırılarak hesaplandığı gibi oluşan kolonların yüzeye göre ortalama mesafelerinin ölçülmesiyle de hesaplanmaktadır (Demirel 2013).



Şekil 2.7. Borür tabakası kalınlığının işlem süresi-sıcaklığı ile değişimi (Bayça vd. 2004).

Borlama işleminde çift fazlı tabakalarda, tabaka kalınlığı arttıkça kırılgenliğin artmasında dolayı tabaka kalınlığının fazla olmaması istenir. Eğer malzemede karbon miktarı artıyorsa borun difüzyonunda azalma olacağından dolayı tabaka kalınlığının azalması ve yapısının düzleşmesi görülecektir (Yamanel 2018). Borür tabakasının kalınlığının belirlenmesine yönelik hesaplama Şekil 2.8’de gösterilmektedir.



Şekil 2.8 Borür tabakası kalınlığının belirlenmesi d: tabaka kalınlığı, n: bor dişi sayısı (Uzun 2002).

2.2.3.6 Borür Tabakası Sertliği

Malzeme cinsine ve borlama işlemi sonrası oluşacak olan FeB ve Fe₂B fazlarına bağlı olarak elde edilecek sertlik değişebilmektedir. Örneğin çeliklere uygulanan bir borlama işleminde elde edilecek sertlik değerleri 1800-2000 HV civarındadır (Lakhtin 1983). Borlama işlemi sonrası elde edilen tabaka sertliği daha sonra uygulanacak 900 °C' a kadar ısıtıl işlem sonrasında da korunduğundan dolayı bu tür malzemelere yapılacak ısıtıl işlemlere izin vermektedir.verir. Borlama işlemi yapılan çelikler ile farklı yöntemlerle sertleştirilen malzemelerin karşılaştırılması Çizelge2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Farklı malzemelerle oluşturulan bor tabakalarının sertlikleri ve erime noktaları (Sinha 1991).

Malzeme	Oluşan Bileşik	Sertlik (HV veya kfg/mm ²)	Ergime Noktası (°C)
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe ₂ B	1800-2000	1390
	CoB	1850	1390
Co	Co ₂ B	1500-1600	1390
	Co ₂ B	700-800	1390
	CoB	2200	1390
Co-27.5Cr	Co ₂ B	1550	1390
	Co ₂ B	700-800	1390
	Ni ₂ B ₂	1600	1390
Ni	Ni ₂ B	1500	1390
	Ni ₂ B	900	1390
	Mo ₂ B	1660	2000
Mo	MoB ₂	2330	=2100
	Mo ₂ B ₄	2400-2700	2100
W	W ₂ B ₅	2600	2300
Ti	TiB	2500	=1900
	TiB ₂	3370	2980
Zr	ZrB ₂	2250	3040
Re	ReB	2700-2900	2100

2.2.3.7 Borür Tabakasının Aşınma Dayanımı

Oldukça sert yüzeyler elde edilen borlama işlemi, aşınma direncinin yüksek olması istenilen yerlerde de kullanılmaktadır. Sürtünme katsayısı, borlama işlemi uygulanan malzemelerde genellikle yüksektir. Sürtünme katsayısı ile aşınma dayanımı malzemenin sertliğiyle doğrudan alakalıdır. Tabakayı oluşturan fazlar, sertlikleri ve oranları aşınma dayanımını etkilemektedir. Örneğin, FeB fazında oluşacak aşınma Fe₂B fazında oluşacak

olan aşınmadan daha fazla olacaktır. Bunun nedeni FeB fazının Fe₂B fazından daha gevrek olmasıdır. Aynı zamanda Cr-B fazları gibi fazlar da yüksek sertliğe sahip oldukları için Fe-B fazlarından daha fazla aşınma direncine sahiptirler. Başka bir husus ta borun oksijen ile bağ kurmasının daha kolay olacak olması yüzeyde oksit tabakasının koruyuculuğu ve yağlayıcılığı sayesinde sürtünme katsayısını düşürmesidir. Böylelikle yüzeyler arasında oluşabilecek ısı sonrası kaynamasını da önlenmektedir (Bayça vd. 2004).

2.2.4 Borlamanın Uygulama Alanları

Bor saf hale getirilerek bir çok alanda kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan bor ürünleri, Boraks dekahidrat, boraks pentahidrat, susuz boraks, borik asit, bor oksit ve sodyum perborat' tır (Uslu 2007). Borlanmış malzemeler, üstün performanslara sahip oldukları için genellikle makine, otomotiv, gıda, tekstil, kimya sektörleri gibi birçok endüstriyel alanlarda kullanılmaktadırlar. En çok tercih edilen çalışma koşulları abrazif ve adhezif aşınma koşullarıdır (Akbayır 2005). Borlama işlemi kullanım alanları Çizelge 2.3' görülmektedir.

Çizelge 2.3 Borlama işleminin kullanım alanları(Kanat 2015).

Savunma Sanayi	Seramik plakalarda ve zırhlarda, ateşli silah namlularında ve fişek yapımında kullanılır.
Cam Sanayi	Laboratuvar camlarında, bor silikat camlarda, uçak camlarında ve borcamlarda kullanılır
Kimya Sanayi	Elektrolitik işlemler ve bazı kimyasalların indirgenmesinde kullanılır
Otomobil Sanayi	Hava yastığı mekanizmalarında ve titreşim sönümleyici malzemelerde kullanılır.
Makine Sanayi	Aşındırıcı ve kompozit malzemelerde, zımparalarda ve manyetik cihazlarda kullanılır.
Tarım Sektörü	Biyolojik gelişim ve sentetik gübreler için kullanılır.
Enerji Sektörü	Yüksek ısı transistörlerinde ve gaz türbinlerinde kullanılır.
Elektronik ve Bilgisayar Sanayi	LCD ekranlarında, mikro chiplerde ve CD sürücülerinde kullanılır.
Görüş Sistemleri	Fotoğraf makinelerinde ve mercek camlarında kullanılır
İletişim Araçları	Televizyonlarda, modemlerde kullanılır

Çizelge 2.3 (Devam) Borlama işleminin kullanım alanları (Kanat 2015).

Nükleer Sanayi	Nükleer atıkların depolanmasında ve reaktör aksamalarında kullanılır.
Uzay ve Havacılık Sanayi	Sürtünme, aşınma ve ısıya dayanıklı malzemelerde, roket yakıtlarında ve uydularda kullanılır.
Kâğıt Sanayi	Geri dönüştürülen kâğıtların mürekkeplerinden arındırılmasında kullanılır.
Metalurji	Kaplama alanında kullanılır
Seramik Sanayi	Fayanslarda ve porselen boyalarında kullanılır.
Koruyucu	Ahşap malzemeler için kullanılır
Tıp	Antibiyotikler ve yapay organlarda kullanılır.

2.3 Aşınma

Aşınmanın tanımı, birbirleri ile temas eden yüzeylerde oluşan mekanik etkenlerden dolayı malzeme kaybıdır. İki yüzey arasındaki temasta oluşan bağıl hareket ile aşınma meydana gelmektedir. Aşınma sonucu malzeme, yüzeyinin ilk formunu kaybederken işlevlerini de yerine getiremez hale gelmektedir (Kondul 2020).

Aynı zamanda temasta oluşan mikro parçacıklar ayrılarak malzeme yüzey toleransında değişiklikler ve fonksiyon kayıpları meydana gelmektedir. Genellikle; mil, rulmanlı yataklar, balata ve piston gibi hareket aktarım elemanlarında görülmektedir. Ancak aşınma olmaması için gerekli önlemler önceden alınabilmektedir. Bu önlemler, temas yüzeylerde yağlayıcı kullanılması, yüzey sertleştirmesinin yapılması ya da temas yüzeyinde oksit tabakası oluşturulmasıdır. Aşınmayı etkileyen faktörlerden birkaçı malzemelerin kristal yapısı, yüzey şekli ve boyutu, ortamın basıncı ve uygulanan kuvvetin süresidir (Yıldız vd. 2006).

Moore'a göre aşınma; malzeme yüzeylerine gaz, sıvı ve katı teması sonucu yüzeyden mikro tanelerin kopması ile yüzeylerin bozulmasıdır. Aşınma, malzeme özelliği değil bir süreç sonrası ortaya çıkmaktadır. Aşınmada, dinamik, çevresel ve malzeme parametrelerindeki küçük değişimler olsa bile büyük değişiklikler oluşur.

Tribolojik sistemlerde korozyon ve yorulmadan sonra en büyük problem aşınma olayıdır. Aşınma ekonomiyi de yakından ilgilendirdiği için A.B.D. de yapılan araştırmada farklı

aşınma mekanizmalarıyla oluşan malzeme kayıplarının maliyetinin çok yüksek olduğu tespit edilmiştir (Demirci 1987).

Malzemenin aşınmış olduğunun tespiti için aşağıdaki şartları sağlaması gereklidir. Bu şartlardan herhangi birinin sağlanmaması durumunda aşınma gerçekleşmemiş demektir (Gök 2001).

1. Mekanik bir etki
2. Sürtünme
3. Yavaş ve sürekli
4. Yüzeyde değişiklik
5. İstenmeden oluşması

ASTM F1537 alaşımına 1000°C 6 saat kutu borlama işlemi uygulanmıştır. CoB+ Co₂B tabakaları elde edilmiştir. Borlama işleminden sonra 1000 °C 2 saat Ar (argon) atmosferi altında difüzyon tavlama işlemi gerçekleştirilmiş, bu işlem sonucunda Co₂B fazı elde edilmiştir. Kutu borlamaya nazaran difüzyon tavlama işlemine tabi tutulmuş numunelerde aşınma direnci azalmıştır (Delgado vd. 2020).

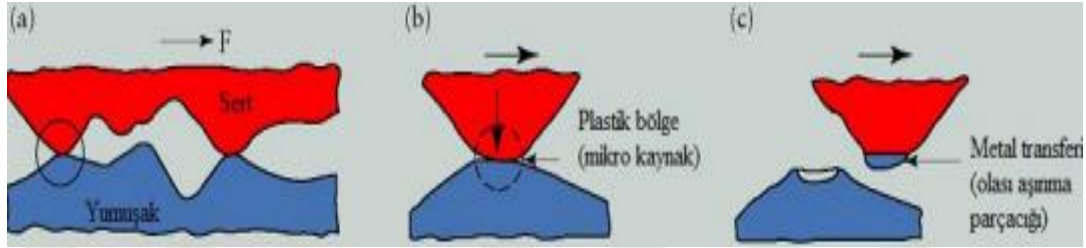
AISI 1018 çeliğinin 950 °C 6 saat kutu borlama yapılmıştır. 950 °C difüzyon tavlama işlemi yapılmış sonra numunelerin aşınma direnci % 50 oranında artmıştır. ASTM G133-5 standartta aşınma yapmış. Aşınma şartı 20 N 3mm çapında Al bilye ile kayma mesafesi olarak 40-80-120-160-200 m mesafelerde aşınma gerçekleştirilmiştir. Sonucunda kutu borlamaya nazaran difüzyon tavlama işlemine göre aşınma direnci % 50 kat artmıştır (Hernandez vd. 2020).

2.3.1 Adeziv (Yapışma) Aşınması

Yapışma aşınmasında kayma sürtünmesi halinde olan yüzeylerde ya soğuk kaynak ya da bölgesel bağlanma oluşur. Daha sonra yüzeyin birinden diğerine doğru bir malzeme transferi gerçekleşir. Böylelikle gerçekleşen kayma hareketiyle malzeme kaybı gerçekleşir (Şekil 2.9). Temas bölgelerinde oluşan deformasyon ile çatlama başlar. Daha sonra gerilmelerle birlikte kırılma oluşur. Gerçekleşen kırılma sonrası yüzeyde kopmalar

meydana geldiği için malzeme kaybı söz konusudur. Önlemek için yüzeylere sertleştirme işlemleri ya da yağlayıcı ortam kullanılması gerekmektedir (Varol 2016).

Yapışma aşınması en yaygın rastlanan aşınma mekanizmasıdır. Ancak oluşacak hasarı hızlandırma etkisi bulunmamaktadır (Aslan 2002).



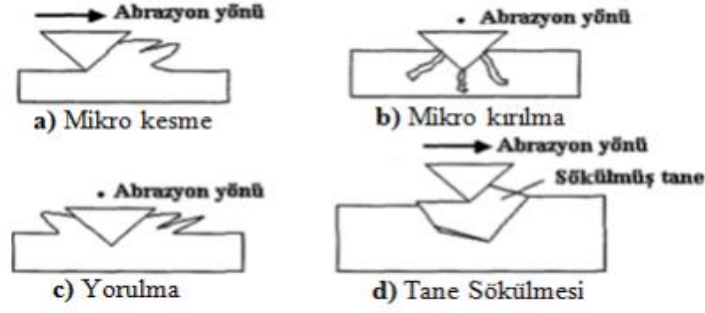
Şekil 2.9 Adeziv aşınma mekanizması sonucu aşınma parçacığının oluşumu (Ayday 2013).

2.3.2 Abraziv (Kazıma) Aşınması

Abraziv aşınma, birbirine temas eden iki yüzeyin sürtünme ve yüzey pürüzleri etkisiyle sert olan yüzeyin diğer yüzeyden parça koparması, dolayısıyla sistemi hasara uğratması olayıdır (Onat vd. 2013).

Abraziv aşınma sünek malzemelerde meydana geldiğinde oluk veya pullanma, gevrek malzemelerde meydana geldiğinde ise çatlak şeklinde karşımıza çıkar. Oluşan çatlak veya oluklar malzemeyi zayıflatır ve nihayetinde kırılmalara neden olur. Yırtılma, çizilme, kazıma, çizilme aşınması olarak da isimlendirilen Abraziv aşınma yüzeyden malzeme kaybına neden olan aşınma mekanizmalarından biridir. Aynı zamanda sert parçacıklar daha yumuşak olan metale batarak ta bu aşınmaya neden olur. Örneğin kum gibi parçacıkların ya da bir motordaki aşınma olayları bu aşınma türüne örnek verilebilir.

Bu aşınma türü sanayide tarım ve iş makineleri, cevher işleme tesisleri ve elek gibi yerlerde görülmektedir (Yıldız ve Gür 2006). Şekil 2.10'da abraziv aşınma mekanizmaları görülmektedir.

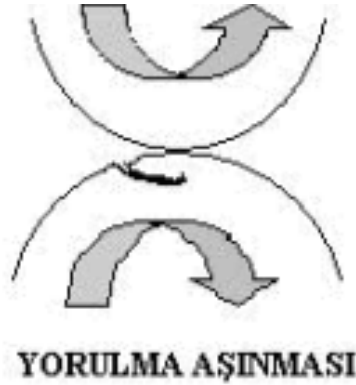


Şekil 2.10 Abrasiv aşınma mekanizmaları (Islak 2005).

2.3.3 Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması ise değişken ve tekrarlı yapılan yüklemelerde meydana gelir. Genel olarak yüzeyde, zamana ve konuma göre büyüklüğü değişen mekanik gerilmeler ile gerçekleştiği için birçok aşınma sürecinde yorulma aşaması meydana gelmektedir (Şekil 2.11). Yorulma aşınması yüzeyden parçacıkların ayrılarak çukur ve oyukları meydana gelmesiyle oluşur (Holmberg vd. 1994) .

Malzemedeki gerilim, yüksek hızlarda çalışma koşulları metal üzerinde oyuk şeklinde boşluklar meydana gelmesine neden olur. Malzeme üzerine binen yüksek basınçlı yüklerin çok sayıda tekrarlanması malzeme yüzeyinde veya malzeme içerisinde medyana gelen çatlakların yüzeye paralel olarak yayılır veya diğer çatlaklarla birleşmesi sonucunda bu oyuklar meydana gelir. Yüzeye yakın bölgelerde maksimum gerilme ve dislokasyonların yoğunlaşması nedeniyle çatlak hızla ilerler ve malzemeyi hasara uğratar. Nihayetinde malzeme yüzeyinden plakalar halinde parça kopmasına neden olmaktadır. Yorulma aşınması “pitting” olarak da anılmaktadır (Onat vd. 2013).

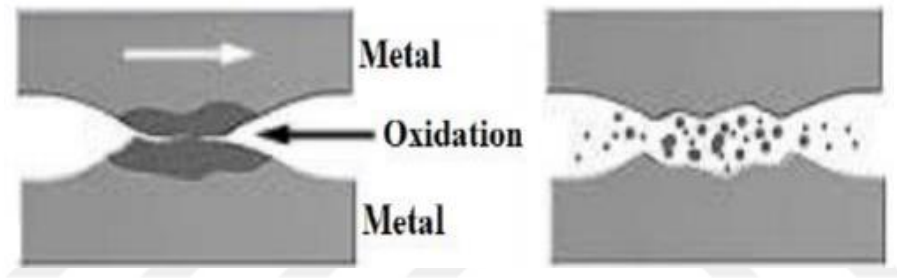


Şekil 2.11 Yorulma aşınması.

Özellikle dönen veya sürtünen malzemelerin temas eden bölgelerinde görülmektedir. Değişen büyüklüklerde yüzeyin altında kayma gerilmelerinin oluşmasıyla parçada yorulma başlar. Oluşan bu deformasyon, aynı zamanda temas bölgesinde kırılma çatlama şeklinde de gerçekleşmektedir.

2.3.4 Korozi Aşınma

Korozi ortam oluşan kayma hareketi sonucu malzemelerde oluşan aşınmaya Korozi Aşınma denir (Şekil 2.12). Eğer parçalar arasında kayma yoksa parça yüzeyinde film tabakası oluşturan korozyon ürünleri sayesinde korozyon yavaşlar. Ancak kayma hareketi başladığında oluşan film tabakası bu etkiyi göstermemektedir (Özsaraç 1999).



Şekil 2.12 Korozi aşınma (Varol 2016).

Oluşan korozyon aşınmalardan en aşırısı ve en önemlisi olan oksitlenmede, yüksek sıcaklık ya da oksitleyici ortamdan etkilenen metal ve alaşımlarının yüzeylerinde oksit tabakası oluşur. Oluşan bu oksit tabakası ile ana malzemenin ısı genleşme katsayıları farklı olduğundan dolayı oluşan iç gerilmeler ile oksit tabakası malzeme yüzeyinden dökülür ama tekrar kendiliğinden yenilenir (Sarıkaya 2007).

2.4 Isıl işlem

Isıl işlem; metal veya alaşımlı parçanın özelliklerinde belirgin özellikler kazandırmak amacıyla bir veya daha çok sayıda, peş peşe veya ayrı ayrı olarak planlanan ısıtma ve soğutma işlemleridir.

Isıl işlem malzemeye;

1. Aşınma dayanımını arttırmak

2. Mekanik özelliklerini iyileştirmek (tokluk, çekme ve akma dayanımı)
3. Sünekliğini geliştirmek
4. Kaba tane yapısını iyileştirmek

Gibi amaçlarla uygulanır. (Karaaslan 2012, Totten 2007)

Isıl işlem ile malzemelere katı haldeki sıcaklık değişimleri yoluyla aynı zamanda istenilen özellikler elde edilmektedir. Genelde ısıtma işlemlerinde parçalar, belli bir sıcaklığa kadar ısıtılır, belirli bir süre bekletilir ve daha sonra da bu sıcaklığın oda sıcaklığına kadar düşürülmesiyle yapılır. Bu yapılan tüm işlemler sonunda istenilen özellikler elde edilmiş olur (Topbaş 1993).

Isıl işlem katı halde bulunan metal ve alaşımları üzerinde özelliklerin değiştirilmesi ya da iyileştirilmesi için uygulanan ısıtma-soğutma işlemleridir. Metal ve alaşımlarının değiştirilmesi istenilen bazı özellikleri için yaygın olarak kullanılan ısıtma işlemi özellikle makine imalatı, makine parçası üretimi ve diğer üretim süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Aynı zamanda metal ve alaşımlarının kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinde istenilen bazı değişiklikler için son işlem olarak uygulanır. Ancak ısıtma işlemi sırasında oluşan ısıtma ve soğutma sırasında malzeme iç yapısında değişiklikler meydana gelmektedir. Oluşan bu değişiklikler birçok özelliğin de değişmesine sebep olmaktadır. Özellikle metal ve alaşımlarında, uygulanan ısıtma işlemi ile parçaların üretimi sonrası farklı davranışlar görülmektedir (Aktaş 2012).

Çeliklerde uygulanan ısıtma işlemi sonrası, artan karbon miktarı ile sertlik ve mukavemetin artması, düzensizliklerin ortadan kaldırılarak daha homojen bir yapının olması, tane boyutunun küçülmesi, soğuk şekillendirme sonrasında oluşan segregasyonların giderilmesi farklı özellikler elde edilebilir. Çeliklere uygulanan ısıtma işlemi tavlama ve sertleştirme olarak ikiye ayrılmaktadır.

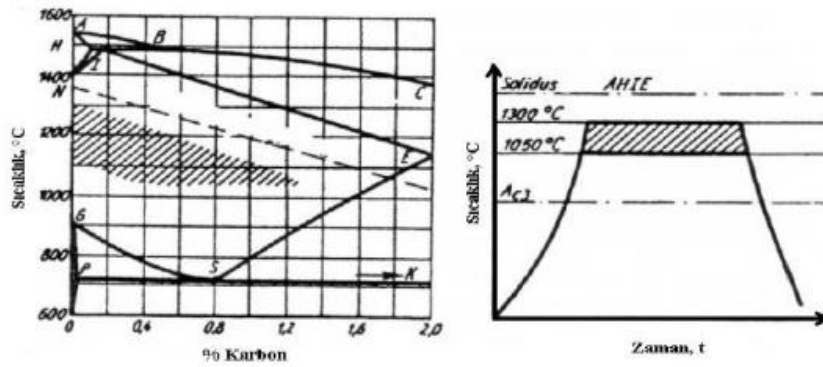
2.4.1 Tavlama

Tavlamada seçilen sıcaklık, çelik malzemenin kimyasal özelliklerine göre belirlenir. Ancak genellikle bu sıcaklık aralığı 730-900 °C’ dir. Tercih edilecek bu sıcaklıklar A_{c3} (üst kritik sıcaklık) ile A_{cm1} (alt kritik sıcaklık) arasındadır.

Uygulanan tavlama işlemi, tam, küreselleştirme ve izotermal tavlama olarak ayrılmaktadır (Totten 2007).

2.4.1.1 Difüzyon (Homojenleştirme) Tavlaması

Malzemenin içerisinde çözünen bileşikler içyapıda farklı kimyasal bileşimler ortaya çıkarmaktadır. Bu farklılıkları ortadan kaldırma için difüzyon tavlaması uygulanır. Difüzyon tavlaması diyagramı Şekil 2.13’de gösterilmektedir.



Şekil 2.13 Homojenleştirme tavlaması ısıtma işlemi diyagramı (Kesti 2009).

Malzemenin difüzyon hızının yüksek olduğu sıcaklıklarda belli bir süre bekletilerek yapılan difüzyon tavlamasında, 1100-1200 °C sıcaklıklarda atomlar hareket kabiliyeti kazandırılır. Böylelikle homojen bir yapı oluşturulması sağlanır. İstenilen tavlama sıcaklığına kadar ısıtılan malzeme belirlenen sürede bekletilerek önce 800 °C’ye kadar fırında daha sonrasında da havada soğutulur. Yapılan bu işlemler sonrası oksitlenme problemi oluşabileceği için tavlama süresine dikkat edilmelidir.

XC38 çeliğinin 900 °C sıvı borlama yaparak FeB+ Fe₂B ikili fazı elde edilmiştir. Borlama işleminden sonra 700 °C 1 saat difüzyon tavlama işlemi gerçekleştirilerek XC38 çeliğinin yüzeyinde Fe₂B bor fazı elde edilmiştir. Tabaka kalınlığı borlama işleminde elde edilen kalınlığa göre % 20 kat artmıştır (Rayane vd. 2017).

AISI 1045 çeliğine 900 °C, 950 °C ve 1000 °C, 4-6-8 saat normal ortamda kutu borlama yapılmıştır. FeB+ Fe₂B fazı elde edilmiştir. 1000 °C 4-6-8 saat difüzyon tavlama işlemi %95 SiC %5 bentonit karışımında uygulanmıştır. Borlama işlemiyle elde edilen FeB+

Fe₂B fazlarında difüzyon tavlama işlemiyle birlikte FeB fazı çözünerek AISI 1045 çeliğinin yüzeyinde sadece Fe₂B fazı elde edilmiştir. Difüzyon tavlama sonucunda borlamaya nazaran bor tabakasında boşluksuz düz bir yüzey elde edilmiştir (Silva vd. 2017) .

2.5 Korozyon

2.5.1 Korozyon Tanımı

Genellikle metal ve alaşımlarının, çeşitli çevresel etkiyle kimyasal ve elektrokimyasal değişme aşamasına korozyon denir (Üneri 1998, Kaftan 2006). Metal ve alaşımlarının, ortam ile bulundukları çevrenin kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonu sonucu yüzeylerinde bozunma meydana gelir. Oluşan bu bozunmayla birlikte malzeme özelliklerinin fiziksel ve kimyasal olarak ta değişmesiyle bu korozyon devam etmektedir (Ahmad 2016).

Korozyon, birçok metali farklı şekilde etkilemektedir. Korozyona uğrayan metal öncelikle kaybolan parlaklığından ya da oluşan deliklerden anlaşılmaktadır. Korozyon sonucu oluşacak olan kopma ya da kırılmayla birlikte metal malzemenin dayanıklılığı da yok olmaktadır (Çifter 1986, Badioğlu 2008). Korozyon günlük hayatımızı hem doğrudan hem de dolaylı bir şekilde etkilemektedir. Günlük hayatımızda kullanmış olduğumuz malzemelerin büyük bir çoğunluğu, örneğin, arabaların gövde panelleri, dış mekanlar da kullanılan mobilyalar, metal malzemeler, beyaz eşyalar, su ısıtıcıları, kömür ızgaraları, köprüler, ulaşım da kullanılan araçlar korozyona uğramaktadırlar. Bir malzemeyi üretmek için ihtiyaç duyulan ekipmanlar, enerji, emek ve teknik kabiliyetten başlayarak ürün geliştirme ve üretimi sırasında farklı korozyon maliyetleri meydana gelmektedir (Davis 2000).

Metal olmayan malzemelerin ise yapılan araştırmalarda çevresel koşullardan aynı metaller gibi etkilendiği saptanmıştır. Bundan dolayı tüm malzemelerin çevrenin etkisiyle bozunmaya uğramasına korozyon denilebilir (Doruk 1982, Kaftan 2006).

Sanayide yatırımı ve üretim maliyetlerini belirlemekte korozyon da kullanılmaktadır.

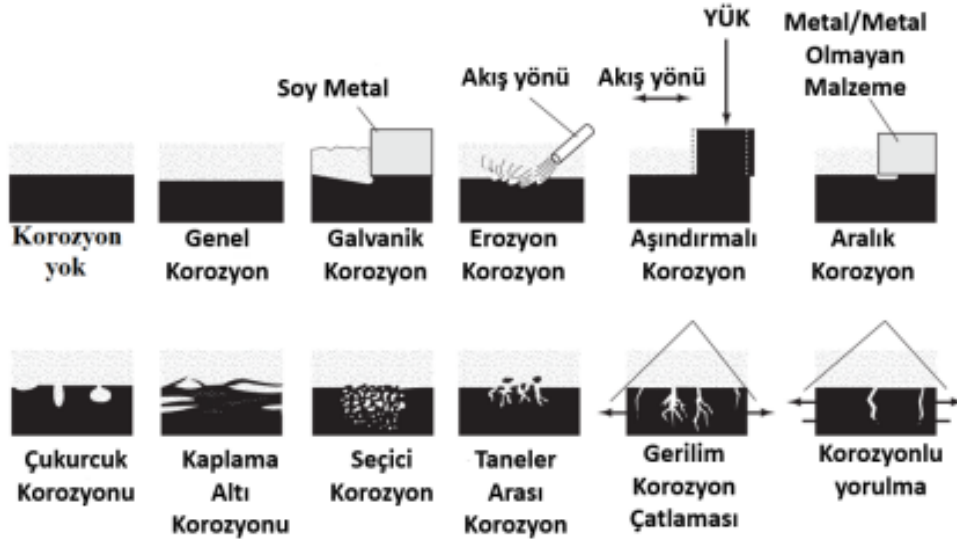
Artan çevre kirliliği ile günümüzde, korozyona karşı etkili bir şekilde kontrol sağlanması gerekmektedir (Çolak 2010). CrCoMo alaşımlı çeliğe 1000 °C 5 saat kutu borlama işlemi yapılmış ve Co₂B fazı elde edilmiştir. Borlamadan sonra CrCoMo alaşıma 1000 °C 2 Saat Ar (argon) gaz atmosferi altında difüzyon tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonucunda Co₂B oluşan tek fazlı 29 mikron elde edilmiştir. Hank çözeltisinde 1 ve 7 gün oda sıcaklığında elektrokimyasal korozyona tabi tutulmuştur. Deney sonucunda difüzyon tavlama işlemiyle elde edilen tek fazlı yapı korozyon direncinin 1 günde yaklaşık 30 kat arttığı 7 günde 20 kat artmıştır (Brito vd. 2021).

2.5.2 Korozyon Çeşitleri

Korozyon çeşitlerini dokuz başlık adı altında aşağıda sınıflandırılarak belirtilmiştir (Davis 2000, Kuruvila vd. 2018). Bunlar;

- Genel (Uniform) Korozyon
- Galvanik Korozyon
- Erozyonlu Korozyonu
- Aralık (Crevice) Korozyonu
- Çukurcuk (Pitting) Korozyonu
- Seçici (Dealloying) Korozyon
- Taneler Arası (Intergranular) Korozyon
- Gerilmeli Korozyon Çatlama (Stress Corrosion Cracking)
- Yorulmalı Korozyon (Fatigue Corrosion)

Korozyon türlerinin şematik gösterimi Şekil 2.14’de görülmektedir.



Şekil 2.14 Korozyon türleri (Davis 2000).

2.5.2.1 Uniform (Homojen) Korozyon

Genel korozyon, tanımlanmış korozyon formları içinde en yaygın olarak karşılaşılanıdır. Bir metalin ya da iş parçasının açıkta kalan hemen hemen sahip olduğu tüm yüzeyinin her alanında kimyasal ve elektrokimyasal tepkimenin homojen bir biçimde ilerleme kaydederek, metal yüzeyin her bölgesinde dengeli aşınmasıyla sonuçlanan korozyon çeşitlerinden biridir. Genel korozyon durumuna karşı alınabilecek en iyi önlemler; boyama ile kaplama sağlanması, inhibitör ve katodik koruma uygulamaları yapılarak bu durumda ortaya çıkan korozyon hızı yavaşlatılabilir (Hinds 2015, Kuruvila vd. 2018, Yalçın ve Koç 2014). Üniform korozyon, oluşan metal kaybı diğer korozyon türlerine göre yüksek olduğu için en yaygın korozyon türüdür. Ancak bu tür korozyonlardan daha az korkulmaktadır. Bunun nedeni bu korozyonun hızı basit laboratuvar şartlarında uygulanacak deneyler ile saptanmaktadır. Bu deneyler sayesinde bu korozyona maruz kalan parçaların ömürleri için tahminler yapılabilir (Kıncay vd. 2009).

2.5.2.2 Galvanik Korozyon

Isı ve nem gibi ortamlarda birbirlerine temas halinde bulunan farklı metal malzemelerde galvanik korozyon meydana gelir. Eğer izolasyonsuz alüminyum malzeme paslanmaz çelik temas ettiğinde zamanla alüminyum malzemenin üzerinde galvanik korozyon

oluşacaktır (Çolak 2010). Bir hücrede korozyonun hızını belirlemede en önemli seçim kriteri anot ve katot arasındaki potansiyel farktır. Oluşan bu potansiyel fark sonucu, sahip olduğu elektrod potansiyel değeri diğerine kıyasla daha elektronegatif olan metal parça anot olarak çok hızlı bir şekilde korozyona maruz kalmaktadır. Katot olan taraf ise bu durumun aksine daha yavaş ve düşük miktarlarda korozyona uğramaktadır. Elektrik akımı birbirlerinden farklı olarak ortaya çıkan bu tür korozyon çeşidine “Galvanik Korozyon” adı verilmektedir (Ahmad 2016, Fontana 1950).

2.5.2.3 Çukurcuk (Pitting) Korozyonu

Metal yüzeyinde küçük bölgelerde çukurcuklar, tepecikler oluşturarak, ortaya çıkan korozyon türüne çukurcuk korozyonu adı verilmektedir (Obeyesekere 2017). Oluşan çukurcuklar malzemede pasifliğin kaybolmasına sebep olur. Çukurcuk, malzemedeki tane sınırı, dislokasyonlar gibi zayıf noktalarda oluşur. Eğer pasif film tekrar oluşmazsa, korozyon devam eder ve tekrar çukurcuklar oluşur (Kaçar 1997). Korozyon sonucu oluşan çukurun derinleşmesi sonucu metal o noktadan delinir. Bu yüzden çukur (pitting) korozyonu tehlikelidir. Bundan dolayı bu korozyon türüne daha önce uğramış ya da uğramaya elverişli olan malzemeler tercih edilmemelidir (Görenler 2007).

2.5.2.4 Aralık Korozyonu

Bu korozyon türünde yüksek korozif ortamda bulunan metal parçaların yüzeylerindeki aralıklar içinde bölgesel korozyon oluşmaktadır. Burada yüzeyde bulunan aralık ya da yarık, korozif sıvıyı hapseden ancak akıp gitmesini engelleyen bir özellikte olmalıdır. Korozif sıvı aralığın içerisinde akmadığından dolayı sabit kalacak ve oksijen geçişini engelleyecektir. Böylelikle oksijen teması olmayan bölgeler anot, diğer bölgeler ise katot olacaktır. Bu korozyon, oksit tabakada veya pasif katmanlı metal ve alaşımlarında oluşmaktadır. Bu korozyon türü görünmeyen bölgelerde hasara yol açar. Bundan dolayı tehlikeli bir korozyon türüdür (Fontana vd. 1967) .

2.5.2.5 Seçimli Korozyon

Bu korozyon türünde alaşım içerisinde bulunan elementler korozyona uğrayarak uzaklaşmaktadır. Pirinç alaşımında çinko bakırdan önce yükseltgenir ve korozyona uğrar (Öztop 2009). Alaşımların seçici korozyonunun ortaya çıkmasındaki en önemli etkenlerden biri, korozyon direnci için önemli olan alaşım elementlerinin yerel konsantrasyon farklılıkları sonucu korozyona maruz kalarak ayrılması, bu ayrılma sonucunda ortaya çıkan korozyon olayına seçici korozyon denilmektedir (Elyiğit 2011).

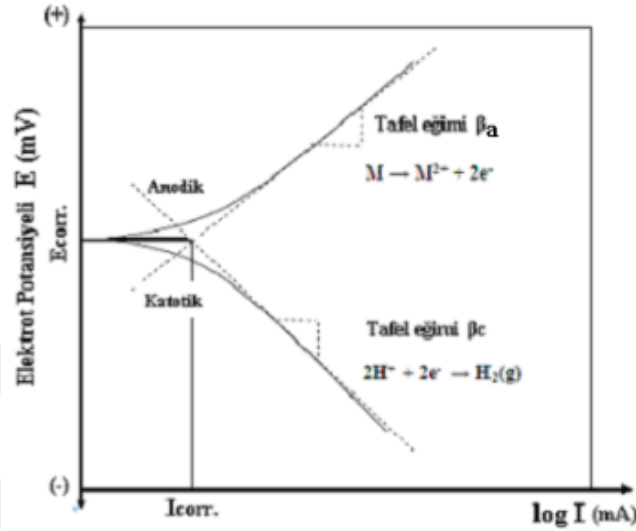
2.5.3 Korozyon Hızı Ölçme Yöntemleri

Metallerin korozyona uğramasının tanımı iletken bir ortamda yüzeyinden malzeme kaybının meydana gelerek hasara uğraması demektir. (Yanardağ 2011). Korozyonun türünü ve hızını etkileyen birçok faktör olduğu bilinmektedir. Korozyon hızı, birim zamanda korozyona maruz kalan metalin çözünme miktarıdır. Korozyonun önlenmesi için korozyon hızı kontrol altına alınarak hızı belirlenebilir. Bu nedenle elektrokimyasal yöntemler korozyon hızının en kısa sürede ölçülmesini sağlamaktadır. Kullanılan bu yöntemlerde korozyon hızı, akım yoğunluğu olarak elde edilmektedir. Tercih edilen yöntemler kütle kaybı, tafel ekstrapolasyon, lineer polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopidir (Kayalı 2011).

2.5.3.1 Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi

Tafel ekstrapolasyon yöntemlerine korozyon hızlarının analizinde sıklıkla başvurulmaktadır. Bu yöntem ile korozyon hızının tespiti yapılırken, anodik ve katodik polarizasyon ölçümleri yapılarak, elde edilen Tafel verileri ile korozyon hızın saptanması ve korozyon özelliklerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Tafel eğrilerinin bir çıktısı olarak iki tane polarizasyon eğrisi elde edilmektedir. Bu eğriler; anodik ve katodik polarizasyon eğrileridir (Şekil 2.15). Korozyon hızının tespiti için grafik üzerinde bu eğriler referans alınır. Tafel bölgelerinin ekstrapole edilmesi sağlanarak, yani bu bölgeden bir eğim çizgisi paralel olacak şekilde çizilerek, anodik bölge ile kesişmesi sağlanır (Çeğil ve Şaduman 2014). Bu iki bölgenin kesişmesiyle elde edilen yatay bileşen değeri, korozyon akım miktarını (I_{cor}), dikey bileşen değeri ise korozyon potansiyelini (E_{cor})

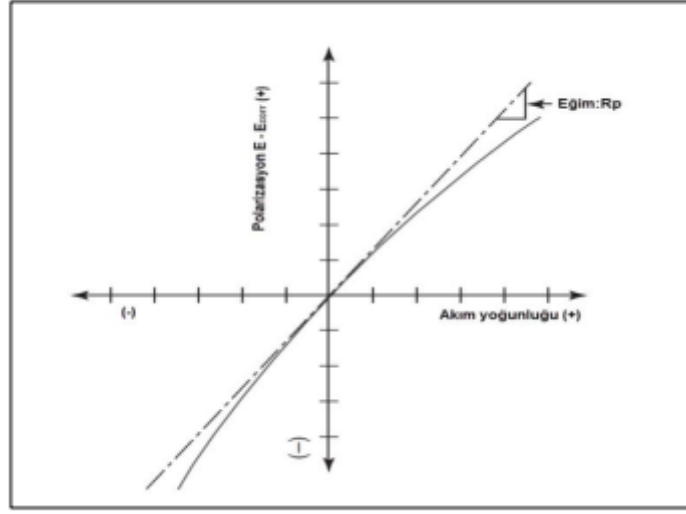
vermektedir. Bu da bize korozyon hızı hakkında bilgi vermektedir. Tafel eğrilerinin ekstrapole kısmı çok önemlidir. Bu bölgenin güvenli olması için korozyon potansiyelinden 40-50 mV sonra başlanmalı ve en az 10 kat olana kadar sürdürülmelidir (Çiftçi 2009, Kayalı 2011).



Şekil 2.15 Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri (Yakar 2010).

2.5.3.2 Lineer Polarizasyon Yöntemi

Tafel eğrileri biliniyorsa, korozyon akım değerleri polarizasyon direnci değeri ile hesaplaması yapılabilmektedir. Bu teknik yardımıyla, metalin sahip olduğu açık devre veya korozyon potansiyeli değerinden ± 10 mV daha uzak değer aralıkları referans alınarak, gerçekleştirilen akım yoğunluğu elektrot potansiyelinin doğrusal bir fonksiyon sonucu olarak elde edilmektedir (Pala 2013). Aşağıda verilen eğriden polarizasyon direnci ölçülmektedir (Fontana 1950, Pala 2013, Yalçın ve Koç 2014).



Şekil 2.16 Lineer polarizasyon direnci eğrisi (Pala 2013).

3. MATERYAL ve METOD

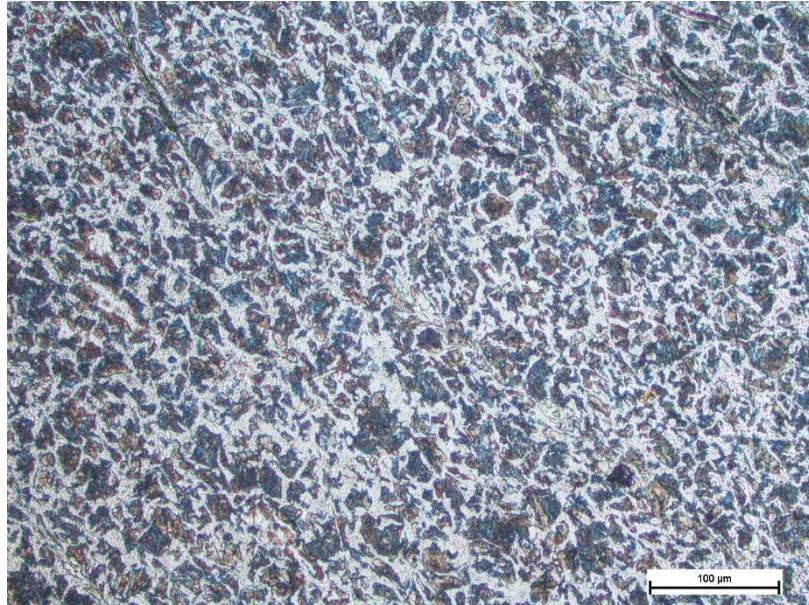
Bu bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme, deney cihazları ve kullanılan metotlar hakkında kısaca bilgiler verilmiştir.

3.1 Malzeme

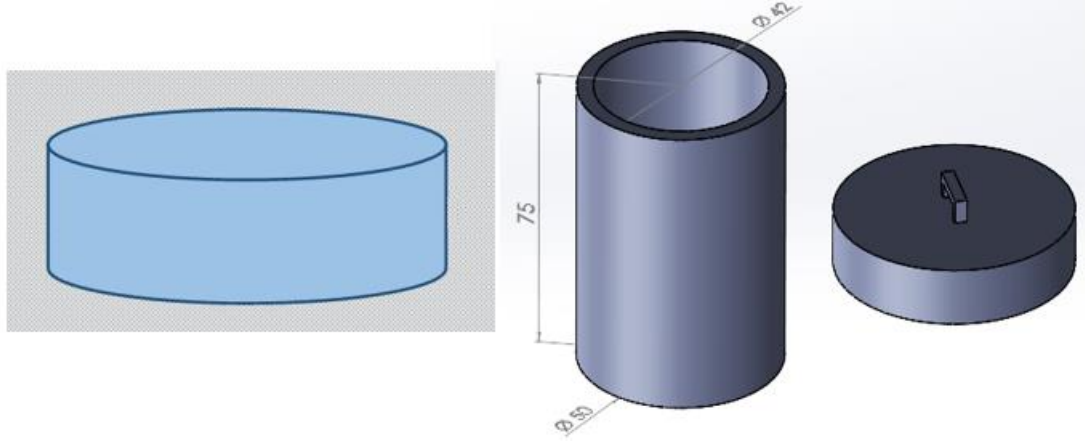
Bu çalışma için Ø20 mm ebatlarındaki AISI 1040 çeliği temin edilmiştir. AISI 1040 çeliğinin kimyasal (spektra analizi) bileşimi çizelge 3.1’de verilmiştir. AISI 1040 çeliğinin mikro yapısı şekil 3.1 verilmiştir. Deneylerde kullanılan AISI 1040 çeliği ve çelik pota şekil 3.2’de şematik olarak gösterilmiştir. Kesilen numuneler kutu borlama işleminde, AISI 316L paslanmaz çelikten imal edilen ve Şekil 3.2 de şematik olarak gösterilmiş çelik potalar kullanıldı. Borlama işleminin şematik gösterimi Şekil 3.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 AISI 1040 çeliğinin kimyasal bileşimi.

Çelik Türü	Kimyasal Bileşim (% Ağırlıkça)									
AISI 1040	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	P	Cu	S	Fe
	0.42	0.08	0.13	0.22	0,74	0,08	0.01	0,3	0.02	98



Şekil 3.1 AISI 1040 çeliğin satıldığı durumda optik mikroyapısı.



Şekil 3.2 Deneyler için hazırlanan AISI 1040 çelik numune ve AISI 316L paslanmaz çelik potanın şematik gösterimi.

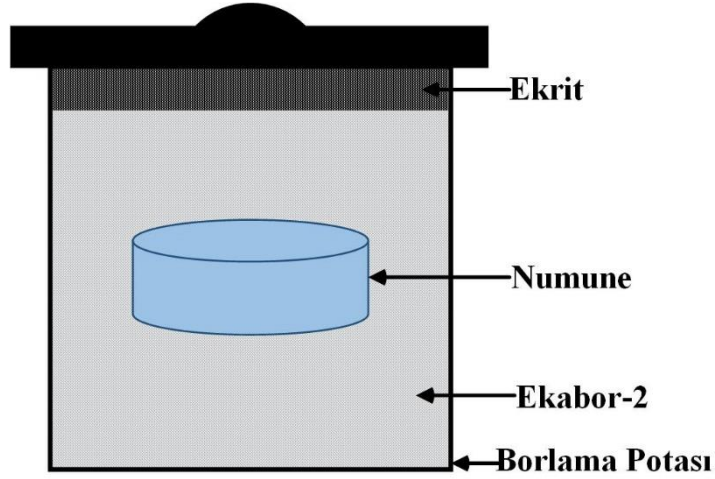
3.2 Borlama ve Difüzyon Tavlama İşlemi (DI)

AISI 1040 çeliğine yapılan işlemlerin kodları Çizelge 3.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.2 AISI 1040 çeliğine yapılan işlemler ve verilen kodlar.

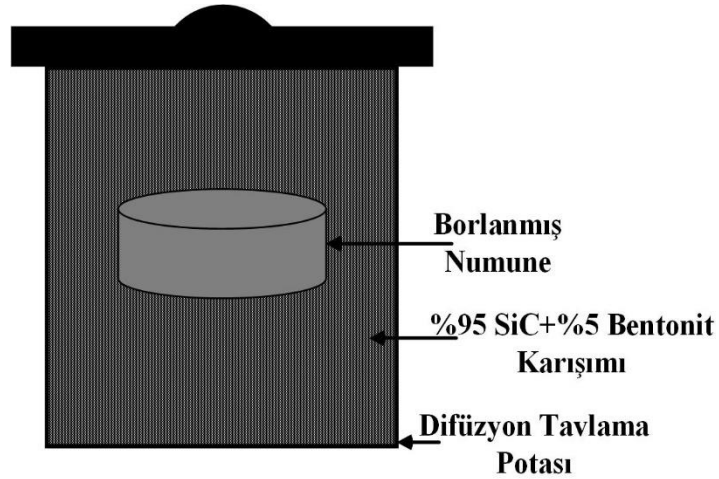
Yapılan İşlemler	Kısaltmalar
İşlemsiz AISI 1040 Çeliği	SD-1040
900 °C 4 saat Borlama	900B
900 °C 4 saat Borlama + 950 °C 4 saat Difüzyon Tavlama İşlemi	900B+950DI
900 °C 4 saat Borlama + 1000 °C 4 saat Difüzyon Tavlama İşlemi	900B+1000DI
950 °C 4 saat Borlama	950B
950 °C 4 saat Borlama + 950 °C 4 saat Difüzyon Tavlama İşlemi	950B+950DI
950 °C 4 saat Borlama + 1000 °C 4 saat Difüzyon Tavlama İşlemi	950B+1000DI

Borlama işleminde Şekil 3.3’de şematik olarak gösterilen kutu borlama yöntemi kullanılmıştır. Deney numuneleri paslanmaz çelik kutu içerisinde Ticari Ekabor®-II tozuna gömüldükten sonra, üste 5 mm kadar Ekrit tozu serpilerek kapakla kapatılmıştır. Numunelerin içinde bulunduğu paslanmaz çelik pota fırın içine konulduktan sonra fırın 900 ve 950 °C’de 4 saat bekletme süresinde borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi bittikten sonra fırın içerisinden çıkartılan çelik kutu içerisindeki numuneler oda sıcaklığına kadar havada yavaş soğutulmuştur.



Şekil 3.3 Borlama işleminin yapılış yönteminin şematik gösterimi.

Difüzyon Tavlama işlemi (DI) Şekil 3.4’de şematik olarak gösterilen kutu yöntemi kullanılmıştır. Borlanmış olan deney numuneleri paslanmaz çelik kutu içerisinde %95 SiC + % 5 Bentonit karışımı olan toza gömüldükten sonra kapakla kapatılmıştır. Numunelerin içinde bulunduğu paslanmaz çelik pota fırın içine konulduktan sonra fırın 950 ve 1000 °C’de 4 saat bekletme süresinde difüzyon tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Difüzyon Tavlama işlemi bittikten sonra fırın içerisinden çıkartılan çelik kutu içerisindeki numuneler oda sıcaklığına kadar havada yavaş soğutulmuştur.



Şekil 3.4 Difüzyon tavlama işleminin yapılış yönteminin şematik gösterimi.

3.2 Metalografik Çalışmalar

Borlanan ve Borlama sonrasında Difüzyon Tavlama işlemine tabi tutulan numuneler hassas kesme cihazı ile kesilmiştir. Kesilen numuneler sıcak bakalite alma cihazı ile kalıp haline getirildi. Sıcak reçine için epoksi reçine kullanıldı. Kesilen numunelerin kesitleri

metalografik olarak hazırlanmıştır. Numunelerin yüzeyleri sırasıyla 120, 240, 320, 600, 1000 ve 1200 gritlik zımparalardan geçirilerek (Resim 3.1) zımparalandıktan sonra 3 μm 'luk elmas pasta ile parlatılmıştır. % 3'lük nital ile dağlanan numuneler optik mikroskop (Resim 2, Olympus BX-60) ve XRD analizi (Bruker Marka D 8 Advance model) X-ışınları difraktometresi yardımıyla karakterize edilmiştir. X-ışınları analizinde $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5406\text{\AA}$) radyasyonu kullanılmıştır. Oluşan borür tabakalarının kalınlığı optik mikroskoba bağlı bir aparat yardımı ile ölçülmüştür. Borlanmış numunelerin sertlik değerleri mikrosertlik cihazı (Shimadzu HM-2) 50 gr. yük altında ve 15 sn bekletme süresi ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan sertlik ölçümleri, en az 20 farklı ölçümde en yüksek ve en düşük iki değer çıkartılıp geri kalan değerlerin ortalama değerleri ve standart sapmaları alınarak sertlik değerleri tespit edilmiştir.



Resim 3.1 Numune zımparalama ve parlatma cihazı.



Resim 3.2 Mikroyapı görüntüleri için kullanılan optik mikroskop.

3.3 Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Yöntem

Deneyler esnasında kullanılan cihazlar ve özellikleri şu şekilde sıralanmıştır:

3.3.1 Borlama ve Difüzyon Tavlama Fırını

Bu çalışmada, hem borlama işleminde hemde borlama sonrasında yapılan difüzyon tavlama işleminde tel rezistanslı kuyu fırını kullanılmıştır. Fırın atmosferik şartlara açıktır. Fırın hassasiyeti ± 1 °C dir. Borlama ve DI işleminin yapıldığı fırın Resim 3.3 de görülmektedir.



Resim 3.3 Borlama işleminde kullanılan fırının fotoğrafı.

3.3.2 Hassas Kesme Cihazı

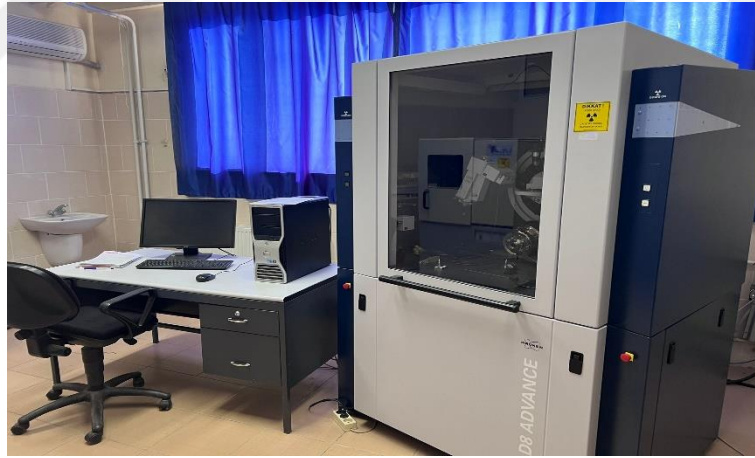
AISI 1040 çeliğinin elde edilen borür tabakasının kırılmaması için küçük otomatik STRUERS Minitom marka hassas kesme cihazı kullanıldı. Borlanan numuneler hassas kesme cihazı ile yaklaşık olarak 12-16 saatlik düşük devir düşük hızda elmas kaplı disk ile hassas kesme işlemleri yapıldı.



Resim 3.4 Hassas Kesme cihazı.

3.3.3 X-Işınları Difraksiyon (XRD) Analiz Cihazı

X-ışını difraksiyon analizi, borlama işlemi ve borlama sonrası DI işlemi ile AISI 1040 çelik numunelerin yüzeyinde oluşan borür tabakasının karakterizasyonu yapılmıştır. Borlanan numunelerin X-ışınları difraksiyon analizleri 20-90 derece arasında, $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılan Bruker Marka D 8 Advance marka X-ışınları Difraktometresi ile gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.5 Yüksek Sıcaklık X-Işınları Kırınım Cihazı.

3.3.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Borlama işlemi ve borlama sonrası DI işlemi yapılan numunelerin aşınma izi analizleri LEO 1430 VP markalı taramalı elektron mikroskobunda gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.6 Tabaka kalınlığı belirlemek ve aşınma izi karakterizasyonu için kullanılan taramalı elektron mikroskobu.

3.3.5 Mikro-Sertlik Cihazı

Borlanan ve Borlama sonrası DI işlemi yapılmış AISI 1040 çeliğinin yüzeyinde oluşan borürlerin sertlik ölçümlerini SHIMADZU HVM-2 model sertlik cihazı ile yüzeyden 50 gr. yük altında 15 sn bekletme ile Vickers uç kullanılarak yapılmıştır. Yüzey işlemi yapılan AISI 1040 çeliğinin yüzeyinden 20 ölçüm alınarak en yüksek ve en düşük değerler atılıp geri kalan değerlerin ortalamaları alınarak sertlik değerleri hesaplanmıştır.



Resim 3.7 AISI 1040 çeliğinin sertlik değerlerinin alındığı mikro-sertlik cihazı.

3.4 Aşınma Deneyleri

Borlanmış ve DI uygulanmış AISI 1040 çeliğin sürtünme ve aşınma özellikleri ASTM G99 standardına göre disk üzerinde bilye test cihazı ile yapılmıştır. Aşınma testlerinde 8 mm çapında WC-Co bilyeler kullanılmıştır. Her test için ayrı bir aşındırıcı eleman (WC-Co bilye) kullanılarak yüzeyin bozulmasından kaynaklanan hatalar ortadan kaldırılmıştır. Aşınma testleri, oda sıcaklığında, kuru koşullarda, 10 N yük altında ve 0,3 m/s kayma hızında, 500 metre kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Her aşınma testinden önce ve sonra, her numune ve aşınma elemanı alkolle temizlendi. Aşınma testinin ardından numunelerin aşınma hacimleri, aşınmanın enine kesit alanları ile Tribotechnic Rugosimeter cihazından elde edilen aşınma izinin genişliği çarpılarak sayısallaştırılmış ve aşınma oranı eşitlik 3.1 deki formülle hesaplanmıştır:

$$\text{Aşınma Hızı} = \text{Aşınma Hacmi} / (\text{Uygulanan Yük} \times \text{Kayma Mesafesi}), \text{ mm}^3/\text{N m} \quad (3.1)$$

Kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayıları sürtünme katsayısı programı ile elde edilmiştir. Numuneler üzerindeki aşınma izlerinin yüzey profilleri ve yüzey pürüzlülükleri Tribotechnic Rugosimeter ile ölçülmüştür. Aşınmış yüzeyler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendi.



Resim 3.8 Aşınma cihazının görünüşü.

3.5 Elektrokimyasal Korozyon Deneyleri

Elektrokimyasal korozyon deneyleri, A.K.Ü, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinde bulunan Gamry Reference 600 Potansiyotat/Galvanostat cihazında gerçekleştirilmiştir. Resim 3.9’de akım-potansiyel eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan deney düzeneği verilmiştir. Korozyon deneylerine başlamadan önce sırasıyla 30 °C’de 15 dk. Aseton, etil alkol ve çift distile edilmiş suda ultrasonik olarak temizlenen numuneler daha sonra 40 °C’de Etüv fırını içerisinde kurutulmuştur.



Resim 3.9 Elektrokimyasal Korozyon deney düzeneği.

Temizlenen numuneler % 3.5 NaCl ortamında oda sıcaklığında elektrokimyasal korozyon deneyleri başlatılmıştır. Korozyon deneylerinden elde edilen tafel eğrilerinden korozyon akımı (I_{corr}), korozyon hızı, polarizasyon direnci (R_p) korozyon potansiyeli (E_{corr}) değerleri tespit edilmiştir. Korozyon akım değerleri yüzey alanına bölünerek korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) bulunmuştur.

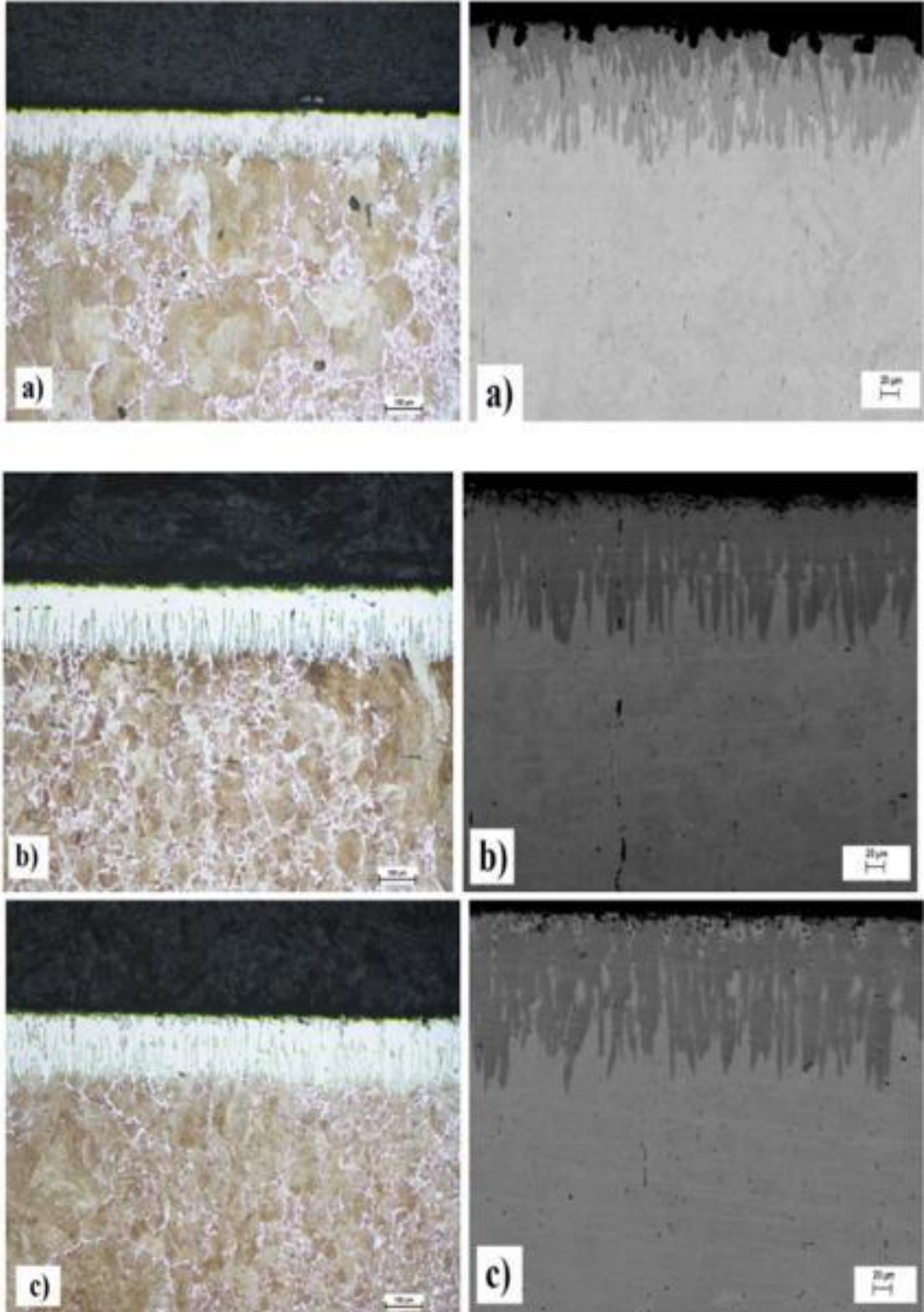
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ

4.1 Mikroyapı Özellikleri

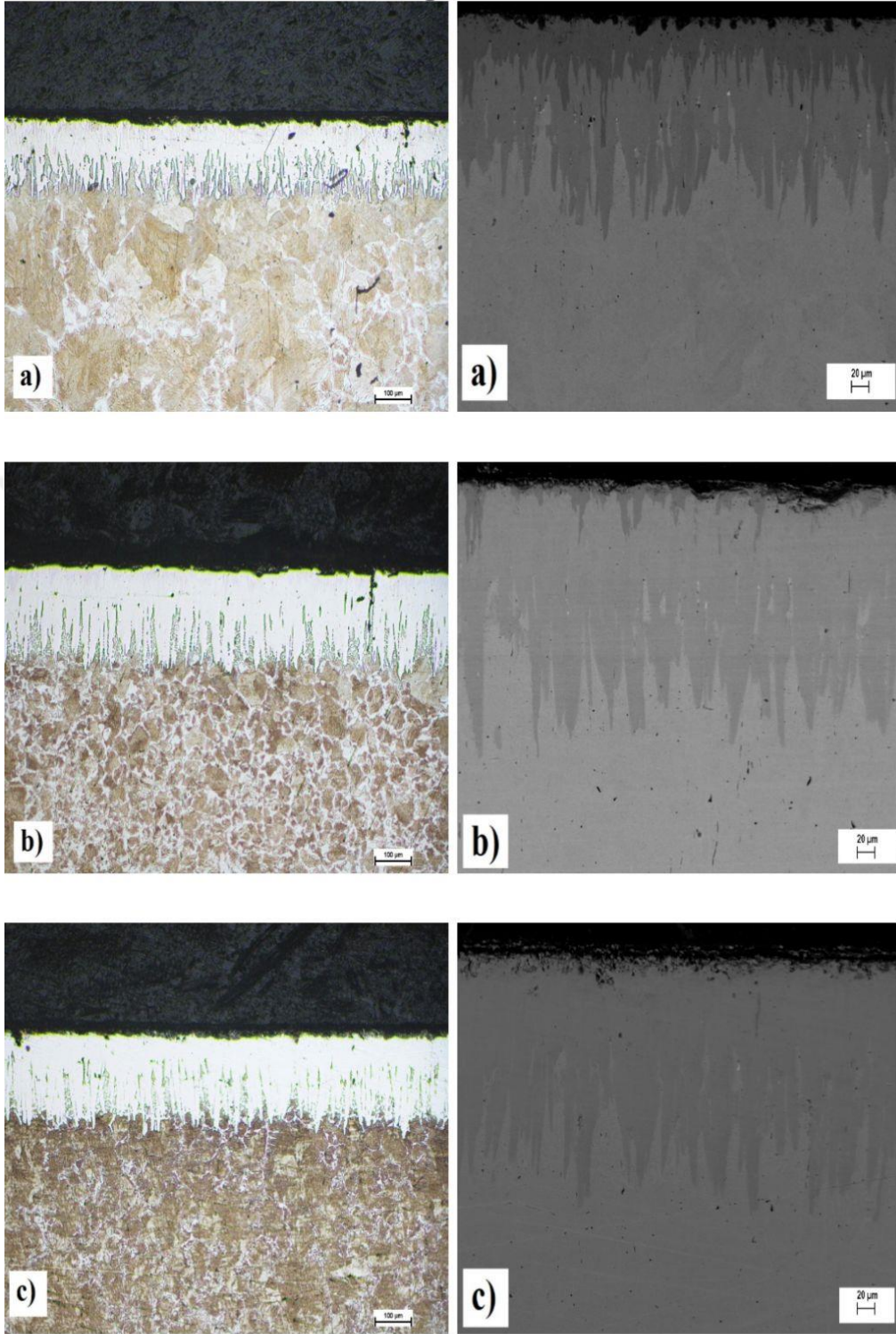
Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 de 900 °C ve 950 °C'de ve 4 saat bekletme süresinde borlama işlemi ile borlama işleminden sonra 950 °C ve 1000 °C de difüzyon tavlama işlemi gerçekleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin optik mikro yapı görüntüleri verilmiştir.

AISI 1040 çeliğinin kimyasal bileşimine bağlı olarak elde edilen borür tabakası testere dişli bir morfolojidedir. Borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte tabaka kalınlığının arttığı görülmektedir.

AISI 1040 çeliği üzerine borlama yapılarak elde edilen borür tabakasının mikroyapı resimlerinde FeB (borlanmış yüzeyin dış bölgesi) ve Fe₂B tabakasından (iç bölge) oluştuğu görülmektedir. Borlama işlemlerinden sonra FeB fazının bir kısmı DI ile 950 °C'de 4 saat süreyle çözünerek Fe₂B fazına dönüşmüştür. Ancak Difüzyon Tavlama sıcaklığının artması ile FeB fazı tamamen çözünerek SEM mikroskobu belirlenen Fe₂B fazına dönüşmüştür (Hernández-Ramírez vd. 2020, Campos-Silva vd. 2017, Kulka vd. 2013). Böylece borlama işlemlerinden sonra AISI 1040 çeliği üzerine endüstriyel uygulamalarda tercih edilen tek fazlı yapı olan Fe₂B DAP ile 1000 °C'de 4 saat süreyle elde edilmiştir (Şekil 4.1c ve Şekil 4.2c).



Şekil 4.1 AISI 1040 çeliğinin a) 900B, b) 900B+950DI ve c) 900B+1000DI numunelerin optik ve SEM resimleri.



Şekil 4.2 AISI 1040 çeliğinin a) 950B, b) 950B+950DI ve c) 950B+1000DI numunelerin optik ve SEM resimleri.

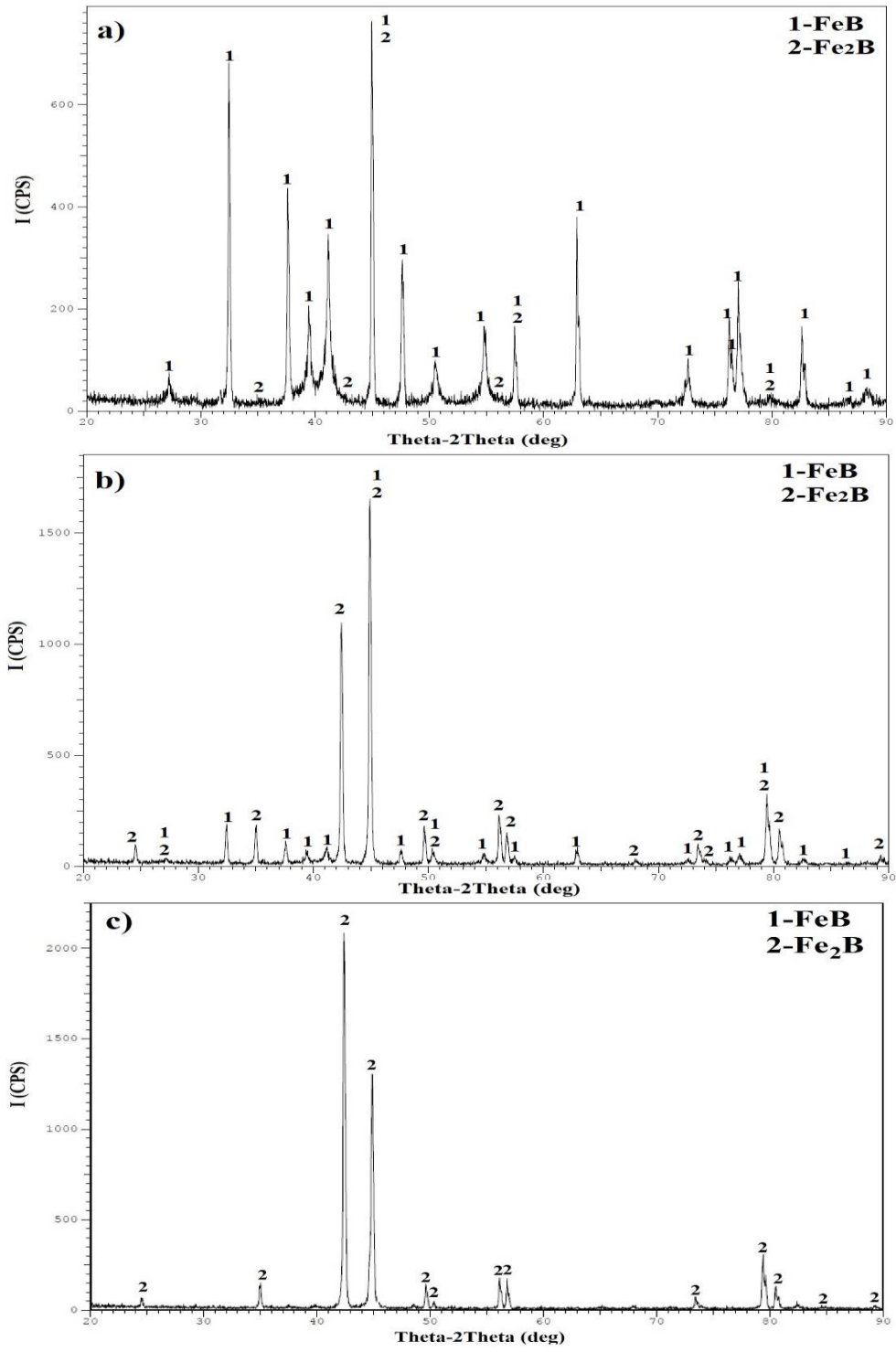
Borlanmış çeliklere uygulanan DI işleminin türü ne olursa olsun (yani sıvı, katı veya gaz yöntemleri), Fırında ortam atmosferinde gerçekleştirilen tavlama difüzyon işlemi sırasında arayüzlerde dönüşümler meydana gelir (Eşitlik 4.1 ve Eşitlik 4.2).



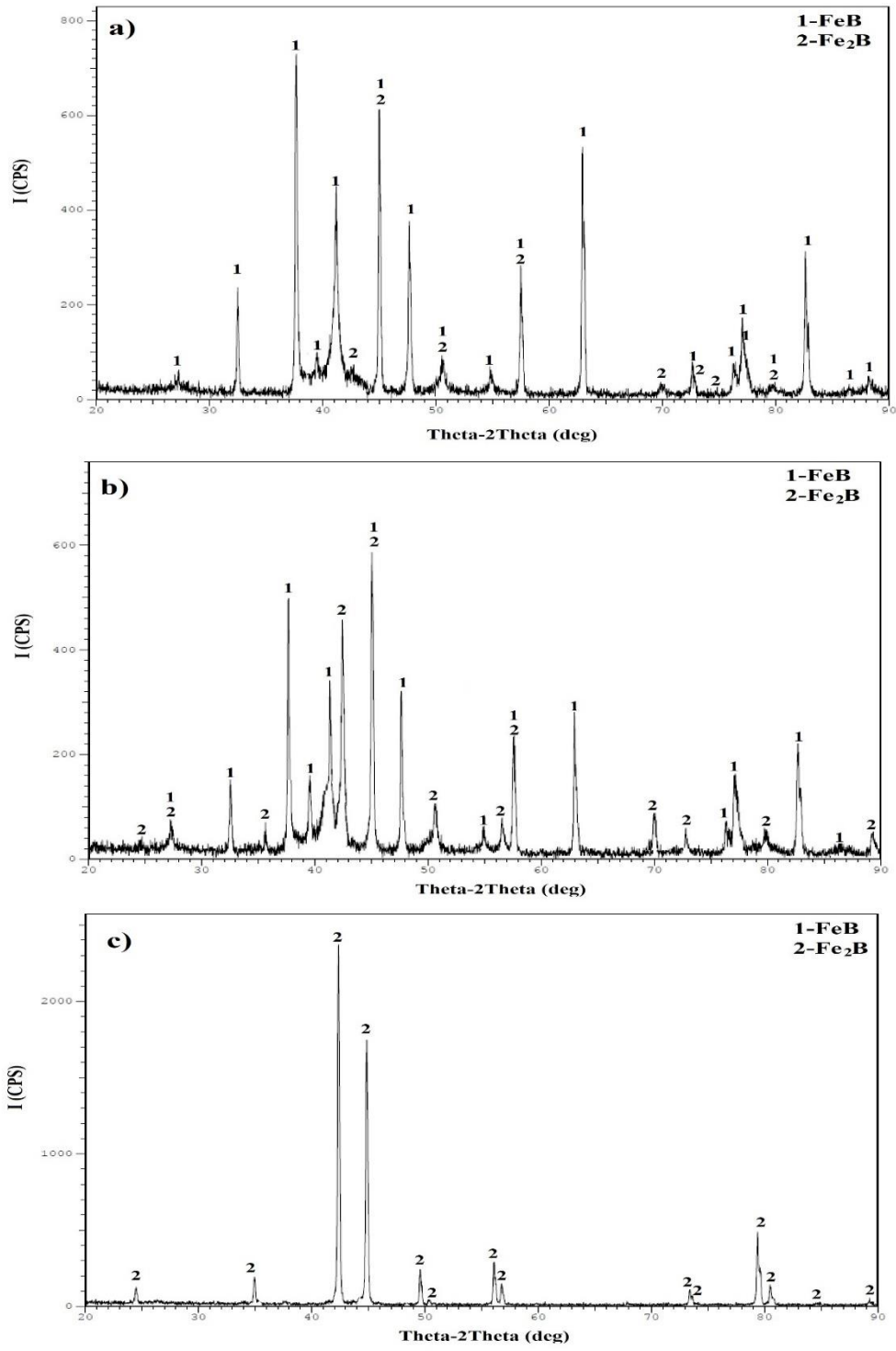
FeB-Fe₂B interfazından salınan bor atomları, substratın demiri ile reaksiyona girerek Fe₂B tabakası boyunca difüze olur ve Fe₂B-altlık interfazında daha fazla Fe₂B geliştirir (Dybkov vd. 2006, Rayane vd. 2017). Bu nedenle, AISI 1040 çeliği üzerinde daha yüksek bir difüzyon tavlama sıcaklığında (1000 °C), FeB'nin tamamen çözünmesiyle homojen bir Fe₂B fazı elde edilmiştir. Borlanmış çeliklerde genellikle FeB ve Fe₂B fazları elde edilir. Ancak endüstriyel uygulamalarda tek fazlı bir yapıya sahip olunması tercih edilmektedir çünkü FeB ve Fe₂B fazları katman bölgesinde farklı gerilmeler uygulamaktadır yani FeB fazı çekme gerilmesine, Fe₂B basma kuvvetlerine neden olmaktadır. FeB fazı, sert ve kırılgan yapısı ve dış kuvvetlere maruz kaldığında kırılma eğilimi nedeniyle istenmeyen bir durum olduğundan, testere dişi şeklinde tek bir Fe₂B fazı istenmektedir (Jain vd. 2002, Erdoğan 2019). Bu çalışmada yüksek difüzyon tavlama sıcaklıklarında (1000 °C) istenilen tek fazlı Fe₂B fazı elde edilmiştir.

4.2 XRD Analizleri

Kaplama tabakasında elde edilen fazların tespiti için X-ışınları difraksiyon analiz yöntemi kullanılmıştır. Şekil 4.3 de 900 °C de 4 saat süre ve Şekil 4.4 de 950 °C de 4 saat süre ile borlanmış AISI 1040 çeliği aynı zamanda borlama işlemi sonrasında sırasıyla 950 °C ve 1000 °C de difüzyon tavlama işlemi gerçekleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin XRD analizleri verilmiştir. Borlama işlemlerinde FeB ve Fe₂B fazlarından oluşan çift fazlı bir yapı elde edilirken DAP işlem sıcaklığının artmasıyla FeB fazının çözünerek Fe₂B fazına dönüşmesiyle istenen tek fazlı bir yapı elde edilmiştir. Borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte FeB fazı daha baskın olarak görülmektedir.



Şekil 4.3 AISI 1040 çeliğinin a) 900B, b) 900B+950DI ve c) 900B+1000DI numunelerin XRD analizleri.



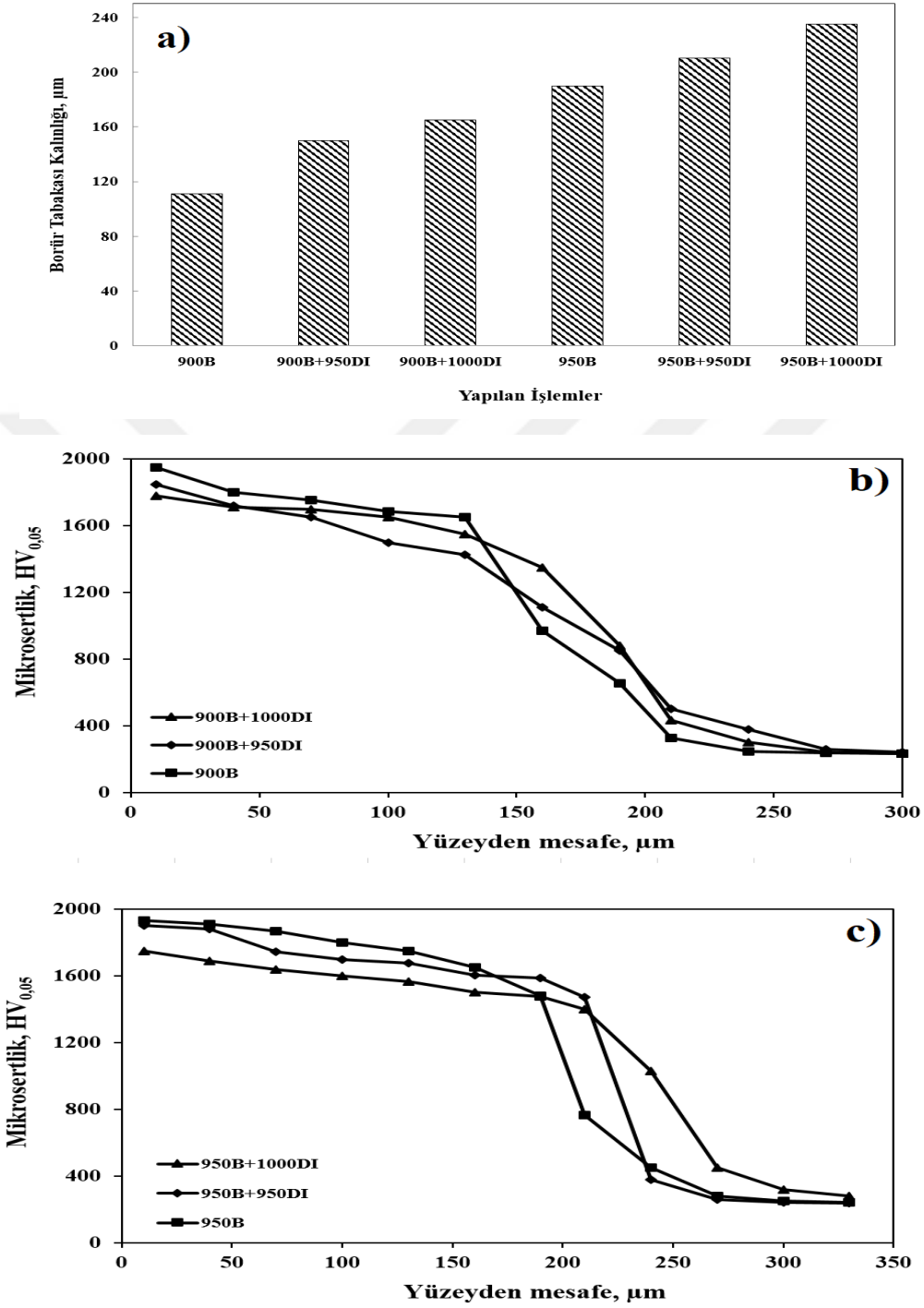
Şekil 4.4 AISI 1040 çeliğinin a) 950B, b) 950B+950DI ve c) 950B+1000DI numunelerin XRD analizleri.

4.3 Tabaka kalınlığı ve Sertlik Özellikleri

Şekil 4.5a'ya göre elde edilen toplam borür tabakası kalınlığı 900B (FeB + Fe₂B) için 111 µm ve 950B (FeB + Fe₂B) için 190 µm olarak belirlenmiştir. 900B+950DI (FeB + Fe₂B) için 150 µm, 950B+950DI (FeB + Fe₂B) için 210 µm, 900B+1000DI(Fe₂B) için 165 µm ve 950B+1000DI (Fe₂B) için 235 µm'dir. Bu kaplama tabakası kalınlıkları, AISI 1040 çeliğinin düşük alaşımlı bir çelik olması nedeniyle elde edilmiştir. Borun alt yüzeye difüzyonu, alaşım elementlerinin sayısı arttıkça alaşım elementleri tarafından yavaşlatılır (Kayalı vd. 2020,2021).

Borlama işlemi AISI 1040 çeliğinin yüzey sertlik değerlerini yaklaşık 7-8 kat arttırmıştır. Sertlik değerlerindeki artış borlama sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir (Kayalı 2013, Taktak 2007). Çeliklerin yüzeyden içeriye sertlik dağılımı Şekil 4.5b ve 4.5c'de gösterilmiştir. Borür tabakasının sertliği, sertlik değerlerinin yüzeyden içe doğru dağılımında belirtildiği gibi, borür tabakası boyunca yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Matrikse ulaşıldığında ani bir düşüş gözlemlendi. DI sıcaklığının artmasıyla sertlik değerleri düşmüştür. Bu, yapıdaki FeB fazının Fe₂B fazına dönüştürülmesinden kaynaklanır. FeB 1900-2100 HV ve Fe₂B 1650-1800 HV arasında sertlik değerlerine sahip olduğundan, Fe₂B'nin FeB'den daha düşük sertliğe sahip olduğu çok iyi bilinmektedir(Sinha 1991, Matushcka 1987, Jibo vd. 2011). Bu da FeB fazının yüzeyde çözünmesinin ve Fe₂B fazındaki artışın bir başka göstergesidir. Borlamasız AISI 1040 çeliğinin (SD-1040) yüzey sertlik değerleri 240 HV_{0.05} iken borlama işlemi ile 900B (FeB + Fe₂B):1950 HV_{0.05}'e yükselmiştir. Borlama işlemi sonrası yapılan DI ile 900B+950DI (FeB + Fe₂B):1847 HV_{0.05}, 900B+1000DI(Fe₂B):1780 HV_{0.05} yüzey sertliği elde edilmiştir. Ayrıca 950B (FeB + Fe₂B) kodlu numunede borlama sıcaklığı artırılarak 1932 HV_{0.05} yüzey sertliği elde edilmiştir. Borlama işleminden sonra DI ile 950B+950DI (FeB + Fe₂B) :1903 HV_{0.05}, 950B+1000DI(Fe₂B):1750 HV_{0.05} yüzey sertlikleri belirlenmiştir. Birçok çalışma borlama işlemi ile elde edilen FeB ve Fe₂B fazlarının sertliklerinin FeB:1800-2400 HV ve Fe₂B: 1600-1800 HV arasında sertlik değerleri bildirmiştir (Sinha 1991) (Küper vd. 2000, Jibo vd. 2011). Bu, çalışmamızda elde edilen sertliklerin bildirilen bu değerler arasında olduğu anlamına gelir. Difüzyon tavlama sıcaklığı ile FeB fazlarının çözünerek azalması ve hatta difüzyon tavlama sıcaklığının artması ile yapının

tamamen Fe_2B 'ye dönüşmesi ile sertlik değerlerinin düştüğü görülmüştür. Bu azalma literatür de bildirilen Fe_2B fazının sertlik değerleri arasındadır.



Şekil 4.5 a) İşlem süresi ve sıcaklığın fonksiyonu olarak AISI 1040 çeliği üzerinde oluşan borür tabakası kalınlığı, b) 900 °C'de 4 saat borlanan AISI 1040 çeliği yüzeyinde oluşan borür tabakalarının sertlik değişimi, c) 950 °C'de 4 saat borlanan AISI 1040 çeliğinin yüzeyinde oluşan borür tabakalarının sertlik değişimi.

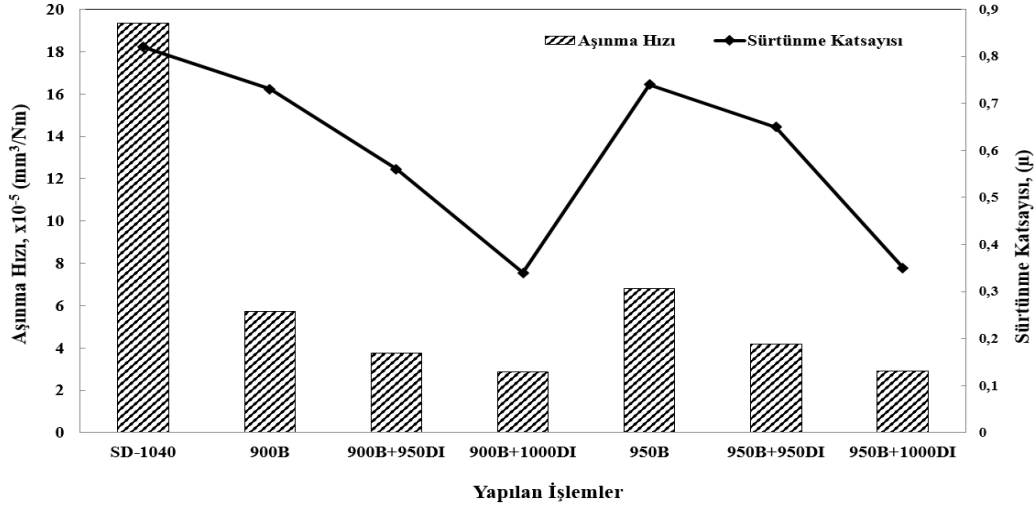
4.4 Aşınma Karakterizasyonu

Borlanmış ve DI uygulanmış numunelerin sürtünme katsayısı ve aşınma hızındaki değişim, kuru kayma ortamında 10 N yük için borlama sıcaklığı ve WC-Co bilyeye karşı difüzyon tavlama sıcaklığına sahip numuneler için Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, Borlanmış ve Difüzyon tavlama uygulanmış AISI 1040 çeliğin sürtünme katsayısı, İşlenmemiş AISI 1040 çeliğe göre daha düşüktür. Borlama sıcaklığı arttıkça sürtünme katsayısı çok az artmıştır (900B= 0.73, 950B= 0.74). Bunun nedeni yapıdaki FeB/Fe₂B oranının artmasının yapıda daha fazla çekme gerilmelerine neden olması olabilir (Cimenoglu vd. 2014). Artan DI sıcaklığı ile yaklaşık %50 oranında azalmıştır. En düşük sürtünme katsayısı 0,34 ile 900B+1000DI numunesinde gözlenirken, en yüksek sürtünme katsayısı 0,82 ile 10 N yük altında işlem görmemiş AISI 1040 çeliğinde bulundu.

Borlama sıcaklığı arttıkça aşınma oranı da artmaktadır (900B=5.713x10⁻⁵ mm³/Nm, 950B= 6.799x10⁻⁵ mm³/Nm). Ancak difüzyon tavlama sıcaklığının artması ile aşınma oranı değerleri düşmektedir. AISI 1040 çeliğinin aşınma direnci borlama ve DI ile 5-7 kat artmıştır (Gök vd., 2017). En düşük aşınma oranı (2.865x10⁻⁵ mm³/Nm) hem borlanmış hem de DI uygulanmış 900B+1000DI kodlu numunede, en yüksek aşınma oranı (19.336x10⁻⁵ mm³/Nm) ise işlem görmemiş AISI1040 çeliğinde bulunmuştur. Hem FeB hem de Fe₂B fazlarının birlikte bulunduğu borür tabakalarında, üst FeB fazının çekme gerilmesi ve alt Fe₂B fazının basma gerilmesi nedeniyle bu iki tabaka arasında çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar aşınma sürecinde tekrarlanan yüklerle yüzeye doğru kırılarak aşınma oranını arttırdığından genellikle tek fazlı bir yapı tercih edilir (Taktak vd. 2006). XRD analizinde belirlendiği gibi (bkz. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4), artan difüzyon tavlama sıcaklığı ile tek fazlı bir Fe₂B borür tabakası elde edildi. İki fazlı (FeB+Fe₂B) borür kaplamaya göre tek fazlı Fe₂B kaplama daha az kırılığandır ve oldukça iyi aşınma direncine sahip olduğu için Fe₂B fazından oluşan tek fazlı borür tabakalarda maksimum aşınma direnci elde edilmiştir (Jibo vd. 2011).

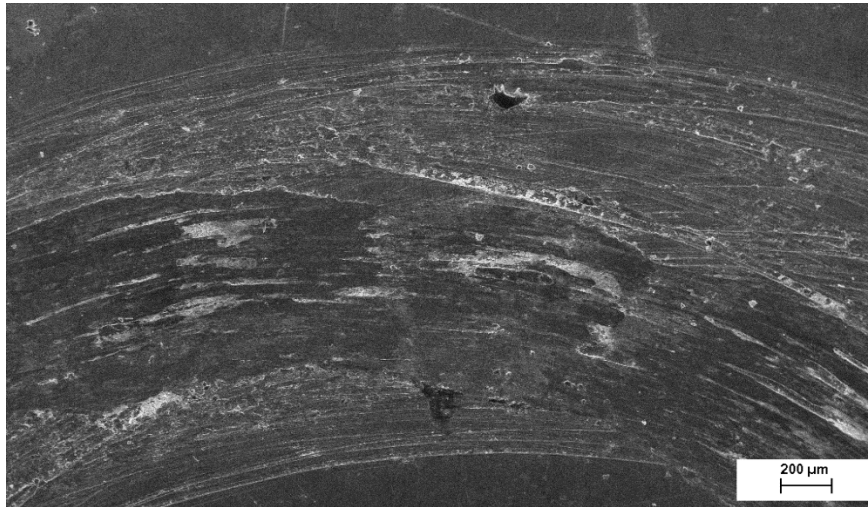
Kuru ortam aşınma testinin ardından, borlama sıcaklığına ve difüzyon tavlama sıcaklığına bağlı olarak aşınma izi derinliklerinde ve alan değerlerinde düşüşler olmuştur. Kaplamasız AISI 1040 çeliğinde en yüksek aşınma izi derinliği gözlemlenirken,

900B+1000DI kodlu numunede en düşük aşınma izi derinliği elde edilmiştir. Borlama ve DI işleminin aşınma oranını azalttığı gösterilmiştir. Bulgular aşınmanın borür tabakasında meydana geldiğini göstermektedir (Çizelge 4.1).



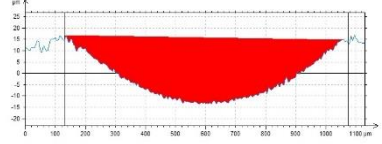
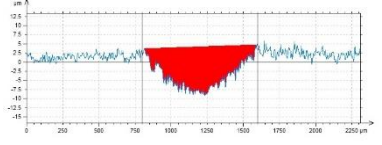
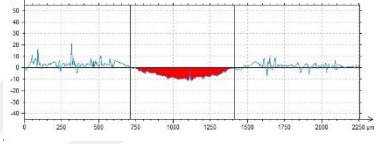
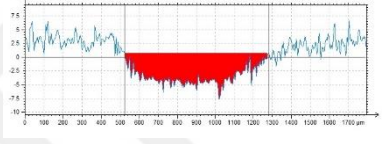
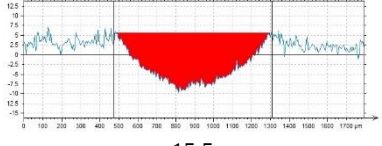
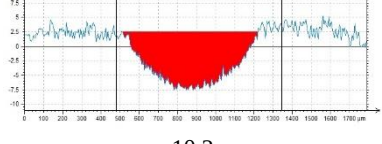
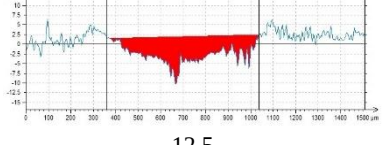
Şekil 4.6 Borürlü ve DI AISI 1040 çeliğin Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Hızı.

Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 de, WC-Co topuna karşı kayma aşınma testinden üretilen aşınma izlerinin SEM resimlerini göstermektedir. Aşınma izi görüntülerinde görüldüğü gibi aşınma oranı değeri en yüksek olan SD-1040 numunesinde delaminasyonlar ve aşınma birikintileri olduğu ve aşınma izinde etki nedeniyle birkaç plastik deformasyon meydana geldiği görülmektedir. Yüzey sertliği düşük olan SD-1040 kodlu numunede abrasiv aşınma mekanizması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aşınma sırasında malzemeden kopan aşınma kalıntıları da Şekil 4.7'de görülmektedir.



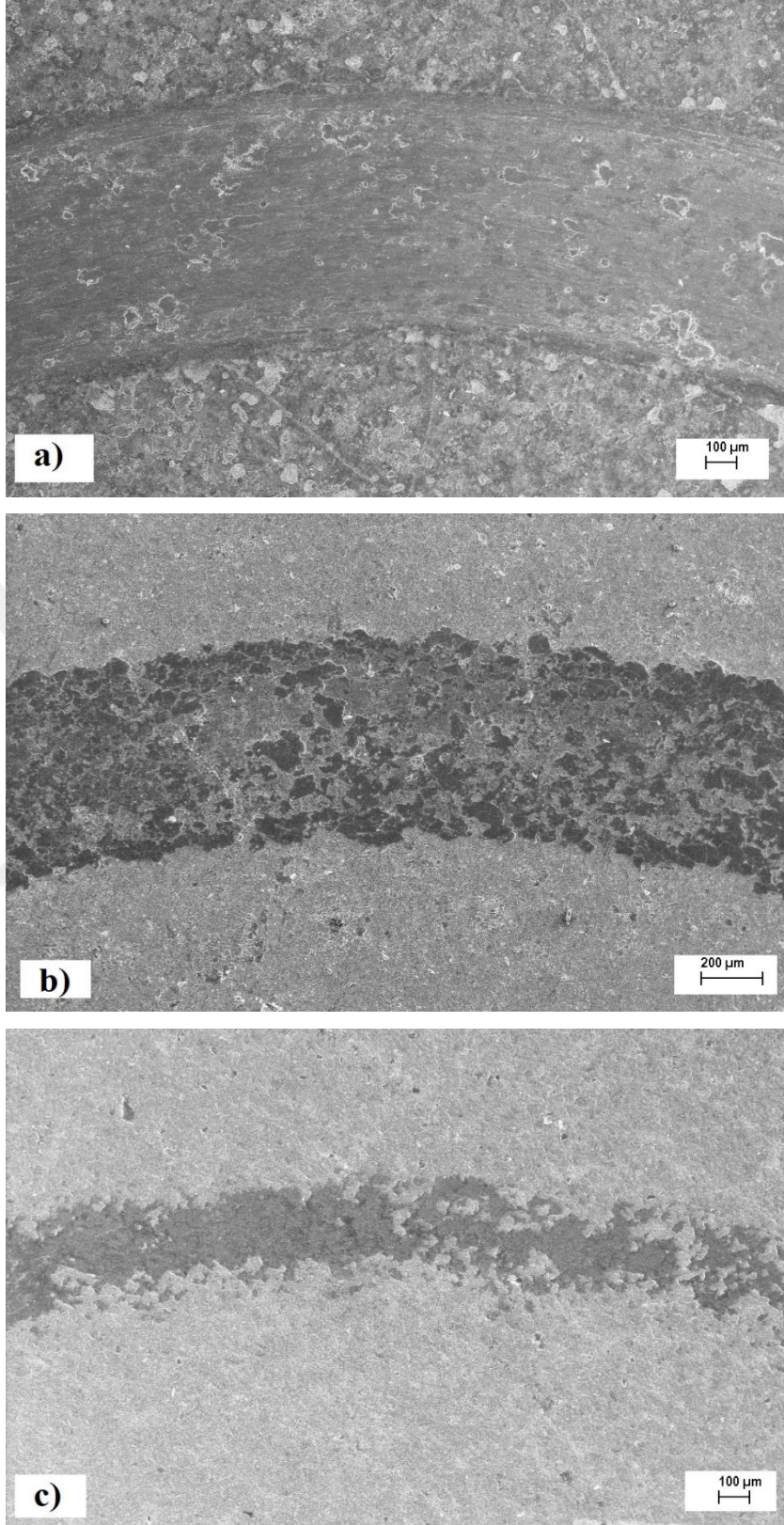
Şekil 4.7 İşlemsiz 1040 çeliğinin Aşınma izi.

Çizelge 4.1 Borlanmış ve Difüzyon Tavlama İşlemleri AISI 1040 çeliğin aşınma değerleri.

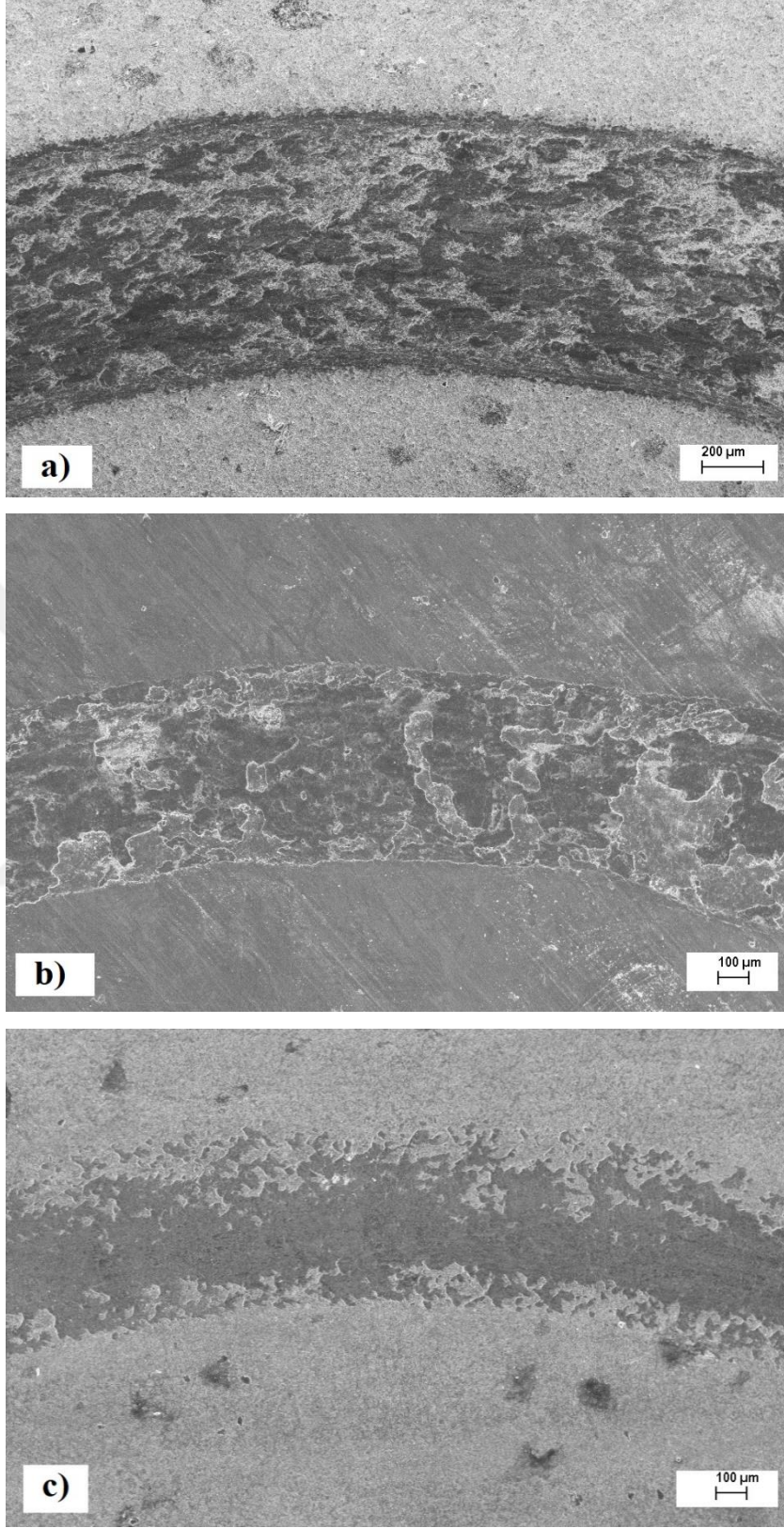
İşlemler	Aşınma Hızı (mm ³ /Nm)	Sürtünme Katsayısı (μ)	Aşınma Alanı (μm ²)	Aşınma Derinliği (μm)
SD-1040	19.336	0.82	17793	 13.7
900B	5.713	0.73	6499	 13.7
900B+950DI	3.759	0.56	4276	 11.5
900B+1000DI	2.865	0.34	3259	 8.36
950B	6.799	0.74	7734	 15.5
950B+950DI	4.188	0.65	4764	 10.2
950B+1000DI	2.912	0.35	3313	 12.5

Adhezyon aşınma mekanizması, borlama işlemi ve DI sırasında meydana gelmiştir. Borlanmış ve DI uygulanmış numuneler arasında en yüksek aşınma direncine sahip olan 900B+1000DI ve 950B+1000DI numunelerinde çok az plastik deformasyon ve aşınma kalıntıları görülmektedir (Şekil 4.8c-Şekil 4.9c).

Aşınma direnci zayıf olan 900B (Şekil 4.8a), 950B (Şekil 4.9a), 900B+950DI (Şekil 4.8b) ve 950B+950DI (Şekil 4.9b) kodlu numunelerin aşınma izinde aşınma döküntüleri, delaminasyonlar, çatlaklar gözlenmiş; sürtünme yükü ve aşınma sürecinin etkileri nedeniyle yüksek miktarda plastik deformasyonlar da görülmüştür. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilen XRD analizlerinde görüldüğü gibi 900B, 900B+950DI, 950B ve 950B+950DI numunelerinin aşınmasının yüksek olduğu görülmektedir çünkü borür tabakasının yapısında FeB ve Fe₂B fazları bir arada bulunmaktadır. Mevcut her iki fazın termal genleşme katsayıları çok farklı olduğundan (FeB: $=23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, Fe₂B: $7.85 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), çift fazlı katmanlarda faz arayüzlerinde mikro çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar, mekanik zorlanma altında pul pul dökülmelere neden olarak katmanların delaminasyonuna neden olur ve parçalanmış katmanlar, aşındırıcı top ile alt tabaka arasına girerek aşınma oranını artırır (Allaoui vd. 2006, Edgar vd. 2016). Ayrıca, döngüsel yükler altında gerilimler tarafından üretilen yorulmanın bir sonucu olarak mikro çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar ilerledikçe aşırı plastik deformasyonlar ve kırılma hasarları meydana gelebilir, bu da delaminasyonlara ve numunenin sürtünme katsayısında ve aşınma hızında artışa neden olur (Aichholz vd. 2018, Krelling vd. 2017). Daha az kırılğan tek fazlı Fe₂B fazı içeren numunelerde (900B+1000DI ve 950B+1000DI) termal genleşme farkları olmadığından, çift fazlı tabakalardan kaynaklanan tüm olumsuz etkiler ortadan kaldırılmıştır. Bu nedenle sürtünme katsayısı değerlerinin ve aşınma oranının düştüğü düşünülmektedir.



Şekil 4.8 Borlanmış ve DI'li AISI 1040 çelik borür tabakasının aşınma izleri a) 900B, b) 900B+950DI, c) 900B+1000DI.



Şekil 4.9 Borlanmış ve DI'li AISI 1040 çelik borür tabakasının aşınma izleri a) 950B, b) 950B+950DI, c) 950B+1000DI.

4.5 Elektrokimyasal Korozyon Karakterizasyonu

Borlanmış ve DI uygulanmış AISI 1040 çeliğinin % 3.5 NaCl ortamında yapılan elektrokimyasal korozyon deneyleri sonucunda Tafel ve lineer polarizasyon yöntemi ile elde edilen korozyon karakteristikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 ve Şekil 4.10 incelendiğinde borlama ve DI işlemi ile birlikte % 3.5 NaCl ortamında polarizasyon akım yoğunluk (i_{corr}) değerleri azalmıştır. Polarizasyon akım yoğunluğu değerleri SD-1040 kodlu numunede $122 \mu A/cm^2$ iken, 900 B ve 950 B kodlu borlanmış numunelerde polarizasyon akım yoğunluğu değeri sırasıyla $60,8 \mu A/cm^2$ ve $74,60 \mu A/cm^2$ olarak tespit edilmiştir. Borlama işleminde sonra yapılan difüzyon tavlama işlemleriyle akım yoğunluğu değerleri yüksek difüzyon tavlama sıcaklıklarında $0,139-0,238 \mu A/cm^2$ aralığına kadar düşmüştür. En düşük akım yoğunluğu ile en yüksek korozyon direnci 900B+1000DI kodlu numunede elde edilmiştir.

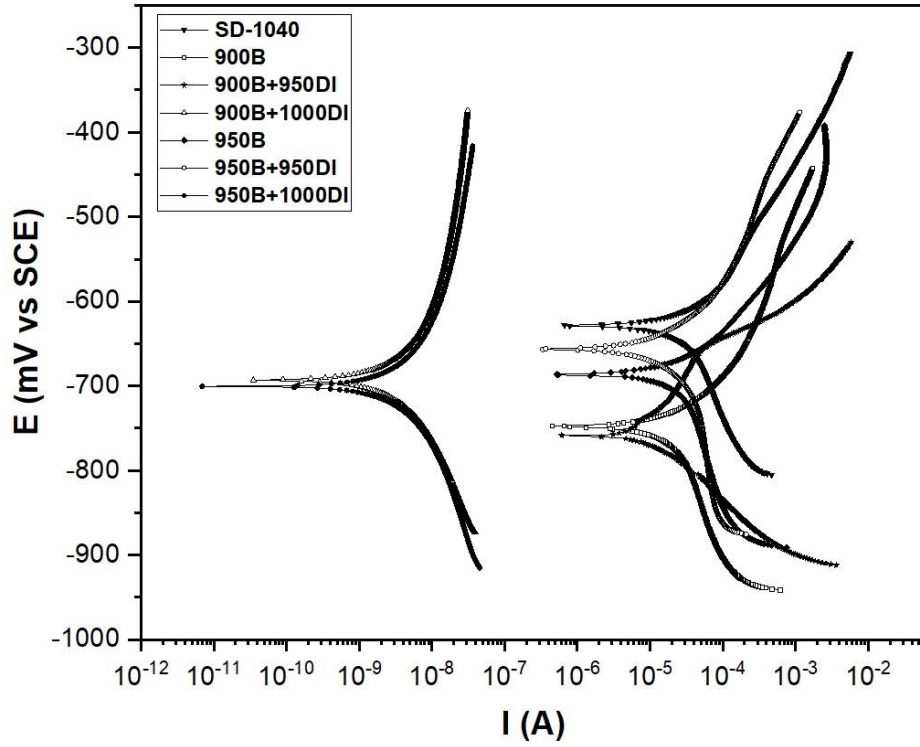
Çizelge 4.2 Borlanmış ve borlanmamış numunelerin % 3.5 NaCl ortamında elde edilen korozyon karakteristikleri.

Yapılan İşlemler	$E_{corr.}$ (mV)	$i_{corr.}$ ($\mu A/cm^2$)	Kor.Hızı (mpy)	R_p (k Ω)
SD-1040	-629	122	28.01	0.510
900B	-748	60.8	13.96	0.925
900B+950DI	-757	14.30	3.279	1.624
900B+1000DI	-693	0.0139	0.0032	7728
950B	-687	74.60	17.12	0.727
950B+950DI	-657	26.40	6.063	1.161
950B+1000DI	-701	0.0238	0.0055	7234

Borlama sıcaklığının artması ile birlikte korozyon direnci azalmaktadır. Bunun sebebi borlama sıcaklığının artmasıyla borür tabakasının kalınlığı artmaktadır. Tabaka kalınlığının artmasıyla birlikte tabakada oluşan porozitelerden ve tabakadaki fazların termal genleşme farklılıklarından oluşan mikroçatlaklardan saldırgan Cl^- iyonları girerek korozyon hızını artırmaktadır (Ozbek 2002, Asthana vd. 2007).

Bilindiği üzere İki fazlı ($FeB+Fe_2B$) borür kaplamalara nazaran tek fazlı Fe_2B kaplamaların korozyon dirençleri daha iyidir. Çünkü çift fazlı bir tabakada bulunan fazlar arasında bir potansiyel farkı meydana geleceğinden potansiyel değeri daha düşük olan faz anot olarak davranırken, potansiyel değeri yüksek olan da katot olarak davranır.

Böylece anot çözünerek korozyon hızını artırır (Ozbek vd. 2002). Burada, işlem yapılmış numuneler arasında sadece borlama yapılan numunelerde (900B ve 950B) korozyon hızının yüksek olmasının sebebi çift fazlı bir tabakaya sahip olmasıdır. Düşük sıcaklıklarda yapılan DI işlemi ile birlikte FeB fazı azalarak, yapı tek fazlı yapıya doğru bir eğilim sergilediğinden dolayı korozyon hızında azalmalar meydana gelmiştir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan DI işlemlerinde ise XRD analizinde belirlendiği gibi (bkz. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4), tek fazlı olan bir Fe₂B borür tabakası elde edildiğinden dolayı korozyon hızlarının çok fazla azaldığı, korozyon dirençlerinin çok yükseldiği görülmektedir.



Şekil 4.10 % 3.5 NaCl ortamında 1 saat bekletilmiş numunelerin Tafel eğrileri.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Ortaya çıkan borür tabakası testere dişi şeklindedir. Katmanlar ve matris arasındaki arayüz düz görünmektedir. XRD analizi sonucunda borlama işlemi ile istenilen FeB ve Fe₂B fazları elde edilmiştir. 950 °C'de gerçekleştirilen DAP'ta, yine baskın bir Fe₂B fazı olan çift fazlı bir borür tabakası elde edilirken, 1000 °C'de gerçekleştirilen DAP'de tek fazlı bir Fe₂B fazı elde edildi.
- SEM çalışması borlama işlemi ile üretilen borür tabakasının üniform bir kalınlığa sahip olduğunu göstermiştir. Bu çalışmaya göre AISI 1040 çeliğinde borür tabakasının kalınlığı borlama sıcaklığına bağlı olarak 111 µm ile 190 µm arasında değişmektedir. Ayrıca borlama işleminden sonra DAP işlemi ile borür tabakası kalınlığının 150 µm'den 230 µm'ye değiştiği gözlenmiştir.
- Borlama ve DI işlemleri ile AISI 1040 çeliğinin sertliği 233 HV_{0.05}'ten 1950 HV_{0.05}'e, sertlik değeri yaklaşık sekiz kat artmıştır.
- Borlama işlemi AISI 1040 çeliğinin aşınma direncini yaklaşık dört katına çıkarmıştır. Bununla birlikte, borlama sıcaklığı arttıkça aşınma hacmi kayıpları görülmüştür. DI ile daha sünek Fe₂B fazının elde edilmesi ile AISI 1040 çeliğinin aşınma direnci yaklaşık yedi kat artmaktadır.
- En iyi aşınma direnci 900B+1000DI kodlu numunede elde edilmiştir. 1000 °C'de DI ile, tabakanın aşınma direnci ile ilgili olarak istenen tek fazlı Fe₂B fazı elde edildi.
- AISI 1040 çeliğine yapılan DI işlemi ile birlikte korozyon direnci artmıştır. Korozyon hızı 0.0032 mpy değerine gelmiştir.
- Bu çalışmada, farklı borlama sıcaklıkları ve süreleri FeB ve Fe₂B oranları üzerinde etkili olup, bu da sürtünme katsayısını ve aşınma hacim oranını etkilemektedir. Uygulanan DI işlemi ile FeB/Fe₂B oranı ile sertlik değeri düşmesine rağmen sürtünme katsayısını ve

aşınma direncini iyileştirmiştir. Bu nedenle, DI işlemi, aşınma ortamlarında borlanmış düşük alaşımlı çeliklerden yapılmış makine parçalarının hizmet ömrünü artırma potansiyeline sahiptir.



6. KAYNAKLAR

- Ahmad Z, 2016, Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, Burlington Butterworth-Heinemann.
- Aichholz S A C, M S Meruvia, P C S Júnior, R D Torres, 2018, Tribocorrosion Behavior of Boronized AISI 4140 Steel, Surface and Coatings Technology, 265-272, 352.
- Akbayır Ö, 2005, Katı Ortamda Borlanmış AISI 1030 Çeliğinde İşlem Parametrelerinin Yüzey ve Aşınma Özelliklerine Etkisi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aktaş D, 2012, Metalik Malzemelerde Tane Boyutunun Pekleşme Katsayısına Etkisi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 133s, Bartın.
- Allaoui O, N Bouaouadja, G Saindeman, 2006, Characterization of Boronized Layers on A XC38 Steel, Surface and Coatings Technology 201, 3475-3482.
- Arman M A, 2017, Farklı Oranlarda Mikro Alaşım Bor İçerikli AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Davranışının Araştırılması, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir.
- Aslan A, 2002, Östempelenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 89s, Ankara.
- Asthana P, Liang H, Usta M, Uçışık A H, 2007, Wear and Surface Characterization of Boronized Pure Iron, Journal of Tribology, 129, 1-10.
- Ayday A, 2013, Elektrolitik Plazma Teknolojisi ile Küresel Grafitli Dökme Demir Malzemesinin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 198s, Sakarya.
- B'ejar M A, Moreno E, 2006, Abrasive Wear Resistance of Boronized Carbon and Low-Alloy Steels, Journal of Materials Processing Technology 173, 352–358.

- Badioğlu N, 2008, 1010 Çeliğinin Korozyonunun Önlenmesinde İnhibitör Etkinliğinin Ortam Parametrelerine Bağlı Olarak İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 112s, Ankara.
- Bartsch K, Leonhardt A, 1999, Formation of Iron Boride Layers on Steel by D.C Plasma Boriding and Deposition Processes, Surface and Coatings Technology 116–119, 386–90.
- Bayça S U, Şahin S, 2004, Borlama, Mühendis ve Makine, Mayıs, Sayı 532.
- Bozkurt N, 1984, Bor Yayınımıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil. Enst., İstanbul.
- Brito A M, Delgado, I Mejía-Caballero, M Palomar-Pardav'e, J Martínez-Trinidad, I Campos-Silva, 2021, Influence of The Diffusion Annealing Process in The Corrosion Susceptibility of Cobalt Boride Layer Immersed in Hank's Solution, Mexico.
- Buijnsters J G, Shankar P, Gopalakrishnan P, Van Enkevort W J P, Schermer J J, Ramakrishnan S S, Ter Meulen J J, 2003, Diffusion-Modified Boride Interlayers for Chemical Vapour Deposition of Low-Residual-Stress Diamond Films on Steel Substrates Thin Solid Films, 426, 85–93.
- Buytoz S, Somunkıran İ, 2005, Borla Kaplanan Yüzeyin Mikroyapı ve Mekaniksel Özellikleri, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 4, 41- 45.
- Campos Silva I, Flores Jiménez M, Rodríguez Castro G, Hernández Sánchez E, Martínez Trinidad J, Tadeo Rosas R, 2013, Improved Fracture Toughness of Boride Coating Developed With A Diffusion Annealing Process, Surface Coatings Technology, 237, 429–439.
- Campos Silva I, FloresJiménez M, Bravo- Barcenas D, Balmori Ramirez H, Andraca Adame J, Martinez Trinidad J, Meda Campana J A, 2017, Evolution of Boride Layers During a Diffusion Annealing Process, Surface Coatings Technology 309, 155-163.

- Campos Silva I, Contla Pacheco A D, Castrejón Sánchez V H, Delgado Brito A M, Garduño Alva A, Lopez Suero D, Martínez Trinidad J, 2020, Wear and Scratch Resistance of Cobalt Boride Layer Exposed to a Diffusion Annealing Process, Materials Performance and Characterization, 2019: 0101.
- Cimenoglu H, Atar E, Motallebzadeh A, 2014, High Temperature Tribological Behaviour of Borided Surfaces Based on The Structure of The Boride Layer Wear, 309, 8-152.
- Çeğil Ö ve Şaduman Ş, 2014, TiN Kaplı AISI D2 Çeliğinin Korozyon Davranışı, Afyon Kocatepe Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14, 285-289.
- Çiftçi N, 2009, Sol-gel Yöntemi ile 316 L SS ve Ti İmplant Malzemelerin Üzerine Hidroksiapatit (Hap) Kaplamaların Üretilmesi ve Korozyon davranışlarının Elektrokimyasal Yöntemle İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 102s, Afyonkarahisar.
- Çifter C, 1986, Alüminyumun Sodyum Klorürlü Ortamlarda Çukur Oluşma ve Kritik Çukur Oluşma Potansiyellerinin Potansiyostatik Yöntemle Belirlenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 95s, Ankara.
- Çolak E, 2010, İyon Nitrülenmiş AISI 5140 Çeliğinin Korozyon Davranışının İncelenmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 101s, Erzurum.
- Davis J R, 2000, The effects and Economic Impact of Corrosion, In The corrosion Understanding the Basics (1-20) Materials Park, ASM International.
- Delgado Brito A M, López Suero A, Ruiz Ríos R A, García León J, Martínez Trinidad, Oseguera Peña J, Campos Silva I, Effect of The Diffusion Annealing Process in The Indentation Properties of Cobalt Boride Layer, Ceramics International 45 (2019) 7767-7777.
- Demirci A H, 1987, Teknik Kuru Sürtünmeli Bir Aşınma Deney Düzeneği Tasarım ve İmalatı, Mühendis ve Makine Dergisi, 8 (330): 24-29.
- Demirel Ç, 2013, AISI 8640 ve GS 60 Çelik Malzemelerin Abrasif Aşınma ve Korozyon Davranışına Borlama İşleminin Etkisi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 117s, Karabük.

- Doruk M, 1982 Korozyon ve Önlenmesi ,Ankara Ortadoğu Teknik Üniversitesi Yayını, Ankara, 239s.
- Dybkov V I, W Lengauer, P Gas, 2006, Formation of Boride Layers at The Fe–25% Cr Alloy–Boron Interface, Journal of Materials Science, 41, 4948-4960.
- Dziarski P, Makuch N, 2022, The Importance of Plasma Paste Boriding Parameters for Thickness, Nanomechanical Properties, Residual Stress Distribution and Fracture Toughness of Layers Produced on Nimonic 80A-Alloy, Engineering Fracture Mechanics 275, November: 108842.
- Edgar V C, Roger L, Armando I M P, Jose B P, J, Francisco J B P, Martin O D, Eduardo D R A, 2016, Characterization and Wear Performance of Boride Phases Over Tool Steel Substrates, Advances in Mechanical Engineering 8, 1-10.
- Elyiğit A, 2011, Bor kaplamalı Betonarme Çeliğinin Korozyona Etkisinin İncelenmesi Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Erdoğan A, 2019, Investigation of High Temperature Dry Sliding Behavior of Borided H13 Hot Work Tool Steel with Nanoboron Powder, Surface and Coatings Technology, 357, 886-895.
- Fontana M G, 1950, Corrosion Engineering , New York, McGrawHill.
- Fontana M G, Greene N D, 1967, Materials Science and Engineering Series, Corrosion Engineering, McGraw-Hill, New York.
- Gök M S, 2001, Taneleri İnceltilmiş Mangan İslah Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 125 s, Elazığ.
- Görenler A, 2007, Al-Si Matrisli Kompozit Malzemelerin Korozyon Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 102s, Ankara.
- Hacısalihoglu I, Yıldız F, Celik A, 2018, Tribocorrosion Behavior of Plasma Nitrided Hardox Steels in NaCl Solution, Tribology Internaional, Volume 120, 434–445p.
- Hamamcı M, Cerit A A, Nair F, 2022, Effect of Sintering Parameters on the Microstructure and Micromechanical Properties of In-Situ Synthesized Boride

- Phases (Fe₂B-FeB) in Iron Matrix Composites Reinforced with B₄C Particles, Materials Characterization 191, September 2022: 112075.
- Hernández Ramírez E J, Guevara Morales A, Figueroa López U, Campos Silva I, 2020, Wear Resistance of Diffusion Annealed Borided AISI 1018 Steel, Materials Letters 277, 128297.
- Hinds G, 2015, Beginners Guide to Corrosion, National Physical Laboratory (NPL) of the National Corrosion Service, 1-10.
- Holmberg K, Matthews A, 1994, Coating Tribology, Elsevier Science B V , 45- 74.
- Hunger H J, Trute G, 1994. Boronizing to Produce Wear-Resistant Surface Layers, Heat Treatment of Metals 21, 31–39.
- Islak S, 2005, 45Mn5 Islah Çeliğinin Isıl İşlem ve Ergitme Yöntemleri ile Yüzey Modifikasyonu İşlemleri Sonrası Mekaniksel Davranışların İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Jain V, G Sundararajan, 2002, Influence of The Pack Thickness of The Boronizing Mixture on The Boriding on The Steel, Surface Coatings Technology, 149(1) 21-26.
- Jibo J, Yi W, Qingdong Z, Lei Z, 2011, Preparation of Fe₂B Boride Coating on Low-Carbon Steel Surfaces and its Evaluation of Hardness and Corrosion Resistance, Surface Coatings Technology, 206, 473-478
- Kaçar R, 1997, Hydrogen in Duplex Stainless Steel Welds, Ph.D. Thesis, University of Leeds, 23-24.
- Kaftan M A, 2006, Çelik Yapılarda Korozyon Oluşumu ve Korozyondan Korunma Yöntemlerinin Maliyet Açısından Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Kanat S, 2015, Borlanmış AISI D6 Çeliğinin Karakterizasyonu ve Aşınma Davranışının İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kaouka A, Khedidja B, 2019, Electrochemical Boriding of Titanium Alloy Ti-6Al Journal of Materials Research and Technology, 8: 6407–12.
- Karaaslan A, 2012, Isıl İşlem Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve

Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

- Kayalı Y, 2011, Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Afyonkarahisar.
- Kayalı Y, Büyüksağış A, Yalçın Y, 2013, Corrosion and Wear Behaviors of Boronized AISI 316L Stainless Steel, Journal of Metals and Materials International, Vol:19, No:5, 1053-1061.
- Kayalı Y, 2013, Wear and Corrosion Behaviour of Borided and Nitrided M2 High Speed Steel, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol:19, No:3, 340–353.
- Kayalı Y, Yalçın Y, 2020, Investigation of Diffusion Kinetics of Boronized AISI 316 L Stainless Steel, Journal of Materials Mechatronics, 12-21.
- Kayalı Y, Yönetken A, 2021, Investigation on Wear Behavior of Borided Materials Produced by The Powder Metallurgy Method in Different Compositions, Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 57(5), 1025-1033.
- Keddām M, 2006, Computer Simulation of Monolayer Growth Kinetics of Fe₂B Phase during the Paste-Boriding Process: Influence of the Paste Thickness, Applied Surface Science 253, 757–61.
- Keddām M, Makuch N, Boumaali B, Piasecki A, Miklaszewski A, Kulka M, 2020, Liquid Boriding of Cp-Ti and Ti6Al4V Alloy Characterization of Boride Layers and Tribological Properties, Surface Engineering and Applied Electrochemistry 56, 348–57.
- Kesti E, 2009, Ç 4140 Çeliğinin, Mikro Yapı Ve Mekanik Özelliklerine Su Verme Ortamının Etkilerinin Araştırılması, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 99s, Konya.
- Kıncay O, Ağustos H. ve Çelebi S. 2009, Kapalı Devre Mekanik Tesisatlarda Korozyon Koruma Programı ve Bir Yapıda Uygulanması, TTMD Dergisi.
- Kondul B, 2020, Borlama İle Yüzeyi Sertleştirilmiş Ray Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Krelling A P, Da Costa C E, Milan J C G, Almeida E A S, 2017 Micro-Abrasive Wear

- Mechanisms of Borided AISI 1020 Steel, *Tribology International*, 111, 234-242
- Kulka M, 2019, Trends in Thermochemical Techniques of Boriding, in *Current Trends in Boriding*, Engineering Materials, Springer Cham, 293.
- Kuruvila R, Kumaran S, Khan M A ve Uthayakumar M, 2018, A Brief Review on The Erosion Corrosion Behavior of Engineering Materials, *Corrosion Reviews*, 36, 435–47.
- Lakhtin Y M, 1983, *Engineering Physical Metallurgy and Heat Treatment*, Trans. Weinstein N, Mir Publishers, 426p, Moscow.
- Makuch N, Dziarski P, 2020 Importance of Trimethyl Borate Temperature Used during Gas Boriding for Microstructure, Nanomechanical Properties and Residual Stresses Distribution on the Cross-Section of the Produced Layer, *Surface and Coatings Technology* January, 126508.
- Matuschka A G, 1980, *Boronizing*, München.
- Meriç C, Şahin S, 2002, Investigation of Effect Boronizing on Welding Zone, *Science Technology of Welding and Joining*, 7, 107.
- Obeyesekere N U, A M El-Sherik, (Ed.), 2017, *Pitting Corrosion The trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies Production and Transmission* 215- 248 Cambridge, Woodhead Publishing.
- Onat Ö, Özdoğan A, Tozlu İ, Cevik E, Ahlatçı H, Sun Y, 2013, Mantarı Sertleştirilmiş R260 Kalite Rayların Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, *ISERSE'13 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu*, Ekim 9-11, Karabük.
- Özaydın D, 2015, *Toz Metalurjisi ile Üretilen Demir Esaslı Malzemelerde Borlamanın Mekanik Özelliklere Etkisi*. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 108s, Manisa.
- Özbek I, Akbulut H, Zeytin S, Bindal C, Ucisik A H, 2000, The Characterization of Borided 99.5% Purity Nickel, *Surface and Coatings Technology* 126, 166–70.
- Özsaraç U, 1999, *Endüstriyel Yatak Alaşımlarının Aşınma Davranışlarının Karakterizasyonu*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 122s, Sakarya.

- Öztop M, 2009, Kapalı Devre buhar Tesisatlarında Korozyon Oluşumu ve Kontrolü Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 106s, İstanbul.
- Pala B, 2013, Tip-304 Paslanmaz Çeliklerin İletken Polimer Kaplamalar ile Korozyona Karşı korunması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi Ankara.
- Palombarini G, Carbucicchio M, 1985, High Boron Phases on Borided Iron and Iron Alloys, Journal of Materials Science, 4,170-172,
- Palombarini G, Carbucicchio M, 1987, Growth of Boride Coatings on Iron, Journal of Materials Science, 6, 415-416.
- Pengxun Y, 1992, Gaseous Boronizing with Solid Boron-Yielding Agents, Thin Solid Films 214, 44–47.
- Petrova R S, Suwattananont N, 2005, Surface Modification of Ferrous Alloys with Boron, Journal of Electronic Materials, Vol:34, No:5.
- Petrova R S, Naruemon S, Veljko S, 2008, The Effect of Boronizing on Metallic Alloys for Automotive Applications, Journal of Electronic Materials ,17,340–345.
- Plaut Ronald L, Angelo F, Padilha N B, Lima Clara Herrera, Antenor Ferreira Filho and Leandro H Yoshimura, 2009, Medium Carbon Steel Deep Drawing A Study on the Evolution of Mechanical Properties, Texture and Simulations, from Cold Rolling to the End Product, Materials Science and Engineering, A 499, 337-41.
- Popov B N, 2015, Basics of Corrosion Measurements In The Corrosion Engineering, Elsevier, 181–237, Columbia.
- Rajan T V, Sharma C P, Sharma A, 1988, Heat Treatment-Principles and Techniques, Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi, 451.
- Rayane K, O Allaoui and A Allaoui 2017, Effect of Diffusion Annealing on Borides Layers Produced on XC38 Steel, Laboratoire de Genie des Procédés, Université de Laghouat, 03000, Algeria.
- Ribeiro K J B, De Sousa R R M, De Araujo F O, De Brito R A, Barbosa J C P, Alves C, 2008, Industrial application of AISI 4340 Steels Treated in Cathodic Cage

- Plasma Nitriding Technique, *Materials Science and Engineering*, 479, 142–147.
- Rodríguez C, Laudien E G, Biemer S, Rie K T, Hoppe S, 1999, Plasma-Assisted Boriding of Industrial Components in a Pulsed Glow Discharge, *Surface and Coatings Technology* 116–119, 229–33.
- Sánchez Islas A, Martínez Trinidad J, Campos Silva I, Figueroa López U, Martínez Londoño J, García León R A, 2022, Dry Sliding Wear Test on Borided AISI 1018 Steel Under Pin-on-Disc Configuration, *Metallurgical and Materials Transactions A* volume 53, 179–199p.
- Sarıkaya Ö, 2007, Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri, Sakarya.
- Selçuk B, Ipek R, Karamiş M B, Kuzucu V, 2000, An Investigation on Surface Properties of Treated Low Carbon and Alloyed Steels (Boriding and Carburizing), *Journal of Materials Processing Technology* 103, 310–17.
- Silva Campos I, M Flores Jiménez, D Bravo Bárcenas, H Balmori Ramírez, J Andraca Adame, Martínez Trinidad J, Meda Campaña J A, 2017, Evolution of boride layers during a diffusion annealing process, vol:309, 155-163.
- Sinha A K, 1991, Boriding, *ASM Handbook*, 437-447, Vol.4, Journal of Heat Treating, OH, USA .
- Sireli, Kartal G, 2016, Molten Salt Baths Electrochemical Boriding, *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys*, May, 2284–2300.
- Stinville J C, J Cormier, C Templier, P Villechaise, 2014, Monotonic Mechanical Properties of Plasma Nitrided 316L Polycrystalline Austenitic Stainless Steel Mechanical Behaviour of The Nitrided Layer and Impact of Nitriding Residual Stresses, *Materials Science and Engineering*, 605, 51–58.
- Sen U, Sen S, Bindal C, 2005, An Approach to Kinetic Study of Borided Steels, *Surface Coatings Technology*, 191, 274–85.
- Taktak S, S Tasgetiren, 2006, Identification of Delamination Failure of Boride Layer on Common Cr-Based Steels, *Journal Materials Engineering Performance*, 15, 570-574.

- Taktak S, 2007, Some Mechanical Properties of borided AISI H13 and 304 Steel, Materials and Design 28, 1836-1843.
- Topbaş M A, 1993, Isıl İşlemler, Prestij Yayınevi, Ekim, 440s. İstanbul
- Totten G E, 2007, Steel Heat Treatment Handbook, 6000 Broken Sound Parkway NW Suite 300, BocaRaton, Florida.
- Uluköy A, Can A Ç, 2006, Çeliklerin Borlanması, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12, 189-198.
- Uslu T, 2007, Bor Madeninin Enerji Kaynağı Olarak Kullanılması, TMMOB Türkiye VI. Enerji Sempozyumu Küresel Enerji Politikaları ve Türkiye Gerçeği, 414- 431, Ekim, Ankara.
- Uzun H A, 2002, Borlama İle Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 75s, Isparta.
- Üçkardeşler A, 2013, Çelik Dökümlerde Borlama Isıl İşleminin Abrasif Aşınma Direnci Üzerine Etkisi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Üneri S, 1998, Korozyon ve Önlenmesi, Korozyon Derneği Yayını, Ankara, 413s.
- Varol T, 2016, Aşınma deneyi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvar Föyü, Trabzon, 9 s.
- Yakar E, 2010, Elektropolimerizasyon Yöntemiyle Polipirrol ve Polianilin ile Kaplanmış Alüminyum Asidik Korozyonunun Önlenmesinde Farklı Anyonların Etkileri Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 114s.
- Yalçın H ve Koç T, 1998, Mühendisler için Korozyon, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası Yayını, Ankara.
- Yamanel B, 2018, Farklı Sıcaklıklarda Menevişlenmiş ve Borlama İşlemine Tabi Tutulmuş SAE 5140 Çeliğinin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yanardağ T, 2011, Çinko ve Çinko Alaşımların Korozyonunun İnorganik ve Organik 124 Maddelerle Önlenmesi, Ankara Üniversitesi, Doktora Tezi, Ankara.

Yıldırım M M, Dođantan Z S, Çakan A, Pakdil M, 2001, Mühendislik Malzemesi Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İskenderun, 114s.

Yıldız T ve Gür A K, 2006, Aşınma Sistemleri. Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Elazığ, 6s.

Yu L, Chen X J, Khor K A, Sundararajan G, 2005, FeB/Fe₂B Phase Transformation During SPS Pack-Boriding Boride Layer Growth Kinetics, Acta Materialia 53, 61–68.

Xie F, Sun L, Pan J, 2012, Characteristics and Mechanisms of Accelerating Pack Boriding by Direct Current Field at Low and Moderate Temperatures, Surface and Coatings Technology 206, 39–44.

İnternet Kaynakları

1- <http://kalitemetalurji.com.tr/urunlerimiz/imalatcelikleri/1040-imalat-celigi/>
(15.03.2015).