



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

FİZİK DOKTORA PROGRAMI

**BİLYELİ ÖĞÜTME VE KUTU BORLAMA YÖNTEMLERİ İLE
AISI 1018 ÇELİK YÜZEYİNİN KAPLANMASI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Ramazan ERARSLAN

Danışman: Prof. Dr. Fikret YILMAZ

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Uğur ÖZTÜRK

TOKAT- 2023

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Fikret YILMAZ danışmanlığında hazırlamış olduğum “Bilyeli Öğütme ve Kutu Borlama Yöntemleri ile AISI 1018 Çelik Yüzeyinin Kaplanması ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı doktora tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

.../.../2023

İmza

Ramazan ERARSLAN

JÜRİ KABUL ve ONAY

Ramazan Erarslan tarafından hazırlanan “**Bilyeli Öğütme ve Kutu Borlama Yöntemleri ile AISI 1018 Çelik Yüzeyinin Kaplanması ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 25/07/2023 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

JüriÜyeleri (Unvanı, AdıSoyadı)	İmzası
Üye (Başkan) :Prof. Dr. İbrahim YİĞİTOĞLU	
Üye :Prof. Dr. Demirhan ÇITAK	
Üye :Prof. Dr. Fikret YILMAZ	
Üye :Prof. Dr. Hüseyin TOPAKLI	
Üye :Dr. Öğ. Üyesi Cengiz TEMİZ	

ONAY

...../..../2023

Doç. Dr. Yusuf TEMÜR

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

İTHAF

Hayatımı Paylaştığım Eşim Güldane

ve

Hayatımıza renk katan Evlatlarım'a

Ali

Teoman

Metehan

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarım süresince bana her türlü kolaylığı sağlayan, karşılaştığım zorluklarda bana yol gösteren ve bu çalışmamın her aşamasında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan danışman hocam sayın Prof. Dr. Fikret YILMAZ’a içten teşekkürlerimi sunarım.

Karşılaştığım zorluklarda her zaman görüşleriyle bana yol gösteren ve desteğini eksik etmeyen değerli hocam Dr. Uğur ÖZTÜRK’e içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımda SEM ve XRD ölçümlerinin alınmasında ve analizlerin yorumlanmasında yardımlarını esirgemeyen Dr. Cengiz TEMİZ’e içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında manevi desteklerini daima yanımda hissettiğim mesai arkadaşlarıma,

Hayatım boyunca maddi ve manevi olarak hep yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

BİLYELİ ÖĞÜTME VE KUTU BORLAMA YÖNTEMLERİ İLE AISI 1018 ÇELİK YÜZEYİNİN KAPLANMASI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ramazan Erarslan

Doktora Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik
Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fikret Yılmaz

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Uğur Öztürk

Ağustos 2023, xvi + 109 sayfa

Bu tezde, bilyeli öğütme ve kutu borlama yöntemleri ile AISI 1018 çelik yüzeyinin kaplanması, kaplanan yüzeylerin mikroyapısı, kristal yapısı, mekanik özellikleri, korozyon ve aşınma özellikleri incelendi. Yüzey kaplamasında, ticari Ekabor-2 tozu kullanıldı. Kaplamada kullanılacak tozlar üç farklı şekilde hazırlandı. İlk olarak doğrudan Ekabor-2 kullanıldı. İkinci olarak bilyeli öğütme ile inceltelen Ekabor-2 tozu kullanıldı ve son olarak, demir+Ekabor-2 toz karışımının bilyeli öğütme ile öğütülerek elde edilen toz karışımı kullanıldı. Kaplama işlemi 950 °C’de ve 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerde yapıldı. Doğrudan ekabor-2 tozu ile kaplanan numunelerde, yaklaşık 100 µm kalınlığında Fe₂B tabakası elde edildi. Ancak süre arttıkça bu kalınlığın azaldığı görüldü. Öğütülen Ekabor-2 tozu ve demir+Ekabor-2 toz karışımı ile hazırlanan numunelerde benzer oluşumlar görüldü. Dış yüzey üzerinde 200 µm kalınlığında FeSi tabakaları oluşurken, bu tabakanın hemen altında ince bir hat şeklinde Fe₂B tabakasının oluştuğu saptandı. Sertlik analizlerinde, borür tabakanın sertliğinin, çeliğe göre 5 kat arttığı saptandı. Benzer olarak, borür tabakasının aşınma ve korozyon direncinin değerleri ısıtıl işlem görmeyen çelik değerlerine göre önemli derecede yüksek olduğu tespit edildi.

Anahtar Kelimeler: AISI 1018 Çeliği, Kutu Borlama, Bilyeli Öğütme, Mekanik Özellikler. Aşınma, Korozyon.

ABSTRACT

BALL MILLING AND PACK BORIDING TECHNIQUES USED FOR SURFACE COATING OF AISI 1018 STEEL AND MECHANICAL PROPERTIES WERE INVESTIGATED

Ramazan Erarslan

Doctorate Thesis, Tokat Gaziosmanpasa University, Graduate School of Natural and Applied Science Department of Physics

Advisor: Prof. Dr. Fikret Yilmaz

Second Advisor: Assit. Prof. Dr. Ugur Ozturk

July 2023, xvi + 109 pages

In this thesis, ball milling and pack boriding technique were used for surface coating of AISI 1018 steel. Crystal structures, mechanical properties, corrosion and wear properties of the coated surfaces were investigated. Commercial Ekabor-2 powder was used for coating. The powders used in the coating process were prepared in three different ways. Ekabor-2 was used directly at first. Secondly, Ekabor-2 powder, which was refined by ball milling, was used, and finally, the powder mixture of milled iron + Ekabor-2 powder was used for coating. The coating process was carried out at 950 °C for 2, 4, 6 and 8 hours. An approximately 100 µm thick Fe₂B layer was obtained in the samples directly coated with Ekabor-2 powder. However, it was observed that the thickness of layer decreased as the sintering time increased. In the samples prepared with milled Ekabor-2 powder and Iron+Ekabor 2 powder mixture, similar FeSi layer of 200 µm thickness was formed on the top side of surface, while a thin Fe₂B zone was formed just below this layer. In the hardness analysis, it was determined that the hardness of the boride layer increased 5 times compared to the steel. Similarly, the wear and corrosion resistance of the boride layer was found to be significantly higher than the untreated steel.

Keywords: AISI 1018 Steel, Pack Boriding, Ball Milling, Mechanical Properties, Wear, Corrosion.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK SÖZLEŞME	i
JÜRİ KABUL ve ONAY	ii
İTHAF.....	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
ÇİZELGELER LİSTESİ	xiv
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	7
2.1. Kaplama Metotları ve Tarihçesi.....	7
2.1.1. Fiziksel Buharlaştırma ile Kaplama (PVD)	9
2.1.2. Kimyasal Buharlaştırma ile Kaplama (CVD).....	10
2.1.3. Mikro Ark-Oksidasyon ile Yüzey Kaplaması (MAO)	12
2.1.4. Elektroliz Yöntemi ile Kaplama (ELD).....	13
2.1.5. Plazma Spreyleme Yöntemi.....	15
2.1.6. Soğuk Spreyleme Yöntemi	16
2.2. Bor.....	17

2.2.1.	Bor Elementinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	177
2.2.2.	Boridler	188
2.2.3.	Bor Karbür	19
2.2.4.	Bor Nitrür.....	19
2.3.	Borlama Yöntemleri.....	1919
2.3.1.	Katı Ortam Borlama Yöntemi (Kutu Borlama)	22
2.3.2.	Pasta Borlama	26
2.3.3.	Sıvı Borlama	27
2.3.4.	Gaz Borlama	28
2.3.5.	Plazma Borlama	29
2.4.	Alaşım Elementlerinin Borlama Üzerine Etkisi.....	30
2.5.	Borlamanın Avantajları ve Dezavantajları.....	30
2.6.	Borlama Kinetiği.....	31
2.7.	Difüzyon nedir?.....	32
2.8.	Difüzyon Hızı.....	34
3.	MATERYAL ve YÖNTEM	39
3.1.	Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Yöntem.....	39
3.2.	Çeliklerde Alaşım Elementlerin Çeliğin Özelliklerine etkileri	40
3.3.	Hedef Metallerinin Hazırlanması ve Borlama İşlemi	41
3.4.	Borür Tabakalarının Mikroyapı İncelemeleri	46

3.5.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	49
3.6.	X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi.....	50
3.7.	Mekanik Karakterizasyon	52
3.8.	Korozif Aşınma.....	58
3.9.	Mekanik Aşınma ve Türleri	60
3.9.1.	Yırtılma (Adhesif) Aşınma	61
3.9.2.	Sürtünme (Abrasif) Aşınma.....	61
3.9.3.	Yorulma Aşınması	63
3.9.4.	Korozif Aşınma.....	63
4.	BULGULAR ve TARTIŞMA	64
4.1.	XRD ve EDX Analizleri	64
4.2.	Aşınma Testleri ve Sonuçları	82
4.3.	Korozyon Dayanımları.....	91
4.4.	Borlama Sonrası Elde Edilen Borür Tabakalarının Mikrosertlik Ölçümleri ...	93
5.	SONUÇLAR.....	98
6.	KAYNAKLAR.....	1011
7.	EKLER	107
8.	ÖZGEÇMİŞ	109

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Daldırma yöntemi ile çinko (Zn) kaplama aşamaları düzeneği.....	3
Şekil 2.1. Sanayileşmenin zaman içindeki gelişimi (Çevik, 2017)	7
Şekil 2.2. PVD Kaplama haznesi ve yerleşim düzeneği (Fotovvati ve ark., 2019).....	10
Şekil 2.3. Kimyasal buharlaştırma ile kaplama düzeneği (Fotovvati ve ark., 2019).....	11
Şekil 2.4. MAO yöntemi ile kaplama düzeneği (Fotovvati ve ark., 2019).....	12
Şekil 2.5. a) ELD kaplama düzeneği, b) EPD Kaplama düzeneği	15
Şekil 2.6. Plazma sprey tabancasının kesiti ve plazma oluşumu (Üstel, 1995).....	16
Şekil 2.7. Kutu borlama yönteminde, hedef numunenin, borlayıcı ortam ve deoksidanların kutu içine yerleşim şekli (Matuschka 1980)	23
Şekil 2.8. Aktivasyon enerjisi (Q) engeli aşılması (Ders notları1).....	33
Şekil 2.9. Difüzyon mekanizmaları, a) Boşluk difüzyonu, b) Ara yer difüzyonu, c) Halka difüzyonu ve d) Kendi kendine difüzyon	34
Şekil 2.10. Difüzyon mekanizmasının şematik gösterimi (Ders notları 2).....	35
Şekil 2.11. α -Fe içerisindeki farklı atom difüzyonlarına ait difüzyon katsayısı-sıcaklık ilişkisi grafiği (Ders notları 2.)	366
Şekil 2.12. Difüzyon konsantrasyonunun mesafeye göre değişimi, a) Farklı difüzyon süreleri için, b) Herhangi bir x mesafesindeki değişimi	377
Şekil 3.1. a) Silindir tipi çelikler, b) Dilimlenmiş hedef metaller, c) Yüzeyin 1200 mesh zımpara ile parlatılmış hali, d) Yüzeyin 2000 mesh zımpara ile parlatılmış hali	422
Şekil 3.2. a) Metkon Gripo 2V Grinder-Polisher Aşındırma ve Parlatma Cihazı, b) Metcon Forcipol 2V Grinder-Polisher ve Metcon Forcimat Specimen Mover ilaveli otomatik aşındırma ve parlatma cihazı	43
Şekil 3.3. a) PM 400 Yüksek enerjili bilyeli öğütme cihazının üstten görünüşü, b) Öğütme potasının istasyona sabitlenmesi ve pota kesit görüntüsü.....	44
Şekil 3.4. PROTHERM marka kare fırın.....	455

Şekil 3.5. a) Numunelerin dilimlenmesi, b) Numunelerin kalıplanması	477
Şekil 3.6. MİKROCUT-200 hassas kesme cihazı.....	47
Şekil 3.7. SHIMADZU model DUH-W201S optik mikroskop.....	48
Şekil 3.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı	500
Şekil 3.9. Elektro-magnetik dalga spektrumu.....	51
Şekil 3.10. X-Işını kırınım (XRD) cihazı	52
Şekil 3.11. Brinell sertlik ölçme yöntemi, Sertlik değerinin hesaplanmasında kullanılan parametrelerin gösterimi	533
Şekil 3.12. a) Çentiğin yanal kesiti b) Çenticiin yüzeyde oluşturduğu iz ve alanın ölçülmesi c) Oliver-Pharr metodunda kullanılan tipik bir P-h eğrisinin gösterimi	56
Şekil 3.13. UMT-2MV Yüksek sıcaklık mikro çentme cihazı	57
Şekil 3.14. HIGH WOOD HWDM-3” Mikro çentme cihazı	58
Şekil 3.15. a) Dilimlenen borlanmış mastır elemanı, b.) Korozyon ölçümlerinde kullanılan borlanmış mastır dilimi	59
Şekil 3.16. Koroziyon dayanım için numunelerin gömüldüğü doğal alan (TOĞÜ Fen Edebiyat Fakültesi ön bahçesi)	59
Şekil 3.17. Temel aşınma türlerinin yüzeyde meydana getirdiği aşınmalar	611
Şekil 3.18. NANOVEA / TRIBOMETER-MİCRO” Aşınma test cihazı	622
Şekil 4.1. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 2 saat borlanan çeliğin XRD grafiği ve Rietveld analizi.....	65
Şekil 4.2. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 2 saat borlanan çeliğin EDX renkli haritalama görüntüleri.....	655
Şekil 4.3. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 2 saat borlanan çeliğin çizgi EDX analizi.....	666
Şekil 4.4. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 4 saat borlanan çeliğin XRD grafiği ve Rietveld analizi.....	667
Şekil 4.5. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 4 saat borlanan çeliğin EDX renkli haritalama görüntüleri.....	68

Şekil 4.6. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 4 saat borlanan çeliğin farklı bölgelerden alınan nokta EDX analizleri, (a) Fe fazı, (b) CFe ₃ fazı, (c) Fe ₂ B fazı.....	69
Şekil 4.7. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 6 saat borlanan çeliğin XRD grafiği ve Rietveld analizi.....	70
Şekil 4.8. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 6 saat borlanan çeliğin iki bölgeden alınan çizgi EDX analizi.....	71
Şekil 4.9. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 8 saat borlanan çeliğin XRD grafiği ve Rietveld analizi.....	72
Şekil 4.10. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 8 saat borlanan çeliğin EDX renkli haritalama görüntüleri.....	72
Şekil 4.11. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 8 saat borlanan çeliğin çizgi EDX analizi.....	73
Şekil 4.12. Bilyeli öğütme ile öğütülen Ekabor-2 tozu ile borlanan çeliğin XRD grafikleri.....	75
Şekil 4.13. Bilyeli öğütme ile öğütülen Ekabor-2 tozu ile 4 saat borlanan çeliğin renkli haritalama görüntüleri.....	76
Şekil 4.14. Bilyeli öğütme ile öğütülen Ekabor-2 tozu ile 4 saat borlanan çeliğin çizgi EDX analizleri	77
Şekil 4.15. Bilyeli öğütme ile öğütülen Fe+Ekabor-2 tozu ile borlanan çeliğin XRD grafikleri.....	778
Şekil 4.16. Bilyeli öğütme ile öğütülen Fe+Ekabor-2 tozu 4 saat borlanan çeliğin renkli haritalama görüntüleri.....	79
Şekil 4.17. Bilyeli öğütme ile öğütülen Fe+Ekabor-2 tozu 4 saat borlanan çeliğin farklı bölgelerinden alınan nokta EDX analizleri, (a) Fe bölgesi, (b) Geçiş bölgesi, (c) Fe ₃ Si katmanı (d) Epoksi kalıp.....	79
Şekil 4.18. MFeB ₂ numunesine ait çizgi EDX analizleri.....	80
Şekil 4.19. Referans hedef metale ait (AISI 1018 Saf Çelik) kütle kaybı(gr/m); (0-600m).....	85
Şekil 4.20. Ekabor 2 ile 950 0C de kaplanmış çelik yüzeyinde oluşan demir borür fazları (a) 2h ve (b) 4h.....	86

Şekil 4.21. Mesafeye bağlı kütle kayıpları (AISI 1018 hedef metali, Ekabor2, 2h ve 4h)	87
Şekil 4.22. Ekabor 2 kaplama numunelerine mesafeye bağlı kütle kaybı(g/m) (Kütle kayıpları sabit kalacak şekilde toplam kütle üzerinde değişim yapılmıştır.)	87
Şekil 4.23. Öğütülmüş Ekabor 2 ile kutu borlama yapılmış numunelerin kütle kaybı eğrileri	88
Şekil 4.24. Öğütülmüş Fe B tozları ile kutu borlama yapılmış hedef metallerin kütle kaybı eğrileri	89
Şekil 4.25. Bazı iş metallerinin yüzey izleri (a) AISI A1018 Çelik, (b) 2h Borlanmış, (c) 4h Borlanmış (100x and 5000x magnification) SEM görüntüleri	90
Şekil 4.26. Korozyon dayanımı ölçümlerinde kullanılan 13 farklı numunenin ilk ve son durumları gösteren resimler	92
Şekil 4.27. Isıl işlem görmemiş A1018 çelik numune vickers çentici izi	93
Şekil 4.28. Ekabor 2 iş metali(2h) iz görüntüleri, a) çelik yüzey HV=130, b) borür tabakası HV =1080, c) 4h Borür tabaka HV= 760 ve d) 6h borür tabaka HV= 415	94
Şekil 4.29. Öğütülmüş Ekaborlu yüzeylerin iz görüntüleri, a) Çelik yüzey HV=100, b)MB 2h HV = 200 ve c) MB 4h HV = 294	96
Şekil 4.30. Çelik numune, farklı ortam ve farklı borlanma sürelerinde elde edilen ortalama Vickers sertlik grafiği	96
Şekil 4.31. Yüksek sıcaklık micro sertlik ölçümleri ile alınan yükleme boşalma eğrileri	97

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Bor atomunun bazı fiziksel özellikleri (Tombal, ve ark., 2016).....	18
Çizelge 2.2. Kristal bor kafes yapısı ve kafes parametreleri (Taşcı, 1993)	18
Çizelge 2.3. EKABOR® borlayıcı elemanları.....	24
Çizelge 2.4. Ticari katı borlama toz karışımlarının ağırlıkça % bileşimleri.....	26
Çizelge 2.5. Literatürde verilen bazı tuz banyosu içerikleri (Uluköy& Can, 2006).....	27
Çizelge 3.1. AISI 1018 çeliğinin kimyasal bileşimi (ağ. %) (URL-1)	39
Çizelge 3.2. AISI 1018 çeliğinin Mekanik özellikleri (URL-1)	39
Çizelge 4.1. Aşınma test cihazı ölçüm parametreleri	82
Çizelge 4.2. Aşınma test sonuçları (kütle kaybı g/mesafe m)	82
Çizelge 4.3. Aşınma test sonuçları değerlerine göre hesaplanan özgül aşınma miktarları (mm ³ /Nm)	84
Çizelge 4.4. Kütle kayıpları sabit kalacak şekilde grafik için kütle düzenlemesi ile oluşturulan yeni liste.....	85
Çizelge 4.5. Gömülen numunelerin korozyon ağırlık değişimleri	91
Çizelge 4.6. Farklı ortamlarda 950 0C de Farklı sürelerde ısıtılma tabii tutulan hedef metallerin yüzeyinden HV sertlik değerleri.....	95
Çizelge 4.7. Yüksek Sıcaklık Mikro çekme cihazı ile elde ettiğimiz yüzey sertlik değerleri ve Elastik Modülü değerleri	97

SİMGELER ve KISALTMALAR

B	Bor
B ₄ C	Bor karbür
KBF ₄	Potasyum bor tetra florür
C	Karbon
SiC	Silisyum karbür
SiO ₂	Silisyum dioksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
FeB	Demir borür alaşımı
Fe ₂ B	Demir 2 borür alaşımı
°C	Santigrat cinsinden sıcaklık
K	Kelvin cinsinden sıcaklık
µm	Mikro metre
d	Parçacık çapı (cm)
m	Parçacık Kütlesi (g)
D	Difüzyon katsayısı
<i>D</i>	Brinell sertlik bilye çapı (mm)
t	Zaman (saniye)
E	Elastisite modülü
P	Yük (Newton)
c	Çatlak Yarı Boyu
µ	Sürtünme Katsayısı
mg	Miligram
ρ	Yoğunluk (g/cm ³)

AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute)
ASTM	Amerika Madenler ve Test Organizasyonu (American Society for Testing and Materials)
SAE	Otomotiv Mühendisleri Odası (Society of Automotive Engineers)
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition)
HV	Vickers Sertliği (Hardness of Vickers)
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapor Deposition)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu (Scanning Electron Microscope)
XRD	X-Işını Difraksiyon Spektrometresi
DDÇ	Derinlik Duyarlı Çentme
UMT	Universal Micro Tribometer
FEG	Alan Emisyon Tabancası (Field Emission Gun)
EPD	Elektroforetik Kaplama
ELD	Elektrolitik kaplama
MAO	Mikro Ark Oksidasyon (Kaplama)

1. GİRİŞ

Madenlerin insanların yaşamına girmesi MÖ 5500 yıllarından sonra başlamıştır. Yapılan Arkeolojik kazı çalışmalarında insanlar tarafından ilk kullanılan madenin bakır (Cu) madeni olduğunu göstermiştir. Bakır madeninin çıkarılması ve işlenmesi kolay olmakla birlikte şekil verilmesi için basit ve ilkel yöntemler yeterlidir. Bakır madeninin kullanımı sırasında ikinci maden olarak kalay (Sn) bulunmuş ve bakırla kalay alaşımından tunç elde edilmiştir (MÖ 3500). Bu malzeme bakır madenine göre daha sert ve dayanıklı olduğundan savunma ve avlanmak için alet yapımında kullanılmıştır.

Demir'in keşfinden (MÖ 1200) sonra her geçen gün insan hayatındaki değeri ve önemi artarak günümüze kadar gelmiştir. Demirden elde edilen malzemeler kolayca hava ve nemli ortamlarda korozyona uğrayarak bozunmaktadırlar. Demirden elde edilen araç-gereçlerin kullanım ömürlerini uzatmak için diğer bir metal veya başka bir madde ile kaplanması gerekir. Yapılan arkeolojik kazılarda, demir asıllı malzemelerin kaplanmasına ışık tutan ilk eşyalardan biri MÖ 450 yıllarına ait olduğu sanılan kalay kaplı demir eşyası İspanya'da bulunmuştur. Demirin kalay ile kaplanması ise daha sonraki dönemlerde, özellikle 10.yy.dan itibaren yaygınlaşmıştır.

Demir ve diğer metallerin insan hayatına girmesi, kullanım alanlarının genişlemesi ve istenilen nitelikler kazandırılmak için metal kaplamaları veya ana-metal içerisine farklı oranlarda metaller katkılanarak yeni özelliklere sahip metal-alaşımları elde edilmiştir.

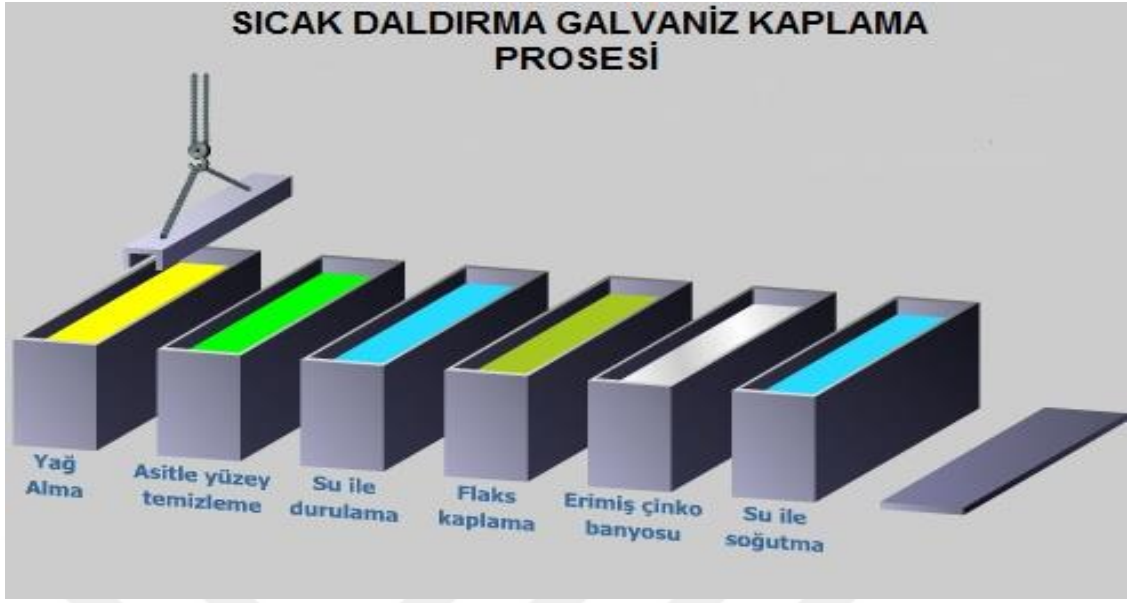
Metallerin kullanım avantajları her ortamda aynı olmayabilir. Bunlar her türlü etkileşime açık ortam, kapalı bir sistem (yüksek sıcaklık), nemli ve asidik ortamda aynı avantajları sağlaması beklenemez. Bu nedenle metallerin kullanım ortamlarına göre özellikle ortamla temas eden yüzeylerinde birtakım iyileştirmeler yapılmaktadır. Metal üzerine diğer bir metal kaplama yapılarak bu işlem gerçekleştirilir. Metal yüzeyini kullanım amacına göre geliştirmek için yapılan metal kaplamalarında tercih edilen temel metaller ve yarı metaller aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Bor, bakır, kalay, çinko, nikel, krom; yüzey sertliği, aşınma ve korozyon dayanımı,
- Gümüş, altın ve bakır elektrik iletkenliğinin geliştirilmesi,
- Alüminyum ve bor daha hafif malzeme üretimi için kullanılmaktadır.

Metal ve metal alaşımlarının korozyona karşı dayanımı veya diğer istenilen özellikleri kazandırmak amacı ile başvurulmuş 4 temel kaplama yöntemi aşağıda verilmiştir.

1. Daldırma yöntemi
2. Püskürtme yöntemi
3. Kutu- Borlama
4. Elektroliz

Daldırma yönteminde, öncelikle kaplama malzemesi olarak kullanılacak metal ısı verilerek ergitilir ve sıvı çözeltisi havuzu (haznesi) hazırlanır. Sonrasında ise kaplama işlemi uygulanacak ana- metal, kaplama öncesi yapılması gereken ön hazırlık işlemleri yapıldıktan sonra, ergitilmiş olan kaplama metalinin içerisine daldırılır. Havuzdan dışarı çıkarılan kaplanmış metal, özel oluşturulan alanlara alınarak oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılır. Bu şekilde yapılan ilk kaplamanın temeli, “1737 Giovanni Galvani tarafından geliştirildiğinden dolayı “galvaniz kaplaması” olarak isimlendirilmiş olup birçok alanda kullanılarak günümüze kadar gelmiştir. Özellikle otomotiv sanayisinde farklı amaçlarla hala kullanılmaktadır. Kayıtlara geçmiş ilk resmi çinko kaplama işlemi Fransız P.J. Malouin tarafından 1742 yılında yapılmıştır. Çinko metali ile galvaniz kaplama düzeneği Şekil 1.1.’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1.Daldırma yöntemi ile çinko (Zn) kaplama düzeneği

Borlama, bir termodinamik yüzey sertleştirme yöntemi olup mühendislik parçalarının yüzey performanslarını geliştirmede umut verici metotlar arasında görülmektedir (Erdoğan, 2019; Usta ve ark., 2005; Ekmekçiler ve ark., 2008; Güneş & Kayalı, 2014). Bu yöntemin geleneksel yüzey kaplama yöntemlerine nazaran en önemli avantajı, kaplanan malzemenin oldukça yüksek aşınma ve oksidasyon direnci göstermesidir (Delai ve ark., 2021; Kulka ve ark., 2013; Yang ve ark., 2016).

Borlama, bor atomlarının metal yüzeyine termokimyasal difüzyonu ile yüzeyde borür bir tabaka oluşturulması işlemidir (Balusamy ve ark., 2013). FeB ve Fe₂B gibi metalik borürlerin oluşması, işlem sıcaklığına, altlık çeliğin kimyasal bileşimine, borun bulunduğu ortamdaki oranına ve borlama süresine bağlıdır (Genel, 2006). Bu işlem, maddenin bilinen 4 hali olan katı, sıvı, gaz veya plazma ortamında gerçekleştirilebilir. Bor metalinin erime sıcaklığı (2076 °C) ve buharlaşma sıcaklığı (3927 °C) göz önüne alınırsa borlama işleminde tercih edilen yöntem olarak kutu-borlama ve pasta-borlama olduğunu söyleyebiliriz. Kutu borlama yönteminin, işlem kolaylığı ve ucuzluğu diğer yöntemlere göre en üstün yönleridir (Özdemir ve ark., 2009).

Kaplanan yüzey, difüze olan bor atomlarının konsantrasyonuna bağlı olarak tetragonal kristal örgüye sahip Fe_2B tabakasını oluşturur. Belirli bir süre sonra kaplama tozu içinde B atomlarının oranı ile Fe atomlarının başlangıç oranlarının değişmesi sebebi ile Fe_2B yüzünün üzerinde FeB tabakası oluşmasına olanak sağlar. Oluşan yeni tabaka ortorombik yapıya sahiptir (Campos-Silva ve ark., 2010). FeB fazı Fe_2B 'den daha yüksek sertlik değerine sahip olmakla birlikte daha düşük tokluk özelliği gösterir. Bu bakımdan yeterli büyüklükte bir dış kuvvete maruz kalındığında Fe_2B kaplama tabakası yüzeyinden kolaylıkla ayrılabilir. Ayrıca FeB fazının sıcaklık genleşme katsayısı, Fe_2B fazının sıcaklık genleşme katsayısından büyük olduğundan (yaklaşık 3 kat) ısıtılma işlemi tabii tutulduğunda dış yüzeyde bulunan FeB tabakası kolaylıkla Fe_2B yüzeyden sıyrılabilir. FeB fazının bu özelliğinden dolayı bu tabaka istenmez ve mekanik işlem uygulanarak temizlenir. Numune yüzeyinde sadece Fe_2B tabakasının kalması sağlanır.

Literatürde yapılan çalışmalar, borlama işleminin Fe dışı metal ve alaşımlarda da iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir;

Delai ve ark., (2021), 4Cr5MoSiV1 çeliği üzerinde demir borür tabakası (Fe_2B ve FeB fazlarını) elde ederek 4Cr5MoSiV1 çeliğinin yüzey sertliğini arttırdıklarını rapor etmişlerdir. FeB fazı için yüzey sertliği 4 kat artırılarak 1600HV ve Fe_2B fazı için yüzey sertliği 3 kat artırılarak 1300HV değerlerini elde etmişlerdir.

Usta ve ark., (2005), borlama metoduyla saf tungstenin yüzeyinde 10-42 mikrometre kalınlığında borür bir tabaka oluşturmayı başardılar. Bu çalışmada borür tabakanın sertliğinin, normal yüzeye göre yaklaşık 5 kat arttığını raporda belirttiler.

Ekmekciler ve ark., (2008), demir alumin (FeAl) alaşımı yüzeyinde 15-32 mikrometre kalınlığında borür tabakası oluşturdular. Elde edilen borür tabakasının sertlik değerinin yaklaşık 3,5 katı kadar arttığını tespit etmişlerdir.

Usta, (2005), niobyum metalini borlama yöntemiyle kaplanmıştır. Bu çalışmada, 8-22 mikrometre kalınlığında nispeten ince borür yüzey oluşturulmuştur. Elde edilen borür tabakasının yüzey sertlik değerini, normal yüzey ile kıyaslandığında 25 kat arttığı tespit edilmiştir.

Yukarıda bahsedildiği üzere borür tabakanın kalınlığı, morfolojisi ve bileşimi, işlem parametreleri ile (sıcaklık, süre, borlama ortamı vb.) yakından ilişkilidir (Ekmekçiler ve ark., 2008; Meriç ve ark., 2006; Gök ve ark., 2017; Campos-Silva ve ark., 2018).

Meriç ve ark., (2000), yapmış oldukları çalışmada, borlama işleminde kullanılan bor tozunun tanecik boyutunun elde edilen borür tabakasına etkisi incelemiş, tanecik boyutu azaldıkça tabaka kalınlığının arttığını rapor etmişlerdir.

Sahin ve ark., (2010), yapmış oldukları çalışmada, katı formundaki metal yüzeyini kaplamak yerine toz formunda borür bileşik oluşturmayı başarmışlardır. Bu çalışmada, üretilen borür tozlarının tamamının Fe_2B fazında olduğunu rapor etmişlerdir.

Yukarıda bahsedildiği üzere, Fe_2B fazı yüksek tokluk özelliği sebebiyle istenen bir fazdır. Tanecik boyutunun borür tabaka kalınlığı üzerine etkisi oldukça belirgindir. Bu bakımdan, bor tozunun tanecik boyutu kontrol edilebildiği takdirde arzu edilen kalınlıkta ve istenen özellikte borür tabaka üretilmesi olası görülmektedir. Öte yandan, borür tozlarının başarılı bir biçimde üretilmesi, bu yöntemin sadece yüzey kaplamasında değil aynı zamanda toz metalürjisinde de kullanım potansiyelinin olduğunu göstermektedir.

Ekabor-2 tozunun sahip olduğu tanecik boyutunu (tedarikçi firmanın verdiği tanecik boyut $<850 \mu m$) bilyeli öğütme (Ball Milling) cihazında öğütülerek, elde edilen küçük tanecik yapısına sahip Ekabor 2 tozu ile kutu-borlama yöntemiyle borür tabakası elde etmişlerdir (Sahin ve ark., 2010).

Bilyeli öğütme tekniği uygulama kolaylığı ve ucuzluğu sebebiyle sadece toz metalürjisi ve endüstriyel alanda da tercih edilen bir yöntem olup önemini korumaktadır. Bilyeli öğütme tekniğinde, sert bilyelerin yüksek enerjilerde çarpışması esnasında, bilyelerin arasına sıkışan toz tanelerin sürekli olarak deformasyonu, soğuk kaynaklanması ve kırılması işlemleri gerçekleşir (Hamamcı ve ark, 2022; Suryanarayana, 2001). Bu sayede, homojen tane boyutuna sahip alaşımın elde edilmesi sağlanır. Söz konusu yöntemde, işlem parametrelerinin; öğütme süresi, öğütme hızı, öğütme topları büyüklüğü-toz parçacıklarının büyüklüğüne oranı vb. son ürünün kimyasal ve fiziksel özellikleri üzerine etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu bakımdan, arzu edilen özelliğe sahip tozların elde

edilebilmesi için işlem parametrelerinin iyi kontrol edilmesi gerekmektedir. Geleneksel alaşım üretme yöntemlerine göre mekanik alaşımlamanın en önemli avantajı yarı kararlı fazların kolaylıkla üretilmesine olanak sağlamasıdır.

Farklı alanlarda kullanılmak üzere malzemelerin özellikleri; mekanik, termal, elektrik, vb. kazandırma çabası, yeni alaşımların ve kompozitlerin geliştirilmesini sağlamıştır. Hem yapısal gereklilikleri karşılayan hem de ek mühendislik işlevselliği sağlayan istenilen özelliklere sahip ergonomik malzemelere olan talep her geçen gün artmaktadır.

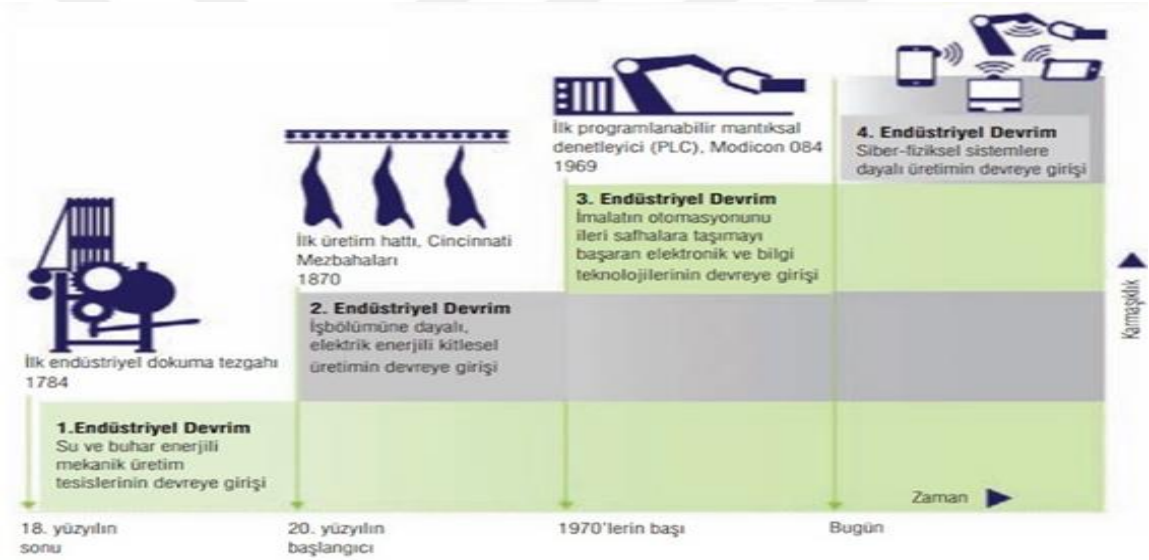
Dünyada bulunan metal kaynakların sınırlıdır. Metallerin geri dönüşümde kullanılarak ekonomik ömürleri uzatılabilir. Metallerin kullanım ömürlerini belirlenmesinde korrozyon dayanımları ve aşınma miktarları önemli rol oynamaktadır. Metallerin bor ile kaplanması korrozyon dayanımları ve aşınma miktarları direnç değerlerini arttırarak kullanım sürelerinde %50 ye kadar artış sağladığı rapor edilmiştir. Günümüzde metalik malzemelerin yerine bazı alanlarda seramikler ve kompozit malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Sanayide erime sıcaklığı 1400 °C'nin altında olan metallerin ve metal-alaşımlarının eritme ve kalıplanmasında kullanılan metal potalar yerine bugün seramik potalar kullanılmaktadır. Her geçen gün kullanım alanları artmaktadır.

Literatürde görüldüğü üzere borlama işlemi, pek çok metal ve metal-alaşım grubuna başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Özellikle, ferro alaşımlar, refrakter metaller (W, Ta, Mo, Zr, Hf, Nb), karbürler (Co ve WC), Ni ve Ti esaslı alaşımlar borlama yöntemi ile başarılı bir şekilde kutu borlama yöntemi ile kaplanabilmektedir. Öte yandan, yapılan çalışmalar çoğunlukla endüstride kullanım yaygınlığı nedeniyle demir ve demir esaslı alaşımlar üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmada bilyeli öğütme tekniği kullanılarak borlama işlemi, düşük karbonlu çelikler üzerinde farklı borlama ortamlarında kaplama yapılarak bazı mekaniksel özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bilyeli öğütme tekniği ile bu alanda herhangi bir çalışma mevcut değildir. Bu bakımdan planlanan tez çalışması literatürde mevcut olan eksikliğin giderilmesi ve endüstriyel alanda yapılan çalışmaların geliştirilmesi açısından önem arz etmektedir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kaplama Metotları ve Tarihçesi

Dünyadaki sanayi devriminden sonra (18.yy) demir-çelik ürünleri insan hayatının her alanına girerek her geçen gün önemi ve kullanım alanları genişlemiştir. Sanayileşmenin ileri safhalarında malzemelerin kullanım alanlarına göre yeni metallere ihtiyaç duyulmuş ve yeni üretim teknikleri geliştirilmiştir. Endüstriyel gelişimin zaman içindeki değişimi, Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Sanayileşmenin zaman içindeki gelişimi (Çevik, 2017)

Metalik malzemelerde kullanım alanlarına göre bazı ilave özellikler istenebilir. İstenilen nitelikleri kazandırmak için metalin içine ikinci bir metali katkılıandırmak veya dış yüzeyinin başka bir madde ile kaplanması ile sağlanır. Farklı özellikleri kazandırmak için farklı teknikler kullanılabilir.

Yüzey koruması için yapılan kaplamalarda farklı metaller, seramikler, polimerler kullanılır. Bir yapıyı oluşturan mekanik parçaların üretiminde kullanılan ana malzeme

seçiminde, malzemelerin (metallerin) sahip oldukları bazı mekanik özellikler bizim malzeme seçiminde sınırlar, bu mekanik özelliklerden bazıları şunlardır:

- Sünme (Creep)
- Sünelik (Ductility)
- Elastiklik (Elasticity)
- Yorulma (Fatigue)
- Sertlik (Hardness)
- İşlenebilirlik (Malleability)
- Plastiklik (Plasticity)
- Esneklik (Resilience)
- Bükölmezlik (Stiffness)
- Tokluk (Toughness)
- Akma dayanımı (Yieldstrength)

Hedef metale kazandırmak istediğimiz temel özelliklerden bazıları da şunlardır:

- Termal iletkenlik
- Elektriksel iletkenlik
- Yık taşıyıcılığı
- Sertlik
- Aşınma direnci
- Korozyon direnci vb.

Üretilen bu malzemelerde en fazla metalde olmasını istediğimiz özelliğin arttırılması üzerine gerekli yüzeysel kaplamaları yapılmaktadır. Tercih edilen kaplama türleri; paslanma direnci (Korozyon direnci), yüzey direnci, yüzey sertliği, termal ve elektriksel iletim vb. (Campos-Silva ve ark., 2018; Bhushan&Gupta, 1991).

Günlük yaşamımızda metallerin kullanımı yaşamın her alanında çok farklı büyüklüklerde, farklı özelliklerde ve farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Sistemi

oluşturan mekanik parçalar sistemin içinde hareketli veya sabit olarak kullanıldığı gibi bunlar ortam içinde farklı fiziksel ve kimyasal etkileşmelere maruz kalmaktadırlar.

Malzemelerin yüzeyinde oluşturulan kaplamanın; kalınlığına ve niteliğine doğrudan etki eden temel parametreler şunlardır.

1. Kaplama yapılacak hedef metal
2. Yüzey kaplamasında kullanılacak hedef metalin şekli
3. Kaplama yapılacak ortam sıcaklığı ve ortam şartları
4. Kaplama yapılacak ortama sıcaklığına çıkma süresi (artma miktarı °C/dakika)
5. Kaplama yapılan ortamda kalma süresi (Kaplama ortam sıcaklığı °C)
6. Soğuma hızı (Hızlı soğuma, mekanik soğuma, soğumaya bırakma)

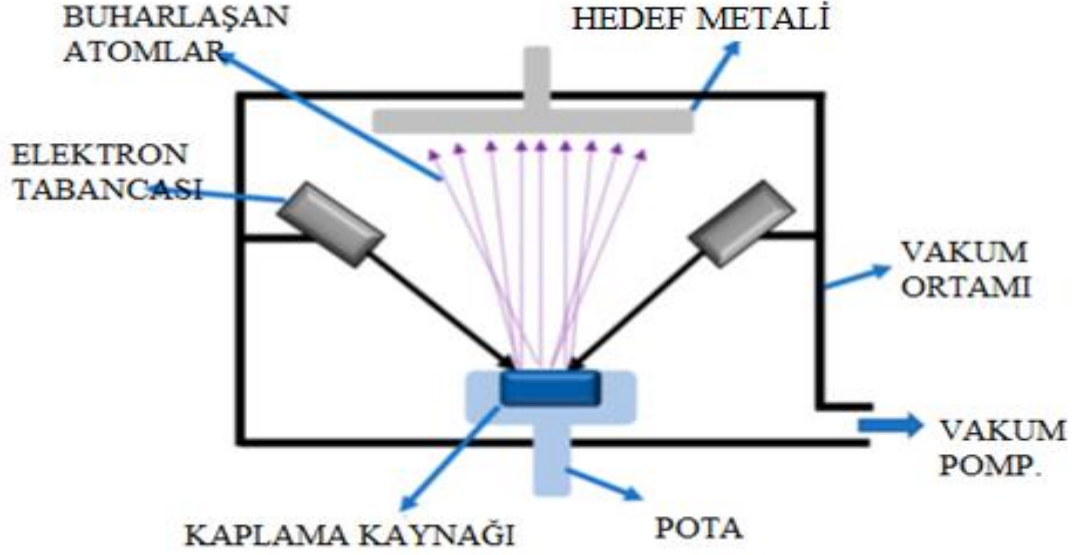
Metallerin yüzey kaplamalarında en fazla tercih edilen başlıca kaplama yöntemler şunlardır:

2.1.1. Fiziksel Buharlaştırma ile Kaplama (PVD)

Malzemelerde yüzey aşınma direncini ve korozyon direncini arttırmak için numune üzerinde ince film tabakası oluşturmak suretiyle yapılan bir kaplama yöntemidir. Yüksek vakum ve inert gaz ortamında yapılması gerekir. Şekil 2.2.'de görüldüğü gibi kaplama yapılacak hedef-metalinin yüzeyi eritme potasına doğru yerleştirilerek sabitlenir. Buharlaştırma potasına yerleştirilen kaplama metalinin dışardan termal enerji yardımıyla buharlaşması sağlanarak atomların vakum ortamından geçerek hedef metale ulaşması sağlanır. Metal yüzeyine ulaşan buhar burada yoğunlaşarak ince düzgün bir film tabakası oluşturur. Termal enerji kaynakları olarak elektrikli ısıtma, lazer demeti, moleküler demet kullanılır. Bu yöntemle yapılan ince film tabakaları 30 µm kadardır ve bu kaplamanın üzerine ikinci bir kaplama yapılmasına olanak sağlar (De Damborenea ve ark., 2007; Mathew ve ark., 2008). Uygulamada iki farklı şekilde isimlendirilir. Bunlar:

- Fiziksel buharlaştırma ile kaplama (PVD)

- Fiziksel püskürtme ile kaplama (PSD)



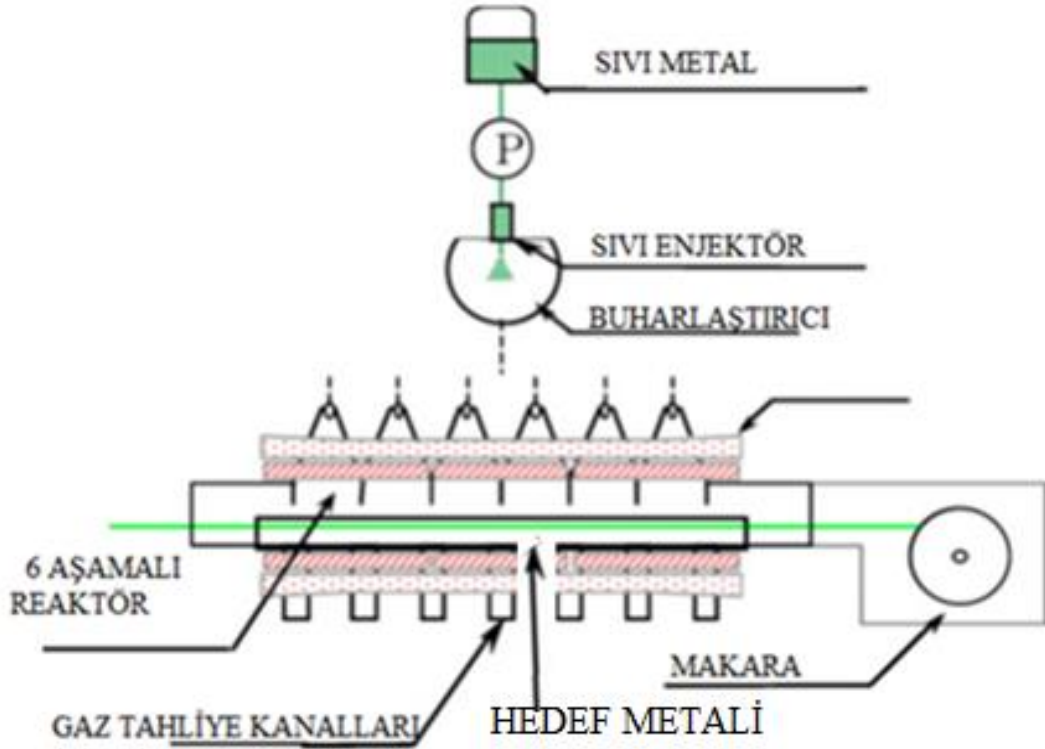
Şekil 2.2. PVD Kaplama haznesi ve yerleşim düzeneği (Fotovvati ve ark., 2019)

PVD kaplamalarının en fazla tercih edildiği ilk 3 sektör havacılık, otomotiv ve biyomedikaldir (Prengel ve ark., 1998).

2.1.2. Kimyasal Buharlaştırma ile Kaplama (CVD)

Buharlaştırma yöntemi ile yapılan ikinci bir yüzey kaplama yöntemi, kimyasal buharlaştırma yöntemidir. İstenilen nitelikte bir kaplama için kaplama ortamı olarak yüksek vakum veya inert bir gaz ortamı gerekir. Kimyasal reaksiyon sırasında ortaya çıkan istenmeyen ürünler vakum pompası yardımıyla ortamdaki uzaklaştırılır (Annavarapu ve ark., 2019; Sojoudive ark., 2017; Nemani, 2018). İstenilen kaplamanın oluşması için kaplama maddesinin ve hedef metali'nin kimyasal reaksiyon şartlarının sağlanması ve hedef metali yüzeyinde kaplama tabakasının oluşturulması için gerekli

termal ısının sağlanması gereklidir. Kimyasal buharlaştırma yöntemi ile yapılan kaplama düzeneği, Şekil 2.3.'de gösterilmiştir.



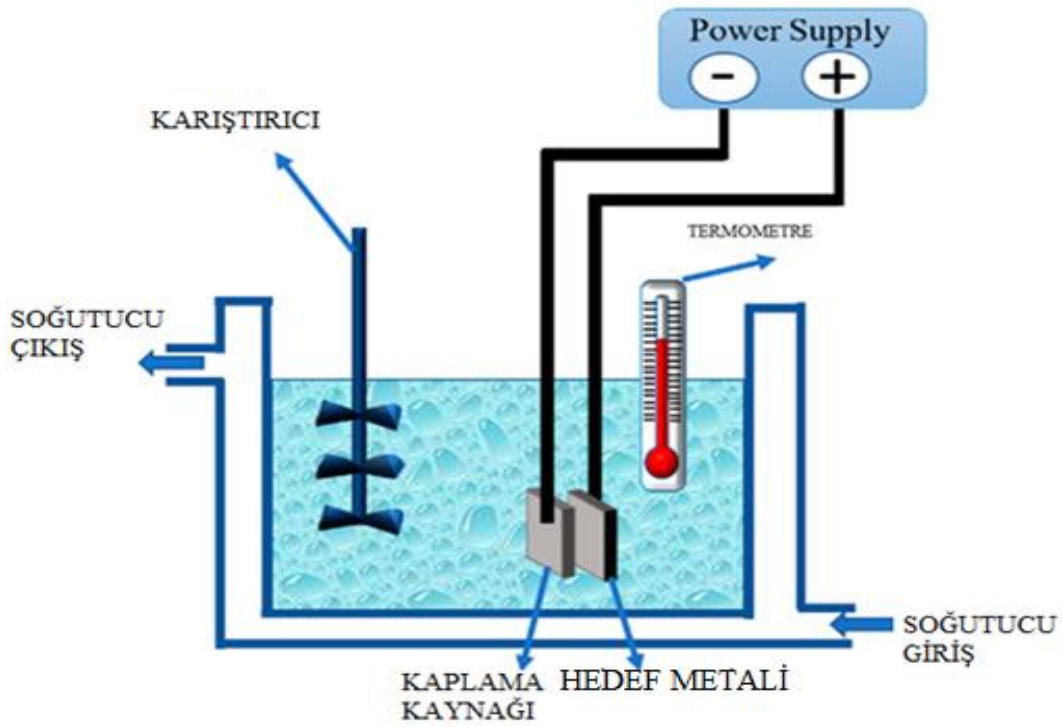
Şekil 2.3. Kimyasal buharlaştırma ile kaplama düzeneği (Fotovvati ve ark., 2019)

Kimyasal buharlaştırma ile kaplama tekniği (CVD) kaplama maddesi için geniş bir seçim olanağı sağlar. Bunlar karbidler, nitritler, oksitler, yarı-iletken uygulamalarında kullanılan yarı metaller, karbon (floro karbonlar), elmas, fiberler, nano fiberler, nano tüpler, mono ve polikristaller vb. lerdir (Foster ve ark., 1994).

Kaplanacak hedef metali 900 °C'ye kadar ısıtılabilir ve kaplama ısıtılan yüzeyde meydana geldiğinden kimyasal atık madde miktarındaki kayıplar daha azdır. Kaplamanın kalitesini artırmak için reaksiyon ortamında yapılması gereken işlemlerin bilgisayar kontrollü yapılması tercih edilir (Fotovvati ve ark., 2018; Fotovvati ve ark., 2019).

2.1.3. Mikro Ark-Oksidasyon ile Yüzey Kaplaması (MAO)

Mikro Ark Oksidasyon (MAO) yöntemi ile hedef metali üzerinde farklı oksidasyon formlarının oluşturulması ile sağlanır. Kaplama yapılacak hedef metali (+), kaplama işleminde kullanılacak metal, DC güç kaynağının eksi (-) kutbuna bağlanarak sulu elektrolitik çözelti içerisine yerleştirilir. Hedef metali ile kaplama metali arasında yüksek gerilim uygulanarak mikro-ark plazma kanalı oluşturulur. Kaplama-metal atomlarının hedef metali yüzeyine ulaştığında çözelti içinde bulunan oksijen atomlarıyla reaksiyona girerek hedef metali yüzeyinde bir metal oksit tabakası oluşması sağlanır. Böylece hedef metalinin yüzey kaplaması gerçekleştirilir. Metal oksit tabakalarının en önemli özelliği korozyon direnci çok yüksek olmasıdır. MAO kaplama düzeneği, Şekil 2.4.'de verilmiştir.



Şekil 2.4. MAO yöntemi ile kaplama düzeneği (Fotovvati ve ark., 2019)

Bu yöntem ile Al, Mg, Ti ve bunların alaşımları kullanılır. Elde edilen metal-oksit tabakası üzerine 100 µm'ye kadar ikinci kaplama yapılmasına olanak sağlar (Li ve ark., 2014). Özellikle hedef metali üzerine yapılan ikinci tür kaplamalar, polimer yapıları gibi ise metal etkileşimlerinin azalmasını sağlar. Özellikle biyomedikal uygulamalar'da yapay organ üretiminde kullanılır.

Kaplama tabakasının niteliğine etki eden başlıca parametreler şunlardır;

- Uygulanan yüksek voltaj
- Akım yoğunluğu(miktarı)
- Elektrolit tipi (konsantrasyonu)
- İşlem süresi (Metal oksit tabakasının oluşturulması için geçen süre)
- Akım tipi (DC, AC)
- Alternatif akım frekansı (değiştirilebilen) vb

2.1.4. Elektroliz Yöntemi ile Kaplama (ELD)

Elektroliz yöntemiyle yapılan metal kaplama işleminde sulu çözelti içindeki metalik iyonların bir DC akım kaynağı vasıtasıyla hedef metali yüzeyine taşınması suretiyle elde edilir. Kaplama yapılacak hedef metali, katot kutbuna (-) kaplama metali anot (+) kutbuna bağlanır, Elektrolitik çözelti üzerinde elektrik alan oluşturularak yüklü metalik iyonların hareket etmesi sağlanarak, katot kutbuna bağlanan hedef metali yüzeyine taşınarak burada yoğunlaşıp bir tabaka oluşturulması sağlanır. Elektroliz hücresi içindeki, sıvı elektrolitin metal iyon konsantrasyonu sabit kalır. Elde edilen kaplama tabakasının özelliklerini arttırmak için ısıtıl işlem, ışık uygulaması ve sinterleme işlemine tabii tutularak kaplama kalitesi ve özellikleri arttırılır.

Bu kaplama yöntemi bazı metal gruplarında uygulanmaktadır. Bu metaller nikel-fosfor, kalay, nikel-fosfor-tungsten, gümüş-paladyum, bakır-gümüş, bakır-nikel, kobalt-gümüş ve kobalt-platin gibi geçiş metalleri üzerinde de başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Fashu ve ark., 2018; Zhou ve ark., 2018). Elektroliz ile yapılan metal kaplamalarında

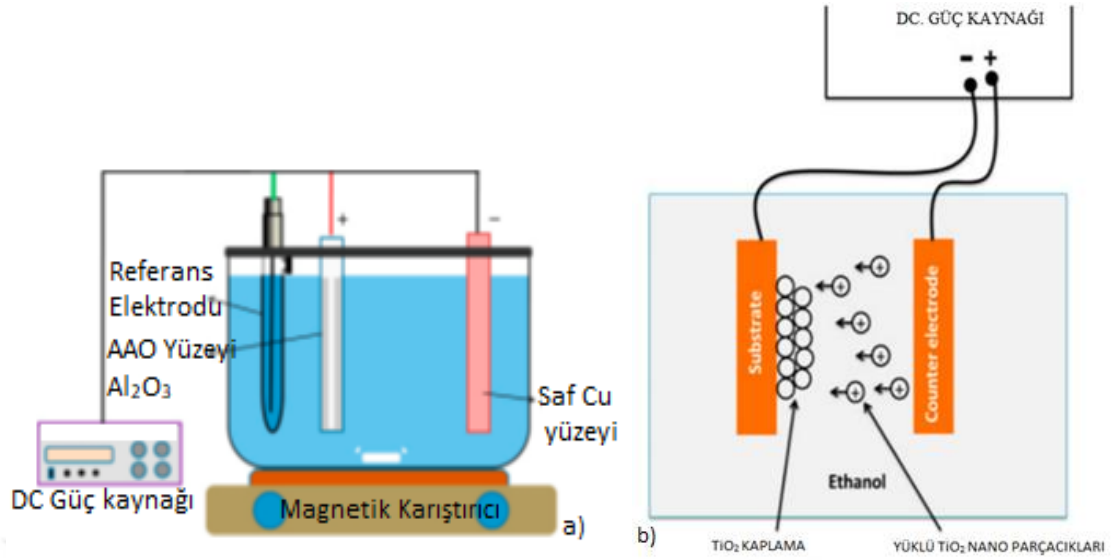
hedef metalinin korozif direncinde belirgin bir değişim gözlenmiştir. Bu kaplama tekniği polimer kaplamalarında da başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Darmanin ve ark., 2010). Elektroliz yöntemi ile yapılan kaplama iki farklı isimle karakterize edilir. Bunlar:

- Elektrolitik kaplama (ELD)
- Elektroforetik kaplama (EPD)

Elektrolitik kaplama(ELD): Elektro-kimyasal işlem olup iletken hedef metali üzerinde üniform kalınlıkta yoğun bir metalik kaplama formudur. Bu işlemin oluşması için elektrolitin süper-satürasyon fazında olması gerekir ki bu devreden çekilen akımla sağlanır. Dekoratif malzemelerin yüzeysel özelliklerini artırmada, optikte, elektronikte, yüksek sıcaklıkta, biyomedikal uygulamalarda ve metal-oksit yakıt hücrelerinde kullanılır (Kyeremateng ve ark., 2017).

Elektroforetik kaplama (EPD): Elektroforetik kaplaması elektroliz yöntemiyle yapılan kaplamanın diğer bir formudur. Hedef metali üzerine taşınan iyonların yüzeyde katmanlı tabaka oluşturmasıdır. Bu yöntemle elde edilen kaplama tabakasının kalınlığı belirgin bir şekilde gözlemlenir. Sonuç olarak hedef malzeme yüzeyinde tozumsu yapıda kalın bir tabaka (20µm -1mm) oluşturulur. Kaplanan tabakanın kalitesini artırmak için fırınlama, sinterleme ve yüksek enerjili ışık demeti (lazer) uygulamalarını gerektirir. EPD kaplama yönteminde tercih edilen metaller; bileşikler, boridler, karbidler, fosfatlar, oksitler ve metal grupları kullanılır(Zhang ve ark., 2018; Dickerson & Boccaccini, 2011).

Yukarıda bahsedilen her iki kaplama düzeneği Şekil 2.5.'de gösterilmiştir.

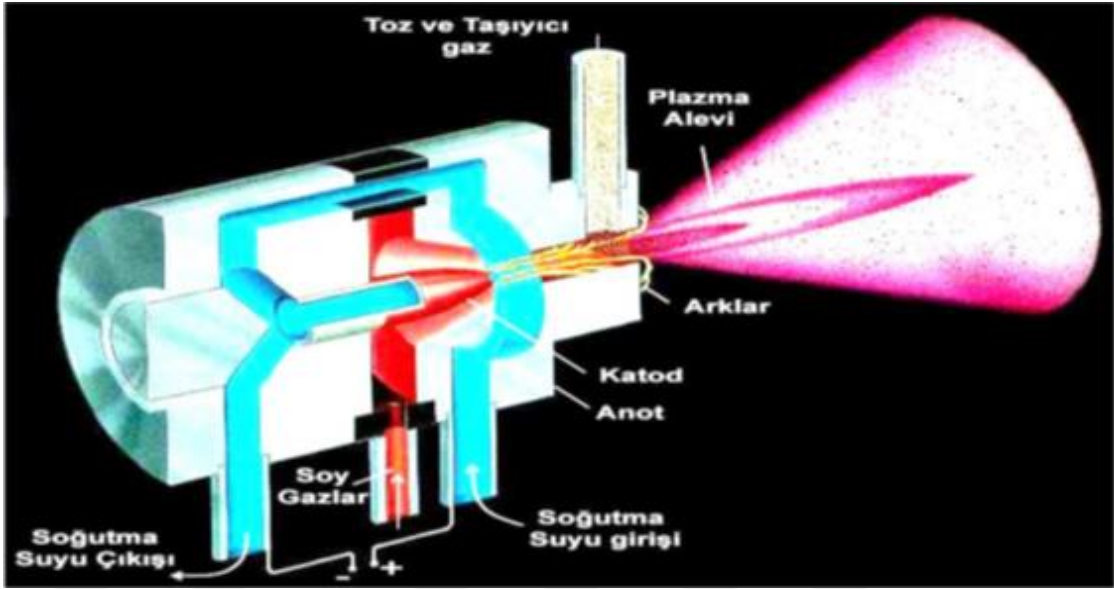


Şekil 2.5. a) ELD kaplama düzeneği, b) EPD Kaplama düzeneği

2.1.5. Plazma Spreyleme Yöntemi

Plazma arkla spreyleme yönteminde kullanılan spreyl tabancası ve sistemi Şekil 2.6.'da gösterilmektedir. Genellikle vakum ortamında gerçekleştirilen bir kaplama yöntemi olup bazı durumlarda atmosfer ortamında da uygulanabilir. Plazma tabancası, DC akımı yardımıyla 11000 °C üstünde bir sıcaklık sağlar. Bu sıcaklık derecesi bütün metallerin erime sıcaklığı değerlerinin çok üstünde bir değer olup bütün metalleri eritip gaz haline getirerek kaplama yapılması istenen hedef metali üzerine 1000 m/s bir hızla püskürtülmek suretiyle yüzeye ulaşan plazma demetinin ani soğuması ve katılaşması sonucu homojen tabaka oluşturur(Üstel, 1995). İşlem süresi çok kısa olup dış ortama kapalı alanda gerçekleştirilir(Lugscheider&Jokiel, 1993). Kaplama tozları, plazma demeti içerisine taşıyıcı argon gazı yardımıyla itilir.

Bu yöntemle kaplanmak istenen hedef metal sistem içine yeterli uzaklığa yerleştirilip sabitlenmesi gerekir. Kaplamada kullanılacak metal ve metal tozları plazma tabancası üzerinde ön kısmında gösterilen hazneye yerleştirilir. Atmosfer ortamında yapılan yüzey kaplamalarında inert gaz (argon gazı) ortamında gerçekleştirilir (Bulloch&Callagy, 1999; Knuuttila ve ark., 1999).



Şekil 2.6. Plazma sprej tabancasının kesiti ve plazma oluşumu (Üstel, 1995)

2.1.6. Soğuk Spreyleme Yöntemi

Soğuk spreyleme yöntemiyle yüzey kaplamasında toz metal parçacıkları kritik bir hızla hedef metal yüzeyine püskürtülür. Yüzeye ulaşan bu parçacıklar malzeme yüzeyine nüfus ederek sahip oldukları kinetik enerji ile yüzeye tutunurlar ve yüzeyde farklı bir tabaka oluştururlar. Bu şekilde bir yüzey modifikasyonu sağlanmış olur. Soğuk spreyleme kaplama yönteminde kullanılan değişkenler genel olarak kaplama tozlarının büyüklüğü, kaplama yapılacak hedef metalin sıcaklığı, kaplama parçacıklarının metalik özellikleri ve kritik hızdır (Moridi ve ark., 2014). Toz metaller yüksek hızlı gaz akışı (helyum ve azot gazı) ile beslenerek master yüzeyine ulaştırılır toz parçacıklarının kinetik enerji, burada yüzeye bağlanma enerjisine dönüşerek yüzeyde tabaka oluşturulur ve kaplama işlemi tamamlanır. Yüksek akış hızları ile taşınan parçacıklarla yüzeyde arzu edilen metal kaplamaları elde edilir. Kaplamada yaygın kullanılan toz parçacıklar; plastikler, metaller, seramikler, kompozitler ve metal alaşımlarıdır (Champagne, 2007; Li ve ark.,2010). Hedef metali olarak Al, Cu gibi yumuşak metaller kullanılır.

2.2. Bor

Bor elementi, periyodik cetvelde 3A grubunun ilk ve en hafif üyesidir. B simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10.82 g/mol, yoğunluğu 2.34 g/cm³, ergime noktası 2075 °C kaynama noktası 4000 °C, özelliklerine sahip yarı iletken özelliğe sahip bir elementtir. İki izotopu vardır. Bunlar ¹⁰B %19.57 ve ¹¹B %80.43 oranlarında 2 adet dengeli izotopa sahiptir (Kistler & Helvacı, 1994). Bor elementi doğada saf halde bulunmaz. Bor cevheri olarak bilinen yaklaşık olarak 23 çeşit bor minerali bulunmaktadır. Ticari olarak borun elde edildiği 4 temel bor cevherleri şunlardır;

- kernit ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
- kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- uleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)

Bor metali, lityum ve berilyum atomlarından sonra en hafif olan bir yarı metaldir. Metalik özelliklerine bağlı olarak kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Son yıllarda araçların yakıt teknolojisinde, nükleer reaktörlerde, otomotiv sektöründe ve uzay sanayisinde kullanılmaktadır.

Metalik bor, ilk kez 1808 yılında Gay-Lussac ve arkadaşları tarafından Bor-Oksit 'in, potasyum ile ısıtılması sonucu yaklaşık %50 saflıkta elde etmişlerdir. İlerleyen zamanlarda yüksek saflıkta bor elementi elde etmek için farklı yeni yöntemler geliştirilmiştir (Baudis&Fichte, 1995).

2.2.1. Bor Elementinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Bor elementi periyodik cetvelde 3A grubunda yer alan bir yarı-metaldir. Oda sıcaklığında yalıtkan gibi davranırken yüksek sıcaklıklarda iletken gibi davranabilir. 600 °C civarında sahip olduğu iletkenliğinin, oda sıcaklığındaki iletkenliğine oranla 100 katı kadardır. Bor

elementi içinde yer aldığı bileşiklerde son yörüngesindeki $2s^2$ ve $2p^1$ enerji düzeylerindeki elektronları vererek B^{+3} değerlikli metal veya $2p$ yörüngesine 5 elektron alarak B^{-5} değerlikli ametal gibi davranış gösterebilir. Bor atomunun bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.1.'de verilmiştir. Bor kristalin sahip olduğu kafes parametreleri Çizelge 2. 2.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Bor atomunun bazı fiziksel özellikleri (Tombal, ve ark., 2016)

Atom kütlesi	10.811 (g/mol)
Atom çapı	1.17 Å°
Elektron dizilimi	$1s^2 2s^2 2p^1$
Valans elektronları	$2s^2 2p^1$
Erime sıcaklığı	2075 °C
Kaynama sıcaklığı	4000 °C
Katı yoğunluğu	2.34 g/cm ³ (25 °C'de)
Amorf yoğunluğu	2.3 g/cm ³
Elastik modülü	Kütle: 320 GPa
Molar hacmi	4.68 cm ³ /mol

Çizelge 2.2. Kristal bor kafes yapısı ve kafes parametreleri (Taşcı, 1993)

Kristal Şekli	Kafes parametresi (°A) a=b	Kafes parametresi (°A) c
Tetragonal	8.13	8.57
Hegzagonal	9.54	11.98

2.2.2. Boridler

Metallerin yüzeyinde kaplama tabakası olarak oluşturulan metal alaşımlarıdır. Metal borürler, yüksek mukavemete, yüksek sertliğe, yüksek aşınma dayanımına, yüksek ergime noktasına ve kimyasallara karşı yüksek aşınma dirence sahiptirler. Bu nedenle, metal yüzeylerinin kaplanması, ısıya dayanıklı, korozyona dayanıklı malzeme üretiminde ve elektronik sanayinde yarı iletken üretiminde katkı maddesi olarak kullanılır (Ediz ve ark., 1997).

2.2.3. Bor Karbür

Bor karbür bileşiği, genellikle granül olarak elde edilir. Bor karbür 2450 °C’de eriyen, kimyasal reaksiyonlara ve radyasyona dayanıklı, oldukça sert bir malzeme olması nedeniyle radyasyon zırhlamalarında, uçak ve diğer askeri araçların yapımında kullanılmaktadır (Ediz ve ark., 1997; TMMOB Bor Raporu, 2003). Sertliği nedeniyle sürtünmeye dayanımlı malzeme yapımında kullanılır. Yüksek sıcaklıklarda hareketli ve temaslı malzemelerin aşınmaya karşı dayanımını arttırmak üzere zırhlama amacı ile uçak ve otomotiv sanayisinde motor parçalarının direkt temaslı yüzeylerinde kullanılır.

2.2.4. Bor Nitrür

Bor nitrür elmasan sonra en sert madde olarak bilinir. Kübik sistemde ise oldukça serttir. Teorik yoğunluğu 3.45 g/cm³ olup iyi bir elektrik izolatörüdür ve elektrik yalıtımında kullanılır, çok sert bir madde olması nedeniyle iyi bir yüzey koruma sağlar. Bu özelliğinden dolayı zırhlamada kullanılır (Ediz ve ark., 1997).

2.3. Borlama Yöntemleri

Borlama; difüzyon mekanizmasıyla yüksek sıcaklıklarda (800-1100 °C) gerçekleştirilen termokimyasal işlem ile metal yüzeyinde metal-borür alaşımları oluşturulmasıdır. Ortam sıcaklığı 800 °C -1100 °C aralığında sabit bir değerde (T_B °C) seçilen ve borlanma süresi 1-12 saat aralığında genellikle 2h, 4h, 6h, 8h vb. gibi sürelerde gerçekleştirilir. Borlayıcı ortam içerisine yerleştirilen hedef metal parçasının yüzeyine, borlayıcı ortam içerisinde bulunan bor atomlarının, sıcaklığa bağlı olarak kazandıkları ısı enerjisi ile bulundukları yapıdan kolayca ayrılarak hedef metal yüzeyine difüze olması ile numune yüzeyinde borür tabakaları oluşturmasıdır. Isıl enerjinin büyüklüğüne bağlı olarak bor atomlarının

ortam içerisinde ulaşacağı mesafe artar. Isıl enerji ile hareket eden serbest bor atomları metal yüzeyine ulaştıktan sonra, sahip olduğu enerji metal yüzeyinin diğer taraftan çıkmasına yeterli olmadığından yüzeyde toplanmak suretiyle metal yüzeyinde katlı bir tabaka oluşturur. Yüzeyde oluşan tabaka yönü yüzeye dik, kalınlığı zamana ve bor konsantrasyonuna bağlı olarak artış gösterir. Metal yüzeyinde oluşan metal borür tabakalarının yüzey sertliği farklılık gösterebilir.

Borlama ortam sıcaklığının sabit tutulması aynı enerjiye sahip bor atomlarının hedef metalinin yüzeyinde aynı enerji seviyesine sahip homojen tabakaların oluşmasını sağlar.

Hedef metali yüzeyinde oluşan borür tabakaları ortamın bor konsantrasyonuna bağlı olarak farklı özellikte borürler oluşturabilir. Demir çelik esaslı yüzeylerde termokimyasal olarak önce Fe_2B fazı oluşur belirli bir süre sonra kaplayıcı madde olarak kullanılan ortam içindeki demir konsantrasyonunun azalması sonucunda Fe_2B tabakası yüzeyi üzerinde ikinci bir faz olarak FeB tabakası formasyonu ortaya çıkar (Badini & Mazza, 1988).

Borlama işleminde bor kaynağı olarak seçilen ortam; katı, sıvı, gaz ve özel durum olan plazma ile birlikte dört farklı ortamda gerçekleştirilebilir. Plazma ve gaz ortamında borlama işleminde borun hedef metal yüzeyine yayılım hızı yüksek, katı ve sıvı ortamda yayılım hızı düşüktür. Borür tabaka ile kaplanan metalin tabaka kalınlığına doğrudan etki eden temel parametreler şunlardır;

- Borlama ortam sıcaklığı (T_B °C),
- Borlanma süresi (t sn),
- Borlayıcı ortamın bor konsantrasyonu (atom sayısı/cm³),
- Borlayıcı ortam faz durumu (Katı, sıvı, gaz ve plazma hali),
- Hedef metalinin yüzey alanı(m²),
- Bor kaynağının difüzyon katsayısı (atom /cm².sn).

Borlama işlemi, demir esaslı malzemeler, demir dışı birçok alaşım ve seramik malzemelere uygulanabilir. Borlama ortamının bor kaynağı olarak tercih edilen bor

bileşikleri (B_4C , $Na_2B_4O_7$, H_2B_6) ve Ekabor tozlarıdır (Ekabor 2; %5 B_4C , %90 SiC , %5 KBF_4). Ekabor 2 karışımını oluşturan bileşenlerden;

- B_4C bileşiği borlayıcı,
- KBF_4 bileşiği aktivatör ve
- SiC bileşiği dolgu ve ekrit ile birlikte borlama ortamında dolgu malzemesi ve deoksidan olarak borlanma işleminde katkı sağlarlar.

Borlanacak hedef metaller, özelliklerine göre 800– 1100 °C sıcaklık aralığında (sabit bir ortam sıcaklığında), yaklaşık 1-12 saat süre ile bor verici ortamlarda bekletilmek suretiyle gerçekleştirilir. Ortamda bulunan bor atomlarının ısı enerjisi yardımıyla bulundukları yapıdan ayrılarak hedef metali yüzeyine difüze olarak burada katmanlı tabakalar oluştururlar. Oluşan tabaka kalınlığı; borlama ortamının bileşimi, hedef metalin cinsi, yüzey alanı, ortam sıcaklığı, işlem süresi ve difüzyon katsayısına bağlı olarak artar.

Endüstride ve küçük boyutta uygulanan borlama yöntemleri, kullanılan bor kaynağının fiziki durumuna göre belirlenmekte olup, genel olarak borlamada fazla tercih edilen yöntemlerden beş tanesinin aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

- Katı ortam borlama (kutu borlama),
- Macunlama ile borlama (Pasta borlama),
- Sıvı ortamda borlama (Elektroliz yöntemiyle borlama),
- Gaz ortamında borlama,
- Plazma ortam borlama.

Katı ortam borlama yöntemi, toz haline getirilmiş bor vericileri içerisine yerleştirilen hedef metali yüzeylerinde 800- 1100 °C arasında bir ortam sıcaklığında gerçekleştirilir. Pratik uygulamalarda diğer kullanılan borlama yöntemlerine nazaran birçok üstünlüğe sahip, basit ve kolayca uygulanabilir bir yöntemdir. Sistem ucuzdur, özel teçhizat ve ekstra teknik gerektirmez (Bozkurt, 1984). Bu avantajlarından dolayı pratikte çoğunlukla katı ortam borlaması tercih edilmektedir. Yaptığımız deneysel çalışmalarımızda bu yöntem tercih edildiğinden dolayı aşağıda bu yöntem hakkında ayrıntılı bilgi verilecektir.

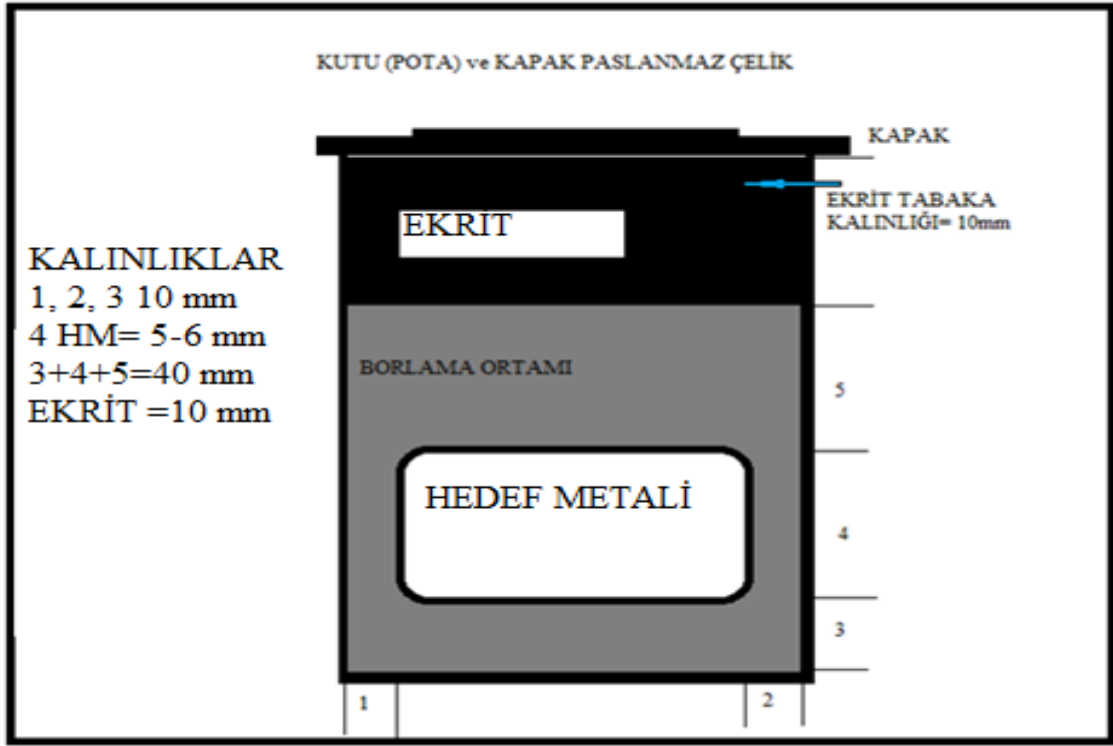
2.3.1. Katı Ortam Borlama Yöntemi (Kutu Borlama)

Kutu borlama yöntemi ile yüzeyi kaplaması gerçekleştirilecek hedef metali toz halindeki bor verici ortam içinde, 800°C- 1100 °C sıcaklık aralığında belirlenen T_B °C’de, 1- 12 saat arasında belirli bir süre (2h, 4h,6h ve 8h) bekletilerek termo-kimyasal olarak borlama işlemi gerçekleştirilir (Delai ve ark., 2021; Campos-Silva ve ark.,2018).

Özel olarak kaplama malzemesinin boyutlarına uygun olarak tasarlanmış, borlama ortam sıcaklığına dayanımlı paslanmaz krom –çelikten yapılmış kutu Şekil 2.7.’de gösterilmiştir. Hedef metaller borlayıcı ortam içine 4 aşamada yerleştirilir.

- Borlayıcı ortam olarak seçilen toz tabakası, kutunun tabanından en az 10 mm kalınlığında kutu içerisine serilir,
- Hedef metaller borlayıcı ortam olarak belirlenen tozların üzerine, kaplanmak istenen yüzey üst tarafa gelecek ve metaller bir birlerinden 5mm uzak olacak şekilde yerleştirilir.
- 3. Borlayıcı ortam tozundan hedef metallerin üst kısmına 20-30 mm kalınlığında toz ilave edilir.
- Son olarak kutunun üst kısmına 10 mm kalınlığında ekrit tabakası ilave edilir ve kutunun ağzı aynı malzemeden yapılmış bir kapak ile kapatılır.

Kapak yüzeyinde 2 mm çapında bir delik açılarak içerde oluşan ortam gazlarının dış ortama atılmasını sağlar. Ekrit, hazırlanan kutunun dışında kalan bölgelerdeki ortam gazlarının hedef metal yüzeyine ulaşmasını engeller. Ayrıca ısıtım işlem sırasında borlayıcı ortam tozları arasında bulunan gazların dışarı atılmasına sağlar.



Şekil 2.7. Hedef metallerin, borlayıcı ortam ve ekrit tabakasının kutu içine yerleşimi (Matuschka 1980)

Hazırlanan kutu fırının iç kısmına ve tam orta noktaya gelecek şekilde yerleştirilir. Kutunun hacmi fırın iç hacminin %60'tan büyük olmamalıdır. Homojen bir sıcaklık dağılımı için tavan, taban ve yanıl yüzeylere eşit mesafede yerleştirilmesi gerekir. Gerekirse kutuyu yükseltmek için alt kısma destek olabilecek özel malzemeler kullanılabilir. Hazırlanan kutunun fırın içine yerleştirme işleminden sonra fırın kapağı kapatılarak fırın içi sıcaklığı, borlama-sıcaklığına ulaşınca kadar sabit bir sıcaklık artım hızı (5-10 °C/dakika) ile istenilen sıcaklık derecesine yükseltilir (tez çalışmasında sıcaklık artım hızı = 7.75 °C/dakika). Belirli bir süre (borlanma süresi) sonra fırının ısı kaynağı kapatılarak fırının içinde soğumaya bırakılır. Fırının sıcaklığı oda sıcaklığına indikten (14-16 saat) sonra fırın açılıp kutuyla birlikte borlanmış hedef metalleri, borlama ortamından çıkarılarak hafif bir ön temizlik yapılır.

Kutu borlama yöntemi ile borür tabakası elde etmek basit, ekonomik ve ekstra bir teknik gerektirmez (Hamamcı ve ark., 2022). Ticari olarak temin edilen Ekabor borlayıcılar, Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. EKABOR® borlayıcı elemanları

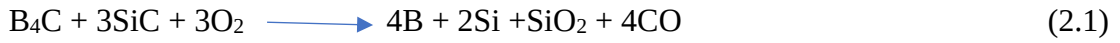
Borlayıcı Tipi	Toz tane boyutu (µm)	Açıklama
Ekabor®1	< 150	Yüzeyde maksimum kalite
Ekabor®2	< 850	Mükemmel yüzey tabakası, işlem sonrası kolaylık
Ekabor®3	>1000 < 2000	Çok iyi yüzey tabakası, işlem sonrası kolay toz akışkanlığı
Ekabor®HM	< 150	Sert metaller için ve küçük çap borular için ideal kalın borür tabaka
Ekabor®Paste	< 100	İnert gaz ortamında kullanılır
Ekabor®Ni	< 100	Ni esaslı alaşımlar için
Ekrit	< 420	Örtü malzemesi, borlama süresince toz borlama ürünlerine oksijen sızmasını önler

Borlama öncesi, hedef metali istenilen büyüklükte dilimlenerek kaplama yapılmak istenen yüzeyi, zımpara ve parlatma yöntemleri ile pürüzsüz hale getirilir. Daha sonra hedef metali yüzeyine zayıf asit banyosu uygulanarak temizlenir. Sıcak hava ile kurutulduktan sonra kaplama için hazırdır.

Borür tabakasının büyüme kinetiği bor atomlarının difüzyonu ile kontrol edilmektedir. Borür tabakasının büyümesi hedef metalin yüzeyine dik, hacimsel olarak oluşur. Borür tabaka kalınlığının zamana göre artması parabolik kanuna uymaktadır (Uslu ve ark.,2007).

Atomların sıcaklığa bağlı olarak hareket etmesi olayı difüzyon olarak adlandırılmaktadır. Bor atomlarının hedef metal yüzeyine termo-kimyasal olarak kazandıkları enerji ile difüze işlemi sonucu metal yüzeyinde aynı enerjili atomların oluşturduğu tabakalı yapılardır. Demir esaslı hedef metali yüzeyinde tek fazlı Fe₂B veya iki fazlı Fe₂B + FeB'den oluşan ferro-bor tabakası elde edilir. FeB fazı borca zengin olduğundan dolayı kırılabilirliği yüksektir. Bu nedenle iki fazlı Fe₂B + FeB fazı yerine tek fazlı Fe₂B oluşması

tercih edilir. FeB'nin ısı genleşme katsayısı (200-600 °C'de 23 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$), Fe₂B'nin genleşme katsayısından (200-600 °C'de 7.65 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$) büyüktür. İki fazlı sistemde oluşan Fe₂B ve FeB fazları arasındaki ısı genleşme farklılıkları nedeniyle yüzeyde çatlamlar oluşur. Bu çatlamları önlemek için FeB fazını azaltmak veya FeB fazının oluşmasını önlemek ile mümkündür. Kutu borlama işleminde yer alan reaksiyonlar şunlardır;



Birinci reaksiyonda B₄C den serbest hale geçen B atomları demir yüzeyine difüze olarak önce yüzeyde Fe₂B fazını oluşturur, bu tabakanın üzerine, ortamdaki bor yoğunluğuna bağlı olarak FeB fazı oluşur.

Bu çalışma, 950 °C borlama ortamında gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığından borlama ortam sıcaklığına erişme süresi 2 saat olarak seçildiğinden sıcaklık artış hızı 7.75 °C/dk'dır. Borlama ortam sıcaklığının 850 °C den - 950 °C'ye ulaşması için yaklaşık 13 dakikadır. Bu sürede farklı kinetik enerjiye haiz atomların difüzyonu sonucu oluşan tabakalarda istenmeyen kusurların oluşması muhtemeldir. 950 °C'deki ortam sıcaklığına ulaştıktan sonra difüze olan bor atomları aynı ısı enerjisiye sahip olarak metal yüzeyinde kararlı borür tabaka büyümesi oluşur. İnce ve sağlam olan birinci tabakanın oluşumundan hemen sonra ikinci adım başlar. Bu adım yayınma kontrollüdür. Metal yüzeyinde oluşan borlu tabakaların kalınlığı, borlama ortam sıcaklığına ve zamana bağlı olarak parabolik bir artış göstermektedir. Her metalik malzemenin kendine has bir yayılım katsayısı $D_0(\text{m}^2/\text{s})$ vardır (Hamamcı ve ark., 2022; Delai ve ark., 2021).

2.3.2. Pasta Borlama

Düzensiz şekilli parçaların borlanması tercih edilen yöntemdir. Borlayıcı kaynağı olarak kullanılan tozların iyi bir bağlayıcı ile macun kıvamına getirilir. Macun kıvamına gelen borlayıcı numune yüzeyine veya kaplama yapılacak bölgeye 3-4 mm kalınlığında sürülerek sıcak ortamda ön kurutma yapılır ($T < 150^{\circ}\text{C}$). Yeterli pasta kalınlığı elde edilmediği durumlarda işlem tekrarlanır. Yeterli kalınlıkta pasta macunu ile kaplanan numune bir kutu içine yerleştirilerek fırın sıcaklığının borlama yapılacak sıcaklığa ayarlanır. 5 saat borlanma sıcaklığında bekletilerek metal yüzeyinde borür tabakasının oluşması sağlanır. Bu işlem, demir esaslı malzemelerle geleneksel fırınlarda $800-1000^{\circ}\text{C}$ arasında 5 saat uygulanmaktadır. Borlama ortamında deoksidanlar bulunmadığından inert gaz ortamında (Ar , NH_3 veya N_2) ısıtma işlemi uygulanır. Büyük parçaların veya seçilmiş alanların borlanması için uygun yöntemdir (Sinha, 1991). Pasta borlamada, bor kaynağı olarak Ekabor 2 tozları kullanılabildiği gibi bor bakımından zengin diğer borlayıcılar da kullanılabilir. Çizelge 2.4.'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Ticari katı borlama toz karışımlarının ağırlıkça % bileşimleri

• %5 B_4C , %90 SiC , %5 KBF_4
• %50 B_4C , %45 SiC , %5 KBF_4
• %85 B_4C , %15 Na_2CO_3
• %95 B_4C , %5 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$
• %84 B_4C , %16 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$
• Amorf bor (%95-97 B)
• %95 amorfbor, %5 KBF_4
• % 50 Amorf bor, % 1 $\text{NH}_4\text{F.HF}$, , % 49 Al_2O_3
• % 100 B_4C
• % 20 B_4C , %5 KBF_4 , % 75 Grafit
• % 60 B_4C , % 5 B_2O_3 , % 5 NaF , % 30 Fe_2O_3

2.3.3. Sıvı Borlama

Bu yöntemde borlama işlemi genellikle elektroliz ile kaplama yöntemi gibi uygulanır, bor verici bileşiğin sıvı çözeltisi hazırlanır ve elektrolit olarak (bor verici) işlem sırasında sıvı halde bulunur. Kaplama yapılacak hedef metalik katot kutbuna sabitlenerek sıvı ortama daldırılır ve anot olarak grafit rodu elektrolit içine daldırılır. DC güç kaynağı ile elektrolit üzerinden akım geçirilerek elektrolit ortamında bulunan bor atomlarının malzeme yüzeyinde difüze olarak kaplama tabakası oluşturması sağlanır.

Borlama işlemi, 900-950 °C sıcaklık aralığında 4-6 saat uygulanır. Bu işlemde diğer önemli bir parametre, uygulanan DC akım değeri 0.15-0.20 A/cm² ile gerçekleştirilir. Kaplamanın homojen yapıda oluşması için elektroliz sırasında parçanın kendi eksenine etrafında dönmesi sağlanır. Alaşımlı çeliklerde kalın kaplama tabakalarının elde edilmesi için düşük akım yoğunluğuna ve uzun sürelerle ihtiyaç duyulmaktadır (Sinha, 1991). Sıvı borlama işleminde kullanılan bazı bor verici elektrolitler ve içerikleri Çizelge 2.5.'te verilmiştir.

Çizelge 2.5. Literatürde verilen bazı tuz banyosu içerikleri (Uluköy & Can, 2006)

%Ağırlık Olarak Banyo İçeriği							
Na ₂ B ₄ O ₇	B ₄ C	KBF ₄	B ₂ O ₃	SiC	Ferro-Si	Al	Kaynak
65	--	--	15	--	20	--	Şen, 1998
70	--	--	--	30	--	--	Yüksel ve ark., 1995
70	--	--	10	20	--	--	Yüksel ve ark., 1995
60	40	--	--	--	--	--	Yüksel ve ark., 1995

Sıvı borlama yönteminin olumsuz yönleri aşağıda belirtilmiştir. Bu yüzden pek tercih edilmez.

- Borlama sonrasında parça yüzeyinde tuz kalıntıları ve reaksiyona girmeyen bor vardır. Bunların giderilmesi zaman ve para kaybına yol açar.

- Borlamanın başarılı olabilmesi borlama sırasında banyo vizkozitesi artmamalıdır. Bu nedenle sıvı banyoya tuz ilavesi yapılmaktadır. Bu da maliyeti arttırır.
- Korozyif ortamlara dayanıklı fırınlara ihtiyaç vardır.

Sıcaklık 850 °C'nin altına düşerse, erimiş boraksın akıcılığı azalacağından dolayı borlama işlemi imkânsız hale gelir (Uluköy& Can, 2006).

2.3.4. Gaz Borlama

Gaz borlama işlemi 700-950 °C arasında ve 0.67 bar basınç altında gerçekleştirilmesi sebebi ile borlama ortamında atmosfer gazlarından kaynaklı azot ve oksijen bulunacaktır. Bu gazların ortamdaki temizlenmesi, ancak ortamın vakum yapılması ile mümkündür. Borlama işlemi 700 °C de ve inert gaz ortamında yapılsa bile, elde edilen metal borür tabakalarında, metal oksit ve metal-nitrat fazları oluşumu kaçınılmazdır.

Borlama işlemi sırasında bor kaynağı olarak en fazla tercih edilen bor bileşiği BCl_3 'dür. Gaz borlamada bor kaynağı olarak kullanılan diğer bor bileşikleri şunlardır:

- Diborane (B_2H_6)- H_2 karışımı,
- Borhalid (iyonize bor)- H_2 /veya (75/25 N_2 - H_2) gaz karışımı,
- $(\text{CH}_3)_3\text{B}$ ve $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$ gibi organik bor bileşikleri de gaz borlamada kullanılabilir.

Son çalışmalarda H_2 gazı yerine azot gazı ve hidrojen gaz karışımını 75:25 oranında (N_2 : H_2) kullanılmasıyla metal yüzeyinde elde edilen kaplama tabakalarında FeB fazının azaldığını ve daha iyi kalitede tabakaların elde edildiğini göstermiştir (Sinha, 1991).

Gaz borlama yönteminin eksileri şunlardır;

- Kaplama işlemi gaz ortamında gerçekleştiği için kaplama yüzeyinde istenmeyen bileşikler önlemek için inert gaz ortamı gerektirir.

- (B_2H_6)- H_2 karışımı zehirli ve patlayıcı olma özelliği sebebiyle ticari olarak pek tercih edilmez. Son derece tehlikeli olan siyanürün zehirlilik oranı sınırı 10 ppm iken, diboranın zehirlilik sınırı 0.1 ppm'den düşüktür.
- Gaz borlama işlemi sağlık açısından risklidir.
- Ekonomik değildir. Diboran hidrojen ile seyreltilse bile oldukça pahalıdır.
- Organik malzemeler kullanıldığı takdirde metal-borür ve metal-karbür bileşikler birlikte oluşmaktadır.

2.3.5. Plazma Borlama

Plazma spreyleme yöntemine benzer şekilde uygulanır. Ancak kaplama maddesi olarak bor elementi kullanılır. Plazma borlama işlemi vakum ortamında ve düşük basınç altında gerçekleştirilir. Uygun bor bileşiği seçildiğinde hedef metal yüzeyinde oluşturulacak borür tabakasının homojen, istenilen kalınlıkta ve istenilen fazda oluşması sağlanır. İstenmeyen borür fazları malzeme yüzeyinden metalografik yöntemler ile uzaklaştırılır.

Plazma borlama ile yüzey sertleştirmenin önemli avantajları vardır. Bunlar:

- Ekonomiktir
- Güvenilir
- Çevresel temizlik
- İşlem süresinin kısa olması
- Mükemmel aşınma direnci
- Kaplama tabaka kalınlığı kontrol edilebilirliği

Dezavantajları ise kullanılan borlayıcı bileşiğine bağlı olarak (BCl_3 ve B_2H_6 gazları kullanılması durumunda):

- Pahalıdırlar,
- Zehirli,
- Patlayıcıdır.

2.4. Alaşım Elementlerinin Borlama Üzerine Etkisi

Demir esaslı çeliklerin borlanması, çeliğin içinde bulunan alaşım metallerinin borlama esnasında malzeme yüzeyi ile borür tabakası arasında gözlemlenir ve bu bölge geçiş bölgesi olarak tanımlanır. Çeliğin içinde bulunan katkı alaşımlarından; C, Ni, Si, Al ve P gibi metaller borlanma sıcaklığında (800-1100 °C) çeliğin dış yüzeyinden iç kısma doğru hareketlenir ve yapının içine süzülerek bu bölgeye ayrı bir sertlik kazandırır. Bu tabakanın üzerine, borlama ortamında bulunan demir ve bor atomları difüze olarak burada Fe₂B ve FeB fazlarını oluştururlar.

Bu katkı atomları (C, Ni, Si, Al ve P), ortamda bulunan bor atomları ile borür tabakası oluşturmazlar ancak ana malzemenin bora karşı olan aktivitesine, reaktifliğine etki ederler. Genellikle tabaka kalınlığını azaltıcı yönde etkilediğini iddia etmişlerdir (Delai ve ark., 2021).

Campos ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada, hedef alaşımının içinde Cr, Mo ve V'un bulunması durumunda bu elementlerin ortamda bulunan bor atomlarıyla borür tabakaları oluşturarak özellikle FeB fazlarının şekillenmesinde büyük rol oynadıklarını rapor etmişlerdir (Campos ve ark., 2007).

2.5. Borlamanın Avantajları ve Dezavantajları

Borlama işleminin önemli avantajları şunlardır;

- Borlama sonrasında elde edilen borür tabakasının, çok yüksek sertlik değerine (145 -5000 HV) ve yüksek ergime noktasına sahip olmasıdır
- Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayılarından dolayı yüzey sürtünme aşınmasına karşı çok iyi direnç gösterirler
- Borlama işleminin katmanlı uygulamasına olanak sağlar
- Asidik ve sulu ortamlara karşı korozyon dayanım sağlar
- Sertlik değerini yaklaşık 600 °C'ye kadar korur

- Borlanmış malzemelerin yorulma ömürleri, özellikle korozyon ortamlarda %25 oranında arttırılabilmektedir
- Borlama, bir iş parçasının sertleştirilmesi istenen seçilmiş bölgelerine, düzensiz karmaşık şekillere üniform bir şekilde uygulanabilmektedir
- Nitrürlenmiş malzemelerle kıyaslandığında borür tabakasının sertliğini daha yüksek sıcaklıklarda muhafaza ettikleri görülmektedir

Borlamanın dezavantajları ise şunlardır;

- Uygulama sıcaklık aralığı 800-1100 °C olmasından dolayı, ergime sıcaklığı 700°C nin altında olan metallere uygulama imkân vermez
- Borlama öncesi ve sonrası işlem süresi uzundur.
- Borlanma işlemi sonucunda ortaya çıkan toz kalıntılarının çevreye olumsuz etkileri vardır.

2.6. Borlama Kinetiği

Borlama işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için kinetik parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Yüksek sıcaklıkta, difüzyon kontrolü ile yapılan borlama işlemi sonucunda kaplama yapılmak istenen hedef metal yüzeyinde, istenilen kalınlıkta ve sertlikteki borür fazlarının oluşturulabilmesi için işlem parametrelerinin doğru tayin edilmesi gerekmektedir.

Borür tabakasının büyümesi, bor atomlarının hedef metal yüzeyine difüzyon yoluyla yayılımı sonucu yüzeye dik olarak oluşmaktadır. Fick'in birinci yasasına göre difüzyon, birim yüzeyde birim zamanda difüze olan madde miktarı olarak tanımlanır. Borlama işleminde, ortam sıcaklığına, borlama ortamının bor zenginliğine (konsantrasyonuna), borlama hızına ve zamana bağlı olarak tabaka kalınlığı değişebilmektedir. Difüzyon olayı konsantrasyon yoğunluğu fazla olan bölgeden konsantrasyon yoğunluğu az olan bölgeye doğru, iki ortamın konsantrasyonu eşit oluncaya kadar devam eder ($dc/dx = 0$). Fick'in

birinci yasası, borun FeB ve Fe₂B fazları içindeki konsantrasyonunu tahmin etmede kullanılmaktadır.

2.7. Difüzyon nedir?

Difüzyon, atomların ısı enerjisi etkisi ile ilk denge konumlarını değiştirerek yeni denge konumuna geçmesidir. Atom içi hareketleri iki aşamada tanımlayabiliriz.

Birinci aşama; ısı enerjisi etkisi ile atomların kendi denge konumları çevresindeki küçük titreşim hareketleridir.

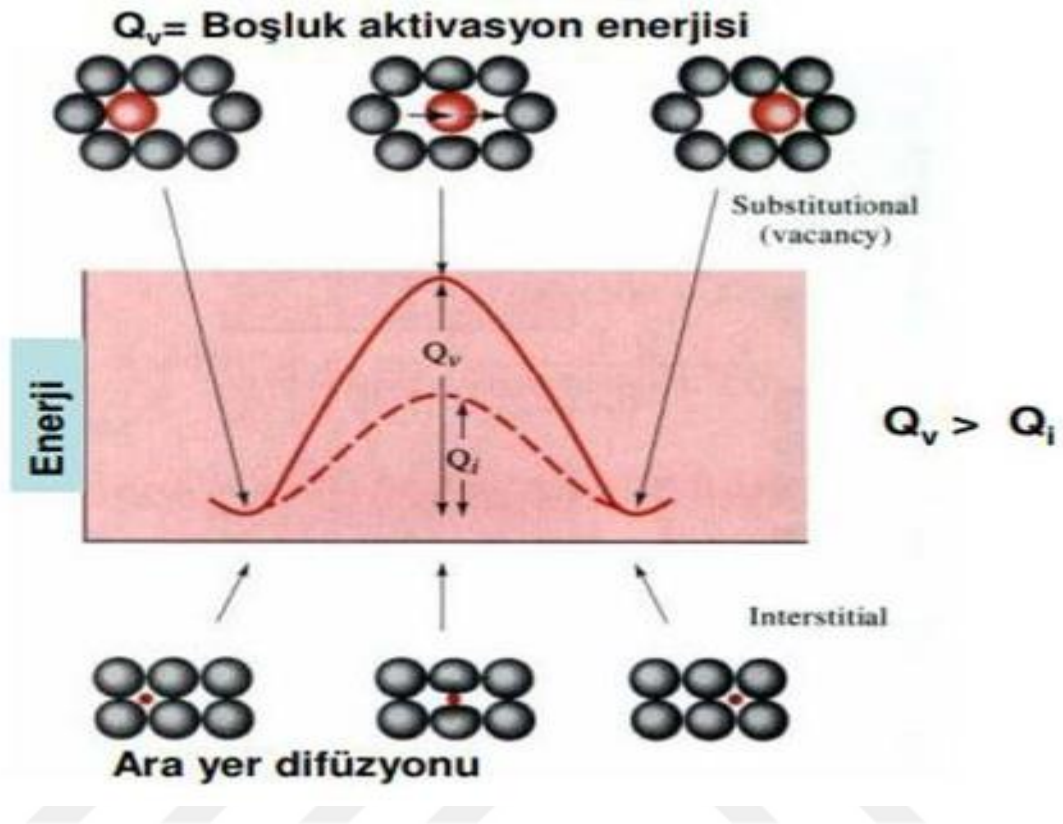
İkincisi aşama; atomların, ısı enerjisi etkisi ile bir denge konumundan diğerine atlayarak yaptıkları uzak mesafe hareketleridir. Homojen malzemelerde aynı yapıya sahip parçacıkların difüzyon olayında kütle taşınması görülmezken, homojen olmayan malzemelerde, farklı konumlara difüzyon etmelerine neden olduğundan önem arz etmektedir. Difüzyon, bir konsantrasyon gradyanından hareket eder ve denge durumunda sona erer.

En hızlı difüzyon gazlarda görülürken, sıvılarda difüzyon daha yavaş gerçekleşmektedir. Katı malzemelerde meydana gelen difüzyon, gaz ve sıvılardaki difüzyondan çok daha yavaştır. Katılardaki difüzyon genellikle kristal kafes kusurları bölgelerinde gerçekleşir.

Difüzyon olayının gerçekleşmesi için gerekli koşullar:

- Boş bir komşu kafes noktası bulunmalıdır.
- Yeterli enerjiye sahip olmalıdır.

Atom, ısı işlem enerjisi ile uyarılarak bulunduğu konumdan ayrılarak kendi bölgesindeki boşluğa geçer ve yeni konumuna geçerken komşu atomları sıkıştırarak geçer. Bu enerji bariyerinin aşılması için gerekli enerjiye **aktivasyon enerjisi** denir. Aktivasyon enerjisi (Q), aynı zamanda difüzyon için enerji bariyeri olarak adlandırılır, Şekil 2.8.'de aktivasyon enerjisi (Q) bariyeri gösterilmiştir.



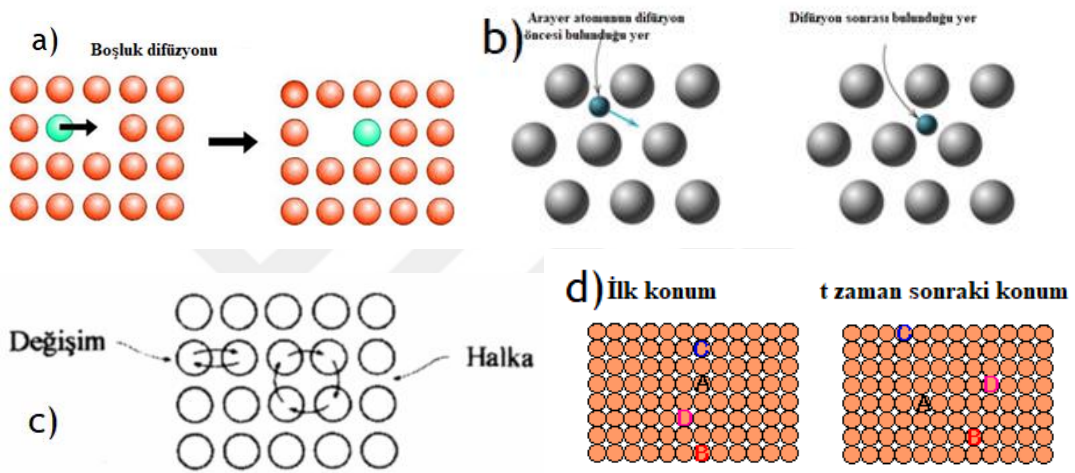
Şekil 2.8. Aktivasyon enerjisi (Q) engeli aşılması (Ders notları1)

Difüzyon hızını etkileyen temel faktörler şunlardır:

1. Maddenin katı(toz), sıvı ve gaz fazında olması, difüzyon hızını değiştirir. Gazlar daha çabuk difüze olurlar.
2. Difüzyon ortam sıcaklığı arttıkça moleküllerin ortalama kinetik enerjisi artacağından difüzyon hızı da artar.
3. Molekül veya tanecik büyüklüğü difüzyon hızını etkiler. Küçük molekül ve tanecik yapısına sahip maddelerin difüzyon hızı artar.
4. Difüzyonun gerçekleştiği alan arttıkça difüzyon hızı da artar.
5. Difüzyon mesafesi arttıkça difüzyon hızı da azalır.

Katılarda gözlenen difüzyon mekanizmaları şunlardır; difüzyon mekanizmaları, Şekil 2.9'da gösterilmiştir.

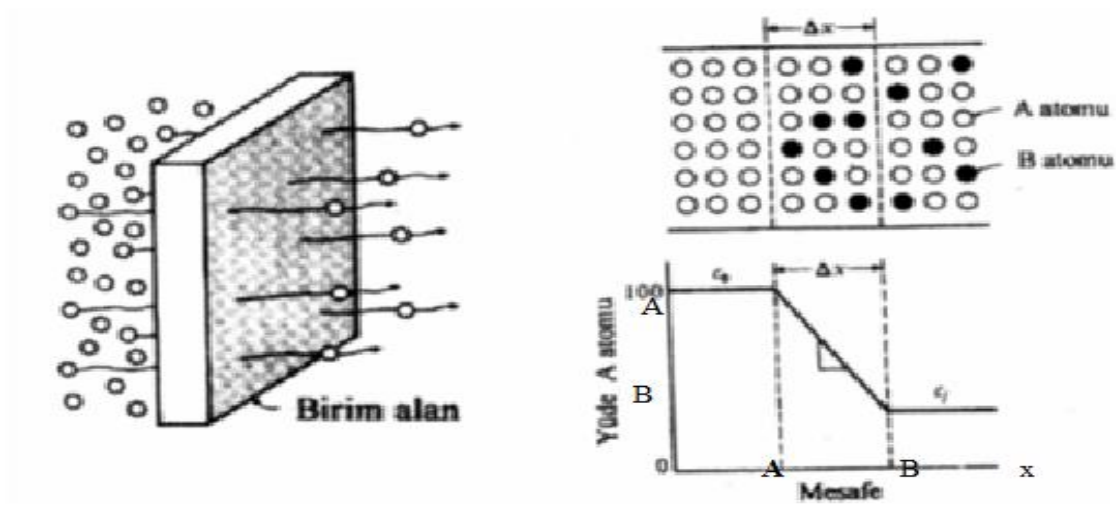
- a) Boşluk difüzyonu,
- b) Ara-yer difüzyonu,
- c) Halka difüzyonu,
- d) Kendi kendine difüzyon.



Şekil 2.8. Difüzyon mekanizmaları, a) Boşluk difüzyonu, b) Ara yer difüzyonu, c) Halka difüzyonu ve d) Kendi kendine difüzyon

2.8. Difüzyon Hızı

Atomların yayılım hızı, birim zamanda birim düzlem alanı boyunca geçen atom sayısı veya birim yüzeyden birim zamanda geçen madde miktarı olarak tanımlanan J akısı ile ölçülebilir ve aşağıdaki formülle ifade edilir. Bu ifade Fick'in birinci yasası olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.10'da difüzyon olayı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Difüzyon mekanizmasının şematik gösterimi (Ders notları 2)

$$J = -D \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad (2-3)$$

Burada;

J: Atomsal yayılım akısı (atom/(m²s))

D: yayılım katsayısı (Atom /(m²s))

c: atom konsantrasyonu (Atom sayısı/ m³)

($\Delta c / \Delta x$) = [(C_A - C_B) / (X_A - X_B)]: konsantrasyon gradyanı

Difüzyon akısı zamanla değişmiyorsa, kararlı hal difüzyonu olarak tanımlanır ve burada “D” difüzyon katsayısı olarak tanımlanır (Flynn ve ark., 1974). Difüzyon ortamının konsantrasyon gradyanına bağlı olarak, konsantrasyon gradyanı arttıkça difüzyon miktarı da doğrusal olarak artar.

Difüzyon “D” katsayısı Arrhenius denklemi olarak bilinen aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$D = D_0 e^{(-Q/RT)} \quad (2-4)$$

Burada;

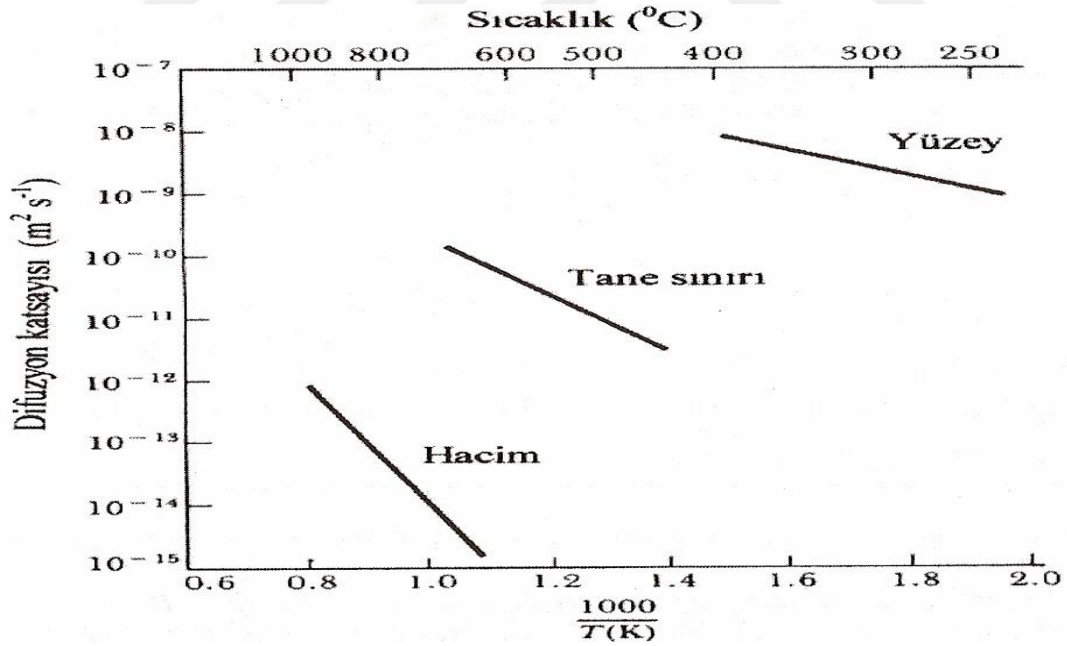
Q: aktivasyon enerjisi (J/mol)

R: gaz sabiti (8.314 J/mol.K)

T: mutlak sıcaklık (K)

D_0 : sabit (m^2/s)

Difüzyon katsayısı sıcaklığa çok etkin bir şekilde bağlıdır (Thelning, 1975). Difüzyon katsayısının ve atom akısının değerinin, aktivasyon enerjisine ve ortam sıcaklığına göre değişimini şu şekilde açıklayabiliriz. Aktivasyon enerjisi, sıcaklık değeri ile doğru orantılı olarak değişmektedirler. Difüzyon katsayısının sıcaklığa ve difüzyon türlerine bağlı değişimleri, Şekil 2.11.'de gösterilmiştir. Bazı metallerde yayınım sabiti ve aktivasyon enerjisi değerleri, Ek 1'de verilmiştir.



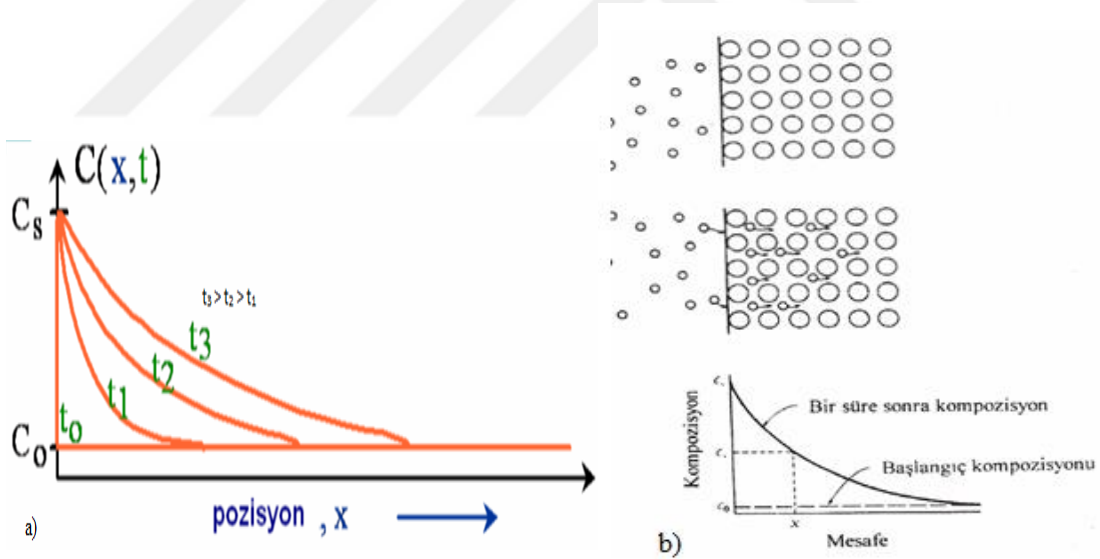
Şekil 2.9. α -Fe içerisindeki farklı atom difüzyonlarına ait difüzyon katsayısı-sıcaklık ilişkisi grafiği (Ders notları 2.)

Uygulamada gerçekleşen difüzyonların çoğu kararsız yayınma ile gerçekleşir. Katı içerisinde yayınan atomların birikmesi veya eksilmesi sonucunda, belirli bir noktadaki yayınma akısı ve konsantrasyon gradyanı zamana bağlı olarak değişir. Üç farklı yayınma süresi için konsantrasyon grafiğinin değişimi şematik olarak Şekil 2.12.a.'da gösterilmiştir.

Difüzyon mesafesinin hesaplanması için II. Fick kanunu kullanılmaktadır. II.Fick kanunu atomların, dinamik veya durağan olmayan hallerini tanımlamaktadır.

$$\frac{dc}{dt} = D * \left(\frac{d^2c}{dx^2}\right) \quad (2-5)$$

denklemlle ifade edilir ve D sabit kaldıkça değişik şartlarda aynı konsantrasyon profili elde edilebilir. Bu özellik, belirli bir ısı işlemin uygulaması için gerekli zaman üzerine sıcaklığın etkisini belirlemeyi sağlar (Ünal, 2008). Kararsız yayınımlarda, difüzyonun mesafeye göre değişimi şekil 2.12.b.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Difüzyon konsantrasyonunun mesafeye göre değişimi, a) Farklı difüzyon süreleri için, b) Herhangi bir x mesafesindeki değişimi

FickII. Yasası atomların dinamik veya durağan olmayan hallerini tanımlamaktadır. $dc/dt = D (d^2c/dx^2)$ denklemlle ifade edilir ve D sabit kaldıkça değişik şartlarda aynı

konsantrasyon profili elde edilebilir. Bu özellik, belirli bir ısıt işlemin uygulaması için gerekli zaman üzerine sıcaklığın etkisini belirlemeyi sağlar. Fick'in II. Yasası, Fick'in I. yasasının zamana göre türevidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2-6)$$

C_x = t zaman sonra orijinal yüzeyden bir x mesafesinde 2. malzemede A atomunun konsantrasyonudur

C_0 = 1. ve 2. malzemedeki A atomunun ortalama konsantrasyonudur

C_s = 1. malzemedeki A atomunun konsantrasyonudur. Borlanan malzemenin yüzeyindeki bor miktarıdır

D = 2. malzemede A atomunun difüzyon katsayısıdır (cm^2/sn)

x = Difüzyon mesafesi (borür tabaka kalınlığı, cm)

t = Borlama süresi (sn)

erf: gauss hata fonksiyonudur

Denklemler düzenlendiğin de borlanma ortam konsantrasyonunun mesafeye ve zamana göre değişim ifadesi erf hata fonksiyonuna bağlı olarak eşitlik (2-7) de verilmiştir.

$$C(x, t) = C_s \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2-7)$$

Erf hata fonksiyonunun değişimi ve erf hata fonksiyonunun difüzyon parametresine göre hesaplanan değerleri Ek 2.a ve b' de verilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Yöntem

AISI 1018 düşük karbonlu çelik, hedef malzeme olarak seçilmiştir. Bu çelik tipinin seçilmesindeki en büyük etken, çelik alaşımının içinde bulunan karbon miktarıdır. AISI 1018 çeliğinin yapısında bulunan katkı atomları, üretilen çeliğe iyi bir tokluk, dayanıklılık ve süneklik dengesi sunar. Kolay işlenebilirliği, karmaşık veya küçük parçaların üretiminde kullanımının nispeten ucuz olmasını sağlar. Örnek ürün kullanımları arasında zincir dişlisi grupları, miller, pimler, çubuklar ve bağlantı elemanları bulunur. Eksen, conta ve cıvata gibi tüketim mallarında da AISI 1018 çelik kullanılır. Ağırlıkça yüzde bileşimi, Çizelge 3.1.'de ve bazı mekanik özellikleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. AISI 1018 çeliğinin kimyasal bileşimi (ağ. %) (URL-1)

Element	İçerik
Karbon, C	%0.14 – 0.20
Mangan, Mn	%0.60 – 0.90
Fosfor, P	%≤ 0.040
Kükürt, S	%≤ 0.050
Demir, Fe	%98.81 – 99.26

Çizelge 3.2. AISI 1018 çeliğinin Mekanik özellikleri (URL-1)

Mekanik özellikler	Metrik
Yoğunluk	7.87gr/cc
Sertlik, Brinell	126
Sertlik, Knoop (Brinell sertliğinden dönüştürülmüş)	145
Sertlik, Rockwell B (Brinell sertliğinden dönüştürülmüş)	71
Sertlik, Vickers (Brinell sertliğinden dönüştürülmüş)	131
Gerilme direnci, en yüksek	440 MPa
Çekme Mukavemeti	370 MPa

3.2. Çeliklerde Alaşım Elementlerin Çeliğin Özelliklerine etkileri

Demir esaslı çelik alaşımlar, yapılarında ağ. %0.2'den az miktarda karbon içeren çelikler düşük karbonlu çelikler olarak adlandırılır. Bunlar yumuşak çelikler olup işlenmesi kolaydır, ısıl işlemle sertleştirilemezler.

AISI 1018 hafif / düşük karbonlu çeliğin yapısında bulunan, alaşım katkı metalleri ve çeliğin özelliğine etkileri şunlardır.

Karbon (C): Bu düşük karbon içeriği (ağ. %0.14 – 0.20), kolayca şekillendirilip işlenebilen yumuşak bir çelik üretimine olanak sağlar. Diğer taraftan bakıldığında ise karbon miktarı yükseldikçe çeliğin sünekliği, dövülebilirliği ve kaynak edilebilirliğinin azaldığı gözlenmiştir. Isıl işlemin ise çatlama eğilimini artırdığı saptanmıştır. Genel olarak çelik içindeki C elementi:

- Aşınma direncini artırır
- Sünekliği ve tokluğu düşürür
- Kaynaklanabilirliği düşürür

Manganez (Mn): Çelik alaşımı içinde ağ. % 0.6 – 0.9 oranında bulunur. Çeliğin yapısına dışardan manganez katkılanması;

- Sertliğin artmasına yardımcı olur
- MnS oluşturarak kükürdün neden olduğu gevrekliği azaltır
- Yüksek miktarlarda ilave edildiğinde aşınma direnci yüksek östenitik çelik yapar
- Çeliğin talaşlı imalat kabiliyetini artırır
- Kaynaklanabilir özelliğini azaltır

Fosfor (P): Düşük karbonlu çeliklere mukavemeti ve sertliği arttırmak için ilave edilebilir.

- Birçok çelikte kirlilik (empürite) olarak kabul edilir.
- Korozyon direncini artırır.
- Talaşlı imalat kabiliyetini artırır.
- Sünekliği ve tokluğu ciddi seviyelerde düşürür.

- Temper gevrekliğini tetikler, kırılabilirliği artırır.
- Yüksek miktarda ise, özellikle dökme demirlerde arzu edilmeyen Fe_3P bileşimini oluşturur.

Kükürt (S): Bazı işlenebilir çelikler içerisinde ağırlık % 0.08 - 0.15 kadar kükürt içerir.

- Birçok çelikte kirlilik olarak kabul edilir.
- Gevrekliğe neden olur. Sünekliği ve darbe direncini düşürür.
- Mangane ile bulunduğu işlenebilirliği artırır.

Bor (B): Demir-çelik ürünlerine bor katkısı, işlenebilirliği ve şekillenebilirliği azaltmadan sertliği artırır. Bunun dışında:

- Diğer elementlerin sertleşme kabiliyetini artırmasına yardımcı olur.
- Yüzey aşınma ve korozyon direncini artırır.
- Metal alaşımların, ergime derecesini artırır.
- Yüzey sürtünmesini azaltır.
- Nötronları geçirimsizliği sayesinde, nükleer reaktörler için kullanılan çeliklere ilave edilir.

Kalıntı elementler: Çelik üretiminde tamamen giderilemeyen safsızlıklardır. Bu elementlerin en sık karşılaşılanları, **O, H, Sb, As ve Sn**'dir.

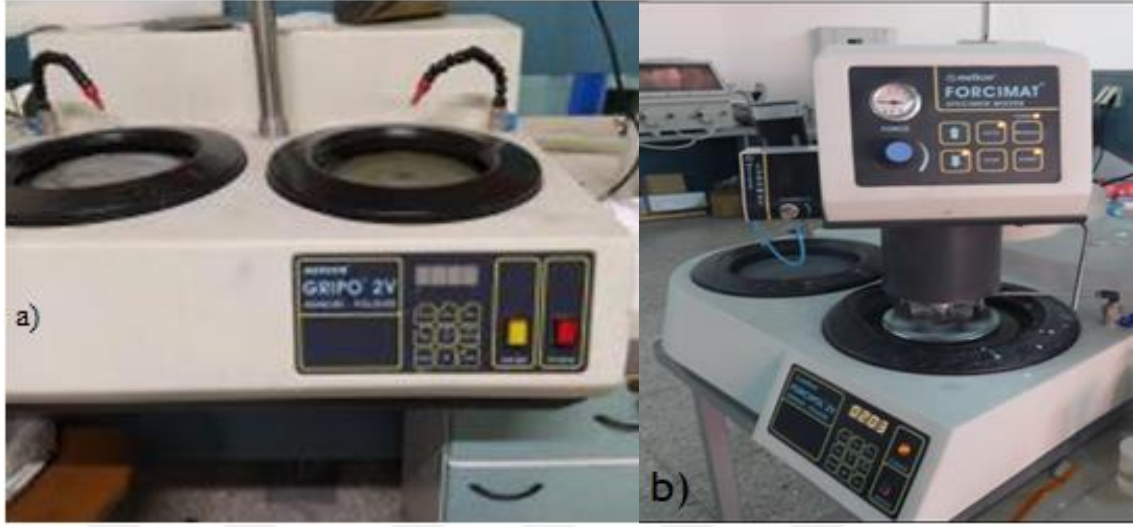
3.3. Hedef Metallerinin Hazırlanması ve Borlama İşlemi

AISI 1018 düşük karbonlu çeliğin silindirik tipli numunelerinden, farklı uygulamalarda kullanılmak üzere, çapları, $d_1 = 20$ mm ve $d_2 = 40$ mm olan çelik numuneden 6mm kalınlığında dilimlenerek kaplamalarda kullanılmak üzere toplam 26 adet hedef metali elde edildi. Dilimleme işlemi sanayiye torna cihazı ile elde edilmiştir. Kullanılan çelikler ve hedef metal örnekleri, Şekil 3.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. a) Silindir tipi çelikler, b) Dilimlenmiş hedef metaller, c) Yüzeyin 1200 mesh zımpara ile parlatılmış hali, d) Yüzeyin 2000 mesh zımpara ile parlatılmış hali

Elde edilen hedef metaller, kaplama yapılacak yüzeyleri pürüzsüz hale getirmek için yüzey parlatma işlemine tabi tutuldu. Numunelerin parlatma işlemleri, araştırma laboratuvarımızda (EL-B2-27) bulunan Metkon Gripo 2V Grinder-Poliser cihazı ile yüzey pürüzleri istediğimiz pürüzsüzlüğe ulaşıncaya kadar farklı tanecik boyutlu (120, 400, 800, 1200 ve 2000 mesh) zımpara kullanılmıştır. Cihaz Şekil 3.2.'de gösterilmiştir. Hedef metallerin zımparalama işleminin her kademesinde tanecik boyutu büyükten küçüğe doğru gidilmiştir. Zımparalama esnasında hedef metali yüzeyinin ısınmasını önlemek ve yüzeyinden kopan parçaların ortamdan uzaklaştırılması için tabla yüzeyine sürekli su tatbik edildi. Bütün aşındırma ve parlatma aşamalarında çarkın devir hızı 300 devir/dk olarak sabitlendi. Hedef metallerin, yüzey pürüzsüzlüğü yeterli seviyeye ulaştıktan sonra yüzeyi etil alkol ile temizlendi ve sıcak hava ile kurutularak ısıl işlem için hazır hale getirildi.



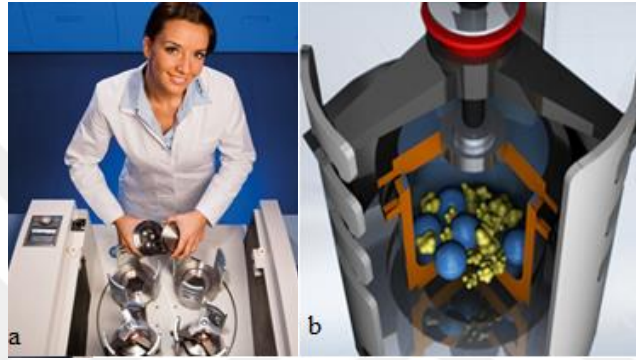
Şekil 3.2. a) Metkon GriPO 2V Grinder-Polisher Aşındırma ve Parlatma Cihazı, b) Metkon Forcipol 2V Grinder-Polisher ve Metkon Forcimat Specimen Mover ilaveli otomatik aşındırma ve parlatma cihazı

Isıl işlem için, hedef metallerin kutulama şartlarını dikkate alarak, özel olarak 1.25 mm kalınlıkta krom çeliğinden, 5.5x6.5x5 cm boyutlarında ve üst kapak olarak 6x7 cm boyutlu olan 2 kutu hazırlandı.

Kaplamada kullanacağımız öğütölmüş toz karışımları için gerekli tozlar; demir tozu (200 mesh, 99+% saflık, tanecik boyutu <60 μm , Alfa Aesar, Germany) ve bor tozu olarak ticari Ekabor-2 kullanıldı (tanecik boyutu <850 μm). Demir-bor toz karışımı olarak 1:2 oranında karıştırıldı. Yaptığımız kaplamalarda, öğütölmüş demir-bor tozu, öğütölmüş Ekabor-2 tozu ve ticari Ekabor-2 tozu kullanılarak her bir hedef metali yüzeyi üzerinde borür tabakaları elde edildi.

Demir-bor toz karışımlarının ve Ekabor-2 tozunun öğütülmesi işlemi bölümümüz araştırma laboratuvarında bulunan PM400 bilyeli öğütme cihazı ile istenilen oranlarda ve yeterli miktarda üretildi. Öğütme işlemi için 125 ml'lik çelik potalarda, toplam ağırlığı 370 g olan 50 adet çelik bilye kullanıldı. Her bir öğütme işleminde, toplamda 24 g demir-bor toz karışımı kullanılmıştır. Öğütme işlemi sırasında soğuk kaynaklamayı engellemek için toz karışımı üzerine 0.2 gram stearik asit eklenmiştir.

PM 400 yüksek enerjili bilyeli öğütme cihazı, dört hazneli olup, haznelerin bağlı olduğu eksen saat yönünde hareket ederken, hazneler ters yönde hareket etmektedirler. Bu hareketin yönü belirli bir süre sonra duraklatılarak belirlenen bekleme süresinin sonunda ilk hareket yönünün ters istikametinde hareketini tekrarlayarak devam eder ve başta belirlenen zaman sonunda otomatik olarak durur. PM 400 bilyeli öğütme cihazı, Şekil 3.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. a) PM 400 Yüksek enerjili bilyeli öğütme cihazının üstten görünüşü, b) Öğütme potasının istasyona sabitlenmesi ve pota kesit görüntüsü

Cihazın büyük eksen çapı 30cm olup, küçük hazneler bu dönel tablanın üzerine ayrı ayrı dönebilecek şekilde yerleştirilmiştir. Potalar bu istasyonların üzerine sıkıca vidalama ile sabitlenir. Potalar eşit ağırlıkta ve simetrik olarak yerleştirilir. Öğütme işlemi sırasında iki pota kullanılmıştır.

PM 400 yüksek enerjili bilyeli öğütme cihazında öğütme işlemi, bilyelerin çarpışması ve sürtünmesi ile sağlanır. Öğütme işleminde, cihaz üzerinde belirlediğimiz çalışma parametreler şunlardır;

- Toplam süre: 180 Dakika
- Devir sayısı: 250 devir/ dakika
- Çalışma aralığı: 1 Dakika (50 sn dönme 10 bekleme)
- Duraklama süresi: 10 sn

Buradan elde ettiğimiz tozların tanecik boyutu, Kimya Bölümü araştırma laboratuvarında test edildi ve toz karışımının tanecik boyutları $<100\text{ }\mu\text{m}$ olarak tespit edildi.

Kutulama işlemi öncesi kaplama yapılacak hedef metali numunelerin son yüzey temizliği, etil alkol ile yapılarak ısıtılma işlemi ile kurutulduktan sonra borlayıcı ortam olan kutu içerisine dikkatli ve orantılı olarak yerleştirildi (bkz. Şekil 2.7.).

Kutulama işleminde, kutunun tabanına 10mm kalınlığında öğütülmüş demir-bor karışımı, öğütülmüş Ekabor-2 ve sadece Ekabor-2 toz karışımı yerleştirildi. Bunun üzerine kaplama yapılacak hedef metallerin yüzeylerine, birbirlerine temas etmeyecek şekilde pürüzsüz yüzeyi üste getirilerek dikkatlice yerleştirildi. Bu numunelerin üst kısmı yaklaşık 30mm kalınlığında alta yerleştirilen aynı tozdan doldurularak yüzeyi düzleştirilir. Bunun üzerine 10 mm kalınlığında ekrit tabakası doldurulur ve kutu kapağı serbest olarak konularak fırınlama işlemine hazırlanır.

Borlama işlemi, bölümümüz araştırma laboratuvarında bulunan PROTHERM marka elektrikle ısıtılan ve $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ısıtmaya elverişli kare fırın ile gerçekleştirildi. Fırın, Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. PROTHERM marka kare fırın

Fırınlama için hazırlanan kutu fırının orta kısmına yerleştirilip kapağı kapatıldı (Kutuların boyutlarından dolayı tabanda yükseltici kullanıldı) ve istenilen kontrol değerleri dijital olarak girildi. Bunlar;

- Oda sıcaklığından (20 °C) istenilen sıcaklığa (950 °C) ulaşma süresi 2 saat olarak ayarlandı.
- Kaplama ortam sıcaklığı, 950 °C’de bekleme süreleri ayarlandı (2h, 4h, 6h ve 8h).

Bekleme süresi sonunda fırının ısıtması kesilerek, fırın sıcaklığının oda sıcaklığına inmesi için 14-16 saat, yavaş soğumaya bırakıldı. süre sonunda fırın açılıp, kutu dışarıya çıkarılarak içinden borlanmış hedef metaller dışarıya çıkarılıp kaplama tabakasına zarar vermeden basit yüzey temizliği yapıldı. Elde edilen borür tabakasının niteliklerinin incelenmesi için, kesme, kalıplama, parlatma ve hedef metalin yüzeyindeki tabakaların tanımlanabilmesi için dağlama işlemleri uygulanmıştır.

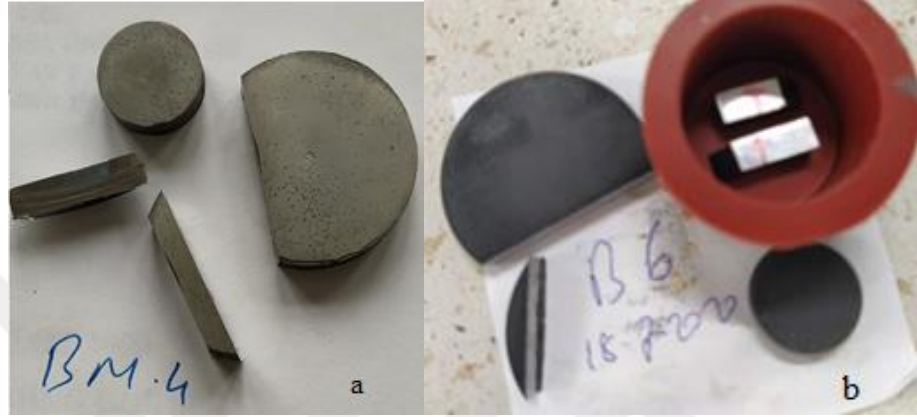
3.4. Borür Tabakalarının Mikroyapı İncelemeleri

Hedef metallerinin yüzeyinde oluşan borür tabakalarının mikro yapılarını incelemek üzere, hedef metaller birtakım ön işlemlerden geçirildi. Bunlar;

- Kesme, Dilimleme,
- Kalıplama,
- Parlatma
- Dağlama.

Elde edilen borür tabakaların aşınma, SEM ve XRD incelemeleri için hedef metallerin yanal yüzeyinden yaklaşık 4mm kalınlığında bir dilim alındı. Kesme ve dilimleme işlemlerinde, araştırma laboratuvarımızda bulunan “Metkon Micracut 200” hassas kesme cihazı kullanıldı. İstenilen boyutlarda dilimlenen hedef metaller, Şekil 3.5’de ve hassas kesme cihazı, Şekil 3.6’da gösterilmiştir. Dilimlenmiş hedef metallerin, test ve analiz işlemlerinde rahat kullanımı için özel epoksi kalıplaması yapıldı. Epoksi kalıplamada

kullanılan toz ve sıvıdan (AcryFix toz ve AcryFix sıvı),2 birim hacim toz ve 1 birim hacim sıvı bir kap içerisinde 30sn süre ile iyice karıştırıldı. Elde edilen solüsyon, hedef metalin yerleştirildiği kalıplara dökülerek solüsyonun katılaşması beklendi. Kalıptan çıkarılan malzemelerin parlatma işlemleri sırasıyla 120, 400, 800, 1200, 2000, 2500 ve 4000 mesh tanecik büyüklüğüne sahip zımparalar ile gerçekleştirildi.



Şekil 3.5. a) Numunelerin dilimlenmesi, b) Numunelerin kalıplanması



Şekil 3.6. MİKROCUT-200 hassas kesme cihazı

Özellikle 2500 ve 4000 mesh tanecik büyüklüğündeki zımparalama işlemi, Şekil 3.2b’de verilen METCON Forcipol 2V Grinder-Polisher ve METKON Forcimat Specimen Mover” ilaveli otomatik aşındırma ve parlatma cihazında, 5N’luk yük altında ve 5

dakikalık süre ile uygulandı. Son parlatma aşamasında 1µm tane boyutlu alümina süspansiyonu kullanıldı. (Solüsyon oranı:200 gr alumina toz/1 litre saf su).

Parlatma işlemi sonrasında, alaşımların yüzeylerinin ayna yapıya sahip olması sebebiyle mikroskobun ışığı, hedef metalin yüzeyinden yansıtılır ve metal yüzeyinde oluşan alaşımların mikroyapıları yeterince ayırt edilemez hale gelir. Metal yüzeyinde oluşan alaşımlardan net görüntü alınabilmesi için, asidik ortamda dağlanması gerekmektedir. Çuhalama işlemi tamamlanan hedef metallerinin yüzeyleri etil alkol ile temizlenip kurutulduktan sonra dağlama işlemi uygulandı.

Dağlama işlemi için nitrik asit ve etil alkolden oluşan dağlama karışımı hazırlandı (%2 HNO₃ + %98 etil alkolden). Yüzey temizlikleri tamamlanan hedef metaller 30 saniye süre ile dağlayıcıya daldırıldı ve su ile yıkandıktan sonra etil alkol banyosu uygulandı. urutulan hedef metaller, yüzeyinden görüntü almaya hazır hale getirildi.

Numunelerin yüzey görüntü incelemeleri, araştırma laboratuvarımızda bulunan, bilgisayar kontrollü SHIMADZU model DUH-W201S optik mikroskop ile yapıldı, cihaz Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. SHIMADZU model DUH-W201S optik mikroskop

Kutu borlama yöntemiyle 950 °C’de ve farklı sürelerde (2h, 4h, 6h ve 8h) borlama işlemi gerçekleştirilen, 12 adet hedef metale ait SEM ve XRD ölçümleri Bülent Ecevit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde gerçekleştirildi.

Yüzey aşınma ölçümleri, Çorum Hitit Üniversitesi Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezi (HÜBTUAM) laboratuvarında bulunan cihazlarla ölçüldü.

Elde ettiğimiz borür kaplamaların mikro sertlik ve korozyon dayanımı ölçümleri Üniversitemiz kampüs alanı ve Gaziosmanpaşa Üniversitesi Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarı’nda bulunan UMT-2MV (UNİVERSAL MİCRO TRIBOMETER) marka yüksek sıcaklık mikro çentme cihazı ile yapıldı. Cihaz, Şekil 3.13’de gösterilmiştir.

3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

İnsan gözünün büyüklükleri algılaması mm boyutundadır, bundan küçük objeleri ve detayları görebilmesi oldukça zordur. Bu sebeple mikrobik yapıların ve daha küçük boyutların incelenmesi mercek sistemleri ve buna bağlı olarak geliştirilen optik cihazlar kullanılır. Atomik boyutların incelenebilmesi için elektro-optik prensiplere dayanarak tasarlanmış SEM (Scanning Electron Microscope) cihazından yararlanılır. Taramalı elektron mikroskobu ile yüksek büyütmelerde ve yüksek çözünürlüklü görüntü alınabilir. Yüksek çözünürlükte ve odak derinliğine sahip olan SEM ile alınan görüntü verilerinin incelenmesi sonucunda malzemelerin içyapıları ve morfolojik özellikleri hakkında fikir beyan edebiliriz. SEM’de yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronlar, malzeme üzerine odaklanır. Daha sonra elektron ve numune atomları arasında oluşan etkileşimle üretilen elektronlar uygun algılayıcılarda toplanır ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktararak görüntü elde edilir.

Bu çalışmada, üretilen borür tabakaların mikroyapılarını incelemek ve malzeme yüzeyinde oluşan fazların içeriklerini tespit edebilmek için Bülent Ecevit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde bulunan QUANTA 450 Field Emission Gun (FEG) SEM cihazı kullanıldı. Cihaz Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

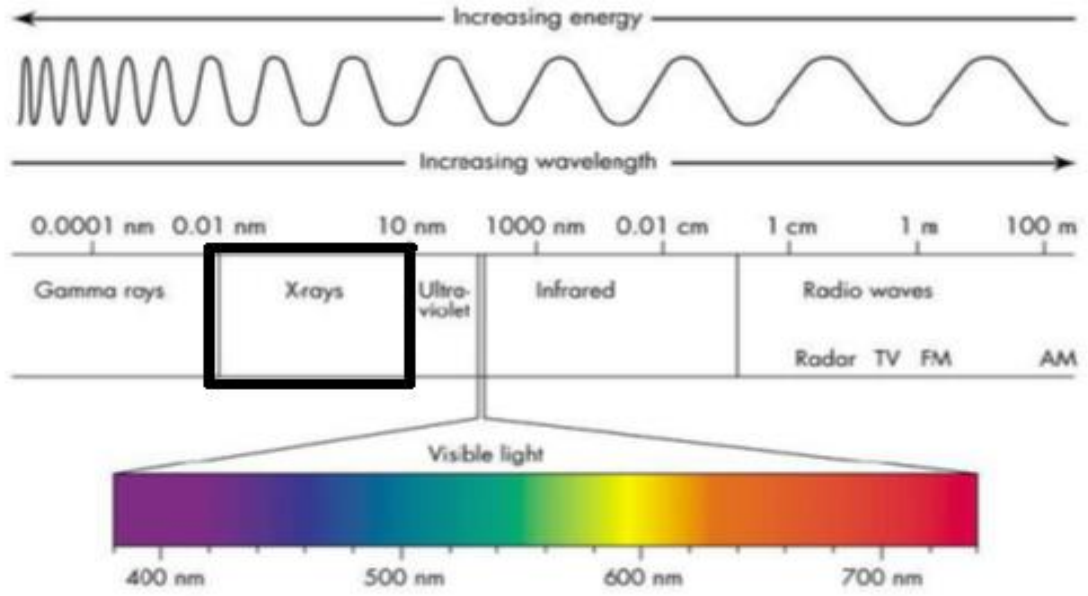


Şekil 3.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı

3.6. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi

Günümüz görüntüleme yöntemlerinin temelini oluşturan özellikle fen ve tıp bilimlerinde çıplak gözle göremediğimiz, mikrobik ve atomik yapıların incelenmesinde kullanılan bir cihazdır. XRD cihazı ile herhangi bir mikro yapının incelenmesi, X-ışını dalgalarının maddenin kristal yapısını oluşturan düzlemlerle etkileşmesiyle oluşan kırınım desenlerinin incelenmesi prensibine dayanır. Kullanılan ışınların dalga boyları elektromagnetik spektrumda görüldüğü gibi $0.1\text{\AA} < \lambda < 100\text{\AA}$ aralığındadır ve bu büyüklük atomların kafes parametreleri boyutundadır.

X-ışınları, hızlandırılan elektronların metal hedefteki atomlarla çarpışarak yavaşlamasıyla (ivmeli hareket yapması) veya bu çarpışmalarda atomların iç yörüngelerindeki elektronların geçişleriyle oluşan kısa dalga boylu elektromanyetik dalgalardır. Şekil 3.9’da elektro-magnetik spektrum gösterilmiştir. X-ışınları, az girici (dalga boyu büyük) ve çok girici (dalga boyu küçük) olmak üzere ikiye ayrılabilirler. Kırınımında kullanılan (Kristalografiğe) X-ışınlarının dalga boyları yaklaşık 0,5 ile 2,5 Å’dür. (Ergen, 2014). Radyoloji de kullanılan X- ışınlarının dalga boyları ise 0,5-1 Å arasındadır.



Şekil 3.9. Elektro-magnetik dalga spektrumu

XRD analizleri için numune üzerine λ dalga boyunda ince bir monoklinik X-ışını dalgası düşürülür. Kristaller belli bir tarama hızı ile döndürüldüğünde Bragg kanununa uygun olarak verilen açı ve şiddet değerleri bir grafiğe dökülerek 2θ açılarına karşılık şiddet pikleri elde edilir. Bragg denklemi kullanılarak kristal yapının örgü parametreleri tespit edilir, Bragg yasası ve denklemi Ek 3’de gösterilmiştir. Bu pikleri sağlayan (hkl) düzlemleri belirlenerek yapı analizi tespitleri yapılır. Böylece X-ışını dalgalarının oluşturduğu kırınım desenleri incelenerek kristalin yapısı hakkında bilgi sağlanabilmektedir.

X-ışınları kırınımı tekniği ile malzeme hakkında aşağıda belirtilen tespitler yapılmaktadır;

- İçerdiği fazların belirlenmesi,
- Nicel faz analizleri,
- Tanecik boyutu ve yöneliminin belirlenmesi,
- Örgü sabitlerinin tespit edilmesi,
- Kimyasal kompozisyonun belirlenmesi,
- Sıcaklık, basınç, vs. gibi etkilere bağlı faz değişiklerinin tespit edilmesi gibi birçok bilgi edinilebilmektedir.

Bu çalışmada, üretilen borür tabakaların kristal yapı analizleri Bülent Ecevit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Pixcel marka X-ışını kırınımı (XRD) cihazı ile yapıldı, cihaz Şekil 3.10'da gösterilmiştir.. Alaşımların XRD analizlerinde dalga boyu $\lambda=1,54056\text{\AA}$ olan Cu-K α radyasyonu kullanılmış olup tüm ölçümler için difraktometrenin tarama hızı 6°/dk olarak ayarlandı. Alaşımların oda sıcaklığında alınan X-ışını kırınım desenlerinden yapı içerisinde oluşan fazlar belirlendi.

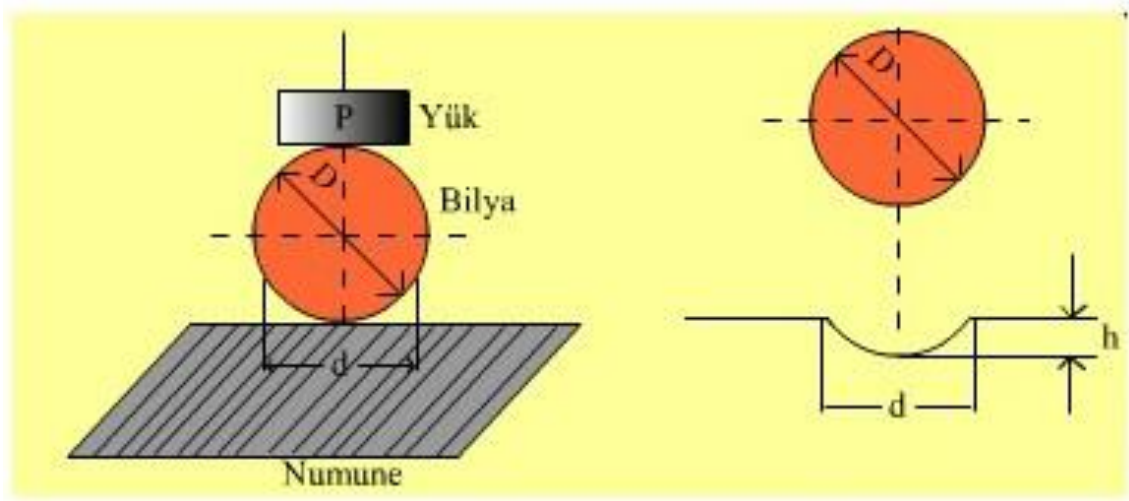


Şekil 3.10. X-Işını kırınım (XRD) cihazı

3.7. Mekanik Karakterizasyon

20. yüzyılın başlarından itibaren metallerin, alaşımların, seramiklerin ve kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede en çok tercih edilen yöntemlerden biri yüzey sertlik ölçümleridir. Genel anlamda sertlik, malzemelerin uygulanan bir kuvvet karşısında plastik deformasyona karşı direncinin bir ölçüsü olarak tanımlanır. Çentme testleri, sertlik ölçümleri için kullanılan standart metotlardan birisidir. İlk kullanımından günümüze farklı tasarımlar ve farklı yöntemler kullanılmıştır.

1900 Yılında Brinell sertlik ölçme yöntemini geliştirmiş ve günümüzde yaygın olarak kullanılan statik sertlik ölçme metotlarının atası olarak kabul edilir. Brinell sertlik ölçme yöntemi prensibi; Küresel bir çelik bilyenin üzerine sabit bir kuvvet bilye üzerinden uygulanarak ölçüm yapılacak numune yüzeyi üzerinde bilyenin iz bırakması sağlanır belli bir süre sonra yük kaldırılarak bilyenin bıraktığı kalıcı deformasyonun izinin iki farklı doğrultuda alınan çap izleri ile geliştirilen ölçüm yöntemidir. Brinell sertlik ölçümünde kullanılan bilye çapları: 1mm, 2.5mm, 5mm ve 10mm lik bilyeler farklı malzemeler için kullanılmaktadır. Brinell sertlik ölçüm düzeneği, Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Brinell sertlik ölçme yöntemi, Sertlik değerinin hesaplanmasında kullanılan parametrelerin gösterimi

Brinell sertlik Denklemi(ifadesi);

$$HBS(N/mm^2) = 0.102 * \frac{F}{\pi D \left(\frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \right)} \quad (3-1)$$

Burada:

D Bilyenin çapı (mm)

d Bilye izinin yüzeyden ölçülen çapı (mm) (Ölçümler 2 farklı doğrultuda 90° açı ile alınır ve iki ölçümün ortalamasıdır.)

F Uygulanan kuvvet (Yük) (Newton)

π Sabit (3.14)

$0.102 = 1/g = 1 / 9.80665$ (g Gravitasyon sabiti)

Bilye izinin derinliği $h = \left(\frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \right)$ ile hesaplanır.

Sonraki yıllarda, Rockwell sertlik ölçme yöntemi ve Vickers sertlik ölçme yöntemleri geliştirilmiştir. Vickers sertlik ölçme yöntemi aynı prensibe göre yapılmaktadır; Yatay konumdaki numune yüzeyine sabit bir kuvvet ile çentici uç üzerinden uygulanır (5-30 sn) sonra kuvvet ve çentici uç numune yüzeyinden kaldırılır. Çentici ucun numune yüzeyinde bıraktığı kalıcı deformasyon izi üzerinden alınan ölçümler doğrultusunda alınan değerler ile Hardness Vickers değeri, Denklem (3-2) ye göre hesaplanır.

Vickers sertlik ölçme yöntemi bilgisayar kontrollü gerçekleştirildiğinde, uygulanan yükte birlikte çentici uç numune yüzeyinden aşağı yönlü batma devam eder, maksimum yükte birlikte (P_{max}) uç ta numune üzerinde maksimum derinliğe (h_{max}) ulaşır. Bekleme süresi sonunda uç üzerine uygulanan kuvvet kaldırıldıktan sonra çentici uç numune yüzeyinden cihaz tarafından başlangıç konumuna geri çekilir, bu arada numune yüzeyinde oluşan batma izi elastik geri kazanımdan yukarıya hareket ederek (h_f)değerinde durur. Bizim numune yüzeyinden görüntüsünü alıp ölçüm yaptığımız değerler plastik deformasyon sonucu yüzeydeki kalıcı değerlerdir. Bilgisayar tarafından kayıt edilen P yük ve h girme derinlik değerleriyle, P -h eğrisi (Yüklem – boşalma) çizdirildiğinde, Şekil 3.12.c'ye benzer görüntüler elde edilir (Bhushan, 1998). Malzemelerin sertlik değeri aşağıdaki formülle karakterize edilir;

$$HV = 1.854 * \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

Burada;

HV ; Vickers sertlik değeri (kg / mm²)

P; uygulanan yük(kg)

A; uç tarafından açılan yüzeyin alanı(mm²) olarak ifade edilir. A'nın kullanılan ucun geometrisine bağlı olarak değişebileceği unutulmamalıdır. Şekil 3.12 b.'de gösterilmiştir.

$$1.854 = 2 \cdot \sin(136^\circ/2) \text{ sayısal sonuç değeridir.}$$

Derinlik duyarlı çentik testleri, özellikle çok küçük boyutlu malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede en çok kullanılan analiz yöntemlerinden biridir. Geleneksel çentik testiyle arasındaki farklardan en önemlisi DDÇ testinde malzeme ve çentici arasındaki kontak derinliğinin (h_c), test esnasında kaydedilen yükleme-boşaltma (P-h) eğrisinden doğrudan hesaplanabilmesidir (Pharr ve ark., 1992; Li & Bhushan, 2002). Şekil 3.12c'de, DDÇ testlerinde yüzeyde oluşan deformasyon ve elde edilen tipik bir (P-h) eğrisi verilmiştir. Şekilde verilen P-h eğrisinden, başta sertlik ve elastik modülü özelliği de karakterize edilebilir.

Oliver ve Pharr yöntemi, P-h eğrisinin analizinde birçok araştırmacı tarafından kabul gören yöntemlerden birisidir. Oliver ve Pharr (1992), Sneddon (1965)'un çalışmasını dikkate alarak malzemede çentik testi sırasında oluşan elastik geri kazanım ve işlem sertleşmesini de göz önünde bulundurarak bir analiz metodu geliştirmişlerdir. Oliver ve Pharr metodu, Sneddon (1965)'un elastik deformasyonlar için bulduğu güç yasasına benzer şekilde boşaltma eğrisinin fit edilmesiyle başlar (Şekil 3.12 c)'de gösterilmiştir).

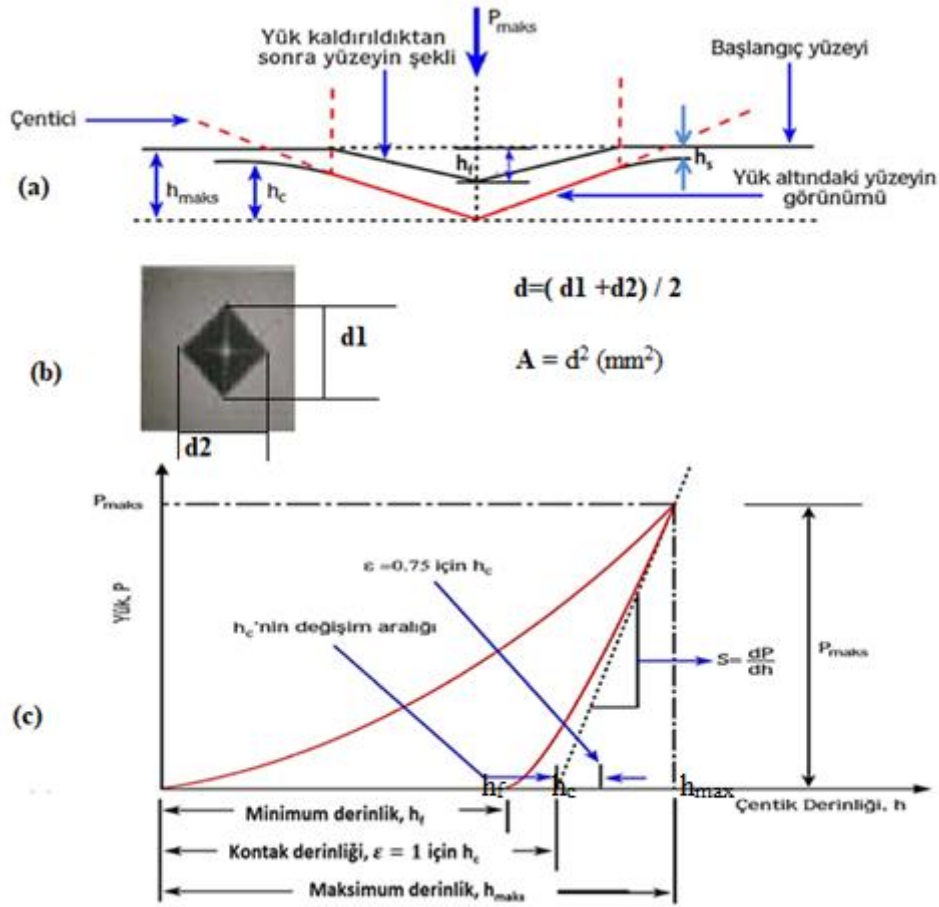
$$S = \frac{dP}{dH} \quad (3.3)$$

Burada şekil 3.13 de P_{max} , h_c ve h_{max} noktalarından oluşan üçgen üzerinden,

$$dH = h_{max} - h_c \text{ derinliği}$$

$$dP = P_{max} - 0 = P_{max} \text{ (N)}$$

S; ölçüm yapılan tabakanın elastik modülüdür (GPa).



Şekil 3.12. a) Çentiğin yanal kesiti b) Çentçinin yüzeyde oluşturduğu iz ve alanın ölçülmesi c) Oliver-Pharr metodunda kullanılan tipik bir P-h eğrisinin gösterimi

Tez çalışmamızda kutu borlama yöntemiyle elde ettiğimiz borür tabakaların mikro sertlik analizleri ve ısıtıl işlem görmemiş AISI 1018 çelik hedef metalinin mikro sertlik analizleri Gaziosmanpaşa Üniversitesi Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan UMT-2MV (Universal Micro Tribometer) marka yüksek sıcaklık mikro-çentme cihazı ile oda sıcaklığında ve 20 mm çapında aynı şartlarda ürettiğimiz mastır yüzeylerinde oluşturulan borür tabakaları üzerinden yapıldı, Şekil 3.13'de yüksek sıcaklık mikro-çentme cihazı gösterilmektedir. Borlanmış hedef metallerin mekanik analizleri oda sıcaklığında 1kg (10000mN) yük altında yükleme-boşaltma (Load-unload; LU) modunda alındı. Bu eğriler Oliver-Pharr (1992) metoduyla analiz edilerek numunelere ait sertlik, elastik modülü değerleri bilgisayar verileri üzerinden hesaplandı.



Şekil 3.13. UMT-2MV Yüksek sıcaklık mikro çentme cihazı

Büyük boyutlu (40mm) hedef metallere dilimleyip kalıpladığımız yüzey düzeltmesi, parlatması yapılan ve dağlanan, borlanmış hedef metallerin boyutları yüksek sıcaklık mikro-çentme cihazında ölçüme uygun olmadığından araştırma laboratuvarımızda mevcut olan “HIGH WOOD HWDM-3” cihazı ile çentici uç; 200 gram kuvvet altında 10 saniyelik bekleme süreleri ile her bir hedef metali yüzeylerinde oluşturulan borür fazları üzerinden 5 farklı ölçüm ile alınmıştır. Şekil 3.14’de HIGH WOOD HWDM-3” cihazı gösterilmektedir. Borür tabaka üzerinden alınan ardışık ölçümlerde iki iz arası uzaklık, çentici izinin genişliğinden en az 3 kat uzağından alınmıştır. Bu cihaz ile alınan ölçümlerde; P-h eğrisi elde etmeye uygun olmadığından yüzeyin sadece sertlik değerlerini tespit için kullanılmıştır.



Şekil 3.14. HIGH WOOD HWDM-3” Mikro çentme cihazı

3.8. Korozi Aşınma

Kutu borlama yöntemi ile 950 °C de farklı sürelerde borlanmış hedef matallerin yanıl yüzeyinden alınan 12 parça ile 13. metal olarak ısııl işlem görmemiş AISI 1018 çelikten kesilmiştir. Bu metal parçaların korrozif dayanımlarını belirlemek üzere doğal ortama gömüldü. Bunları kampüs alanında fazla kullanılmayan doğal ortama, zemin yüzeyinden 16-17 cm derinlikte ve birbirlerinden yaklaşık 20 cm uzaklıkta olacak şekilde toprağa gömüldü. Belirli zaman aralıklarında gömüldükleri ortamdan çıkarılarak zaman içindeki ağırlık değişimleri kayıt altına alınmıştır. Korozi dayanım için kullanılan hedef metal parçaları, Şekil 3.15 b.’de gösterilmiştir. Gömülen ortam alanı, Şekil 3.16’da gösterilmektedir. Korozi dayanım ölçümleri 7. ayın sonunda sonlandırıldı.



Şekil 3.15. a) Dilimlenen borlanmış mastır elemanı, b.) Korozyon ölçümlerinde kullanılan borlanmış hedef metal dilimi



Şekil 3.16. Koroziyon dayanım için numunelerin gömüldüğü doğal alan (TOGÜ Fen Edebiyat Fakültesi ön bahçesi)

3.9. Mekanik Aşınma ve Türleri

Aşınma, malzeme yüzeylerinden, fiziksel, kimyasal mekanik nedenlerle ufak parçacıkların ayrılması sonucu, arzu edilmeyen şekilde değişiklik olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir sistemi oluşturan sabit (veya hareketli) mekanik parçaların özellikle eklem yerlerinde, ortamla temas eden yanal yüzeylerinde zaman içerisinde meydana gelen kütle ve hacimsel değişimlerdir.

Alman Standart Enstitüsü 1953 yılında malzemelerin aşınması hakkında düzenlediği tanımlama “DIN 50320’ de aşınma; malzeme yüzeylerinden, mekanik nedenlerle ufak parçacıkların ayrılması sonucu, arzu edilmeyen şekilde değişiklik olarak tanımlanmaktadır”. DIN 50320 de yapılan bu tanıma göre; yüzeylerin talaş kaldırılarak işlenmesi, taşlanması, parlatılması veya makina parçalarının alıştırılması gibi işlemler aşınma olayı olarak kabul edilmemektedir. Bunun nedeni yüzeyde arzu edilen modifikasyonların istenilerek yapılmasıdır..

Aşınmayı etkileyen başlıca etkenler;

- Malzeme seçimi
- Pürüzlülük
- Sertlik
- Yüzey işlemleri
- Yağlama
- Çevre
- Zaman

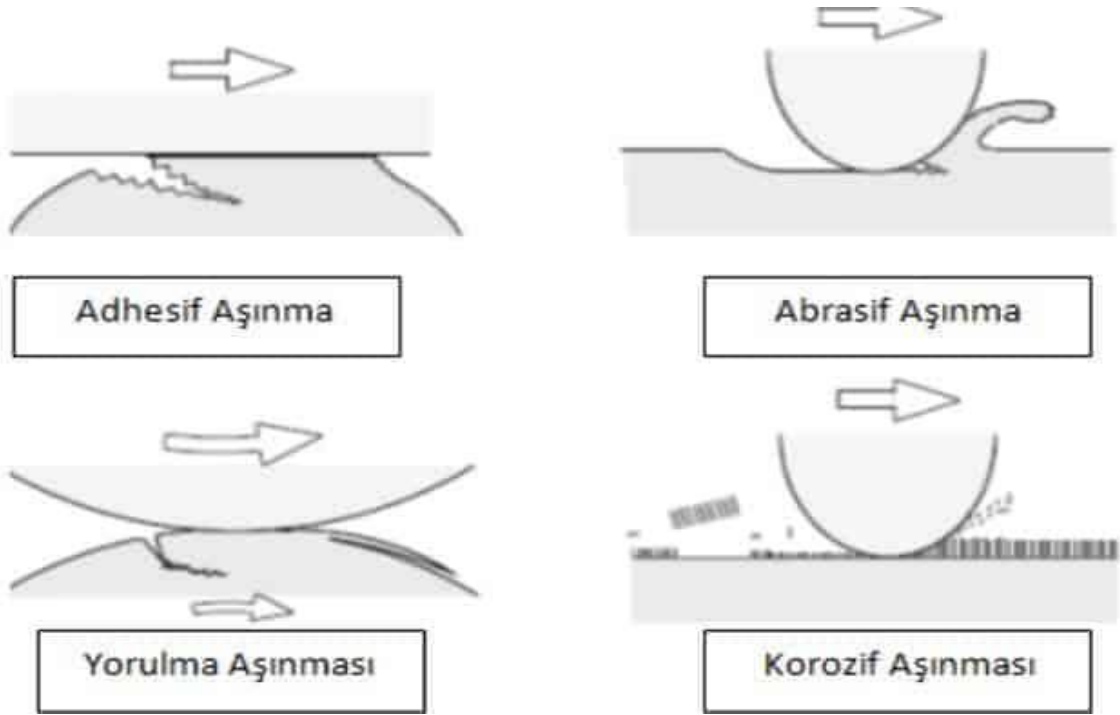
gibi faktörler etkilemektedir.

Temel aşınma çeşitleri 4 başlık altında aşınma tanımlanır. Şekil 3.17’de gösterilmiştir.

3.9.1. Yırtılma (Adhesif) Aşınma

Malzemelerin temas yüzeylerindeki yüksek mekanik gerilimlerin yüzeyde meydana getirdikleri çizilme veya yırtılmalardır. İki farklı malzemenin yüksek yükler ile temaslı mikro kaynak bölgelerinin oluşmasına sebep olan bir aşınma türüdür. Genellikle yüksek hız ve yüksek yüklerde görülür.

Adhesif aşınma; Malzeme sertliğine ve yük durumu gibi unsurlara bağlıdır.



Şekil 3.17. Temel aşınma türlerinin yüzeyde meydana getirdiği aşınmalar

3.9.2. Sürtünme (Abrasive) Aşınma

İki yüzeyin arasında sürtünmeden kaynaklanan fiziksel değişimlerdir. Etkileşme sonucunda malzemelerden kopmuş küçük sert parçalardan kaynaklanan aşınma türüdür. Bu sert parçalar yumuşak olan yüzeye gömülür ve karşı taraftaki yüzeyi aşındırır. Bizim çalışmalarımızda kullandığımız aşınma test yöntemi olup. Ölçümlerimizde, birim

sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı ($\Delta m / L$; mg/m) ile ifade edilerek özgül aşınma miktarları ile tanımlanmıştır.

Yüzey sürtünme aşınmasını (Abrasif) önlemek için;

- Yüzey sertleştirilmeli
- Makinalar her türlü talaştan ve pislikten temizlenmelidir.
- Periyodik olarak bakım uygulanmalıdır
- Gerekli durumlarda yüzeyler arasında sürtünmeyi azaltacak sıvı uygulanmalı
- Belirli periyotlarla temaslı yüzey elemanlarının değiştirilmesi gerekir.

Numunelerimizin aşınma testleri Çorum Hitit Üniversitesi Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarında bulunan cihazla ölçülmüştür, cihazın marka modeli; “Marka / Model: NANOVEA / TRIBOMETER-MİCRO” Aşınma Test Cihazı, sabit ve döner malzemelerin aşınma ve sürtünmeye karşı dayanıklılıklarının tespit edilmesi için kullanılmaktadır. Cihaz şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. NANOVEA / TRIBOMETER-MİCRO” Aşınma test cihazı

3.9.3. Yorulma Aşınması

Çoğunlukla dinamik zorlanma sonunda temas yüzeyinin altında veya yakınında iç yapının yorulması, zorlanmaya ve zamana bağlı yüzeysel çatlama ve yüzeyden küçük parçaların kopması ile gerçekleşen aşınma türüdür. Bu aşınma türünde doğal sertlik önemli bir husustur. Yorulma aşınması yumuşak malzemelerde görülmemektedir. Yorulma aşınmasının önlenmesinde etkili yöntemlerden biri yüzey sertleştirilmesidir.

3.9.4. Korozi Aşınma

Demir esaslı malzemelerin yüzeylerinin kimyasal bir madde ile teması sonucunda kimyasal reaksiyona girerek malzemenin dış yüzeyinde bir oksit tabakası oluşmasıdır. Demir esaslı malzemelerin dış yüzeylerinde oksit tabakası oluşması için kimyasal maddeye ihtiyaç duymaz, Atmosfer ile temas eden demir esaslı malzemeler atmosferde bulunan oksijen gazı ile reaksiyona girerek dış yüzeyinde demir oksit tabakası oluşturabilir. Oluşan bu oksit tabakası demir esaslı malzemenin üç boyutlu kristal parametrelerinde aşırı genleşmeden dolayı bir alt tabakadan ayrılmasına ve parçalanıp dökülmesine sebebiyet verir. Malzeme aynı ortamda kaldığı süre içinde oksitlenme sürekli devam eder. Malzeme yüzeyindeki aşınmada buna paralel olarak devam eder. Bu aşınmalar sonucunda malzeme içinde bulunduğu ortamdaki yükünü taşıyamaz hale gelir. Bu sonuç malzemelerin kullanım ömürlerini kısaltır.

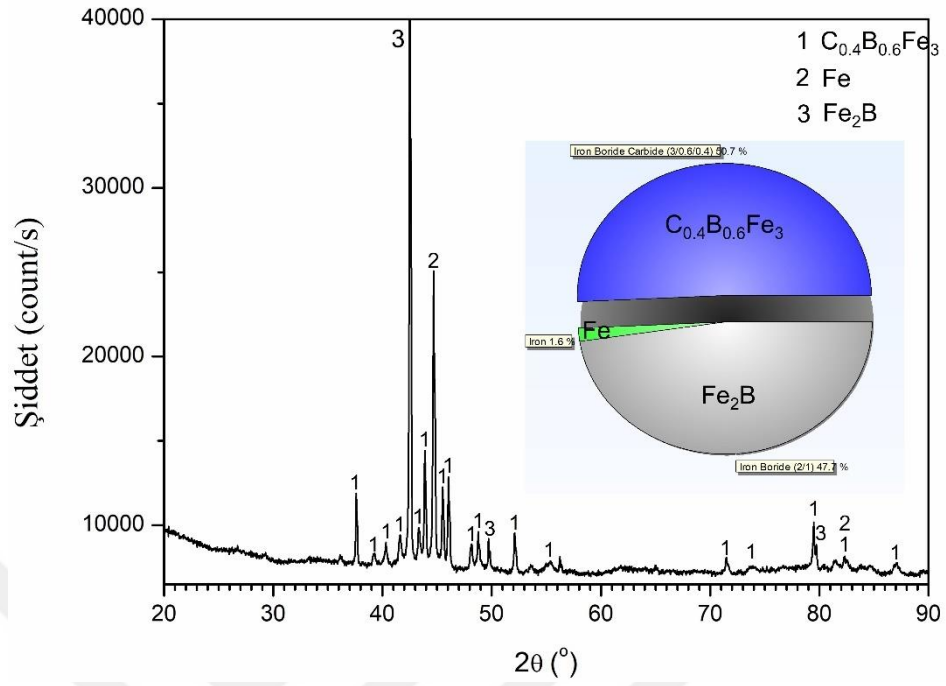
Demir esaslı malzemelerin doğru ve verimli kullanabilmek için zamana veya kullanım için belirlenen parametrelere göre periyodik bakımlarının yapılması ve belirlenen standartların altına düşen malzemenin yenisi ile değiştirilmesi gerekir. Malzemenin değişimi büyük maddi ve manevi kayıpların önlenmesini sağlar. Kimyasal reaksiyon sonucu ortaya çıkan ısı aşındırma hızını artırır. Bu aşınmayı önlemenin en kolay ve ekonomik yolu malzemeyi kullanıldığı ortama göre koruyucu bir tabaka ile kaplamaktır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

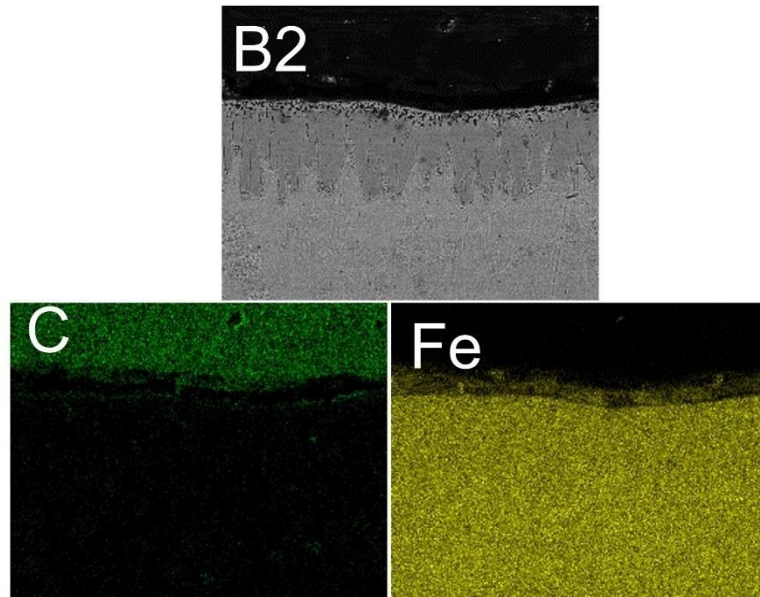
4.1. XRD ve EDX Analizleri

Bu bölümde, kutu borlama yöntemi ile yüzeyi kaplanan AISI 1018 çeliğinin yüzeyinde oluşan fazların tanımlaması, X-ışınları kırınımı (XRD) ve enerji dağılımlı X-ışınları (EDX) yöntemleri kullanılarak yapıldı.

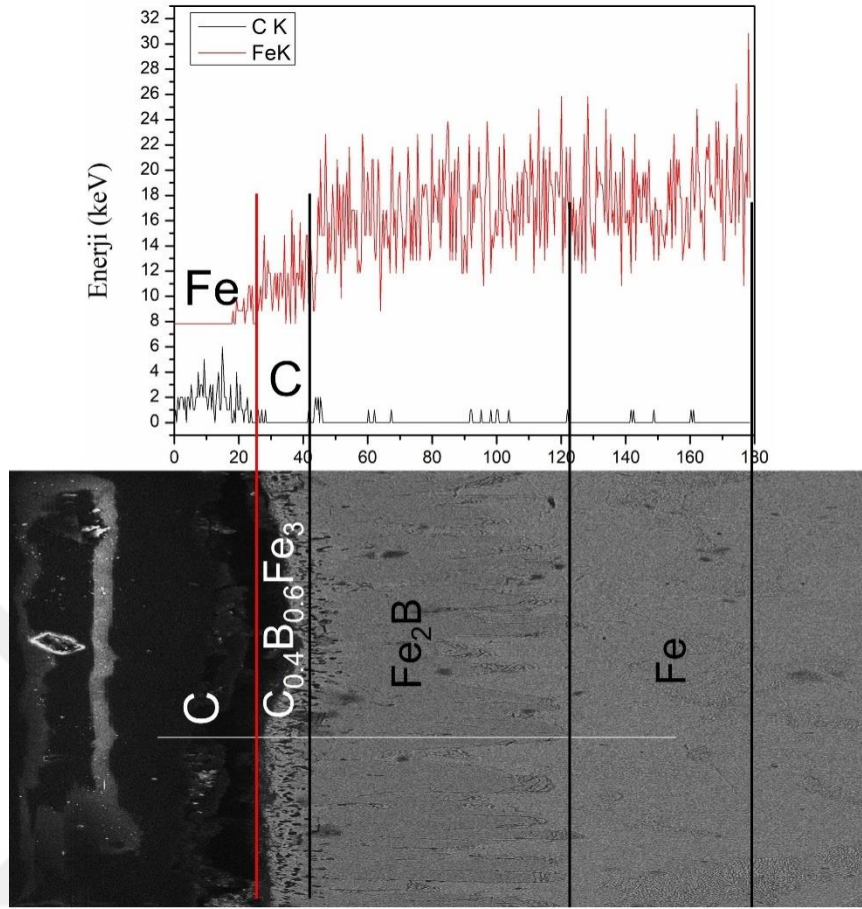
Şekil 4.1.'de 2 saat Ekabor-2 tozu ile borlanan çeliğin XRD grafiği verilmektedir. Numunede üç faz tespit edildi. Bunlar $C_{0.4}B_{0.6}Fe_3$, Fe_2B ve Fe fazlarıdır. Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'te sırasıyla renkli haritalama ve çizgi EDX analizleri verilmektedir. Analizler, birlikte değerlendirildiğinde, çeliğin en üst katmanın $C_{0.4}B_{0.6}Fe_3$ fazına ait olduğu görülmektedir. Bu katmanın hemen altında, testere dişi morfolojisine sahip Fe_2B fazı oluşmuştur. Son olarak en alt katman ana malzeme olan çeliğe ait olduğundan Fe fazı saptanmıştır. Şekil 4.1.'de dilim grafik şeklinde verilen Rietveld analizlerinden, oluşan fazların miktarları verilmektedir. Buna göre $C_{0.4}B_{0.6}Fe_3$ (demir borür karbür), Fe_2B ve Fe fazlarının kütlece oranları sırasıyla % 50.7, 47.7 ve 1.6 olarak verilmektedir. Burada $C_{0.4}B_{0.6}Fe_3$ fazı yüzeyde oluştuğu için miktarı fazla çıkmıştır. XRD analizlerinde kullanılan X-ışınları, analiz edilen malzemeye bağlı olarak yüzey içerisine 20µm civarında nüfuz edebilmektedir. Bu nedenle yüzeyde bulunan faz, Rietveld analizlerinde daha fazla tespit edilmektedir. Sonuç olarak, 2 saat borlanan malzemede, yüzeyde ince $C_{0.4}B_{0.6}Fe_3$ fazının dışında arzu edilen Fe_2B fazının oluştuğu sonucuna varılabilir.



Şekil 4.1. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 2 saat borlanan çeliğin XRD grafiği ve Rietveld analizi

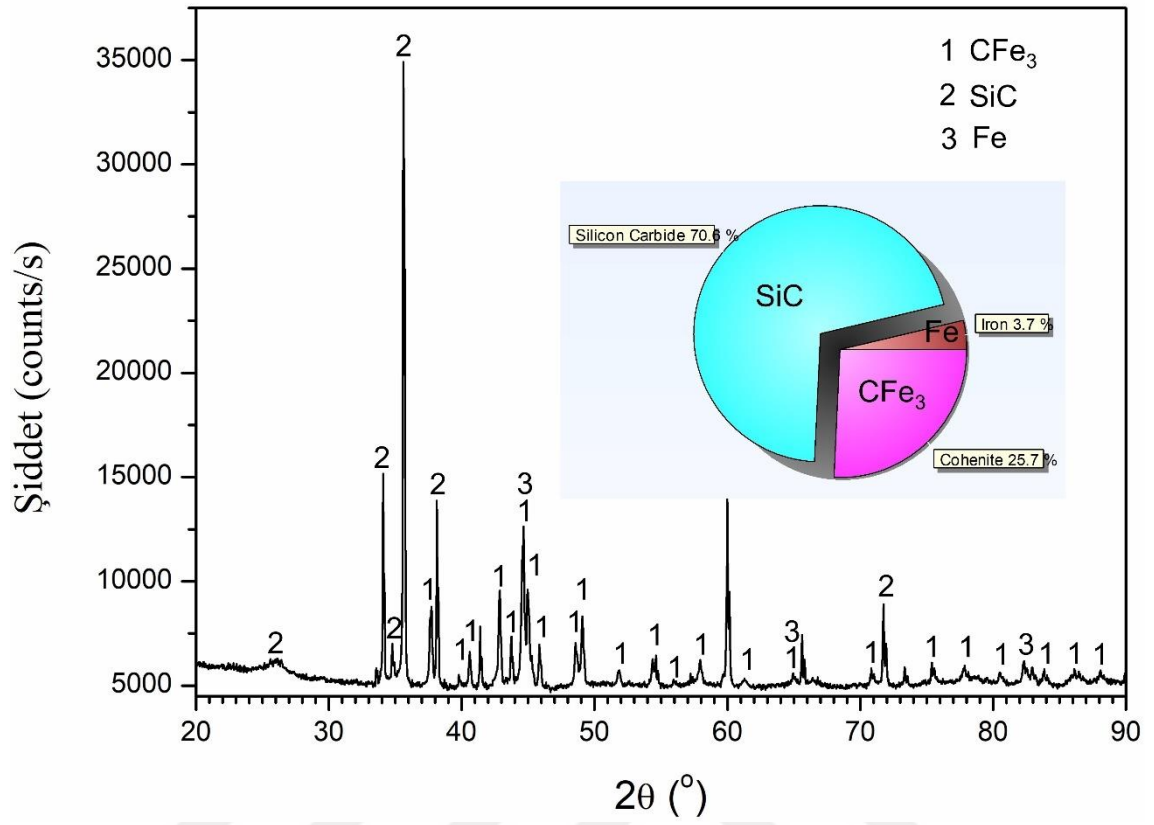


Şekil 4.2. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 2 saat borlanan çeliğin EDX renkli haritalama görüntüleri

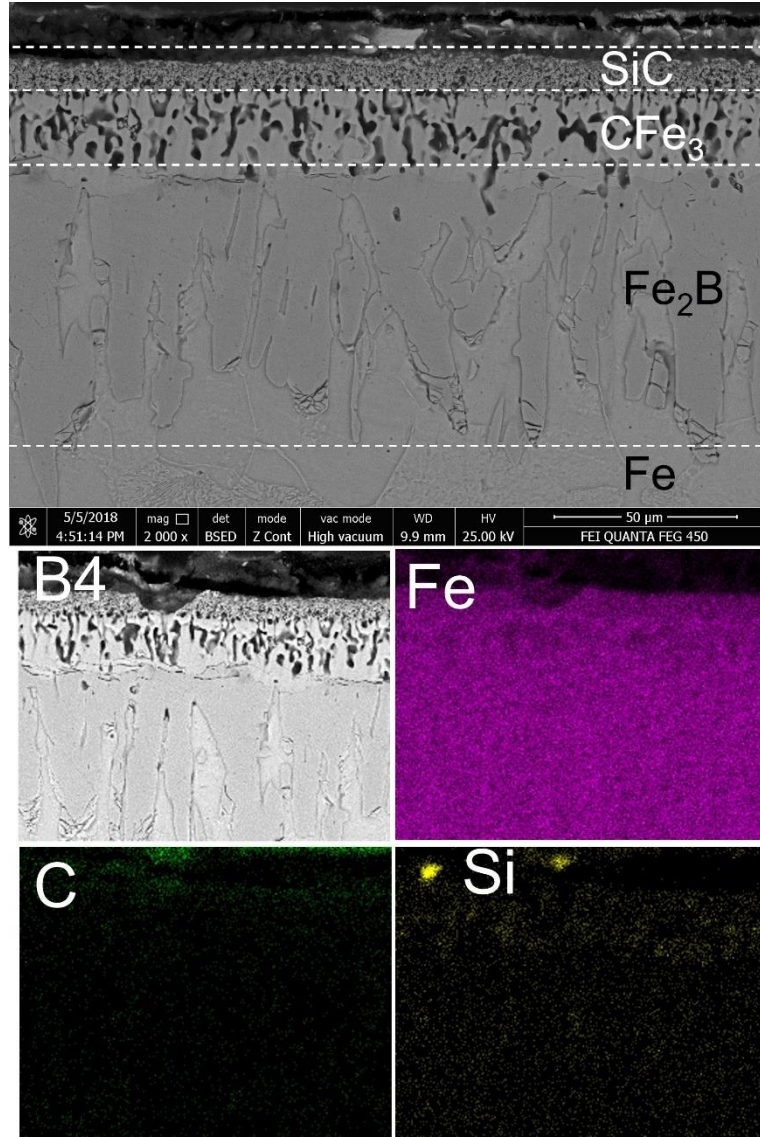


Şekil 4.3. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 2 saat borlanan çeliğin çizgi EDX analizi

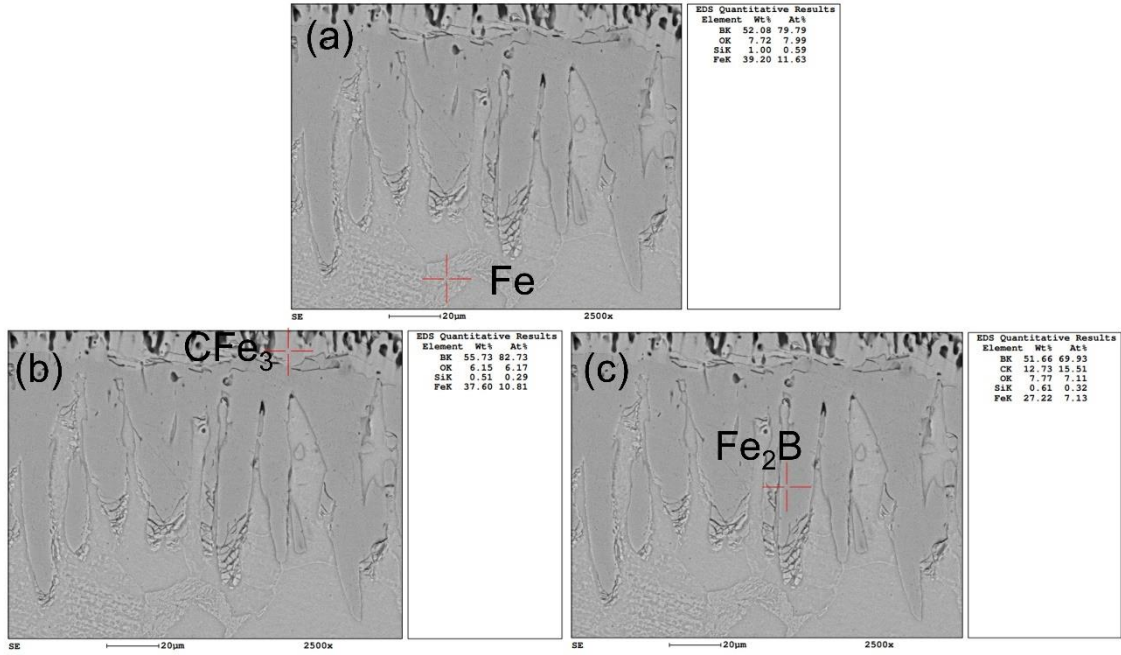
Şekil 4.4’de Ekabor-2 tozu ile 4 saat borlanan çeliğin XRD grafiği verilmektedir. Şekil 4.5 ve 4.6’da sırasıyla renkli haritalama ve nokta EDX analizleri verilmektedir. Analizler birlikte değerlendirildiğinde en üst bölgede SiC fazının olduğu görülmektedir. Bu faz, Ekabor-2 tozu içerisinde bulunan SiC tozunun yüzeye yapışmasından kaynaklanmaktadır. Onun altında, C ve Fe elementlerinin oluşturduğu CFe₃ bulunmaktadır. Daha sonra Fe₂B fazı oluşmuştur. XRD analizlerinde, Fe₂B fazının gözlenmeyişi, SiC ve CFe₃ fazlarının Fe₂B fazını perdelemesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.4. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 4 saat borlanan çeliğin XRD grafiği ve Rietveld analizi

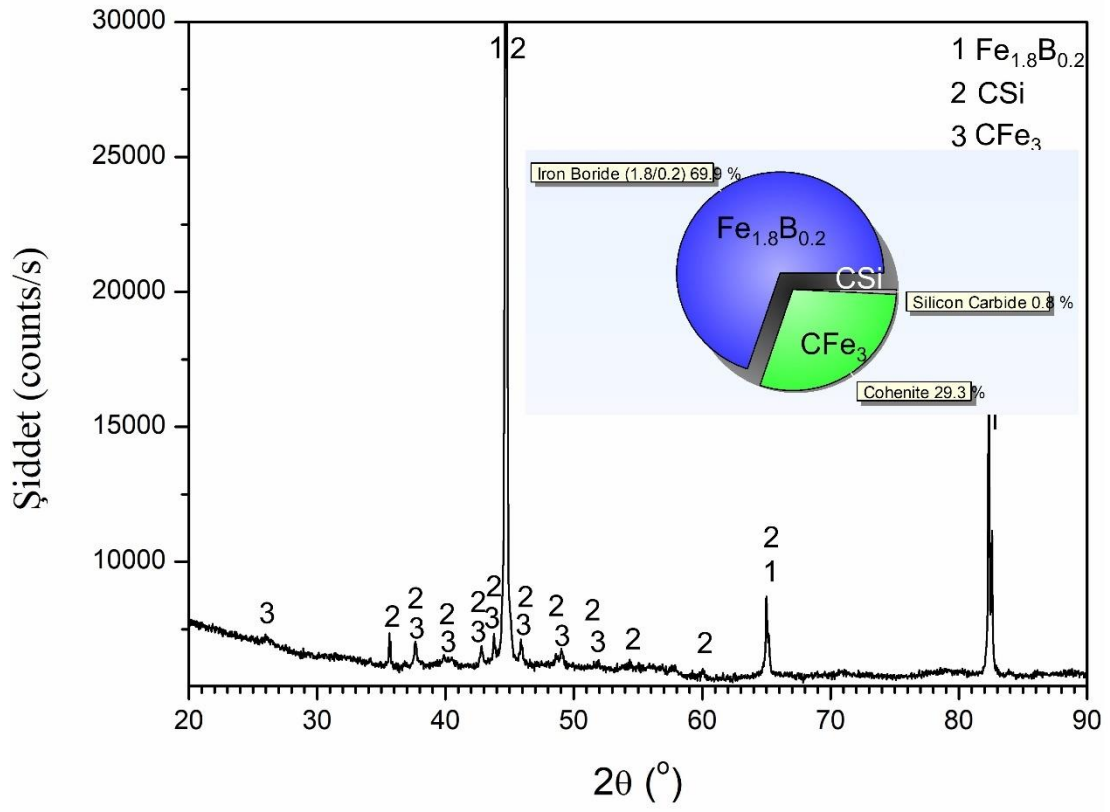


Şekil 4.5. Ekabor-2 tozu ile 950°C’de 4 saat borlanan çeliğin EDX renkli haritalama görüntüleri

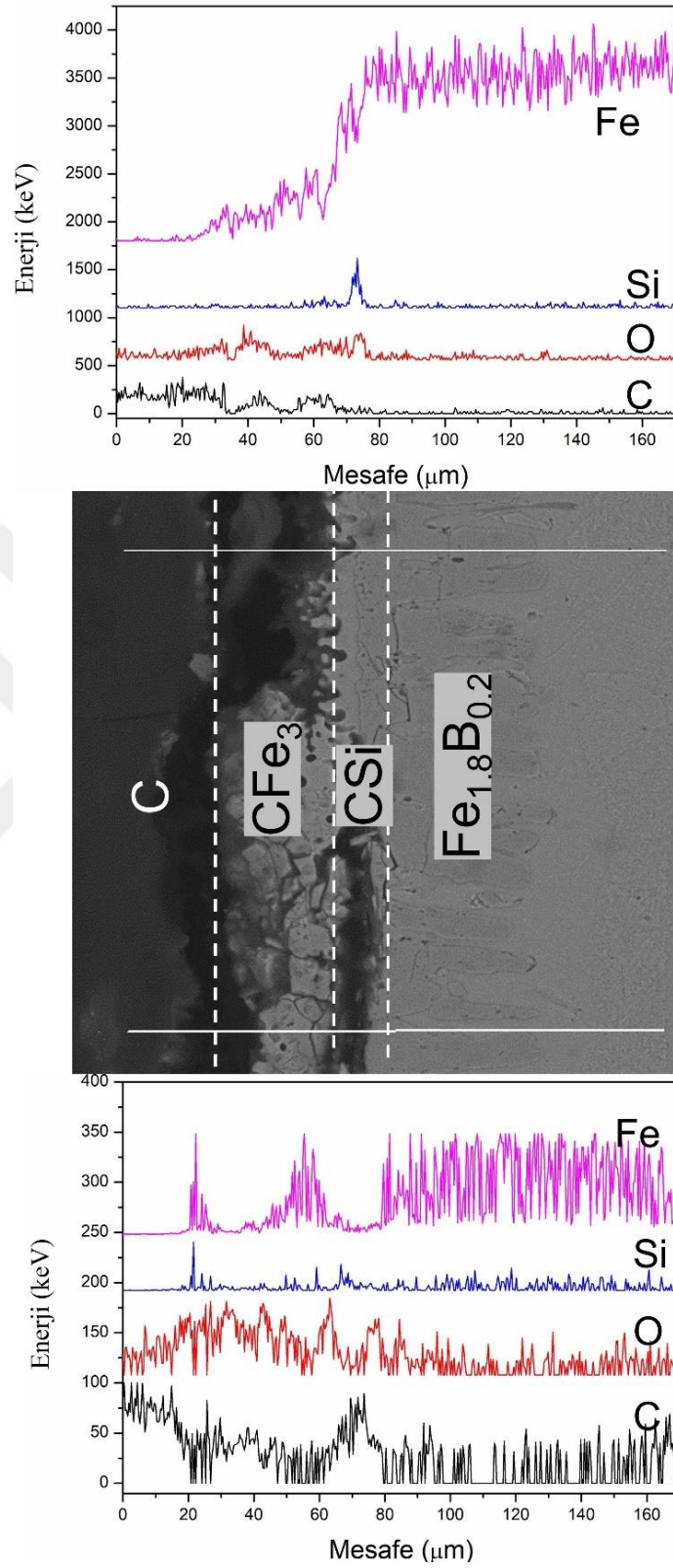


Şekil 4.6. Ekabor-2 tozu ile 950°C’de 4 saat borlanan çeliğin farklı bölgelerden alınan nokta EDX analizleri, (a) Fe fazı, (b) CFe₃ fazı, (c) Fe₂B fazı

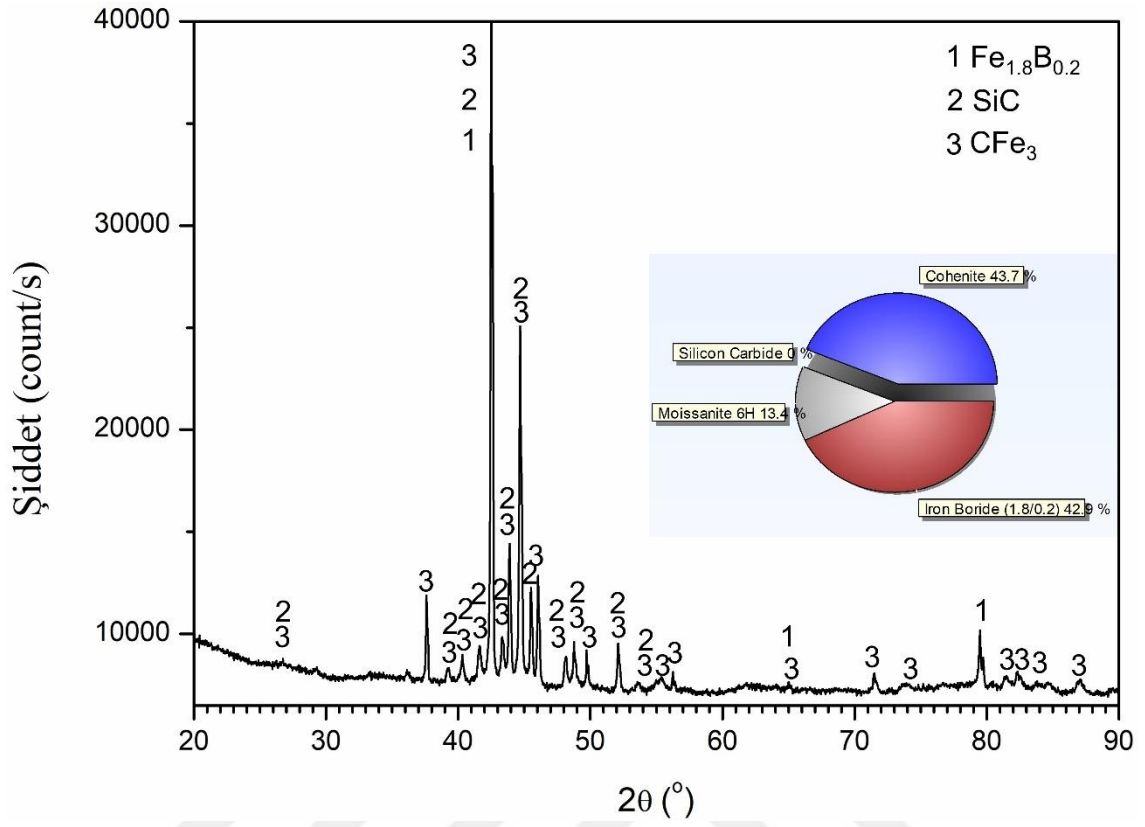
Şekil 4.7.’de Ekabor-2 tozu ile 6 saat borlanan çeliğin XRD grafiği ve Şekil 4.8.’de iki farklı bölgeden alınan çizgi EDX analizleri verilmektedir. Grafikler birlikte değerlendirildiğinde, üstten itibaren sırasıyla CFe₃ (Demir3 Karbür), SiC (Silisyum Karbür) ve Fe_{1.8}B_{0.2} fazlarının olduğu saptandı. Artan sinterleme süresiyle birlikte, Fe_{1.8}B_{0.2} borür bileşiği oluşmuştur. Şekil 4.8.’de Ekabor-2 tozu ile 8 saat borlanan çeliğin XRD grafiği, Şekil 4.9.’da renkli haritalama görüntüsü ve Şekil 4.10.’da çizgi EDX analizleri verilmektedir. Analizlerden görüldüğü üzere, 8 saat sinterlenen çelikte CFe₃, SiC ve Fe_{1.8}B_{0.2} olmak üzere üç faz tespit edildi. Bu bakımdan, 6 ve 8 saat borlanan çelikte benzer faz yapısının olduğu söylenebilir.



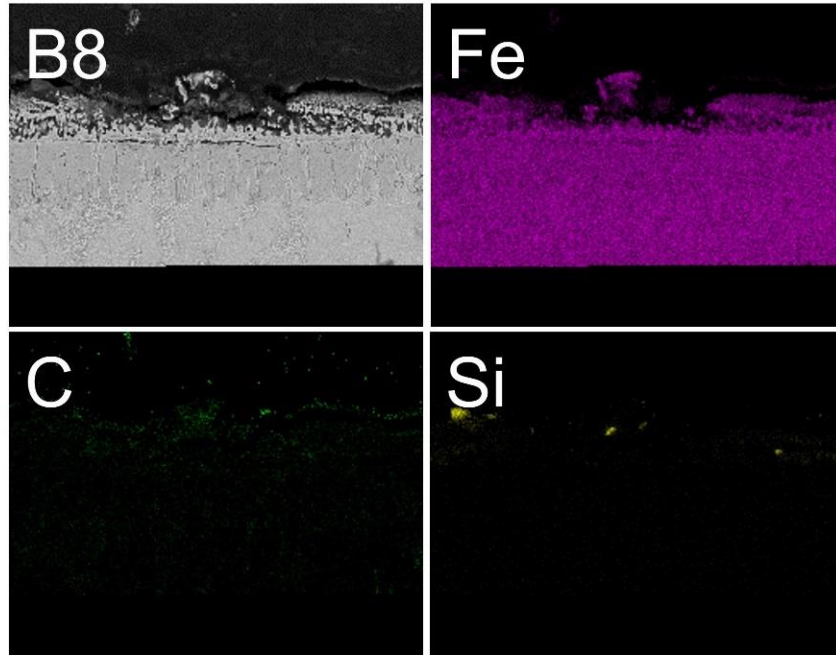
Şekil 4.7. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 6 saat borlanan çeliğin XRD grafiği ve Rietveld analizi



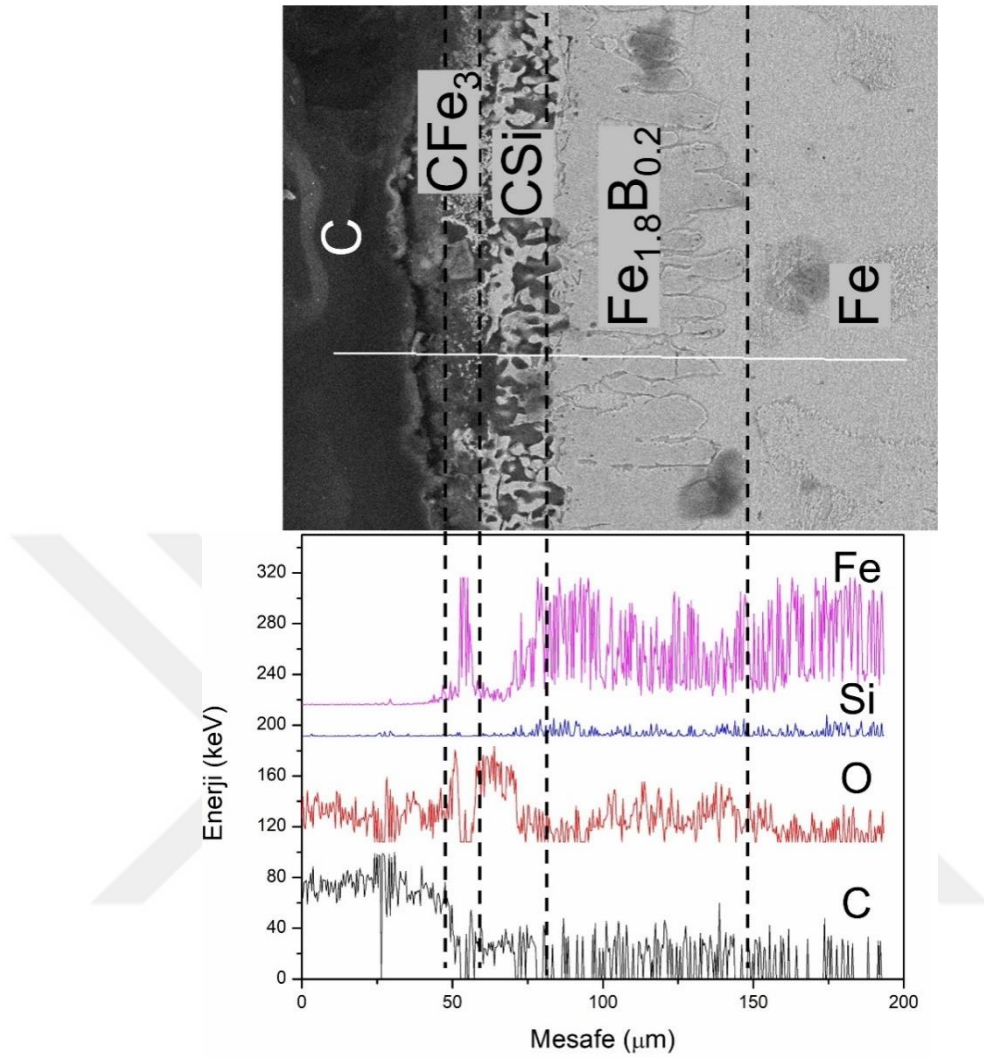
Şekil 4.8. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 6 saat borlanan çeliğin iki bölgeden alınan çizgi EDX analizi



Şekil 4.9. Ekabor-2 tozu ile 950°C’de 8 saat borlanan çeliğin XRD grafiği ve Rietveld analizi



Şekil 4.10. Ekabor-2 tozu ile 950°C’de 8 saat borlanan çeliğin EDX renkli haritalama görüntüleri



Şekil 4.11. Ekabor-2 tozu ile 950 °C’de 8 saat borlanan çeliğin çizgi EDX analizi

Ekabor-2 Tozu ile 4 farklı borlama süreleri ile yapılan borlama işlemlerinde sonunda özellikle dış tabakada meydana gelen demir-borid (Fe_2B) tabakası dışındaki oluşumlar;

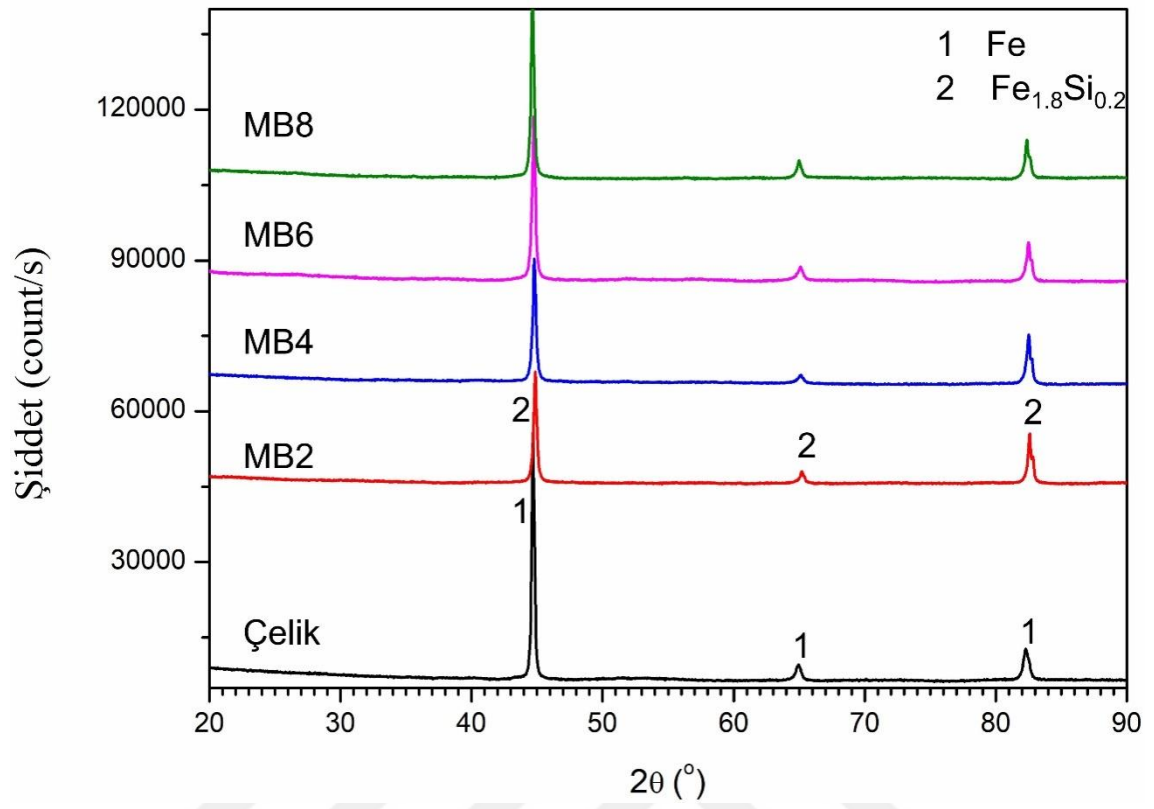
- 2h, $\text{C}_{0.4}\text{B}_{0.6}\text{Fe}_3$ (Demir Borür Karbür), Şekil 4.3.
- 4h SiC (Silisyum Karbür) ve Fe_3C (Demir Karbür), Şekil 4.5.
- 6h SiC (Silisyum Karbür) ve Fe_3C (Demir Karbür), Şekil 4.8.
- 8h SiC (Silisyum Karbür) ve Fe_3C (Demir Karbür), Şekil 4.11.

Alaşımları tespit edilmiş olup bu oluşumları aşağıdaki şartlarda değerlendirebiliriz.

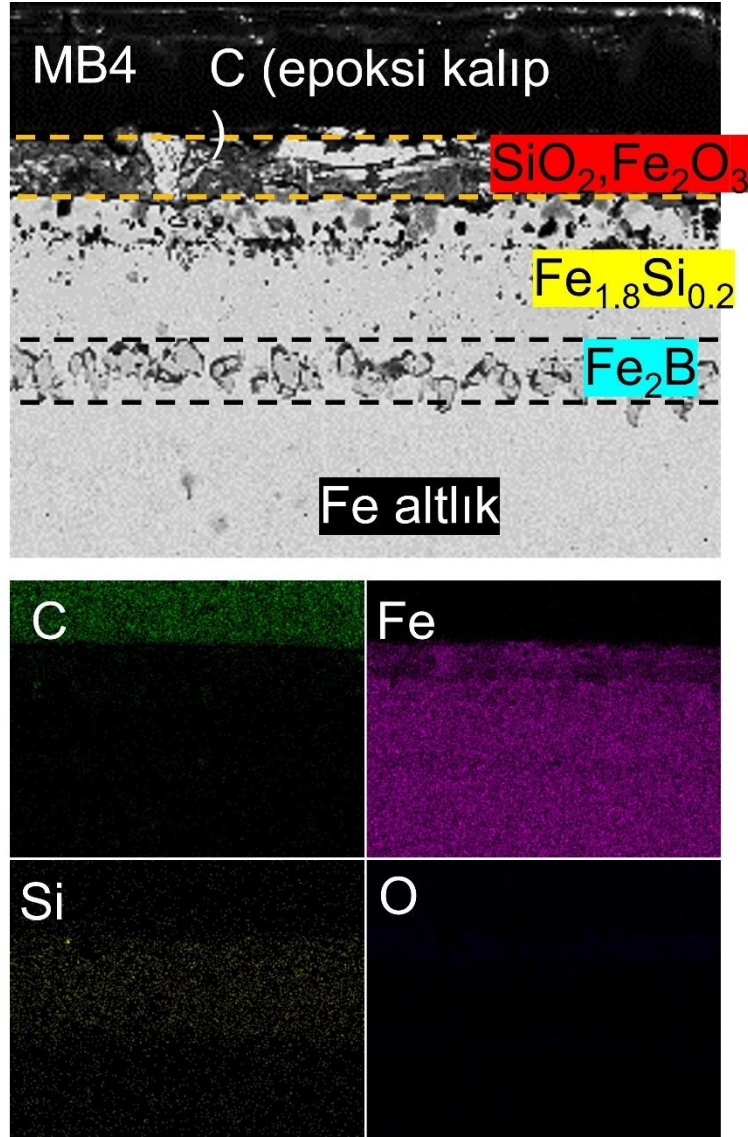
Bu tür oluşumlar numune yüzeyinde, oda sıcaklığından borlama ortam sıcaklığına çıkarken (800°C ve üzerinde) ilk 15 dakika içinde difüzyon bölgesinde karbon, silisyum gibi atomların numune yüzeyinin iç tabakalarına itilmesi şeklinde oluşabilir. Bunun dışında, söz konusu fazların soğuma işlemi sırasında da kaplama numunesinin dış yüzeyinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalardaki sonuçlarla uyumludur (Gök ve ark., 2017; Poletti & Battezzati, 2013).

Borlama ortam sıcaklığını arttırırken dışardan bir ısı enerjisi vererek doğrusal olarak artmasını sağlayabiliriz. Soğuma aşamasında dışardan herhangi bir müdahale yapılmadığından dolayı başlangıçtaki borlama ortam sıcaklığı 950°C ile dış ortam sıcaklığı 20°C iki ortam arasında 930°C lik sıcaklık farkından dolayı başlangıç anında ısı gradyan yüksek olacak ve hızlı soğuma meydana gelecek bu hızlı soğuma esnasında borlama ortamında Ekabor-2 içinde bolca bulunan (%5 B_4C borlayıcı etken madde, %90 SiC dolgu ve deoksidan maddesi) Si ve C atomlarının kaplama maddesi yüzeyinde tabakalaşacaktır. Aktivasyon enerjisi daha küçük olan atom grupları, daha kolay difüze olduklarından demir esaslı numunenin yüzeyinde tabaka oluştururlar. Numunenin dış yüzeyinde silisyum bileşiklerinin oluşma sıcaklık aralığı $800-900^{\circ}\text{C}$ olup yoğun olarak 800°C civarında olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçların önceki çalışmalara uyumlu olduğu görülmüştür (Gök ve ark., 2017, Poletti & Battezzati, 2013).

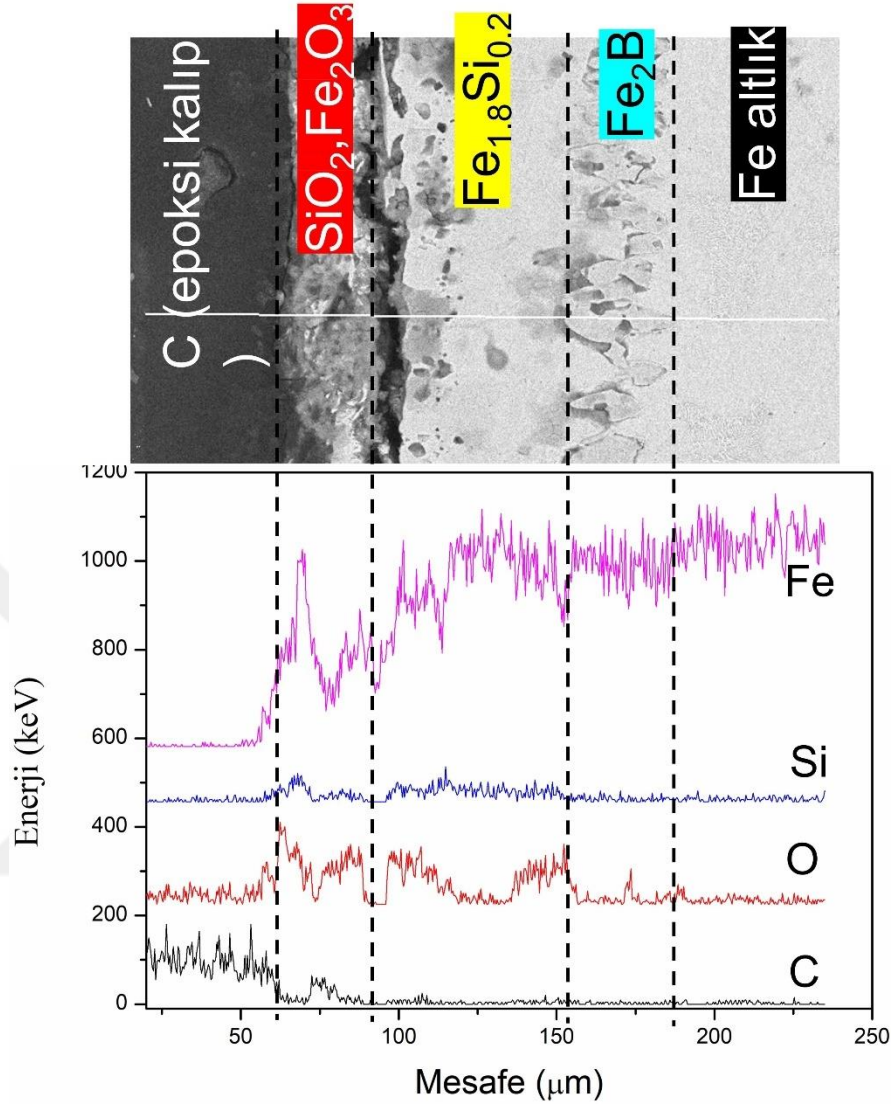
Şekil 4.12.'de bilyeli öğütme ile öğütülen Ekabor-2 tozu kullanılarak 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerde borlanan çelik numunelerinin XRD grafikleri birlikte verilmektedir. Ayrıca, yüzeyden itibaren oluşan fazları tespit edebilmek için 4 saat borlanan çelik için renkli haritalama (Şekil 4.13.) ve çizgi EDX (Şekil 4.14.) analizleri yapılmıştır. Analizlerden görüldüğü üzere en üst bölgede Si ve Fe'e ait oksit tabakası oluşmuştur. Onun hemen altında, $\text{Fe}_{1.8}\text{Si}_{0.2}$ fazı ve Fe_2B fazları oluşmuştur. Görüldüğü üzere, Ekabor-2 tozunun bilyeli öğütme işlemine tabi tutulması, Fe_2B fazının testere dişli morfolojisini değiştirmiştir ve rastgele dağılan parçacıklar şeklinde oluşmuştur.



Şekil 4.12. Bilyeli öğütme ile öğütülen Ekabor-2 tozu ile borlanan çeliğin XRD grafikleri



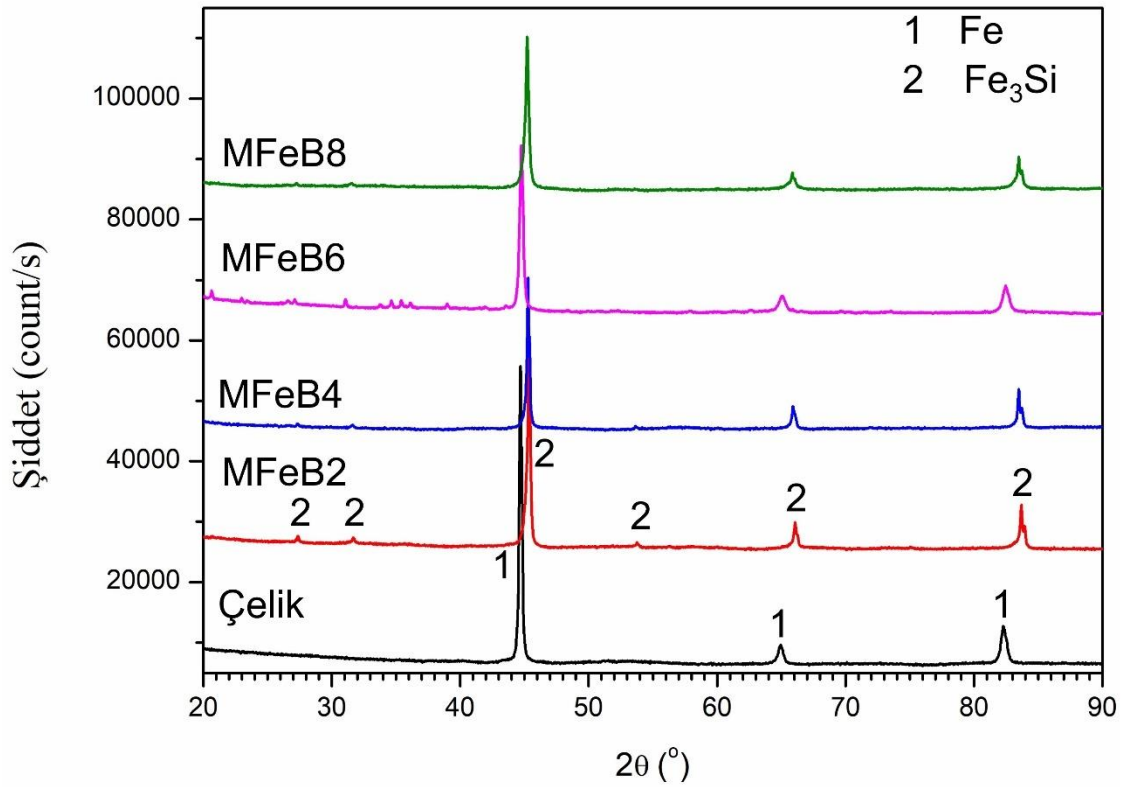
Şekil 4.13. Bilyeli öğütme ile öğütülen Ekabor-2 tozu ile 4 saat borlanan çeliğin renkli haritalama görüntüleri



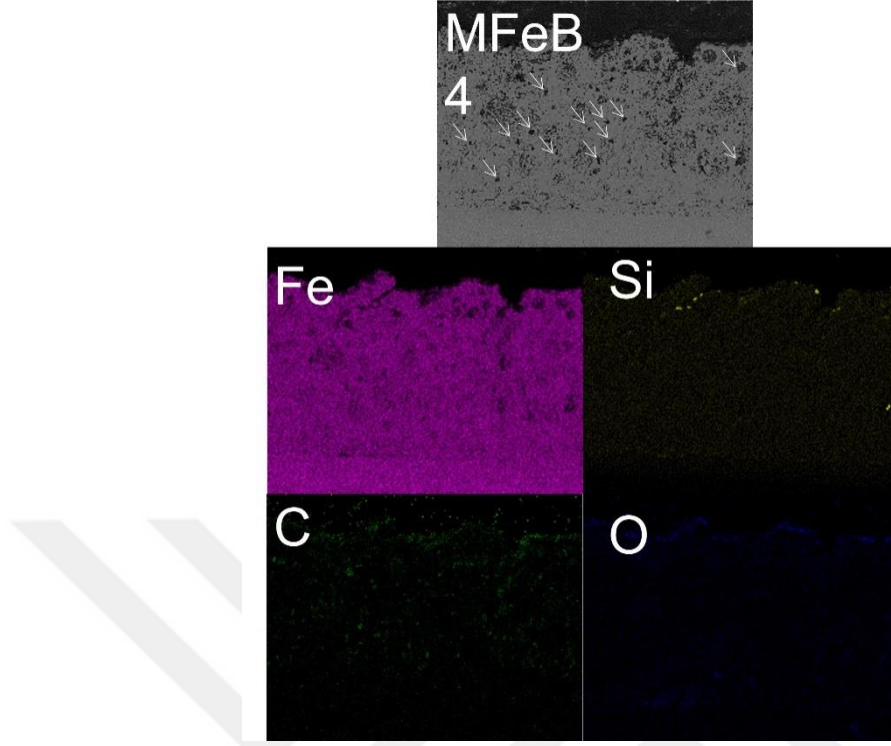
Şekil 4.14. Bilyeli öğütme ile öğütülen Ekabor-2 tozu ile 4 saat borlanan çeliğin çizgi EDX analizleri

Şekil 4.15'te bilyeli öğütme ile öğütülen Fe+Ekabor-2 tozu kullanılarak 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerinde borlanan çeliğe ait XRD grafikleri verilmektedir. Çeliklerin yüzey kısımlarında iki faz tespit edilmiştir. Bunlar Fe ve Fe₃Si fazlarıdır. MFeB₄ numunesine ait renkli haritalama görüntülerinde, yüzeyden itibaren yaklaşık 500 μm kalınlığında Si'ca zengin bir bölge görülmektedir. Bu bölge, XRD analizlerinde tespit edilen Fe₃Si fazına aittir. Şekil 4.17'de ise aynı numuneye ait nokta EDX analizleri verilmektedir. Şekil 4.17a'da Fe fazı belirgindir. Şekil 4.17b'de Fe fazının yanısıra bir miktar Si

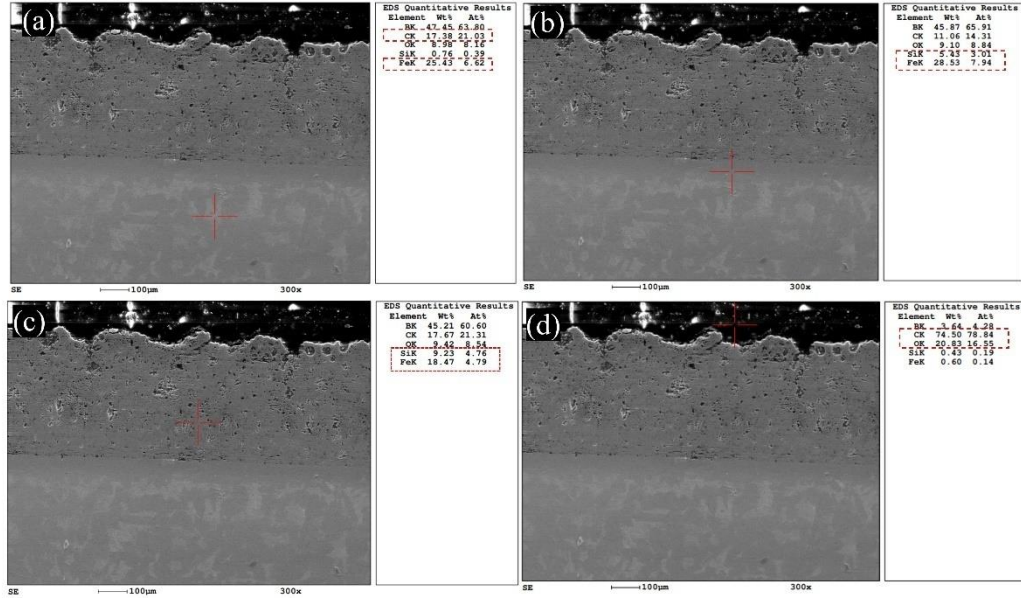
elementi saptanmıştır. Bu kısım geçiş bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.17c’de kaplanan bölgeye ait elemental analiz verileri verilmektedir. Bu bölgenin Fe_3Si fazına ait olduğu görülmektedir ve XRD analizleri ile uyumludur. Şekil 4.17d ise karbonca zengin epoksi kalıp bölgesini göstermektedir. MFeB serisi numunelerde belirgin bir borür tabaka gözlenememiştir. Ancak söz konusu tabakanın geçiş bölgesi ile Fe_3Si katmanını arasında ince bir tabaka şeklinde oluştuğu düşünülmektedir. Bu durum, 2 saat borlanan MFeB2 numunesine ait çizgi EDX analizlerinde daha iyi görülebilmektedir (Şekil 4.18). Şekilden görüldüğü üzere Fe_2B olarak belirlenen bölgede, Fe fazına ait sinyalde ani bir artış görülmektedir. Bunun aksine Si, C ve O fazlarının bu bölgede gözlenmeyişi, söz konusu bölgenin borür tabaka olduğunu göstermektedir.



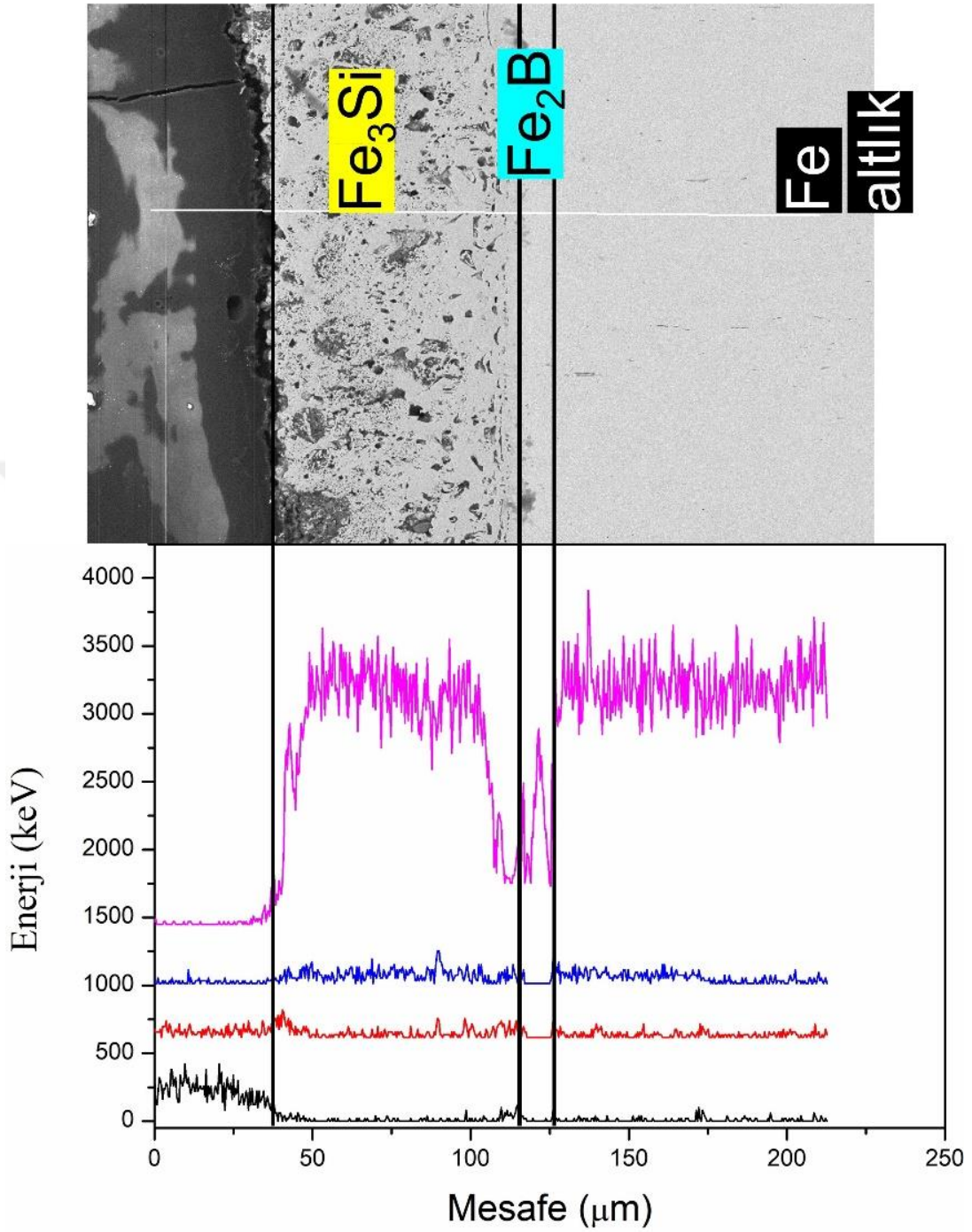
Şekil 4.15. Bilyeli öğütme ile öğütülen Fe+Ekabor-2 tozu ile borlanan çeliğin XRD grafikleri



Şekil 4.16. Bilyeli öğütme ile öğütülen Fe+Ekabor-2 tozu 4 saat borlanan çeliğin renkli haritalama görüntüleri



Şekil 4.17. Bilyeli öğütme ile öğütülen Fe+Ekabor-2 tozu 4 saat borlanan çeliğin farklı bölgelerinden alınan nokta EDX analizleri, (a) Fe bölgesi, (b) Geçiş bölgesi, (c) Fe₃Si katmanı (d) Epoksi kalıp



Şekil 4.18. MFeB₂ numunesine ait çizgi EDX analizleri

Bilyeli öğütme işlemi uygulanan Ekabor-2 tozu ile 4 saatlik süre için yapılan borlama işleminde Fe₂B tabakası dışında, Fe_{1.8}Si_{0.2}, SiO₂ ve Fe₂O₃ fazlarının olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.13. ve Şekil 4.14.). Borlayıcı olarak kullanmış olduğumuz saf Ekabor-2 toz

karışımının parçacık boyutları 850 µm olarak tedarikçi firma tarafından belirtilmiştir. Bilyeli öğütme sonunda Ekabor-2 tozunun ortalama parçacık boyutu 100 µm olarak tespit edildi. Bu öğütme işlemi sonucunda ortaya çıkan küçük tanecikli yapı, tozun, ortam sıcaklığına bağlı olarak numunenin dış yüzeyine daha kolay difüze olmasını sağlamıştır. Numune yüzeyinin dış tabakasında görülen Fe_2O_3 ve Si_2O tabakaları, difüzyon sıcaklığının sona erdiği 800 °C'nin altında ve fırın ortamında mevcut olan oksijen gazının sıcak ortamlarda metallerle aktif olarak metal oksit tabakası oluşturması şeklinde açıklanır (Gök ve ark. 2017; Poletti & Battezzati, 2013).

Bilyeli öğütme işlemi uygulanan Demir- Ekabor-2 tozu karışımı kullanılarak 4 saat borlama süresi ile gerçekleştirilen kaplamada numune yüzeyinde geçiş bölgesinin üzerinde ince bir Fe_2B tabakası olduğu gözlenmiş olup (yaklaşık 25-30 µm) bu tabakanın üzerinde Fe_3Si tabakası oluşmuştur. Fe_2B tabakasının XRD'de görülmemesinin sebebi, numunenin dış yüzeyinin kalın (yaklaşık 200 µm) bir Fe_3Si tabakası ile kaplanmış olmasıdır.

Demir tozu ile Ekabor2 toz karışımının bilyeli öğütme ile parçalanması sonucunda elde edilen öğütülmüş toz karışımının (MFeB) ortalama tanecik boyutu 60 µm olduğu tespit edildi. Oluşan tabakaların kalınlığı incelendiğinde numune yüzeyindeki geçiş bölgesi üzerinde ince bir demir borür tabakası olduğu görülmektedir ve üzerinde kalın bir demir silisyum (Fe_3Si) tabakası meydana gelmiştir. Borlayıcı ortam içinde herhangi bir yapıya bağlı olmayan demir tozları (%99.99 saflıkta) ve Ekabor-2 tozu içinde %90 oranında SiC bulunmaktadır. Ortamda bulunan silisyum ve demir atomlarının aktivasyon enerjileri, bor ve karbon'a göre düşük olduğundan, daha düşük enerji ile kolayca difüze olmalarına sebep olur. Bu durum, numune yüzeyinde kalın bir demir silisyum (Fe_3Si) tabakası oluşmasını açıklar. Şekil 4.15'de verilen XRD sonuçlarından görüldüğü gibi bilyeli öğütme ile öğütülen Fe+Ekabor-2 toz karışımı ile farklı sürelerde 2h, 4h, 6h ve 8h sürelerinde elde edilen sonuçlar benzerlik göstermektedir.

4.2. Aşınma Testleri ve Sonuçları

Malzemelerin aşınma testleri Çizelge 4.1’de verilen parametrelere göre gerçekleştirildi.

Çizelge 4.1. Aşınma test cihazı ölçüm parametreleri

Test Tipi	:	Pin On Disk
Devir	:	150 dev/dk
Yük	:	30 N
Toplam yol	:	600 metre
Aşınma iziçapı	:	22 mm

Aşınma test ölçümleri, üç farklı ortamda borlanmış 12 hedef metalleri ve 13. hedef metali olarak ısıtıl işlem uygulanmayan AISI 1018 çeliğinden aynı ebatlarda ve özellikte hazırlanmıştır. Hesaplamalarda kullanılmak üzere yoğunluk değerleri; AISI 1018 çeliği için $\rho = 7.87 \text{ gr/cm}^3$, FeB ve Fe₂B bileşikleri için ortalama $\rho=7.30 \text{ gr/cm}^3$ olarak alınmıştır. Ölçümler; test cihazı ölçüm parametreleri sabit kalarak aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir.

Ölçümlerde, birim sürtünme yoluna karşılık gelen kütle kaybı miktarı ($\Delta m / L$; mg/m) ile özgül aşınma miktarları hesaplandı.

Bu bağıntı:

$$W_s = \Delta m / (\rho * F_n * L) \quad (4. 1)$$

W_s = özgül aşınma miktarı ($\text{mm}^3 / \text{N} * \text{m}$)

Δm =Ağırlık kaybı (mg)

ρ = yoğunluk ($\text{g/cm}^3 = \text{mg/mm}^3$)

F_n = Uygulanan normal kuvvet (Newton)

L = Hedef metal yüzeyi üzerinde alınan toplam yol uzunluğu (metre)

Numune yüzeylerinden alınan, mesafe başına aşınma değerleri Çizelge 4.2.’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Aşınma test sonuçları (kütle kaybı g/mesafe m)

Hedef metaller	0(m ₀)gram	200 m(m ₂) gram	400 m (m ₄) gram	600 m (m ₆) gram	0.0m	200m	400 m	600m
B2	47,7468	47,7442	47,7434	47,7423	0.0	0,0026	0,0034	0,0045
B4	44,6389	44,6373	44,6367	44,6365	0.0	0,0016	0,0022	0,0024
B6	46,4582	46,4575	46,4563	46,4546	0.0	0,0007	0,0019	0,0036
B8	41,9979	41,9955	41,9920	41,9848	0.0	0,0024	0,0059	0,0131
MB2	50,9871	50,9540	50,9411	50,9327	0.0	0,0331	0,0460	0,0544
MB4	48,9627	48,9245	48,9066	48,8828	0.0	0,0382	0,0561	0,0799
MB6	50,9596	50,9130	50,8645	50,8573	0.0	0,0466	0,0951	0,1023
MB8	50,9545	50,9129	50,8847	50,8778	0.0	0,0416	0,0698	0,0767
MFB2	46,1715	46,1513	46,1319	46,1119	0.0	0,0202	0,0396	0,0596
MFB4	45,1597	45,1564	45,1539	45,1517	0.0	0,0033	0,0058	0,0080
MFB6	46,5331	46,5288	46,5254	46,5224	0.0	0,0043	0,0077	0,0107
MFB8	49,1453	49,1402	49,1312	49,1233	0.0	0,0051	0,0141	0,0220
Çelik Numune	43,7843	43,73	43,6776	43,6280	0.0	0.0543	0.1067	0,1563

Isıl işlem görmemiş çelik metali için özgül aşınma miktarını hesaplandığında,

$$W_s = \Delta m / \rho F_n L = 0,1563 \text{ gr} / [(7.87 \text{ g/cm}^3) * 30 \text{ N} * 600 \text{ m}]$$

$$= 156,3 \text{ mg} / [7.87 * 10^3 (\text{mg}/10^3 \text{ mm}^3) * 30 \text{ N} * 600 \text{ m}] = 156.3 \text{ mm}^3 / 141.660 \text{ Nm}$$

$$= 110 * 10^{-5} (\text{mm}^3 / \text{N} * \text{m}) \text{ sonucu elde edilmiştir.}$$

Tribometer-Micro aşınma test cihazı ile, 30 Newton'luk bir kuvvet altında, dönme hızı, 150 devir/dakika olan tablaya sıkıca tutturulan hedef metallerin üzerinde iz çapı 22 mm'lik bir daire yüzeyinden toplam 600 m'ye karşılık gelen kütle kayıp miktarları bilgisayar ile kaydedildi. Bu değerlere göre, mesafe başına kütle kaybı (gram/metre) grafiği oluşturulmuştur. Her bir hedef metal için özgül aşınma değerleri, Eşitlik 4.1'e göre hesaplanmıştır. Isıl işlem görmeyen çelik numune için mesafeye bağlı kütle kaybı grafiği Şekil 4.19'de gösterilmiştir. Isıl işlem görmemiş AISI 1018 çelik numune için hesaplanan özgül aşınma değeri; $W_s (\text{AISI 1018}) = 110 * 10^{-5} \text{ mm}^3 / \text{N} * \text{m}$ 'dir. Bu değer, aynı çelik numuneler üzerine yapmış olduğumuz kutu borlama yöntemi ile elde edilen borür tabakaların aşınma direncinin nasıl değiştiğini tespit etmede referans değerimiz olacaktır. Farklı ortamlarda kutu borlama yöntemiyle borlanmış 12 farklı hedef metale ait özgül

aşınma değerleri, Çizelge 4.2’de verilen kütle kayıpları(gr/m) kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2.’de Ekabor 2 ortamında borlanan hedef metaller için ortalama özgül aşınma değerleri hesaplanmış ve $W_s (ort.) = 4.3 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ sonucu elde edilmiştir. Çelik numune için bu değer $110 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ dir. Bu özgül aşınma değerlerini kıyasladığımızda elde Ekabor 2 ile elde ettiğimiz borür tabakasının aşınma direnci ısıt işlem yapılmayan referans değerimizden yaklaşık 25 katı daha az aşınmıştır ($110/4.3$). Bu sonuçlar ettiğimiz borür tabakası ile çelik numunelerin yüzey aşınmalarına karşı mükemmel bir iyileştirme sağlamıştır.

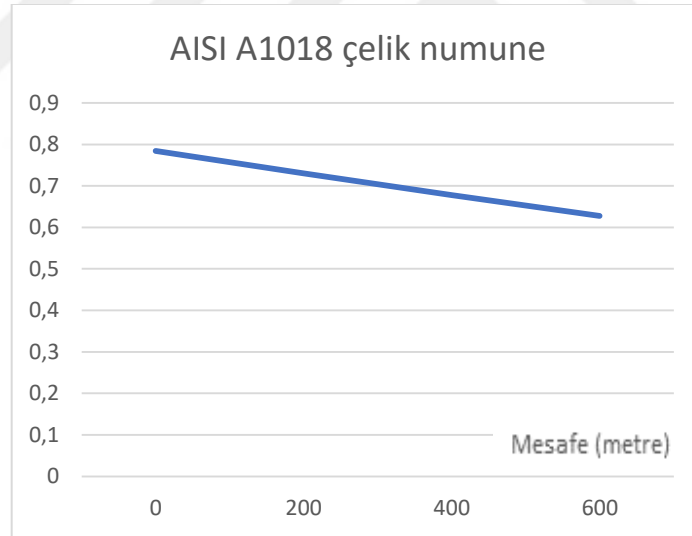
Öğütülmüş Ekabor-2 ortamında borlanan hedef metaller için ortalama özgül aşınma değerleri hesaplanmış ve $W_s (ort.) = 59.9 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ ve çelik numune değerlerine göre 2 kat bir iyileştirme gözlenmiştir. Öğütülmüş Ekabor-2 ile elde edilen Borür tabakaları üzerinden elde edilen mesafeye bağlı kütle kayıpları Şekil 4.23.’ de gösterilmiştir. Hedef metaller için hesaplanan özgül aşınma değerleri Çizelge 4.3.’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Aşınma test sonuçları değerlerine göre hesaplanan özgül aşınma miktarları ($\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$)

Numune Etiket Bilgisi	(m_0)gram	Δm , Gram	Δm , mg	$W_s(\text{mm}^3/\text{Nm}) \cdot 10^{-5}$	$W_s(ort.) (\text{mm}^3/\text{Nm}) \cdot 10^{-5}$
B2	47,7468	0,0045	4.5	3.42	4.3
B4	44,6389	0,0024	2.4	1.8265	
B6	46,4582	0,0036	3.6	2.59	
B8	41,9979	0,0131	13.1	9.7	
MB2	50,9871	0,0544	54.4	41.4	59.6
MB4	48,9627	0,0799	79.9	60.8	
MB6	50,9596	0,1023	102.3	77.85	
MB8	50,9545	0,0767	76.7	58.37	
MFB2	46,1715	0,0596	59.6	45.36	19.0
MFB4	45,1597	0,0080	8	6.08	
MFB6	46,5331	0,0107	10.7	8.14	
MFB8	49,1453	0,0220	22	16.74	
Çelik Numune	43,7843	0,1563	156.3	110	110

Çizelge 4.4. Kütle kayıpları sabit kalacak şekilde grafik için kütle düzenlemesi ile oluşturulan yeni liste

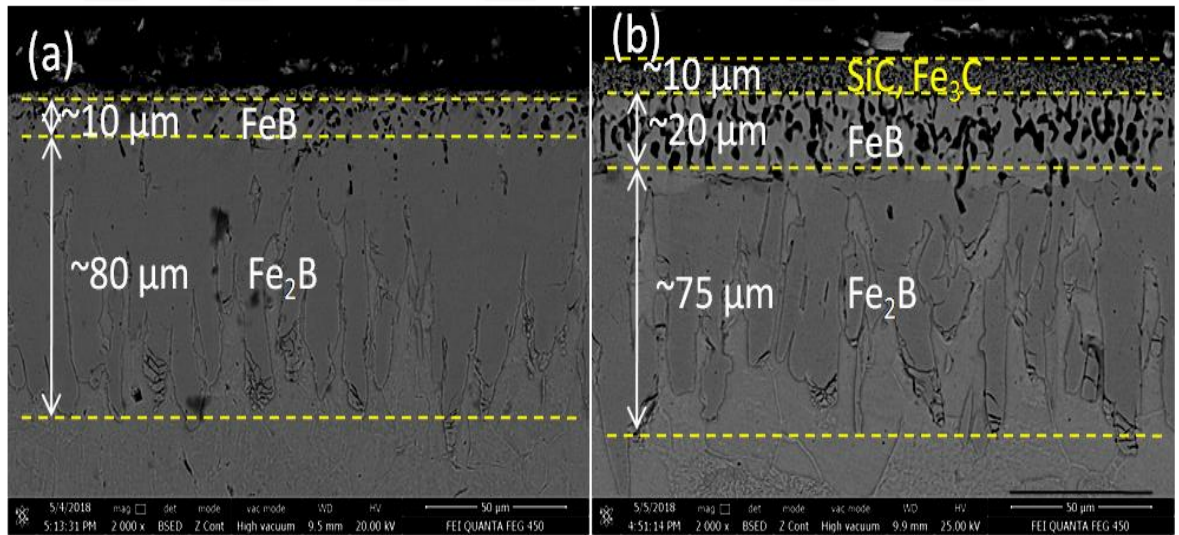
Çelik	M	2h	4h	6h	8h	Borlayıcı
0,7843	0	0,7468	0,6389	0,4582	0,9979	Ekabor2
0,73	200	0,7442	0,6373	0,4575	0,9955	
0,6776	400	0,7434	0,6367	0,4563	0,992	
0,628	600	0,7423	0,6365	0,4546	0,9848	
0,7843	0	0,9871	0,9627	0,9596	0,9545	Öğütülmüş Ekabor2
0,73	200	0,954	0,9245	0,913	0,9129	
0,6776	400	0,9411	0,9066	0,8645	0,8847	
0,628	600	0,9327	0,8828	0,8573	0,8778	
0,7843	0	0,1715	0,1597	0,5331	0,1453	Öğütülmüş FeB
0,73	200	0,1513	0,1564	0,5288	0,1402	
0,6776	400	0,1319	0,1539	0,5254	0,1312	
0,628	600	0,1119	0,1517	0,5224	0,1233	



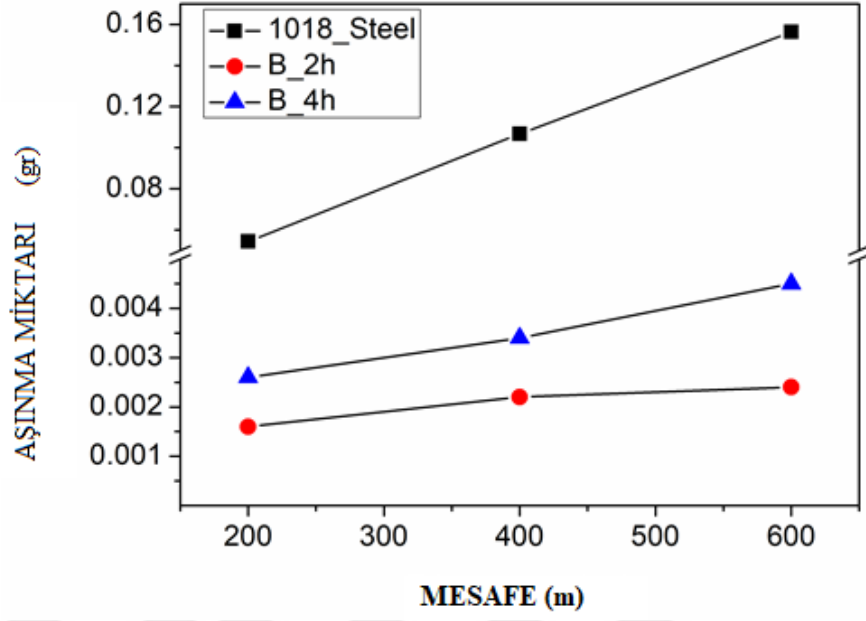
Şekil 4.19. Referans hedef metale ait (AISI 1018 Saf Çelik) kütle kaybı(gr/m); (0-600m)

Aynı kristal örgü parametrelerine ve homojen yapıya sahip katı cisimlerin yüzeyinde, aynı kuvvet altında yapılan özgül aşınma testinde yüzeyden aşınan madde miktarındaki değişimin lineer olması beklenir. AISI 1018 Saf Çelik ten elde edilen hedef metali homojen yapıda olduğundan aşınma miktarı lineer olarak değiştiği görülmektedir.

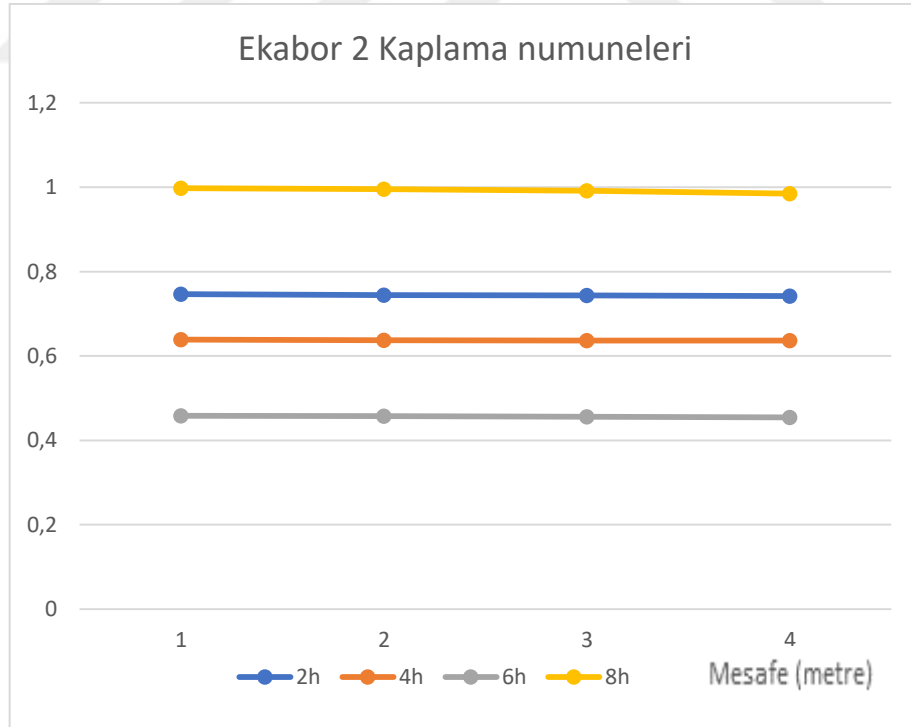
Aşınma testi uygulanacak hedef metallerin dış yüzey temizliği, 800 ve 1200 mesh tanecik boyutuna sahip zımparalar kullanılarak 50 gram kuvveti geçmeyecek şekilde yüzey düzeltmesi yapılır. Şekil 4.20’de borür tabakaları gösterilmiştir. Bazı durumlarda; Şekil 4.20’a) 2h numunesi üzerinde en üst tabakada 10 μm FeB fazı tamamen aşındırılabilir.. Şekil 4. 21’de çelik numune ve Ekabor-2 ile 2h ve 4h numuneleri için kütle kayıpları tek bir grafik üzerinde gösterilmiştir. Bu grafikte verilen çelik metali yüzeyi homojenlik gösterirken, B2h ve B4h değerleri mesafeye göre değişkenlik göstermektedir. B4h aşınma değeri 400-600 metre arasında artış gösterirken, B2h aşınma değeri azalmaktadır. Çizelge 4.2 de verilen aşınma değerlerine bakıldığında aşınma testi FeB tabakası üzerinde yapıldığını söylemek mümkündür. Özgül aşınma değerleri karşılaştırıldığında aynı mesafede ısıtıl işlem uygulanmayan hedef metale göre yaklaşık 1/ 25 kadar az aşınmıştır. Referans metalimiz(borlanmamış çelik) 25 kat daha fazla aşınmıştır. Şekil 4.22’de Ekabor-2 ile 2h, 4h, 6h ve 8h numuneleri için dört farklı sürelerdeki kayıplar aynı skala da gösterilmiştir.



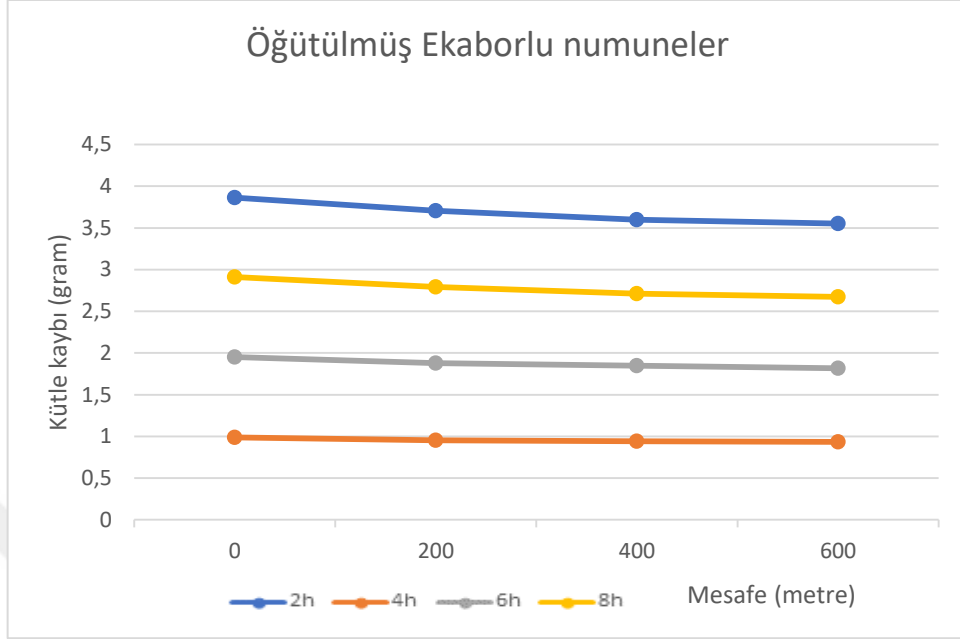
Şekil 4.20. Ekabor 2 ile 950 $^{\circ}\text{C}$ de kaplanmış çelik yüzeyinde oluşan demir borür fazları (a) 2h ve (b) 4h



Şekil 4.21. Mesafeye bağlı kütle kayıpları (AISI 1018 hedef metali, Ekabor2, 2h ve 4h)

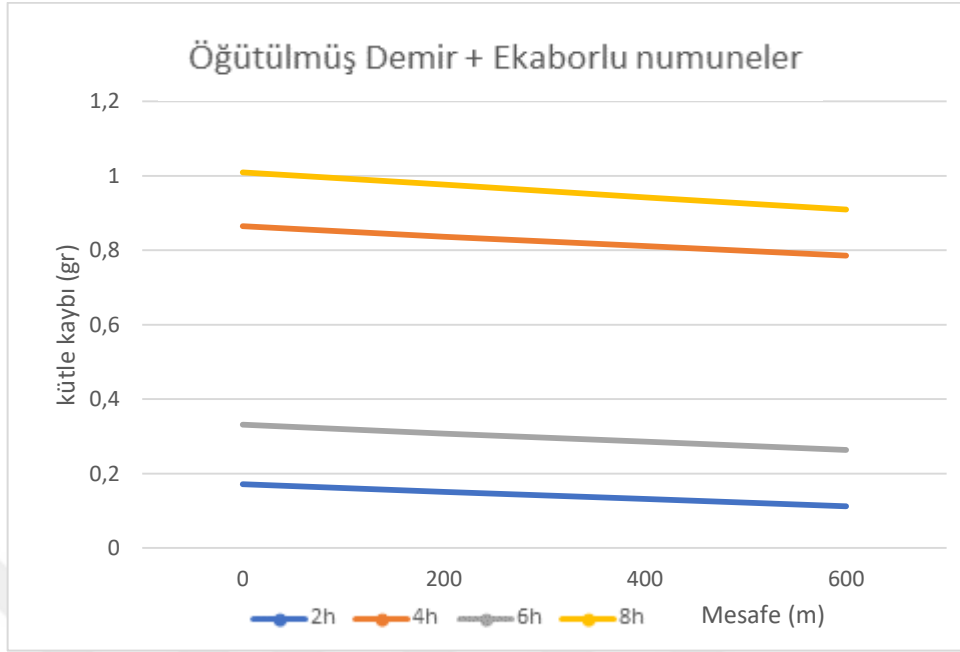


Şekil 4.22. Ekabor 2 Ortamında borlanmış hedef metallerin numunelerine mesafeye bağlı kütle kaybı(g/m)



Şekil 4.23. Öğütülmüş Ekabor 2 ile kutu borlama yapılmış hedef metallerin kütle kaybı eğrileri

Öğütülmüş Demir-Ekabor 2 ortamında borlanan hedef metaller için ortalama özgül aşınma değerleri hesaplanmış ve W_s (MFeB 2h) = $45.36 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Diğer üç borlama numuneleri için hesaplanan özgül aşınma değerleri küçük olup, sadece Ekabor-2 tozlarıyla elde ettiğimiz borlanmış yüzey üzerinden alınan değerlere yakın olması sebebiyle çelik yüzeylerinden uygulanan aşınma testleri FeB fazından alınması kuvvetle muhtemeldir. Öğütülmüş Demir-Ekabor-2 tozlarından farklı sürelerde borlama işleminde oluşturulan borür tabakalar için ortalama özgül aşınma değeri hesap edilmiş ve sonuç olarak W_s (MFeB) = $19 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer referans A1018 çelikten elde edilen değer yaklaşık 1/6'ı kadar olup, yüzey aşınma direncinin 6 katı kadar arttığı sonucu elde edilir. Elde ettiğimiz sonuçlar, literatürde verilen sonuçlarla uyumludur (Bayça & Şahin, 2004; Şahin & Meriç, 2002; Hunger & True, 1994). Dökme demir ve borlanmış dökme demirden elde edilen SEM görüntüleri değerlendirildiğinde; borlanmış numunelerin ekonomik ömürlerinin ortalama olarak 3 kat arttığı anlaşılmıştır.

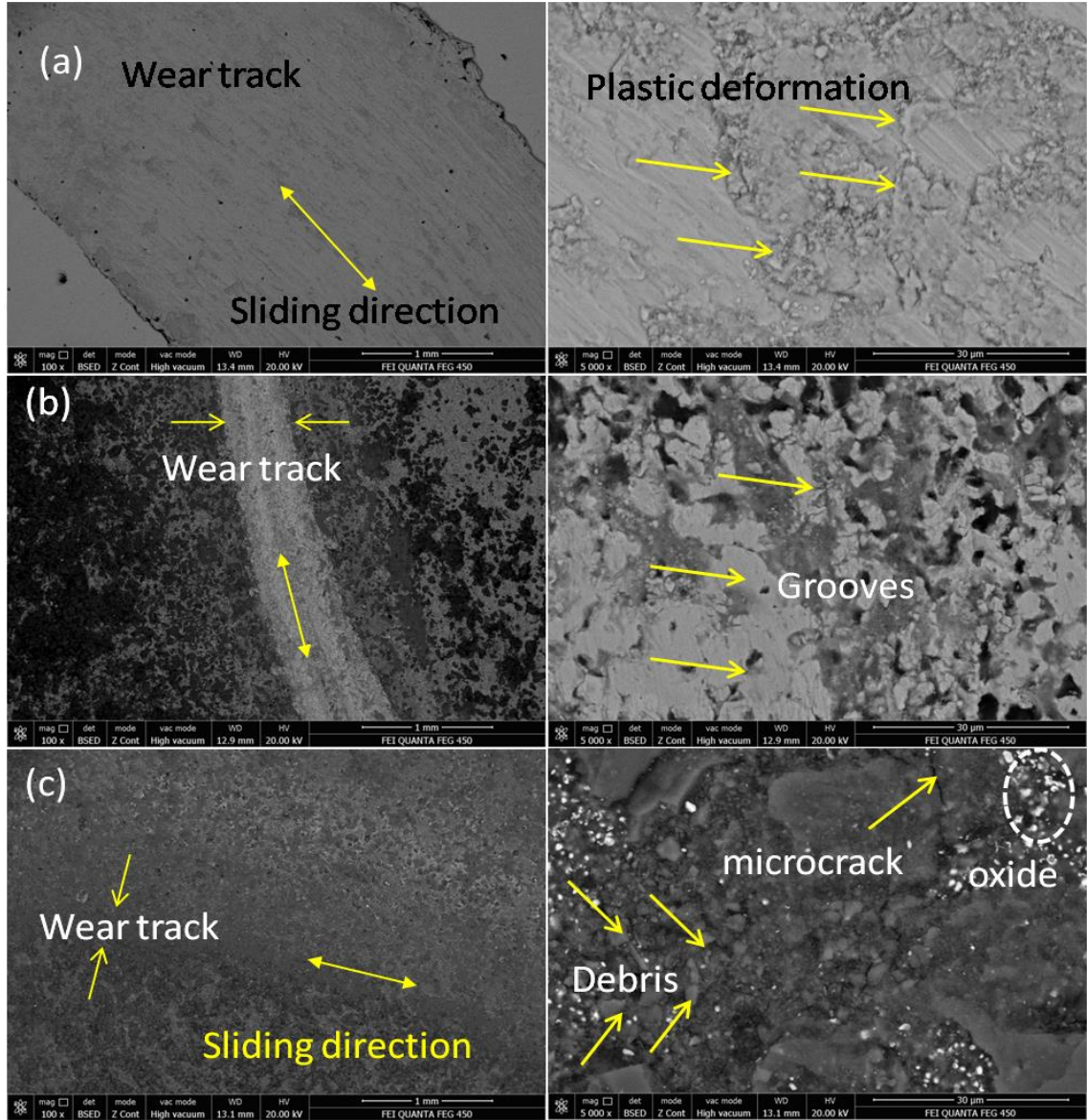


Şekil 4.24. Öğütülmüş Fe B tozları ile kutu borlama yapılmış hedef metallerin kütle kaybı eğrileri

Aşınma testleri yapılmış olan numunelerde, aşınma testine tabi tutulan yüzeylerde meydana gelen yapısal deformasyonları ve değişimleri daha detaylı analiz etmek için numuneler SEM altında incelenmiştir. Şekil 4.25 a'da ısıtılma işlemi görmemiş AISI A1018 çelik, 2h ve 4h süreleriyle borlanmış numunelere ait SEM görüntüleri görülmektedir. AISI A1018 çeliğe ait 100x, 5000x SEM resimleri incelendiğinde aşınma yönü ve çizgileri net bir şekilde görülmektedir. A1018 çelik numune yüzeyinde meydana gelen derin aşınma çizgileri ve geniş deformasyon alanı aşındırıcı yüzeye göre daha yumuşak bir yüzeye sahip olan A1018 çelik yüzeyinden kopmaların kolay olduğunun bir göstergesidir. Yüzeye uygulanan kuvvetle birlikte yumuşak olan yüzey yapısı önce sıkılaşmakta ve sonrasında ise kopmaya uğramaktadır.

5000x SEM görüntüsünde yüzeydeki kalıcı (plastik) deformasyon izleri net olarak görülmektedir. Bu görüntüde yüzeyde meydana gelen kütle kaybı sıvanmış bir yapıda görülmektedir. Analizler, 30N'luk sabit bir kuvvet altında mesafe ile orantılı olarak malzeme kaybının arttığını göstermektedir. Yukarıda kütle kaybı grafiklerindeki aşağı yönlü eğim bunu doğrulamaktadır. Bu yüzey kaplamaları, çelik malzemelerin, temaslı

hareketli ve hareketsiz kontak noktalarında parçaların kullanım ömürlerinin artırılmasında kullanılabilir.



Şekil 4.25. Bazı iş metallerinin yüzey izleri (a) AISI A1018 Çelik, (b) 2h Borlanmış, (c) 4h Borlanmış (100x and 5000x magnification) SEM görüntüleri

4.3. Korozyon Dayanımları

Korozyon dayanımlarını ölçmek için farklı borlanma süreleri ile oluşturduğumuz borür kaplı 12 farklı hedef metal ile ısıtıl işlem görmemiş AISI A1018 çeliği kullanıldı. Gömülen hedef metaller belirlenen tarihlerde topraktan çıkarılarak hafif bir ön temizliği yapıldıktan sonra ağırlık ölçümleri kayıt altına alındı 2. gün tekrar benzer ortama gömüldü. Bu işlem 7. ayın sonunda sonlandırıldı. Zamana bağlı olarak alınan kütle ağırlık değişimi Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Gömülen numunelerin koroziyon ağırlık değişimleri

Numune	05.06.20	07.09.20	03.11.20	09.01.21	Dm	Değişim	Ort. %
M FeB 2	5.6775	5.7023	5.7247	5.7738	96	1.7	1.95
M FeB 4	7.2085	7.2524	7.2843	7.3534	145	2.0	
M FeB 6	4.5439	4.6161	4.6250	4.6885	145	3.18	
M FeB 8	3.7138	3.7480	3.7794	3.7941	80	2.16	
M B 2	4.1498	4.1858	4.2089	4.2127	63	1.52	1.5
M B 4	4.3438	4.3657	4.4088	4.4137	70	1.6	
M B 6	3.7322	3.7632	3.7794	3.7835	51	1.37	
M B 8	3.9890	4.0206	4.0347	4.0520	63	1.59	
B 2	5.7706	5.8168	5.8527	5.8788	108	1.87	1.7
B 4	9.0371	9.0606	9.1231	9.1381	101	1.1	
B 6	4.1705	4.1900	4.2328	4.2505	80	1.9	
B 8	3.9037	3.9405	3.9648	3.9767	73	1.87	
A1018	3.2739	3.3177	3.3470	3.3527	79	2.4	2.4

Korozyon ölçümlerinin sonlandırıldığı 7. ayın sonunda yapmış olduğumuz son ölçümlerden sonra numunelerin ilk ve son ağırlıkları arasındaki farklar alınarak toprağa gömülmeden önceki ilk değere oranlandığında çıkan sonuç kütledeki değişim yüzdesini verir. Ölçümlerde en büyük fark öğütülmüş demir-Ekabor-2 tozu 6h numunesi üzerinde yapılan ölçümlerde çıkmıştır. Buradan alınan ölçümlerde değişim %3.18 olarak elde edilmiştir. Diğer ölçümlerden alınan sonuçların ortalama değişim yüzdeleri alındığında, çelik (A1018) numunesi üzerinden alınan sonuçtan (% 2.4) daha iyi bir korozyon direnci göstermektedirler. Öğütülmüş Demir-Ekaborlu kaplamalarda değer ortalaması %1.95 Öğütülmüş Ekaborlu numunelerde değişim % 1.5 ve Ekabor-2 ile elde edilen yüzeylerde değişim %1.7 hesaplanmıştır. Literatürde, borür tabakası ile kaplama yapılan demir-çelik

malzemelerin korozyon direncini % 25 kadar arttırdığını belirtmişlerdir, bu sonuç literatür sonuçları ile uyumludur (Campos-Silva ve ark. 2018).

$$\Delta m \text{ (mg)} = m_s - m_0 \quad (4-2)$$

$$\text{Değişim \%} = \Delta m / m_0 \quad (4-3)$$

Sonuçların bu şekilde çıkmasının bir sebebi, borür tabakası ile kaplanan numune kenarından alınan dilimin kesim yapılan yüzeyin borür tabakası ile kaplanmamış olmakla birlikte kesimden kaynaklanan yüzey pürüzlerinin de bulundurmaktadır. Bu yüzey korozyon tabakası oluşumunu hızlandırır. Şekil 4.26'da korozyon dayanımı ölçümlerinde kullanılan 13 farklı hedef metalinin ilk ve son durumları gösterilmiştir.

Korozyon dayanımı ölçümlerinde hedef metalinin yüzeyinin tamamı, borür tabaka ile kaplandığında, korozyon dayanımı, kaplama yapılmayan demir esaslı malzemelere göre %50'lere kadar iyileştirilebilir.

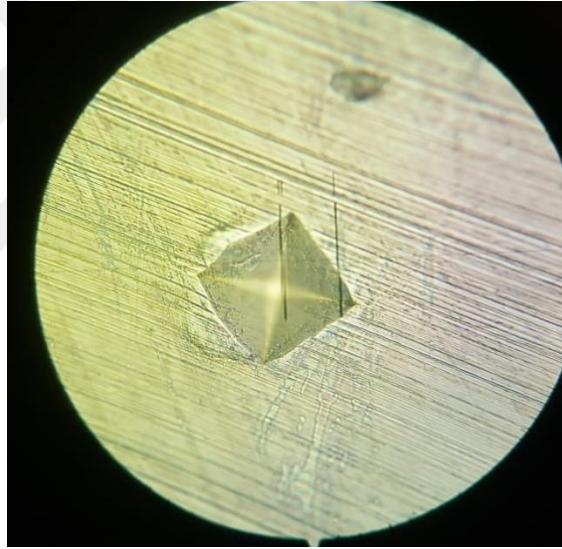


Şekil 4.26. Korozyon dayanımı ölçümlerinde kullanılan 13 farklı numunenin ilk ve son durumları gösteren resimler

4.4. Borlama Sonrası Elde Edilen Borür Tabakalarının Mikrosertlik Ölçümleri

Sertlik ölçümleri, numunelerin kesitleri üzerinden elde edildi. Bor kaplı tabaka ile kaplanmamış iç yüzeyin 10 farklı bölgesinden elde edilen sertlik değerlerinin ortalaması alındı. Ölçümlerden elde edilen değerler Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Isıl işlem görmeyen çelik numune üzerinden, 200 gr sabit yük altında alınan sertlik ortalama değeri HV 210 olarak tespit ettik. Çelik numune yüzeyinde oluşan plastik deformasyon yüzeyinden diyagonal köşelerden alınan ölçüm değerleri ile Eşitlik 3.2 kullanılarak HV değerleri hesaplandı. Metal yüzeyinde oluşturulan deformasyon iz görüntüsü Şekil 4.27’de gösterilmiştir.

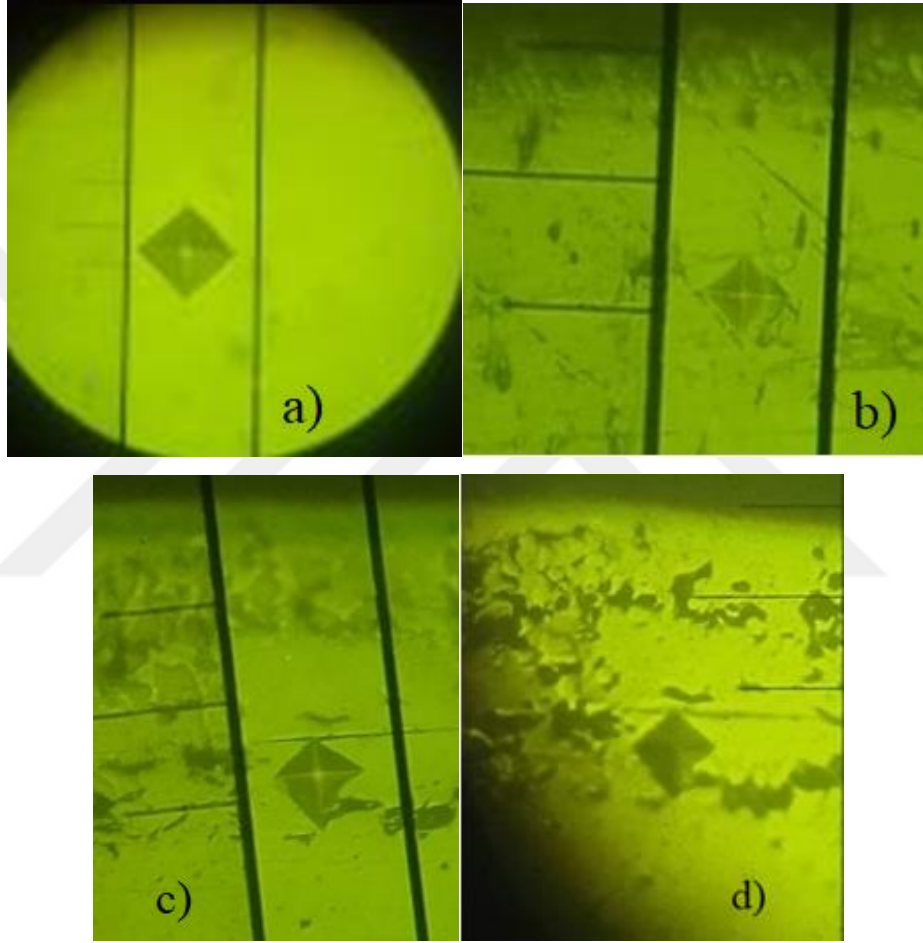


Şekil 4.27. Isıl işlem görmemiş A1018 çelik numune vickers çentici izi

Sadece Ekabor-2 ortamında 950 °C de ısıl işleme tabi tutulan numunelerin metal borür sertlik değerlerinin ölçümlerinde uygulanan kuvvet 200 gram olarak alınmıştır. Ölçme işlemi üst yüzeyden iç kısma doğru alınarak elde edilen sertlik değerleri, HV = 660, 640, 615, 595, 580, 575, 548 ve geçiş bölgesine yaklaştıkça 470, 460 ve 430 olarak ölçülmüştür. Bu değerler göre yüzey borür tabakasının ortalama HV = 560 olarak tespit edilmiştir. Hedef metalinin üst yüzeyden iç kısma doğru yaptığımız ekstra ölçümlerde 200 gram kuvvet ile aldığımız, HV değerleri 1080 (d=18.2 µm) ve 945 (d=19.8 µm)

olarak elde edildi. Bu değerler yüksek sıcaklık sertlik lme cihazı ile elde 1000 HV değeri ile uyumludur. İş metali yüzeyinden alınan HV sertlik değerleri 100-130 arasında olup geçiş bölgesi altında HV 150 değeri de gözlemlenmiştir.

lm yapılan hedef metalinin iç kısmından ve dış yüzeyine yakın bölgeden elde edilen iz görüntüleri şekil 4. 28'te gösterilmiştir.



şekil 4.28. Ekabor 2 iş metali(2h) iz görüntüleri, a) elik yüzey HV=130, b) borür tabakası HV =1080, c) 4h Borür tabaka HV= 760 ve d) 6h borür tabaka HV= 415

Ekabor-2 ile 4h borlama sonucu elde edilen borür tabakası üzerinden yapılan ilave ölçümlerde üst yüzeyine yakın bölgelerde HV değeri olarak 795 ve 760 değerleri elde edilmiştir. Malzeme yüzeyi üzerinden borür tabaka kalınlığı ölçümünde 90 μ m değeri elde edilmiştir. Bu değerler, şekil 4.20 b'de verilen Fe_2B tabaka üzerinden EDAX

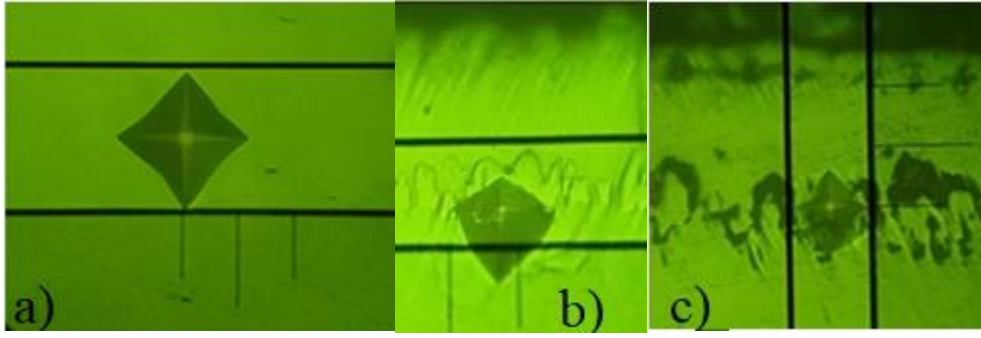
ölçümleri ile elde edilen borür tabaka kalınlığı ile uyumludur. Ekabor-2 borlayıcı ortamında 950 °C de 6h ve 8h sürelerinde ısıtılma tabii tutulan malzeme yüzeyinden ölçülen ortalama sertlik değerleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Farklı ortamlarda 950 0C de Farklı sürelerde ısıtılma tabii tutulan iş metalleri yüzeyinden HV sertlik değerleri

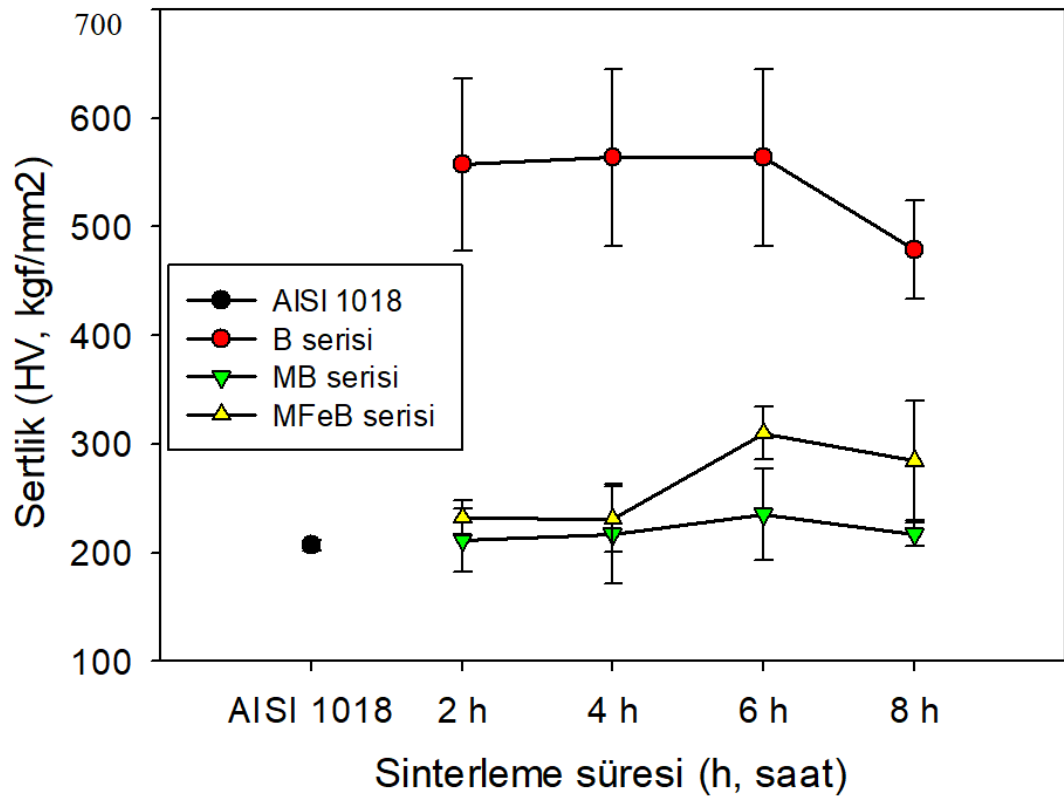
Uygulanan Kuvvet: 200 gr 1961 mN ile ölçülen sertlik değerleri.					
İş Metali iç kısım	2h	4h	6h	8h	
110	560	555	510	480	Ekabor 2
110	210	220	235	220	Öğütülüş Ekabor 2
110	230	230	310	285	Öğütülmüş Demir + Ekabor 2
	210				AISI A1018 yüzeyi

Öğütülmüş Ekabor-2 ve öğütülmüş Demir+Ekabor2 ortamında 950 °C’de farklı sürelerde ısıtılma tabii tutulan malzemelerin yüzeyinden alınan ortalama HV sertlik değerleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

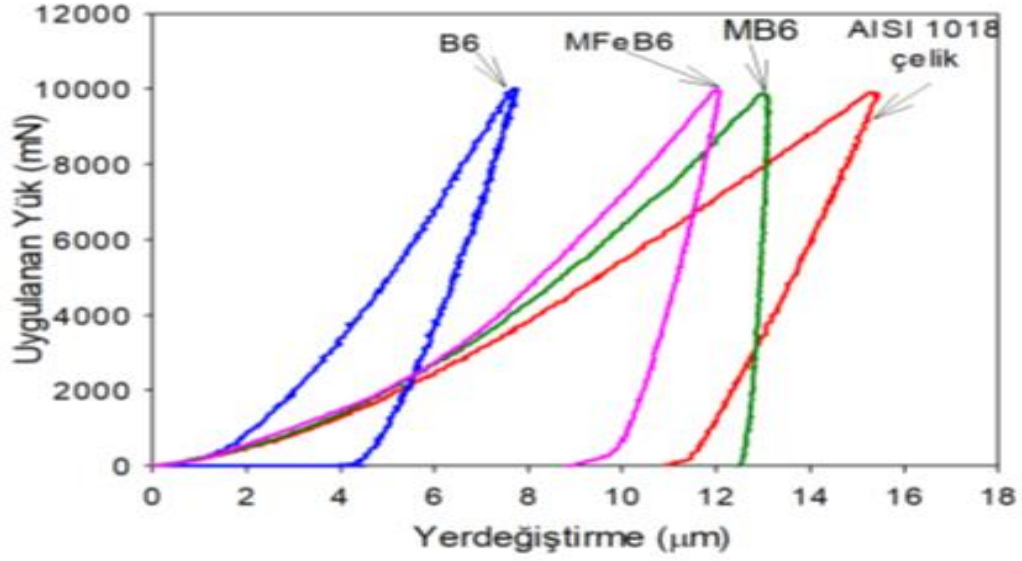
Öğütülmüş Ekabor-2 ile yapılan metal kaplamalarında, borür tabakasının 100 µm altından yapılan sertlik ölçümlerinde ortalama HV değeri 110 olarak tespit edildi. Bu değer iç kısımlara doğru HV = 100 değerinin altına inmiştir. Geçiş bölgesinde ise artarak (50 µm) HV=130 değerine ulaşmıştır. İş metalinin iç kısım ve borür tabakası yüzeyinden alınan Vickers iz görüntüsü ve sertlik değerleri Şekil 4. 29’da gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Öğütülmüş Ekaborlu yüzeylerin iz görüntüleri, a) Çelik yüzey HV=100, b) MB 2h HV = 200 ve c) MB 4h HV = 294



Şekil 4.30. Çelik numune, farklı ortam ve farklı borlanma sürelerinde elde edilen ortalama Vickers sertlik grafiği



Şekil 4.31. Yüksek sıcaklık micro sertlik ölçümleri ile alınan yükleme boşalma eğrileri

Yüksek sıcaklık mikro çentme cihazı ile oda sıcaklığında 1kg kuvvet altında yapılan sertlik ölçümleri 20 mm çaplarında olan iş metalleri üzerinde elde edilen borür tabakalarına ait sertlik değerleridir. Elde edilen değerler Çizelge 2.7’de liste halinde verilmiştir. Ticari Ekabor-2 borlama ortamında 950⁰C’de 2, 4, 6 ve 8 borlanma sürelerini belirtmektedir. Benzer şekilde MB bilyeli öğütme ile öğütülmüş Ekabor-2’yi. MFeB bilyeli öğütme ile öğütülmüş demir-Ekabor -2’yi ifade etmektedir.

Çizelge 4.7. Yüksek Sıcaklık Mikro çentme cihazı ile elde ettiğimiz yüzey sertlik değerleri ve Elastik Modülü değerleri

Numune	HV	Sertlik (GPa)	Std. Sapma	Elastik Mod. (GPa)	Std. Sapma
Çelik	260	2.6	0.11	41	1.9
B2	1030	10.3	0.60	120	12.9
B4	460	4.7	0.70	190	21.1
B6	180	1.8	0.20	240	33.5
B8	180	1.7	0.25	80	13.6
MB2	230	2.2	0.12	190	10.5
MB4	250	2.5	0.14	290	25.5
MB6	250	2.5	0.23	220	24.8
MB8	230	2.3	0.18	320	18.8
MFeB2	360	3.6	1.42	140	21.6
MFeB4	190	1.9	0.60	110	18.0
MFeB6	400	4.0	1.60	140	45.2
MFeB8	200	2.0	0.28	120	13.1

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada AISI 1018 çeliğinden dilimlenen iş metallerinin dış yüzeyinde kutu borlama yöntemi kullanılarak, 950 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerde, bor verici ortamda borlama işlemi gerçekleştirilerek, demir-borür alaşımı kaplaması gerçekleştirilmiştir. Ekabor-2 tozu üç farklı şekilde borlayıcı yöntem ile çelik yüzeyine tatbik edilmiştir.

- Birinci olarak, doğrudan Ekabor-2 tozu kullanılmıştır.
- İkinci olarak, Ekabor-2 tozu, bilyeli öğütme yapılarak kullanılmıştır.
- Son olarak da, Ekabor-2 tozu Fe tozu ile karıştırılıp bilyeli öğütme yapılmış ve elde edilen toz karışımı borlama işleminde kullanılmıştır.

Kaplama yapmak üzere başlangıçta bar tipli çubuklarından, 13 adet 20 mm çapında ve 13 adet 40 mm çaplarında toplam 26 adet iş metali hazırlandı. Bunların 12+12 toplam 24 adedi farklı borlama sürelerinde ve ortamında iki farklı büyüklükte iş metalleri yüzeyinde borür kaplaması gerçekleştirildi. Birer adet (20mm ve 40mm çaplarında) iş metali borlama işleminde kullanılan iş metalleri ile aynı aşındırma ve parlatma işlemine tabii tutulmuş. Aynı yüzey aşınma ve sertlik testlerine uygulanmıştır. Elde ettiğimiz sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

Mekanik sertlik testine tabii tuttuğumuz ısıtılmış işlem görmemiş AISI A1018 çelik iş metali’nin vickers sertlik değeri $HV = 210$ olarak tespit ettik, 950 °C de farklı sürelerde ısıtılmış işleme tabii tutulan hedef metali’nin iç kısım sertlik ortalama değerini yaklaşık $HV=100$ olarak tespit ettik. Bu sertlik değeri; merkezde daha düşük ve kaplama yapılan yüzeye doğru arttığını tespit ettik. Bu sonuç, 950 °C 2 saat ve üzerinde ısıtılmış işlem uygulanan demir esaslı çeliklerin yapısında yumuşama meydana gelerek sertlik değerinin %50 oranında düştüğünü tespit ettik.

Yüzey aşınma tetlerinden elde ettiğimiz sonuçlarda, ısıtılmış işlem görmemiş çelik numune için özgül aşınma miktarını $110 \cdot 10^{-5} \text{ (mm}^3/\text{N} \cdot \text{m)}$ elde ederken.

- Öğütülmüş demir -ekabor 2 (MFeB) ortamında elde edilen borür yüzeyinden hesaplanan özgül aşınma değeri ortalaması $20 \cdot 10^{-5} \text{ (mm}^3/\text{N} \cdot \text{m)}$

- Ögütülmüş Ekabor2 (MB) ortamında elde borür yüzeylerinde özgül aşınma değeri ortalaması $60 \cdot 10^{-5}$ ($\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) olarak tespit edilmiştir.
- Ekabor 2 ortamında(B) elde edilen borür tabakası yüzeylerden elde edilen özgül aşınma ortalama değeri $4 \cdot 10^{-5}$ ($\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$).
- Özellikle ekabor 2 ile elde edilen FeB tabakası aşınma tetlerinde yaklaşık 25 katı kadar bir iyileştirme göstermiştir.

Korrozyon dayanımı için yaptığımız test çalışmaları sonuçlarında ısıtıl işlem görmemiş numuneye göre borlanmış yüzeylerin korrozyon dayanımlarında yaklaşık %30 luk iyileştirme sonuçları elde edilmiştir. Ölçüm yaptığımız borlanmış numunelerin yüzey alanlarının yaklaşık 1/3 borlanmamış ve ısıtıl işlem görmüş çelik yüzey olmasına rağmen bu sonuç beklediğimiz değerin üzerindedir.

Yüksek sıcaklık sertlik ölçümlerinden elde edilen sonuçlarla ile mekanik olarak mikroskop altında gözlemllediğimiz borür tabakaları yüzeyinden elde ettiğimiz değerler bazı durumlarda tutarlı iken bazı durumlarda farklılıklar göstermektedir. Bunun sebebi; Mekanik olarak yapılan yüzey vickers sertlik ölçümlerinde uygulanan kuvvet 200 gram kuvvet ve kaplama tabakası üzerinden alınmıştır. Yüksek sıcaklık ölçümlerinde ise uygulanan kuvvet 1000 gram kuvvet (9805 mN) ve iş metalinin en dış tabakası üzerinden alınmıştır. Kaplama yapılan bu iş metallerinin dış yüzeyindeki alaşım tabakasını, XRD ve EDX analizleri sonucuna göre tespit ettik.

- Ekabor 2 ortamında, 950°C 2 saat süre ile borlama işlemi uygulanmış iş metalini yüzeyi üzerinden elde edilen vickers sertlik değeri; $\text{HV}=1030$ olarak ölçülürken, (bkz. Şekil 4.31) 1kg kuvvet altında ölçülen $\text{HV}=1080$ değeri ile mekanik olarak elde ettiğimiz $\text{HV}=1030$ değeri tutarlı olmakla birlikte bu değerin hedef metalin dış yüzeyinde oluşan FeB fazına ait olduğunu tespit ettik. Diğer taraftan Ekabor-2 ile 950°C de 2 saat borlama süresine tabii tutulan hedef metalinin dış yüzeyinde oluşan borür tabakasının kesit yüzeyi(yanal) üzerinden alınan ortalama sertlik değeri, mekanik ölçüm ile $\text{HV}=560$ olarak tespit etik ve bu sertlik değerinin Fe_2B tabakasına ait olduğu kanaatine ulaştık. Bu sonuç ısıtıl işlem görmeyen iş metalini sonucu ile ($\text{HV}=210$) karşılaştırdığımızda %270 lük bir iyileştirme sağlağı tespit edilmiştir. Mekanik ölçümlerde B2h ortamında borlanmış hedef metalin HV

sertlik değerini 560 olarak tespit etmiştik. Sonradan yaptığımız ölçümlerde hedef metal yüzeyinin dış tabakasında oluşan ikinci tabaka üzerinden HV değeri olarak, Şekil 4.28.b. ve Şekil 4.28.c. izleri üzerinden $HV = 1080$ ve $HV = 760$ değerleri ölçülmüştür.

- Elde ettiğimiz borür tabakalarının oluşumu ve borlanma süresinin en iyi değerleri 6 saat lik borlanma süresi ile elde edilmiştir. (Bkz. Şekil 4.29. ve Şekil 4.30.) bu değerlerin bire-bir örtüştüğünü göstermektedir.
- Mekanik alaşımlama ve Kutu borlama yöntemiyle yüksek dayanımlı yüzeyleri yeterli kalınlıkta elde ettik. Bu elde edilen tabakalar mastır yüzeyinden başlayarak önce Fe_2B tabakası ve bu tabaka yüzeyindeüzeinde FeB tabakasını elde ettik. Bizim amacımız olan Fe_2B tabakası kalınlığı farklı borlanma sürelerinde; 75-100 μm arasında değerleri elde edilmiştir.
- Bu kaplama tabakaların dışında yüzeyde tespit ettiğimiz oluşumlar şunlardır:
- Fe_3B , Fe_3O_2 , CFe_3 , Fe_3Si , Si_2O

950 $^{\circ}C$ borlanma ortamında inert gaz uygulanmadığı durumlarda bu tür oluşumların ortaya çıkması muhtemeldir ve farklı yıllarda bu yapılara benzer oluşumlar gözleendiği literatür yayınlarında belirtilmiştir.

Yapılan bu çalışmada borlayıcı olarak kullanılan Ekabor 2 yerine Çizelge 2.4.’de verilen borlayıcılardan;

- % 100 B_4C
- %95-97 B amorf bor
- %95 amorf bor, %5 KBF_4

Kullanılması durumunda, öğütölmüş EKABOR2 ve öğütölmüş demir-bor tozu karışımında numune dış yüzeyinde karşımıza (Fe_3B , Fe_3O_2 , CFe_3 , Fe_3Si , Si_2O) yan ürün olarak çıkan bu alaşım tabakaları gözlenmeyecek ve daha kaliteli bir demir borür alaşımlarını elde edilebilir.

Yine borlama yöntemlerinde bahsedilen “Plazma Spreyleme Yöntemi” şu ana kadar en güvenilir ve saf metal borür alaşımı elde edilmesinin yanında istenilen tabaka kalınlığında kaplama yapılmasına olanak sağlamaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Annavaarapu, R., K., Kim, S., Wang, M., Hart, A., J., Sojoudi, H., 2019. Explaining Evaporation-Triggered Wetting Transition Using Local Force Balance Model and Contact Line-Fraction. Sci. Rep. DOI:10.1038/s41598-018-37093-6 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37093-6>
- Badini, C., Mazza, D., 1988. The Texture of Borided Layers Grown of Fe-Ni and Fe-Cr Alloy. J. Mater. Sci. Let., 7, 661-662.
- Balusamy, T., Sankara Narayanan, T.S.N., Ravichandran, K., Song, I., P.,, Ho, L., M., 2013. Effect of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on pack boronizing of AISI304 stainless steel, Surf. Coat. Technol. 232 60–67.
- Bayça, S.,U., ve Şahin, S., 2004. “Borlama”, Mühendis ve Makine, 533
- Baudis, U., Fichte, R., 1995. Boron and Boron Alloys. Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry. Vol A4, 281-293
- Bhushan, B., 1998. Handbook of Micro/nanotribology. CRC Press, 2nd ed., 859 p, Florida, USA.
- Bhushan, B., Gupta, B., K., 1991. Handbook of Tribology: Materials, Coatings, and Surface Treatments; Krieger Pub. Co.: Malabar, FL, USA
- Bozkurt, N., 1984. Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bulloch, J., Callagy, A., 1999. An in situ wear-corrosion study on a series of protective coatings in large induced draft fans. Wear, 233, 284–292.
- Champagne, V., K., 2007. The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands,.
- Campos, I., Ramirez, G., Figueroa, U., Martinez, J. ve Morales, O. 2007. “Boriding of Nickel in a Fluidized Bed Reactor”, Applied SurfaceScience, 253:3469-3475
- Campos-Silva, I., Ortiz-Dominguez, M., Lopez-Perrusquia, N., Meneses-Amador A., Escobar-Galindo, R., Martinez-Trinidad, J., 2010. Characterization of AISI 4140 borided steels, Appl. Surf. Sci. 256 2372–2379.
- Campos-Silva, I., Palomar-Pardave, M., Pasten-Borja, R., P., Kahvecioğlu, O., F., Bravo-Barcenas, D., Lopez-Garcia, C., Reyes-Helguera, R., 2018. Tribo corrosion and

cytotoxicity of FeB- Fe₂B layers on AISI 316 L Steel. Surface&CoatingTechnology. 349 986-997

Çevik, D., 2017. Sanayi Devrimlerinin Süreci ve 4. Sanayi Devrimi:
<https://www.alomaliye.com/2017/05/29/sanayi-devrimlerinin-sureci-4-sanayi-devrimi/>
(30.11.2022 son erişim)

Darmanin, T., Taffin de Givenchy, E., Amigoni, S., Guittard, F., 2010. Hydro carbon versus fluoro carbon in the electro deposition of süper hydrophobic polymer films. Langmuir 26, 17596–17602.

De Damborenea, J., Navas, C., García, J., Arenas, M., Conde, A. 2007. Corrosion–erosion of TiN-PVD coatings in collagen and cellulose meat casing. Surf. Coat. Technol., 201, 5751–5757.

Delai, O., Cui, X., Shiqiang, L., 2021. Growth kinetics of the FeB/Fe₂B boride layer on the surface of 4Cr5MoSiV1 steel: experiments and modelling. Journal of Material and Technology; 11: 1272-1280

Ders notları 1. Erizalp, S., 2022. Difüzyonda aktivasyon enerjileri.
<http://simgeirizalp.cbu.edu.tr/mlzblmB/bolum5.pdf>

Ders notları 2. Çetin, S., 2022. Difüzyon, Fick yasaları.
<https://slideplayer.biz.tr/slide/13380801/>

Dickerson, J., H., Boccaccini, A., R., 2011. Electrophoretic Deposition of Nanomaterials; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany

DIN 50320 Standard, 1979. Wear; Terms. Systematic Analysis of WearProcess. Classification of WearPhenomena, DIN Standard, GERMANY.

Ediz, N., Seyfettinoğlu, M., A., Özdağ, H., 1997. Kil Minerallerinin Tügsaş-Kütahya Azot Fabrikası Baca Gazlarının Filtrasyonunda Kullanımın Araştırılması, 8. ulusal Kil Sempozyumu, Dumlupınar Ü., Ed. Işık, Kütahya, 315-325.

Erarslan R., , Öztürk, U., , Yılmaz, F. 2023. Coating of AISI 1018 steel with the pack-boriding method. Journal of New Results in Science 12(1) 14-21

Ekmekçiler, E., Polat, A., Usta, M., 2008. Hard boride coating on iron aluminide (FeAl), Surf.Coat.Technol. 202 6011-6015.

Erdoğan A., 2019. Investigation of high temperature dry sliding behavior of borided H13 hot work tool steel with nanoboron powder. Surf. Coat. Technol. 357 (2019) 886-895.

Ergen, S., 2014. Hızlı katılaştırılmış şekil hafızalı Cu-Al-Be alaşımlarının üretimi ve karakterizasyonu. (Doktora Tezi), Gaziosmanpaşa Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.

Fashu, S., Mudzingwa, L., Khan, R., Tozvireva, M., 2018. Electrodeposition of high corrosion resistant Ni-Sn-P alloy coatings from an ionic liquid based on choline chloride. Trans. IMF 96, 20–26.

Flynn G.L., Yalkowsky S.H. ve Rosemani T.J., 1974. "Mass Transport Phenomena and Models: Theoretical Concepts", Journal of Pharmaceutical Sciences, 63:479-510

Foster, R., F., Rebenne, H., E., Le-Blanc, R., E., White, C.L.; Arora, R. 1994. Rotating Susceptor Semiconductor Wafer Processing Cluster Tool Module Useful for Tungsten CVD. U.S. Patent 5,370,739.

Fotovvati, B., Wayne, S., F., Lewis, G., Asadi, E., 2018. A Review on Melt-Pool Characteristics in Laser Welding of Metals. Adv. Mater. Sci. Eng. 2018, 2018, 4920718.

Fotovvati, B., Namdari, N., Dehghanghadikolaei, A., 2019. Review On Coating Techniques for Surface Protection, J. Manuf. Mater. Process. 2019, 3, 28

Genel, K., 2006. Boriding kinetics of H13 steel, Vacuum 80 (2006) 451–457.

Gök, M., S., Küçük, Y., Erdoğan, A., Öge, M., Kanca, E., Günen, A., 2017. Dry sliding wear behavior of borided hot-work tool steel at elevated temperatures. Surf. Coat. Technol. 328 54-62.

Güneş, I., Kayali, Y., 2014. Investigation of mechanical properties of borided Nickel 201 alloy. Materials and Design, 53 577-580.

Hamamcı, M., Cerit, A., Alper., Nair, F., 2022. Effect of sintering parameters on the microstructure and Micromechanical properties of in-situ synthesized boride phases(Fe_2B - FeB) in iron matrix composites reinforced with B_4C particals. Material Characterization 191, 112075

Hunger, H., True, G., 1994. Boronizing to Produce Wear-resistant Surface Layers. Heat Treatment of Metals, 2, 31-39.

Kistler, R., B., Helvacı, C., 1994. Boron and Borates. Industrial Minerals and Rocks, 6.Edition, Society of Mining, Metallurgy and Exploration Inc., 171-186.

Knuuttila, J., Ahmaniemi, S., Mäntylä, T., 1999. Wet abrasion and slurry erosion resistance of thermally sprayed oxide coatings. Wear, 232, 207–212.

- Kulka, M., Makuch, N., Pertek, A., 2013. Micro structure and properties of laser borided 41Cr4steel, *Opt. Laser Technol.* 45 308–318.
- Kyeremateng, N., A., Brousse, T., Pech, D., 2017. Microsupercapacitors as miniaturized energy-storage components for on-chip electronics. *Nat. Nanotechnol.* 2017, 12, 7.
- Li, C., J., Wang, H., T., Zhang, Q., Yang, G., J., Li, W., Y., Liao, H., 2010. Influence of spray materials and their surface oxidation on the critical velocity in cold spraying. *J. Therm. Spray Technol.* 19, 95–101.
- Li, L., H., Narayanan, T., S., Kim, Y., K., Kong, Y., M., Park, I., S., Bae, T., S., Lee, M., H., 2014. Deposition of microarc oxidation–polycaprolactone duplex coating to improve the corrosion resistance of magnesium for biodegradable implants. *Thin Solid Film.*, 562, 561–567.
- Li, X., D., Bhushan, B., 2002. A review of nanoindentation continuous stiffness measurement technique and its application. *Material Characterization*, 48(1), 11-36.
- Lugscheider, E., Jokiel, P., 1993., *Plasmaspritzen- Verfahren, Anwendungen, Entwicklungen*, Metall Heft 3, 230-235,
- Poletti, M., G., Battezzati, L., 2013. Assessment of the ternary Fe–Si–B phase diagram. *CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry* 43 40–47
- Mathew, M., Ariza, E., Rocha, L., Fernandes, A.C., Vaz, F., 2008. TiCxOy thin films for decorative applications: Tribo corrosion mechanisms and synergism. *Tribol. Int.* 41, 603–615.
- Matuschka A., G., 1980. *Boronizing*. Carl Hanser Verlag, 100s, München
- Meriç, C., Sahin, S., Backir, B., Koksall, N., S., 2006. Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behavior in cast irons. *Materials and Design* 27 751–757.
- Moridi, A., Hassani-Gangaraj, S., M., Guagliano, M., Dao, M., 2014. Cold spray coating: Review of material systems and future perspectives. *Surf. Eng.*, 30, 369–395.
- Nemani, S., K., Sojoudi, H., 2018. Barrier Performance of CVD Graphene Films Using a Facile P3HT Thin Film Optical Transmission Test. *J. Nanomater.*, 9681432.
- Özdemir, O., Omar, M., A., Usta, M., Zeytin, S., Bindal, C., Ucisik, A., H., 2009. An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel, *Vacuum* 83 175–179
- Pharr, G. M., Oliver, W.C. ve Brotzen, F.R., 1992. On the generality of the relationship among contact stiffness, contact area and elastic modulus during indentation. *J. Mater. Res.*, 7(3), 61617.

Poletti, M., G., Battezzati, L., 2013. Assessment of the ternary Fe–Si–B phase diagram. CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry 43 40–47

Prengel, H., Pfouts, W., Santhanam, A. 1998. State of the art in hard coatings for carbide cutting tools. Surf. Coat. Technol. 102, 183–190.

Sahin, S., Meric, C., Saritas, S., 2010. Production of ferro boron powders by solid boronizing method. Advanced Powder Technology 21 483–487.

Sneddon, I. N., 1965. The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile. Int. J. Eng. Sci., 3, 47-56.

Sojoudi, H., Kim, S., Zhao, H., Annavarapu, R., K., Mariappan, D., Hart, A., J., McKinley, G., H. Gleason, K., K., 2017. Stable Wettability Control of Nanoporous Microstructures by CVD Coating of Carbon Nanotubes. ACS Appl. Mater. Interfaces, 9, 43287–43299.

Suryanarayana, C., 2001. Mechanical alloying and milling, Prog. Mater. Sci. 46 1-184.

Şahin, S., Meriç C., 2002. Investigation of the effect of Boronizing on Cast Irons, Materials Research Bulletin 37, pp. 971-979,

Şen, Ş., 1998. Termokimyasal Borlama İşlemi ile AISI 5140, AISI 4140 ve AISI 4340 Çeliklerinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi.

Şen, U., Şen, S., Köksal, S., ve Yılmaz, F., 2005. “Fracture Toughness of Borides Formed On Boronized Ductile Iron”, Materials and Design, 26:175-179

Thelning, K.E., 1975. “Steel and its Heat Treatment: Bofors Handbook”, Butterworths

TMMOB Bor Raporu, 2003. TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 2003. Bor Raporu, Metalurji Dergisi, 134, 11-72

Tombal, T., D., Şafak, G., Ö., Ünver, İ., K., Osmanlıoğlu, A., E., 2016. “Bor bileşiklerinin özellikleri, üretimi, kullanımı ve nükleer reaktör teknolojisinde önemi “ BORON 1 (2), 86 – 95

Uluköy, A., & Can, A., Ç., 2006. “Çeliklerin Borlanması”, Journal of Engineering Sciences 2006 12 (2) 189-198

URL-1 <http://tr.weldsteelpipe.com/steel-pipe/seamless-steel-pipe/aisi-1018-low-carbon-steel-tube.html> (12.12.2022)

Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Ozdemir, O., ve Bindal C., 2007. “Evaluation Of Borides Formed On AISI P 20 Steel”, Materials & Design, 28:55-61

Usta, M., 2005. The characterization of borided pure niobium. Surf. Coat. Technol. 194 251-255.

Usta, M., Ozbek, I., Ipek, M., Bindal, C., Ucisik, A., H., 2005. The characterization of borided pure tungsten. Surf. Coat. Technol. 194 330-334.

Üstel, F. 1995. Plazma Sprey Kaplama Teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri, İstanbul, 1995

Yang, Haopeng., Wu, Xiaochun., Cao, Guanghui., Yang, Zhe., 2016. Enhanced boronizing kinetics and high temperature wear resistance of H13 steel with boriding treatment assisted by air blasts hot peening, Surf.Coat.Technol. 307 506–516.

Yüksel, M., Can, A., Ç., Özmen, Y., 1995. X210Cr12 (1.2080) Takım Çeliğinin Tuz Banyosunda Borlanması, Tr. J. of Engineering and Environmental Sciences, V. 19, s. 97-101.

Zhang, L., Sun, H., Yu, J., Yang, H., Song, F., Huang, C., 2018. Application of electrophoretic deposition to occluded dentinal tubules in vitro. J. Dent., 71, 43–48.

Zhou, H., H., Liao, Z., W., Fang, C., X., Li, H., X., Bin, F., Song, X., Cao, G., F., Kuang, Y., F., 2018. Pulse electroplating of Ni-WP coating and its anti-corrosion performance. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 28, 88–95.

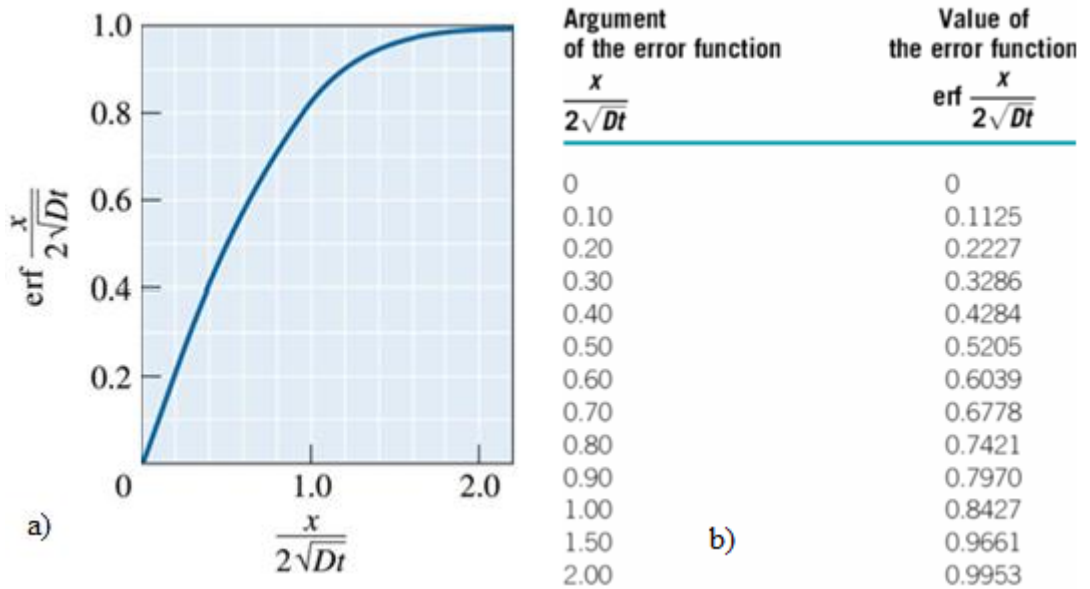
7. EKLER

Solute	Solvent	D_0 (m ² /s)	Q (kJ/mol)	Q (kcal/mol)
Carbon	Fcc iron	20×10^{-6}	142	34.0
Carbon	Bcc iron	220×10^{-6}	122	29.3
Iron	Fcc iron	22×10^{-6}	268	64.0
Iron	Bcc iron	200×10^{-6}	240	57.5
Nickel	Fcc iron	77×10^{-6}	280	67.0
Manganese	Fcc iron	35×10^{-6}	282	67.5
Zinc	Copper	34×10^{-6}	191	45.6
Copper	Aluminum	15×10^{-6}	126	30.2
Copper	Copper	20×10^{-6}	197	47.1
Silver	Silver	40×10^{-6}	184	44.1
Carbon	Hcp titanium	511×10^{-6}	182	43.5

Source: Data from L. H. Van Vlack, *Elements of Materials Science and Engineering*, 4th Ed., Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, MA, 1980.

^aSee Equation 5.13.

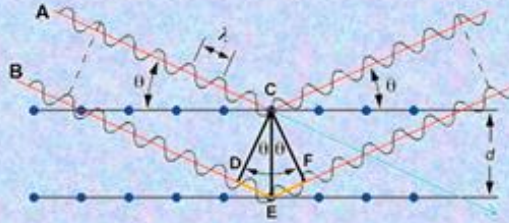
Ek 1. Bazı metallerde yayılım sabiti ve aktivasyon enerjisi (Ders notları 1)



Ek 2. a) Erf hata fonksiyonunun değişimi, b) Erf hata fonksiyonunun difüzyon parametresine göre hesaplanan değerleri verilmiştir

Bragg Denklemi

- DE mesafesi EF ile aynıdır böylece toplam yol farkı:



$$EF = d \sin \theta$$

$$DE = d \sin \theta$$

$$DE + EF = 2d \sin \theta$$

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

- Yol farkı dalga boyunun tam katları şeklinde olduğunda yapıcı bir girişim meydana gelir. Buna **Bragg Kırınım Yasası** denir.

Ek 3. Bragg denklemi ve Brag Kırınım Yasası

8. ÖZGEÇMİŞ

